

Entwicklung eines neuen Ansatzes zur Bestimmung der Wiederverwendungs-grenzwerte von elektromechanischen Lenksystemen

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktoringenieurin / Doktoringenieur
(Dr.-Ing.)**

Von M.Sc. René Klügel

Geb. am 03.03.1988 in Berlin

Genehmigt durch die Fakultät für Maschinenbau
der Otto- von- Guericke- Universität Magdeburg

Gutachter/innen:

Prof. Dr.-Ing. habil Thorsten Halle

Prof. Dr.-Ing. habil. Dirk Bartel

Dr.-Ing. Jörg Detzel

Promotionskolloquium am 07.03.2024



Kurzfassung

Die Wiederverwendungsgrenzwerte spielen eine essentielle Rolle in der Entwicklung von Aufarbeitungskonzepten. Ihre Definition unterliegt bei Lenksystemen hohen Anforderungen an die Qualität und Zuverlässigkeit, was zu einem Zielkonflikt mit den Aufarbeitungskosten und der Wiederverwendungsquote führt. Das Verständnis der auftretenden Beanspruchungen im Feldeinsatz und der Beanspruchbarkeitsgrenzen sind erforderliche Grundlagen für die Einordnung der konsumierten Lebensdauer zurückgeführter Altteile. Eine Herausforderung bei wartungsfreien Systemen, wie es Lenksysteme sind, ist die unzureichende Datengrundlage in Bezug auf die Nutzungsintensität und die auftretenden Betriebsausfälle.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung eines neuen Ansatzes zur Bestimmung der Wiederverwendungsgrenzwerte für die Aufarbeitung von sicherheitsrelevanten elektromechanischen Lenksystemen. Im Fokus steht die Modellierung dynamischer Grenzwerte, welche sowohl mögliche Lastreserven als auch die Systemnutzung in verschiedenen Phasen des Produktlebenszyklus und die Anforderungen an Zuverlässigkeit und Kosten berücksichtigen sollen. Inhaltlich basiert der entwickelte Ansatz auf drei Säulen. Die erste Säule besteht aus der Ermittlung der repräsentativen Feldbelastung mithilfe von systematisch erfassten Felddaten. Auf der Basis von definierten (Pseudo-) Schädigungsparametern erfolgt eine Auswertung der Nutzungsvariabilität und des Anwendungsspektrums, mit dem Ziel die kritischsten Kombinationen zu identifizieren. Methodisch wird dabei auf Korrelations- und Regressionsverfahren zurückgegriffen. Die Entwicklung von Schädigungsmodellen stellt die zweite Säule dar. Im Kern beruhen die Schädigungsmodelle auf einer Verknüpfung der (Pseudo-) Schädigungsparameter mit der realen Schädigung der als repräsentativ eingestuften Feldsysteme. Hierfür bildet eine umfangreiche Feldstudie die Basis. Die dritte Säule stellt die Wiederverwendungsentscheidung dar. In ihr werden die gewonnen Erkenntnisse in Bezug auf die Beanspruchbarkeit, Feldbeanspruchung und Schädigung zur Definition der Wiederverwendungsgrenzen verarbeitet und die konsumierte Lebensdauer des Altteils eingeordnet. Der Ansatz eignet sich für eine systematische Definition der Wiederverwendungsgrenzwerte, von der System- bis zur Komponentenebene. Darüber hinaus ist der Ansatz für eine beanspruchungsorientierte Lebensdauerabschätzung von Produkten, auch ohne das Vorhandensein von Ausfalldaten, anwendbar. Er eignet sich zudem zur Identifikation von Lastreserven und Kostenreduzierungspotentialen in der Entwicklung neuer Produkte.



Abstract

Reuse limits have an essential role in the development of remanufacturing concepts. Especially for steering gears their definition is subject to high requirements regarding quality and reliability. This leads to a conflict of objectives between remanufacturing costs and the reuse rate. It is necessary to have a deep understanding of potential stress that can occur during the field use and the stress limits to have a basis for classifying the consumed life of returned used parts. A challenge for maintenance-free systems, such as steering systems, is the insufficient data basis with regard to the intensity of use and the operational failures that occur.

The aim of the present thesis is the development of a new approach for the determination of reuse limits for the remanufacturing of safety-relevant electromechanical steering systems. The focus lays on the modeling of dynamic reuse limits which should take into account possible load reserves as well as the system utilization in different phases of the product life cycle and the requirements on reliability and costs. The content of the developed approach is based on three pillars. The first pillar consists of the determination of the representative field load with the help of systematically collected field data. Based on defined (pseudo) damage parameters, an evaluation of the variability of use and the spectrum of applications is carried out with the aim of identifying the most critical combinations. Methodically, correlation and regression procedures are used. The development of damage models represents the second pillar. The damage models are based on a linkage of the (pseudo) damage parameters with the real damage of the field systems which were classified as representative. A comprehensive field study generates the basis for this. The third pillar is the reuse decision. The knowledge gained in terms of stressability, field stress and damage is used to define the reuse limits and classify the consumed service life of returned used parts. The approach is suitable for a systematic definition of the reuse limits from the system to the component level. Furthermore, it is applicable for a stress-oriented life estimation of products, even without the existence of failure data. It is also suitable for identifying load reserves and cost reduction potentials in the development of new products.



Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Abkürzungen	VI
1. Einleitung	1
1.1 Herausforderungen in der Aufarbeitung von Lenksystemen	4
1.2 Aufbau der Arbeit	9
2. Grundlagen und Stand des Wissens.....	11
2.1 Begriffe, Definitionen und statistische Kenngrößen.....	11
2.2 Statistische Verteilungen	12
2.2.1 Normalverteilung.....	13
2.2.2 Lognormalverteilung	14
2.2.3 Weibullverteilung	14
2.3 Statistische Schätzung von Parametern	16
2.3.1 Maximum Likelihood Methode.....	16
2.3.2 Momenten Methode.....	16
2.3.3 Vertrauensbereiche	17
2.4 Grundlagen der Betriebsfestigkeit	18
2.5 Stand des Wissens in der Aufarbeitung	22
2.5.1 Grundlagen der Aufarbeitung.....	23
2.5.2 Ansätze, Methoden und Modelle in der Aufarbeitung	24
2.5.2.1 Abschätzung der Restlebensdauer.....	25
2.5.2.2 Ansätze zur Bestimmung der Wiederverwendungsstrategie.....	28
2.5.2.3 Ermittlung repräsentativer Lastannahmen	36
2.5.2.4 Bewertung der vorgestellten Ansätze, Modelle und Methoden	39
2.6 Zielsetzung der Arbeit	41
3. Entwicklung des neuen Ansatzes.....	43

3.1	Grundlagen der Wiederverwendungsentscheidung	43
3.2	Bausteine der Wiederverwendungsentscheidung	48
3.2.1	Abschätzung der Lebensdauer	50
3.2.1.1	Beanspruchbarkeitsgrenzen	53
3.2.1.2	Beanspruchungsverteilung	54
3.2.2	Abschätzung der Restlebensdauer	58
3.2.3	Wiederverwendungsgrenzwerte	61
3.2.3.1	Auf der Zuverlässigkeit basierende Wiederverwendungsgrenzwerte	62
3.2.3.2	Auf den Kosten basierende Wiederverwendungsgrenzwerte	70
4.	Feldbeanspruchung.....	73
4.1	Allgemeine Lastannahmen.....	73
4.1.1	Fahrzeugalter	73
4.1.2	Fahrleistung und Betriebszeit	76
4.2	Systematische Felddatenerfassung	78
4.2.1	Anwendungsspektrum und Nutzungsveränderbarkeit des Referenzsystems	79
4.2.2	Beanspruchungsparameter	86
4.2.2.1	Load Recording Software.....	87
4.2.2.2	Direkt verfügbare Parameter	91
4.2.2.3	Indirekt verfügbare Parameter.....	96
4.3	Identifikation relevanter Nutzungsprofile.....	102
4.3.1	Feldnutzung in Abhängigkeit des Fahrzeugalters	103
4.3.2	Einfluss der Durchschnittsgeschwindigkeit auf die Beanspruchung.....	107
4.3.3	Einfluss des Fahrzeugaufbaus auf die Beanspruchung.....	111
4.3.4	Einfluss der Fahrzeugumgebung auf die Beanspruchung	113
4.4	Übersicht über ausgewählte Feldsysteme	114
4.5	Schädigungsanalyse	119
4.5.1	Performance Analyse.....	119



4.5.1.1	Analyse auf Fahrzeugebene	120
4.5.1.2	Analyse auf Systemebene.....	121
4.5.1.3	Zusammenfassung der Ergebnisse auf der Systemebene	127
4.5.2	Detailanalyse mechanischer und elektronischer Komponenten	127
4.5.2.1	Getriebeispiel.....	127
4.5.2.2	Druckstückspiel.....	133
4.5.2.3	Sensor Offset.....	137
4.5.2.4	Leistung, Drehmomentwelligkeit und Rast/Reibmoment.....	139
4.5.3	Zusammenfassung und Übertragung der Schädigung in den Kontext der sFDE 141	
5	Wiederverwendungsentscheidung.....	144
5.1	Definition der Wiederverwendungsgrenzwerte	145
5.2	Einordnung der konsumierten Lebensdauer	147
6	Diskussion des Ansatzes	151
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	155
8	Literaturverzeichnis.....	157

Formelzeichen und Abkürzungen

Lateinische Buchstaben

Formelzeichen	Bedeutung
A_{Fz}	Fahrzeugalter
a	Anzahl der Varianten einer Systemplattform x
AB	Außer Betrieb gesetzte Einheiten
AF_{Fz}	Feldalter eines Fahrzeuges
B_x	Lebensdauer bei der $x\%$ aller Einheiten ausgefallen sind
b	Anzahl der Baugruppen eines Systems
b_v	Erprobungsumfang bezogen auf die Beanspruchung
BD_{Fz}	Datum der Analyse der Daten
C^A	Kosten der Aufarbeitung
C_M^A	Materialkosten der jeweiligen Aufarbeitungsoption
C_P^A	Produktionskosten der Aufarbeitungsoptionen
C_w	Gewährleistungskosten
c	Anzahl der Komponenten einer Baugruppe
D	Schädigungssumme
D_S	Druckstückspiel
D_{Ps}	Pseudoschädigung
d_i	Einzelschädigungen
DC	Damage Counter
EK	Exportierte Einheiten
F	Kraft
$F(t)$	Ausfallwahrscheinlichkeit
F_B	Beanspruchungsverteilung
$F_{B_{Feld}}$	Feldbeanspruchungsverteilung
F_F	Beanspruchbarkeitsverteilung
f	Frequenz
$f(t)$	Ausfallwahrscheinlichkeitsdichte
f_B	Beanspruchung
f_F	Beanspruchbarkeit
f_{RODT}	Zahnstangensummenkraft der Unterstützungscharakteristik
G_i	Lebensdauergrenzwert eines Pseudoschädigungsparameters
G_q	Schädigungsgrenzwert
GS_w	Grenzwert des Getriebespiels, ab dem eine Reklamation in der Gewährleistung akzeptiert wird
j	Betrachtungsstufe von der System- bis zur Komponentenebene
k	Steigungskoeffizient der Wöhlerlinie
L_K	Konsumierte Lebensdauer
L_K^R	Konsumierte Lebensdauer auf der Basis der Zuverlässigkeit
L_K^{ref}	Konsumierte Lebensdauer auf der Basis der Referenzparameter
L_K^{Fzg}	Konsumierte Fahrzeuglebensdauer
L_P	Gesamtlebensdauer
L_P^{Fzg}	Fahrzeuglebenserwartung

$L_P^{R^*}(x)$	Spezifizierte Lebensdauergrenze basierend auf der Zuverlässigkeit
$L_P^{r_{ref}^*}$	Spezifizierte Lebensdauergrenze basierend auf den Referenzparametern
L_{Reuse}	Reuse Limit – Grenzwert für eine direkte Wiederverwendung
L_{Reuse}^C	Kostenorientierter Wiederverwendungsgrenzwert für eine direkt Wiederverwendung
L_{Reuse}^R	Zuverlässigkeitsorientierter Wiederverwendungsgrenzwert für eine direkte Wiederverwendung
L_{Rework}	Rework Limit – Grenzwert für eine Wiederverwendung mit zusätzlicher Nacharbeit
L_{Rework}^C	Kostenorientierter Wiederverwendungsgrenzwert für eine Wiederverwendung mit zusätzlicher Nacharbeit
L_{Rework}^R	Zuverlässigkeitsorientierter Wiederverwendungsgrenzwert für eine Wiederverwendung mit zusätzlicher Nacharbeit
L_{RLD}	Restlebensdauer
L_{RLD}^R	Restlebensdauer auf der Basis der Referenzparameter
$L_{RLD}^{r_{ref}}$	Restlebensdauer auf der Basis der Referenzparameter
L_{RLD}^{Fzg}	Relative Fahrzeugrestlebensdauer
$L_{RLD_{rel}}$	Relative Fahrzeugrestlebensdauer
L_{WG}	Wiederverwendungsgrenzwerte
L_{WG}^C	Kostenorientierte Wiederverwendungsgrenzwerte
L_{WG}^R	Zuverlässigkeitsorientierte Wiederverwendungsgrenzwerte
l_p	Belastungsparameter einer Betrachtungseinheit
M	Mittelspannung
M_{Fahrer}	Handmoment des Fahrers
M_{Motor}	Motormoment der Servounterstützung
N	Feldpopulation
N	Wöhlerlinie
N_0	Grenzlastspielzahl
N_i	Ertragbare Anzahl an Lastzyklen einer Spannungsamplitude i
N_{pl}	Passive Feldpopulation
N_u	Aktive Feldpopulation
n	Stichprobenumfang (Statistik)
n_i	Lastzyklen einer Spannungsamplitude i
P_A	Vertrauensbereiche
P_A^*	Festgelegte zulässige Ausfallwahrscheinlichkeit zur Absicherung der spezifizierten Lebensdauer
P_f	Ausfallwahrscheinlichkeit aus der Überschneidung von Beanspruchung und Beanspruchbarkeit
PD_{Fz}	Fahrzeugproduktionsdatum
ϕ_{iSTW}	Lenkwinkel des Lenkrades bei der Druckstückspielmessung
ϕ_{iWRS}	Rotorlagewinkel
R	Spannungsverhältnis
$R(t)$	Zuverlässigkeit
R^*	Zuverlässigkeitsgrenze
R^2	Bestimmtheitsmaß
r_a	Referenzparameter Alter
r_{aNI}	Aktive Nutzungsphase I
r_m	Referenzparameter Laufleistung

r_{ref}	Den Spezifikationsrahmen aufspannende Referenzparameter
r_{ref}^*	Spezifikationsgrenze der Referenzparameter
r_{ref}^I	Nutzungszeitraum vor der Aufarbeitung
r_{ref}^{II}	Nutzungszeitraum nach der Aufarbeitung
r_t	Referenzparameter Betriebszeit
S_D	Dauerfestigkeitsbereich
s	Empirische Standardabweichung
s^2	Empirische Varianz
s_{log}	Empirische Standardabweichung einer zur Basis logarithmierten Stichprobe
s_q	Schädigungsparameter einer Betrachtungseinheit
$symmetry\ tor_{SW}$	Symmetrie der Eingangskennlinie
T	Statische Temperatur
T_0	Referenztemperatur
T_j	Temperaturniveau
t	Zeit
t_{eq}	Äquivalente Temperaturverweildauer
t_N	Nutzungszeitraum im Feld
t_p	Produktlebenszykluszeit
t_{pl}	Passive Lagerzeit eines Altteils
t_s	Sicherer Bereich
t_u	Unsicherer Bereich
t_w	Gewährleistungszeitraum
tor_{DIF}	Differenzmoment des Sensormoments und des Lenkmoments am Lenk- rad
tor_{MOT}	Motormoment
$tor_{MOT_{req}}$	Erforderliches Motorsollmoment
tor_{Sensor}	Sensormoment
tor_{SW}	Lenkmoment am Lenkrad
VK	Anzahl verkaufter Einheiten
W_i	Lenkwinkel eines Lastwechsels
W_{lr}	Lenkwinkel welcher über die Lenkzwischenwelle vorgegeben wird
x	Plattform
\bar{x}	Arithmetischer Mittelwert
\tilde{x}	Median
x_i	Beobachtungen einer Stichprobe
x_{jz}	Datensatz z der Plattform x für eine Betrachtungsklasse j
x_n	Vereinnahmtes System einer Feldpopulation N der Plattform x
$xYoke$	Druckstückspielverlauf
x_z	Datensatz z der Plattform x
ZC_w	Zero Crossing Peaks
ZD_{FZ}	Fahrzeugzulassungsdatum

Griechische Buchstaben

Formelzeichen	Bedeutung
α	Sicherheitsfaktor zur Einordnung von Feldbeanspruchung und Beanspruchbarkeit
α_i	Zulässige Überschreitungswahrscheinlichkeit
β_{FB}	Zentraler Sicherheitsfaktor
β_{VB}	Sicherheitsfaktor zur Einordnung von Erprobungsumfang und Beanspruchung
$\gamma(t_P)$	Wiederverwendungsfaktor in Abhängigkeit der Produktlebenszykluszeit
γ^c	Dynamischer Anteil des Wiederverwendungsfaktors
γ^{max}	Maximale relative Restlebensdaueranforderung
γ^{min}	Minimale relative Restlebensdaueranforderung
ε	Streuparameter einer Regression
λ	Ausfallrate
μ	Erwartungswert
μ_{BsFDE}	Erwartungswert der Beanspruchung unter Verwendung der sFDE
μ_{G_i}	Erwartungswert für eine Ersatzlebensdauer
σ	Standardabweichung
φ_{SW}	Lenkwinkel des Lenkrades

Abkürzungen:

Abkürzung	Bedeutung
ABV	Abbiegevorgänge
CCW	Counter Clock Wise/ Gegen den Uhrzeigersinn
CW	Clock Wise/ Uhrzeigersinn
DC	Damage Counter
DLW	Durchschnittlicher mittlerer Lastwechsel
dp	Dual-pinion/ Doppelritzeln
DS	Druckstückspiel
EBV	Endbevorratung
ECU	Electronic control unit/ Elektronisches Steuergerät
EDOP	End of delivery obligation period/ Ende der Versorgungsverpflichtung
EOLSESS	EOL Strategies Evaluation Support System
EOS	End of serial supply/ Ende der Serienproduktion
EPS	Electronic power steering/ Elektrolenkung
EPSapa	Achsparelle Elektrolenkung
EPSc	Lenksäulen Elektrolenkung
EPSdp	Dual- pinion- Elektrolenkung
EU	europäische Union
FS	Fahrschullenkung
IfF	Institut für Fahrzeugtechnik
ITWM	Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik
KGT	Kugelgewindetrieb
KGT-LC	Schadensakkumulation für Lenksysteme mit Kugelgewindetrieb
KNN	Künstliche neuronale Netze



LC	Load Counter/ Belastungszähler
LCV	Light Commercial Vehicle/ Leichte Nutzfahrzeuge
LDDM	Leerdurchdrehmoment
LUD	Lenkradumdrehungen
MTTF	Mean time to failure/ Mittlere Zeit bis zu einem Ausfall
NSV	Nachserienversorgung
OBD	On Board Diagnose
PKV	Parkiervorgänge
Pkw	Personenkraftfahrzeuge
PM	Profit Margin/ Gewinnspanne
RLD	Restlebensdauer
SCU	Steering control unit/ Steuereinheit des Lenksystems
sFDE	Systematisch erfasste Felddaten
SLC	Standard Load Counter/ Standard- Schadensakkumulation
SOP	Start of production/ Produktionsstart
SR	Schneckenradgetriebe
SR-LC	Schadensakkumulation für Lenksysteme mit Schneckenradgetriebe
SSM	State Space Model
SWV	Spurwechselfvorgänge
SUV	Sports Utility Vehicle
TK	Temperaturklassen
TTF	Time to failure/ Zeit bis zu einem Ausfall
TVD	Temperaturverweildauer
USA	United States of America/ Vereinigt Staaten von Amerika
WG	Wiederverwendungsgrenzwerte
ZBV	Zwischenbevorratung

1. Einleitung

Als Zuverlässigkeit wird die „Beschaffenheit einer Einheit bezüglich ihrer Eignung, während oder nach vorgegebenen Zeitspannen bei vorgegebenen Anwendungsbedingungen die Zuverlässigkeitsforderungen zu erfüllen.“ (DIN 40 041, Dez. 1990) bezeichnet [1].

Eine hohe Unfallsicherheit und Zuverlässigkeit automobiler Systeme spielen für den Konsumenten¹ eine wichtige Rolle [2]. Auch die Hersteller verspüren den Anreiz, die Sicherheit und Zuverlässigkeit ihrer Produkte sicherzustellen. Neben den gesetzlichen und normativen Anforderungen sind die Gewährleistungskosten und das Markenimage als wichtige Einflussfaktoren zu nennen. Insbesondere vor dem Hintergrund der zunehmenden Komplexität und Leistungsdichte heutiger Systeme ist ein frühzeitiges Zuverlässigkeitsmanagement sowohl für die Serienphase als auch für die Nachserienphase ein wichtiger Wettbewerbsfaktor.

Eine Ersatzteilversorgungspflicht von zehn bis fünfzehn Jahren nach dem Ende der Serienproduktion (EOS) ist in der Automobilindustrie gängige Praxis. Abbildung 1-1 veranschaulicht einen typischen Produktionszeitraum von automobilen Systemen. Dieser erstreckt sich vom Produktionsstart (SOP) bis zum Ersatzteilversorgungsende (EDOP).

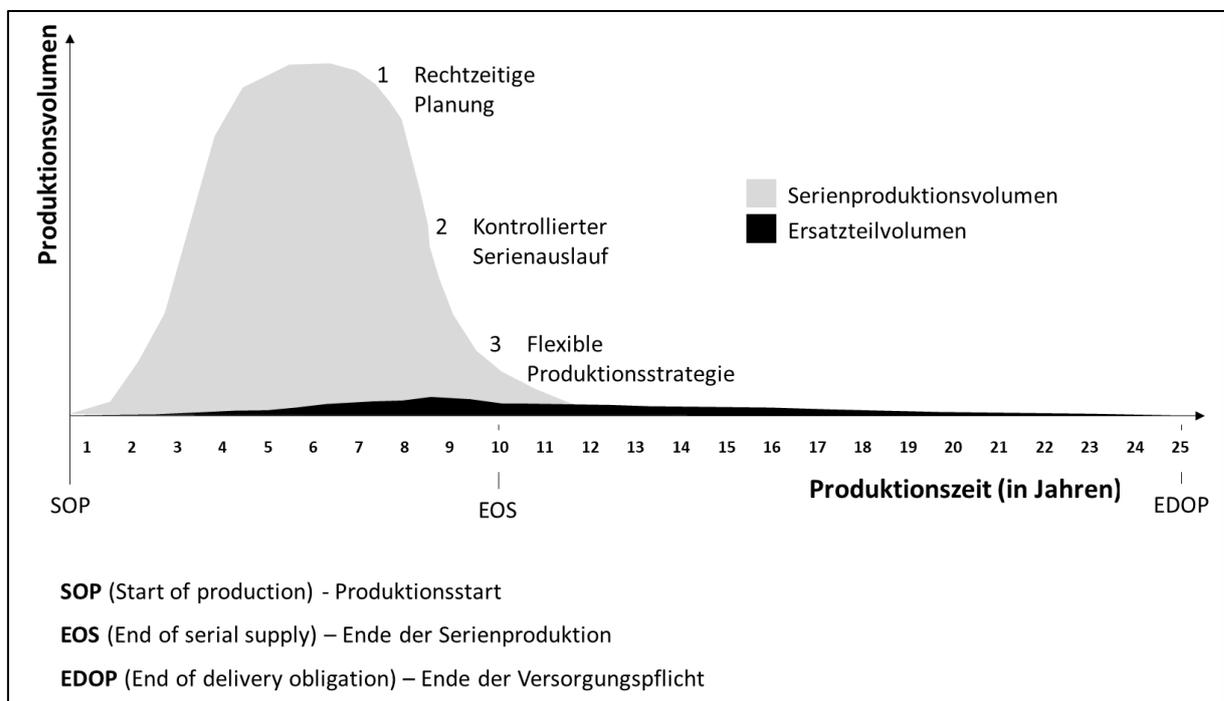


Abbildung 1-1 Exemplarischer Produktionszeitraum für Systeme in der Automobilindustrie (Eigene Darstellung in Anlehnung an [3])

¹ In der vorliegenden Dissertation wird aus Gründen der besseren Lesbarkeit ausschließlich die Sprachform des generischen Maskulinums verwendet. Es ist anzumerken, dass diese männliche Sprachform geschlechtsunabhängig zu verstehen ist und selbstverständlich auch die weibliche und die diverse Sprachform mit einschließt.

Die rechtzeitige Planung des Serienauslaufes ist ein unerlässlicher Schritt, um die steigenden Kosten so gering wie möglich zu halten und einen kontrollierten Übergang in die Nachserie sicherzustellen. Ein wichtiges Instrument dafür kann eine angepasste Steuerung der Produktionsmenge oder eine Zwischenbevorratung (ZBV) sein.

Bereits vor dem Ende der Serienproduktion ist es wahrscheinlich, dass die Produktion nicht mehr kostendeckend fortgeführt werden kann. Spätestens zu diesem Zeitpunkt sollten alternative Produktionsstrategien verfügbar sein und deren zeitnahe Implementierung im Fokus stehen. Die drei Säulen einer wirtschaftlichen Nachserienversorgung (NSV) sind die Kleinserienfertigung, die Endbevorratung (EBV) und die Aufarbeitung von gebrauchten Systemen (Altteilen), in Abbildung 1-2 dargestellt.

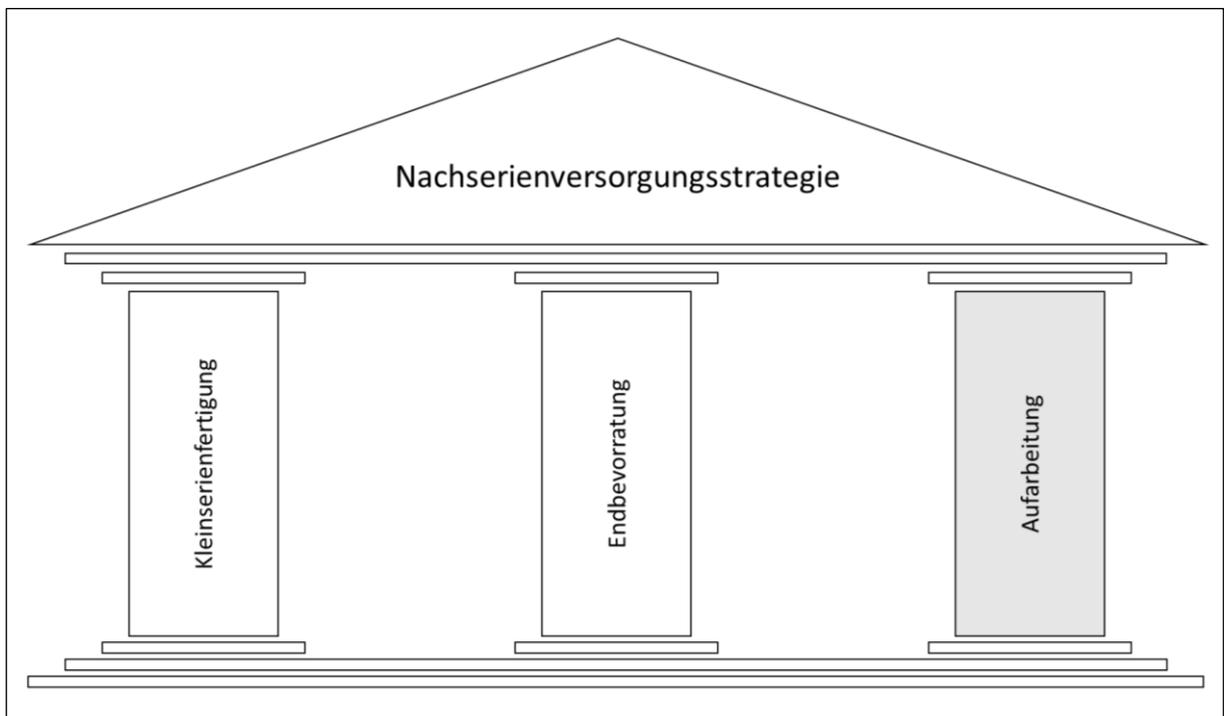


Abbildung 1-2 Die drei Säulen einer wirtschaftlichen Nachserienversorgung

Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf die Aufarbeitung von Altteilen. Neben ökonomischen Vorteilen bietet die Aufarbeitung auch einen ökologischen Ansatz zur Ersatzteilversorgung von Systemen [4]. Unter einer Aufarbeitung werden ein industrieller Prozess und ein standardisiertes Vorgehen zur Wiederverwendung von bereits im Feld genutzten Produkten verstanden [5]. Das aufgearbeitete Produkt wird erneut in seiner ursprünglichen Funktion eingesetzt. Analog zu einem Neuteil spielt der Nachweis einer hohen Produktzuverlässigkeit auch in der Aufarbeitung eine entscheidende Rolle.

Seit ihrem ersten Einsatz im Jahr 1988 erfolgte ein Übergang von der hydraulischen zu einer elektromechanischen Lenkkraftunterstützung, welche den heutigen Standard für Personenkraftfahrzeuge (Pkw) darstellt [6][7]. Aufgrund einer Zeitspanne von mehreren Jahren, zwischen dem Produktionsstart und dem Ende der Serienproduktion gewinnt die Aufarbeitung für die Nachserienversorgung zeitversetzt an Bedeutung. Die Anzahl der sich in der Nachserie befindenden Fahrzeugmodelle und der korrespondierende Ersatzteilbedarf wachsen daher immer noch stetig. Insbesondere der viel kürzere Lebenszyklus und die kostenintensive Herstellung von Elektronikkomponenten stellen ein Problem in der NSV von Lenksystemen dar.

Ein elektromechanisches Lenksystem (EPS) besteht aus fünf wesentlichen Baugruppen, Abbildung 1-3. Die Sensoreinheit überträgt das vom Fahrer über das Lenkrad aufgebrachte Drehmoment an die elektronische Steuereinheit (ECU) der Lenkkraftunterstützungseinheit (SCU). Die ECU verarbeitet das übertragene Drehmoment und die eingehenden Fahrzeugsignale, wie Lenkwinkel, Lenkgeschwindigkeit und Fahrzeuggeschwindigkeit, für die Bereitstellung der Lenkkraftunterstützung durch den Servomotor. Ein Servogetriebe überträgt die bereitgestellte Lenkkraftunterstützung anschließend auf die Zahnstange. Das vom Fahrer aufgebrachte Moment wird über ein Ritzel ebenfalls auf die Zahnstange übertragen und ergibt im Zusammenspiel mit der bereitgestellten Lenkkraftunterstützung die resultierende Zahnstangensummenkraft.

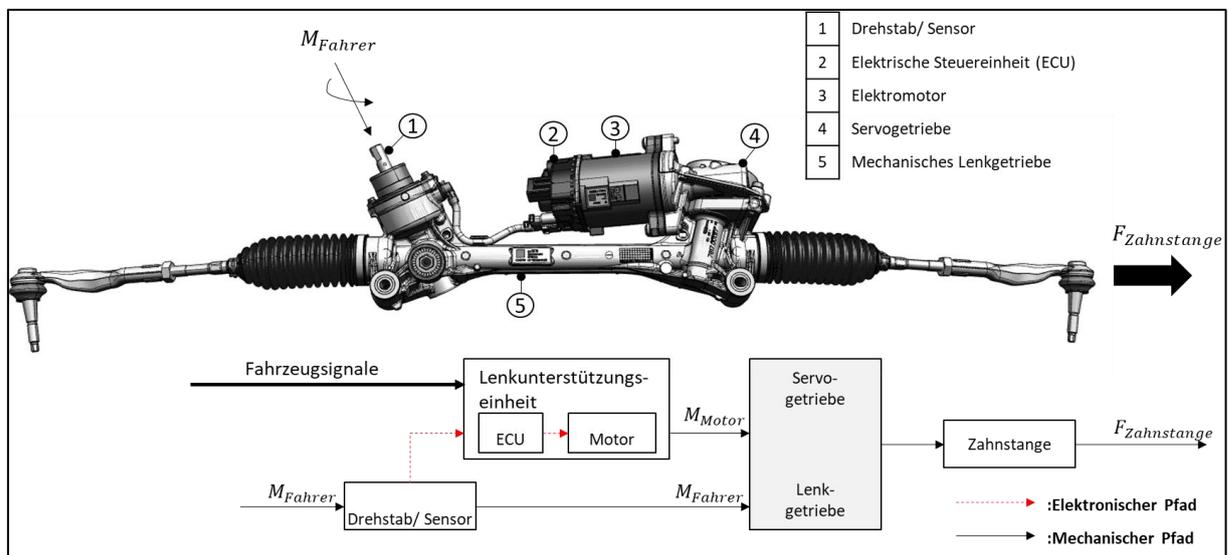


Abbildung 1-3 Aufbau eines elektromechanischen Lenksystems, bezogen auf die Hauptkomponenten eines elektromechanischen Lenksystems und die Krafteinleitung sowie die Eingangssignale für die Bereitstellung der Servounterstützung, unterteilt in den elektronischen und mechanischen Pfad (in Anlehnung an [8])

1.1 Herausforderungen in der Aufarbeitung von Lenksystemen

Die Aufarbeitung stellt die gängigen Methoden der Zuverlässigkeitsabschätzung vor veränderte Rahmenbedingungen. Während die üblichen Verfahren zur Abschätzung der Systemzuverlässigkeit von einem Neuzustand des zu betrachtenden Systems und seiner Komponenten ausgehen, weisen die Systeme in der Aufarbeitung in der Regel eine Vorschädigung auf. Eine zuverlässige Einordnung der Restlebensdauer dieser Systeme ist zum Zeitpunkt der Vereinnahmung nur mithilfe einer zusätzlichen Analyse des Systemzustandes möglich. Informationen über die Intensität der Vorbeanspruchung sind oft nicht vollumfänglich verfügbar. Zudem fehlen Modelle, welche die Vorbeanspruchung und die Vorschädigung in Einklang mit der zu erwartenden Schädigung bringen. Eine weitere Herausforderung ist in diesem Zusammenhang die Nutzungsvervariabilität im Feld. Gemeint ist das individuelle Anwendungsspektrum der Kombination aus Fahrer, Fahrzeug, Fahrzeugumgebung und System, das zu unterschiedlichen Beanspruchungsintensitäten innerhalb eines Feldlebens führt. Abbildung 1-4 veranschaulicht anhand von drei Beispielen die Heterogenität der Systemnutzung im Feld.

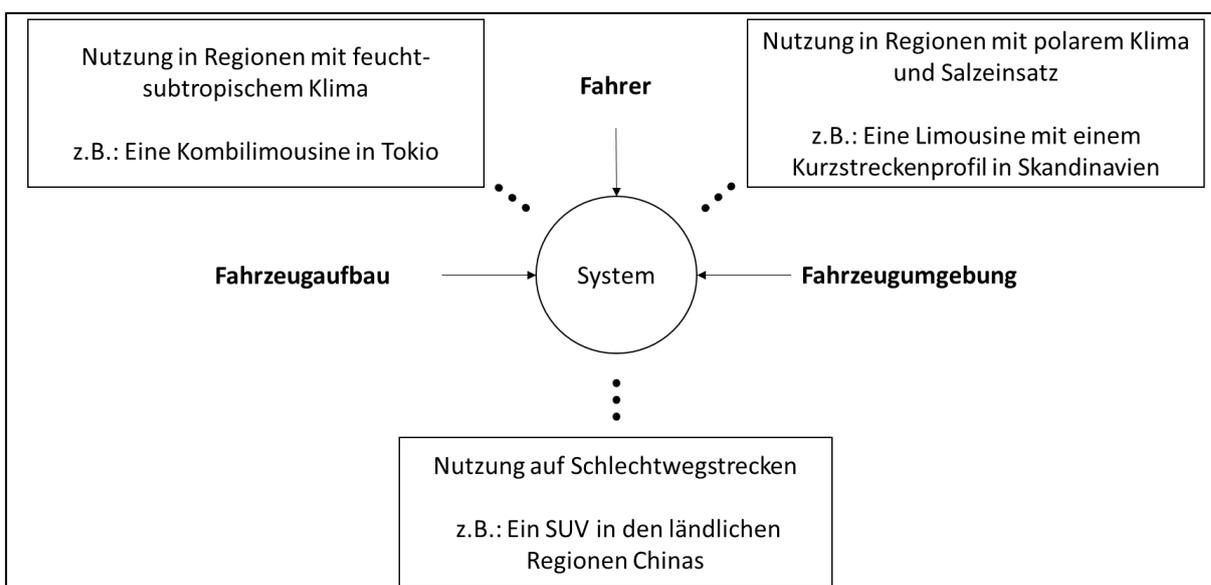


Abbildung 1-4 Die Heterogenität der Systemnutzung, beruhend auf dem Fahrzeugaufbau, dem Fahrereinfluss und der Fahrzeugumgebung

Der Einsatz automobiler Systeme erfolgt global und unter allen denkbaren Bedingungen, unter denen Kraftfahrzeuge heute bewegt werden. Neben klimatischen und infrastrukturellen Herausforderungen spielt vor allem der Fahrereinfluss eine maßgebliche Rolle bei der Beanspruchung eines Lenksystems. Die Nutzung bei einem Stadtfahrprofil unterscheidet sich deutlich in der Anzahl und Intensität der Lenkvorgänge von der eines Autobahnfahrprofils. Ebenfalls zu berücksichtigen ist der Fahrzeugaufbau, in dem das System zur Anwendung kommt. Einige

relevante Einflussgrößen sind hier die Einbaulage und die Lagerung des Systems, die Achsgeometrie und die Achslast.

Aus der beschriebenen Heterogenität der Systemnutzung resultiert eine hohe Streuung der Schädigung innerhalb eines Feldlebens. Systeme, die zu einem identischen Zeitpunkt ihres Feldlebens, und zwar gemessen an einem beliebigen Referenzparameter r_{ref} , wie der Laufleistung, der Betriebszeit oder dem Alter, betrachtet werden, können stark voneinander abweichende Vorschädigungen D aufweisen. Für die Wiederverwendungsentscheidung spielt das eine nicht unerhebliche Rolle. Angenommen, es erfolgt eine identische Beanspruchung aller Systeme nach der Aufarbeitung. Unter dieser Voraussetzung werden die zugrundeliegenden Zuverlässigkeitsgrenzen, und zwar je nach dem Grad der Vorschädigung, zu unterschiedlichen Zeitpunkten erreicht. Eine weitere Herausforderung für die Aufarbeitung resultiert aus verschiedenen r_{ref} , mit denen Systeme aus dem Feld bereitgestellt werden. So können Systeme mit unterschiedlichem Referenzparameter eine gleiche Vorschädigung aufweisen oder aber auch eine stark voneinander abweichende. Abbildung 1-5 visualisiert die Vorschädigung D für beliebige Referenzparameter r_{ref} und veranschaulicht das beschriebene Problem. Die eingefügten Grenzen (gestrichelte Linien) stellen statische Grenzwerte in Bezug auf die maximal erlaubte Vorschädigung und den maximal erlaubten Referenzparameter dar.

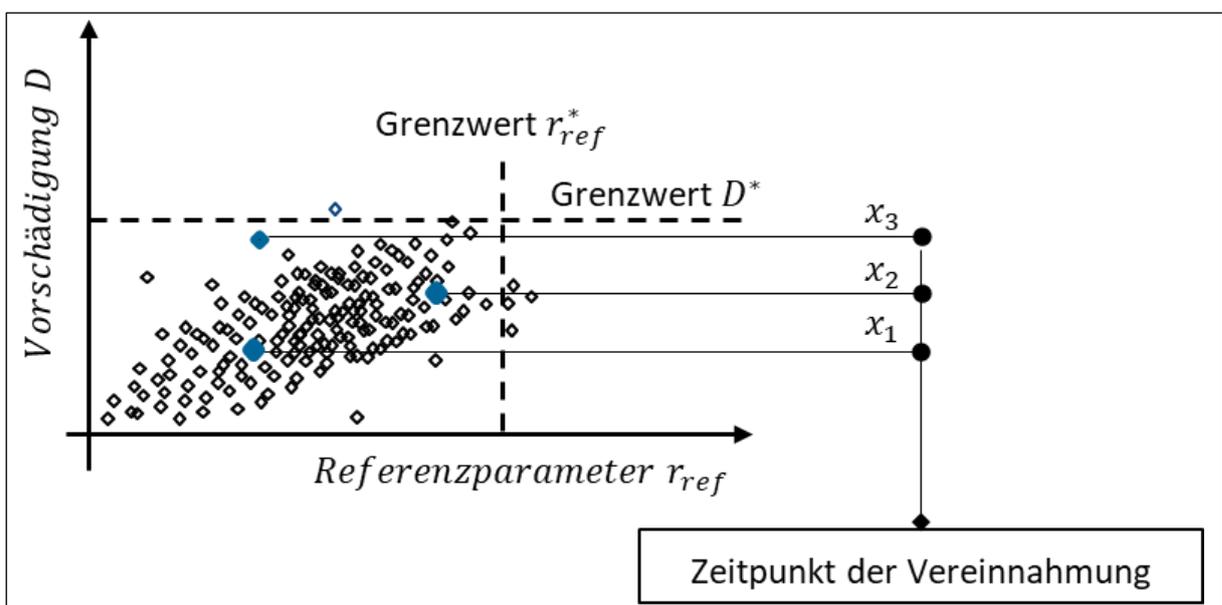


Abbildung 1-5 Streuung der Vorschädigung zum Zeitpunkt der Vereinnahmung, welche aus der Heterogenität der Systemnutzung und dem Zeitpunkt der Vereinnahmung resultiert

Lenksysteme als sicherheitsrelevante und wartungsfreie Systeme sind für eine Fahrzeuglebensdauer ausgelegt und werden nach den international gültigen Standards der funktionalen Sicherheit, u.a. der ISO 26262 [9], entwickelt. In der ISO 26262 wird das Lenksystem mit der höchsten

Risikostufe ASIL-D bewertet [10]. Die Erprobung des Gesamtsystems erfolgt neben Fahrzeugversuchen mit einem Lastkollektivdauerlauf, welcher verschiedene Extrembeanspruchungen im Feld simuliert. Eine Prüfung bis zum Bauteilversagen ist nicht Bestandteil der Systemerprobung. Zwar wird der Nachweis der geforderten Beanspruchbarkeit in Bezug auf die Extrembeanspruchungen erbracht, jedoch bleiben die Beanspruchbarkeitsgrenzen eines Lenksystems, seiner Baugruppen und Komponenten weiterhin unbekannt. Auch existieren die für eine Lebensdauerberechnung notwendigen Ausfalldaten in der Regel nur für den kundenspezifischen Gewährleistungszeitraum. Verschleißbehaftete und alterungsabhängige Ausfallursachen sind in diesem Zeitraum nicht zu erwarten. Eine umfassende systematische Erfassung und Beobachtung von Betriebsdaten gehören noch nicht zum heutigen Standard bei Lenksystemen. Es fehlt daher die Grundlage für eine standardisierte Verknüpfung der theoretisch spezifizierten Lebensdauer mit der tatsächlichen Feldlebensdauer. Ebenfalls nicht bekannt ist die erwartbare Schädigung im Rahmen eines Feldlebens und es fehlen die geeigneten Schädigungsmodelle, um die Vorschädigung zurückgeführter Systeme bewerten zu können.

Auch die Komplexität des Lenksystems muss in der Wiederverwendungsentscheidung berücksichtigt werden. Ein Lenksystem besteht aus mehr als 500 Komponenten, Abbildung 1-6.

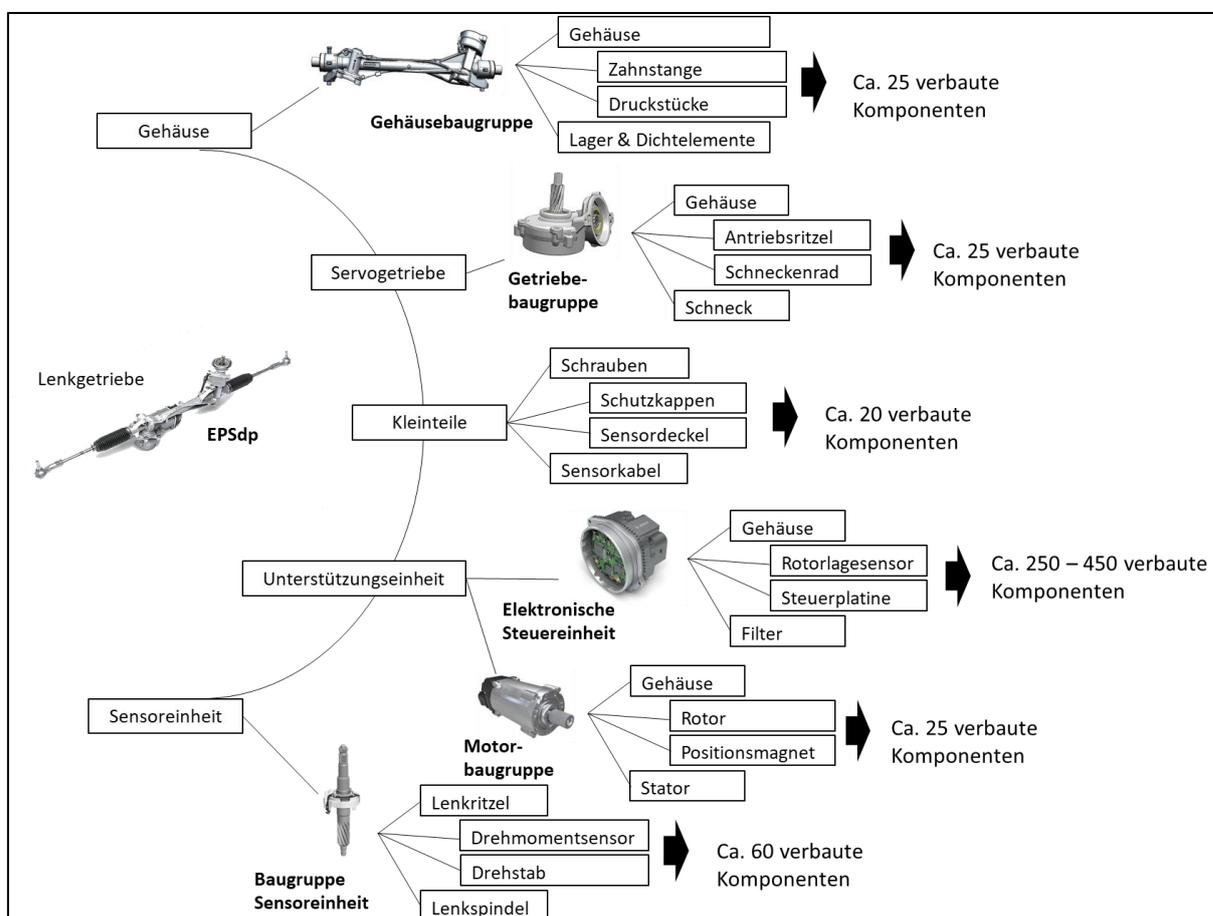


Abbildung 1-6 Anzahl der in einem Lenksystem verbaute Komponenten

Als Hauptbaugruppen sind die Gehäusebaugruppe, Die Getriebebaugruppe, Die Unterstützungseinheit und die Sensoreinheit zu nennen. Die Komplexität der EPS und die Kombination aus mechanischen und elektronischen Bauteilen erfordert eine differenzierte Betrachtung der nutzungsabhängigen Beanspruchung und Beanspruchbarkeit auf System, Baugruppen und Komponentenebene

Neben den bisher aufgeführten Herausforderungen müssen weitere Faktoren in der Entwicklung zuverlässigkeits- und kostenorientierter Wiederverwendungsgrenzwerte (Reuse Limits) betrachtet werden. Es gilt, Erkenntnisse über den gesamten Produktlebenszyklus, und zwar von der Entwicklungsphase bis zur Herausnahme aus dem Markt, zu berücksichtigen. Abbildung 1-7 zeigt die einzelnen Phasen des Produktlebenszyklus und vermittelt einen vereinfachten Überblick über die einfließenden Erkenntnisse. Aus den Erprobungsumfängen, von der Entwicklungs- bis zur Serienphase, resultiert der Nachweis einer hinreichenden Sicherheit des Systems, der Baugruppen und Komponenten. In der Nutzungsphase I werden Informationen über die Systemqualität und die Nutzung generiert. Eine Nachserienerprobung ermöglicht den Nachweis einer hinreichenden Sicherheit für eine nochmalige Nutzung des Systems, und zwar unter der Berücksichtigung der definierten Grenzen. In der Nutzungsphase II werden analog zur Nutzungsphase I Daten bezüglich Qualität und Nutzung des Systems generiert.

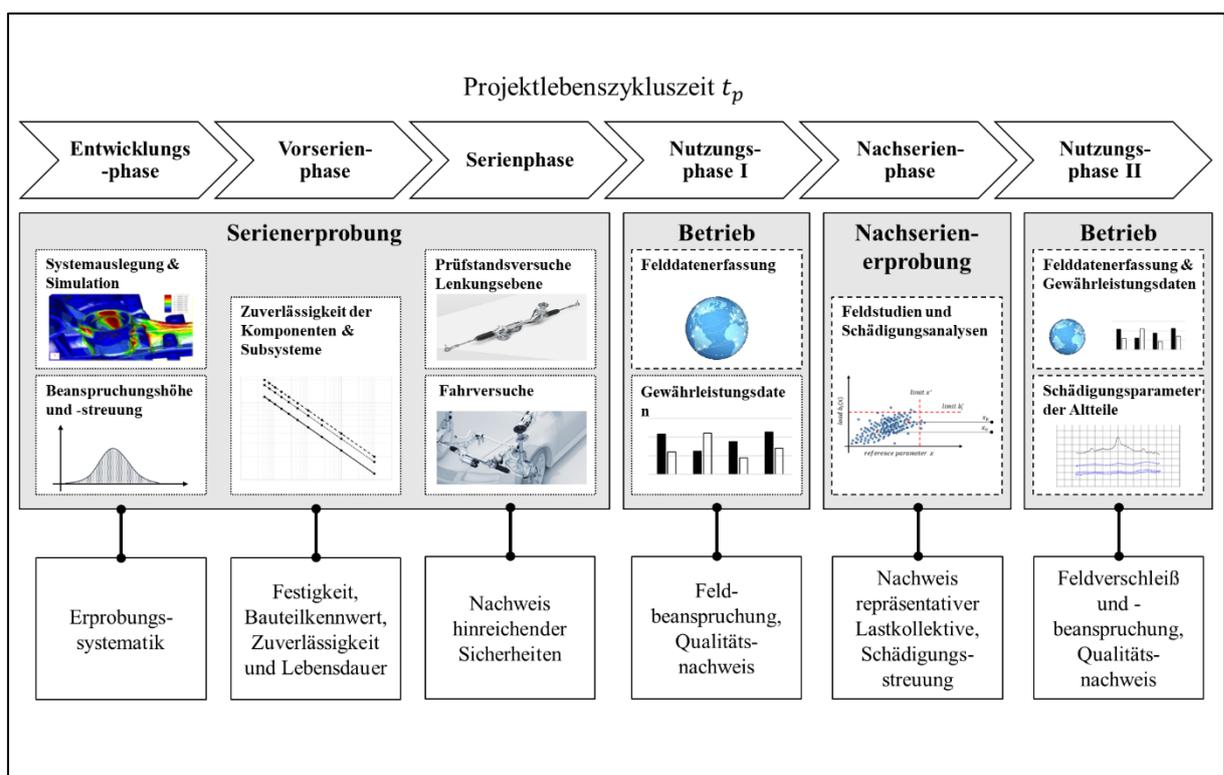


Abbildung 1-7 Übersicht über die einzelnen Phasen im Rahmen des Produktlebenszyklus



Das Berücksichtigen sich verändernder Rahmenbedingungen über den Produktlebenszyklus t_p , stellt eine weitere Herausforderung in der Entwicklung neuer Aufarbeitungskonzepte dar. Die aktuell für Lenkgetriebe definierten Wiederverwendungsgrenzwerte basieren auf statischen Zusammenhängen zwischen der spezifizierten Fahrzeuglebensdauer und den Ergebnissen der Systemerprobung. Eine Abschätzung der tatsächlichen Feldbeanspruchung ist nicht Gegenstand der heutigen Betrachtung und kann aus diesem Grund nicht in die Wiederverwendungskonzeption sowie nicht in die Prognose der zukünftigen Beanspruchung einfließen. Bisher ebenfalls nicht berücksichtigt wird die Veränderung der Feldpopulation in den einzelnen Phasen des Produktlebenszyklus. Für eine kostenoptimale Aufarbeitungsstrategie wird eine an die Rahmbedingungen angepasste Wiederverwendungsentscheidung benötigt. Es fehlen jedoch Ansätze zur dynamischen Anpassung der Wiederverwendungsgrenzwerte bei sich verändernden Anforderungen an die Zuverlässigkeit. Gemeint ist damit vordergründig die Abnahme der potenziellen Fahrzeugrestlebensdauer mit zunehmendem Alter der Fahrzeuge nach dem Serienauslauf. Zusammengefasst sind nachfolgend die Probleme und Herausforderungen für die Aufarbeitung stichpunktartig aufgeführt:

- Die Beanspruchbarkeitsgrenzen des Systems, der Baugruppen und Komponenten sind nicht bekannt.
- Die Komplexität eines Lenksystems ist mit über fünfhundert verschiedenen Komponenten als hoch einzustufen.
- Die Feldbeanspruchung ist heterogen und die korrespondierende Schädigung des Systems, der Baugruppen und der Komponenten weist aus diesem Grund eine hohe Streuung auf.
- Die Vereinnahmung kann zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Lebenszyklus eines Systems erfolgen, was die Streuung der Vorschädigung zusätzlich erhöht.
- Die Verteilung der Feldbeanspruchung ist nicht bekannt.
- Es stehen keine Schädigungsmodelle zur Einordnung der Vorschädigung des Systems, der Baugruppen und Komponenten zur Verfügung.
- Ausfalldaten sind nur für den Gewährleistungszeitraum verfügbar und bilden keine Grundlage für eine Lebensdauerabschätzung.
- Lenkgetriebe als sicherheitsrelevante Systeme unterliegen strengen Anforderungen an Qualität und Zuverlässigkeit.

- Wiederverwendungsgrenzwerte werden heute statisch definiert und berücksichtigen keine Anpassung an sich verändernde Rahmenbedingungen innerhalb des Produktlebenszyklus.

Neben den Lenksystemen bestehen die aufgeführten Herausforderungen und Probleme auch für weitere (sicherheitsrelevante) Systeme wie Bremssysteme oder Elektromotoren. Für die genannten Schwierigkeiten soll im Rahmen dieser Arbeit ein Lösungsansatz erarbeitet werden, welcher die Unsicherheiten beherrschbar macht und eine beanspruchungsorientierte Wiederverwendungsentscheidung ermöglicht. Wie bereits Angemerkt ist eine Abschätzung der tatsächlichen Feldbeanspruchung nicht Gegenstand heutiger Konzepte. Die Wiederverwendungsentscheidung beschränkt sich hier auf die Auswertung von Parametern wie Laufleistung, Betriebszeit und auch Belastungszählern im Verhältnis zur Systemerprobung und damit den spezifizierten Grenzen.

1.2 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit ist inhaltlich in die folgenden Kapitel gegliedert:

Im Kapitel **Grundlagen und Stand des Wissens** (Kapitel 2) wird auf die grundlegenden Elemente der statistischen Verteilungsfunktionen und der Parameterschätzungen eingegangen. Weiterhin werden die Grundlagen der Betriebsfestigkeit und der Wiederverwendung fokussiert und das Thema dieser Arbeit in den wissenschaftlichen Kontext eingeordnet. Im Anschluss daran wird die inhaltliche Zielsetzung der Arbeit abgeleitet.

Das Kapitel **Entwicklung des neuen Ansatzes** (Kapitel 3) vermittelt einen Einblick in die Grundlagen der Wiederverwendungsentscheidung. Der Schwerpunkt dieses Kapitels liegt auf der schrittweisen Herleitung des neu entwickelten Ansatzes zur Definition der Wiederverwendungsgrenzwerte und verschafft einen Überblick über die verwendeten Bausteine.

Im Kapitel **Feldbeanspruchung** (Kapitel 4) werden die wesentlichen Elemente der Beanspruchungsermittlung mittels Felddaten beschrieben. Neben den allgemeinen Lastannahmen werden die verfügbaren Felddaten und die relevanten Parameter vorgestellt. Den Abschluss des Kapitels bilden die Schädigungsanalyse realer Feldsysteme sowie die Einordnung der Schädigung vor dem Hintergrund der systematisch erfassten Felddaten (sFDE). Neben einer Analyse der Funktionsfähigkeit auf der Systemebene werden auch die relevanten Schädigungsparameter auf der Baugruppenebene betrachtet. Anschließend erfolgt die Übertragung der erarbeiteten Zusammenhänge auf den Kontext der sFDE.



Im Kapitel **Wiederverwendungsentscheidung** (Kapitel 5) erfolgen die Anwendung des neuen Ansatzes zur Definition der Wiederverwendungsgrenzwerte und die Einordnung der konsumierten Lebensdauer zurückgeführter Altteile.

Das Kapitel **Diskussion des Ansatzes** (Kapitel 6) reflektiert die Vor- und Nachteile des neuen Ansatzes und zeigt die allgemeingültige Anwendbarkeit.

Das Kapitel **Zusammenfassung und Ausblick** (Kapitel 7) umfasst eine Zusammenfassung des entwickelten Ansatzes und der enthaltenen Methoden und Prozesse.

2. Grundlagen und Stand des Wissens

2.1 Begriffe, Definitionen und statistische Kenngrößen

Die Beschreibung der Zuverlässigkeit und des Ausfallverhaltens von Bauteilen und Systemen erfolgt unter Verwendung von Fachbegriffen, auf die im Folgenden näher eingegangen wird.

Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t)$

Als Ausfallwahrscheinlichkeit wird die Wahrscheinlichkeit bezeichnet, mit der eine Einheit die Lebensdauer im Rahmen einer betrachteten Betriebsdauer ab dem Anwendungsbeginn nicht erreicht [1]. Der Zusammenhang zwischen Zuverlässigkeit $R(t)$ und Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t)$ wird wie folgt beschrieben

$$F(t) = 1 - R(t). \quad (2.1)$$

Ausfallwahrscheinlichkeitsdichte $f(t)$

Die Ausfallwahrscheinlichkeitsdichte $f(t)$ beschreibt die Ausfallhäufigkeit einer betrachteten Einheit zum Zeitpunkt t

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt}. \quad (2.2)$$

Ausfallrate $\lambda(t)$

Als Ausfallrate wird das Verhältnis der Ausfälle zum Zeitpunkt t zu der Summe noch intakter Einheiten verstanden

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}. \quad (2.3)$$

B_x – Lebensdauer

Die B_x – Lebensdauer beschreibt die Lebensdauer B , bei der x Prozent aller Einheiten ausgefallen sind. Die Ausfallwahrscheinlichkeit entspricht dem Wert von x .

Arithmetischer Mittelwert \bar{x}

Der arithmetische Mittelwert wird aus den Beobachtungen x_i einer Stichprobe berechnet und repräsentiert den statistischen Durchschnittswert

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (2.4)$$

Median \tilde{x}

Als Median wird der Zentralwert einer Stichprobe bezeichnet. Der Median stellt in diesem Zusammenhang die Ausfallzeit $t_{\tilde{x}}$ dar, bei der exakt die Hälfte aller Probanden ausgefallen ist

$$\tilde{x} = \begin{cases} \frac{x_{n+1}}{2} & \text{für } n \text{ ungrade} \\ \frac{1}{2} \left(x_{\frac{n}{2}} + x_{\frac{n}{2}+1} \right) & \text{für } n \text{ gerade} \end{cases} \quad (2.5)$$

$$F(t_{\tilde{x}}) = 0,5. \quad (2.6)$$

Varianz s^2

Als empirische Varianz s^2 wird die mittlere quadratische Abweichung der Beobachtungen x_i einer Stichprobe von deren Stichprobenmittelwert bezeichnet. Die empirische Varianz, auch Stichprobenvarianz genannt, stellt ein Maß für die Streuung der Beobachtungen dar

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2. \quad (2.7)$$

Standardabweichung s

Die empirische Standardabweichung wird aus der Wurzel der empirischen Varianz berechnet und ist ebenfalls ein Maß für die Streuung um den Mittelwert einer Stichprobe

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \quad (2.8)$$

2.2 Statistische Verteilungen

Nachfolgend werden die wesentlichen stetigen Verteilungen zur Modellierung des Ausfallverhaltens von Systemen, Subsystemen und Komponenten aufgeführt.

2.2.1 Normalverteilung

Die Normalverteilung ist eine stetige Verteilungsfunktion, welche in der Zuverlässigkeitstheorie dazu verwendet wird, um das Ausfallverhalten normalverteilter Zufallsvariablen zu beschreiben. Als Lebensdauerfunktion eignet sich die Normalverteilung nur unter der Berücksichtigung, dass auch negative Referenzparameter mit einer positiven Wahrscheinlichkeit enthalten sein können [11]. Charakteristisch für die Normalverteilung ist die symmetrische Glockenkurve der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion, Abbildung 2-1.

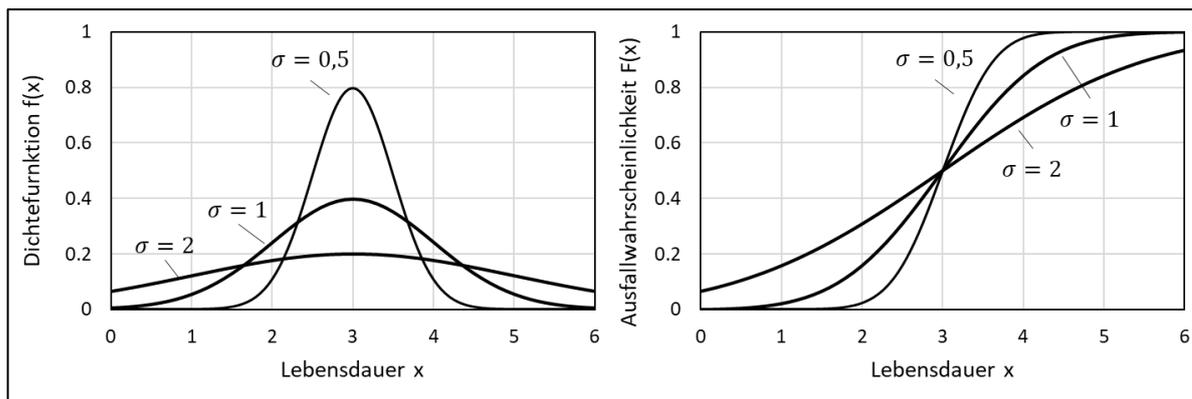


Abbildung 2-1 Grafische Darstellung der Dichtefunktion und Ausfallwahrscheinlichkeit der Normalverteilung [12]

Mathematisch beruht ihre Modellierung auf dem Stichprobenmittelwert μ , welcher die Lage des Datenschwerpunktes beschreibt, und der Standardabweichung σ , welche als Streuungsmaß die Form der Glocke bestimmt.

Formeln der Normalverteilung

Dichtefunktion
$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} * e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}}, \quad (2.9)$$

Ausfallwahrscheinlichkeit
$$F(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} * \int_0^x e^{-\frac{(\tau-\mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}} d\tau, \quad (2.10)$$

Zuverlässigkeit
$$R(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} * \int_t^{\infty} e^{-\frac{(\tau-\mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}} d\tau, \quad (2.11)$$

Ausfallrate
$$\lambda(x) = \frac{f(x)}{R(x)}. \quad (2.12)$$

2.2.2 Lognormalverteilung

Die Lognormalverteilung ist ebenfalls eine stetige Verteilungsfunktion und wird in der Zuverlässigkeitstheorie dazu verwendet, um das Ausfallverhalten einer normalverteilten Zufallsvariablen, der Form $z = \log(x)$, zu beschreiben. Die Lognormalverteilung bietet im Gegensatz zur Normalverteilung die Möglichkeit zur Beschreibung unsymmetrischer Dichteverläufe, Abbildung 2-2. Sie wird aufgrund ihrer Eigenschaften häufig als Lebensdauerverteilung herangezogen [11].

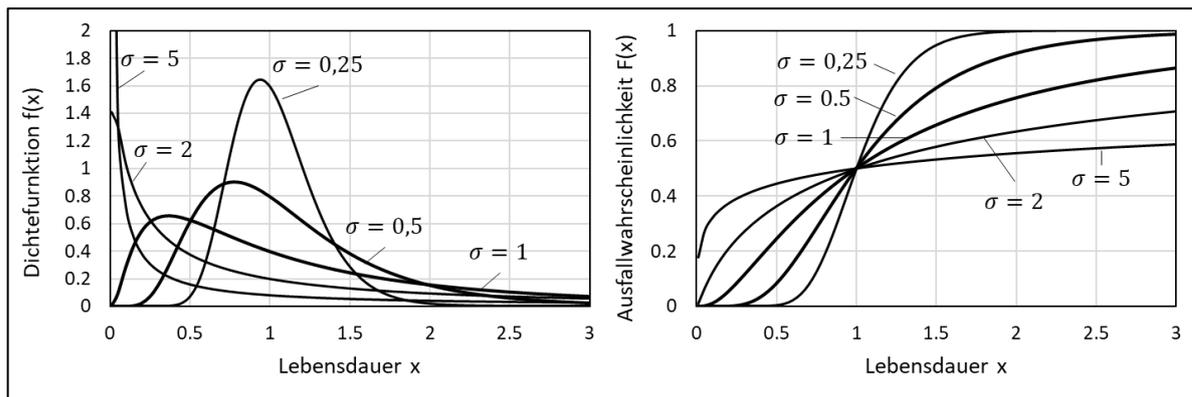


Abbildung 2-2 Grafische Darstellung der Dichtefunktion und Ausfallwahrscheinlichkeit der logarithmischen Normalverteilung [12]

Formeln der Lognormalverteilung

Dichtefunktion
$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot x \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} * e^{-\frac{(\log x - \mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}}, \quad (2.13)$$

Ausfallwahrscheinlichkeit
$$F(x) = \int_0^x \frac{1}{\sigma \cdot \tau \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} * e^{-\frac{(\log \tau - \mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}} d\tau, \quad (2.14)$$

Zuverlässigkeit
$$R(x) = 1 - F(x), \quad (2.15)$$

Ausfallrate
$$\lambda(x) = \frac{f(x)}{R(x)}. \quad (2.16)$$

2.2.3 Weibullverteilung

Die Weibullverteilung ist eine stetige Verteilungsfunktion und eignet sich aufgrund ihrer Anpassungsfähigkeit zur Beschreibung unterschiedlichen Ausfallverhaltens im Rahmen des Lebenszyklus einer Produktpopulation [11]. Mathematisch wird die dreiparametrische Weibull-

verteilung anhand des Lageparameters charakteristische Lebensdauer X , des Formparameters b sowie der ausfallfreien Nutzungsreferenz x_0 gebildet, Gl.(2. 17). Abbildung 2-3 veranschaulicht die Dichtefunktion und die Ausfallwahrscheinlichkeit für verschiedene Formparameter b , und zwar bei einer ausfallfreien Zeit von $x_0 = 0$.

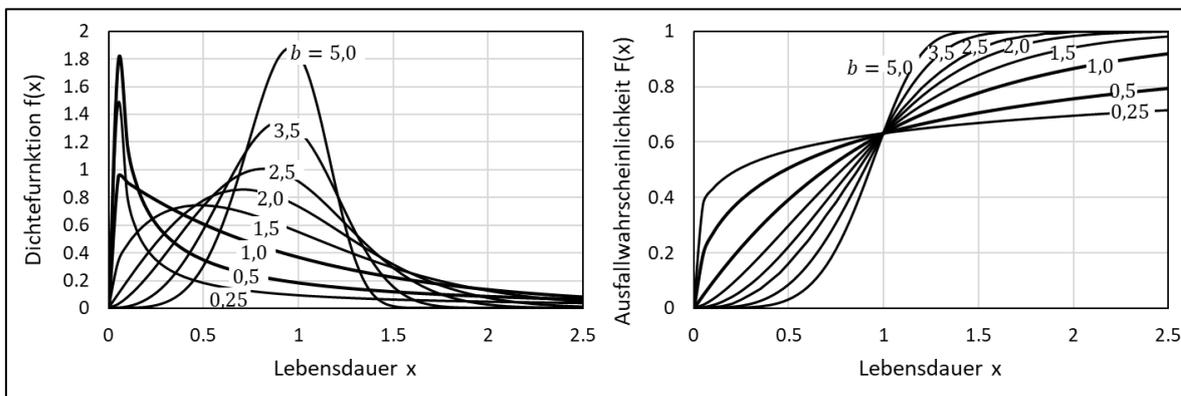


Abbildung 2-3 Grafische Darstellung der Dichtefunktion und Ausfallwahrscheinlichkeit der Weibullverteilung [12]

Für $b < 1$ ist die Ausfallrate zu Beginn relativ hoch und nimmt mit zunehmender Lebensdauer ab, was für die Beschreibung von Frühausfällen verwendet werden kann [11]. Bei $b = 1$ entspricht die Weibullverteilung der Exponentialverteilung mit konstanter Ausfallrate und beschreibt den Umstand der Zufallsausfälle. Für $b > 1$ steigt die Ausfallrate monoton mit zunehmender Lebensdauer an, was sich zur Beschreibung von Verschleiß- und Ermüdungsausfällen eignet [11].

Formeln der dreiparametrische Weibullverteilung

Dichtefunktion
$$f(x) = \frac{b}{X-x_0} * \left(\frac{x-x_0}{X-x_0}\right)^{b-1} e^{-\left(\frac{x-x_0}{X-x_0}\right)^b}, x \geq x_0, X \geq 0, b \geq 0, \quad (2. 17)$$

Ausfallwahrscheinlichkeit
$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x-x_0}{X-x_0}\right)^b}, \quad (2. 18)$$

Zuverlässigkeit
$$R(x) = e^{-\left(\frac{x-x_0}{X-x_0}\right)^b}, \quad (2. 19)$$

Ausfallrate
$$\lambda(x) = \frac{b}{X-x_0} * \left(\frac{x-x_0}{X-x_0}\right)^{b-1}. \quad (2. 20)$$

2.3 Statistische Schätzung von Parametern

Im folgenden Abschnitt wird auf Methoden zur Parameterschätzung von Verteilungsfunktionen eingegangen. Es wird neben der Maximum Likelihood Methode auch die Momenten Methode vorgestellt und auf das Thema Vertrauensbereiche eingegangen.

2.3.1 Maximum Likelihood Methode

Die Maximum Likelihood Methode ist ein Verfahren zur Parameterschätzung einer Verteilungsfamilie, und zwar mit dem Ziel, die ausgewählte Verteilungsfunktion möglichst gut an den vorhandenen Datensatz anzupassen. Die Wahrscheinlichkeit der Stichprobenrealisation (x_1, \dots, x_n) einer kontinuierlichen Zufallsgröße X_n wird durch die Maximum Likelihood Funktion in Abhängigkeit des zu schätzenden Parameters θ plausibilisiert, Gl. (2. 21) [13].

$$L_x(\theta) = L(\theta|x_1, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n f(x_i|\theta). \quad (2. 21)$$

Der Maximum Likelihood (ML)- Schätzwert $\hat{\theta}$ beschreibt das Maximum der ML- Funktion $L_x(\theta)$ und damit die wahrscheinlichste Realisation der betrachteten Zufallsvariablen. Gebildet wird der ML- Schätzer durch das Differenzieren nach dem zu schätzenden Parameter und dem anschließenden Nullsetzen

$$\frac{d}{d\theta} L(\theta|x_1, \dots, x_n) = 0. \quad (2. 22)$$

Aus Gründen der besseren numerischen Handhabung erfolgt die Maximierung der ML-Funktion oft in logarithmischer Form [13]

$$\log L_x(\theta) = \log \prod_{i=1}^n f(x_i|\theta) = \sum_{i=1}^n \log f(x_i|\theta). \quad (2. 23)$$

2.3.2 Momenten Methode

Die Momenten Methode [14][15][16] ist ein Schätzverfahren zur Bestimmung von Parametern unter der Annahme einer bestimmten Verteilungsfunktion. Grundlage des Verfahrens bildet die Gegenüberstellung der theoretischen Momente (Erwartungswert) und der empirischen Momente (arithmetisches Mittel), sodass die Momente der Verteilung den empirischen entsprechen. Das theoretische Moment ist definiert als das k -te Moment μ_k der Verteilung einer Zufallsvariablen X

$$\mu_k = E(x^k), k = 1, 2, \dots \tag{2.24}$$

Das k -te empirische Moment m_k der Stichprobenrealisationen x_1, \dots, x_n wird durch den folgenden Ausdruck beschrieben

$$m_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^k, k = 1, 2, \dots \tag{2.25}$$

Der Momenten Schätzer $\hat{\theta} = (\hat{\theta}_1, \dots, \hat{\theta}_r)$ für einen Parameter(vektor) $\theta = (\theta_1, \dots, \theta_r)$ resultiert aus der Lösung des Gleichungssystems

$$\begin{aligned} \mu_1(\hat{\theta}) &= m_1 \\ \mu_2(\hat{\theta}) &= m_2 \\ &\vdots \\ \mu_r(\hat{\theta}) &= m_r . \end{aligned} \tag{2.26}$$

Es müssen so viele Gleichungen gebildet werden, wie Parameter zu schätzen sind.

2.3.3 Vertrauensbereiche

Vertrauensbereiche [15][16], auch Konfidenzintervalle genannt, geben an, mit welcher Wahrscheinlichkeit $1 - \alpha$ sich der wahre Parameter innerhalb konstruierter Intervallgrenzen befindet, Abbildung 2-4.

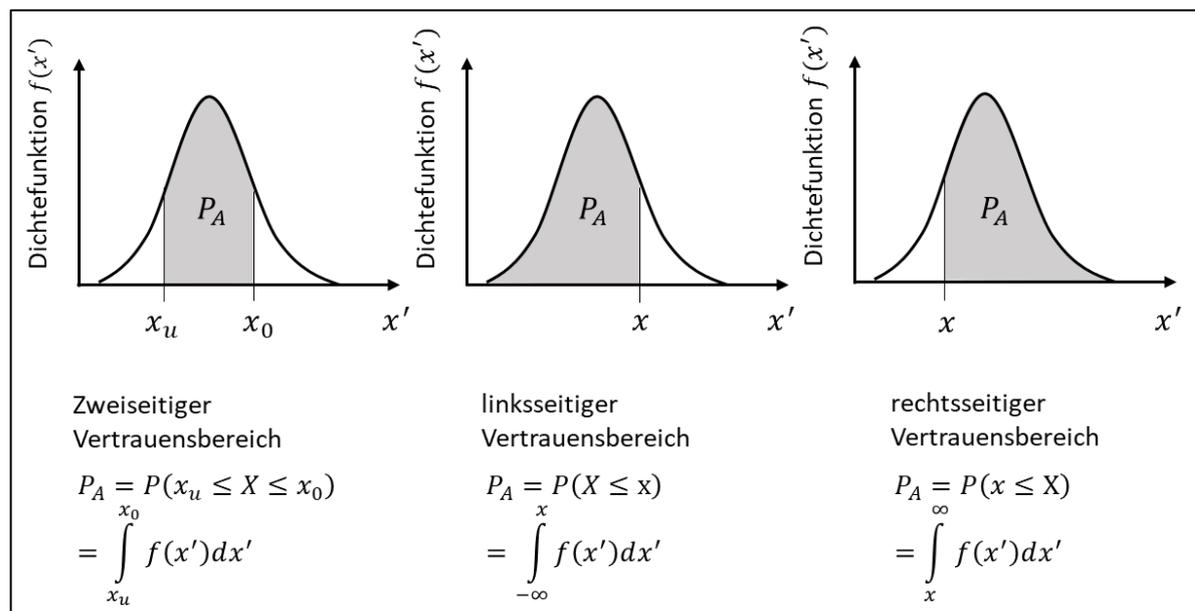


Abbildung 2-4 Vertrauensbereiche [17]

Die zugrundeliegenden Parameter der Verteilungsfunktion werden anhand der Stichprobenrealisationen geschätzt und sind demzufolge als Wahrscheinlichkeitsverteilung zu verstehen. Wird der Vertrauensbereich von einer oberen sowie einer unteren Intervallgrenze begrenzt, liegt ein zweiseitiger Vertrauensbereich vor. Ein einseitiger Vertrauensbereich wird entsprechend von einer oberen oder einer unteren Intervallgrenze begrenzt. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von einem linksseitigen oder rechtsseitigen Vertrauensbereich.

2.4 Grundlagen der Betriebsfestigkeit

Die Betriebsfestigkeit bewertet mithilfe von Methoden zur rechnerischen Lebensdauerabschätzung die Auslegung, Dimensionierung und Haltbarkeit von Bauteilen und Systemen in Bezug auf die mechanische Beanspruchung. Das Ziel ist es, ein anforderungsgerechtes Produkt herzustellen und zu betreiben, welches seine Funktion über die gesamte Lebensdauer hinweg erfüllt. Im vorliegenden Kapitel werden die wichtigen Begriffe und Zusammenhänge der Betriebsfestigkeit [18] [19] [20] [21] zusammengefasst.

Die Auslegung technischer Komponenten und Bauteile beruht auf der Beanspruchung im Rahmen ihrer Nutzung. Statisch beanspruchte Bauteile werden vorwiegend nach dem Nennspannungskonzept ausgelegt. Für die Lebensdauerberechnung dynamisch beanspruchter Bauteile stehen das Nennspannungskonzept, das örtliche Konzept sowie das Rissfortschrittskonzept zur Verfügung. Die genannten Konzepte sind umfassend und ausführlich in der bestehenden Literatur [18] [19] [20] beschrieben. Abbildung 2-5 präsentiert die grundlegenden Begriffe und Zusammenhänge der Betriebsfestigkeit.

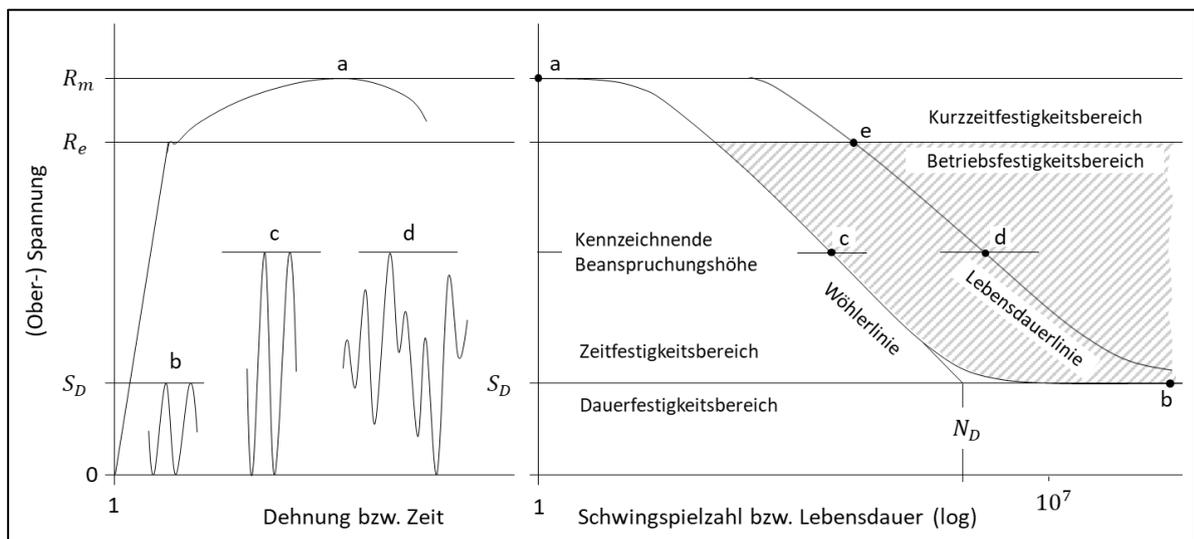


Abbildung 2-5 Begriffe und Zusammenhänge der Betriebsfestigkeit [18]

Die Zugfestigkeit R_m und die Streckgrenze R_e sind die Grenzwerte für die Beanspruchung eines Bauteils. Beide Grenzwerte sind aus der Spannungs- Dehnungs- Kurve (a) zu entnehmen. Ein einmaliges Überschreiten führt zu einem Bauteilversagen bzw. einer bleibenden plastischen Verformung. Der Dauerfestigkeitsbereich S_D beschreibt einen unteren Beanspruchungsgrenzwert, bis zu dem eine schwingende Beanspruchung (b) beliebig oft ohne Bauteilversagen oder Bruch ertragbar ist. Beanspruchungen oberhalb der Dauerfestigkeitsgrenze führen hingegen nach einer endlichen Anzahl von Lastwechseln zu einem Bauteilversagen oder Bruch. Die Anzahl der ertragbaren Schwingspiele oberhalb der Dauerfestigkeit richtet sich nach der Intensität der Beanspruchung. Liegt eine konstante Beanspruchung vor, werden die Zusammenhänge zwischen der Beanspruchungshöhe und der Anzahl ertragbarer Lastwechsel durch die Wöhlerlinie beschrieben. Diese verläuft von der Zugfestigkeit über die Zeitfestigkeit bis hin zur Dauerfestigkeit. Eine schwingende Beanspruchung mit einer zufallsartigen Folge unterschiedlich großer Amplituden (d) führt zu einem Überschreiten der Wöhlerlinie. Analog zur Wöhlerlinie kennzeichnet die Lebensdauerlinie eine maximale Anzahl ertragbarer Lastzyklen, jedoch bezogen auf eine gegebene Kollektivform. Die ertragbaren Lastzyklen einer Lebensdauerlinie sind über dem Kollektivhöchstwert aufgetragen. Lebensdauerlinien können experimentell durch die Simulation zufallsartiger Beanspruchungsverläufe oder auf der Basis einer bestehenden Wöhlerlinie mithilfe von Schadensakkumulationshypothesen berechnet werden. Die charakteristischen Kenngrößen eines Schwingspiels sind in Abbildung 2-6 dargestellt.

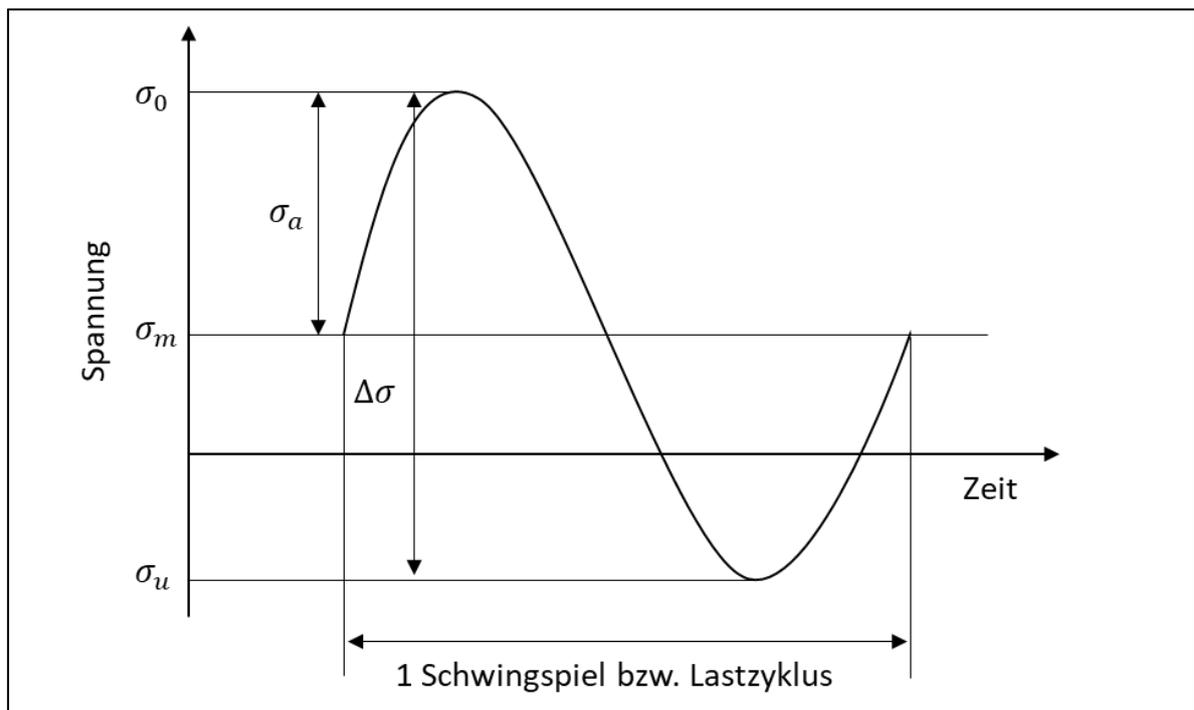


Abbildung 2-6 Kennwerte eines Schwingspiels [20]

Begrenzt wird ein Schwingenspiel von seiner Oberspannung σ_o und seiner Unterspannung σ_u . Ebenfalls dargestellt sind die Amplitude σ_a , die Mittelspannung σ_m und die Schwingbreite $\Delta\sigma$. Die Differenz zwischen Unterspannung und Oberspannung wird als Spannungsverhältnis R bezeichnet

$$R = \frac{\sigma_u}{\sigma_o} \tag{2.27}$$

Ausgehend von dem Spannungsverhältnis und den charakteristischen Parametern eines Schwingenspiels, wird die Beanspruchung in Kategorien unterteilt, Abbildung 2-7. Neben der Normalspannung können auch Schubspannungen, Dehnungen, Kräfte oder Momente als Indikationen für die Höhe einer Beanspruchung dienen.

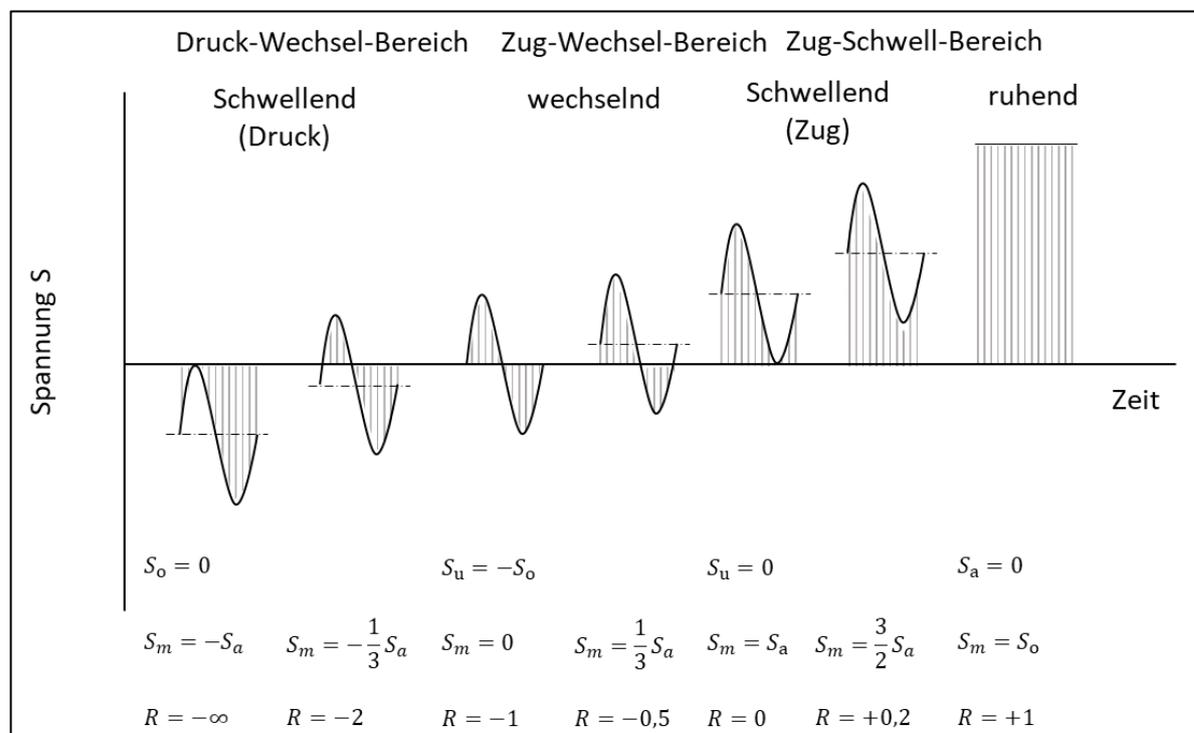


Abbildung 2-7 Beanspruchungsfälle und deren Spannungsverhältnis [18]

Für die Dimensionierung dynamisch beanspruchter Komponenten und Systeme ist neben der Werkstoffauswahl und der Konstruktion der Bauteile vor allem die Abschätzung der Betriebsbelastung von entscheidender Relevanz. Der Grundgedanke der Schadensakkumulationshypothese beruht darauf, dass jede schwingende Beanspruchung im Werkstoff eine Teilschädigung zur Folge hat, welche sich im Laufe fortwährender Beanspruchung aufsummiert, bis ein kritischer Schädigungswert erreicht ist. Dieser Wert steht für das theoretische Bauteilversagen. Die auf das Bauteil einwirkende Schwingbeanspruchung und die experimentell oder auf der Basis von Geometrie, Werkstoff und Fertigungsverfahren hergeleitete Wöhlerlinien bilden die Ein-

gangsgrößen für die Lebensdauerberechnung, Abbildung 2-8. Bei der linearen Schadensakkumulationshypothese nach Miner [18] [19] werden die Lastzyklen n_1 einer spezifischen Spannungsamplitude σ_{a1} in ein Verhältnis zu der theoretisch maximal ertragbaren Anzahl an Lastzyklen N_1 der Bauteil- Wöhlerlinie gesetzt. Die Einzelschädigungen d_i bilden aufsummiert die Gesamtschädigung D , welche bei einem Wert von 1 ein theoretisches Bauteilversagen darstellt.

$$D = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_i}{N_i} = \sum_{i=1}^j \frac{n_i}{N_i} = \sum_{i=1}^j d_i. \quad (2.28)$$

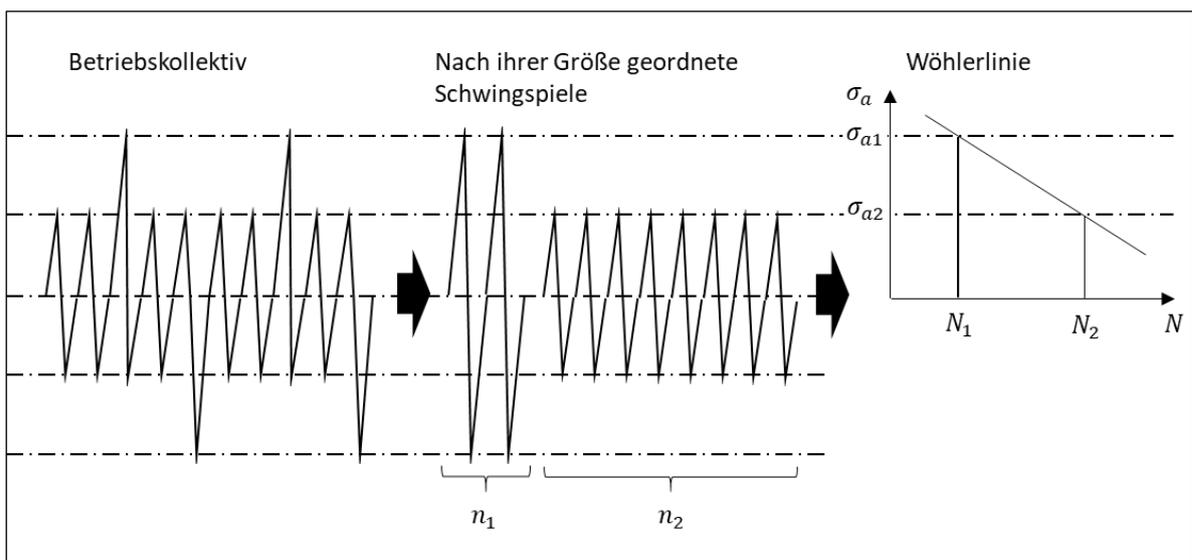


Abbildung 2-8 Darstellung der linearen Schadensakkumulation (In Anlehnung an [22])

Basierend auf der Akkumulation von Teilschädigungen, existieren unterschiedliche Varianten der linearen Schädigungsberechnung. Die lineare Schadensakkumulation nach Miner Original berücksichtigt nur Spannungsamplituden oberhalb der Dauerfestigkeit σ_D [18]. Somit kann die Schwingfestigkeit direkt aus der Zeitfestigkeitslinie, im doppellogarithmischen Netz als gerade dargestellt, berechnet werden

$$N = N_D * \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_D} \right)^{-k} \text{ für } \sigma_a \geq \sigma_D. \quad (2.29)$$

Der Ansatz nach Miner Elementar stellt eine konservative Methode zur Berechnung der Teilschädigungen unterhalb der Dauerfestigkeitsgrenze dar. Während bei der originalen Form der Miner-Regel die Dauerfestigkeitsgerade, und zwar unabhängig von der Vorschädigung der Bauteilgeometrie, einen konstanten Wert annimmt, fällt die Dauerfestigkeit nach Miner Elementar bei einer kleinsten akkumulierten Schädigung $\sigma \ll 1$ auf $\sigma_D = 0$ [18]. Die tatsächliche Abnahme der Dauerfestigkeit aufgrund einer zunehmenden Schädigung der Bauteilgeometrie

liegt dementsprechend irgendwo zwischen beiden Extremfällen. In Abbildung 2-9 sind die möglichen Szenarien der progressiven und degressiven Dauerfestigkeitsabnahme als Funktion der akkumulierten Schädigung sowie das Prinzip der Schadensakkumulation nach Miner Elementar veranschaulicht. Die Wöhlerlinie eines vorgeschädigten Bauteils $D > 0$ erscheint im doppellogarithmischen Netz zu der ursprünglichen Wöhlerlinie mit einer Vorschädigung von $D = 0$ parallel verschoben. Der Abknickpunkt, gekennzeichnet durch die abgeminderte Dauerfestigkeit $\sigma_D(D)$ und die Schwingspielzahl $N_D(D)$, liegt für verschiedene Werte der Vorschädigung D auf der geradlinigen Ortskurve mit dem folgenden formelmäßigen Zusammenhang [18]

$$N_D(D) = N_D * \left(\frac{\sigma_D(D)}{\sigma_D} \right)^{-(k-q)} \quad (2.30)$$

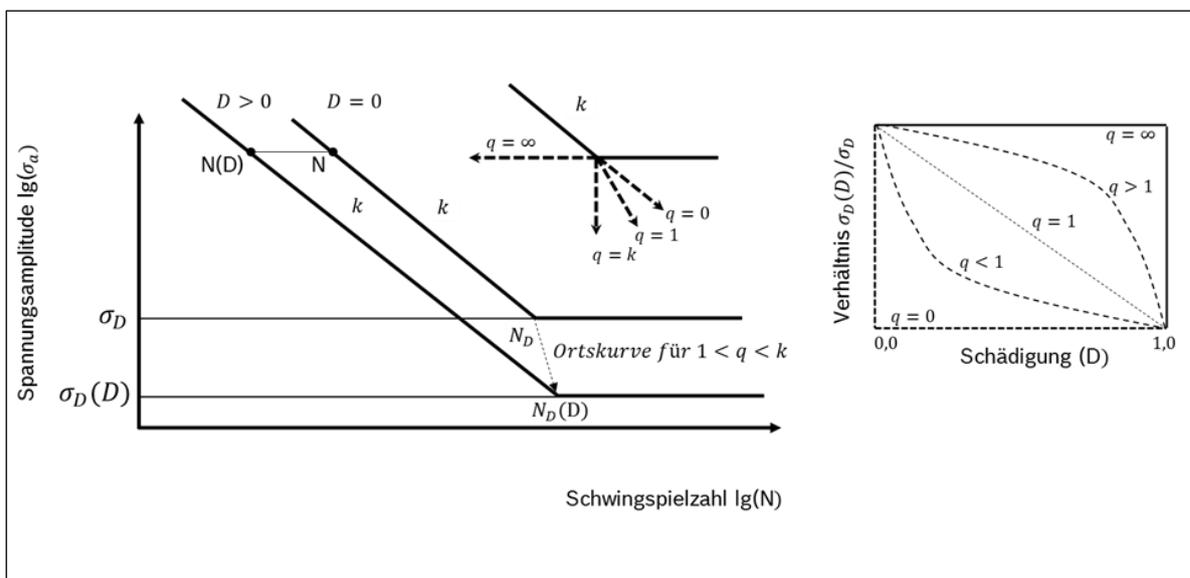


Abbildung 2-9 Szenarien der Dauerfestigkeitsabnahme in Abhängigkeit von der akkumulierten Schädigung als Darstellung der Ortskurve für verschiedene Exponenten q [18]

2.5 Stand des Wissens in der Aufarbeitung

Im folgenden Abschnitt wird auf die wichtigen Zusammenhänge und Begriffe der Aufarbeitung von Altteilen eingegangen. Zudem werden die gängigen Ansätze, Modelle und Methoden auf den Gebieten Restlebensdauer, Wiederverwendungsentscheidung und Lastannahmen vorgestellt und kritisch diskutiert. Es wird darüber hinaus eine Einordnung des Forschungsvorhabens in den aktuellen Stand der Forschung vorgenommen.

2.5.1 Grundlagen der Aufarbeitung

Die Begriffe Aufarbeitung (Remanufacturing), Wiederverwendung (Reuse), Nacharbeit (Rework) und Wiederverwertung (Recycling) sind in der Literatur, vergleiche hierzu [23], [24], [25], oft nicht widerspruchsfrei beschrieben. In ihrer grundsätzlichen Funktion beziehen sich alle Begriffe auf die Wiederverwendung von Systemen, Baugruppen, Komponenten und Materialien sowie die notwendigen industriellen Prozesse, die damit einhergehen. Es wird im Folgenden zwischen drei grundlegenden Strategien in der Aufarbeitung von Altteilen differenziert.

- **Remanufacturing:** Der Begriff Remanufacturing umfasst den gesamten Prozess zur Wiederverwendung von Altteilen, und zwar mit dem Ziel, diese nochmalig und in ihrer ursprünglich spezifizierten Funktion einzusetzen. Reuse und Rework sind als Bestandteile des Remanufacturing zu verstehen.
- **Reuse:** Der Begriff Reuse beschreibt als Teil der Aufarbeitung die direkte Wiederverwendung von Systemen, Baugruppen und Komponenten, welche eine ausreichend hohe Restzuverlässigkeit aufweisen.
- **Rework:** Der Begriff Rework beschreibt eine zusätzliche Nacharbeit als Teil der Aufarbeitung. Relevant ist eine Nacharbeit für solche Systeme, Baugruppen und Komponenten, die keine ausreichend hohe Restzuverlässigkeit für eine direkte Wiederverwendung aufweisen. Die Restzuverlässigkeit muss dementsprechend durch eine Reparatur oder den Austausch von Elementen nachträglich erhöht werden.
- **Recycling:** Unter dem Begriff Recycling wird die Materialverwertung im Rahmen der Altteilentsorgung verstanden.

In Abbildung 2-10 ist der Materialfluss für die beschriebenen drei Strategien dargestellt.

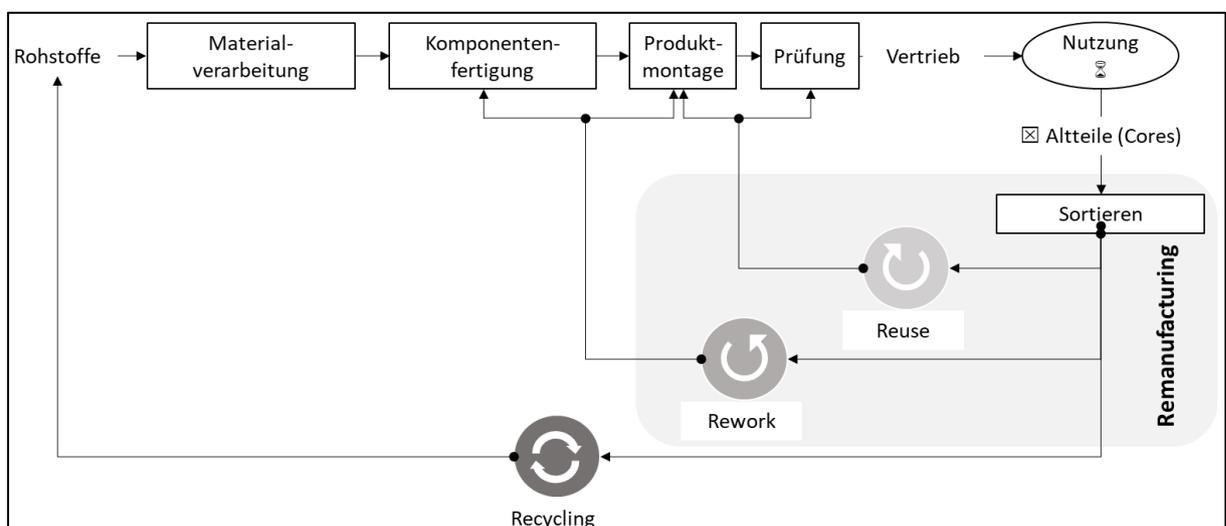


Abbildung 2-10 Materialfluss in der Aufarbeitung (In Anlehnung an [26])

Die Neuteilproduktion besteht aus der Materialverarbeitung, der Fertigung der Komponenten, der Produktmontage und einer Produktprüfung. Nach erfolgter Nutzung im Kundenbetrieb, mit einem nicht näher spezifizierten Austauschgrund, wird das Produkt für eine Aufarbeitung zur Verfügung gestellt. Eine Analyse und Bewertung, hier dargestellt durch das Sortieren, sollen die grundsätzliche Eignung für eine Wiederverwendung verifizieren. Ist keine Nacharbeit erforderlich und weist das Produkt eine hinreichend hohe Restzuverlässigkeit auf, kann eine direkte Wiederverwendung erfolgen. Ist eine direkte Wiederverwendung nicht möglich, erfolgt die Demontage des Produktes in die einzelnen Komponenten. Komponenten, die den Anforderungen genügen, werden direkt dem Produktmontageprozess zugeführt. Komponenten, welche nicht die Anforderungen erfüllen, erfahren einen Nacharbeitsprozess oder werden recycelt. Bei Produkten mit einem überschaubaren Komplexitätsgrad erfolgen die direkte Wiederverwendung (Reuse) oder Reparatur üblicherweise auch unabhängig von einem Aufarbeitungsprozess.

2.5.2 Ansätze, Methoden und Modelle in der Aufarbeitung

Im Folgenden werden die für diese Arbeit relevanten Ansätze, Methoden und Modelle zum Thema Restlebensdauer, Wiederverwendung und Lastannahmen konkretisiert. Eine Übersicht über die ausgewählte Literatur ist der Abbildung 2-11 zu entnehmen.

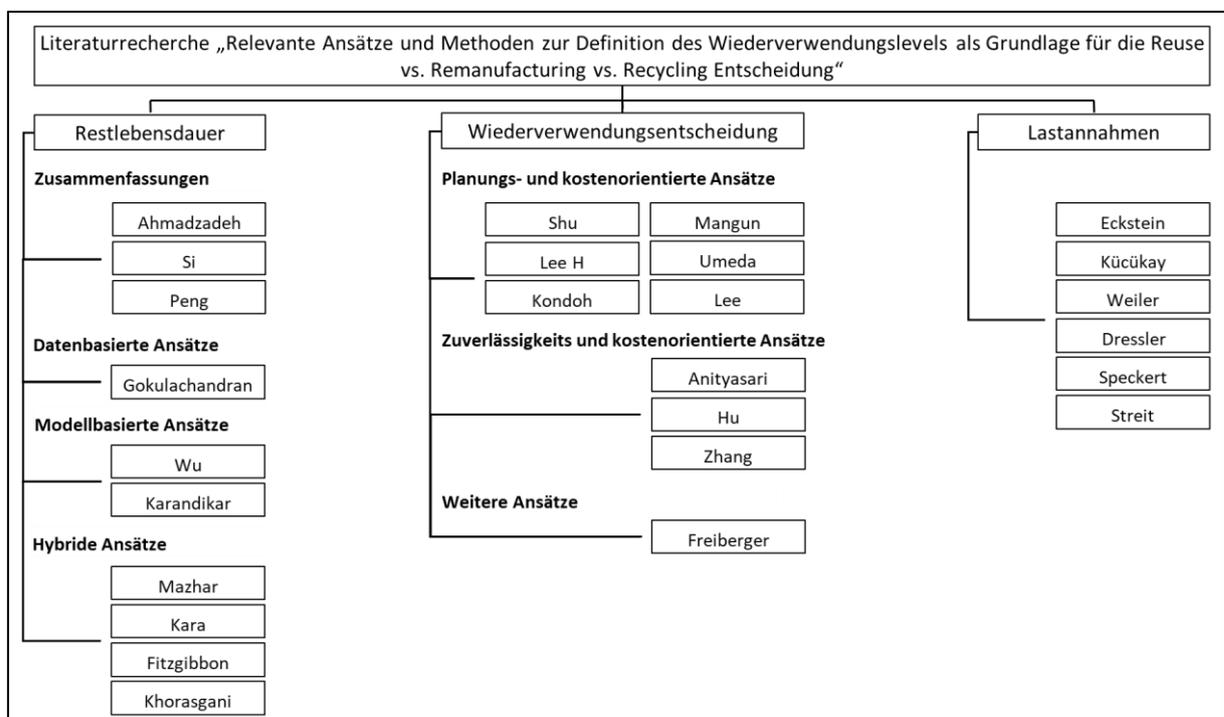


Abbildung 2-11 Überblick über die relevante Literatur

Die Eindeutigkeit der thematischen Eingliederung verschwimmt aufgrund der Themenverwandtschaft der Inhalte und wurde in Bezug auf den Schwerpunkt dieser Arbeit vorgenommen.

2.5.2.1 Abschätzung der Restlebensdauer

Ahmadzadeh und Lundberg [27] und Peng [28] vermitteln einen umfangreichen Gesamtüberblick über die bisher entwickelten Ansätze zur Bestimmung der Restlebensdauer (RLD). Sie diskutieren deren Vor- und Nachteile und unterteilen diese in physikalisch basierte, datengetriebene, experimentelle, wissensbasierte und hybride Ansätze. Eine ähnliche, wenn auch reduzierte Kategorisierung wurde für die Einordnung der Literatur zum Thema „Restlebensdauer“ vorgenommen. Der Beitrag von Si [29] verschafft eine Übersicht über datenbasierte statistische Ansätze und unterteilt diese in die zwei Kategorien „direkt auf beobachteten Daten basierend“ und „nicht auf direkt beobachteten Daten basierend“. Im Folgenden werden die allgemeinen Unterschiede in den Ansätzen erläutert und mit Beispielen aus der Praxis in Beziehung gesetzt.

- **Datenbasierte Ansätze**

Die Anwendung datenbasierter Ansätze erfordert keine spezifische Systemkenntnis und kann auch dann eine adäquate Schätzung der RLD ermöglichen, wenn die modellbasierten Ansätze aufgrund der Systemkomplexität an ihre Grenzen stoßen [30]. Eine entsprechend große Anzahl an Daten bildet jedoch die Voraussetzung für eine repräsentative Aussage [27]. Gokulachandran [31] untersucht in seiner Dissertation die Restlebensdauer und das Potential für einen nochmaligen Einsatz von Schneidwerkzeugen unter der Verwendung von datenbasierten Methoden. Dazu analysiert er experimentell die Zeitspanne bis zu einem definierten Flankenverschleiß. Eine Übersicht über die thematische Einordnung datenbasierter Ansätze kann Abbildung 2-12 entnommen werden.

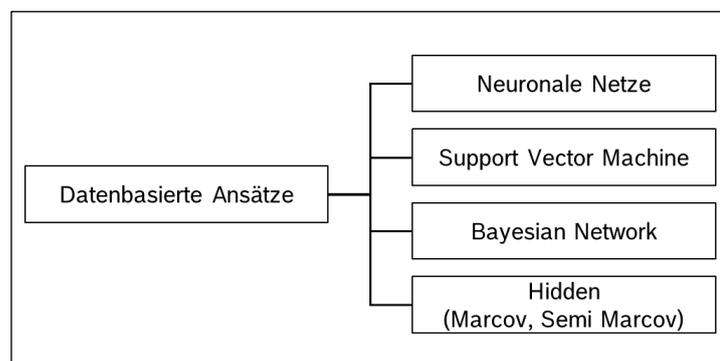


Abbildung 2-12 Übersicht über die thematische Einordnung datenbasierter Ansätze (In Anlehnung an [27])

- **Modellbasierte Ansätze**

Modellbasierte Ansätze setzen im Gegensatz zu den datengesteuerten Ansätzen ein spezifisches Produktverständnis voraus. Sie können dann in Betracht gezogen werden, wenn theoretische Modelle entsprechend den Systemgegebenheiten konsistent für alle relevanten Betriebszustände anwendbar sind [27]. Wu [32] und Karandikar [33] schlagen in ihren Arbeiten eine Abschätzung der RLD auf der Basis des Risswachstums in Verbindung mit verschiedenen Prognosemethoden vor. Wie beschrieben, setzt die Anwendung eines modellbasierten Ansatzes ein spezifisches Verständnis der Beanspruchung und Schädigung im Feld voraus. Dies kann die Nutzbarkeit, insbesondere bei komplexen Systemen, einschränken. Eine Übersicht über die thematische Einordnung modellbasierter Ansätze ist Abbildung 2-13 zu entnehmen.

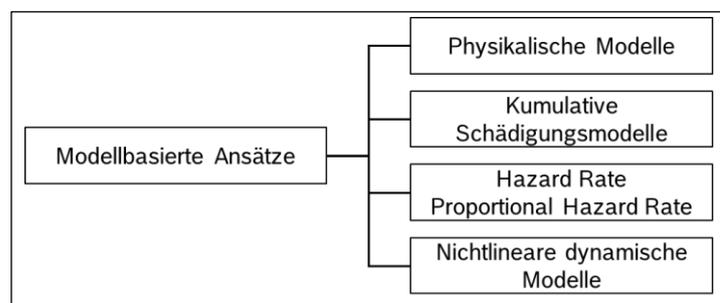


Abbildung 2-13 Übersicht über die thematische Einordnung modellbasierter Ansätze (Eigene Darstellung nach [27])

- **Hybride Ansätze**

Unter hybriden Ansätzen wird die Verwendung von mehr als einer Methode zur Prognose der RLD verstanden. Die hybriden Ansätze können die Schwachstellen einzelner Methoden ausgleichen, die Komplexität der Berechnungen vereinfachen und die Präzision der Vorhersage verbessern. Abbildung 2-14 präsentiert eine Übersicht über hybride Ansätze.

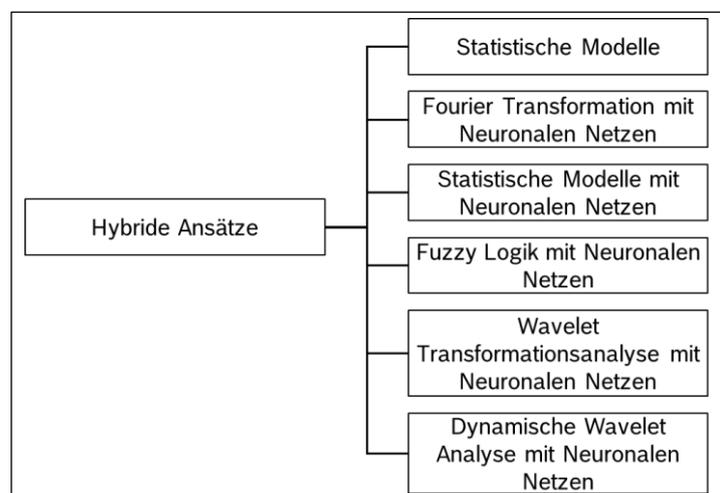


Abbildung 2-14 Übersicht über die thematische Einordnung hybrider Ansätze (Eigene Darstellung nach [27])

Fitzgibbon [34] schlägt eine Zwei Stufen Methode vor. Er verwendet eine Weibull Analyse und eine Auswertung statistischer Muster für eine kombinierte Prognose der mittleren Zeit bis zum nächsten Ausfall (MTTF). Kara [35] und Mazhar [36] [37] verwenden die Weibullanalyse zur Abschätzung der charakteristischen Lebensdauer, ergänzen diese in der zweiten Stufe jedoch durch unterschiedliche datenbasierte Methoden. Sie schlagen dazu die Verwendung von Regressionsanalysen, Neuronalen Netzen oder Kringing vor. Khorasgani [38] geht einen anderen Weg und kombiniert die Abschätzung von Systemzuständen mit der Komponentenverschleißrate für eine Prognose der RLD auf der Grundlage der Systemperformanz.

Die Restlebensdauer L_{RLD} kann vereinfacht als Funktion der prognostizierten Gesamtlebensdauer L_P und der konsumierten Lebensdauer L_K dargestellt werden [31].

$$L_{RLD} = L_P - L_K. \tag{2.31}$$

Im Prinzip beruhen alle Ansätze, Modelle und Methoden darauf, eine möglichst gute Annäherung dieser beiden Parameter zu erzielen, um mit einer entsprechenden Güte eine Prognose der Restlebensdauer abzuleiten. Abbildung 2-15 vermittelt einen Überblick über das beschriebene Vorgehen zur Bestimmung der Restlebensdauer.

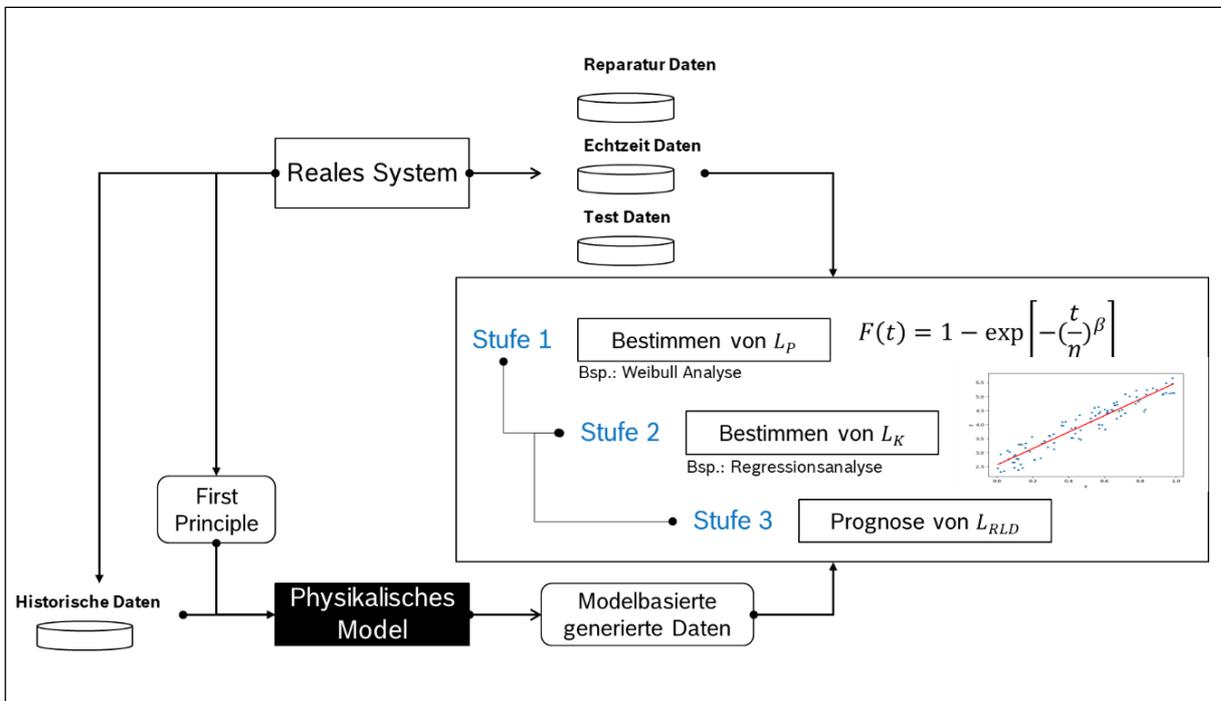


Abbildung 2-15 Allgemeines schematisches Vorgehen zur Bestimmung der Restlebensdauer; Zur bestmöglichen Abschätzung der Lebensdauer (L_P), der konsumierten Lebensdauer (L_K) und der Prognose der Restlebensdauer (L_{RLD}) können modellbasierte Daten, aus physikalischen Modellen, mit real generierten Daten kombiniert werden

2.5.2.2 Ansätze zur Bestimmung der Wiederverwendungsstrategie

In diesem Abschnitt werden Ansätze, Modelle und Methoden zur Bestimmung der optimalen Wiederverwendungsstrategie vorgestellt. Die für diese Arbeit relevante Literatur lässt sich in die drei Kategorien planungs- und kostenorientierte Ansätze, zuverlässigkeits- und kostenorientierte Ansätze und weitere Ansätze untergliedern. Die planungs- und kostenorientierten Ansätze berücksichtigen in vielen Publikationen zwar die Zuverlässigkeit als relevanten Parameter, beziehen sich aber hauptsächlich auf die ökonomische Modellierung der Entscheidungsgrundlage und eine rechtzeitige Lebenszyklusplanung. Die zuverlässigkeits- und kostenorientierten Ansätze legen hingegen den Schwerpunkt auf die Zuverlässigkeit und das Zusammenspiel mit den Kosten sowie auf eine Abschätzung des konsumierten Lebens. Die Kategorie weitere Ansätze vereint Ansätze in sich, welche eine allgemeine Herangehensweise an die Aufarbeitung von mechatronischen Lenksystemen thematisieren.

- **Planungs- und kostenorientierte Ansätze**

Shu und Flowers [39] untersuchen den kostenseitigen Einfluss verschiedener Fügemethoden auf das Remanufacturing und betrachten auch die Relation zu anderen Lebenszykluskosten in der Erstausrüstung. Der Ansatz stellt eine direkte Verbindung zu den Designentscheidungen im Entwicklungsprozess her. Die Berechnung der allgemeinen Aufarbeitungskosten C_{rm} erfolgt mithilfe der zusätzlich anfallenden Demontage- und Montagezeiten T , des benötigten Arbeitsaufwands C_{Arbeit} , der auftretenden Fehlerkosten C_F und der Ausfallwahrscheinlichkeit nach der Aufarbeitung P_F .

$$C_{rm} = (T_{Demontage} + T_{Montage}) * C_{Arbeit} + P_F * C_F. \quad (2.32)$$

Im Anschluss daran werden die Kosten in der Erstausrüstung C_{EA} hinzugefügt, um die Lebenszykluskosten C_{LC} zu ermitteln (2.33). Somit ermöglicht dieser Ansatz bereits bei der Designentscheidung eine lebenszykluskostenorientierte Entscheidung. Es wird jedoch vorausgesetzt, dass der Einfluss des Designs auf die Ausfallwahrscheinlichkeit bekannt oder mit bestehenden Modellen ermittelbar ist.

$$C_{LC} = C_{rm} + C_{EA} \quad (2.33)$$

Mangun und Thurston [40] stellen in ihrer Veröffentlichung ein neues Entscheidungsmodell vor. Das Modell beruht auf der Maximierung des Gesamtportfolionutzens $U(X)$, Gl. (2.34). Es berücksichtigt den Nutzen individueller Kundengruppen für jeden Produktlebenszyklus l eines

Produktes p , in der Designentscheidung. Alle Kundengruppennutzenfunktionen basieren auf dem individuellen Nutzen $U(X_{j,p,l})$, welcher wiederum eine Funktion aus den verschiedenen Attributen, j wie Kosten, der resultierenden Zuverlässigkeit und den spezifischen Umweltauswirkungen darstellt. K_p beschreibt einen Normierungsparameter und $k_{j,p}$ einen Skalierungsfaktor für den Nutzen des Attributes j , jeweils bezogen auf das Produkt p . Als Entscheidungsoptionen werden das Remanufacturing, die direkte Wiederverwendung, das Recycling und der Neuteilaustausch in Betracht gezogen.

$$\max U(x) = \sum_{l=1}^r \sum_{p=1}^z \frac{1}{K_p} \left[\prod_{j=1}^3 (K_p * k_{j,p} * U(X_{j,p,l}) + 1) - 1 \right] \quad (2.34)$$

Für $p = (1, \dots, z)$, $l = (1, \dots, r)$

Das vorgestellte Modell soll eine langfristige Planung der Aufarbeitungsstrategie ermöglichen und die Bestimmung des optimalen Zeitraums für eine Produktrücknahme vereinfachen. Mangun und Thorsten berücksichtigen die vielfältigen Möglichkeiten zur Aufarbeitung eines Produktes, indem Sie zwischen mehreren Optionen in den einzelnen Kundengruppen unterscheiden. Die Anwendung des Ansatzes erfordert ein grundlegendes Verständnis der Zuverlässigkeitskenngrößen und der vorherrschenden Marktmechanismen in Bezug auf die Kundengruppenpräferenzen der verschiedenen Attribute.

Umeda [41] unterscheidet in seinem Ansatz zwischen verschiedenen Ausfallarten und unterteilt diese in physikalische und in wertebasierte Ausfallursachen. Als physikalische Ausfallursachen werden in seiner Arbeit Ursachen bezeichnet, welche auf der Abnutzung eines Produktes oder einer Komponente basieren und zum Beispiel funktionale Fehler zur Folge haben können. Wertebasierte Ausfallursachen hingegen beruhen auf dem Produktalter oder der jeweiligen Produktgeneration. Die Produkte werden aufgrund neuer Trends als nicht mehr zeitgemäß entsorgt. Abbildung 2-16 zeigt das für die Lebenszyklusentscheidung entwickelte „life cycle option selection chart“. Die beiden Indikatorvariablen Lebenszeiteffizienz lfe und relative Lebenszeit lfr setzen sich für jede Komponente k , wie in Gl. (2.35) und Gl. (2.36) dargestellt, zusammen.

$$lfe(k) = vlt(k)/plt(k) \quad (2.35)$$

$$lfr(k) = lt(k)/Avg(lt(k)) \quad (2.36)$$

$$k \in P$$

$vlt(k)$ entspricht der wertebasierten Lebensdauer und $plt(k)$ der physikalischen Lebensdauer. Für die Berechnung der relativen Lebensdauer wird die komponentenbasierten Gesamt-

lebensdauer $lt(k)$ aus den Ausfallverteilungen bestimmt und in ein Verhältnis zu der durchschnittlichen Produktlebensdauer $Avg(lt(k))$ gesetzt. Wie in Abbildung 2-16 veranschaulicht, eröffnen sich verschiedene Optionen je nach Einordnung der Produkteigenschaften. Eine Instandhaltung (1) ist dann erforderlich, wenn die physische Lebensdauer zu gering ist. Upgrading (2) bedeutet, dass die Komponente in ihrer Ausstattung angepasst werden sollte. Reuse (3) bedeutet, dass die Komponente auf der einen Seite noch zeitgemäß ist und auf der anderen Seite noch genug physisches Restleben bietet. Option (4) stellt die ideale Lösung dar, da die durchschnittliche Produktlebensdauer auch den komponentenspezifischen Lebensdauern entspricht. Die Abschätzung der Parameter erfordert die Erhebung von Ausfalldaten und eine detaillierte Erfassung der Ausfallursache. Resümierend bewertet, bietet die Methode eine gute Entscheidungsgrundlage für die Definition der richtigen Aufarbeitungsstrategie von Konsumgütern. Bei komplexen Systemen für den Automobilbau stößt der Ansatz allerdings auf veränderte Rahmenbedingungen. Insbesondere sicherheitsrelevante Systeme, wie Lenksysteme und Bremssysteme, sind individuell an die jeweilige Fahrzeuggeneration angepasst. Ein Upgrading entfällt aus diesem Grund als eine der möglichen Optionen.

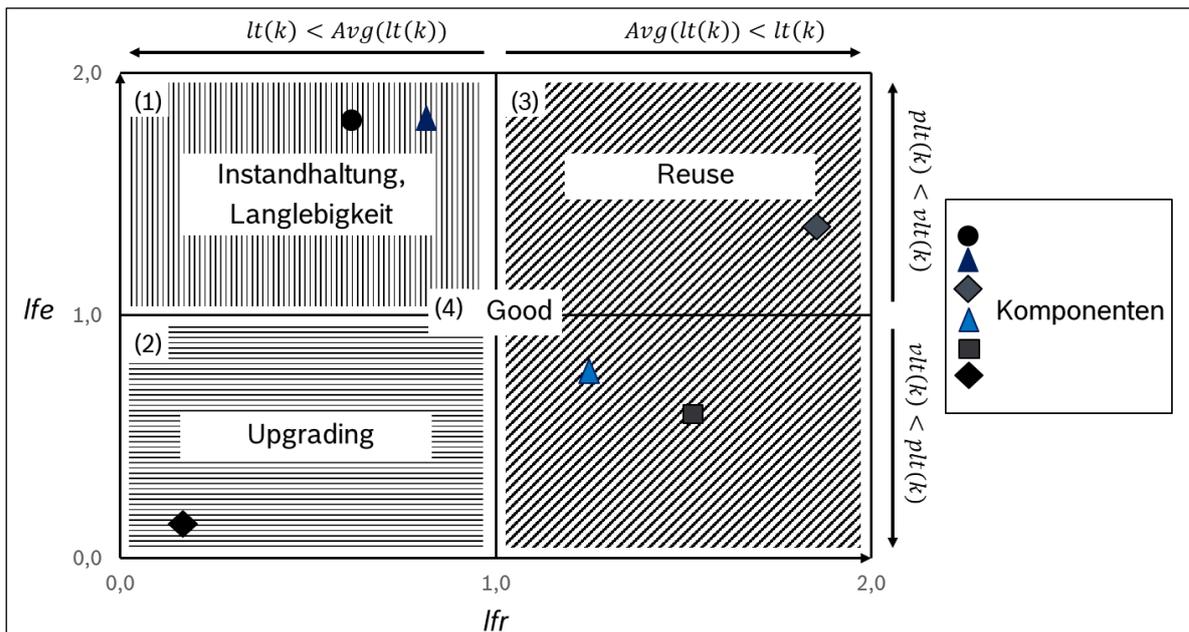


Abbildung 2-16 Life cycle option selection chart for components; Aus dem Vergleich der Komponentenrestlebensdauer mit der Produktlebensdauer ergeben sich unterschiedliche Wiederverwendungsoptionen (Instandhaltung, Reuse, Upgrading) für die Komponenten [41]

In einem weiteren Ansatz schlägt Umeda [42] die Verwendung eines Wiederverwendungsindicators, „marginal Reuse Rate“ (MR) genannt, vor. Dieser wird aus dem Verhältnis der zur Verfügung stehenden Ausfallverteilung der Produkte oder Komponenten $D(t)$ und der Produktnachfrage $S(t)$ gebildet, Gl. (2. 37).

$$MR = \int_0^{\infty} \min(S(t), D(t)) dt \Big/ \int_0^{\infty} S(t) dt \quad (2.37)$$

Wie in Abbildung 2-17 dargestellt, bildet die MR das obere Limit in Bezug auf die Wiederverwendungsrate. Selbst dann, wenn die Rückführquote von Altteilen einhundert Prozent beträgt, kann die MR nicht überschritten werden. Die Abbildung zeigt exemplarisch die maximale nutzbare Menge an Altteilen im Verhältnis zur Produktnachfrage, und zwar bei einer Wiederverwendung für denselben Produkttyp A oder einem kompatiblen Produkttyp B mit einem zeitversetzten Nachfragezyklus. Der Indikator dient nicht zur Unterstützung der direkten Wiederverwendungsentscheidung, sondern bietet ein strategisches Instrument zur Planung.

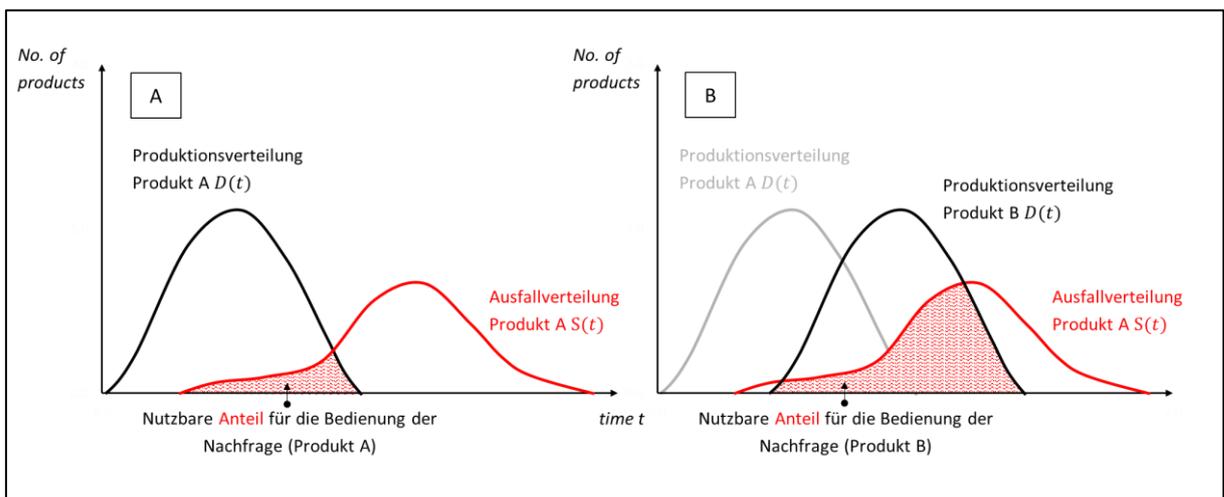


Abbildung 2-17 Marginal Reuse Rate; Die Marginal Reuse Rate (MR) beschreibt die maximale nutzbare Menge an Altteilen im Verhältnis zur Produktnachfrage und dient als strategisches Planungsinstrument [42]

A - MR für denselben Produkttyp

B - MR für einen kompatiblen Produkttyp mit einem zeitversetzten Nachfragezyklus

Es sind weitere Arbeiten zu dem Themakomplex der planungs- und kostenorientierten Entscheidungsmodelle für die Aufarbeitung veröffentlicht worden [43] [44] [45]. Diese beruhen ebenfalls im Wesentlichen auf der Analyse der ökonomischen und ökologischen Rahmenbedingungen zur Ableitung der richtigen Aufarbeitungsstrategie. Die vorgestellten planungs- und kostenorientierten Ansätze bieten die Möglichkeit bereits frühzeitig eine aufarbeitungsrechte Designentscheidung zu treffen. Sie können darüber hinaus als Instrument dienen um in jeder Phase des Produktlebenszyklus die optimale Aufarbeitungsstrategie zu wählen. Für ihre Anwendung ist es jedoch erforderlich die Zuverlässigkeitskenngrößen und die Schädigungszusammenhänge des Produktes zu kennen was, wie in Kapitel 1.1 beschrieben, jedoch nicht für alle automobilen Systemen vollumfänglich gegeben ist.

- **Zuverlässigkeits- und kostenorientierte Ansätze**

Anityasari hat in einer Vielzahl von Publikationen [46] [47] [48] [4] [49] verschiedene Ansätze zur Bestimmung der optimalen Wiederverwendungsstrategien unter der Berücksichtigung von Zuverlässigkeit und Kosten diskutiert. In einer Zusammenarbeit mit Bao und Kaebnick [47] wird ein Modell vorgeschlagen, welches auf den drei Parametern Produktgewinn (PG), Produktlebenszykluskosten (PLCC) und Produktwert (PVL) basiert.

$$PG = PVL - PLCC \quad (2.38)$$

Der PG beschreibt das monetäre Ergebnis aus dem Verkauf nach dem Abzug der PLCC, Gl. (2.38). Der PVL bezeichnet die technische Performanz sowie den qualitativen Zustand eines Produktes und wird aus der Produkteffektivität (PE) und dem Marktpreis (MP) berechnet, Gl. (2.39).

$$PVL = PE * MP \quad (2.39)$$

Die PE steht in einem direkten Verhältnis zu der Zuverlässigkeit eines Produktes und entspricht bei einem Neuteil mit einer Zuverlässigkeit von einhundert Prozent dem Wert eins. Die PLCC repräsentieren die im Rahmen des Produktlebenszyklus anfallenden Kosten, welche sich aus den Produktkosten C_P und den Umweltkosten C_E zusammensetzen.

$$PLCC = C_P + C_E. \quad (2.40)$$

Das Model beruht im Kern auf der Kalkulation und dem Vergleich des PG bei der Produktion von neuen Komponenten (NC) und der Wiederverwendung von alten Komponenten (OC). Dabei stellt ein positiver Wert des ΔPG eine Indikation für ein positives Wiederverwendungspotential von Altteilen dar. Ein neutraler oder negativer Wert kann hingegen als positive Indikation für eine Neuteilproduktion verstanden werden.

$$\Delta PG = PG_{OC} - PG_{NC}. \quad (2.41)$$

Die Grundlage für die Einordnung der PE mittels einer Weibullanalyse ist die Erfassung der Time to failure (TTF) Daten. Diese sind im Rahmen von Instandhaltungs- und Servicemaßnahmen zu erheben. Um Unsicherheiten in Bezug auf die Nutzungsintensität im Feld, auf die physische Beschaffenheit der zurückgeführten Altkomponenten und auf den durch die Rückführquote bedingten kostenseitigen Einfluss zu reduzieren, wird eine Monte Carlo Simulation durchgeführt. Abbildung 2-18 zeigt eine Auswertung für die PE und den ΔPG bei einem verwendeten PE- Grenzwert von 0,9. Am Beispiel von Komponente acht wird deutlich, dass nur

ein Teil der zurückgeführten Einheiten die Zuverlässigkeitsanforderungen erfüllt. Die Wiederverwendung bietet für diese Komponente einen fast identischen Produktgewinn wie die Neuteilproduktion.

Das vorgestellte Modell ermöglicht eine Indikation des Wiederverwendungspotentials von Komponenten am Ende ihres Lebenszyklus. Als positiv hervorzuheben ist, dass sowohl die Unsicherheiten in Bezug auf die Nutzungsvariabilität des Produktes als auch die Beschaffenheit der zurückgeführten Altteile ihre Berücksichtigung in der Berechnung finden.

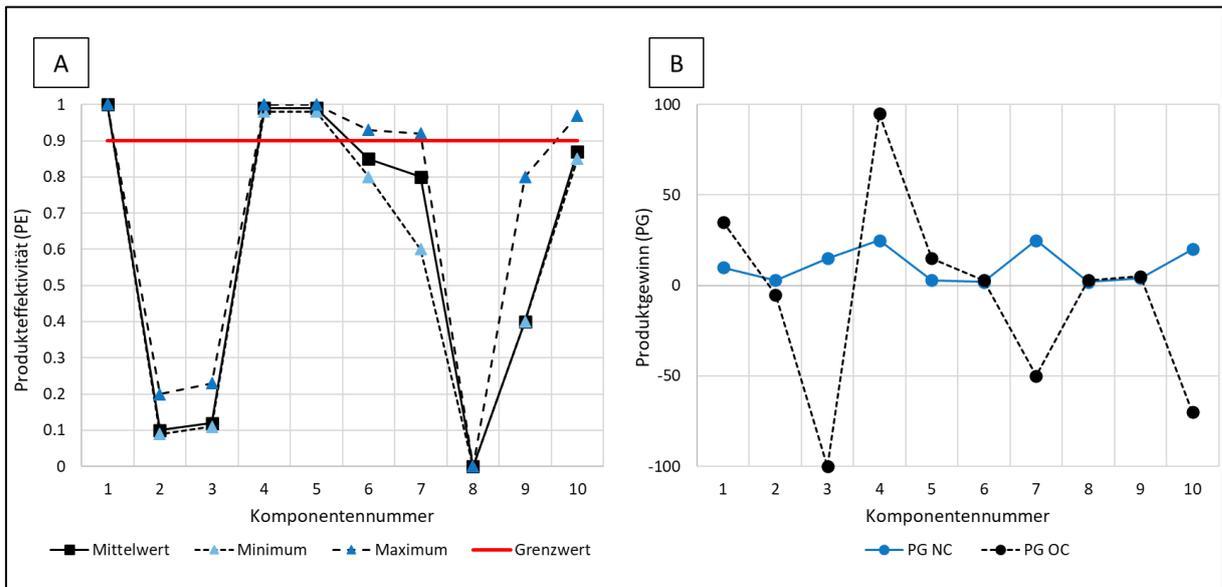


Abbildung 2-18 Komponentenbasierte Auswertung der PE und des ΔPG (In Anlehnung an [47])

A – Produkteffektivität der Komponenten als zuverlässigkeitsbasierter Einflussparameter

B – Produktgewinn als Vergleich zwischen einem Neuteil und einem Altteil. Werte größer null stehen für ein positives Wiederverwendungspotential

In einem weiteren Ansatz schlagen Anityasari, Kaebernick und Kara [49] dahin gehend vor, auch die Gewährleistungskosten C_w je Lebenszyklus i in der Wiederverwendungsentscheidung zu berücksichtigen. In diesem Zusammenhang wird die Gewinnspanne (PM) als Referenzgröße eingeführt. Die Gewährleistungskosten C_w je verkaufte Einheit, welche von den Produzenten als Rückstellung gebildet werden, setzen sich aus den PLCC und den erwarteten Ausfällen $F(t_w)$ zusammen, Gl. (2. 42). Die Gewinnspanne (PM) ist aus dem Verhältnis zwischen Erlös und Kosten zu berechnen (2. 43).

$$C_w = E[C_w(t_w)] = PLCC * \frac{F(t_w)}{1-F(t_w)} = PLCC * \frac{F(t_w)}{R(t_w)} \quad (2. 42)$$

$$PM = \frac{MP_1 - PLCC_1}{PLCC_1} \quad (2. 43)$$

Für den Vergleich verschiedener Wiederverwendungsstrategien wird die Berücksichtigung ihrer zusätzlichen Gewährleistungskosten ΔC_{W_2} bei einer identischen Gewährleistungsperiode t_W vorgeschlagen. Dies ermöglicht zudem den Vergleich mit einem Neuteil.

$$\Delta C_{W_2} = C_{W_2} - C_{W_1} \tag{2.44}$$

Mit $i = 1, 2, \dots$ = der i -te Lebenszyklus

$$PM \leq \frac{MP_2 - (PLCC_2 + \Delta C_{W_2})}{(PLCC_1 + \Delta C_{W_2})} \tag{2.45}$$

Die Bewertung der Restlebensdauer spielt in diesem Zusammenhang eine nicht unerhebliche Rolle und soll nach der in [49] beschriebenen Strategie möglichst schon vor Beginn der Teilerückführung vorhanden sein. Zuerst wird die Lebensdauerverteilung definiert, das Alter der wiederzuverwendenden Produkte geschätzt und im Anschluss daran das Wiederverwendungspotential bestimmt. Neben der Weibullanalyse ist eine Vielzahl an Methoden zur Bestimmung der Restlebensdauer, wie in Kapitel 2.5.2.1 aufgeführt, möglich.

Anityasari und Kaebernick beschrieben in einem weiteren Ansatz [46] drei Wiederverwendungsszenarien auf der Grundlage zuvor definierter Zuverlässigkeitsgrenzen, Abbildung 2-19.

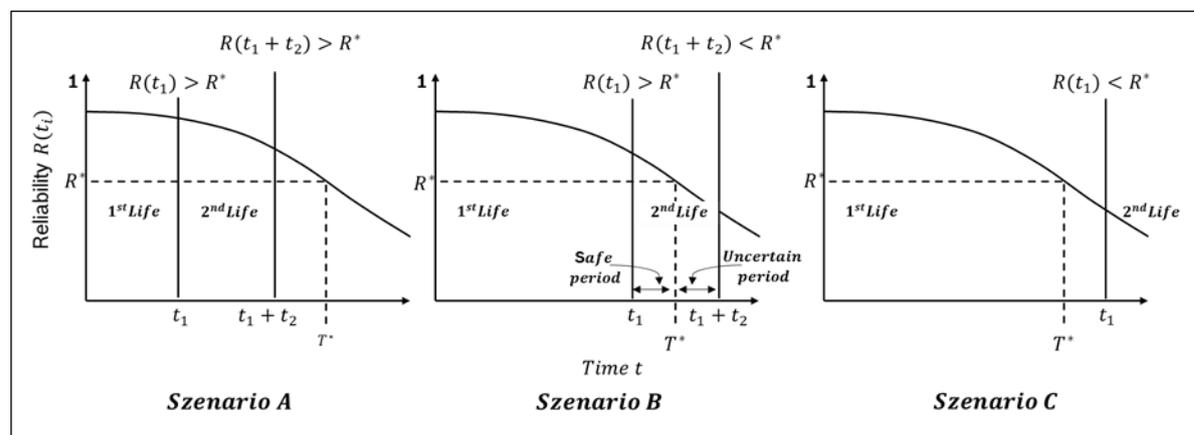


Abbildung 2-19 Drei Szenarien der zuverlässigkeitsorientierten Wiederverwendungsentscheidung [46]

Szenario A – Die Restzuverlässigkeit nach dem ersten und einem möglichen zweiten Lebenszyklus ist ausreichend hoch für eine direkte Wiederverwendung

Szenario B – Die Restzuverlässigkeit liegt für den zweiten Lebenszyklus unterhalb der geforderten Zuverlässigkeitsgrenze

Szenario C – Die Restzuverlässigkeit liegt bereits nach dem ersten Lebenszyklus interhalb der Zuverlässigkeitsgrenze

Die Entscheidung für die Auswahl der richtigen Strategie basiert auf der Restzuverlässigkeit $R(t_1)$ nach dem ersten Lebenszyklus t_1 sowie der Zuverlässigkeit $R(t_1 + t_2)$ nach dem zweiten Lebenszyklus t_2 . Die Bewertung erfolgt jeweils vor dem Hintergrund des Zuverlässigkeits-

grenzwertes R^* . Durch Szenario A wird die direkte Wiederverwendung (Reuse) von Systemen, Baugruppen und Komponenten beschrieben, welche eine ausreichend hohe Zuverlässigkeit nach dem ersten Lebenszyklus aufweisen und deren Zuverlässigkeit auch nach dem zweiten Lebenszyklus oberhalb der geforderten Zuverlässigkeitsgrenze liegt, Gl. (2. 46).

$$R(t_1) > R^* \text{ und } R(t_1 + t_2) > R^*; t_1, t_2 \geq 0 \quad (2. 46)$$

In Szenario B liegt die Zuverlässigkeit nach dem ersten Lebenszyklus ebenfalls oberhalb des geforderten Grenzwertes, jedoch liegt die Zuverlässigkeit nach dem zweiten Lebenszyklus unterhalb der Zuverlässigkeitsgrenze, Gl. (2. 47).

$$R(t_1) > R^* \text{ und } R(t_1 + t_2) < R^*; t_1, t_2 \geq 0 \quad (2. 47)$$

Der zweite Lebenszyklus ist aus diesem Grund in einen sicheren Bereich $t_s \in [t_1; T^*]$ und einen unsicheren Bereich $t_u \in]T^*; t_1 + t_2]$ unterteilt. Als Optionen ergeben sich für Szenario B die direkte Wiederverwendung (Reuse), die Wiederverwendung mit zusätzlichem Aufarbeitungsprozess (Remanufacturing) und das Recycling des Altteils.

In Szenario C liegt die Zuverlässigkeit nach dem ersten Lebenszyklus bereits unterhalb der Zuverlässigkeitsgrenze, Gl. (2. 48). Hier empfiehlt sich generell das Recycling.

$$R(t_1) < R^*; t_1, t_2 \geq 0 \quad (2. 48)$$

Um zwischen den genannten Wiederverwendungsstrategien Reuse, Remanufacturing und Recycling die optimale Option auszuwählen, wird vorgeschlagen, die Entscheidung auf der Basis strategischer und ökonomischer Parameter zu treffen. Anityasari und Kaebnick verweisen in diesem Zusammenhang auf das in [49] aufgezeigte Modell des Gewinnspannenvergleiches. Zhang greift in seinem „EOL Strategies Evaluation Support System (EOLSESS)“ [50] die drei Szenarien aus Abbildung 2-19 auf und legt den Schwerpunkt auf die Bestimmung der in Gl. (2. 31) dargestellten Parameter. Für die Abschätzung der Gesamtlebensdauer L_p verwendet Zhang eine Weibullanalyse und für die Ermittlung der bereits konsumierten Lebensdauer wird eine Analyse mittels künstlicher neuronaler Netze (KNN) durchgeführt. Die Ansätze von Hu [51] [52] basieren ebenfalls auf den zuvor diskutierten drei Szenarien der Wiederverwendungsentscheidung, unterscheiden sich aber in der Auswahl der Methoden zur Bestimmung der RLD. Hu schlägt vor, dass Online Monitoring stärker in die Zuverlässigkeitsabschätzung miteinzubeziehen und die Parameter L_K und L_{RLD} , unter Berücksichtigung bauteilspezifischer Aspekte zu bestimmen. Dies kann mittels der Verwendung der Support Vector Machine (SVM)



Methode [51] oder einer Kombination aus der State Space Model (SSM) Methode und einem physikalischen Modell, wie der Risswachstumsgeschwindigkeit, [52] geschehen.

Der vorgestellte Ansatz bietet die Herleitung einer Entscheidungsgrundlage für die genannten Aufarbeitungsstrategien und berücksichtigt sowohl die Zuverlässigkeit als auch die wirtschaftliche Perspektive in der Entscheidungsfindung. Wie bei allen gezeigten zuverlässigkeits- und kostenorientierten Ansätzen erfordert auch dieser Ansatz, dass die grundlegenden Zuverlässigkeitskenngrößen vorhanden sind. Eine variable Gestaltung der Wiederverwendungsgrenzwerte, im Hinblick auf die Produktnutzung und die Zuverlässigkeitsanforderungen für den zweiten Lebenszyklus des Produktes, wird von keinem Ansatz betrachtet.

- **Weitere Ansätze**

Freiberger von der Universität Bayreuth untersucht in seiner Forschung [53] die unvollständige Informationslage zurückgeführter Altteile. Diese soll durch ein Reverse Engineering und das Durchführen von Referenzstudien ausgeglichen werden. Er bietet darüber hinaus ein allgemeines Vorgehen zur Herleitung der Wiederverwendungsentscheidung mechatronischer Systeme auf der Grundlage von Feldstudien.

2.5.2.3 Ermittlung repräsentativer Lastannahmen

Weiler [54] und Küçükay [55] beschrieben in ihren Veröffentlichungen die am Institut für Fahrzeugtechnik (IfF) der TU- Braunschweig entwickelte 3F Methode. Die 3F Methode bietet ein Mittel zur repräsentativen Anforderungsermittlung und dient als Basis für die Entwicklung und Dimensionierung, die Auslegung und die Erprobung von Fahrzeugkomponenten. Die Methode beinhaltet die Auswahl des problemspezifischen Parameterraums unter Berücksichtigung der 3Fs Fahrer, Fahrzeug und Fahrzeugumgebung. Eine Bewertung der Fahrzeugkomponente im Kundenbetrieb ist ebenfalls Bestandteil des Methodenumfanges und erfolgt durch Bewertungsfahrten. Das Ziel der 3F Methode ist die Identifikation kritischer Kombinationen von Fahrzeug-, Fahrer- und Fahrzeugumgebung. Aus den gewonnenen Erkenntnissen werden im Anschluss daran Maßnahmen für den Umfang der Systemerprobung abgeleitet. Abbildung 2-20 vermittelt einen Überblick über die Datenauswertung für das Beispiel Verbrennungsmotor. Die Kundentypkombinationen sind aus der jeweiligen Kundenanforderung in Bezug auf die Nutzung des zu untersuchenden Systems zu definieren.

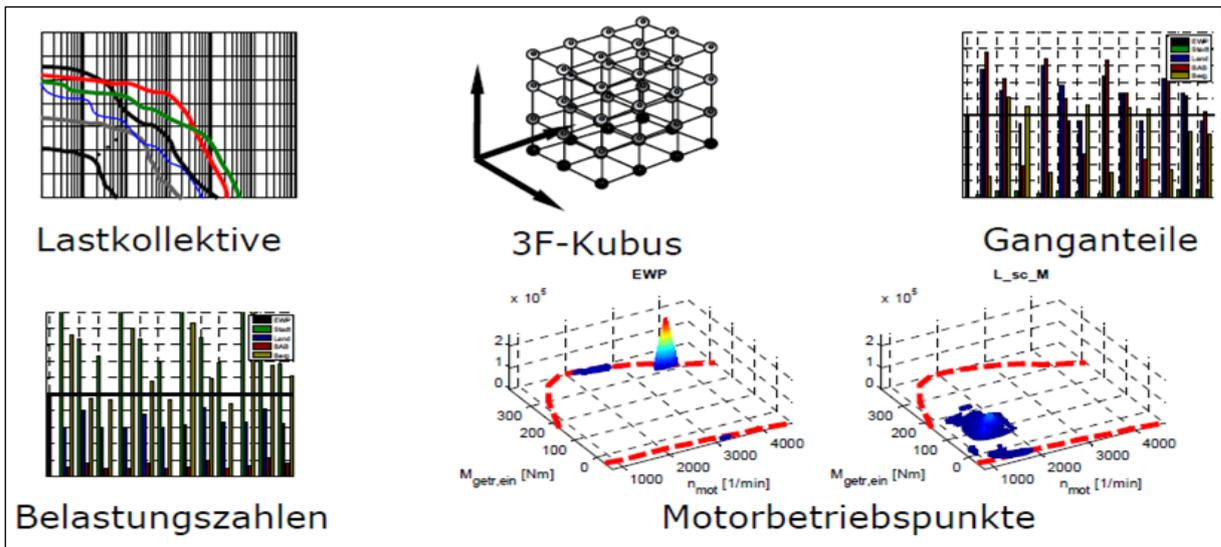
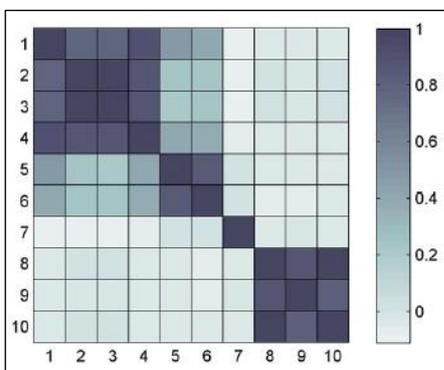


Abbildung 2-20 Auswertung der im Rahmen der 3F Methode gesammelten Daten [55]

Eine weitere Methode zur Bestimmung relevanter Lastfälle wurde am Fraunhofer ITWM entwickelt und ist in den Publikationen von Dreßler [56], Speckert [57] und Streit [58] beschrieben. Analog zu der 3F Methode werden Messfahrten zur Identifikation der einzelnen Schädigungsanteile durchgeführt. Die im Nutzungsbetrieb gesammelten Daten werden im Anschluss daran statistisch ausgewertet, in Einzelabschnitte je Anwendungsgebiet und Auswertungskanal zerlegt und über den zeitlichen Verlauf hinweg normiert. Eine Schädigungsberechnung je Kanal liefert die notwendige Vergleichbarkeit der Beanspruchungsintensitäten. Mittels einer Korrelationsanalyse sollen die repräsentativen Kanäle identifiziert werden, Abbildung 2-21. In der Abbildung ist eine Korrelationsmatrix mit zehn Kanälen dargestellt, wobei vier Gruppen in Bezug auf die Korrelation der Schädigungswerte zwischen den Kanälen identifiziert werden können. Zu berechnen sind die Korrelationskoeffizienten unter Verwendung von Gl.(2. 49). Die Variable $d_{i,k}$ beschreibt den Schädigungswert von Kanal i bei der k -ten Messung.



$$Corr(i, j) = \frac{\sum_{k=1}^n (d_{i,k} - \bar{d}_i)(d_{j,k} - \bar{d}_j)}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (d_{i,k} - \bar{d}_i)^2 \sum_{k=1}^n (d_{j,k} - \bar{d}_j)^2}}$$

$$\bar{d}_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n d_{i,k} \text{ und } \bar{d}_j = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n d_{j,k} \tag{2. 49}$$

Abbildung 2-21 Korrelationsmatrix am Beispiel von 10 verschiedenen Kanälen [58]

Anschließend erfolgt die Untersuchung der geschätzten statistischen Kenngrößen mittels einer Varianzanalyse. Das Ziel ist darauf ausgerichtet, eine kanalspezifische Einordnung der Messungen vorzunehmen und diese miteinander zu verknüpfen. Aus den ermittelten repräsentativen Anwendungen wird die Schädigungsverteilung unter Verwendung einer Monte-Carlo-Simulation geschätzt. Darauf aufbauend, wird ein repräsentatives Lastprofil abgeleitet. Abbildung 2-22 veranschaulicht das beschriebene Vorgehen.

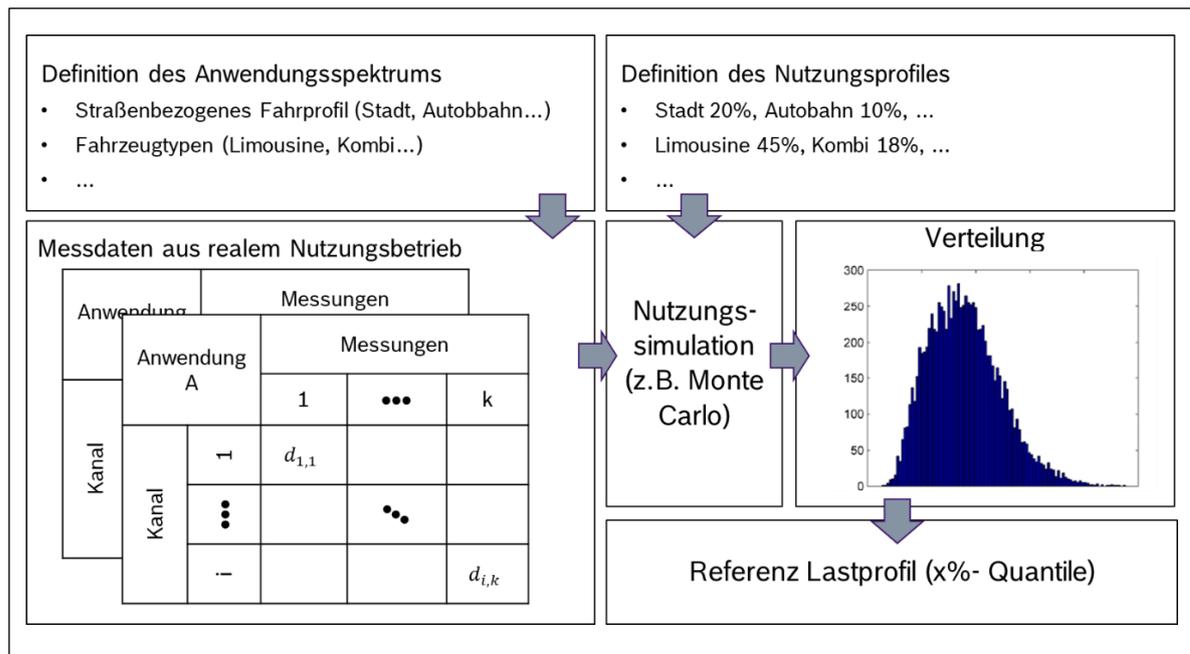


Abbildung 2-22 Methode des Fraunhofer ITWM zur Identifikation repräsentativer Lastprofile; Ableitung der Referenzlastprofile aus der Monte Carlo Simulation, unter Verwendung von Messdaten aus dem Nutzungsbetrieb und zuvor definierter Nutzungsprofile (Darstellung in Anlehnung an [58] und [59])

Eckstein greift in seiner Dissertation [59] die Verfahren des ITWM und des IFF auf und erweitert speziell die Methode des ITWM für eine Anwendung bei Landmaschinen. Die Arbeit von Eckstein ist ein Beispiel für die Modellanpassung bei einer hohen Anwender- und Anwendungsvielfalt.

Die vorgestellten Methoden bieten ein strukturiertes Vorgehen zur Ermittlung kritischer Lastfälle und berücksichtigen das umfangreiche Anwendungsspektrum von Fahrzeugkomponenten. Zur Übertragbarkeit auf den vorliegenden Anwendungsfall sollte das Anwendungsspektrum jedoch nochmals erweitert werden, um auch bei komplexen Systemen die Vielfalt der Systemausprägungen abzubilden. Auch ist das Durchführen von Messfahrten aufgrund der hohen Anwendungsvielfalt als unverhältnismäßig einzustufen. Hier muss eine Verknüpfung der bestehenden Methoden mit der verfügbaren Datengrundlage erarbeitet werden.

2.5.2.4 Bewertung der vorgestellten Ansätze, Modelle und Methoden

Im Bereich der Restlebensdauerabschätzung, siehe Kapitel 2.5.2.1, wurden zahlreiche Vorschläge zur methodischen Einordnung von Altteilen erarbeitet und publiziert. Bei den datenbasierten Ansätzen bildet eine repräsentative Datengrundlage zur Bestimmung der charakteristischen Lebensdauer eine notwendige Voraussetzung. Diese besteht in den meisten Ansätzen aus Ausfall- oder Reparaturdaten. Aber auch Betriebsdaten in Form einer Echtzeitüberwachung, Referenzmessungen zur Bestimmung der Schädigung nach einem festgelegten Zeitintervall oder eine kombinierte Verwendung der genannten Verfahren finden ihre Anwendung. Wie in Kapitel 1.1 beschrieben, fehlt eine repräsentative Datengrundlage für Lenksysteme. Es besteht eine Informationslücke $t_N - t_w$ für das Ausfallverhalten außerhalb der Gewährleistungsperiode t_w , Abbildung 2-23. Die Variable t_{pl} beschreibt die passive Lagerzeit eines Altteils nach seinem Ausbau bis zur physischen Vereinnahmung und Bewertung. Hu [51] [52] und Zhang [50] merken zudem an, dass der reale System- und Komponentenverschleiß bei einer rein datenbasierten Vorhersage der Restlebensdauer mit Unsicherheiten behaftet ist.

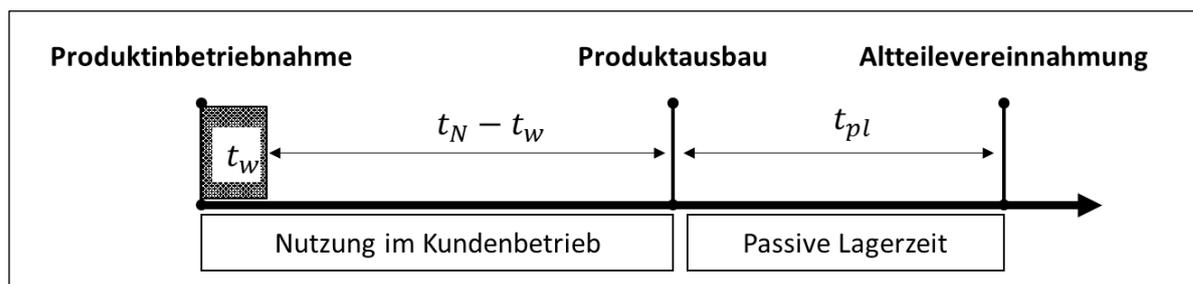


Abbildung 2-23 Relevante Zeiträume im Produktlebenszyklus; Nach dem Gewährleistungszeitraum (t_w) besteht eine Informationslücke in Bezug auf die über diesen Zeitraum hinausgehende Nutzung im Kundenbetrieb ($t_n - t_w$)

Ein modellbasierter Ansatz zur Abschätzung der Restlebensdauer, vergleiche hierzu [27] [32] [33], setzt ein spezifisches Verständnis von Beanspruchung und Beanspruchbarkeit voraus. Wie in Kapitel 1.1 beschrieben, sind weder die Beanspruchung noch die Beanspruchbarkeit von Lenksystemen im Rahmen eines spezifizierten Feldlebens bekannt. Auch fehlen Modelle für den Zusammenhang zwischen Beanspruchung und Schädigung im Feld. Eine zuverlässigkeitsorientierte Einordnung des konsumierten Lebens L_K in den Kontext der Gesamtlebensdauer L_P ist aus diesem Grund mit einem modellbasierten Ansatz nicht möglich.

Die hybriden Ansätze benötigen analog zu den datenbasierten Ansätzen eine Datengrundlage zur Prognose der Restlebensdauer. Ebenfalls zur Anwendung kommen Elemente der modellbasierten Ansätze, welche ebenfalls ein Verständnis der Schädigungszusammenhänge voraus-



setzen. Die Vorteile eines hybriden Vorgehens liegen jedoch in der kombinierten Verwendung einzelner Methoden zum Ausgleich von Schwachstellen, zur Reduktion der Komplexität und zur Verbesserung der Prognose. Unter Berücksichtigung der bestehenden Herausforderungen in der Aufarbeitung von Lenksystemen, bietet ein hybrides Vorgehen sicherlich die notwendige Flexibilität um die vorhandenen Unsicherheiten beherrschbar zu machen. Es erfordert jedoch auch das Schaffen einer ausreichenden Datengrundlagen ohne Ausfalldaten, das Erarbeiten der erforderlichen Schädigungszusammenhänge und das Anpassen der Parameter zur Zuverlässigkeitsabschätzung.

Lösungsansätze zur Bestimmung der Aufarbeitungsstrategie wurden in einigen Publikationen, siehe Kapitel 2.5.2.2, diskutiert. Die planungs- und kostenorientierten Ansätze thematisieren eine frühzeitige Entscheidung bereits während der Designphase. Sie setzen jedoch voraus, dass die erforderlichen Zuverlässigkeitskenngrößen und Schädigungszusammenhänge bereits frühzeitig in der Kostenbetrachtung berücksichtigt werden können. Wie in Kapitel 1.1 dargestellt gilt es die erforderlichen Kenngrößen und Zusammenhänge für komplexe Systeme zunächst erst zu erarbeiten bevor diese in die frühzeitige Planung der optimalen Aufarbeitungsstrategie einfließen können. Die zuverlässigkeits- und kostenorientierten Ansätze legen den Schwerpunkt auf die Zuverlässigkeitsabschätzung. Der Ansatz von Anityasari und Kaebnick [46] [49], die Wiederverwendungsentscheidung um die drei Szenarien Reuse, Remanufacturing und Recycling zu erweitern sowie kostenseitig zueinander in Beziehung zu setzen, wurde bereits in einigen Publikationen aufgegriffen [50] [51] [52]. Für die Übertragbarkeit des Ansatzes auf die vorliegende Problematik sind jedoch Änderungen erforderlich. Die zugrunde liegende Referenzvariable „Zeit“ t eignet sich nur als Indikator zur Abschätzung der Zuverlässigkeit, wenn davon ausgegangen werden kann, dass diese als Parameter tatsächlich verfügbar ist. Zudem muss sichergestellt sein, dass ein zu betrachtendes Produkt mit zunehmender Zeit im Feld einem repräsentativen Abnutzungsprozess unterliegt. Lenksysteme verschleiben jedoch nicht durch ihre reine Verweildauer im Feld, sondern aufgrund der Intensität ihrer Nutzung während ihrer Feldverweildauer. Oft wird das Produktalter als offensichtliche Alternative verwendet, was aufgrund zum Teil erheblicher passiver Lagerzeiten t_{pl} zu einer Ungenauigkeit und Überbewertung der konsumierten Lebensdauer führt. Aus diesem Grund ist es unerlässlich, alternative Parameter zu definieren, welche zur Abschätzung der Zuverlässigkeit herangezogen werden können. Ebenfalls angepasst werden muss der Wiederverwendungsgrenzwert. Dieser wird als statische Größe aus der Gesamtlebensdauer abgeleitet. Die Realität für Lenksysteme zeigt, dass aufgrund der langen Nachserienversorgungszeiträume eine sukzessive Abnahme der notwendigen Restlebensdauer bei einer



gleichzeitigen Zunahme der potentiellen Vorschädigung nach dem Serienauslauf wahrscheinlich ist. Eine dynamische Anpassung der Wiederverwendungsgrenzwerte ist aus diesem Grund erforderlich.

Für die Ermittlung der Restlebensdauer, ohne repräsentative Ausfalldaten oder eine Echtzeitüberwachung ist es notwendig, die Beanspruchung und die Schädigung im Feld zu kennen. Methoden zur Ermittlung repräsentativer Lastannahmen wurden in Kapitel 2.5.2.3 vorgestellt. Die 3F Methode von Küçükay [55] und Weiler [54] bietet einen guten Ansatz zur Identifikation der kritischsten Betriebszustandskombinationen, erfordert jedoch die Messungen von Betriebsparametern. Wesentlich flexibler in Bezug auf den Parameterraum erweist sich die Methode von Dreßler [56], Speckert [57] und Streit [58]. Für beide Methoden müssen die Datenerhebungs- und die Datenverarbeitungsmethode angepasst werden. Das Messen von Betriebsdaten ist aufgrund der Vielzahl an Fahrzeug- und Systemvariationen, in denen Lenksysteme einer Plattform zur Anwendung kommen können, nicht verhältnismäßig.

Resümierend bietet kein bestehender Ansatz ein ganzheitliches Lösungskonzept welches die in Kapitel 1.1 aufgeführten Herausforderungen in ihrer Summe abdeckt. Zwar werden einige der genannten Probleme vereinzelt aufgegriffen und Teilaspekte diskutiert, jedoch bleibt ein Großteil unberücksichtigt oder wird als bereits gelöst vorausgesetzt. Ein Ansatz welcher alle Themengebiete miteinander Verknüpft und ein strukturiertes Vorgehen, von der Definition der Lastannahmen bis zur Definition der Wiederverwendungsgrenzwerte, ermöglicht fehlt.

2.6 Zielsetzung der Arbeit

Für die Aufarbeitung elektromechanischer Lenksysteme soll ein neuer Ansatz zur Definition der Wiederverwendungsgrenzwerte (WG) unter der Berücksichtigung von Zuverlässigkeit und Kosten entwickelt werden. Bestandteil des neuen Ansatzes sollen die Einordnung der Feldlebensdauer- und Beanspruchungsverteilung und eine vom Fahrzeugalter abhängige Beanspruchungsprognose sein. Die Einordnung der Feldlebensdauer- und Beanspruchungsverteilung soll vor dem Hintergrund der erprobten Grenzen und der spezifizierten Systemlebensdauer vorgenommen werden. Hierbei soll untersucht werden, welchen Einfluss die Nutzungsvariabilität auf die Feldbeanspruchung ausübt. Das Ziel dieser Analyse ist eine Ableitung repräsentativer Beanspruchungskollektive. Die anschließende Verknüpfung von Beanspruchung und Schädigung soll über eine Feldstudie hergeleitet werden. Eine systematische Felddatenerfassung (sFDE) bildet die Datengrundlage zur Analyse der Zusammenhänge. Die sFDE beinhaltet Informationen zum Fahrzeugaufbau, zur Fahrzeugumgebung und zum Fahrprofil.



Weiterhin soll aufgezeigt werden, wie die Individualentscheidung der Wiederverwendung vor dem Hintergrund von Zuverlässigkeit, Kosten und Produktlebenszykluszeit getroffen werden kann. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Wiederverwendung des Gesamtsystems, der mechanischen Baugruppen, der elektronischen Baugruppen und der Komponenten von Lenkgetrieben für Personenkraftfahrzeuge. Die wesentlichen Ziele der Arbeit sind nachfolgend aufgeführt:

- Untersuchung und Bewertung bestehender Ansätze zur Definition der Wiederverwendungsgrenzwerte in der Aufarbeitung.
- Erarbeitung der Feldbeanspruchungsverteilungen und die Identifikation repräsentativer Lastkollektive aus systematisch erfassten Felddaten unter der Berücksichtigung der Anwendungs- und Nutzungsvariabilität elektromechanischer Lenksysteme.
- Untersuchung der Vorschädigung zurückgeführter Altteile und Verknüpfung der Ergebnisse mit der Feldbeanspruchungsverteilung zur Entwicklung von Schädigungsmodellen.
- Einbindung der Schädigungsmodelle in den Kontext der spezifizierten Lebensdauer und der Erprobungsergebnisse für eine Abschätzung der Feldlebensdauer.
- Entwicklung eines neuen Ansatzes zur Modellierung der Wiederverwendungsgrenzwerte unter Berücksichtigung identifizierter Lastreserven, der Systemnutzung in verschiedenen Phasen des Produktlebenszyklus, der Vorschädigung zurückgeführter Altteile und der Zuverlässigkeitsanforderungen an den zweiten Lebenszyklus.

Konzepte zur Definition der Wiederverwendungsgrenzwerte in der Aufarbeitung von sicherheitsrelevanten Systemen, wie Lenksystemen und Bremssystemen, sind in der Vielzahl der Publikationen nicht vorhanden und bieten keinen ganzheitlichen Lösungsansatz für die vorliegende Problemstellung. Die Zuverlässigkeit und die Restlebensdauer werden sowohl für mechanische als auch elektronische Bauteile zu Genüge diskutiert, jedoch ohne den notwendigen Bezug zu den Themen Aufarbeitung und Wiederverwendung im Zusammenhang mit sicherheitsrelevanten Systemen herzustellen. Das Fehlen von Ausfalldaten oder einer Online-Überwachung wird ebenfalls nicht ausreichend thematisiert. Aus diesem Grund ist es unabdingbar, einen neuen Ansatz zur Lösung der vorliegenden Problemstellung zu entwickeln. Der Ansatz ist darüber hinaus nicht nur auf die reine Verwendung bei Lenksystemen beschränkt, sondern soll ein generelles Vorgehen von der Erarbeitung der Lastannahmen bis zur Definition der Wiederverwendungsgrenzwerte bieten. Die Themengebiete in denen der Ansatz zusätzlich eine Anwendung finden soll sind die Ableitung der Zuverlässigkeitskenngrößen aus systematisch erfassten Felddaten und die dynamische Definition der Wiederverwendungsgrenzwerte.

3. Entwicklung des neuen Ansatzes

Die Bestimmung der plattformindividuellen Wiederverwendungsgrenzwerte ist ein essenzieller Bestandteil in der Entwicklung von Konzepten zur Wiederverwendung von Lenksystemen. Auf ihrer Grundlage erfolgt die Auswahl der optimalen Wiederverwendungsstrategie in der Aufarbeitung. Im Folgenden wird der neu entwickelte Ansatz zur Bestimmung der Wiederverwendungsgrenzwerte (WG) vorgestellt und auf die dazu notwendigen Bausteine eingegangen.

3.1 Grundlagen der Wiederverwendungsentscheidung

Die Wiederverwendungsentscheidung beruht auf der Wahl der optimalen Aufarbeitungsstrategie. Unterschieden wird zwischen den in Kapitel 2.5.1 aufgezeigten Optionen Reuse, Rework und Recycling. Die Entscheidung wird dabei auf jeder Ebene, und zwar von der System- bis zur Komponentenebene, und für jedes zurückgeführte Altteil erneut getroffen. Abbildung 3-1 veranschaulicht den zugrundeliegenden Materialfluss in der Aufarbeitung von Lenksystemen.

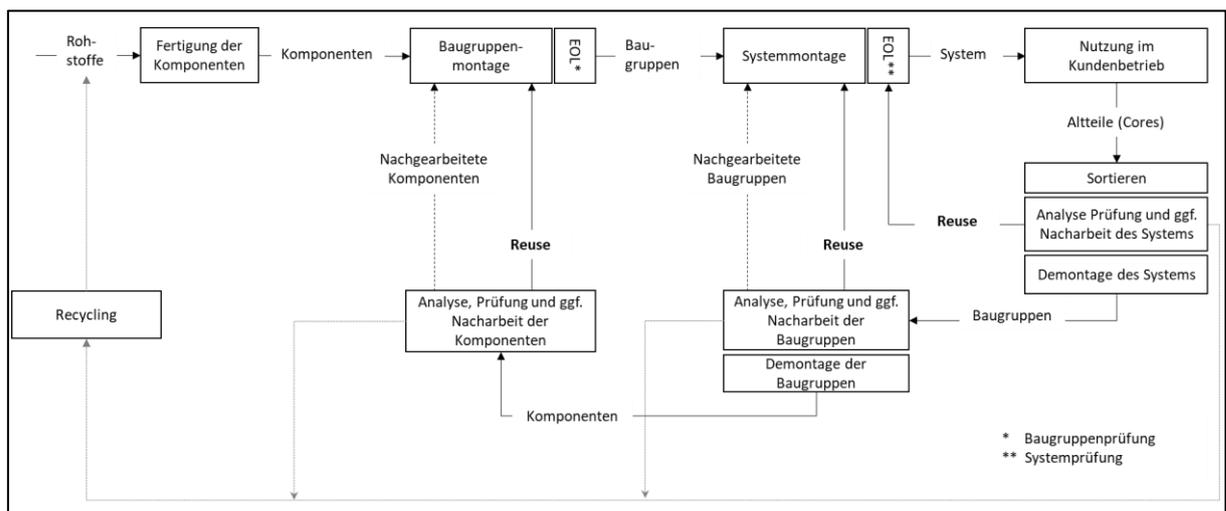


Abbildung 3-1 Materialfluss in der Aufarbeitung von Lenksystemen; Auf jeder Ebene, von der System- bis zur Komponentenebene erfolgt eine Analyse, Prüfung und ggf. Nacharbeit der zurückgeführten Altteile. Je nach Zustand und Restlebensdauer wird die optimale Aufarbeitungsstrategie (Reuse, Rework oder Recycling) gewählt

Eine Analyse und Prüfung auf der Systemebene sollen die grundsätzliche Eignung für eine Wiederverwendung verifizieren. Relevant ist neben der Verschleißbewertung und der damit verbundenen Abschätzung der Feldbelastungs- und Feldbeanspruchungsintensität vor allem die Identifikation von Fremdeinwirkungen durch unsachgemäßen Gebrauch. Mögliche Ursachen für Beschädigungen können Unfälle, Reparaturen durch Drittanbieter oder Fehler beim

Handling und Ausbau des Lenkgetriebes sein. Ist keine Nacharbeit erforderlich und weist das System eine hinreichend hohe Restzuverlässigkeit auf, kann eine direkte Wiederverwendung erfolgen. Ist eine direkte Wiederverwendung nicht möglich, erfolgt die Demontage des Systems in die einzelnen Baugruppen. Baugruppen, die den Anforderungen genügen, werden direkt dem Systemmontageprozess zugeführt. Baugruppen, welche nicht die Anforderungen erfüllen, erfahren einen Nacharbeitsprozess oder werden recycelt. Analog zu dem Vorgehen auf der Baugruppenebene erfolgt der Prozess bis auf die Komponentenebene. Berücksichtigt werden bei der Wiederverwendungsentscheidung sowohl der Zustand als auch die Restlebensdauer der Systemkomponenten. Die bestimmenden Variablen für die Wiederverwendungsentscheidung sind die Gesamtlebensdauer L_P , die konsumierte Lebensdauer L_K , die Restlebensdauer L_{RLD} und die Wiederverwendungsgrenzwerte L_{Reuse} und L_{Rework} . Der Zusammenhang zwischen L_P , L_K und L_{RLD} ist bereits aus Kapitel 2.5.2.1 bekannt und durch Gl. (2.31) definiert. Die Wiederverwendungsgrenzwerte sind als restlebensdauerbasierte Schranke zu verstehen und grenzen die Optionen hinsichtlich Zuverlässigkeit und Kosten voneinander ab. Neben einer Restlebensdauerprognose sind die Qualitäts- und Zuverlässigkeitsanforderungen maßgebliche Faktoren für die Definition der Wiederverwendungsgrenzwerte. Abbildung 3-2 veranschaulicht die beschriebenen Zusammenhänge der Variablen untereinander.

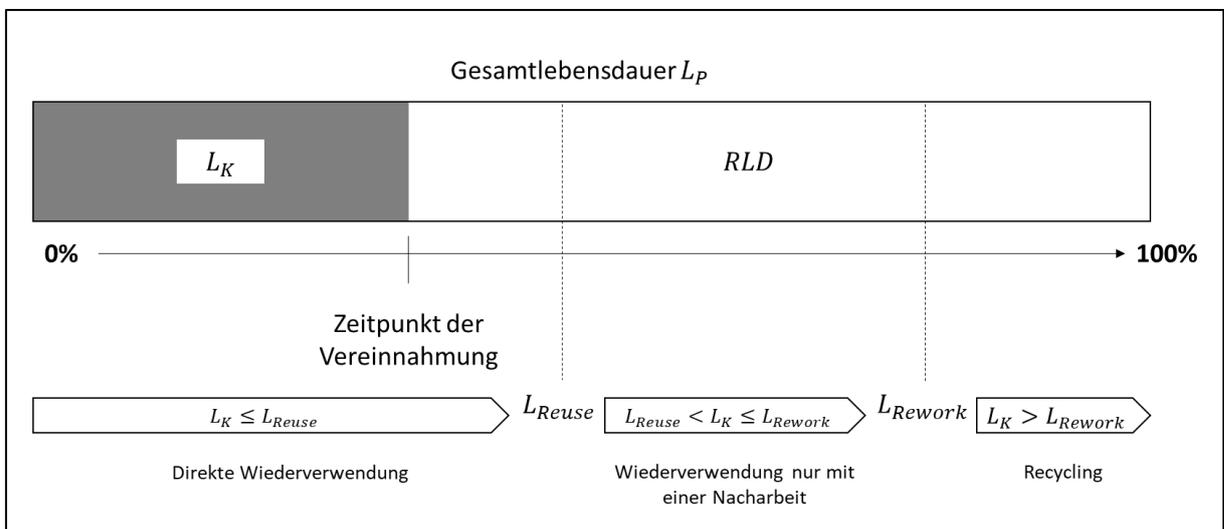


Abbildung 3-2 Variablen der Wiederverwendungsentscheidung, zur Einordnung der konsumierten Lebensdauer (L_K) und der Restlebensdauer (RLD) vor dem Hintergrund der Wiederverwendungsgrenzwerte

Die Gesamtlebensdauer beschreibt die maximale Lebensdauer eines Systems, einer Baugruppe oder einer Komponente. Unter Verwendung der konsumierten Lebensdauer kann mithilfe der Wiederverwendungsgrenzwerte eine Entscheidung für eine der Optionen getroffen werden.

Aus Gl. (2. 31) ergeben sich die in der Abbildung bereits formulierten Wiederverwendungsanforderungen:

$$\textbf{Reuse:} \quad L_K(x_{jn}) \leq L_{Reuse}(t_p). \quad (3. 1)$$

$$\textbf{Rework:} \quad L_{Reuse}(t_p) < L_K(x_{jn}) \leq L_{Rework}(t_p). \quad (3. 2)$$

$$\textbf{Recycling:} \quad L_{Rework}(t_p) < L_K(x_{jn}). \quad (3. 3)$$

t_p = Produktlebenszykluszeit

x_n = vereinnahmtes System einer Feldpopulation N der Plattform x

j = Betrachtungsstufe von der Systemvariante- bis zur Komponentenebene

Alternativ können die Wiederverwendungsgrenzwerte auch als Restlebensdaueranforderung ausgedrückt werden. Die Grenzwerte sind in Abhängigkeit der Produktlebenszykluszeit t_p einer Plattform x definiert. Dies ermöglicht ihre dynamische Anpassung an veränderliche Rahmenbedingungen mit einem zunehmenden Alter der Feldpopulation. Die Variable x_{jn} beschreibt ein zu bewertendes Altteil x_n und definiert die jeweilige Betrachtungsstufe j , für welche eine Einordnung der konsumierten Lebensdauer vorzunehmen ist.

Die in einem Markt verbliebene Feldpopulation N ist über die Anzahl der verkauften Einheiten VK , und zwar abzüglich der außer Betrieb gesetzten Einheiten AB und der exportierten Einheiten EX , zu berechnen, Gl. (3. 4). Wie in Abbildung 2-23 dargestellt und in Kapitel 2.5.2.4 beschrieben, kann es zu einer längeren Einlagerung ausgetauschter Systeme vor der eigentlichen Aufarbeitung kommen. Aus diesem Grund sind unter „außer Betrieb“ gesetzten Systemen nur solche zu verstehen, auf welche kein Zugriff im Rahmen der Aufarbeitung möglich ist. Die verbliebene Population N unterteilt sich in eine aktive Feldpopulation N_U sowie in eine passive Feldpopulation N_{pl} . Beide Populationen sind für die Aufarbeitung nutzbar. Unter der aktiven Feldpopulation werden die Systeme verstanden, welche aktiv in Fahrzeugen genutzt werden. Systeme, welche bereits für eine spätere Aufarbeitung eingelagert wurden, werden als passive Feldpopulation bezeichnet.

$$\begin{aligned} N(t_p(x)) &= VK(t_p(x)) - (AB(t_p(x)) + EX(t_p(x))) \\ &= N_U(t_p(x)) + N_{pl}(t_p(x)) \end{aligned} \quad (3. 4)$$

Der schematische Aufbau des Systems ist in Abbildung 3-3 veranschaulicht. Dargestellt ist das n -te Feldsystem der verbliebenen Feldpopulation N von der Systemvariante a bis zur Komponentenebene abc .

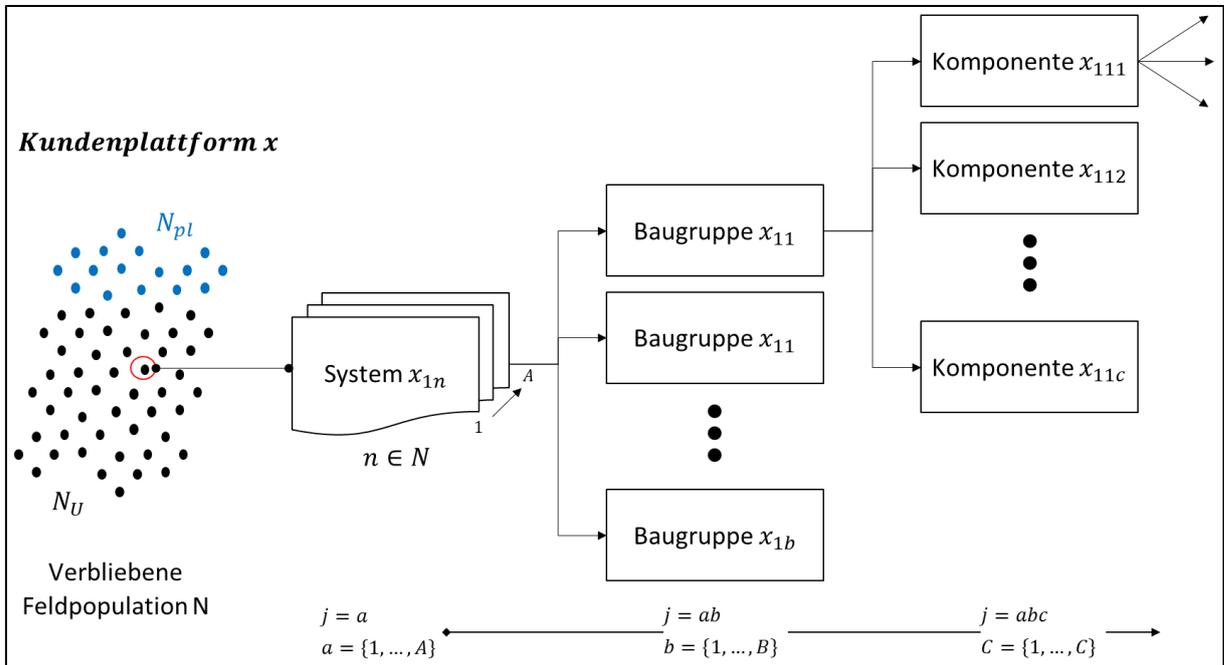


Abbildung 3-3 Schematischer Aufbau des zu betrachtenden (Lenk-) Systems; Für eine Kundenplattform x unterteilt sich die Feldpopulation in Systeme welche sich in Betrieb befinden (N_U) und solche die bereits außerbetrieb gesetzt wurden (N_{pl}). Die Betrachtung eines Systems n erfolgt in einzelnen Betrachtungsstufen j bis zur Komponentenebene

$a = (1, \dots, A)$ Anzahl der Varianten einer Systemplattform

$b = (1, \dots, B)$ Anzahl der Baugruppen eines Systems

$c = (1, \dots, C)$ Anzahl der Komponenten einer Baugruppe

(3. 5)

Aus (2. 31) können die Gleichungen für die system-, baugruppen- und komponentenspezifischen Restlebensdauern abgeleitet werden

$$L_{RLD}(x_{an}) = L_P(x_a) - L_K(x_{an}) \quad (3. 6)$$

$$L_{RLD}(x_{abn}) = L_P(x_{ab}) - L_K(x_{abn}) \quad (3. 7)$$

$$L_{RLD}(x_{abcn}) = L_P(x_{abc}) - L_K(x_{abcn}). \quad (3. 8)$$

Im ersten Schritt der Aufarbeitung erfolgt die Eingangsinspektion. Eine Analyse auf der Systemebene liefert Aufschluss über den allgemeinen Zustand und die Funktionsfähigkeit des Altteils. In diesem Schritt wird bereits eine Entscheidung in Bezug auf die generelle Tauglichkeit des Gesamtsystems, seiner Baugruppen und Komponenten für eine Wiederverwendung getroffen. Neben einer optischen Untersuchung zur Identifikation potenzieller Beschädigungen um-

fasst die Eingangsinspektion eine Auswertung der Belastungsparameter $l_p(x_{jn})$ und das Messen von Schädigungsparametern $s_q(x_{jn})$. Beide Parameter sind system-, baugruppen- und komponentenspezifisch in der jeweiligen Analyseebene zu erfassen und werden zur Abschätzung der konsumierten Lebensdauer $L_K(x_{jn})$ herangezogen. Die Indizes p und q repräsentieren die erfassbaren Parameter je Betrachtungsklasse j . Dies soll eine individuelle Entscheidungsgrundlage auf der jeweiligen Analyseebene ermöglichen. Abbildung 3-4 zeigt den Entscheidungsablauf von der System- bis zur Komponentenebene.

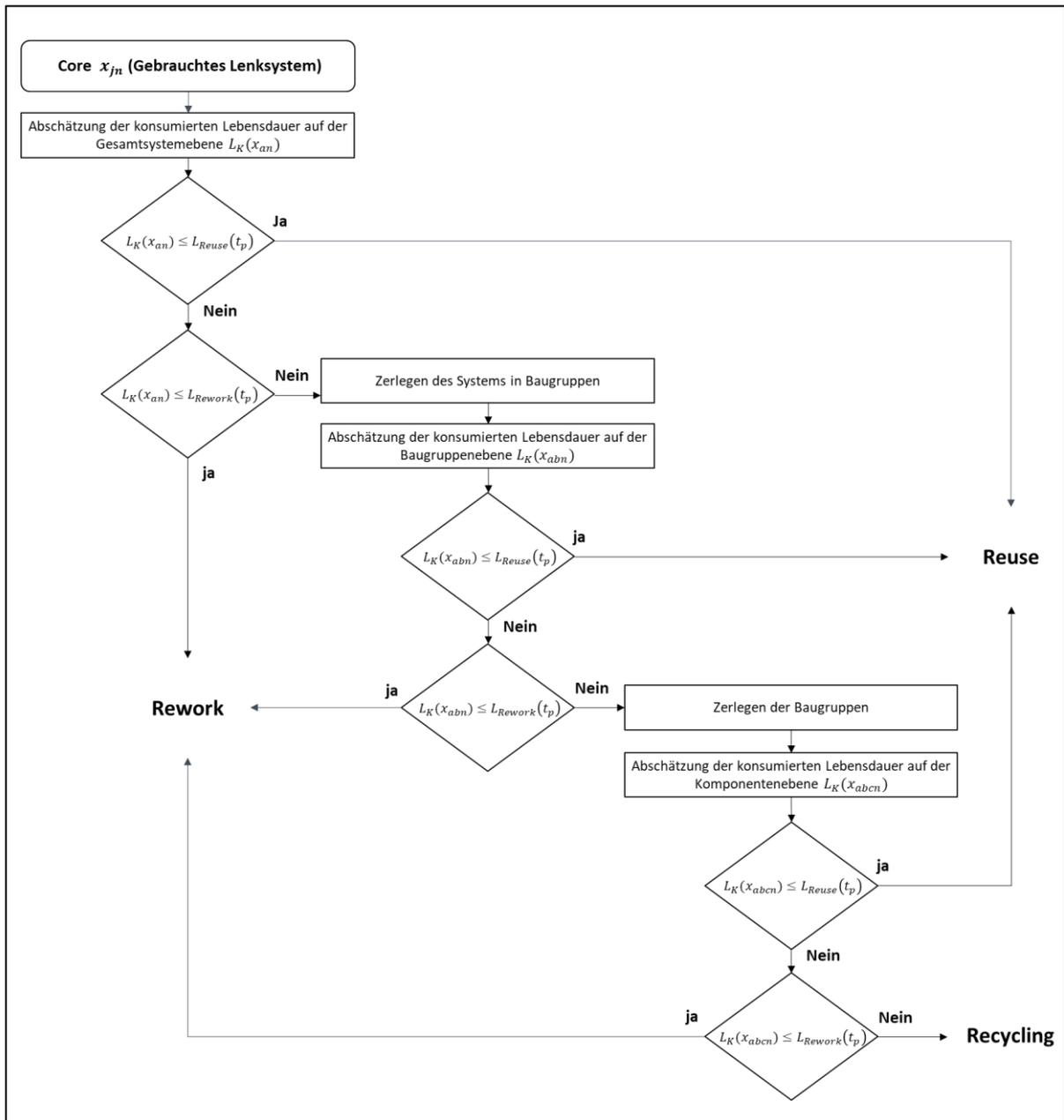


Abbildung 3-4 Schematischer Ablauf der allgemeinen Reuse Entscheidung von der System- bis zur Komponentenebene



Falls die konsumierte Lebensdauer den Grenzwert für eine direkte Wiederverwendung auf der Systemebene überschreitet, ist diese als Option ausgeschlossen. Eine Wiederverwendung des Systems ohne ein Zerlegen in die Baugruppen oder Komponenten ist in diesem Fall nur mit einem zusätzlichen Nacharbeitsprozess möglich. Sollte die konsumierte Lebensdauer den Grenzwert für einen Nacharbeitsprozess ebenfalls überschreiten, ist eine Wiederverwendung des Systems ohne Zerlegen ausgeschlossen. Systeme, welche nicht als Einheit wiederverwendet werden können, sind auf der Baugruppen- sowie Komponentenebene nochmals zu bewerten. Hierbei wird die direkte Wiederverwendung auf beiden Ebenen untersucht. Die während der Eingangsinspektion erhobenen Belastungs- und Schädigungsparameter sind hier ebenfalls heranzuziehen. Entsprechen die Baugruppen nicht den Anforderungen für eine direkte Wiederverwendung, ist ein Nacharbeitsprozess möglich, sofern die konsumierte Lebensdauer nicht oberhalb des entsprechenden Wiederverwendungsgrenzwertes liegt. Können weder das System, die Baugruppen noch die Komponenten wiederverwendet werden, bietet das Recycling die einzige verbleibende Option. Die konsumierte Lebensdauer kann je nach Systemvariante, Baugruppe und Komponente variieren. Der Hintergrund ist, dass zum Teil unterschiedliche Anforderungen an die Beanspruchbarkeit gestellt werden sowie unterschiedliche Beanspruchungen bei identischer Systembelastung zugrunde liegen. Der notwendige Neuteilzuschuss kann zudem je nach Vorbelastung und Vorschädigung des Altteils unterschiedlich hoch ausfallen.

3.2 Bausteine der Wiederverwendungsentscheidung

In diesem Abschnitt wird der neu entwickelte Ansatz zur Definition der Wiederverwendungsgrenzen vorgestellt und auf die relevanten Bausteine eingegangen. Abbildung 3-5 vermittelt eine Übersicht über die Bausteine, veranschaulicht deren Verknüpfung untereinander und gibt einen Ausblick, in welchem Kapitel die jeweiligen Themen diskutiert werden. Die Beanspruchbarkeit des Systems, seiner Baugruppen und Komponenten resultiert vor allem aus den in der Systemauslegung erprobten Grenzen. Zudem fließen Qualitätsdaten aus dem Gewährleistungszeitraum sowie Erfahrung und Vorwissen ein. Die Beanspruchungsverteilung beruht auf der Auswertung der Felddaten. Aus den Felddaten sind zudem die repräsentativen Feldbeanspruchungen zu ermitteln, um für eine Feldstudie geeignete Systeme zu identifizieren. Eine Einordnung dieser Systeme in den Kontext der Feldbeanspruchung ermöglicht die Verknüpfung zwischen Beanspruchung und physischer Schädigung. Aus der Verknüpfung wird die Feldbeanspruchungsverteilung für ein Feldleben bestimmt. Durch eine Gegenüberstellung von Beanspruchung und Beanspruchbarkeit des Systems der jeweiligen Baugruppe oder Komponente

wird deren Lebensdauer ermittelt. Analog dazu wird das Altteil (Core) in Bezug auf die bereits konsumierte Lebensdauer eingeordnet. Die zu erfüllenden Zuverlässigkeitsanforderungen an die Nutzungsphase II beruhen im Wesentlichen auf zwei Faktoren, zum einen auf der Lebensdauer des Produktes und zum anderen auf der geforderten Restlebensdauer des aufgearbeiteten Systems. Aus den Zuverlässigkeitsanforderungen wird der zuverlässigkeitsbasierte Wiederverwendungsgrenzwert berechnet. Der kostenbasierte Wiederverwendungsgrenzwert beruht auf der Kostenstruktur des Aufarbeitungsprozesses und der Ausfallrate in Verbindung mit den Gewährleistungskosten. Eine Verknüpfung beider Grenzwerte bildet die Entscheidungsgrundlage für die Optionen in der Aufarbeitung.

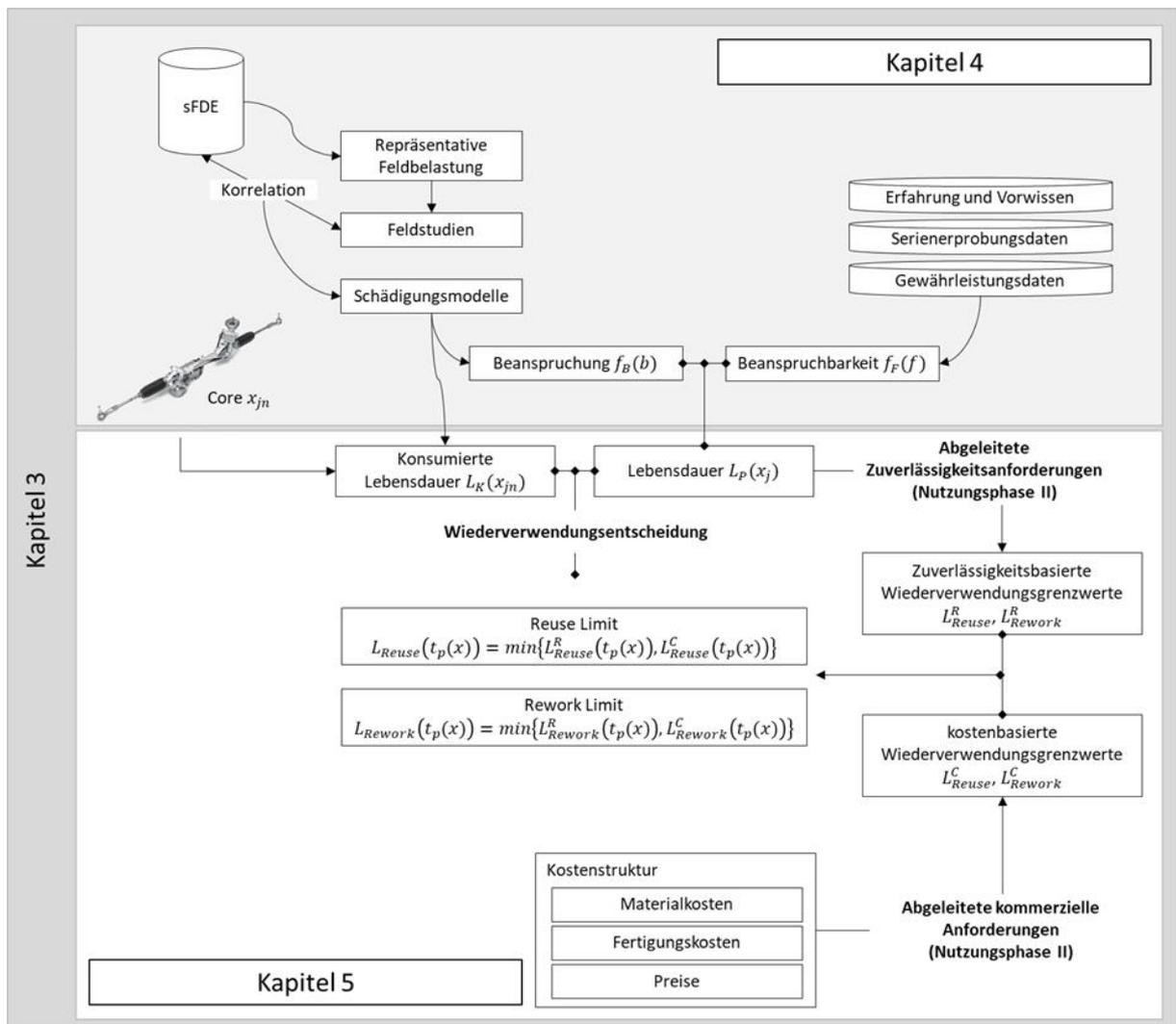


Abbildung 3-5 Bausteine des neuen Ansatzes zur Bestimmung der Wiederverwendungsgrenzen; **Kapitel 3** behandelt die theoretische Herleitung der Zusammenhänge und den Aufbau des Modells, **Kapitel 4** schafft die bisher fehlende Datengrundlage zur Gegenüberstellung von Beanspruchung und Beanspruchbarkeit und **Kapitel 5** zeigt die Anwendung des Modells am Beispiel elektromechanischer Lenksysteme

3.2.1 Abschätzung der Lebensdauer

Lenksysteme inklusive ihrer Baugruppen und Komponenten werden in der Entwicklung und Erprobung für eine spezifische Lebensdauer ausgelegt und freigegeben. Für die Ableitung der Gesamtlebensdauer L_p und die Einordnung der erwartbaren Beanspruchungen ist es unerlässlich, den Spezifikationsrahmen für die Erstausslegung des Systems zu kennen. Abbildung 3-6 präsentiert den allgemeinen Spezifikationsrahmen und die dazugehörigen Referenzparameter r_{ref} . Alle system-, baugruppen- und komponentenspezifischen Belastungs- und Schädigungsparameter können mithilfe der Referenzparameter r_{ref} normiert und in Lastprofile zerlegt werden. Die eingezeichnete Ebene ε unterteilt durch die vier Punkte A, B, C, D den Spezifikationsrahmen in zwei Bereiche. Bereich I vereint alle Systeme, die sich innerhalb des spezifizierten Rahmens bewegen und deren Durchschnittsgeschwindigkeiten \bar{v} kleiner als die spezifizierte Durchschnittsgeschwindigkeit \bar{v}^* sind. Der zweite Bereich II vereint, und zwar analog zu Bereich I, ebenfalls alle Systeme, die sich innerhalb des spezifizierten Rahmens bewegen, aber beinhaltet nur solche, bei denen sich die Durchschnittsgeschwindigkeiten \bar{v} oberhalb der spezifizierten Durchschnittsgeschwindigkeit \bar{v}^* bewegen.

$$\bar{v}^* = \frac{r_m^*}{r_t^*}, \text{ mit } r_m^*, r_t^* > 0 \quad (3.9)$$

$$\bar{v} = \frac{r_m}{r_t}, \text{ mit } r_m, r_t > 0 \quad (3.10)$$

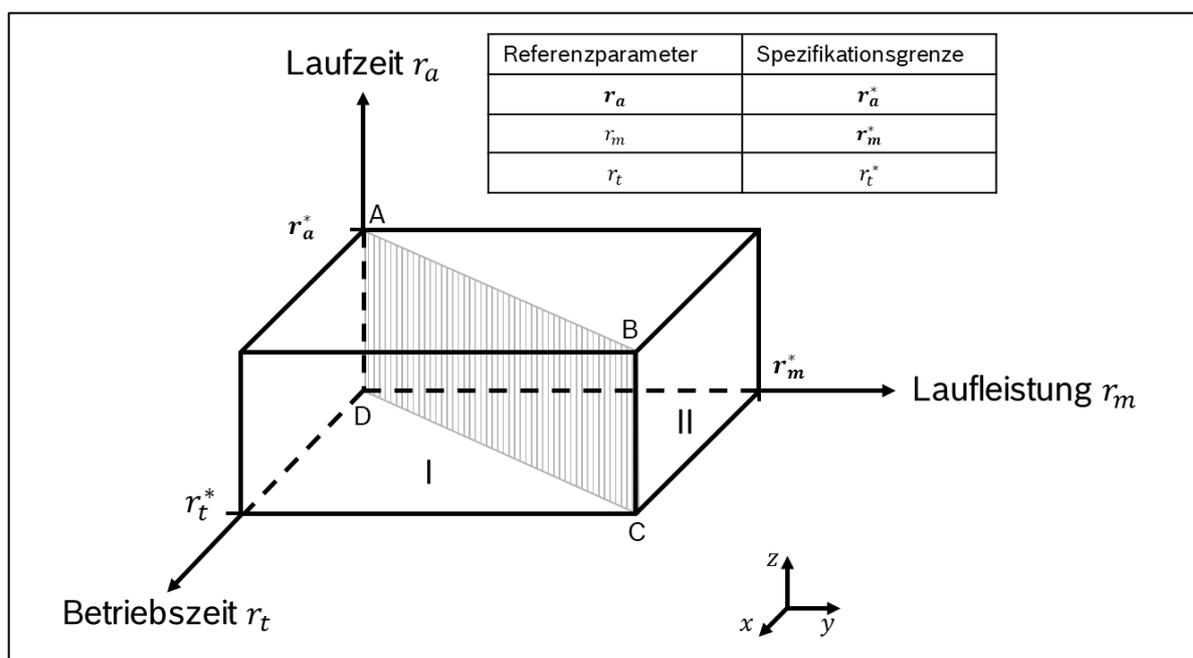


Abbildung 3-6 Allgemeiner Spezifikationsrahmen zur Einordnung der Feldbelastung; Der allgemeine Spezifikationsrahmen wird durch die spezifizierte Laufleistung r_m^* , die spezifizierte Betriebszeit r_t^* , und das spezifizierte Alter r_a^* begrenzt

Das Einhalten der spezifizierten Lebensdauergrenze $L_p^{r_{ref}^*}$ stellt die wichtigste Grundanforderung in der Definition der bisherigen Wiederverwendungsgrenzen für sicherheitsrelevante Lenksysteme dar. Der Mangel an Informationen in Bezug auf die tatsächliche Beanspruchung und Schädigung der Systeme im Feld hat dieses Vorgehen bislang erforderlich gemacht. Zudem spielt eine Vielzahl von Schädigungs- und Alterungsmechanismen über die Feldverweildauer hinweg ebenfalls eine wichtige Rolle. Die Auslegung, die Erprobung und die Freigabe der spezifizierten Lebensdauer erfolgen mit einer notwendigen Sicherheit, um die Nutzungsvervariabilität im Feld und die Komplexität der Schädigungszusammenhänge abzudecken. Diese Sicherheit musste bisher auch in der Wiederverwendungsentscheidung berücksichtigt werden, und zwar unabhängig davon, wie hoch die Beanspruchung im Feld tatsächlich ist. Das aufgearbeitete System und, damit einhergehend, die wiederverwendeten Baugruppen und Komponenten sollen am Ende einer definierten Nutzungsphase II innerhalb der validierten Beanspruchbarkeitsgrenzen liegen. Gl. (3. 11) zeigt den formalen Zusammenhang, bezogen auf die Referenzparameter.

$$r_{ref}^I + r_{ref}^{II} \leq r_{ref}^* \quad (3. 11)$$

Es wird angenommen, dass die Beanspruchungsverteilung F_B und die Beanspruchbarkeitsverteilung F_F durch voneinander stochastisch unabhängige, normalverteilte Verteilungsfunktionen modelliert werden können. In Abbildung 3-7 sind die Dichtefunktionen $f_B(b)$, $f_F(f)$ und die auf der Überschneidung beider Funktionen beruhende Ausfallwahrscheinlichkeit P_f dargestellt. Die Ausfallwahrscheinlichkeit P_f kann aus der Fläche unterhalb der Dichtefunktion f_G für alle Werte kleiner 0 berechnet werden, Gl. (3. 12).

$$P_f = P(g < 0) = \int_{-\infty}^0 f_G(g) dg \quad (3. 12)$$

Als Referenz für die Beanspruchungsverteilung wird die akkumulierte Schadenssumme am Ende der spezifizierten Lebensdauer herangezogen. Ebenfalls dargestellt sind die Schadenssummen aus der Erprobung sowie für die Festigkeitsverteilung. Die Verteilungsfunktion F_G , welche aus der Faltung der Differenz der beiden Zufallsvariablen F und B entsteht, ist normalverteilt mit den charakteristischen Verteilungsparametern μ_G und σ_G [18]. Dabei werden die Verteilungsparameter für G aus den Verteilungsparametern von F_B und F_F bestimmt [19], Gl. (3. 13) bis (3. 15).

$$f_{f-b}(g) = \int_{-\infty}^{+\infty} f_F(f) * f_B(g - f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_G} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{g-\mu_G}{\sigma_G}\right)^2\right) = f_G(g) \quad (3. 13)$$

$$\mu_G = (\mu_F - \mu_B) = \log D_{F50} - \log D_{B50} \quad (3. 14)$$

$$\sigma_G = \sqrt{\sigma_F^2 + \sigma_B^2} \tag{3.15}$$

Der Erprobungsumfang b_v beruht auf der Annahme von Extrembeanspruchungen und wird durch die akkumulierte Schädigung $D(b_v)$ dargestellt. Dieser sichert die Beanspruchungsverteilung B für die spezifizierte Lebensdauer mit einer festgelegten Ausfallwahrscheinlichkeit P_A^* ab, Gl. (3.16).

$$F_F(f < b_v) = P_A^* \tag{3.16}$$

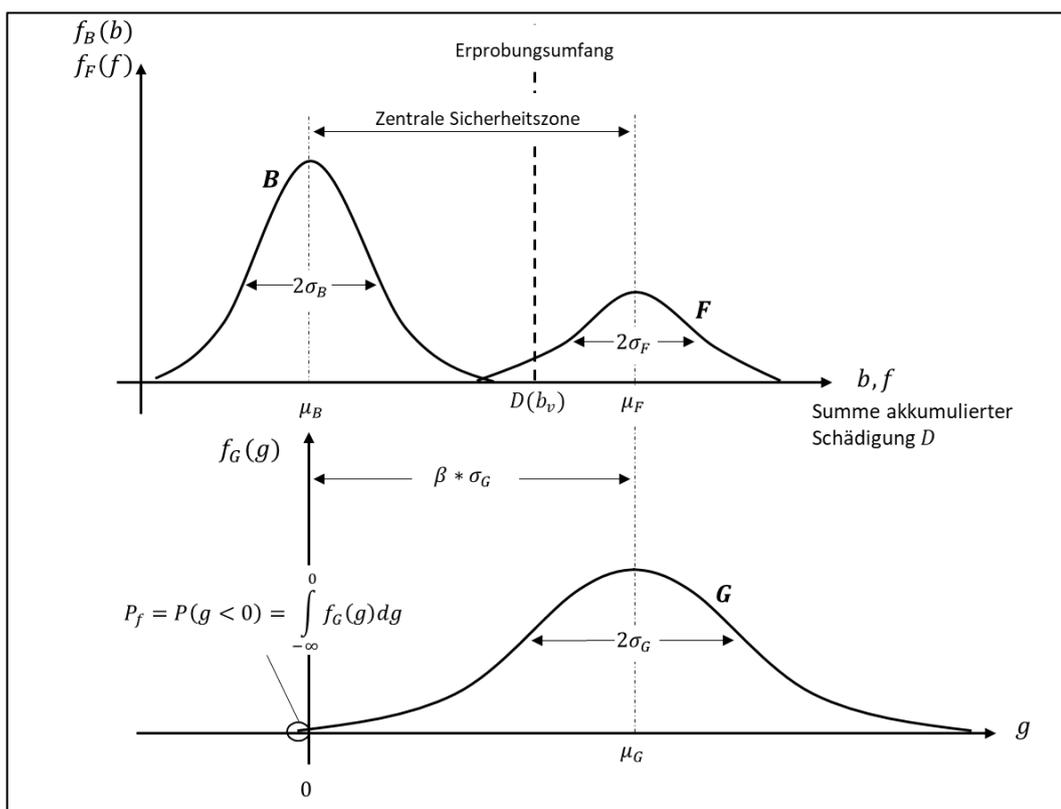


Abbildung 3-7 Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeit bei logarithmisch normalverteilten Dichtefunktionen (In Anlehnung an [18])

Für den neuen Ansatz müssen zwei Hauptanforderungen in der Lebensdauerabschätzung berücksichtigt werden. Die erste Lebensdauerergrenze bildet nach wie vor die spezifizierte Lebensdauer, welche den abgesicherten Spezifikationsrahmen aufspannt. Diese kommt insbesondere für Baugruppen und Komponenten zum Tragen, welche auch einem relevanten Alterungsprozess aufgrund der reinen Feldverweildauer unterliegen. Die zweite Lebensdauerergrenze $L_P^{R^*}(x)$ ist aus den Zuverlässigkeitsanforderungen R^* für die spezifizierte Lebensdauer abzuleiten. Diese spannt den Zuverlässigkeitsrahmen für die angenommene Beanspruchungsverteilung F_B auf. Analog zu Gl. (3.11) sind die in der Entwicklung vereinbarten Zuverlässigkeitsziele, sofern nicht anders vereinbart, zwingend einzuhalten.

$$R(r_{ref}^I + r_{ref}^{II}) \leq R(r_{ref}^*) = R^*. \quad (3.17)$$

Die Gesamtlebensdauer des Systems beruht somit auf der spezifizierten und der zuverlässigkeitsorientierten Lebensdauer

$$L_P = \{L_P^{r_{ref}^*}(x), L_P^{R^*}(x)\}. \quad (3.18)$$

Die Einbindung der Zuverlässigkeitsanforderungen in die Definition der Wiederverwendungsgrenzen soll ein Überschreiten der spezifizierten Lebensdauer für Komponenten, deren Verschleiß vorwiegend durch eine Nutzung erfolgt, ermöglichen. Das Ziel ist es, potentielle Restlebensdauerreserven nutzbar zu machen und auf diesem Weg die Wiederverwendungsquote nachhaltig zu verbessern

3.2.1.1 Beanspruchbarkeitsgrenzen

Die Beanspruchbarkeitsgrenzen des Systems, der Baugruppen und der Komponenten werden in der Erprobung validiert. Die Absicherung der spezifizierten Lebensdauer hinsichtlich Betriebsfestigkeit, Verschleiß- und Funktionsverhalten von Lenksystemen erfolgt mittels eines Lastkollektivdauerlaufes. Dieser simuliert eine Extrembeanspruchung im Feld und besteht aus verschiedenen Einzelkollektiven, welche verschiedene Fahrsituationen und die dazugehörigen Lenkvorgänge abbilden. Das aus den Einzelkollektiven zusammengesetzte Mischkollektiv wird zyklisch bis zu einer festgelegten Anzahl wiederholt. Abbildung 3-8 veranschaulicht exemplarisch einen Ausschnitt des Mischkollektives.

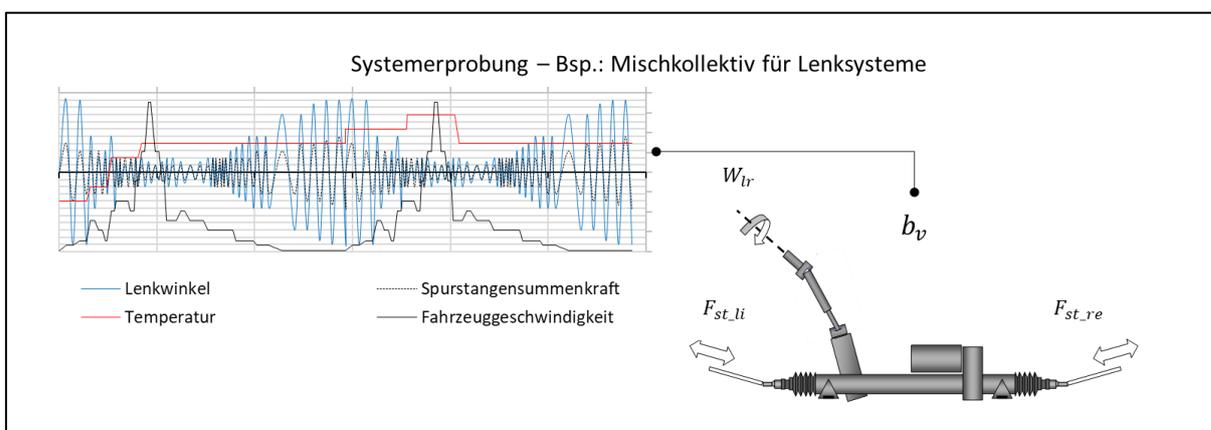


Abbildung 3-8 Mischkollektiv zur Absicherung eines spezifizierten Feldlebens auf der Systemebene; Ein Mischkollektiv, bestehend aus verschiedenen Lastzyklen unterschiedlicher Intensität, dient zur Absicherung von Festigkeit, Verschleiß- und des Funktionsverhalten

Die Krafterleitung F_{st} erfolgt über die Spurstangen und der Lenkwinkel W_{lr} wird über die Lenkzwischenwelle vorgegeben. Eine Temperaturüberlagerung simuliert den Einfluss der Temperatur auf die Festigkeit mechanisch beanspruchter Komponenten. Eine Alterung des Systems aufgrund von Umweltbedingungen ist nicht Teil des Lastkollektivdauerlaufes. Als Bestandteil des Erprobungsprozesses wird dieser Teil durch eine Reihe von Umweltprüfungen abgedeckt. Unter anderem gehören Salzsprühnebeltests, die thermische Alterung und ein Tauchen des Lenksystems zu den üblichen Erprobungsumfängen. Eine Freigabe bezieht sich in der Regel ebenfalls auf die spezifizizierte Lebensdauer. Neben der Systemerprobung ist auch eine Erprobung auf der Baugruppen- und Komponentenebene üblich. Für die Absicherung der Unterstützungseinheit, bestehend aus ECU und Motor, wird beispielsweise ein Temperaturdauerlauf durchgeführt. Zur Ermittlung der Lastgrenzen der Getriebekomponenten sind Wöhlerversuche ein Bestandteil des Erprobungsumfanges.

Aus der Relation zwischen der Erprobungsbeanspruchung b_v und der Beanspruchungsverteilung in Verbindung mit der Ausfallwahrscheinlichkeit P_f kann eine Einordnung der Beanspruchbarkeitsgrenzen vorgenommen werden. Der zentrale Sicherheitsfaktor β_{FB} wird aus dem Quotienten der Mittelwerte von Beanspruchbarkeits- und der Beanspruchungsverteilung bestimmt. Fügt man eine zusätzliche Zone für die Absicherung der Beanspruchung durch das Erprobungskollektiv hinzu, ergibt sich ein weiterer Faktor β_{VB} zur Einordnung der Beanspruchbarkeit

$$\beta_{VB} = \frac{D(b_v)}{\mu_B}. \quad (3.19)$$

Die linear akkumulierte Schädigung durch das Erprobungskollektiv und die dazugehörigen Belastungs- $l_p(b_v)$ und Schädigungsparameter $s_q(b_v)$, fließen in die Entwicklung der Lebensdauermodelle ein. Sie dienen als Referenz für die validierte Beanspruchbarkeit. In Verbindung mit den zu erarbeitenden Schädigungsmodellen und der festgelegten maximalen Ausfallwahrscheinlichkeit ist ein Grenzrahmen zu definieren. Dieser soll die Einordnung der konsumierten Lebensdauer vereinnahmter Altteile ermöglichen.

3.2.1.2 Beanspruchungsverteilung

Die wahre Verteilung der Feldbeanspruchung eines Systems innerhalb eines spezifizierten Feldlebens ist in der Erprobungsphase von Lenksystemen nicht bekannt. Es werden Annahmen auf der Basis von Vorwissen und Erfahrungen getroffen. Für eine realistische Einordnung der konsumierten Lebensdauer L_K zurückgeführter Altteile ist es notwendig, die Beanspruchungs-

verteilung und die relevanten Schädigungsmechanismen im Feld zu kennen. Dies gilt auch für eine Prognose der Feldbeanspruchung nach der Aufarbeitung. Es müssen die zwei Fragen „Welche Lebensdauer wurde bereits konsumiert?“, „Welche Restlebensdauer ist noch möglich?“ beantwortet werden. Die Verwendung von Felddaten ist daher ein unerlässlicher Schritt für ein besseres Verständnis der Feldbeanspruchung. In einer Vielzahl von Ansätzen, z.B.: [30] [31] [33] [51] [52], wird dies über eine Echtzeitüberwachung von Betriebszuständen realisiert. Präventive Maßnahmen können auf diesem Weg bei einem Überschreiten definierter Grenzwerte eingeleitet werden. Als Beispiel ist die zulässige Betriebsdauer eines Werkzeuges zu nennen. In jedem Fall aber liegen Schädigungs- und Lebensdauermodelle zur Einordnung der Schädigung zugrunde. Eine Echtzeitauswertung von Betriebsdaten ist für Lenksysteme jedoch nicht verfügbar. Als Alternative stehen systematisch erfasste Felddaten (sFDE) zur Verfügung. Diese wurden im Rahmen von Reparatur- und Servicemaßnahmen erfasst. Die Daten beinhalten Informationen zu den Referenzparametern sowie zu den Belastungsparametern und können in ihrer Qualität und Aussagefähigkeit von Plattform zu Plattform variieren. Anders als Zeitreihendaten bietet die sFDE keinen Mitschnitt der Belastungen über den zeitlichen Verlauf der Nutzung. Es existiert jedoch eine akkumulierte Zusammenfassung der erfassten Parameter. In der sFDE enthalten sind unter anderem die Temperaturverweildauer, der Lenkwinkel, die Spurstangensummenkräfte und die Lenkwinkelgeschwindigkeit. Über die Definition von Pseudoschädigungswerten D_{PS} erfolgt die Ableitung einer auf den Felddaten basierenden Beanspruchungsverteilung $F_{B_{Feld}}$. Die Pseudoschädigungswerte ermöglichen zudem eine Einordnung vor dem Hintergrund der Festigkeitsverteilung F_F sowie des Erprobungskollektives b_v . Abbildung 3-9 präsentiert den Vergleich zwischen Feld, Festigkeit und Erprobung.

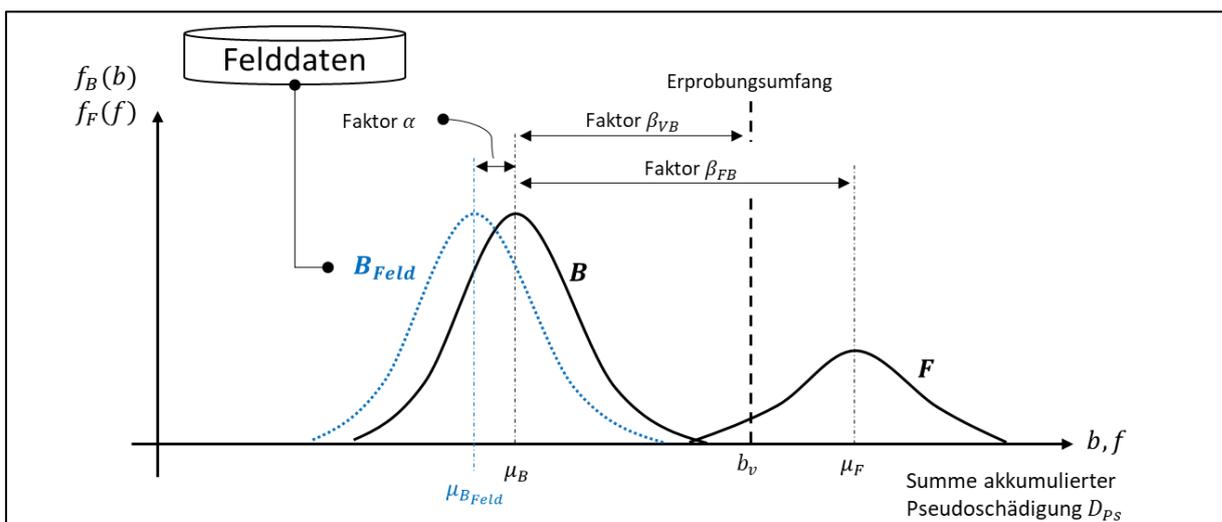


Abbildung 3-9 Einordnung der Feldbeanspruchungsverteilung, unter Verwendung der Felddaten; Es erfolgt der Vergleich zwischen tatsächlicher Beanspruchung und der abgesicherten Beanspruchbarkeit

Die Variable α beschreibt den Abstand von der Felddatenbeanspruchungsverteilung und der in der Ersterprobung zugrunde gelegten Beanspruchungsverteilung Gl. (3. 20). In Verbindung mit den Faktoren β_{VB} und β_{FB} kann eine Beziehung mit dem Erprobungskollektiv und der Beanspruchbarkeit hergestellt werden.

$$\alpha = \frac{\mu_B}{\mu_{B_{Feld}}} \quad (3. 20)$$

Zur Verknüpfung von Pseudoschädigung mit realer Schädigung ist das Durchführen von Feldstudien erforderlich. Die für eine solche Verknüpfung erforderlichen repräsentativen Lastprofile sind dazu aus den Felddaten abzuleiten. Im Anschluss daran gilt es, repräsentative Systeme aus dem Feld für das Durchführen der Studie zu identifizieren. Die in Kapitel 2.3.2.3 vorgestellte 3F Methode und der Ansatz des ITWM beschreiben die Definition repräsentativer Lastannahmen in der frühen Entwicklungsphase eines Systems. Der nachfolgende und im Rahmen dieser Arbeit neu entwickelte, Ansatz vereint beide Methoden miteinander. Zudem wurde der fahrzeugspezifische 3F Parameterraum um einen systemspezifischen 3S Parameterraum erweitert. Hintergrund sind die Komplexität eines elektromechanischen Lenk-systems und das vielfältige Anwendungsspektrum auch innerhalb einer Plattform, was eine entsprechende Berücksichtigung bei der Bestimmung der repräsentativen Lastprofile erfordert. Dies konnte mit dem bisherigen Parameterraum nicht vollumfänglich abgebildet werden. Abbildung 3-10 veranschaulicht das neue Vorgehen von der Identifikation der repräsentativen Nutzungsprofile bis hin zur Ermittlung eines Referenzschädigungsmodells.

Das system- und komponentenspezifische Anwendungsspektrum resultiert aus der zugrundeliegenden Fahrzeugkonfiguration der gewählten Systemvariante sowie den regionalen und nutzerspezifischen Einflussfaktoren. In der Regel liegen für das Anwendungsspektrum bereits Annahmen für die Auslegung und Erprobung vor, welche unter Berücksichtigung von Erfahrungswerten definiert wurden. Mithilfe der sFDE können die getroffenen Annahmen plausibilisiert und quantifiziert werden. Die Pseudoschädigungswerte bilden die Referenz für einen Intensitätsvergleich. Da ihnen kein Bauteilversagen zugrunde liegt, können die Schadenssummen auch Werte größer als eins annehmen. Es finden alternative Normierungsgrößen, wie die Pseudoschädigung des Erprobungskollektives $D_{PS_i}(b_v)$ oder Quantile aus der Feldbeanspruchungsverteilung, ihre Anwendung. Im weiteren Verlauf wird von dem Erprobungskollektiv als Grundlage für die Normierung ausgegangen. Die aus den Felddaten berechneten Pseudoschädigungswerte $D_{PS_i}(x_{jz})$ werden zur Vergleichbarkeit untereinander auf ein Feldleben extrapoliert, Gl. (3. 21). Die Variable x_{jz} beschreibt den Datensatz z der Plattform x sowie die Beziehung zu der Betrachtungsklasse j . Dies ermöglicht eine differenzierte Einordnung derselben

Pseudoschädigungswerte für verschiedene Baugruppen und Komponenten. Die Extrapolation auf ein Feldleben erfolgt unter der Annahme von (3. 11) und der Relation von r_{ref} zu r_{ref}^* . Der Index i beschreibt die verschiedenen Pseudoschädigungsparameter.

$$D_{PS_i}^*(x_{jz}) = D_{PS_i}(x_{jz}) * \min\left(\frac{r_a^*}{r_a(x_{jz})}; \frac{r_t^*}{r_t(x_{jz})}; \frac{r_m^*}{r_m(x_{jz})}\right) * \frac{1}{D_{PS_i}(b_v)} \quad (3. 21)$$

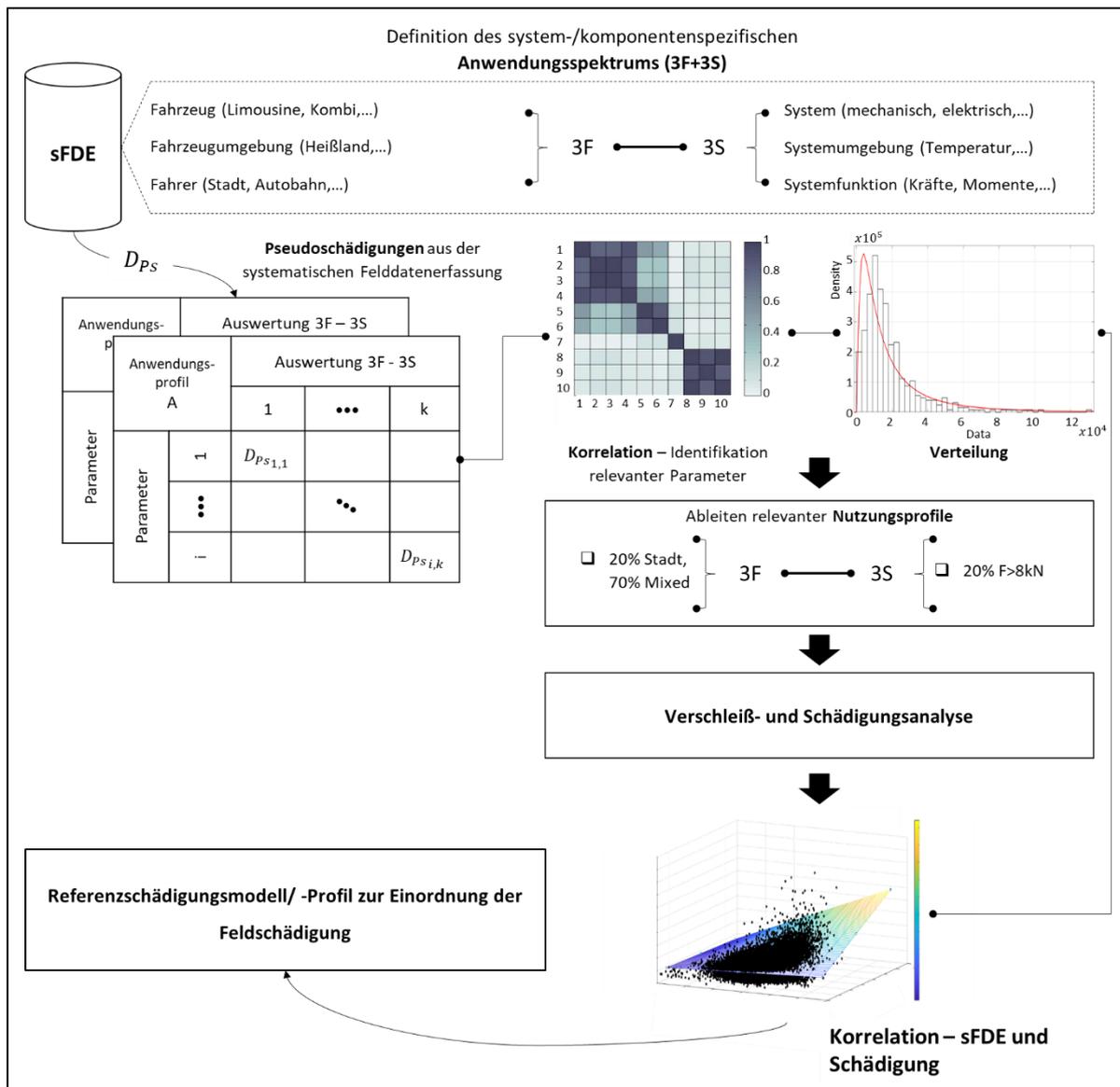


Abbildung 3-10 Angepasste neue Methode zur Verknüpfung des 3F- Parameterraumes mit den systemspezifischen Gegebenheiten 3S (Eigene Darstellung unter Verwendung von [55], [54], [56], [57] und [58])

Die Pseudoschädigungswerte werden anschließend den einzelnen Fahrprofilen zugeordnet und ausgewertet. Mittels einer Korrelationsanalyse, wie in [56][57][58] vorgeschlagen, werden die Zusammenhänge zwischen den Pseudoschädigungswerten identifiziert und der Parameterraum auf die wesentlichen Parameter reduziert. Nachdem die relevanten Nutzungsprofile über die



Verteilung der Pseudoschädigungswerte identifiziert wurden, erfolgt eine Feldstudie. Eine physische Analyse dient der Plausibilisierung der Pseudoschädigungswerte und bildet die Grundlage zur Einordnung der realen Schädigung vor dem Hintergrund der datenbasierten Beanspruchungsverteilung. Darauf aufbauend, erfolgt die Modellierung des Schädigungsverhaltens in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer und der Nutzungsintensität im Feld. Eine solche Vorbeurteilung ist notwendig, um eine realistische Einordnung der konsumierten Lebensdauer L_K zu gewährleisten.

3.2.2 Abschätzung der Restlebensdauer

Die Abschätzung der Restlebensdauer basiert auf der Einordnung des konsumierten Lebens L_K und der Prognose der zukünftigen Beanspruchung. Basis hierfür sind die erarbeiteten Zusammenhänge von Beanspruchung und Schädigung. Eine Differenzierung zwischen qualitätsorientierten und sicherheitsrelevanten Zuverlässigkeitszielen wird an dieser Stelle nicht expliziert diskutiert, ist aber im Rahmen der Wiederverwendungsentscheidung zu berücksichtigen. Die Notwendigkeit einer Unterscheidung beruht auf den schärferen Anforderungen von 1ppm für sicherheitskritische und damit rechtlich besonders relevante Ausfallmechanismen. Im Gegensatz dazu steht die übliche Basisausfallrate von 1000 - 3500ppm für qualitätsrelevante Ausfallursachen.

In Abbildung 3-11 ist die Einordnung der konsumierten Lebensdauer L_K von zwei Feldsystemen veranschaulicht. Beide Systeme haben eine unterschiedliche Nutzungsintensität im Feld erfahren und wurden an unterschiedlichen Punkten ihres Feldlebenszyklus vereinnahmt. Der Referenzparameter stellt die Vergleichsgröße in Bezug auf die allgemeine Nutzung dar. Die Pseudoschädigung wird für den Vergleich der erfahrenen Nutzungsintensität herangezogen. Unabhängig von der ursprünglich spezifizierten Lebensdauer ergeben sich aufgrund der unterschiedlichen Vorschädigungen unterschiedliche Restlebensdauern. Die dargestellte Restlebensdauer von x_{j1} und x_{j2} ist durch die Zuverlässigkeitsgrenze R^* begrenzt. Unter Verwendung einer linearen Extrapolation der Beanspruchungsverteilung, abgeleitet aus der sFDE, wird die Feldbeanspruchungsverteilung prognostiziert und mit der Festigkeitsverteilung in Beziehung gesetzt. Das System x_{j1} ist in der oberen Abbildung dargestellt und weist im Vergleich zu x_{j2} einen niedrigeren Referenzparameter sowie eine niedrigere Pseudoschädigungssumme auf. Aus diesem Grund erreicht das System x_{j2} , im unteren Teil der Abbildung dargestellt, zu einem früheren Referenzpunkt seine prognostizierte Lebensdauergränze. Dies ist durch die nach links verschobene vertikale Linie und die ebenfalls verschobene Ausfallwahrscheinlichkeitsverteilung

ung abgebildet. Zur Extrapolation der Beanspruchung beider Systeme wird dieselbe Beanspruchungsverteilung zugrunde gelegt.

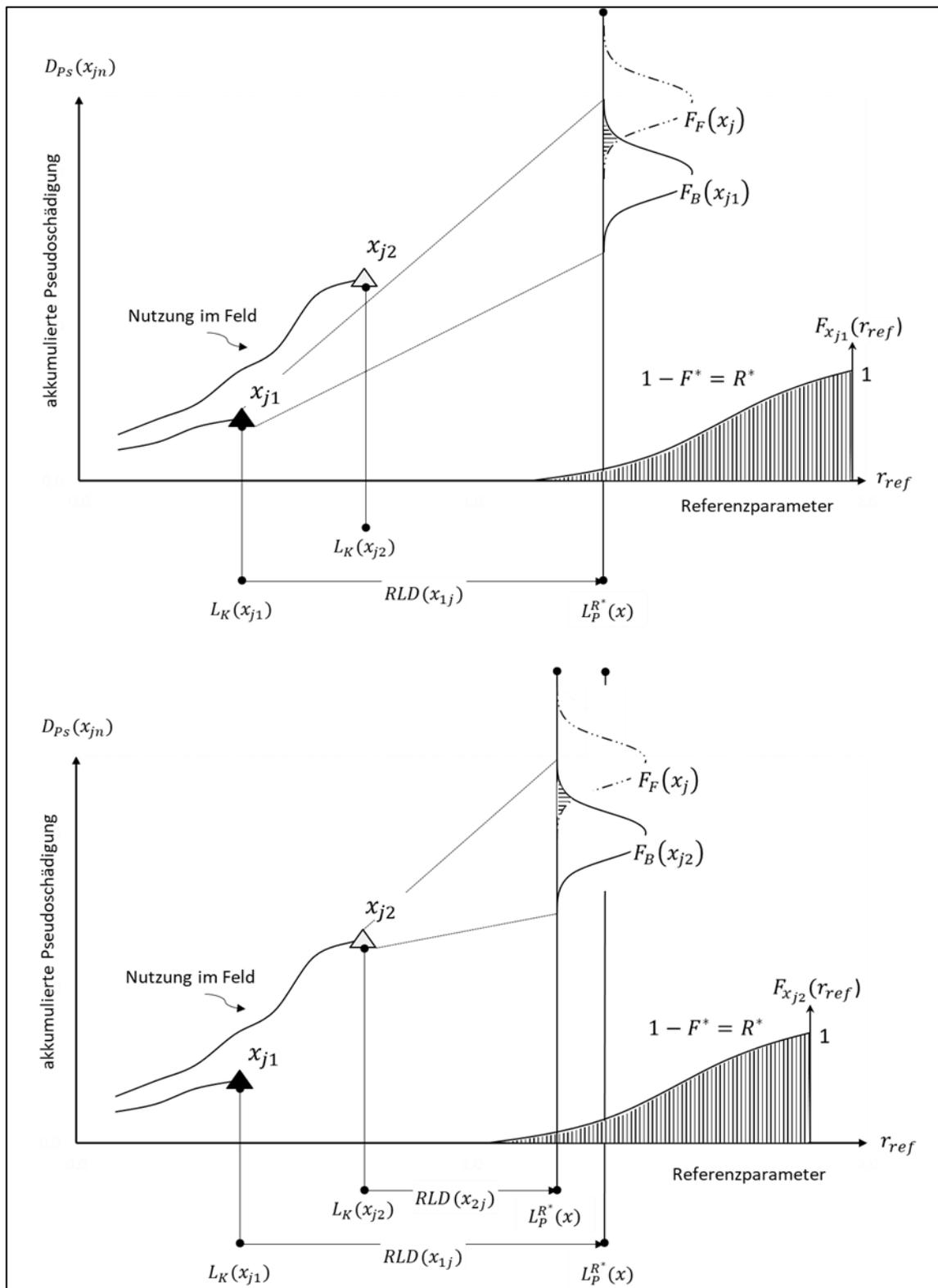


Abbildung 3-11 Einordnung der konsumierten Lebensdauer L_K und Prognose der zukünftigen akkumulierten Pseudoschädigung; Die Streuung in der Intensität der Feldnutzung hat bei einer ähnlichen Nutzung im zweiten Lebenszyklus unterschiedliche erwartbare Restlebensdauern zur Folge

Die erforderliche Verknüpfung der im Feld erfahrenen Beanspruchungsintensität, dargestellt durch die Verknüpfung der Pseudoschädigung mit der resultierenden Schädigung, erfolgt jedoch auf der Basis unvollständiger Informationen. Abbildung 3-12 visualisiert die Problematik des Informationsverlustes am Beispiel einer Blackbox.

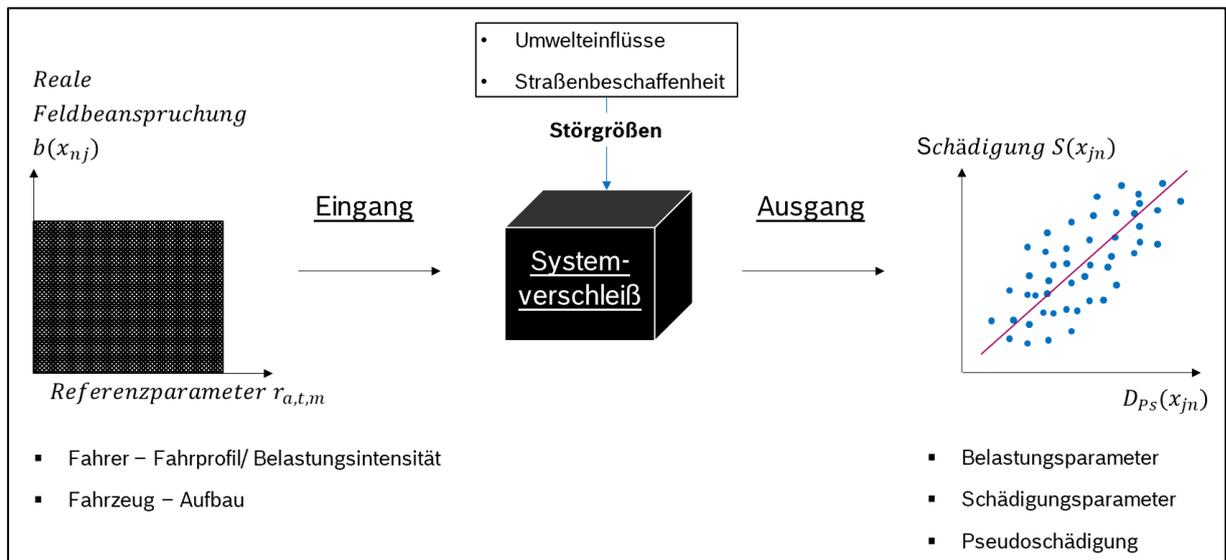


Abbildung 3-12 Informationsverlust in Bezug auf die reale Feldbeanspruchung am Beispiel einer Blackbox

Das Prinzip der Blackbox ist in der Kybernetik eine gängige Praxis zur Veranschaulichung von Sachverhalten, bei denen innere Funktionen und Strukturen eines zu betrachtenden Systems als unbekannt angenommen werden [60]. Die Verwendung einer solchen Blackbox Darstellung der Informationsverluste entspricht jedoch nicht der klassischen Theorie, da die inneren Funktionen und Strukturen des Systems bekannt sind. Der eigentliche unbekannt Anteil bezieht sich zum einen auf die reale Feldnutzung des Systems innerhalb seines spezifizierten Lebenszyklus und zum anderen auf den belastungs- und beanspruchungsspezifischen Systemverschleiß. Die ertragene Feldbeanspruchung eines Altteils kann dementsprechend nur mithilfe der vorhandenen oder messbaren Feldparameter geschätzt werden. Die Pseudoschädigung wird als der führende Parameter vorgeschlagen. Diese bietet die Möglichkeit, den Informationsgehalt einer Vielzahl an Parametern auf relevante zu komprimieren, was den Beanspruchungsvergleich vereinfacht. Darüber hinaus kann die Komplexität der Regressionsanalyse von Pseudoschädigung und messbarer Schädigung ebenfalls reduziert werden. Gleichung (3. 22) beschreibt die Regression zwischen logarithmierter Gesamtschädigung S und logarithmierter Pseudoschädigung D_{PS} unter der Annahme exponentiellen Verhaltens. Der Streuparameter ε ist normalverteilt mit μ_ε und σ_ε .

$$\log S(x_{jn}) = \log a + b * \log D_{Ps}(x_{jn}) + \varepsilon \quad (3. 22)$$

Die Schädigungsparameter s_q stützen einen mehrstufigen Ansatz zur Abschätzung der Gesamtschädigung. In der ersten Stufe wird die Vorschädigung auf der Systemebene bewertet, bevor im weiteren Verlauf eine Bewertung auf der Baugruppen- oder Komponentenebene durchgeführt wird. Dabei wird sowohl auf Messergebnisse als auch auf Belastungsdaten zurückgegriffen. In der Regel ist eine Vielzahl von Schädigungsmechanismen, wie z.B. der Flankenverschleiß am Schneckenrad des Reduktionsgetriebes, nicht ohne zeitaufwendige Messmethoden und eine vollständige Demontage der Baugruppen bewertbar. Die Abschätzung mittels Pseudoschädigung bietet daher eine adäquate und kostensparende Möglichkeit zur Abschätzung der Restlebensdauer einer Baugruppe, ohne diese kostenintensiv zerlegen zu müssen.

Als Grundlage für die Bestimmung der Gesamtlebensdauer dienen die in 3.2.1.1 definierten Grenzen der spezifizierten Lebensdauer. Zur Einordnung der potenziellen Restlebensdauer auch über die spezifizierte Lebensdauer hinaus werden die zugrundeliegenden Zuverlässigkeitsanforderungen L_P^{R*} verwendet. Die Prognose der zukünftigen Beanspruchung und der erwartbaren Schädigung resultiert aus der Verknüpfung der Feldbeanspruchungsverteilung und der entwickelten Schädigungsmodelle. Als Abschätzung für die Restlebensdauer einer Betrachtungseinheit ergibt sich anschließend, wie in Abbildung 3-11 dargestellt, der minimale Abstand der Pseudoschädigungsparameter zu den definierten Zuverlässigkeitsgrenzen. Ebenfalls in Gl. (3. 23) enthalten ist der spezifizierte Lebensdauerrahmen für Systeme, Baugruppen und Komponenten, die einem auf den Referenzparametern beruhenden Alterungs- und Verschleißprozess unterliegen.

$$L_{RLD}(x_{jn}) = \min \left[L_P^{r_{ref}}(x) - L_K(r_{ref}(x_{jn})); L_P^{R*}(x) - L_K(D_{Ps}(x_{jn})) \right] \quad (3. 23)$$

3.2.3 Wiederverwendungsgrenzwerte

Die Definition der Wiederverwendungsgrenzwerte (WG) ist das zentrale Element in der Entwicklung eines Aufarbeitungskonzeptes und bildet die Basis für eine Wiederverwendungsentscheidung. Der neue entwickelte Ansatz unterscheidet zwischen einem zuverlässigkeitsbasierten und einem kostenbasierten Wiederverwendungsgrenzwert. In die Definition des zuverlässigkeitsbasierten Grenzwertes fließen die Anforderungen an Zuverlässigkeit und Qualität, die erwartbare Nutzung nach der Aufarbeitung und die Beanspruchbarkeit des Produktes ein. Die genannten Einflussfaktoren sind sowohl von den Produkteigenschaften als auch von dem Anwendungsgebiet abhängig. Bei der Definition der kostenbasierten Grenzwerte erfolgen eine

Abschätzung der Gewährleistungskosten und eine Betrachtung der Wirtschaftlichkeit für die einzelnen Optionen in der Aufarbeitung. Die Gewährleistungskosten stehen in einer direkten Beziehung zu den Ausfallraten für sicherheitsrelevante und qualitative Ausfallursachen. Eine Verknüpfung beider Grenzwerte soll eine zuverlässigkeits- und kostenoptimale Entscheidung ermöglichen. Unter der Berücksichtigung von Gl. (3. 1) - (3. 3) sind die kombinierten Wiederverwendungsgrenzwerte wie folgt definiert:

$$L_{Reuse}(t_p(x)) = \min \{L_{Reuse}^R(t_p(x)), L_{Reuse}^C(t_p(x))\} \quad (3. 24)$$

$$L_{Rework}(t_p(x)) = \min \{L_{Rework}^R(t_p(x)), L_{Rework}^C(t_p(x))\}. \quad (3. 25)$$

C – auf den Kosten basierend

R – auf der Zuverlässigkeit basierend

Wird als Grundlage die Restlebensdauer anstatt der konsumierten Lebensdauer verwendet, richtet sich der Wiederverwendungsgrenzwert nicht nach dem minimalen, sondern nach dem maximalen Grenzwert von Zuverlässigkeit und Kosten.

Im Folgenden werden neu entwickelte Ansätze für die Modellierung der Wiederverwendungsgrenzwerte vorgestellt und deren Unterschiede und Vorteile diskutiert. Die Grenzwerte werden zunächst theoretisch erarbeitet, vertieft und anschließend wird der Bezug zu den Optionen Reuse, Rework und Recycling hergestellt.

3.2.3.1 Auf der Zuverlässigkeit basierende Wiederverwendungsgrenzwerte

Für die Definition der zuverlässigkeitsbasierten Wiederverwendungsgrenzwerte wird als Grundlage der in Kapitel 2.5.2.4 beschriebene Ansatz von Anityasari und Kaebnick [46] herangezogen. Wie bereits beschrieben, erfordern die marktspezifischen Gegebenheiten eine Anpassung der bisher statischen Grenzen über den gesamten Produktlebenszykluszeitraum hinweg. Besonders relevant ist in diesem Zusammenhang der Zeitraum zwischen EOS und EDOP. Hintergrund ist eine Nachserienversorgungspflicht von 15 Jahren, wobei jedoch die für die Aufarbeitung relevante Fahrzeugpopulation nach dem EOS keine nennenswerten Zuwächse mehr erfährt. Im Gegenteil, die Anzahl an Fahrzeugen im Feld wird mit zunehmender Produktlebenszykluszeit sinken. Damit einhergehend, steigen das durchschnittliche Alter sowie die potenzielle Vorbeanspruchung der Fahrzeuge im Feld. Aus diesem Grund kann davon ausgegangen werden, dass auch die durchschnittliche konsumierte Lebensdauer der Systeme, Baugruppen und Komponenten zum Zeitpunkt der Vereinnahmung ansteigen wird. Gleichzeitig sinkt aber auch die mittlere Restlebensdauererwartung der im Servicefall zu versorgenden Fahrzeug-

population. Aus diesem Grund sind eine dynamische Anpassung der Grenzwerte und eine Verknüpfung mit der Restlebensdauererwartung der Fahrzeuge sinnvoll. Selbst dann, wenn bereits in frühen Phasen des Produktlebenszyklus ein Aufarbeitungsprogramm in Betracht gezogen wird, erfordern veränderte Rahmenbedingungen eine Anpassung der Grenzen. Auf diesem Weg kann eine langfristige und ressourcenschonende Aufarbeitung sichergestellt werden.

• Lineares Modell

Die Modellierung des linearen Wiederverwendungsgrenzwertes basiert auf der Annahme eines linearen Fahrzeuglebensdauerkonsums über die Dauer der Feldnutzung. Für die Fahrzeugrestlebensdauer ist dementsprechend eine lineare Abnahme anzunehmen. Beide Parameter werden relativ zur spezifischen Lebensdauer des Fahrzeuges betrachtet. Verwendet man als Ausgangspunkt das Ende der Serienproduktion und nimmt das letzte Produktionsdatum als Referenz, wie in Abbildung 3-13 dargestellt, dann orientiert sich die Wiederverwendungsanforderung an der relativen Fahrzeugrestlebensdauer des letzten Produktionsdatums. Alternativ kann auch ein anderer Referenzwert, wie zum Beispiel das mittlere Alter der Fahrzeugpopulation, herangezogen werden. Für die spätere Wiederverwendungsentscheidung spielt das deshalb eine entscheidende Rolle, da es einen direkten Einfluss auf die potenzielle Menge der wiederverwendbaren Altteile ausübt. Diese steigt an, je niedriger die Restlebensdaueranforderungen an die aufgearbeiteten Systeme sind. Für die Entwicklung der linearen Grenzwerte soll das zunächst eine untergeordnete Rolle spielen.

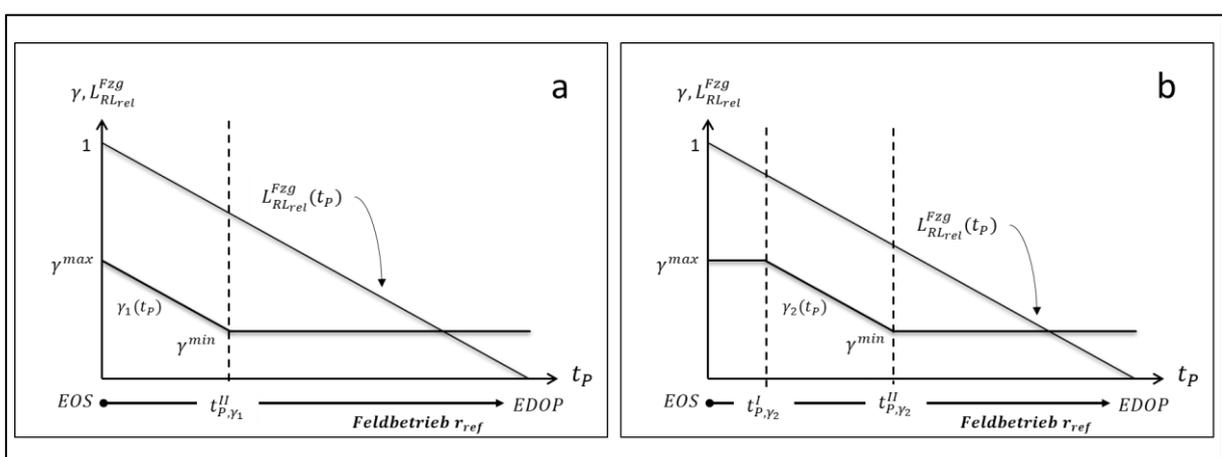


Abbildung 3-13 Der lineare Wiederverwendungsfaktor in Abhängigkeit von der Produktlebenszykluszeit und der Fahrzeugrestlebensdauer

- Dargestellt ist der lineare Wiederverwendungsfaktor mit einem Startpunkt γ^{max}
- Dargestellt ist der lineare Wiederverwendungsfaktor mit einem konstanten Startbereich γ^{max}

Die relative Fahrzeugrestlebensdauer $L_{RLD_{rel}}^{Fzg}$ setzt sich aus der Fahrzeuglebenserwartung L_P^{Fzg} abzüglich der konsumierten Lebensdauer L_K^{Fzg} zusammen.

$$L_{RLD_{rel}}^{Fzg}(t_p) = \frac{L_{RLD}^{Fzg}(t_p)}{L_P^{Fzg}} = \frac{1}{L_P^{Fzg}} * \left(L_P^{Fzg} - \frac{\Delta L_K^{Fzg}}{\Delta t_p} * t_p \right). \quad (3.26)$$

Der Wiederverwendungsfaktor $\gamma(t_p)$ beschreibt die Restlebensdaueranforderung an die wiederverwendeten Systeme, Baugruppen und Komponenten. Die Restlebensdaueranforderung ist mit der Fahrzeugrestlebensdauer verknüpft und in Relation zu dieser zu verstehen. In Abbildung 3-13 wird zwischen zwei linearen Wiederverwendungsfaktoren differenziert. Diese unterscheiden sich aufgrund des Anfangs ihres dynamischen Anteils. Der Faktor $\gamma_1(t_p)$ beschreibt die lineare Abnahme der Restlebensdaueranforderung, ausgehend von einem Startpunkt γ^{max} . Der Faktor $\gamma_2(t_p)$ verfügt hingegen über einen Startbereich $[EOS, t_{p,y_2}^I]$ mit konstanter Anforderung γ^{max} . Die Abnahme der Restlebensdaueranforderung erfolgt für beide Faktoren mit der gleichen Steigung, welche wiederum der Abnahme der Fahrzeugrestlebensdauer entspricht. Begrenzt wird der dynamische Anteil jeweils durch eine Mindestanforderung γ^{min} . Diese beschreibt die Grundanforderung für die restliche Produktlaufzeit nach $[t_{p,y_x}^{II}, \infty[$. Neben den dargestellten Varianten können noch unzählige weitere lineare Faktoren zur Beschreibung der Wiederverwendungsanforderungen modelliert werden, welche sich aber im Wesentlichen alle auf dieselben nachfolgenden Eigenschaften beziehen. Es müssen bei der Festlegung drei wesentliche Bereiche berücksichtigt werden, die in der Praxis, z.B. aufgrund von Gewährleistungszeiträumen, eine nicht unerhebliche Rolle spielen können. Der Anfangsbereich $[EOS, t_p^I]$ ist durch einen Faktor γ^{max} definiert, welcher die initiale relative Restlebensdaueranforderung an die Wiederverwendung darstellt. Wird zum Beispiel eine Restlebensdauer von 50% eines Fahrzeuglebens gefordert, dann ist der Faktor γ^{max} mit 0,5 festzulegen. Der Anfangsbereich kann, wie bei $\gamma_1(t_p)$, auch nur mit einem Startpunkt anstelle eines Startbereiches modelliert werden. Gl. (3.27) zeigt den mathematischen Zusammenhang für den Startbereich.

$$\gamma(t_p) = \frac{\gamma^{max} * L_P^{Fzg}}{L_P^{Fzg}} = \gamma^{max}, \quad (3.27)$$

für $EOS \leq t_p < t_p^I$ und $0 < \gamma^{max} \leq 1$

Der zweite Bereich $[t_p^I, t_p^{II}]$ beschreibt den dynamischen Anteil γ^c des Wiederverwendungsfaktors und wird durch eine Abnahme der relativen Restlebensdaueranforderung an die Wiederverwendung mit zunehmender Produktlebenszykluszeit charakterisiert.

$$\gamma(t_p) = \gamma^{max} + \gamma^c * (t_p - t_p^I),$$

$$\text{für } t_p^I \leq t_p < t_p^{II} \text{ und } 0 < \gamma^c \leq 1. \quad (3.28)$$

Bereich drei $[t_p^{II}, \infty[$ wird durch die minimale Restlebensdaueranforderung an die Wiederverwendung mittels eines konstanten Faktors γ^{min} definiert.

$$\gamma(t_p) = \frac{\gamma^{min} * L_p^{Fzg}}{L_p^{Fzg}} = \gamma^{min},$$

$$\text{für } t_p^{II} \leq t_p < \infty \text{ und } 0 < \gamma^{min} \leq 1. \quad (3.29)$$

Der Sonderfall Gl. (3.30) beschreibt das Szenario einer fixierten Restlebensdaueranforderung über den gesamten Produktlebenszykluszeitraum hinweg bis zum Versorgungsende (EDOP)

$$\gamma^{min} = \gamma^{max} \text{ und } \gamma^c = 0. \quad (3.30)$$

Aus (3.27), (3.28) und (3.29) kann $\gamma(t_p)$ für alle Bereiche zusammengesetzt werden

$$\gamma(t_p) = \begin{cases} \gamma^{max} & , \text{für } t_p < t_p^I \\ \gamma^{max} + \gamma^c * (t_p - t_p^I) & , \text{für } t_p^I \leq t_p < t_p^{II} \\ \gamma^{min} & , \text{für } t_p \geq t_p^{II} \end{cases} \quad (3.31)$$

$$0 < \gamma(t_p) \leq 1.$$

Unter Verwendung von $\gamma(t_p)$ erfolgt im Anschluss die Bestimmung der Wiederverwendungsgrenzwerte. Dabei wird auf die spezifizierte Gesamtlebensdauer des Altteils zurückgegriffen. Eine Umrechnung auf die Systemlebensdauer ist deshalb unabdingbar, da die Fahrzeuglebensdaueranforderungen von den systemischen durchaus abweichen können, falls die Systeme nicht für ein komplettes Fahrzeugleben ausgelegt sind. Analog dem Wiederverwendungsfaktor sind die linearen Wiederverwendungsgrenzwerte durch drei Bereiche charakterisiert, Abbildung 3-14. Der erste Bereich ist unter Verwendung von Gl. (3.27) zu bestimmen und entspricht der maximalen Anforderung an die Systemrestlebensdauer.

$$L_{WG}^R(t_p) = (1 - \gamma^{max}) * L_p^{r*ref} = L_{WG_{max}}^R = const.$$

$$\text{für } EOS \leq t_p < t_p^I. \quad (3.32)$$

Im Umkehrschluss kann dies mit der minimal zulässigen, bereits konsumierten Lebensdauer gleichgesetzt werden. Der zweite Bereich beschreibt den dynamischen Anteil des linearen Grenzwertes. Mithilfe von Gl. (3.28) ist der folgende Zusammenhang herzuleiten.

$$L_{WG}^R(t_p) = (1 - \gamma(t_p)) * L_p^{r*ref} \quad (3.33)$$

für $t_p^I \leq t_p < t_p^{II}$.

Bereich drei beschreibt die untere Schranke unter Verwendung von Gl. (3. 29).

$$L_{WG}^R(t_p) = (1 - \gamma^{min}) * L_P^{r_{ref}^*} = L_{WG_{min}}^R = const. \quad (3. 34)$$

für $t_p^{II} \leq t_p < \infty$

Ebenfalls in Abbildung 3-14 dargestellt ist die Systemrestlebensdauer L_{RLD} . Die Systemrestlebensdauer ist in Abhängigkeit des Referenzparameters r_{ref} definiert und ihre Abnahme wird idealisiert ebenfalls als linear über den spezifizierten Lebenszyklus $[0, r_{ref}^*]$ vorausgesetzt.

$$L_{RLD}(r_{ref}) = L_P^{r_{ref}^*} - L_K(r_{ref}) \quad (3. 35)$$

mit $L_K(r_{ref}) = \frac{L_P^{r_{ref}^*}}{r_{ref}^*} * r_{ref}$.

Die minimale Restlebensdaueranforderung $L_{RLD_{min}}$ wird durch die dunkelblaue Linie dargestellt. Eine Abnahme der Zuverlässigkeit R erfolgt mit zunehmendem Referenzparameter r_{ref} und ist im oberen Teil der Abbildung zu finden. Die produktbezogene zulässige Nutzungsphase ist in eine Nutzungsphase I, in eine Nutzungsphase II sowie in eine variable Nutzungsphase unterteilt. Hintergrund der variablen Nutzungsphase ist die Berücksichtigung der veränderlichen Restlebensdaueranforderung mit zunehmender Produktlebenszykluszeit. Hierbei erfolgen eine Verlängerung der zulässigen Nutzungsphase I und eine Verkürzung der geforderten Nutzungsphase II. Der Punkt (I) symbolisiert den Knotenpunkt $(L_{RLD}(r_{ref}^I), r_{ref}^I)$, welcher die Nutzungsphase I in Bezug auf die konsumierte Lebensdauer $L_K(r_{ref}^I)$ für den Bereich $[EOS, t_p^I]$ begrenzt. Punkt (II) stellt den zweiten Knotenpunkt dar, welcher die maximal zulässige Nutzungsphase I begrenzt und gleichzeitig die minimale Restlebensdaueranforderung $L_{RLD}(r_{ref}^{II})$ für den Bereich $[t_p^{II}, \infty[$ definiert. Ebenfalls dargestellt ist der Knotenpunkt (III), welcher das spezifizierte Lebensdauerende und die damit korrespondierende Zuverlässigkeitsanforderung R^* in Beziehung zueinander setzt. Die Punkte (I), (II) und (III) charakterisieren die Anforderungen an die zu vereinnahmenden Altteile für z.B. eine direkte Wiederverwendung und können Gl. (3. 36) entnommen werden.

$$\begin{aligned} \text{Punkt (I)} &: L_P(x) - L_{WG}^R(t_p^I) \leq L_{RL}(r_{ref}^I) \\ \text{Punkt (II)} &: L_P(x) - L_{WG}^R(t_p^{II}) \leq L_{RL}(r_{ref}^{II}) \\ \text{Punkt (III)} &: R(r_{ref}^I + r_{ref}^{II'} + r_{ref}^{II}) \geq R^* \end{aligned} \quad (3. 36)$$

Es muss beachtet werden, dass in dem dargestellten Ansatz sowohl die Zuverlässigkeit als auch die spezifizierte Restlebensdauer als führende Größen berücksichtigt werden. Der Referenzparameter r_{ref} dient als Normierungsgrundlage zur Einordnung der Zuverlässigkeitsanforderungen.

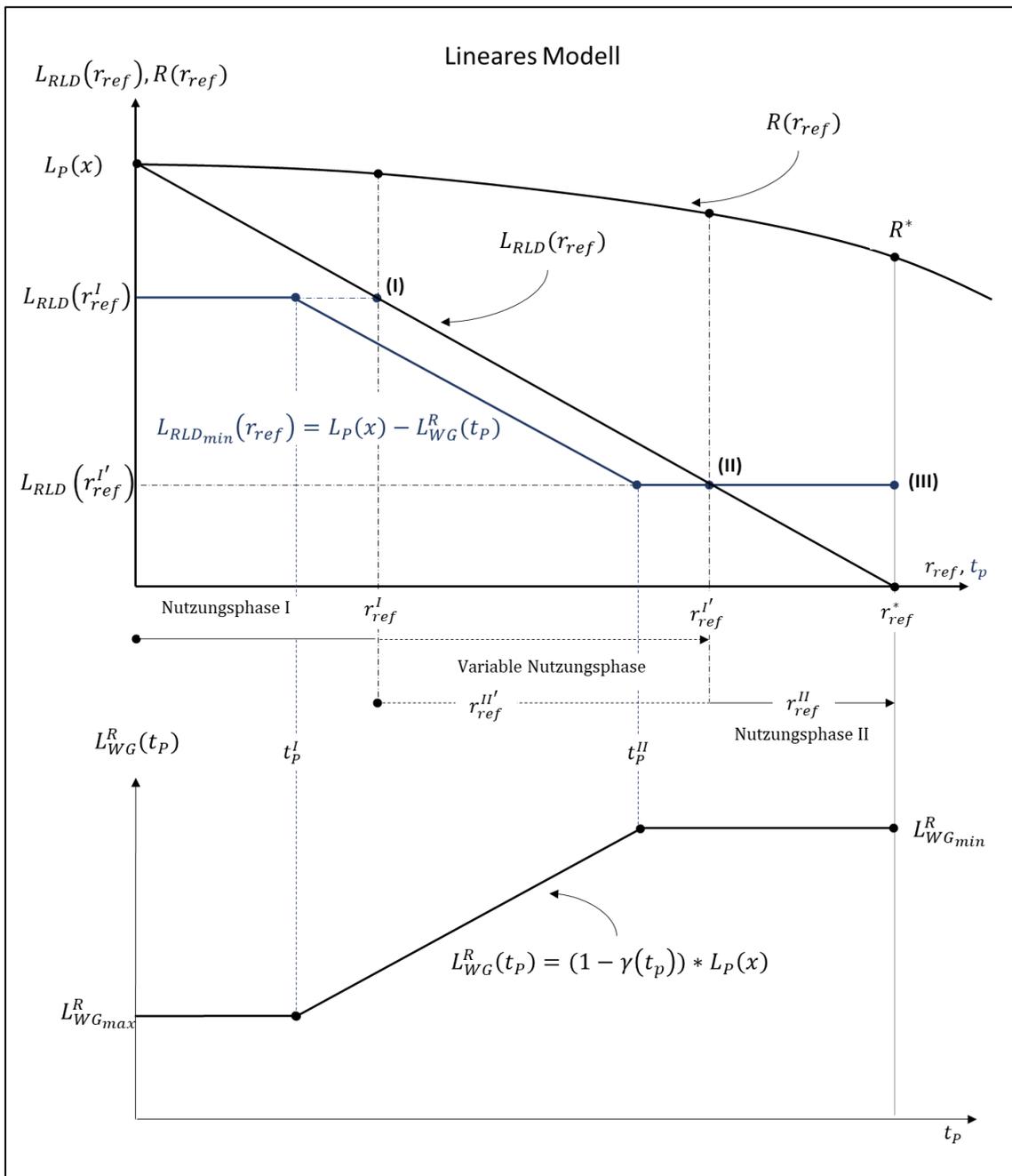


Abbildung 3-14 Der lineare Grenzwert im Zusammenspiel mit der Systemrestlebensdauer und der Zuverlässigkeit; Der in Abhängigkeit der Projektlebenszykluszeit und der Fahrzeugrestlebensdauer modellierte lineare Wiederverwendungsgrenzwert L_{WG}^R wird in den Kontext der von den Referenzparametern abhängenden Systemrestlebensdauer übertragen. $L_{RLD_{min}}$ beschreibt die minimale Lebensdauernanforderung und somit das untere Limit in Bezug auf die Restlebensdauer

• Exponentielles Modell

Alternativ zu einer linearen Abnahme der Fahrzeugrestlebensdauer und der damit zusammenhängenden Wiederverwendungsanforderung wird ein weiterer Ansatz vorgeschlagen. Das exponentielle Modell differenziert zwischen verschiedenen Nutzungsszenarien innerhalb des Fahrzeuglebenszyklus. Diese werden durch eine exponentielle Abnahme der Fahrzeugrestlebensdauer beschrieben und basieren auf der Annahme drei verschiedener Lebensabschnitte. Als Grundlage für die Bestimmung der Lebensabschnitte dienen Nutzungsdaten des Kraftfahrtbundesamtes [61][62] und der europäischen Datenerfassung [63], welche in Abhängigkeit vom Kraftfahrzeugalter erhoben wurden. Den ersten Abschnitt (I) kennzeichnet eine intensive Nutzung oberhalb der durchschnittlichen Beanspruchung. Der zweite Bereich (II) beschreibt eine Übergangphase, welche in den dritten Bereich (III), die Auslaufphase, mündet. In Abbildung 3-15 sind exemplarisch die exponentiell abnehmende Fahrzeugrestlebensdauer und der exponentielle Wiederverwendungsfaktor dargestellt. Analog zu dem linearen ist auch der exponentielle Faktor in einen maximalen, in einen dynamischen sowie in einen minimalen Anforderungsbereich unterteilt.

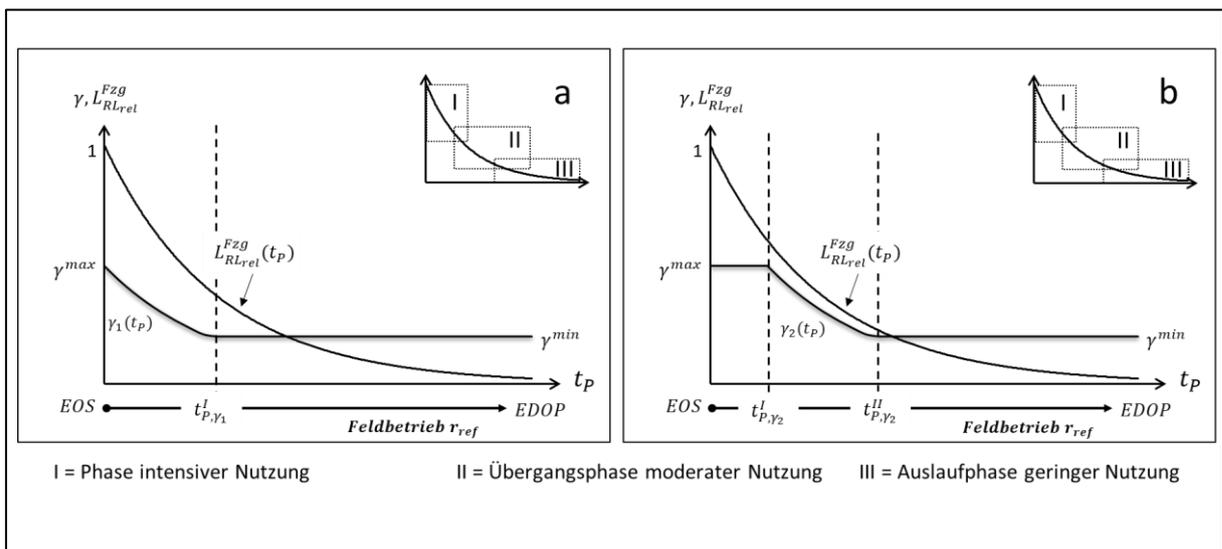


Abbildung 3-15 Der exponentielle Wiederverwendungsfaktor in Abhängigkeit des Fahrzeugalters und der Produktlebenszykluszeit

- Dargestellt ist der exponentielle Wiederverwendungsfaktor mit einem Startpunkt γ^{max}
- Dargestellt ist der exponentielle Wiederverwendungsfaktor mit einem konstanten Startbereich γ^{max}

Angenommen, die exponentielle Fahrzeugrestlebensdauerabnahme ist analog zu Gl. (3.35) anzunähern

$$L_{RLD_{rel}}^{Fzg}(t_p) = 1 * e^{-m*t_p}, \quad (3.37)$$

dann ist der Reuse Faktor in Abhängigkeit der Fahrzeugrestlebensdauerabnahme wie folgt zu modellieren.

$$\gamma(t_p) = \begin{cases} \gamma^{max} & , \text{für } t_p < t_p^I \\ \left(\frac{\gamma^{max}}{e^{-m \cdot t_p^I \cdot \gamma^c}} \right) * e^{-m \cdot t_p \cdot \gamma^c} & , \text{für } t_p^I \leq t_p < t_p^{II} ; 0 < \gamma(t_p) \leq 1. \\ \gamma^{min} & , \text{für } t_p \geq t_p^{II} \end{cases} \quad (3.38)$$

Der Vorteil eines exponentiellen Wiederverwendungsfaktors resultiert aus der Anpassung an die reale Fahrzeugrestlebensdauer und aus dem schnelleren Erreichen niedrigerer Wiederverwendungsgrenzwerte. Abbildung 3-16 veranschaulicht die Kombination des exponentiellen Grenzwertes mit der systemischen Lebensdauererwartung.

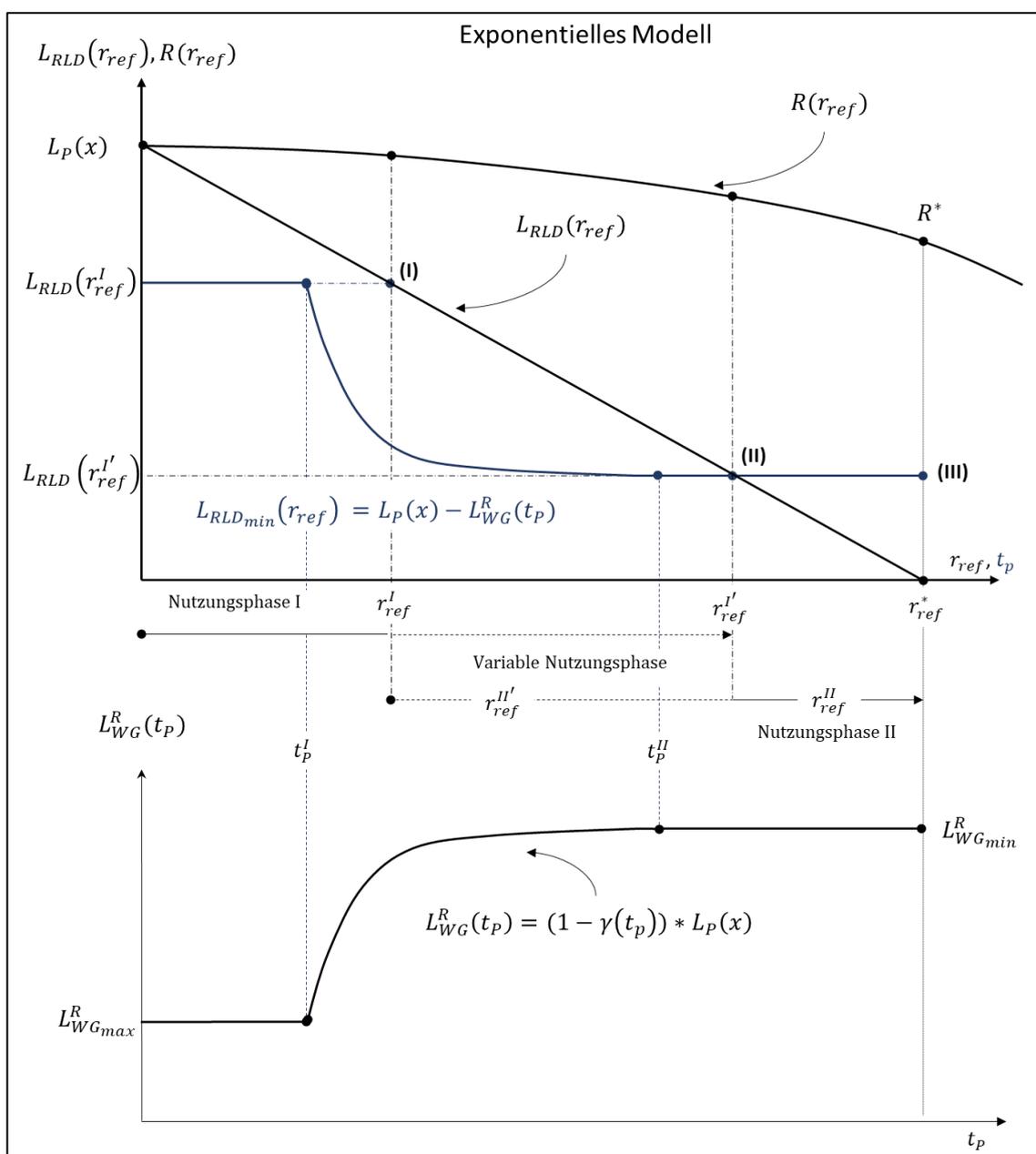


Abbildung 3-16 Der exponentielle Grenzwert im Zusammenspiel mit der Systemrestlebensdauer und der Zuverlässigkeit

Die Wiederverwendungsgrenzwerte können analog zu (3. 32), (3. 33) (3. 34) bestimmt werden. Die Systemlebenserwartung wird nach wie vor als linear aufgetragen. Hintergrund ist die Abhängigkeit von r_{ref} , weswegen eine lineare Lebensdauerabnahme mit zunehmendem Referenzparameter vorgeschlagen wird. Die Darstellungen der linearen und der exponentiellen Grenzwerte unterscheiden sich lediglich in der Modellierung des dynamischen Anteils. Aus diesem Grund wird auf die Erläuterung von Abbildung 3-14 verwiesen.

Die in diesem Kapitel beschriebenen Wiederverwendungsgrenzwerte definieren die Minimalanforderung in Bezug auf die Restlebensdauer aufgearbeiteter Systeme, Baugruppen und Komponenten. Auf ihrer Grundlage erfolgt die Einordnung der konsumierten Lebensdauer zurückgeführter Altteile. Dabei wird ebenfalls der prognostizierte Lebensdauerkonsum in der Nutzungsphase II berücksichtigt. Systeme, Baugruppen und Komponenten, welche nicht den Anforderungen der direkten Wiederverwendung genügen, können nicht ohne eine Nacharbeit dem Aufarbeitungsprozess zugeführt werden. Ein Überschreiten der Minimalanforderung geht mit einer erhöhten Ausfallwahrscheinlichkeit einher. Als Folge geht die Nutzungsphase II, wie bereits von Anityasari und Kaebnick [46] angemerkt, von einem sicheren Bereich in einen unsicheren Bereich über. Ein Nacharbeitsprozess kann durch beispielsweise ein gezieltes Austauschen kritischer Komponenten die Restlebensdauer nachträglich erhöhen. Der unsichere Bereich kann auf diesem Weg reduziert werden oder in Regionen außerhalb der Nutzungsphase II verschoben werden. Der Wiederverwendungsgrenzwert für eine Nacharbeit ist oberhalb des Bereiches der direkten Wiederverwendung anzusetzen, wenn die konsumierte Lebensdauer als Basis verwendet wird, siehe Gl. (3. 39). Die Grenzwerte sind je System, Baugruppe und Komponente definiert. Das beruht auf der Individualität von Beanspruchung, Beanspruchbarkeit und der Möglichkeit zur Instandsetzung

$$L_{Reuse}^R(t_P(x)) < L_{Rework}^R(t_P(x)) \quad (3. 39)$$

3.2.3.2 Auf den Kosten basierende Wiederverwendungsgrenzwerte

In diesem Abschnitt wird auf die Kosten der verfügbaren Optionen in der Aufarbeitung eingegangen. Analog zur Zuverlässigkeit erfolgt eine erste kostenseitige Bewertung bereits auf der Systemebene. Abbildung 3-17 veranschaulicht den Zusammenhang zwischen Restlebensdauer und Kosten für die drei Strategien Reuse, Rework und Recycling. Am Beispiel der Reuse Kurve (a) ist die Abhängigkeit der Kostenentwicklung von der Restlebensdauer dargestellt. Die direkte Wiederverwendung von Altteilen unterhalb der Restlebensdaueranforderung kann zusätzliche Kosten in Form von Gewährleistungs- und Regressansprüchen verursachen. Anityasari,

Kaebnick und Kara [49] schlagen für deren Berechnung den in Gl. (2. 42) - (2. 45) dargestellten Ansatz vor. Analog zu (a) stellt die Rework Kurve (b) die Abhängigkeit der Kostenentwicklung von der Restlebensdauer dar. Aufgrund des zusätzlichen und damit kostenintensiveren Aufarbeitungsprozesses ist die Kurve des Rework nach rechts verschoben. Der Schnittpunkt zwischen (a) und (b) bildet den kostentechnischen Break Even Point. Ab diesem Punkt bietet das Rework die wirtschaftlichere Lösung und entspricht dem kostenbasierten Reuse Limit L_{Reuse}^C . Es ist zu berücksichtigen, dass es einen Bereich unterhalb der Restlebensdaueranforderung für das Reuse und links von (b) gibt, in dem eine Wiederverwendung trotz höherer Ausfallwahrscheinlichkeit günstiger wäre als das Rework. Die Restlebensdaueranforderung an das Rework beschreibt die minimal notwendige Restlebensdauer für eine Nacharbeit. Systeme oder Komponenten unterhalb dieser Grenze können nicht mehr in einen Zustand versetzt werden, der den Restlebensdaueranforderungen gerecht wird. Kostenseitig wird die Nacharbeit von den Kosten für eine reine Neuteilproduktion begrenzt L_{Rework}^C .

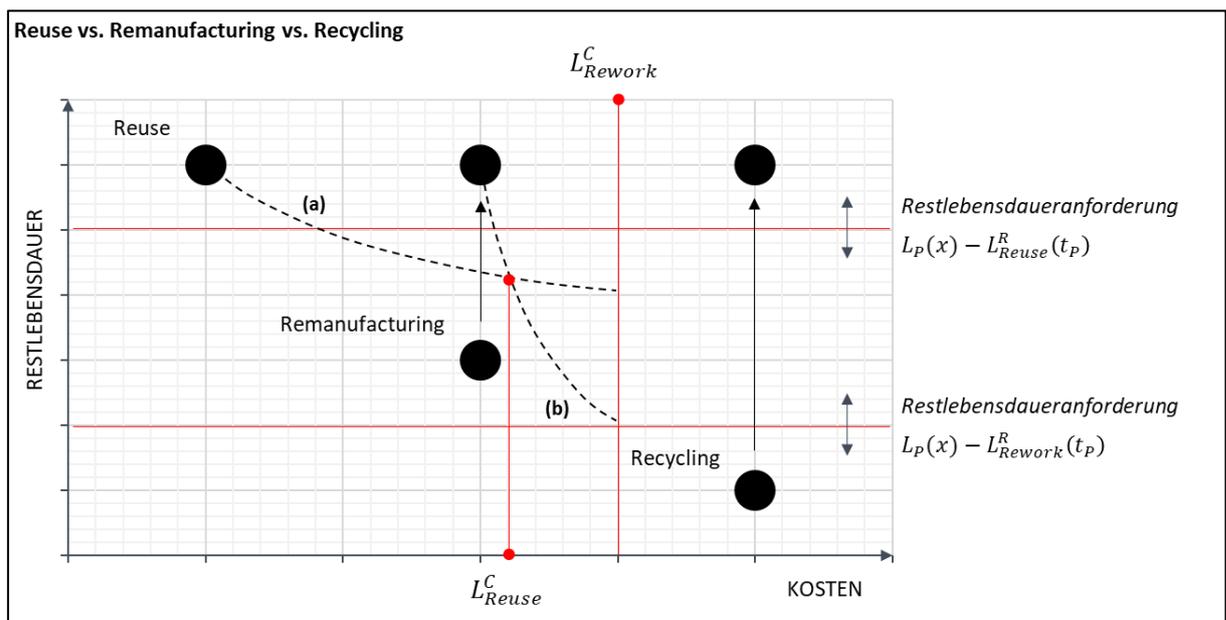


Abbildung 3-17 Zusammenhang zwischen Restlebensdauer und Kosten im Rahmen der Reuse vs. Rework vs. Recyclingentscheidung; Je niedriger die Restlebensdauer zurückgeführter Altteile desto höher liegen die Kosten je Aufarbeitungsoption unter Berücksichtigung der Restlebensdaueranforderungen (minimal notwendige Restlebensdauer für eine Option)

Am Beispiel der Reuse Kurve (a) ist die Abhängigkeit der Kostenentwicklung von der Restlebensdauer dargestellt. Die direkte Wiederverwendung von Altteilen unterhalb der Restlebensdaueranforderung kann zusätzliche Kosten in Form von Gewährleistungs- und Regressansprüchen verursachen. Anityasari, Kaebnick und Kara [49] schlagen für deren Berechnung den in Gl. (2. 42) - (2. 45) dargestellten Ansatz vor. Analog zu (a) stellt die Rework Kurve (b) die Abhängigkeit der Kostenentwicklung von der Restlebensdauer dar. Aufgrund des zusätzlichen und



damit kostenintensiveren Aufarbeitungsprozesses ist die Kurve des Rework nach rechts verschoben. Der Schnittpunkt zwischen (a) und (b) bildet den kostentechnischen Break Even Point. Ab diesem Punkt bietet das Rework die wirtschaftlichere Lösung und entspricht dem kostenbasierten Reuse Limit L_{Reuse}^C . Es ist zu berücksichtigen, dass es einen Bereich unterhalb der Restlebensdauernforderung für das Reuse und links von (b) gibt, in dem eine Wiederverwendung trotz höherer Ausfallwahrscheinlichkeit günstiger wäre als das Rework.

Nach der in Gl. (3. 24) und (3. 25) definierten Anforderung ist jeweils der Minimalwert in Bezug auf die zulässige konsumierte Lebensdauer (kostenorientiert L_{WG}^C und zuverlässigkeitsorientiert L_{WG}^R) zu wählen. Aus dieser Anforderung resultieren drei Szenarien für die Wiederverwendungsgrenzwerte. Der Index WG dient als Platzhalter für die verschiedenen Optionen in der Aufarbeitung.

- I. $L_{WG}^R = L_{WG}^C = L_{WG}$
- II. $L_{WG}^R > L_{WG}^C = L_{WG}$
- III. $L_{WG} = L_{WG}^R < L_{WG}^C$.

Die Berechnung der Kosten unterliegt unterschiedlichen Einflussfaktoren und wurde in einer Vielzahl von volkswirtschaftlichen Ansätzen bereits zu Genüge diskutiert. Aus diesem Grund wird auf eine nähere Ausführung an dieser Stelle mit dem Verweis auf die in Kapitel 2.5.2.2 aufgeführten Quellen verzichtet.

4. Feldbeanspruchung

Das Verständnis der Beanspruchung im Feld ist der Schlüssel zur Entwicklung von Schädigungsmodellen. Hierfür müssen allgemeine Lastannahmen getroffen und die Nutzungsvariabilität im Feld berücksichtigt werden. Im Folgenden werden am Beispiel einer ausgewählten Plattform die verfügbaren Daten und die darauf basierenden Pseudoschädigungswerte vorgestellt. Im Anschluss daran werden relevante Nutzungsprofile abgeleitet und eine Verknüpfung mit der Schädigung hergeleitet.

4.1 Allgemeine Lastannahmen

In diesem Abschnitt werden die allgemeinen Lastannahmen für das spezifizierte Feldleben diskutiert. Es wird sowohl auf die Unterschiede beim Fahrzeugalter in verschiedenen Märkten eingegangen als auch die Fahrleistung und Betriebszeit für verschiedene Fahrzeugkonfigurationen betrachtet. Das Ziel der Untersuchung ist die Herleitung des allgemeinen Spezifikationsrahmens für Elektrolenkungen. Weiterhin sollen die markt- und fahrzeugspezifische Nutzungsvariabilität sowie deren Relevanz für die weitere Analyse aufgezeigt werden.

4.1.1 Fahrzeugalter

Das Fahrzeugalter A_{FZ} spiegelt das tatsächliche Alter des Fahrzeuges in Jahren, und zwar ausgehend von seinem Produktionsdatum PD_{FZ} bis zum Betrachtungsdatum BD_{FZ} , wider

$$A_{FZ} = BD_{FZ} - PD_{FZ}. \quad (4.1)$$

Das Feldalter eines Fahrzeuges AF_{FZ} ist über das Zulassungsdatum ZD_{FZ} zu ermitteln

$$AF_{FZ} = BD_{FZ} - ZD_{FZ}. \quad (4.2)$$

In den nachfolgenden Ausführungen ist das Fahrzeugalter als synonym für das Feldalter AF_{FZ} zu verstehen.

Die Alterung eines Fahrzeuges, seiner Systeme sowie seiner Komponenten ist nicht immer von ihrer tatsächlichen Feldverweildauer abhängig. Vielmehr spielen die mechanische und die thermische Beanspruchung und die wechselnden Umwelteinflüsse im Feldeinsatz eine wichtige Rolle. Dennoch stellt das Fahrzeugalter und, damit einhergehend, die Feldverweildauer, eine relevante Größe in Bezug auf die Auslegung und die statistische Lebenserwartung von Fahr-

zeugkomponenten dar. Das Alter wird zudem als eine wichtige Normierungsgrundlage für die Abschätzung der Belastung im Feld verwendet. In der Automobilindustrie wird oft eine durchschnittliche statistische Lebensdaueranforderung von 15 Jahren angegeben [61]. Aufgrund von starken regionalspezifischen Unterschieden in Bezug auf die klimatischen Bedingungen, die Beschaffenheit der Infrastruktur und die Art und die Dauer der Fahrzeugnutzung ist eine Lebensdaueraussage nur nach einer Analyse der regionalen Rahmenbedingungen zielführend.

Das durchschnittliche Personenkraftfahrzeugalter betrug in Deutschland am 01. Januar 2019 ca. 9,5 Jahre [61]. Im Vergleich dazu lag das Alter der europäischen Personenkraftfahrzeuge (Pkw) im Jahr 2017 mit durchschnittlich 11,1 Jahren [65] deutlich über dem deutschen Durchschnitt. In Abbildung 4-1 sind die relativen Fahrzeugbestände nach Alter in den europäischen Regionen dargestellt. Die Zuordnung zu den europäischen Regionen erfolgt nach Einteilung der Vereinten Nationen [66].

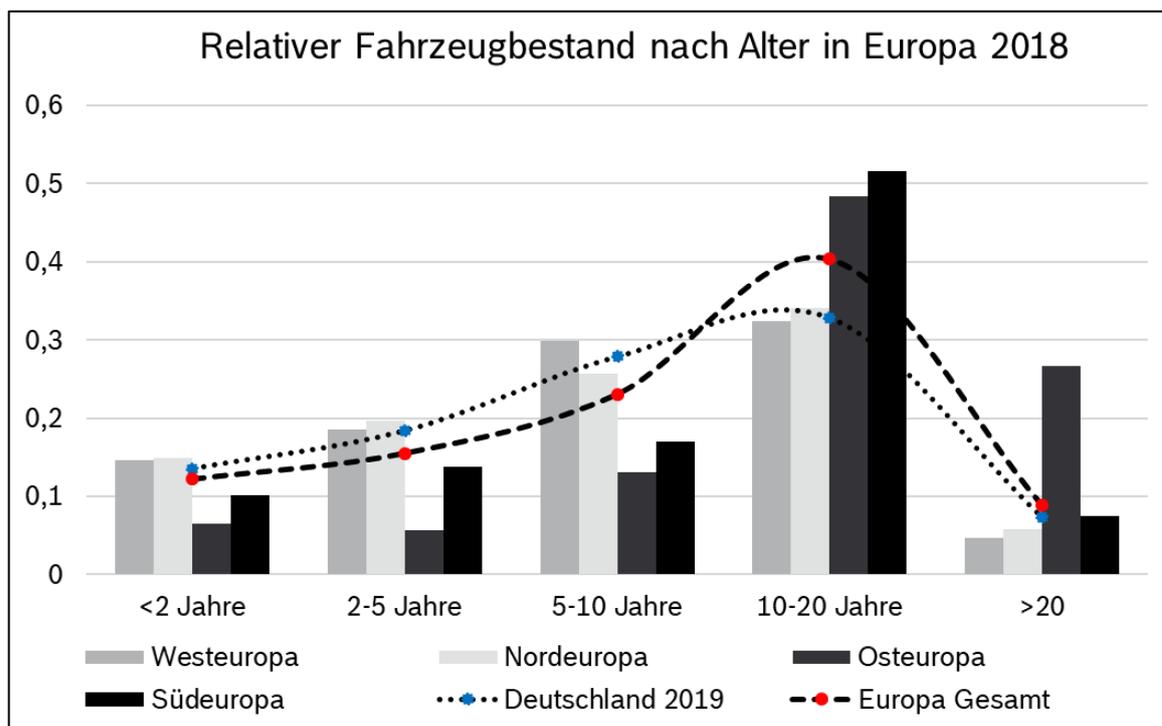


Abbildung 4-1 Relativer Fahrzeugbestand nach Alter in Europa 2018 (Eigene Darstellung unter Verwendung der Daten aus [67])

Wie dargestellt, bestehen zwischen den europäischen Regionen gravierende Unterschiede in Bezug auf das durchschnittliche Alter der Fahrzeugpopulation. Die Unterschiede sind zwischen den Nationen sogar noch stärker ausgeprägt. Insgesamt ist ein Trend in Richtung eines wachsenden Fahrzeugdurchschnittsalters bei Personenkraftwagen in Europa[65] und in Deutschland [68] zu erkennen. Fahrzeuge mit einem Alter von über 20 Jahren machen noch einen Anteil von 9% der 281 Millionen Fahrzeuge in Europa aus [69]. Die Annahme eines allgemeinen Zielalters

AF_{Fz}^* von 15-20 Jahren ist daher als realistisch für einen Fahrzeuglebenszyklus einzuschätzen. In Abbildung 4-2 ist das Durchschnittsalter der Pkw-Population verschiedener europäischer Staaten veranschaulicht. Zudem ist das Pkw-Durchschnittsalter für Deutschland, Europa und die USA vergleichend dargestellt.

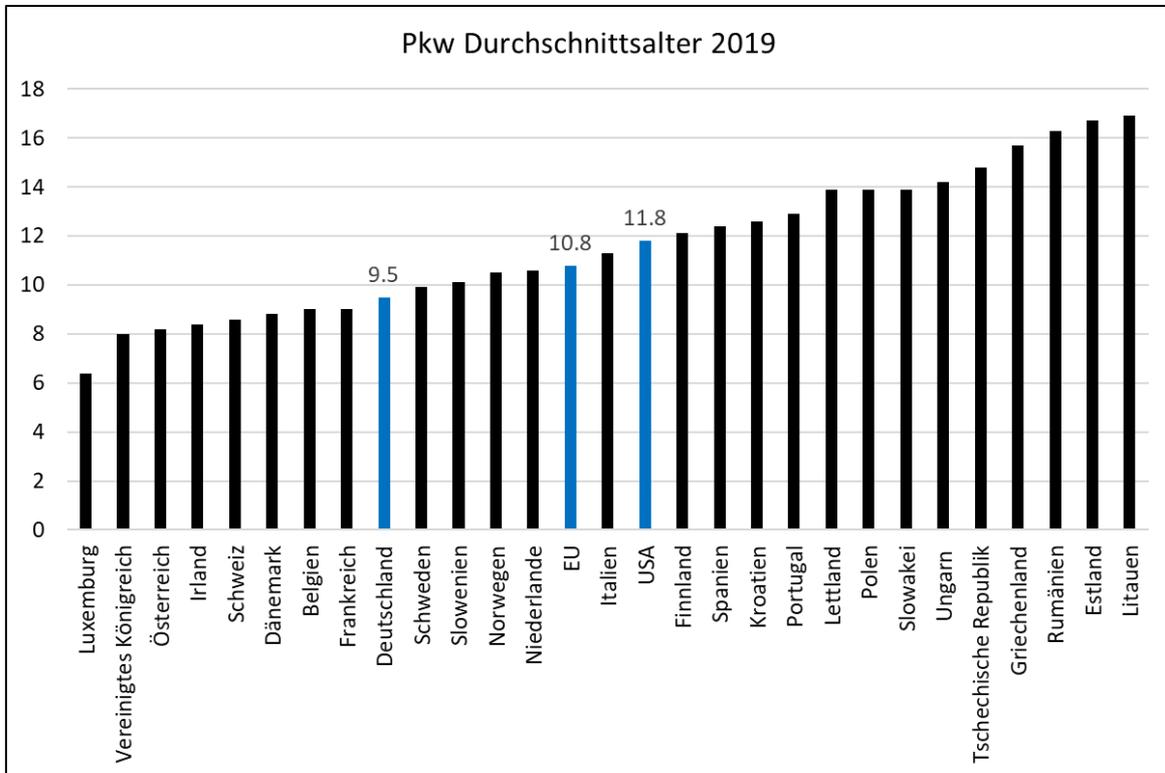


Abbildung 4-2 Pkw-Durchschnittsalter 2019 (Eigene Darstellung unter Verwendung der Daten aus EU [70] , USA [71])

Der Vergleich zwischen den Pkw-Populationen Europas und den Vereinigten Staaten ermöglicht das Einordnen des Fahrzeugalters in den globalen Kontext. Der Fahrzeugbestand in den USA mit rund 113 Millionen Personenkraftfahrzeugen [72] und einem Durchschnittsalter von 11,6 Jahren im Jahr 2016 [73] weist einen ähnlichen Trend wie der europäische Raum auf [74]. Für das Jahr 2019 belegen die Daten bereits einen Anteil von 15% des Gesamtfahrzeugbestandes für Fahrzeuge mit einem Alter von mindestens 12 Jahren [75]. Die Annahme eines Zielalters AF_{Fz}^* von 15-20 Jahren ist daher auch für den amerikanischen Markt als realistisch einzuschätzen. Der Trend zu längeren Fahrzeuglebensdauern unterstreicht die Relevanz und Notwendigkeit einer Aufarbeitung zur Sicherstellung einer ressourcenschonenden und kostengünstigen Ersatzteilversorgung.

Geht man von der in der Automobilindustrie üblichen spezifizierten Lebensdauer von 15 Jahren [61] aus, hat ein Teil der Feldpopulation diese bereits überschritten. Viele Fahrzeugkomponenten verschleißten jedoch, wie angemerkt, nicht aufgrund ihres Alters, sondern durch die

Intensität und Dauer ihrer Nutzung im Feld. Eine Lebensdauernanforderung von 15 Jahren wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit als Referenzwert und Normierungsgröße für das System- und Komponentenleben verwendet.

$$AF_{Fz}^* = r_a^* = 15 \text{ Jahre.} \quad (4.3)$$

4.1.2 Fahrleistung und Betriebszeit

Unter der Fahrleistung wird die zurückgelegte Strecke eines Fahrzeuges verstanden. Diese wird üblicherweise in Kilometern angegeben. Im Gegensatz zum Alter stellt die Fahrleistung zudem ein direktes Kriterium für Gebrauch und Nutzung eines Fahrzeuges dar. Nachfolgend wird die Fahrleistung in Abhängigkeit des Fahrzeugalters und der Fahrzeugklasse untersucht.

In Deutschland betrug die durchschnittliche Jahreslaufleistung des gesamten Fahrzeugbestandes im Jahr 2016 rund 13.341 km. Die Personenkraftfahrzeuge wiesen eine durchschnittliche Jahreslaufleistung von 14.015 km auf [76]. Im Vergleich dazu betrug die durchschnittliche jährliche Laufleistung aller im Individualverkehr befindlichen Kraftfahrzeuge der Vereinigten Staaten im Jahr 2018 ca. 21.687,53 km [77]. Verknüpft man die jährliche Laufleistung mit dem Fahrzeugalter, so kann eine Laufleistungsverteilung über die Fahrzeuglebensdauer hergeleitet werden, Abbildung 4-3.

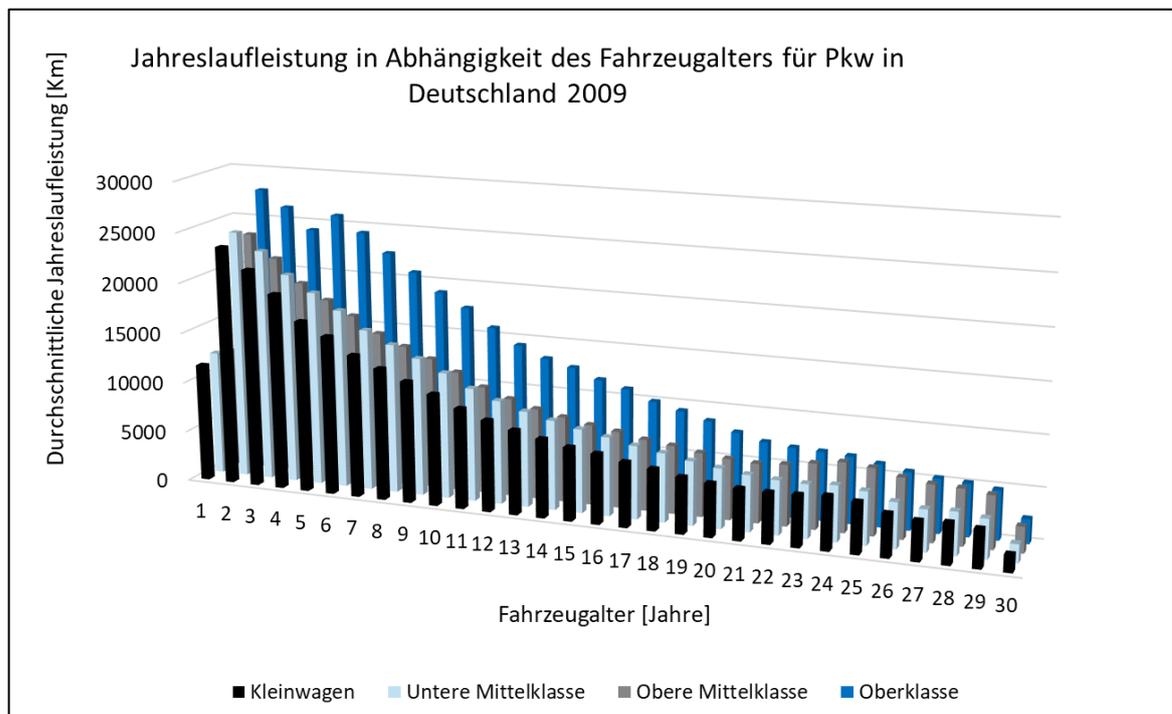


Abbildung 4-3 Laufleistung von Personenkraftfahrzeugen in Deutschland in Abhängigkeit des Fahrzeugalters (Eigene Darstellung unter Verwendung der Daten aus [63])

Wie aus der Abbildung hervorgeht, nimmt die durchschnittliche Laufleistung mit zunehmendem Fahrzeugalter ab [63]. Dieser Zusammenhang lässt sich für alle Fahrzeugklassen beobachten. In der Automobilindustrie ist eine Laufleistung von 250.000 km - 300.000 km [17] eine gängige Annahme für ein Fahrzeugleben. Unter Verwendung von (4. 3) ergibt sich somit eine maximale durchschnittliche Laufleistung \overline{LF}_{FZa}^* von 20.000 km pro Jahr für das Erreichen einer Laufleistungsobergrenze von 300.000 km.

$$\overline{LF}_{FZa}^* = \frac{LF_{FZ}^*}{AF_{FZ}^*} = \frac{300.000 \text{ km}}{15 \text{ Jahre}} = 20.000 \frac{\text{km}}{\text{Jahr}} \quad (4. 4)$$

Die durchschnittliche jährliche Laufleistung des amerikanischen Individualverkehrs lag mit ca. 21.687 km im Jahr 2018 deutlich oberhalb der deutschen jährlichen Laufleistung [78]. Unter der Annahme einer maximalen Laufleistung von 300.000 km ergibt sich eine durchschnittliche Feldverweildauer von 13.8 Jahren. Dies setzt voraus, dass die jährliche Laufleistung über den gesamten Fahrzeuglebenszyklus hinweg konstant bleibt, was im Widerspruch zu den Erkenntnissen aus Abbildung 4-3 steht. Im Umkehrschluss wäre das Erreichen der spezifizierten 15 Jahre im Feld mit einer Laufleistung von 325.000 km gleichzusetzen. Führt man eine Betrachtung am Beispiel der deutschen Fahrzeugpopulation durch und unterteilt diese in Fahrzeugklassen und Antriebsarten, so erhält man das in Tabelle 4-1. dargestellte Ergebnis. Grundlagen für die Berechnung sind eine angenommene Feldverweildauer von 15 Jahren sowie die jährlichen Laufleistungen aus Abbildung 4-3.

		Fahrzeugklasse			
		Kleinwagen	Untere Mittelklasse	Obere Mittelklasse	Kleinwagen
Antrieb	Benzin	157.685 km	184.240 km	170.962 km	200.836 km
	Diesel	345.465 km	321.342 km	327.139 km	366.539 km

Tabelle 4-1 Durchschnittliche kumulierte Laufleistung nach 15 Jahren für Fahrzeuge in Deutschland, gruppiert nach Fahrzeugklasse und Antriebsart (Eigene Darstellung unter Verwendung der Daten aus [63])

Die Unterschiede in der durchschnittlichen kumulierten Laufleistung nach einer Dauer von 15 Jahren werden nicht nur von der betrachteten Fahrzeugklasse, sondern auch durch die jeweilige Antriebsart bestimmt. Auffällig ist insbesondere die fast doppelt so hohe Laufleistung von Fahrzeugen mit Dieselmotor. Dies könnte auf die geringeren Kraftstoffkosten in Deutschland zurückzuführen sein, die den Dieselmotor in der Vergangenheit besonders attraktiv für eine

Nutzung mit hoher Laufleistung gemacht haben. Eine maximale Laufleistung von 300.000 km wird im weiteren Verlauf als Spezifikationsgrenze LF_{FZ}^* für ein Fahrzeugleben herangezogen.

$$LF_{FZ}^* = r_m^* = 300.000 \text{ km} \quad (4.5)$$

Die Betriebszeit BF_{FZ}^* ist analog zu der Laufleistung LF_{FZ}^* ebenfalls ein direkter Indikator für Gebrauch und Nutzung eines Fahrzeuges. In der Literatur sind nur wenige Annahmen für die jährliche Betriebszeit zu finden. Ross nennt eine durchschnittliche jährliche Betriebszeit von 300 h als häufige Annahme in der Automobilindustrie [61]. Geht man von dieser Annahme aus und kalkuliert auf der Basis einer maximalen Laufleistung von 300.000 km und mit einer maximalen Laufzeit von 15 Jahren, so resultiert eine durchschnittliche Fahrzeuggeschwindigkeit \bar{v} von 66,7 km/h.

$$\bar{v} = \frac{LF_{FZ}^*}{BF_{FZ}^*} \quad (4.6)$$

Bei sicherheitsrelevanten Systemen großer Automobilzulieferer ist eine jährliche Betriebszeit von 400 h (6000 h Spezifikationsgrenze bei einer durchschnittliche Fahrzeuggeschwindigkeit von 50 km/h) bis zu 533,33 h (8000 h Spezifikationsgrenze bei einer durchschnittlichen Fahrzeuggeschwindigkeit von 37,5 km/h) spezifiziert. In den weiteren Analysen dieser Arbeit wird eine maximale Betriebszeit von 8000 h als Spezifikationsgrenze für ein Feldleben angenommen.

$$BF_{FZ}^* = r_t^* = 8000 \text{ h} \quad (4.7)$$

4.2 Systematische Felddatenerfassung

Die systematische Erfassung von Felddaten (sFDE) erfolgt im Rahmen von Servicemaßnahmen oder Reparaturen während eines Werkstattaufenthaltes. Wie Abbildung 4-4 entnommen werden kann, werden die Felddaten mithilfe des Diagnose Equipments über die Fahrzeug OBD (On Board Diagnose) Schnittstelle ausgelesen und anonymisiert in einer Datenbank abgelegt. Neben dem Extrahieren der Daten erfolgt auch eine Eingabe von zusätzlichen Informationen in Bezug auf den Fahrzeugtyp und die Region, in welcher die Daten erhoben werden. Die Belastungsparameter sind bei der untersuchten Plattform auch in der ECU des Lenksystems abgelegt und können daher in der Aufarbeitung zur Einordnung der Vorbeanspruchung verwendet werden.

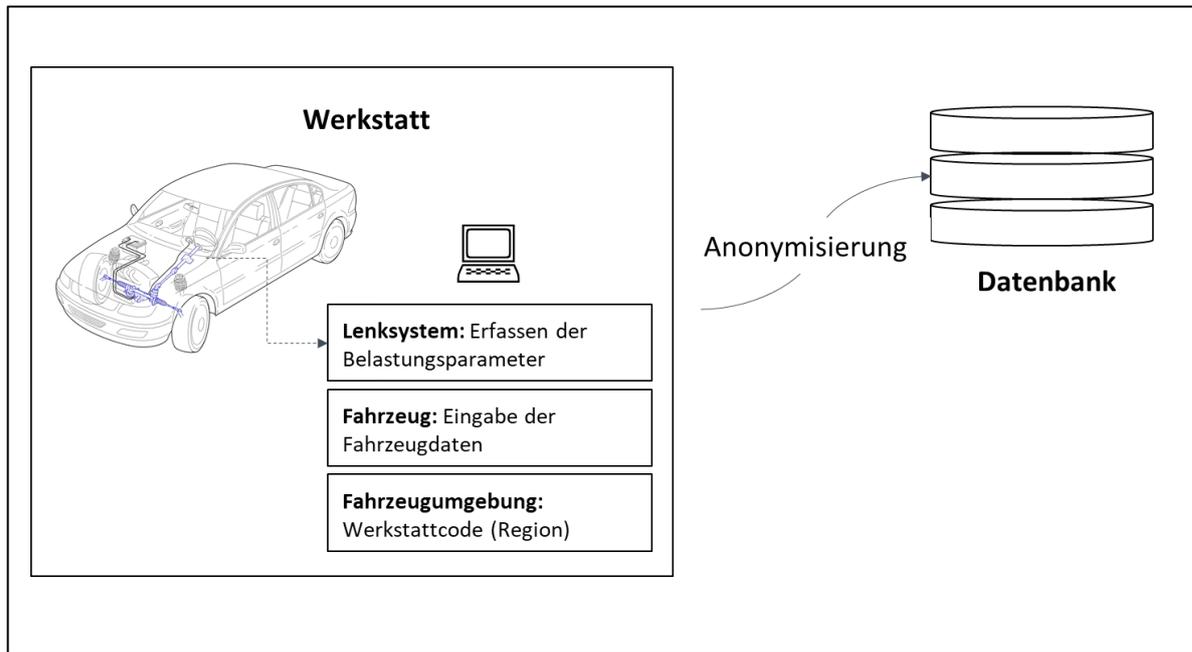


Abbildung 4-4 Auslesen von Fahrzeug- und Systemdaten

4.2.1 Anwendungsspektrum und Nutzungsvervielfältigung des Referenzsystems

Unter Verwendung des in Kapitel 3.2.1.2 vorgestellten Ansatzes erfolgt für die Untersuchung des Anwendungsspektrums und der Nutzungsvervielfältigung die Unterteilung in einen fahrzeugspezifischen sowie einen systemspezifischen Teil.

Der fahrzeugspezifische Teil beruht auf einer Auswertung der 3Fs Fahrzeug, Fahrzeugumgebung und Fahrprofil. Für die untersuchte Plattform bietet sich, wie in Abbildung 4-5 veranschaulicht, ein breites Anwendungsspektrum. Die Lenksysteme sind in Kompaktwagen, Limousinen, Kombilimousinen, Roadster/Coupes, Cabrios und SUVs verbaut. Als Resultat ergibt sich eine hohe Varianz in der Fahrzeugkonfiguration von der Motorisierung über das Gewicht, die Antriebsart bis zur Achsgeometrie. Ebenfalls relevant für die Beanspruchung ist neben dem Fahrzeugaufbau der Einfluss durch die Fahrzeugumgebung. Die Lenksysteme werden in den unterschiedlichsten klimatischen Regionen der Welt genutzt, wobei der Schwerpunkt dieser Analyse auf die europäischen Regionen gelegt wird. Ebenfalls zu berücksichtigen ist der Fahrereinfluss in Form des gefahrenen Fahrprofils. Je nach Fahrprofil erfährt das Lenksystem eine unterschiedlich hohe Intensität der Beanspruchung über den zeitlichen Verlauf der Nutzung hinweg.

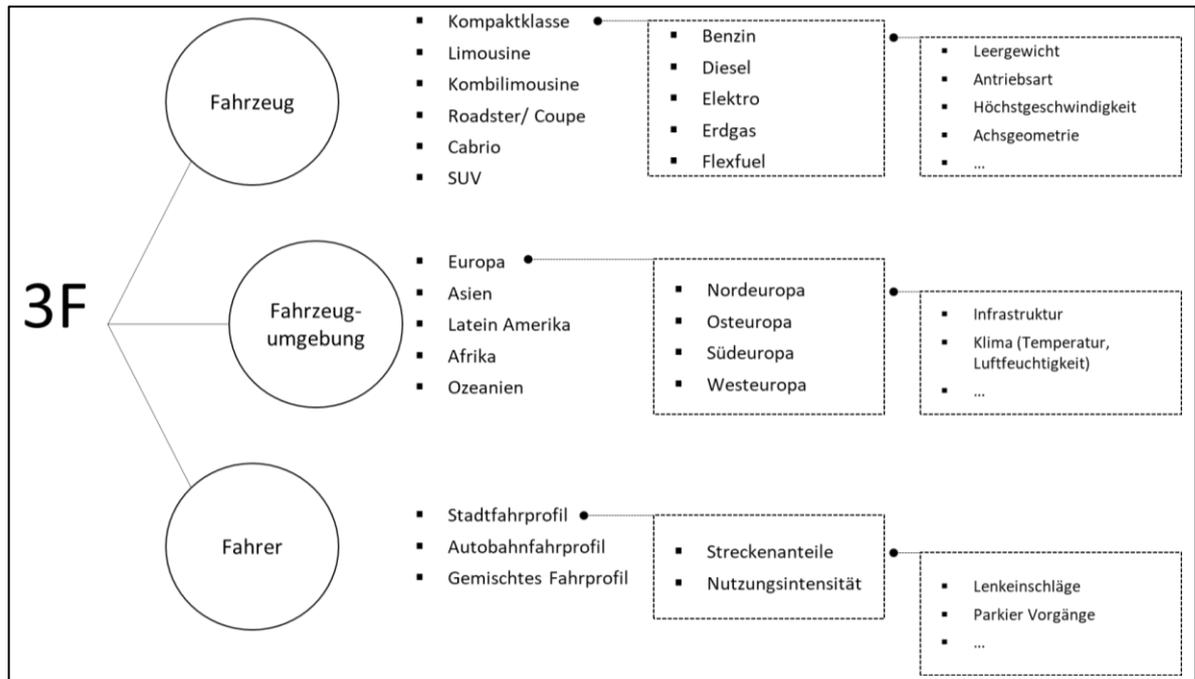


Abbildung 4-5 Aufschlüsselung der fahrzeugspezifischen Anwendungs- und Nutzungsvariabilität auf Basis der sFDE

Mithilfe der Felddaten können Rückschlüsse auf die 3Fs für die untersuchte Plattform gezogen werden. Von den über dreißigtausend verfügbaren Datensätzen sind 97 % dem europäischen Raum zuzuordnen. Abbildung 4-6 zeigt die Zuordnung aller europäischen Datensätze und nimmt eine Unterteilung in die europäischen Regionen und deren Länder vor.

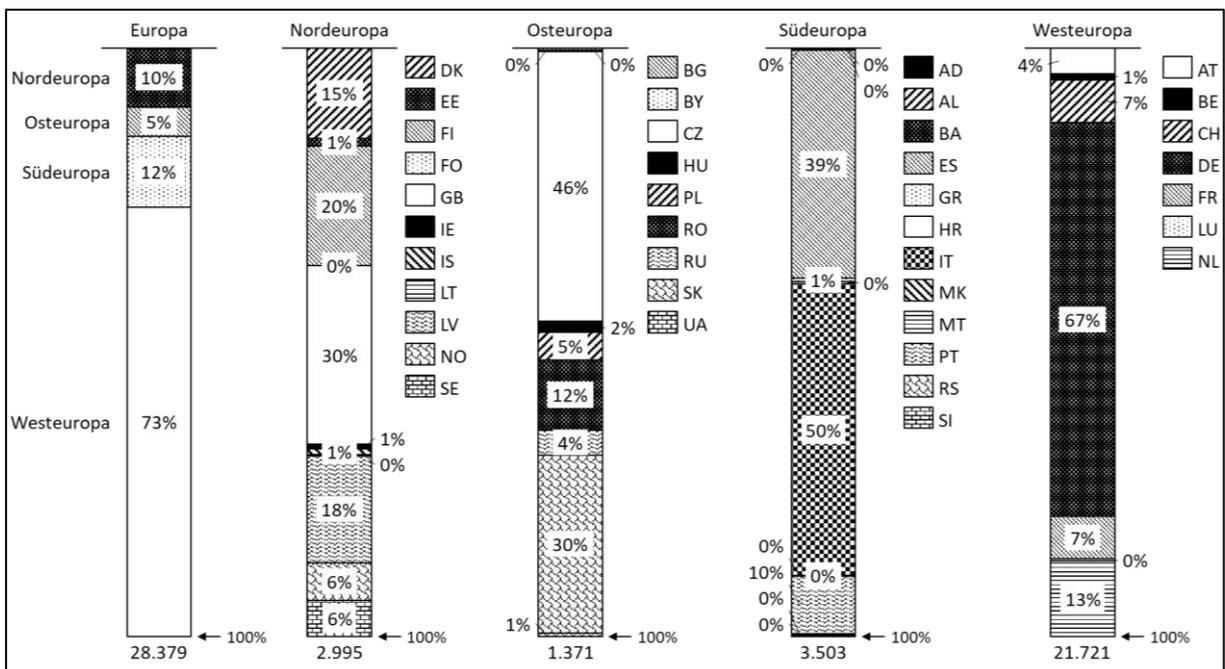


Abbildung 4-6 Aufteilung der für den europäischen Markt verfügbaren Fahrzeugdatensätze nach Regionen

Aus der Darstellung kann entnommen werden, dass ein Großteil der Daten der Region Westeuropa entstammt, wobei Deutschland mehr als 50 % aller europäischen und 67 % der westeuropäischen Fahrzeugdatensätze stellt. Die Ursache für die ungleiche globale und regionale Verteilung kann an dieser Stelle nur gemutmaßt werden, basiert aber vermutlich auf der unterschiedlichen Infrastruktur und Ausstattung von Werkstätten. Trotz des Ungleichgewichtes der Fahrzeugdatenverteilung wird die Diversität der vorhandenen Datensätze deutlich. Die 29,6 Tausend europäischen Fahrzeugdaten verteilen sich auf vier europäische Regionen und auf 39 Länder. Dies ermöglicht eine Auswertung regionaler Unterschiede vor dem Hintergrund länderspezifischer Besonderheiten und klimatischer Aspekte. Die Varianz im Fahrzeugaufbau der untersuchten Plattform kann der Abbildung 4-7 entnommen werden.

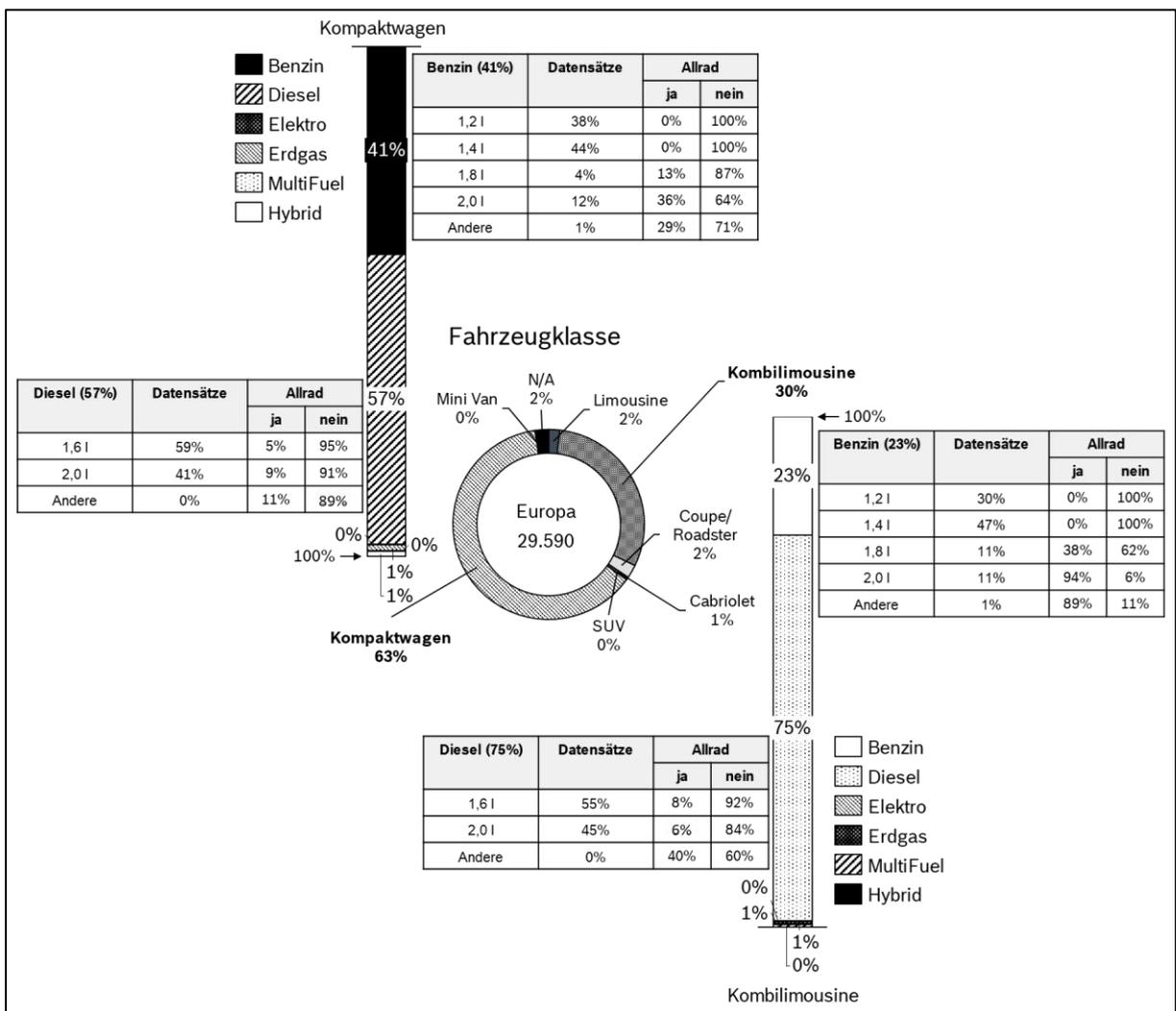


Abbildung 4-7 Aufteilung der für den europäischen Markt verfügbaren Fahrzeugdatensätze nach Fahrzeugaufbau

Der Großteil der in Europa verfügbaren Datensätze besteht aus Kompaktwagen sowie Kombilimousinen. Für diese beiden Klassen ist zusätzlich eine Unterteilung der Fahrzeugdaten in

Kraftstoffklassen gegeben. In der Kompaktwagenklasse sind lediglich 500 Datensätze mit alternativen Kraftstoffkonzepten, wie Elektroantrieb, Erdgas, Hybrid oder Multi Fuel, verfügbar. Das entspricht einem Anteil von ca. zwei Prozent in dieser Klasse. Die konventionellen Antriebskonzepte, wie Benzin (41%) und Diesel (57%), sind mit einem deutlich höheren Anteil vertreten. Neben den Kraftstoffklassen sind außerdem noch die Motorisierung und die Antriebsart in der Übersicht enthalten. Dies ermöglicht eine zusätzliche Differenzierung innerhalb einer Fahrzeug- und Kraftstoffklasse. Für die Auswertung der Anwendungs- und Nutzungsvervielfältigung bedeutet das eine zusätzliche Möglichkeit, etwaige Einflussfaktoren gezielt zu berücksichtigen. Analog zur Aufschlüsselung der Kompaktwagenklasse ist die Fahrzeugklasse der Kombilimousinen dargestellt. Die Verteilung alternativer Kraftstoffkonzepte mit einem Anteil von zwei Prozent ist ähnlich gering wie bei den Kompaktwagen. Auffällig ist der insgesamt sehr hohe Anteil an Dieselfahrzeugdaten in dieser Fahrzeugklasse. Für die Verteilung der Fahrzeugmotorisierung und die Antriebsart resultiert ein ähnliches Bild innerhalb der beiden Fahrzeugklassen.

Wie beschrieben, ist der Fahrereinfluss neben dem Fahrzeugaufbau und der Fahrzeugumgebung eine bestimmende Größe in der Nutzungsvervielfältigung von Lenksystemen. Die Fahrzeuggeschwindigkeit spielt dabei eine nicht unerhebliche Rolle. In Abbildung 4-8 ist eine Auswertung der Fahrzeugdurchschnittsgeschwindigkeit für ausgewählte Länder der europäischen Regionen visualisiert

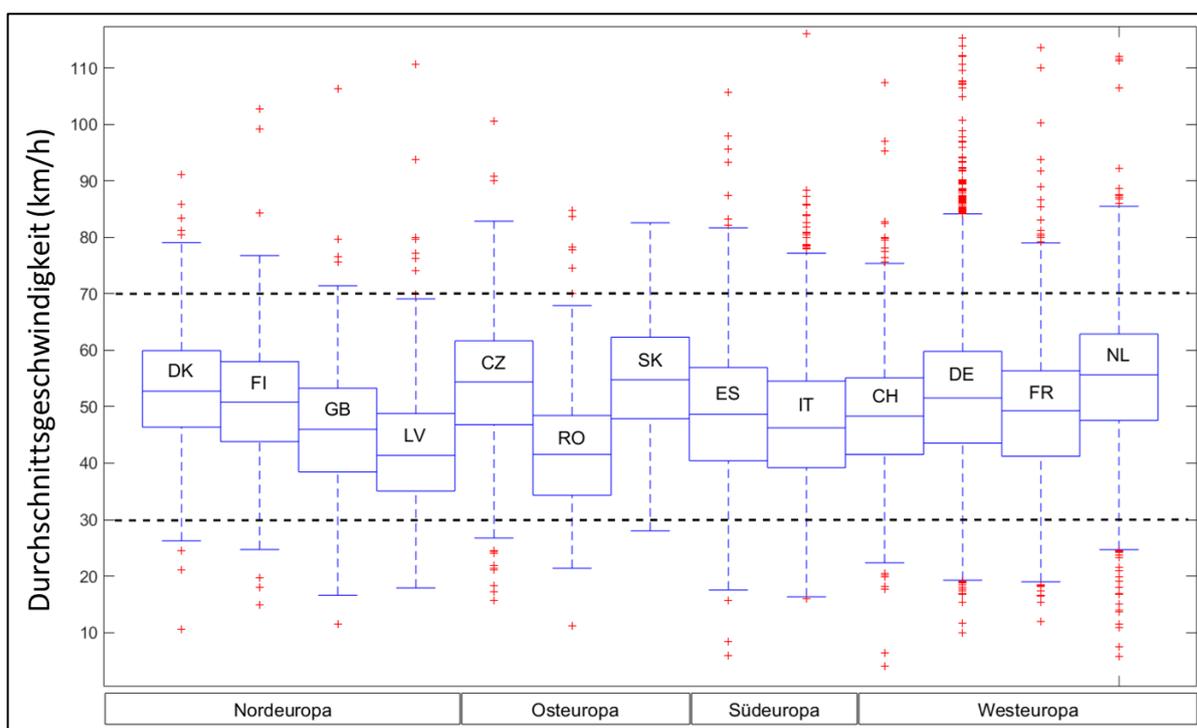


Abbildung 4-8 Vergleich des Fahrereinflusses in Bezug auf die Durchschnittsgeschwindigkeit für einzelne europäische Länder

Der Box Plot Darstellung sind die länderspezifischen Schwerpunkte in Bezug auf die Durchschnittsgeschwindigkeit zu entnehmen. Wie bereits dargestellt, bewegen sich die Schwerpunkte aller Daten zwischen 30 und 70 Kilometer pro Stunde, unterscheiden jedoch zwischen den Ländern in starkem Maß voneinander. Die über den Lebenszyklus eines Fahrzeuges gefahrene Durchschnittsgeschwindigkeit ist dann ein nicht zu vernachlässigender Indikator, wenn es um die Nutzungsintensität eines Lenksystems geht. Hohe Durchschnittsgeschwindigkeiten über 70 Kilometer pro Stunde deuten auf ein Fahrzeug hin, welches den Großteil seiner Feldnutzung mit hoher Geschwindigkeit und einer vergleichsweise geringen Lenkintensität verbracht haben muss. Eine Ausnahme bilden Lenksysteme, welche auf einer Rennstrecke bewegt wurden. Im Gegensatz dazu zeigen Stadtfahrprofile mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von unter 30 Kilometer pro Stunde höhere Lenkintensitäten innerhalb eines Feldlebens. Das Geschwindigkeitsprofil dazwischen wird als gemischtes Fahrprofil bezeichnet. In Kapitel 4.3 wird der beschriebene Unterschied anhand der Schädigungs- und Pseudoschädigungswerte verdeutlicht, soll in diesem Kontext aber bereits eine Indikation für die Relevanz des Parameters Durchschnittsgeschwindigkeit liefern.

Aus den exemplarisch aufgezeigten Variationen der 3Fs resultiert bereits eine hohe Variabilität des Anwendungsspektrums und der Nutzung für die ausgewählte Plattform. In Abbildung 4-9 ist zusätzlich die systemspezifische Aufschlüsselung der Anwendungs- und Nutzungsvariabilität am Beispiel der untersuchten Plattform veranschaulicht.

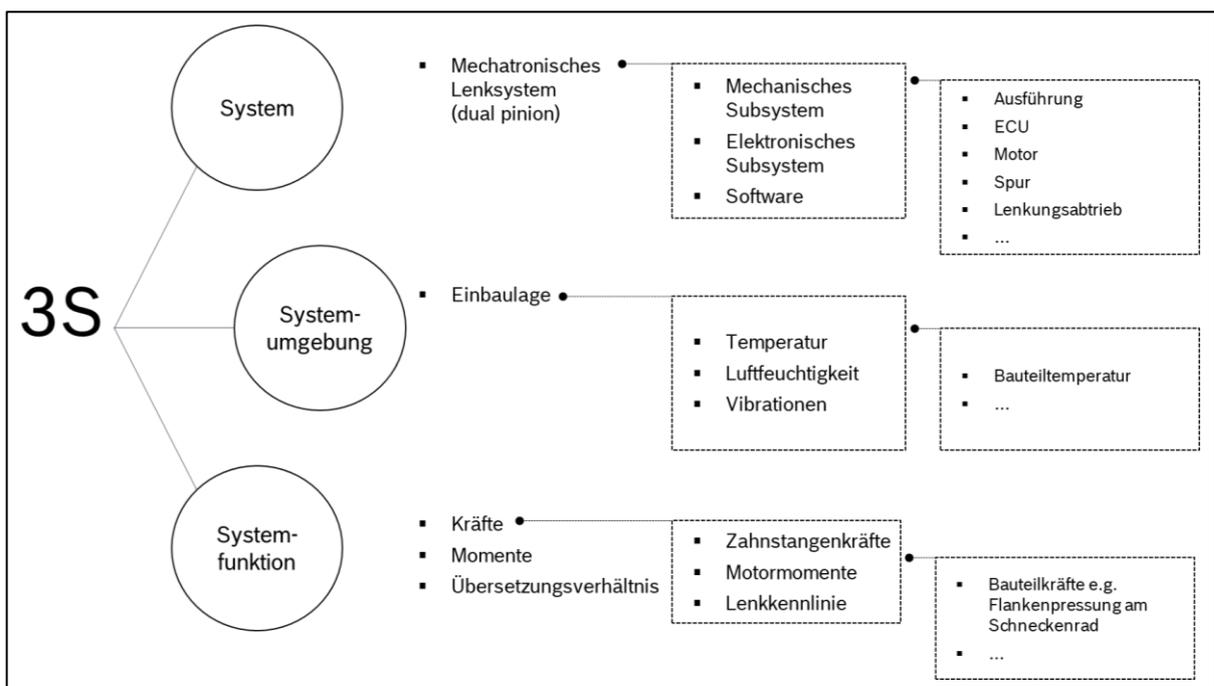


Abbildung 4-9 Aufschlüsselung der systemspezifischen Anwendungs- und Nutzungsvariabilität auf Basis der sFDE

Das mechatronische Lenksystem besteht aus einem mechanischen und einem elektronischen Subsystem sowie einem Softwareanteil. Je nach plattform- und fahrzeugspezifischer Konfiguration lassen sich unterschiedliche Ausführungen, wie Rechtslenker und Linkslenker, sowie Varianten von ECU, Motor, Spur und Lenkungsantrieb realisieren. Ebenfalls relevant für die Alterung und den Verschleiß der Systemelemente ist die Umgebung, in welcher sich diese befinden. Die Einbaulage innerhalb der Fahrzeugarchitektur spielt hierbei eine wesentliche Rolle. Sie ist entscheidend dafür, welchen äußeren Einflüssen das Lenksystem während unterschiedlicher Betriebsbelastungen ausgesetzt ist. Als wichtige Einflussgrößen können die Temperatur, die Feuchtigkeit und die Vibrationen genannt werden. Bei den Systemfunktionen sind verschiedene Variationen in Form der resultierenden Kräfte, Momente und des Übersetzungsverhältnisses möglich. Um die Beanspruchung auf der System-, Baugruppen- und auf der Komponentenebene bewerten zu können, besteht die Notwendigkeit, die relevanten 3F und 3S Kombinationen in die Auswertung miteinfließen zu lassen.

Die Lenksysteme der ausgewählten Plattform gehören zu der Kategorie EPSdp. Bei der EPSdp erfolgt der Eingriff des Reduktionsgetriebes über ein zweites Ritzel. Die EPSdp ist in ihrem Anwendungsspektrum dem mittleren Fahrzeugsegment zuzuordnen und gilt als robust und wartungsfrei. In Abbildung 4-10 sind die verschiedenen EPS Variationen in Bezug auf Aufbau, Leistung, Zahnstangenkraft und Motormoment visualisiert.

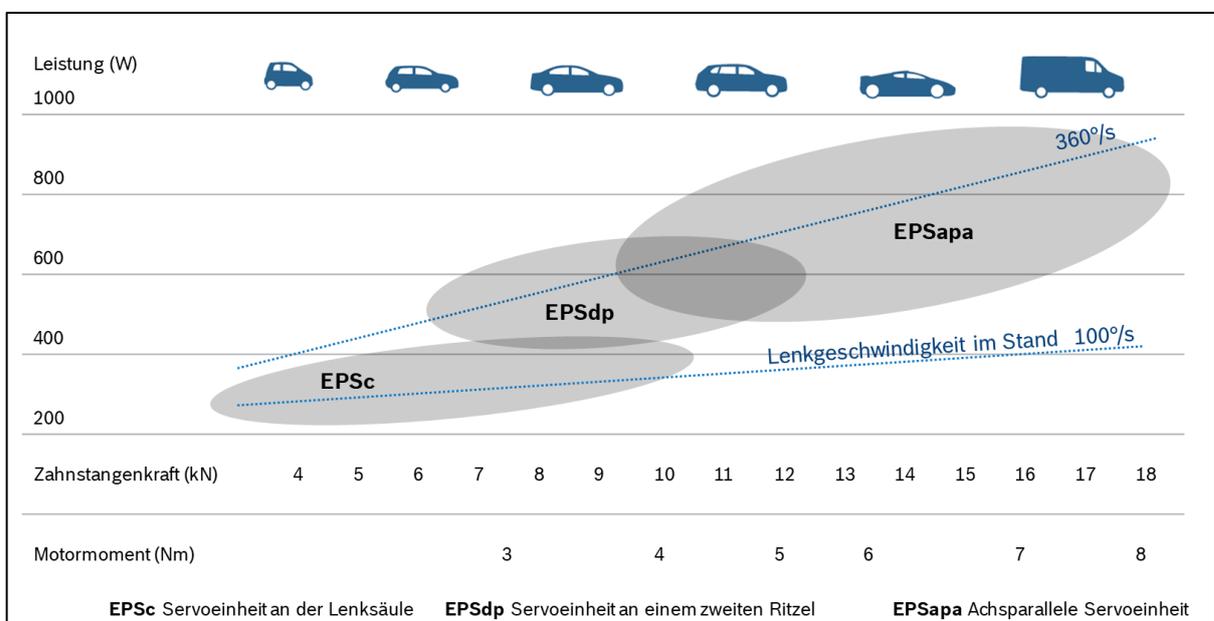


Abbildung 4-10 Übersicht über das Lenksystemportfolio für Pkw (In Anlehnung an [79])

Neben der EPSdp sind die Varianten EPSc für den Kleinwagensektor und EPSapa für LCV, Ober- und Luxusklasse dargestellt. Systemseitig verfügt die ausgewählte Plattform über zwei

verschiedene Motorvariationen, welche ein Motorsollmoment von vier bis fünf Newtonmeter realisieren können. Die Lenkübersetzung kann sowohl konstant als auch variabel erfolgen. In Abhängigkeit von der gewählten Fahrzeugvariante werden das mechanische Subsystem und das elektronische Subsystem kombiniert und verschiedene Ausführungen von der Spur, der Zahnstangensummenkraft und der Einbaulage realisiert. Die grau unterlegten Bereiche zeigen, welche Zahnstangensummenkräfte und welches Motormoment in der jeweiligen Fahrzeugkategorie mit welchem Lenksystemtyp abgedeckt werden. Jeder Systemtyp deckt einen Anwendungsbereich ab, was sich entsprechend in der Variabilität der Nutzung und der Beanspruchung widerspiegelt.

In Abbildung 4-11 ist der Aufbau der EPSdp sowie des Schraubradgetriebes und der Lenkkräfteunterstützungseinheit (SCU) dargestellt.

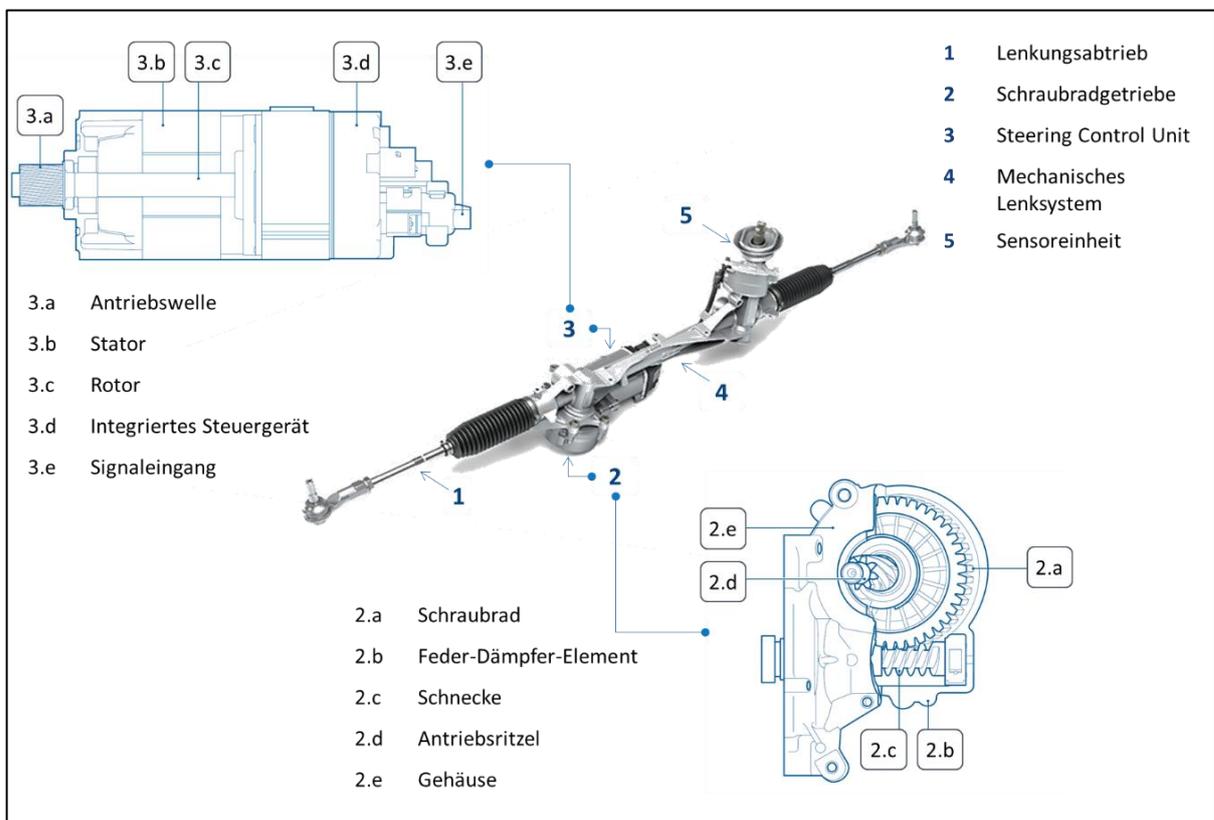


Abbildung 4-11 Aufbau eines Dual-pinion-Lenksystems EPSdp (Darstellung in Anlehnung an [79])

Das Dual-pinion (dp) -Lenksystem EPSdp der untersuchten Plattform ist für Lenkachslasten von bis zu 12 kN ausgelegt [79]. Bei dem Antriebsmotor handelt es sich um einen bürstenlosen Gleichstrommotor der, und zwar je nach Motorklasse, ein Drehmoment von vier bis fünf Newtonmeter realisiert. Das Motordrehmoment wird über die Abtriebswelle mittels einer Kupplung auf das Schraubradgetriebe übertragen. Die Schnecke überträgt das eingehende Drehmoment

wiederum auf das Schraubrad und dieses wird über das Antriebsritzel an die Zahnstange des mechanischen Lenksystems weitergegeben. Der im Zahneingriff liegende Polymerwerkstoff des Schraubrades PA66 gehört zur Gruppe der Thermoplaste, was insbesondere bei der Berücksichtigung des Temperatureinflusses von Relevanz ist. Der Lenkungsabtrieb stellt die mechanische Verbindung des Lenksystems zur Radaufhängung dar und überträgt die Zahnstangenkraft auf diese.

Sowohl die 3Fs als auch die 3Ss weisen eine hohe Varianz auf. Für das Anwendungsspektrum und die Nutzungsvervielfältigung der dargestellten Plattform bedeutet das eine ebenso hohe Varianz in ihren möglichen Ausprägungen. Mithilfe der sFDE gilt es, diese Varianz beherrschbar zu machen sowie die für die Beanspruchung kritischsten Kombinationen zu identifizieren und zu bewerten.

4.2.2 Beanspruchungsparameter

Zur Identifikation kritischer Lastprofile aus den Felddaten wird eine Analyse der verfügbaren Beanspruchungsparameter vorgenommen. Die Beanspruchungsparameter sind Parameter, welche Rückschlüsse auf die Intensität der Nutzung von Fahrzeug und Lenksystem zulassen. Abbildung 4-12 vermittelt einen Überblick über die vorhandenen Parameter.

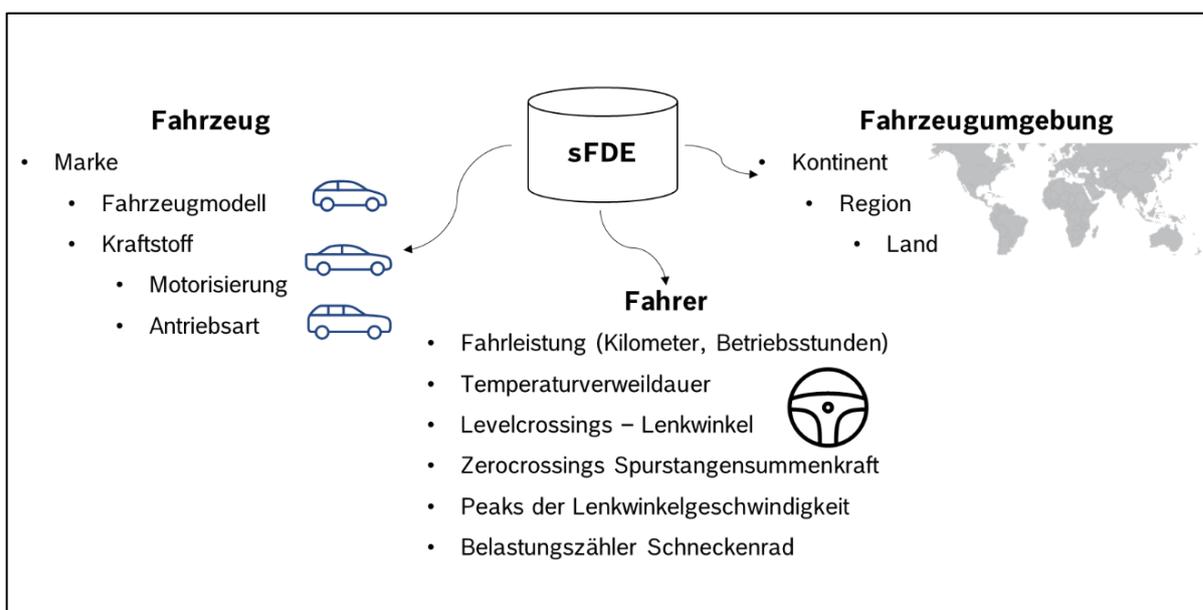


Abbildung 4-12 Überblick über die durch die sFDE erfassten Parameter

Nachfolgend werden die in der Übersicht dargestellten Parameter konkretisiert. Es wird dabei zwischen direkt erfassbaren Parametern und indirekt ableitbaren Parametern differenziert.

4.2.2.1 Load Recording Software

Die belastungserfassende Software, auch Load Counter (LC) genannt, basiert auf dem Prinzip der linearen Schadensakkumulation nach Miner Elementar. Die Berechnung nach Miner Elementar ermöglicht durch eine Verlagerung der Zeitfestigkeitsgeraden in den Dauerfestigkeitsbereich die Berücksichtigung von Spannungsamplituden ober- und unterhalb der Dauerfestigkeitsgrenze [18]. Für den Einsatz in Lenksystemen wird der LC als Frühwarnsystem und als Belastungs- und Beanspruchungsindikator verwendet. Grundsätzlich wird in dieser Arbeit zwischen drei Arten von LC Varianten für Lenksysteme unterschieden welche sich in ihrer Berechnung unterscheiden und in ihrer Funktion auf verschiedene Baugruppen beziehen.

- Standard-Schadensakkumulation (SLC)

Die Standard-Schadensakkumulation (SLC) dient als Indikator für die im Feld zu ertragende Beanspruchung des Gesamtsystems. Der SLC beruht auf der Annahme einer standardisierten Wöhlerlinie mit einer Neigung von $k_{SLC} = 5$ [80], einer Grenzlastspielzahl N_{0SLC} und einem Referenzmoment M_{0SLC} . Das vom Servomotor abgegebene Unterstützungsmoment wird mittels eines Hysterese Filters M_H gefiltert und die Lastwechsel unter Verwendung des Rainflow Zählverfahrens zusammengefasst. Die Funktionsweise des Rainflow Zählverfahrens kann in [18] und [19] nachgelesen werden. Der Einfluss der Mittelspannung M auf die Bauteillebensdauer wird bei jedem Wertepaar entsprechend dem Haigh-Diagramm berücksichtigt, indem die Lastamplituden M_{a_i} auf ein identisches Spannungsverhältnis transformiert werden. Die Amplitudentransformation erfolgt standardmäßig auf das Spannungsverhältnis $R = -1$ [17].

$$D_{SLC} = \frac{1}{N_{0SLC}} * \sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{M_{a_i} + M * |M_{m_i}|}{M_{0SLC}} \right)^k \right) \quad (4.8)$$

- Schadensakkumulation für Lenksystemen mit Kugelgewindetrieb (KGT-LC)

Der KGT-LC dient ebenfalls als Indikator für die im Feld zu ertragende Beanspruchung. Der Zähler bezieht sich in seiner Funktion jedoch nicht auf das Gesamtsystem, sondern speziell auf das Reduktionsgetriebe der EPSapa, den Kugelgewindetrieb (KGT). Für die Schädigungsrechnung wird das gefilterte Motormoment M_i mit der Lenkwinkeldifferenz ΔW multipliziert und die Schadenssumme mit dem Faktor A skaliert. Die Skalierung ist deshalb notwendig, um die Betriebsbeanspruchung in ein Verhältnis zu den experimentell ermittelten Werten zu setzen. Gl. (4.9) zeigt die Schadensakkumulation für den KGT-LC.

$$D_{KGT-LC} = A * \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{2} * |M_{i-1} + M_i| \right)^3 * |W_i - W_{i-1}| \quad (4.9)$$

- Schadensakkumulation für Lenkungen mit Schneckenradgetriebe (SR-LC)

Die SR-LC dient als Indikator für die im Feld ertragende Beanspruchung und bezieht sich in seiner Funktion auf das Schneckenrad des Reduktionsgetriebes der EPSdp. Die Berechnung sowie die Berechnungsgrundlage des SR-LC werden im Folgenden aufgrund der Relevanz des SR-LC als Beanspruchungsreferenzparameter für diese Arbeit detaillierter beschrieben. Die in der Software zugrunde gelegten Referenzwöhlerlinien N_j werden über eine statistische Auswertung der experimentell ermittelten Wöhlerlinien bei unterschiedlichen Temperaturniveaus berechnet. Im Gegensatz zu den experimentell ermittelten Wöhlerlinien beinhalten die Referenzwöhlerlinien einen zusätzlichen Faktor $A = e^{\alpha * \Delta T}$. Dieser beschreibt den linear interpolierten Zusammenhang zwischen der Lebensdaueränderung und dem Temperaturgradienten, und zwar unter Berücksichtigung der Referenztemperatur T_0 .

$$N_j = N_{0Ref} * \left(\frac{M}{M_0} \right)^{-k_{Ref}} * e^{-\alpha_{ref} * (T_j - T_0)}, T_j \geq 0. \quad (4.10)$$

Die Bestimmung der Referenzgrenzlastspielzahl N_{0Ref} , des Neigungsfaktor k_{Ref} und des Temperaturkoeffizienten α_{Ref} erfolgt über eine multivariate Regressionsanalyse der bei unterschiedlichen Temperaturniveaus durchgeführten Wöhlerversuche.

$$\log N = \log N_{0Ref} - k_{Ref} * \log \frac{M}{M_0} - \alpha_{Ref} * \frac{(T_j - T_0)}{\ln 10}, T_j \geq 0 \quad (4.11)$$

Logarithmiert man die temperaturabhängige Wöhlerlinie (4.11) und legt die aus den Stichproben ermittelten unterschiedlichen Merkmalsausprägungen zugrunde, dann sind die Parameter für die Referenzgleichung analog zu den Steigungskoeffizienten der multivariaten Regression [81] zu bestimmen:

$$\text{Steigungskoeffizient } k_{Ref} = \frac{r_{yx_1} - r_{yx_2} * r_{x_1x_2}}{1 - r_{x_1x_2}^2} * \frac{s_y}{s_{x_1}} \text{ (Motormoment)} \quad (4.12)$$

$$\text{Steigungskoeffizient } \alpha_{Ref} = \frac{r_{yx_2} - r_{yx_1} * r_{x_1x_2}}{1 - r_{x_1x_2}^2} * \frac{s_y}{s_{x_2}} \text{ (ECU Temperatur)} \quad (4.13)$$

$$\text{Regressionskonstante } \log N_{0Ref} = \bar{y} - k * \bar{x}_1 - \alpha * \bar{x}_2 \quad (4.14)$$

Mit $x_1 = \log \frac{M}{M_0}$, $x_2 = \frac{(T_j - T_0)}{\ln 10}$ und $y = \log N$.

Das Bestimmtheitsmaß R_{Ref}^2 der multivariaten linearen Regression ist analog zu einer bivariaten Regression zu bestimmen [81]:

$$R_{Ref}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4.15)$$

Die Residualvarianz s_{Ref}^2 mit $n - 3$ Freiheitsgraden bildet die Summe der quadrierten Abstände von der Referenzgleichung [82]. Sie stellt neben dem Bestimmtheitsmaß ein weiteres Maß für die Anpassungsgüte der Regression dar:

$$s_{Ref}^2 = \frac{1}{n-3} * \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2. \quad (4.16)$$

Je nach Anforderungsniveau kann ein zusätzlicher Sicherheitsfaktor PA für eine Verschiebung nach links der Referenzkurven berücksichtigt werden. Hierfür wird der kritische Wert der t-Verteilung $t_{\frac{\tau}{2}, n-3}^{crit}$ für die gewünschte Aussagesicherheit $PA = \tau$ bestimmt. Die Referenzgrenzlastspielzahl N_{0Ref} verringert sich um das Produkt des kritischen Wertes der t-Verteilung mit der Residualstandardabweichung, dividiert durch die Wurzel der Stichprobengröße [83]:

$$\log N_{0Ref,PA} = \log N_{0Ref} - t_{\frac{\tau}{2}, n-3}^{crit} * \frac{\sqrt{s_{Ref}^2}}{\sqrt{n}}. \quad (4.17)$$

Abbildung 4-13 präsentiert exemplarisch die in der Software hinterlegten Referenzwöhlerlinien für eine definierte Aussagesicherheit PA_{Ref} und eine definierte Überlebenswahrscheinlichkeit PU_{Ref} .

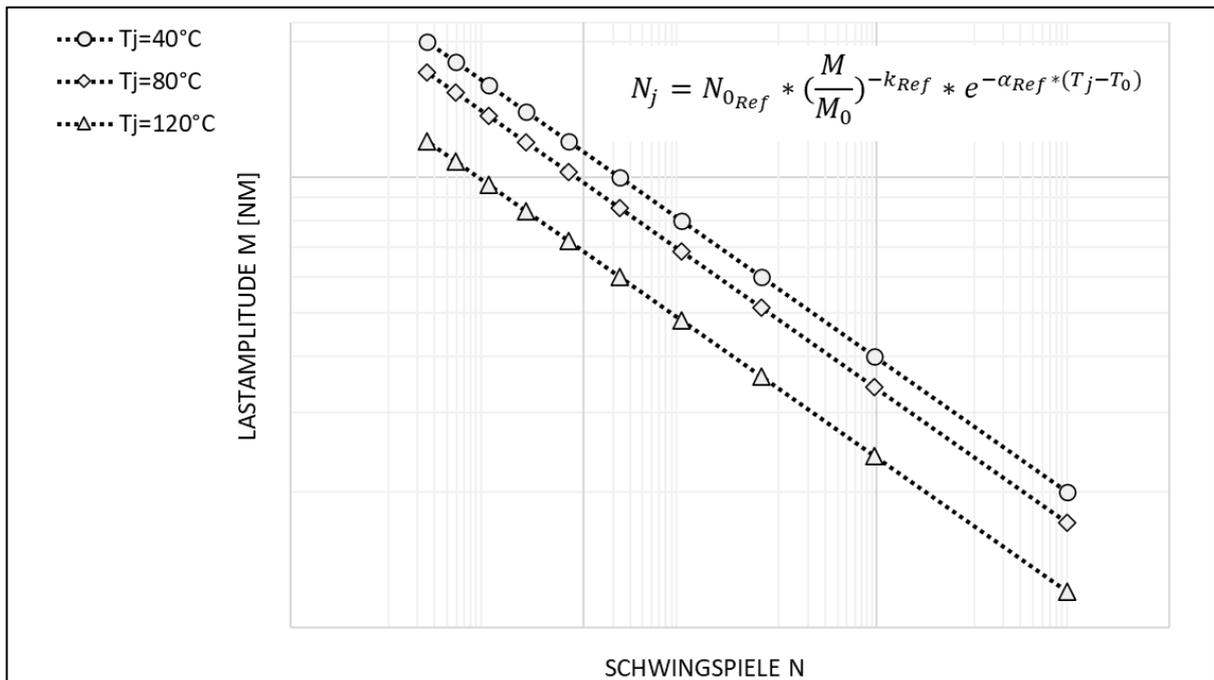


Abbildung 4-13 Exemplarisch dargestellte Referenz-Wöhlerlinien des SR-LC

Zur Berechnung der Lastamplitude wird das am Schneckenrad wirkende Moment M_{SR} aus dem gefilterten Motormoment M_M ermittelt. Für die Berechnung werden außerdem der Wirkungsgrad η_{SR} und das Übersetzungsverhältnis i_{SR} von Schnecke zu Schneckenrad berücksichtigt:

$$M_{SR} = \eta_{SR} * i_{SR} * M_M. \quad (4.18)$$

Die Schneckenradtemperatur T_{SR} wird aus der Steuergerätemperatur T_{ECU} abgeleitet. Die Parameter a und b sind projektspezifisch und experimentell zu ermitteln.

$$T_{SR} = a * T_{ECU} + b. \quad (4.19)$$

Für den SR-LC wird ebenfalls das Rainflow Zählverfahren angewandt. Der Einfluss der Mittelspannung M auf die Bauteillebensdauer wird bei jedem Wertepaar entsprechend dem Haigh-Diagramm berücksichtigt. Die korrigierte Spannungsamplitude M_{SR_k} ist Gl. (4.20) zu entnehmen.

$$M_{SR_k} = M_{SR} + M * M_m \quad (4.20)$$

Alle Lastzyklen in Form des am Schneckenrad wirkenden Moment M_{SR} und der damit korrespondierenden Schneckenradtemperaturen T_{SR} werden mit den der Software zugrunde liegenden Referenzwöhlerlinien in Beziehung gesetzt. Auf diesem Weg sind die Teilschädigungen D_i einer Laststufe i zu berechnen:

$$D = \sum_i D_i$$

$$= \sum_i \frac{n_i}{N_i} = \frac{1}{N_{0Ref}} * \sum_i \left(\left(\frac{M_{SR_i} + M * |M_{m_i}|}{M_0} \right)^{k_{Ref}} * e^{\left(\alpha_{Ref} * (T_{SR_i} - T_0) \right)} \right). \quad (4.21)$$

Der Load Counter ist als direkte Referenz für die Intensität der mechanischen Beanspruchung bei motorischer Unterstützung zu bewerten. In Abbildung 4-14 sind die auf ein Feldleben von mindestens 300.000 km oder mindestens 8000 h extrapolierten SR-LC Datensätze der Region Westeuropa dargestellt. Ebenfalls in der Abbildung enthalten sind die gefittete Lognormalverteilung und die berechnete Schadenssumme für das Erprobungskollektiv. Es ist zu erkennen, dass die Erprobung in Bezug auf die Beanspruchungsintensität deutlich härter ist als das Feld. Sowohl das 50% Quantil als auch das 99% Quantil liegen weit von dem Erprobungskollektiv entfernt. Es ist anzumerken, dass aufgrund der Zählweise des LC eine Vielzahl an Lastwechseln ohne motorische Unterstützung nicht in der Berechnung berücksichtigt wird. Diese Lastwechsel

können zu einem höheren lokalen Verschleiß der Verzahnung führen, welcher als Teil der Schädigungsanalyse bewertet werden muss.

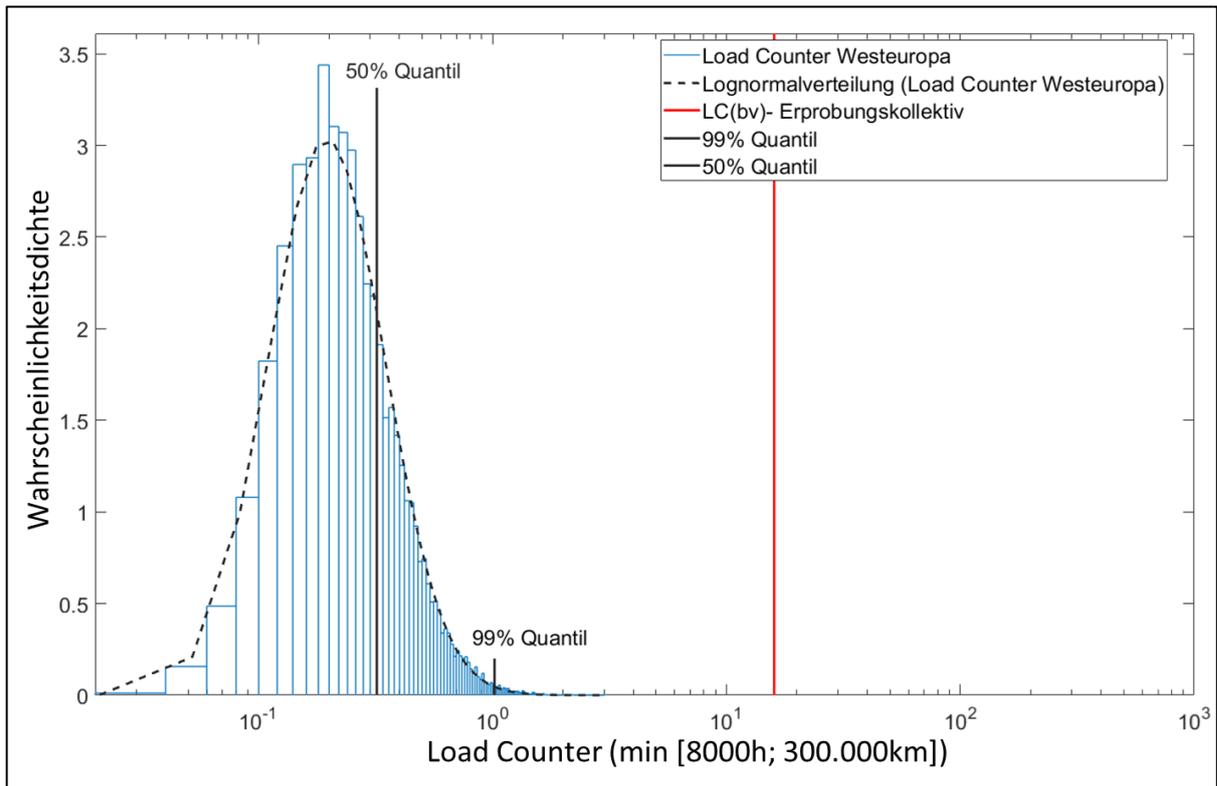


Abbildung 4-14 Auswertung des auf ein Feldleben extrapolierten SR- LC; Die auf ein Feldleben (mindestens 8000 Betriebsstunden oder mindesten 300.000 Kilometer) extrapolierten Datensätze der Region Westeuropa weisen deutlich niedrigere Schädigungswerte (SR-LC) auf als das Erprobungskollektiv (rote Linie)

4.2.2.2 Direkt verfügbare Parameter

Neben der in Kapitel 4.2.2.1 beschriebenen Load Recording Software existieren weitere Parameter, die als Teil der systematischen Felddatenerfassung verfügbar sind. Im Folgenden sind die direkt verfügbaren Parameter aufgeführt. Sie können direkt für die Bewertung der Nutzung und der Beanspruchung verwendet werden.

Fahrleistung und Betriebszeit

Sowohl die Fahrleistung in Kilometern als auch die Betriebszeit in Stunden können direkt der sFDE entnommen werden. Abbildung 4-15 präsentiert beide Parameter für alle verfügbaren Datensätze. Ein Großteil der Daten befindet sich zum Zeitpunkt der Erfassung innerhalb des spezifizierten Lebensdauerrahmens von maximal 300.000 Kilometer und 8000 Stunden. Der Median der Durchschnittsgeschwindigkeit liegt bei ungefähr 50 km/h. Die durchgehende Ursprungsgerade symbolisiert einen Fahrer mit einer konstanten Durchschnittsgeschwindigkeit

von 37,5 km/h, also derjenigen Durchschnittsgeschwindigkeit, bei welcher die spezifizierte Lebensdauer für beide Parameter gleichzeitig erreicht wird. Die weiteren Ursprungsgeraden (gestrichelte Linien) repräsentieren die gegensätzlichen Extreme der im Mittel schnellsten und langsamsten Fahrzeuge.

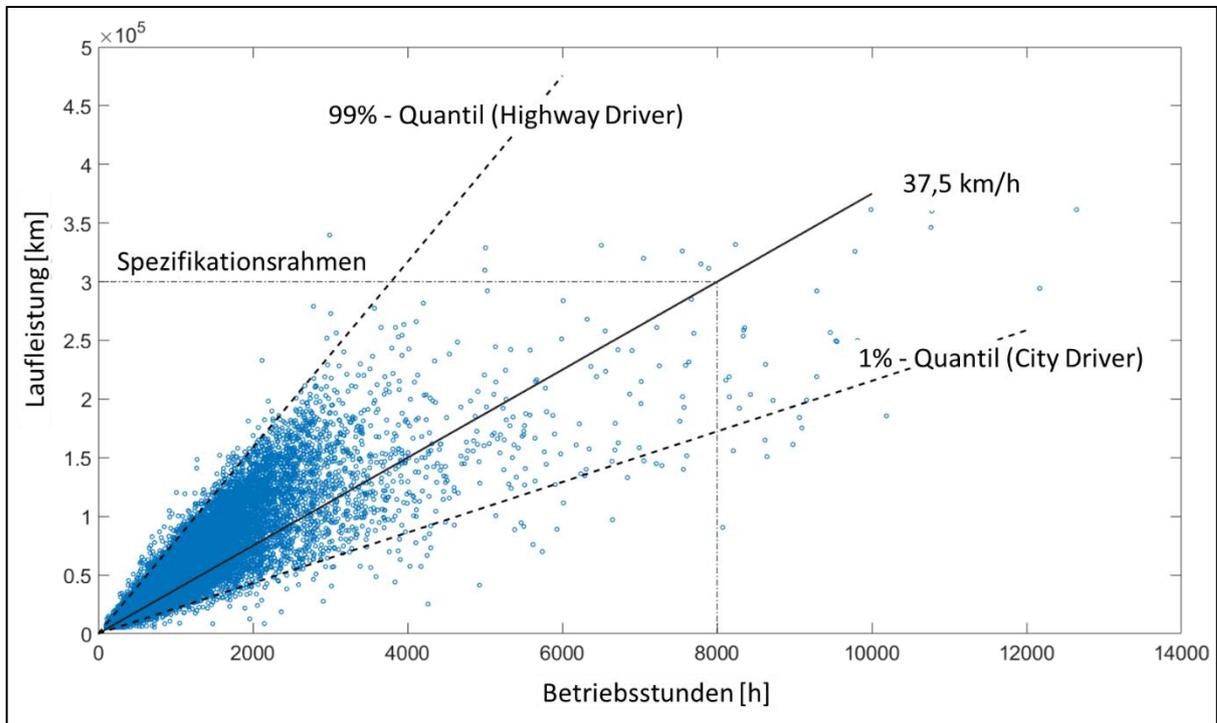


Abbildung 4-15 Laufleistung und Betriebszeit aller Datensätze

Temperaturverweildauer

Der Parameter Temperaturverweildauer (TVD) wird nach DIN 45667 4.2 [84] für die einzelnen Temperaturklassen (TK) je Datensatz z der Plattform x vom Steuergerät des Lenksystems erfasst und gespeichert. Die relative Verweildauer $t_{rel.T_i}$ in der i -ten TK setzt sich aus der absoluten Verweildauer $t_{abs.T_i}$ und der Betriebszeit r_t zusammen, Gl. (4. 23). Die Betriebszeit ist über die Summe der absoluten Anteile je TK zu bilden, Gl. (4. 22).

$$r_t(x_z) = \sum t_{abs.T_i}(x_z) \quad (4. 22)$$

$$t_{rel.T_i}(x_z) = \frac{t_{abs.T_i}(x_z)}{r_t(x_z)} \quad (4. 23)$$

Abbildung 4-16 veranschaulicht die relative und klassierte TVD für alle Datensätze. Ebenfalls dargestellt ist die relative Anzahl der Datensätze $x_{rel_{ik}}$, welche sich in der jeweiligen Temperaturverweildauerklasse der ausgewählten TK befinden. Die Variable n_{ik} beschreibt die Anzahl der Datensätze in der i – ten TK der k – ten Temperaturverweildauerklasse.

$$x_{rel_{ik}} = \frac{n_{ik}}{N} \quad (4.24)$$

$$N = \sum n_{ik} \quad (4.25)$$

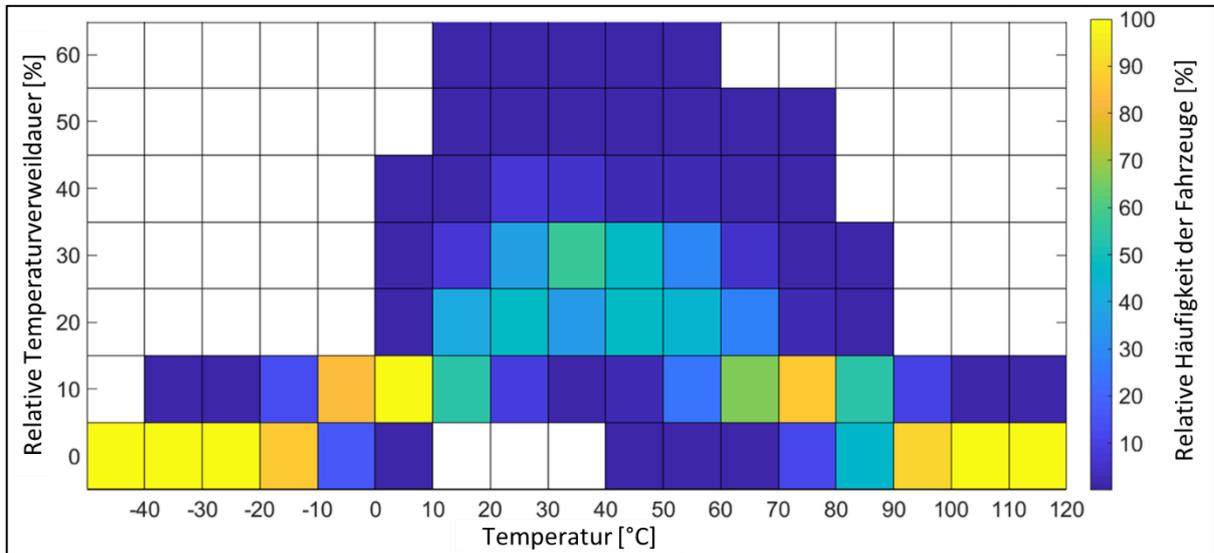


Abbildung 4-16 Relative Temperaturverweildauer und Häufigkeit aller Datensätze; Der Großteil der Fahrzeugdatensätze indiziert einen Betrieb zwischen zehn Grad und sechzig Grad Celsius. Temperaturen unterhalb von minus zwanzig Grad und oberhalb von hundert Grad Celsius weisen eine geringe Verweildauer auf

Die relative TVD beschreibt die prozentuale Verweildauer in der jeweiligen TK und ist in 10°C Schritten klassiert dargestellt. Als relative Häufigkeit ist die Häufigkeit aller Datensätze in der zu betrachtenden Verweildauerklasse der ausgewählten TK zu verstehen. Der überwiegende Anteil der Datensätze verweilt in der Temperaturklasse von 20°C bis 60°C. Die Grenzbereiche über 90°C und unter -10°C sind prozentual nur geringem Umfang vertreten. Über die TVD kann auf die relative thermische Belastung im Rahmen der Feldnutzung geschlossen werden. Nicht auswertbar sind einzelne Temperaturspitzen, welche prozentual eher selten vorkommen und in der Summe der Daten untergehen. Für längere Verweildauern in kritischen Temperaturniveaus können individuelle Grenzen je Betrachtungsklasse in der Aufarbeitung gezogen werden.

Levelcrossings der Lenkwinkel

Die Levelcrossings der Lenkwinkel werden nach dem Klassendurchgangsverfahren DIN 45667 4.4 [84] gezählt. Hierbei werden die vom Fahrer über das Lenkrad initiierten Lenkwinkel φ_{SW} den Lenkwinkelklassen i, j zugeordnet. Die Klassenbreite beträgt 50°. In Abbildung 4-17 sind die auf eine Lebensdauer extrapolierten und bereinigten Levelcrossings für verschiedene Quantile präzisiert. Als Basis für die Extrapolation sind die Betriebszeit und die Laufleistung zu

verwenden. Die bereinigten Levelcrossings $LC_{i,j \text{ bereinigt}}$ entsprechen der summierten Anzahl an Lenkbewegungen, welche auch in der entsprechenden Klasse verbleiben und diese nicht nur durchlaufen.

$$LC_{i,j \text{ bereinigt}}(x_z) = \begin{cases} LC_{i,j}(x_z) - LC_{i+50^\circ,j+50^\circ}(x_z), & \text{für } i > 0 \\ LC_{i,j}(x_z) - LC_{i-50^\circ,j-50^\circ}(x_z), & \text{für } i < 0 \end{cases} \quad (4.26)$$

Aus der Zusammenfassung einzelner Klassen kann außerdem die Anzahl an Parkier- und Abbiegevorgängen abgeleitet werden, ein Vorgang, der in Kapitel 4.2.2.3 näher beschrieben wird. Für die Einordnung der im Feld erfahrenen Nutzung ermöglichen die Levelcrossings der Lenkwinkel eine Indikation der getätigten Lenkvorgänge.

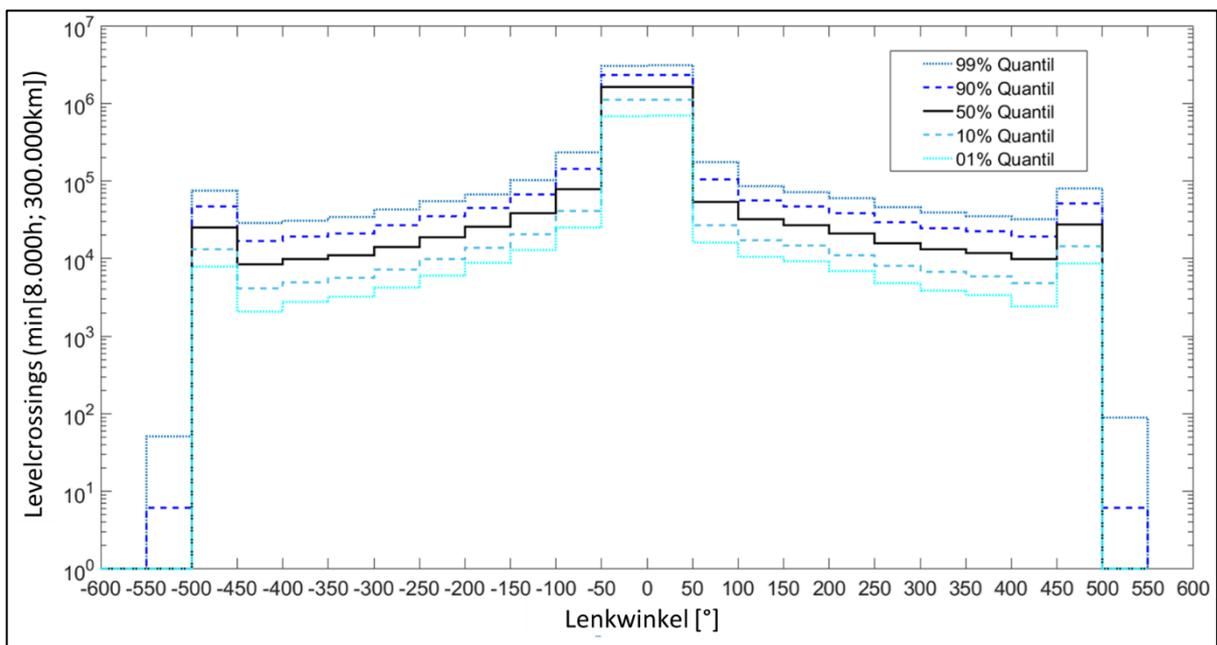


Abbildung 4-17 Bereinigte Quantile der Levelcrossings je Lenkwinkelklasse

Zero Crossing Peaks der Spurstangensummenkraft

Die Zero Crossings der Spurstangensummenkraft werden nach dem Spitzenwertverfahren DIN 45667 4.3.1 [84] gezählt. Abbildung 4-18 präsentiert die extrapolierten Zero Crossing Peaks. Dargestellt sind die empirischen Quantile der auf die Lebensdauer extrapolierten Zero Crossing Peaks ZC_w je Spurstangensummenkraftklasse w . Gezählt werden die Zero Crossings in positiver sowie negativer Richtung mit einer Klassenbreite von 1 kN. Die Spurstangensummenkraft als die resultierende Zahnstangenkraft einer Lenkbewegung ist ebenfalls ein direkter Indikator für die Intensität der Nutzung eines Lenksystems. Aufgrund der Zero Crossing Peaks können zudem Abschätzungen für die auf die Verzahnung einwirkende Flankenpressung vorgenommen werden. Vor allem für die spätere Schädigungsanalyse und die Regression der Felddaten mit dem tatsächlichen Verschleiß von Zahnstange und Getriebe ist dies besonders relevant.

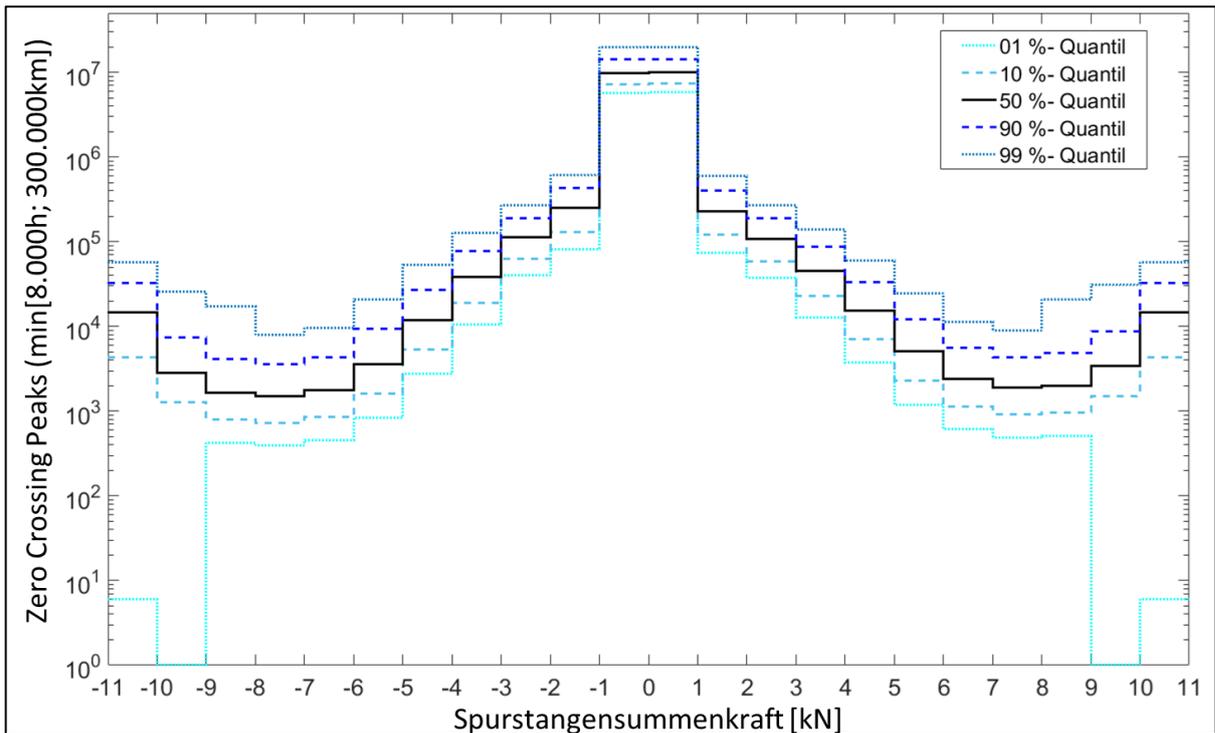


Abbildung 4-18 Quantile der Zero Crossing Peaks je Spurstangensummenkraftklasse

Peaks der Lenkwinkelgeschwindigkeit

Die Peaks der Lenkwinkelgeschwindigkeit LP_i werden nach dem Spitzenwertverfahren DIN 45667 4.3.2 [84] in 4 Klassen i je Datensatz z erfasst. Abbildung 4-19 veranschaulicht die Quantile der extrapolierten Peaks je Lenkgeschwindigkeitsklasse.

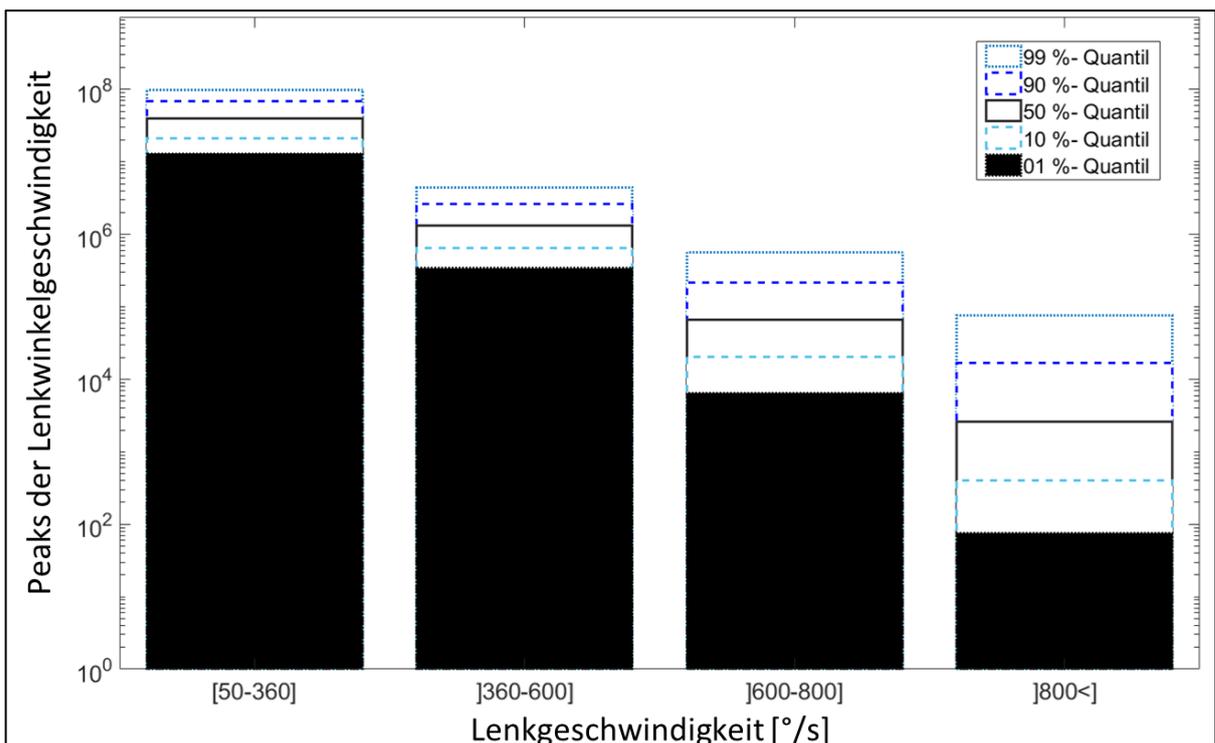


Abbildung 4-19 Quantile der Peaks je Lenkwinkelgeschwindigkeitsklasse

4.2.2.3 Indirekt verfügbare Parameter

Neben dem Load Counter ist es möglich, noch weitere Pseudoschädigungswerte zur Beanspruchungsindikation aus der sFDE abzuleiten. Die im Folgenden präsentierten Pseudoschädigungen stellen keine Schädigungswerte im eigentlichen Sinne dar, sondern Indikatoren zur Einordnung und Klassifizierung der Nutzungsintensität. Bewertet werden sollen verschiedene Fahrzeug-, Fahrer- und Fahrzeugumgebungskombinationen unter Berücksichtigung der systemspezifischen Gegebenheiten des zu betrachtenden Lenksystems.

Damage Counter

Der Damage Counter (DC) resultiert aus der Spurstangensummenkraft. Er entspricht dem Verhältnis der gewichteten Zero Crossing Peaks zu der äquivalenten Beanspruchungsintensität des Erprobungskollektives. Die Zero Crossing Peaks ZC_w je Klasse w sind in Bezug auf ihre maximale Anzahl an Lastwechseln L_w für die betragsmäßig gleichen Klassen zusammengefasst. Analog dem SLC wird eine für Stahl übliche Wöhlerlinienneigung von $k = 5$ für die Berechnung des DC angenommen [80]. Die äußere Klassengrenze ist mit dem Neigungsfaktor zu potenzieren. Im Anschluss daran werden die potenzierten Klassengrenzen mit der korrespondierenden maximalen Anzahl an Lastwechseln multipliziert. In Abbildung 4-20 ist die Auswertung des DC für die Region Westeuropa dargestellt.

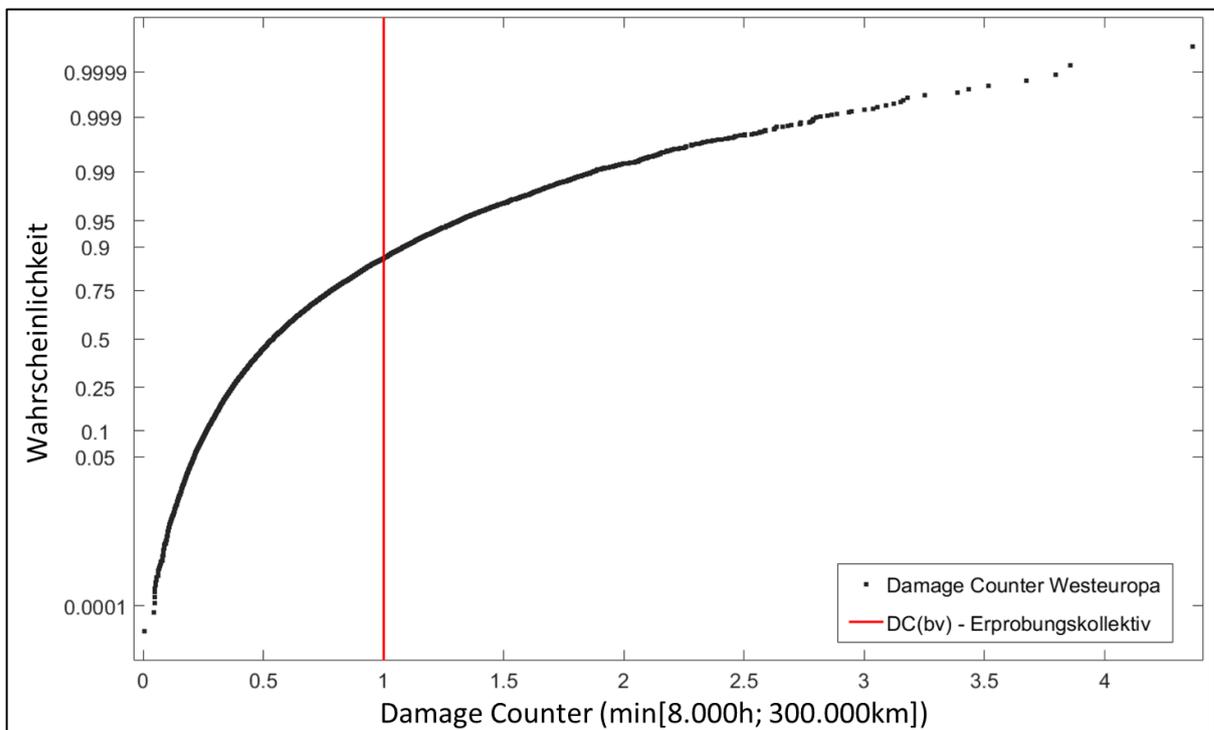


Abbildung 4-20 Auswertung des Damage Counter für die Region Westeuropa; Das Erprobungskollektiv (rote Linie) deckt mehr als 75% der im Feld erfahren Beanspruchung (extrapoliert auf ein spezifiziertes Feldleben) in Form des Damage Counters ab

$$L_w(x_z) = \max(ZC_{+w}; ZC_{-w}) \quad (4.27)$$

$$DC(x_z) = \sum \frac{L_w(x_z) * w^k}{L_w(b_v) * w^k} \quad (4.28)$$

Das Erprobungskollektiv, in Rot dargestellt, deckt mehr als 75% der extrapolierten Feldbeanspruchung ab. Im Unterschied zur Einordnung mittels Load Counter fällt auf, dass die hohe Differenz zwischen dem Feld und dem Erprobungskollektiv nicht mehr gegeben ist. Dieser Umstand ist auf die unterschiedliche Herleitung des DC zurückzuführen. Der DC vermittelt eine summierte Gesamtsicht der Feldnutzung und keine bauteilspezifische Berechnungsgrundlage. Auch erfolgt die Zählung nicht unter Verwendung des Rainflow Zählverfahrens. Insgesamt bildet der DC eine Überbewertung der Feldsituation ab. Für die relative Einordnung der Feldbeanspruchung in der Aufarbeitung spielt das jedoch nur eine untergeordnete Rolle, da ein Intensitätsvergleich im Vordergrund steht.

Äquivalente Temperaturverweildauer

Der Ansatz der relativen äquivalenten Temperaturverweildauer basiert auf dem nach Savante Arrhenius benannten Arrhenius Ausfallmodell. Das Arrhenius Modell bildet die Abhängigkeit der Reaktionsrate chemischer Prozesse von der Temperatur ab [85]. Die Arrhenius Beziehung (4.29) wird bei der Lebensdauerabschätzung von Elektronikkomponenten, wie Halbleiterdioden oder Elektrolytkondensatoren, herangezogen [86] [87].

$$t_f = A * \exp\left(\frac{-E_a}{k * T}\right), \text{ mit} \quad (4.29)$$

t_f = Zeit bis zum Ausfall

A = Materialkonstante

E_a = Aktivierungsenergie

$k = 8,617 * 10^{-5} \frac{eV}{K}$ (Boltzmann Konstante)

T = statische Temperatur

Zur Einordnung in den Kontext der Felddaten und für die Bewertung der Nutzungsintensität werden die absoluten Verweildauern $t_{abs.T_i}$ mittels des Arrhenius Ansatzes gewichtet und in Relation zu einer Referenztemperatur T_0 gesetzt. Die Summe der zu der Referenztemperatur äquivalenten Verweildauern je Temperaturklasse bildet die gesamte äquivalente Temperaturverweildauer ab. Für die Aktivierungsenergie, welche typischerweise zwischen 0.5eV und 1eV liegt [88], wird ein Wert von 0,45eV für eine konservative Abschätzung vorgeschlagen. Unter Verwendung von Gl. (4.29) erfolgt die Berechnung der Arrhenius Beziehung für zwei Temperaturniveaus T_1 und T_2 , Gl. (4.30).

$$\frac{t_{f1}}{t_{f2}} = \frac{A \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{k \cdot T_2}\right)}{A \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{k \cdot T_1}\right)} = \exp\left(\frac{E_a}{k} \cdot \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)\right). \quad (4.30)$$

Das Einsetzen der Referenztemperatur und der absoluten Verweildauern in (4.30) ermöglicht die Berechnung der zu dieser Temperatur äquivalenten Verweildauer für den Datensatz z.

$$t_{eq}(x_z) = \sum_i t_{abs.T_i}(x_z) \exp\left(\frac{E_a}{k} \cdot \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_i}\right)\right). \quad (4.31)$$

Abbildung 4-21 zeigt die auf ein Feldleben extrapolierten äquivalenten Temperaturverweildauern bei einer Referenztemperatur $T_0 = 110^\circ\text{C}$ für die Region Westeuropa.

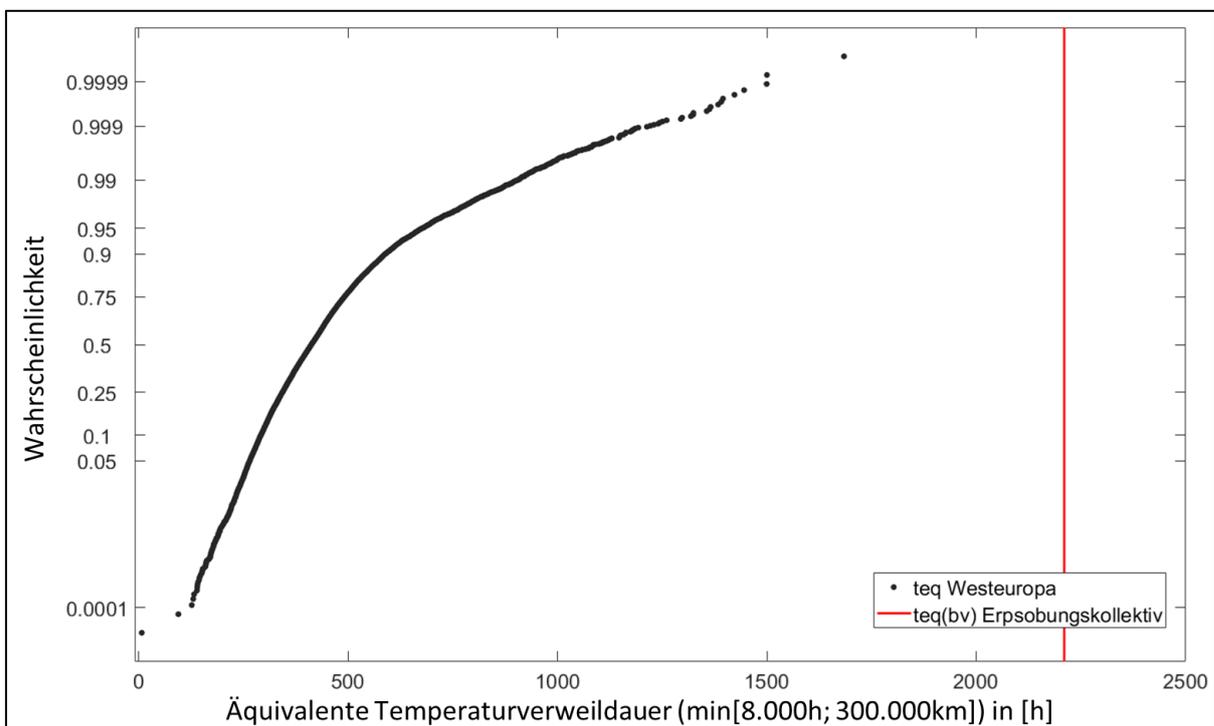


Abbildung 4-21 Auswertung der äquivalenten Temperaturverweildauer für die Region Westeuropa

Das Erprobungskollektiv (rote Linie) entspricht dann der äquivalenten Verweildauer, wenn von einer Betriebszeit von 8000 Stunden ausgegangen wird. Die äquivalente Temperaturverweildauer stützt die Abschätzung der Feldbeanspruchung und Vorbelastung elektronischer Lenksysteme in der Aufarbeitung.

Lenkvorgänge aus den Levelcrossings der Lenkwinkel

Aus den Levelcrossings der Lenkwinkel kann die Anzahl verschiedener Lenkvorgänge geschätzt werden. Dies ermöglicht eine Einordnung des Lenkprofils je Datensatz z. Im Folgenden

wird zwischen den drei Lenkvorgängen Spurwechsel, Abbiegen und Parkieren differenziert, Tabelle 4-2.

Winkelbereich Lenkrad	Lenkvorgang
$\varphi_{SW} \leq 150^\circ$	Spurwechsellvorgänge und kurvige Landstraßen
$150^\circ < \varphi_{SW} \leq 350^\circ$	Abbiegevorgänge (links und rechts]
$350^\circ < \varphi_{SW}$	Parkiervorgänge

Tabelle 4-2 Einteilung der Lenkwinkelklassen in korrespondierende Lenkvorgänge

- Spurwechsellvorgänge

Die Spurwechsellvorgänge sind aus den bereinigten Levelcrossings Gl. (4. 26) über die Summe der Anzahl an Lastwechseln in den jeweiligen Lenkwinkelklassen ij zu berechnen. Da die bereinigten Levelcrossings eine Zusammenfassung betragsmäßig gleicher Klassen darstellen, wird die Summe der Lastwechsel mit dem Faktor zwei multipliziert, um die Spurwechsellvorgänge beider Lenkrichtungen abzubilden

$$\text{Spurwechsellvorgänge (SWV)}(x_z) = 2 * \sum_{i,j}^{100^\circ, 150^\circ} LC_{i,j \text{ bereinigt}}(x_z), \text{ mit} \quad (4. 32)$$

$$0^\circ \leq i \leq 100^\circ \wedge 50^\circ \leq j \leq 150^\circ.$$

- Abbiegevorgänge

Die Abbiegevorgänge werden analog den Spurwechsellvorgängen aus den bereinigten Levelcrossings je Datensatz z bestimmt

$$\text{Abbiegevorgänge (ABV)}(x_z) = 2 * \sum_{i,j}^{300^\circ, 350^\circ} LC_{i,j \text{ bereinigt}}(x_z), \text{ mit} \quad (4. 33)$$

$$150^\circ \leq i \leq 300^\circ \wedge 200^\circ \leq j \leq 350^\circ.$$

- Parkiervorgänge

Das Parkieren bedeutet für Lenksysteme einen Lenkvorgang mit sehr hoher Beanspruchung. Insbesondere das Parkieren im Stand ist für die Mechanik mit hohen Kräften verbunden, da in der Regel bis zu 100% der möglichen Zahnstangensummenkraft aufgewendet werden müssen [89] [90]. Die Abbildung 4-22 veranschaulicht die Einordnung verschiedener Lenkvorgänge am Beispiel eines SUV. Die für einen Lenkvorgang aufzubringenden Kräfte variieren je nach der Achskinematik, Achslast, Beschaffenheit der Bereifung und dem Reibwert der Fahrbahnoberfläche [90]. Berücksichtigt man die Tatsache, dass bei einem Einparkvorgang rückwärts

und längs zur Fahrtrichtung in der Regel zwei Lenkeinschläge notwendig sind, kann der bisher verwendete Faktor zwei aus der Gleichung eliminiert werden.

$$Parkiervorgänge (PKV)(x_z) = \sum_{i,j}^{550^\circ, 600^\circ} LC_{i,j \text{ bereinigt}}(x_z), \text{ mit} \quad (4.34)$$

$$350^\circ \leq i \leq 550^\circ \wedge 400^\circ \leq j \leq 600^\circ$$

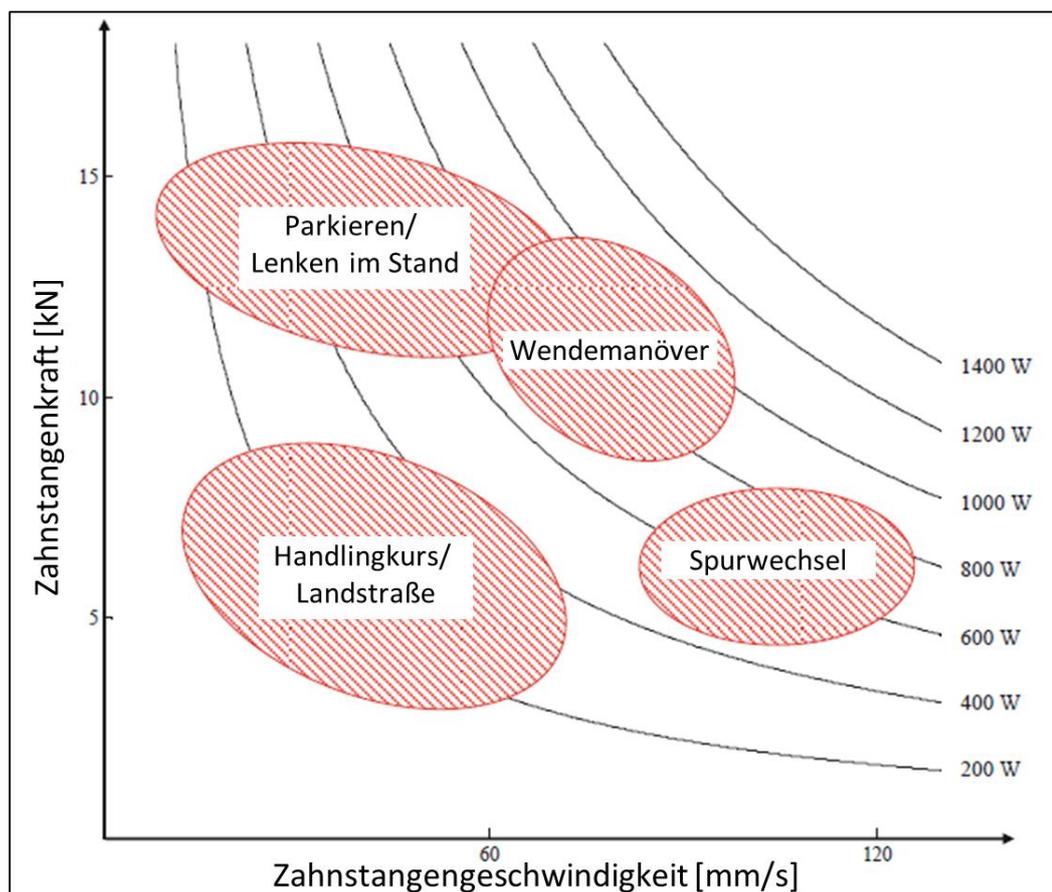


Abbildung 4-22 Einordnung verschiedener Lenkvorgänge in Bezug auf die Spurstangensummenkraft und die Zahnstangengeschwindigkeit am Beispiel eines SUV [90]

Die Einordnung der Lenkvorgänge im Feld kann Abbildung 4-23 entnommen werden. Dargestellt ist für ausgewählte Quantile die Anzahl an Vorgängen in Relation zu dem Erprobungskollektiv. Die Felddaten wurden für die Einordnung auf ein Feldleben extrapoliert. Beim Parkieren, das, wie beschrieben, mit der höchsten Lenkbeanspruchungsintensität verbunden ist, entspricht das Erprobungskollektiv mindestens 90% der im Feld auftretenden Anzahl an Vorgängen. Für die Spurwechsel- und Abbiegevorgänge liegt die relative Anzahl deutlich oberhalb dessen, was die Erprobung abbildet. 75% des Feldes zeigen eine mindestens um den Faktor acht höhere Anzahl an Lenkbewegungen mit einem Lenkwinkel kleiner als 150° . Das Erprobungskollektiv erweist sich jedoch dann als repräsentativ, wenn es um die Abbildung der beanspruchungsintensiveren Parkiervorgänge geht.

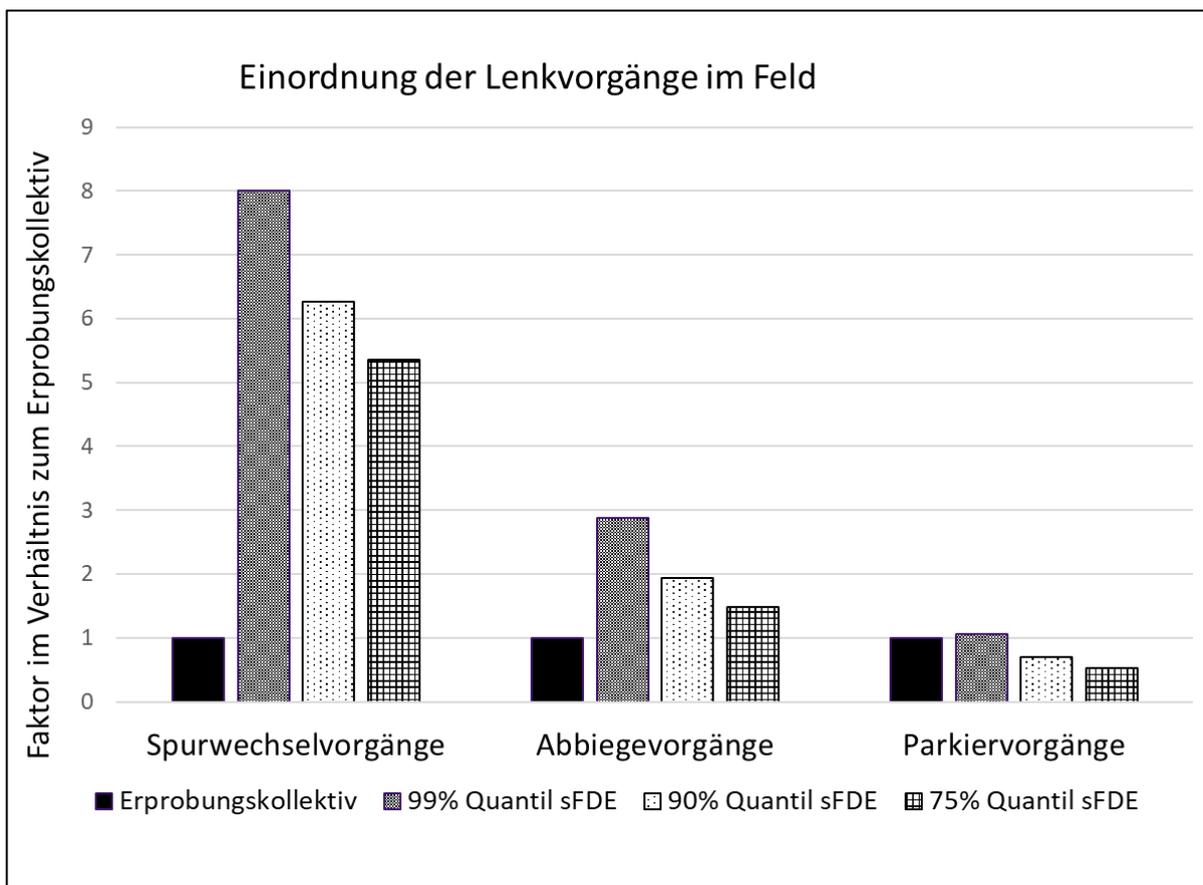


Abbildung 4-23 Einordnung der extrapolierten Lenkvorgänge; Lenkvorgänge mit kleinen Lenkwinkeln wie Spurwechsel- und Abbiegevorgänge, zeigen eine deutlich höhere Häufigkeit im Rahmen eines Feldlebens als in der Erprobung. Lenkvorgänge mit großen Lenkwinkeln hingegen werden durch das Erprobungskollektiv im Bereich des 99% Quantils abgedeckt

Lenkradumdrehungen

Die Anzahl der Lenkradumdrehungen beruht auf den Levelcrossings der Lenkwinkel und beschreibt die absolute Anzahl an Lenkradumdrehungen LUD. Gezählt wird der Lenkwinkel der jeweiligen Klassenmitte.

$$LUD(x_z) = 4 * LC_{i,j \text{ bereinigt}}(x_z) * \left(\frac{i+j}{2}\right) \quad (4.35)$$

Mittlerer Lastwechsel

Der mittlere Lastwechsel ist ein Produkt aus den Lenkwinkeln, der Lenkwinkelgeschwindigkeit und der Zahnstangensummenkraft.

$$DLW(x_z) = \overline{ZC}(x_z) * \overline{LC}_{\text{bereinigt}}(x_z) * \overline{LP}(x_z) \quad (4.36)$$

4.3 Identifikation relevanter Nutzungsprofile

Aus den verfügbaren Parametern der sFDE sind die für Lenksysteme beanspruchungsintensivsten Kombinationen in Bezug auf das Anwendungsspektrum, die Varianz der Nutzung und die daraus resultierende Pseudoschädigung abzuleiten. Die ermittelten Kombinationen sind im Anschluss daran vor dem Hintergrund eines Feldlebens einzuordnen, um ihre Relevanz für die Feldstudie zu bestimmen. Das Ziel ist es die theoretisch ermittelten beanspruchungsintensivsten Kombinationen mit der realen physischen Schädigung zu vergleichen und eine für die Wiederverwendungsentscheidung repräsentative Lebensdauerberechnungsgrundlage zu schaffen. Aus den bisher verfügbaren Daten ist nur bekannt welche Beanspruchung und Schädigung zur Absicherung der spezifizierten Lebensdauer validiert wurde. Ein Feldleben dient im Anschluss als Normierungsgrundlage für eine Vergleichbarkeit mit den Erprobten Lebensdauergerenzen und zur Ermittlung potentieller Lastreserven.

Abbildung 4-24 präsentiert eine Übersicht über das Zusammenspiel der Einflussfaktoren bei Lenksystemen. Sowohl das System Fahrzeug als auch das System EPSdp sind als komplexe Systeme zu verstehen. Der Einfluss äußerer Faktoren, wie der Fahrereinfluss oder der Einfluss der Fahrzeugumgebung auf die Beanspruchung, ist entsprechend in diesem komplexen Verbund zu betrachten. Das dargestellte Zusammenspiel zwischen den Systemen Pkw und EPSdp verdeutlicht außerdem die Mehrdimensionalität von Anwendung, Aufbau und Nutzung.

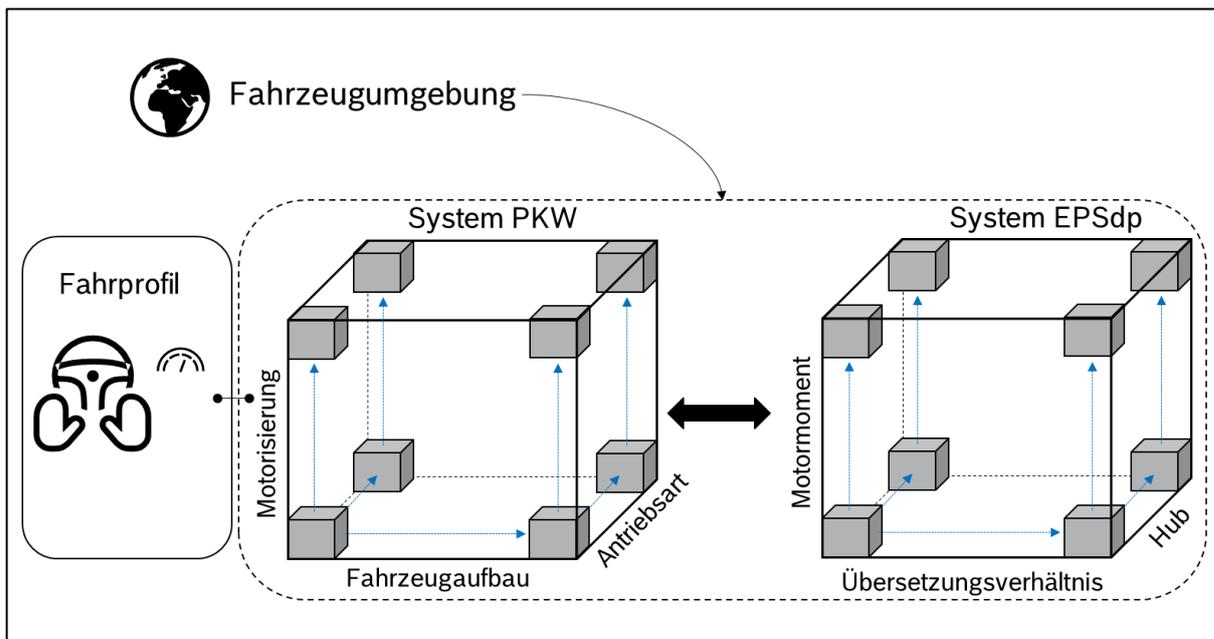


Abbildung 4-24 Zusammenspiel von Aufbau und Einflussfaktoren; Die Beanspruchung eines Lenksystems beruht auf dem Zusammenspiel von Fahrzeug und Lenksystem unter dem Einfluss verschiedener Faktoren wie der Fahrzeugumgebung und dem Fahrereinfluss

Unter der Verwendung von Regressionsmethoden werden die Zusammenhänge zwischen der fahrzeug- und der systemspezifischen Nutzungsvariabilität aufgezeigt. Zudem wird die abgeleitete Nutzungsintensität am Beispiel ausgewählter Kombinationen dargestellt. Abbildung 4-25 veranschaulicht die Verknüpfung zwischen der Datenbasis, dem in der Erstausslegung definierten Spezifikationsrahmen und der daraus resultierenden Abschätzung der Pseudoschädigungsverteilungen.

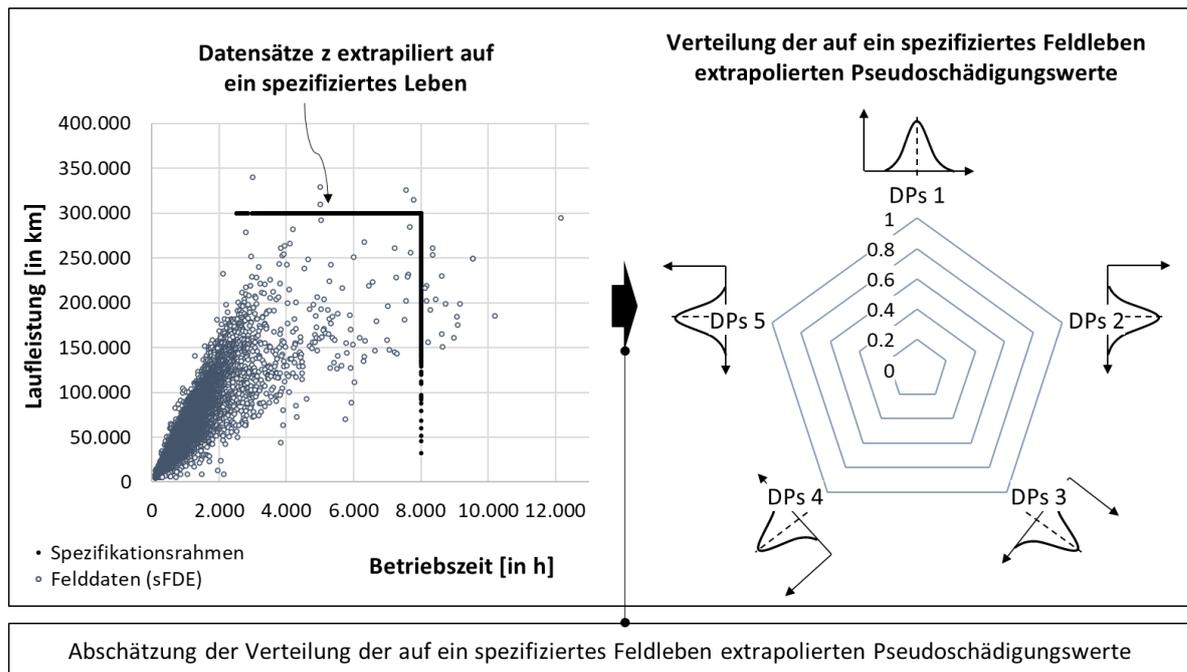


Abbildung 4-25 Verteilung der Pseudoschädigungswerte zur Indikation der Beanspruchungsintensität von Nutzungsprofilen

Der linke Teil der Abbildung zeigt die Felddaten und deren Extrapolation auf ein Feldleben. Aus den extrapolierten Felddaten sind die Verteilungsfunktionen der Pseudoschädigungsparameter zu bestimmen. Für eine Indikation der Beanspruchungsintensität von einzelnen Nutzungsprofilen wird im Anschluss daran eine Einordnung der Pseudoschädigungsparameter in den Kontext der Verteilungsfunktionen vorgenommen.

4.3.1 Feldnutzung in Abhängigkeit des Fahrzeugalters

Wie in Kapitel 4.1.2 aufgezeigt, entspricht die Annahme einer linearen Nutzung über die zeitliche Verweildauer im Feld hinweg nicht der realen Feldsituation. Die sFDE beinhaltet jedoch für die ausgewählte Plattform keinerlei Informationen zum Fahrzeugalter. Aus diesem Grund werden zusätzlich die Garantiedaten für die Verknüpfung von Nutzungsintensität und Fahrzeugalter herangezogen. Ein Auszug der Garantiedaten mit ca. 5.000 Datensätzen ermöglicht

die Berechnung einer jährlichen Laufleistungsverteilung. Unter der Voraussetzung, dass die aus der sFDE bekannte Verteilung der Durchschnittsgeschwindigkeit als repräsentativ einzustufen ist, können beide Verteilungsfunktionen miteinander kombiniert werden. Es ist anzumerken, dass die Verteilungsfunktionen mit Datensätzen aus Deutschland ermittelt wurden. Aus der Kombination beider Verteilungen kann zudem auch die Verteilungsfunktion der jährlichen Betriebsstunden hergeleitet werden. Nachteilig bei der Verwendung von Garantiedaten ist die geringe Anzahl an Fahrzeugdatensätzen mit einem Fahrzeugalter größer als drei Jahre. Dieser Umstand sorgt für eine Verschiebung der Laufleistung und der Betriebszeit in Richtung höherer Mittelwerte. Hintergrund ist der in Kapitel 4.1.2 aufgezeigte Zusammenhang einer Abnahme der mittleren Laufleistung mit zunehmendem Fahrzeugalter. Die Verwendung der Garantiedaten stellt daher eine konservative Annahme für die Bestimmung der Feldnutzung dar. Eine weitere Voraussetzung für das vorgeschlagene Vorgehen ist die Annahme, dass die Nutzung im gleichen Maße abnimmt wie die Laufleistung und die Betriebszeit und beide Parameter daher als Äquivalenten für die Fahrzeugnutzung angesehen werden können.

Die Faltung zweier unabhängiger Zufallsvariablen [91] bietet ein Werkzeug zur Verknüpfung von Daten zur Herstellung fehlender Abhängigkeiten. Nehmen wir an, die Betriebszeit und die Laufleistung wären unabhängig voneinander. Die Modellierung der jährlichen durchschnittlichen Betriebszeitenverteilung $L_i(\bar{b})$ erfolgt aus der Division der beiden Zufallsvariablen „durchschnittliche jährliche Laufleistung in Abhängigkeit des Fahrzeugalters“ \bar{S} und der „Durchschnittsgeschwindigkeit“ \bar{V} . Die Substitution der Zufallsvariablen erfolgt aus der Beziehung von Betriebszeit, Laufleistung und Geschwindigkeit, Gl. (3. 10).

$$\bar{v} = t \quad (4. 37)$$

$$b = \frac{\bar{s}}{\bar{v}} \quad (4. 38)$$

Aus (4. 37) und (4. 38) erfolgt die Umstellung nach \bar{s}

$$\bar{s} = b * t. \quad (4. 39)$$

Die Funktionaldeterminante, auch Jacobideterminante genannt, wird über die Jacobimatrix berechnet

$$J_f(b, t) = \begin{pmatrix} t & b \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4. 40)$$

$$|\det(J_f(b, t))| = |t|. \quad (4. 41)$$

Die Dichtefunktion $f_{\bar{s}/\bar{v}}$ setzt sich aus $f_{\bar{s}}(b * t)$ und $f_{\bar{v}}(t)$ sowie der Jacobideterminante zusammen

$$f_{\bar{s}/\bar{v}} = f_b(\bar{b}) = \int_{-\infty}^{+\infty} |t| * f_{\bar{s}}(b * t) * f_{\bar{v}}(t) dt \quad (4.42)$$

$$g_{\bar{s}/\bar{v}}(b, t) = |t| * f_{\bar{s}}(b * t) * f_{\bar{v}}(t) \quad (4.43)$$

Abbildung 4-26 veranschaulicht die gemeinsame Verteilungsdichte $g_{\bar{s}/\bar{v}}(b, t)$.

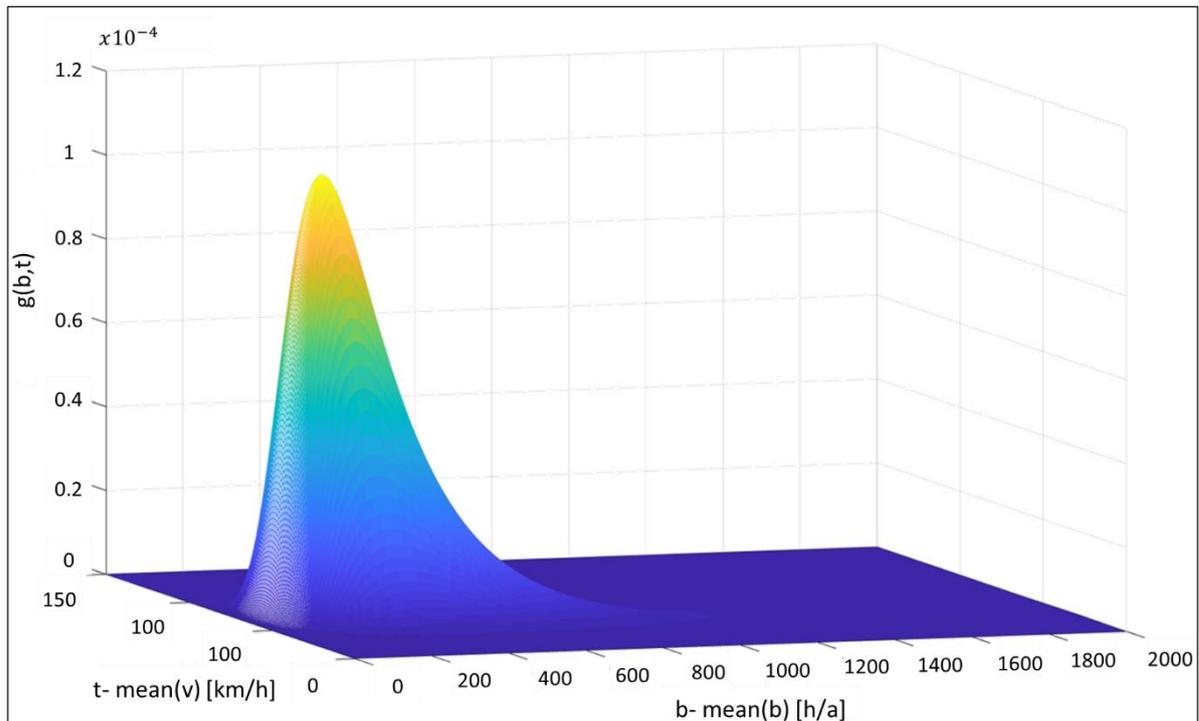


Abbildung 4-26 Gemeinsame Verteilungsdichte $g_{\bar{s}/\bar{v}}(b, t)$ der jährlichen Laufleistung und der Durchschnittsgeschwindigkeit; Faltung der beiden Zufallsvariablen „durchschnittliche jährliche Laufleistung in Abhängigkeit des Fahrzeugalters“ \bar{S} und der „Durchschnittsgeschwindigkeit“ \bar{V} zur Abschätzung der jährlichen Betriebsstundenverteilung

Aufgrund der lognormalverteilten Laufleistung ist auch die Verteilung der jährlichen Betriebszeit lognormalverteilt mit $\mu_{\bar{b}}$ und $\sigma_{\bar{b}}$. Der Mittelwert der jährlichen Betriebsstundenverteilung liegt mit 300 Stunden deutlich unterhalb der bei einer linearen Nutzung anzunehmenden ca. 500 Stunden pro Jahr. Eine Abschätzung der jährlichen Betriebsstundenverteilung kann auch direkt aus den Garantiedaten aufgrund der Abhängigkeit beider Parameter erfolgen. Deren Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen sind in Abbildung 4-27 dargestellt. Für die Anpassung der Nutzung an das Fahrzeugalter wird eine Abnahme der Betriebszeit im selben Maß wie die Abnahme der Laufleistung angenommen

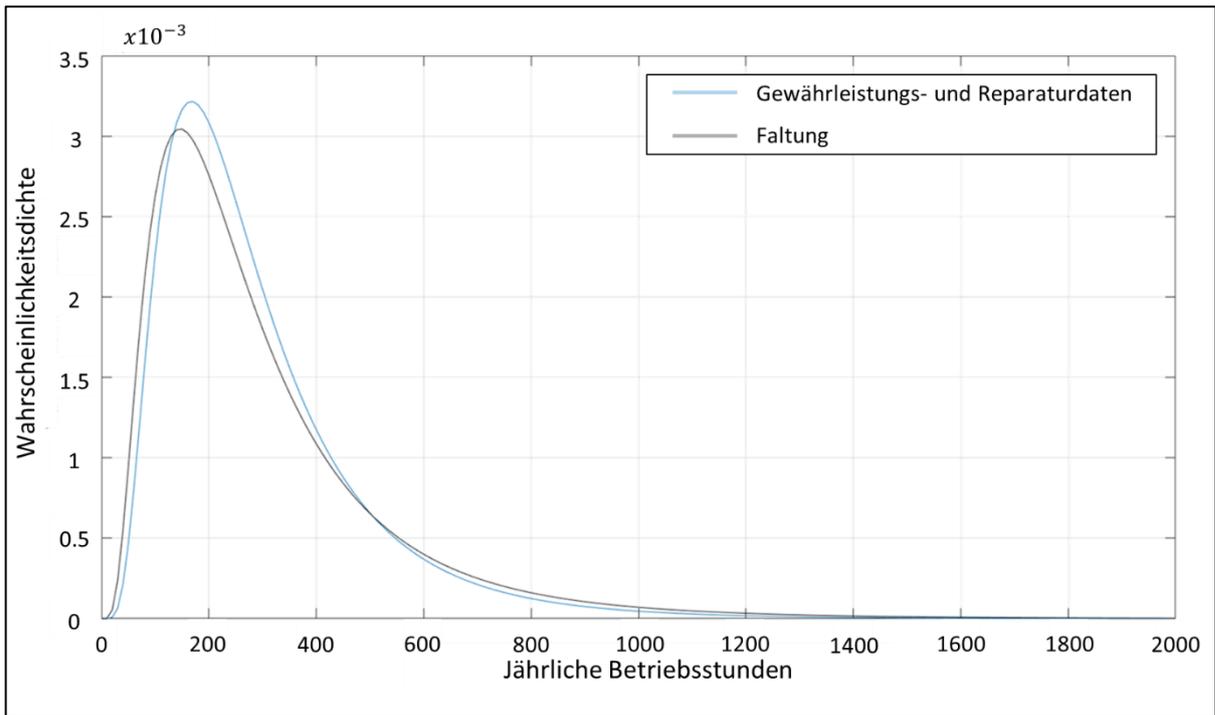


Abbildung 4-27 Verteilung der jährlichen Fahrzeugbetriebsstunden aus den Garantiedaten und der Faltung

Für die Anpassung der Nutzung an das Fahrzeualter wird eine Abnahme der Betriebszeit im selben Maß wie die Abnahme der Laufleistung angenommen. Abbildung 4-28 präsentiert die resultierende Exponentialfunktion und die kumulierte Fahrzeugnutzen in Abhängigkeit vom Fahrzeualter.

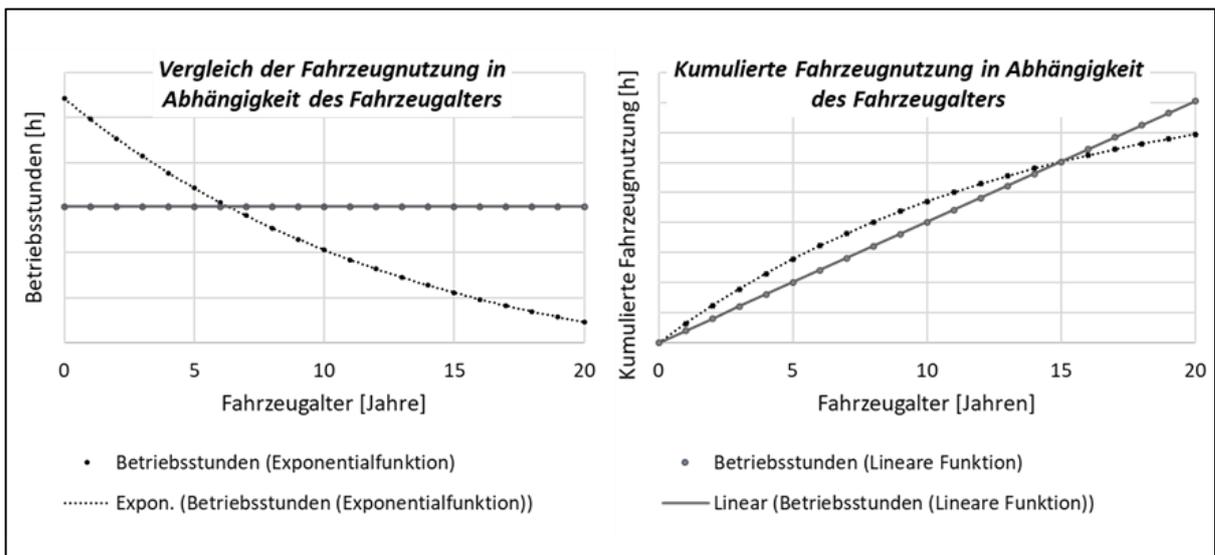


Abbildung 4-28 Vom Fahrzeualter abhängige mittlere Nutzung auf Basis der Betriebsstunden
Links: Basierend auf den Betriebsstunden sind zum einen die lineare Nutzung (horizontale Linie) und eine exponentielle Abnahme der Nutzung dargestellt
Rechts: Basierend auf den Betriebsstunden sind kumulierte die lineare Nutzung und die exponentielle Nutzung dargestellt

Jeder Punkt der Exponentialfunktion stellt den Mittelpunkt einer Betriebsstundenverteilungsfunktion dar. Aus der Darstellung ist zu entnehmen, dass eine lineare Annahme der Nutzung zu einer Unterschätzung der mittleren Betriebszeit in frühen Phasen und zu einer Überschätzung in späten Phasen des Fahrzeuglebenszyklus führt. Für die Extrapolation der Nutzung auf ein Feldleben spielt das jedoch keine wichtige Rolle, da diese sowohl auf linearem als auch auf exponentiellem Weg nach 15 Jahren bei 100% gedeckelt wird. Die kumulierte Nutzung ist insbesondere für die Definition der Wiederverwendungsgrenzwerte von entscheidender Relevanz. Wie in Kapitel 3.2.3.1 bereits konkretisiert, führt eine stärkere Nutzung in frühen Phasen des Fahrzeuglebenszyklus unweigerlich zu einer geringeren mittleren Restlebensdauererwartung in späteren Phasen.

4.3.2 Einfluss der Durchschnittsgeschwindigkeit auf die Beanspruchung

Der SR-LC dient in der Aufarbeitung von Lenksystemen schon heute als essenzieller Indikator für die Feldbeanspruchung des Reduktionsgetriebes. Darüber hinaus wird er ebenfalls als Referenz für die Intensität der Nutzung auf der Gesamtsystemebene verwendet. Abbildung 4-29 veranschaulicht den Zusammenhang zwischen SR-LC, Laufleistung und Betriebszeit.

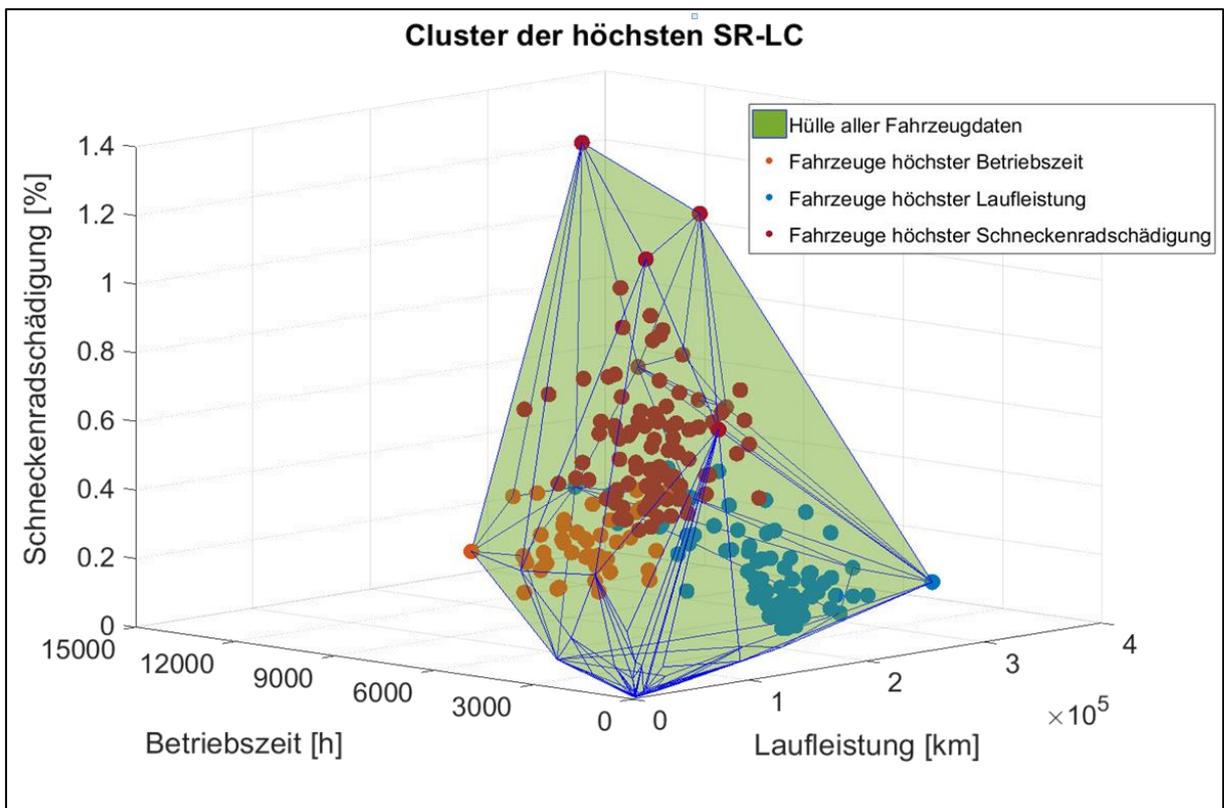


Abbildung 4-29 Cluster der höchsten SR-LC; Die Hülle (grün) umrahmt die einhundert Datenpunkte mit den höchsten Werten der drei Parameter Betriebszeit, Laufleistung und Schneckenradschädigung

Dargestellt sind je Parameter die hundert Datensätze mit den jeweils höchsten Werten. Die grüne Hülle umspannt die Ränder dieser Datensätze. Der Großteil der Fahrzeugdatensätze mit der höchsten Laufleistung, und zwar in blau dargestellt, liegt bei deutlich niedrigeren SR-LC Werten im Vergleich zu den beiden anderen Kategorien. Eine Zunahme der Durchschnittsgeschwindigkeit ist also mit potenziell kleineren Schädigungswerten verbunden als umgekehrt. Die Datenwolke mit der höchsten Schneckenradschädigung ballt sich zwischen den beiden anderen Extremen. Folgt man der Logik der Darstellung, kommt es mit abnehmender Durchschnittsgeschwindigkeit zunächst zu einer Zunahme und dann wiederum zu einer Abnahme des SR-LC. Aus Kapitel 4.2.2.3 ist bekannt, dass hohe Lenkintensitäten aus Fahrsituation mit geringen Geschwindigkeiten, wie dem Parkieren, resultieren. Kausal gesehen, ist die Abnahme des SR-LC daher nur mit einer Unschärfe der Daten zu erklären. Zur Klärung trägt eine Betrachtung der Betriebsstunden bei. Die Betriebsstunden werden auch dann gezählt, wenn sich das Fahrzeug bei laufendem Motor im Stillstand befindet und keine aktive Nutzung des Lenksystems vorliegt. Ein solches Fahrprofil kann für Taxifahrer typisch sein und führt zu einer Verzerrung der Zusammenhänge.

Eine Korrelationsanalyse soll die Abhängigkeiten der Parameter untereinander ermitteln. Die Berechnung der Korrelationskoeffizienten erfolgt mit dem Ansatz der multiplen linearen Regression. Insgesamt ist ein positiver Zusammenhang zwischen der Schneckenradschädigung und den beiden Variablen Laufleistung r_m und Betriebszeit r_t nachweisbar

$$r_{LC,r_m,r_t} = \sqrt{\frac{r_{r_m,LC}^2 + r_{r_t,LC}^2 - 2 * r_{r_m,r_t} * r_{r_m,LC} * r_{r_t,LC}}{1 - r_{r_m,r_t}^2}} > 0,75. \quad (4.44)$$

Aufgrund einer starken Korrelation von Laufleistung und Betriebszeit erfährt die gesamte Regression eine Verzerrung in Richtung eines höheren multiplen Korrelationskoeffizienten. Für die Beziehung zwischen Load Counter und Laufleistung zeigt der Korrelationskoeffizient eine negative Tendenz, Gl. (4.45). Eine Fixierung der Betriebszeit bei gleichzeitiger Zunahme der Laufleistung hat eine Abnahme der Schneckenradschädigung zur Folge. Die Beziehung zwischen Load Counter und Betriebszeit zeigt hingegen eine positive Korrelation, Gl. (4.46). Bei einer Fixierung der Laufleistung führt ein Anstieg der Betriebszeit zu höheren Schädigungswerten.

$$b_1 = \beta_1 * \frac{s_{LC}}{s_{r_m}} < 0 \quad (4.45)$$

$$b_2 = \beta_2 * \frac{s_{LC}}{s_{r_t}} > 0 \quad (4.46)$$

Die berechneten Abhängigkeiten sind deshalb nicht unerwartet, da eine Zunahme von r_m , bei gleichem r_t auch mit einer Zunahme der Fahrzeugdurchschnittsgeschwindigkeit gleichzusetzen ist, Gl. (3. 10). Dieser Zusammenhang wird auch von der LC Berechnung gestützt, da der SR-LC nur bei einer aktiven Unterstützung durch den Servomotor die eingehenden Lastwechsel bewertet. Die Notwendigkeit einer Servounterstützung nimmt mit zunehmender Durchschnittsgeschwindigkeit ab. Die Zero Crossing Peaks der Spurstangensummenkraft stützen ebenfalls die aufgezeigte Korrelation von Schädigung, Laufleistung und Betriebszeit. In jeder der Spurstangensummenkraftklassen zeigt das Stadtfahrprofil die im Mittel höchste Anzahl an Peaks. Abbildung 4-30 zeigt den Box Plot der bereinigten Zero Crossing Peaks je Klasse. In der niedrigsten Klasse fällt auf, dass das Autobahnprofil eine im Mittel höhere Anzahl an Peaks aufweist als das gemischte Fahrprofil. Begründet werden könnte dies durch eine höhere Anzahl an Spurwechseln mit geringerem Kraftaufwand. Für eine nähere Analyse dieses Zusammenhangs fehlen jedoch die erforderlichen Zeitreihendaten. In den restlichen Klassen überwiegt die Anzahl der Peaks des gemischten Fahrprofils im Vergleich zu denen des Autobahnprofils.

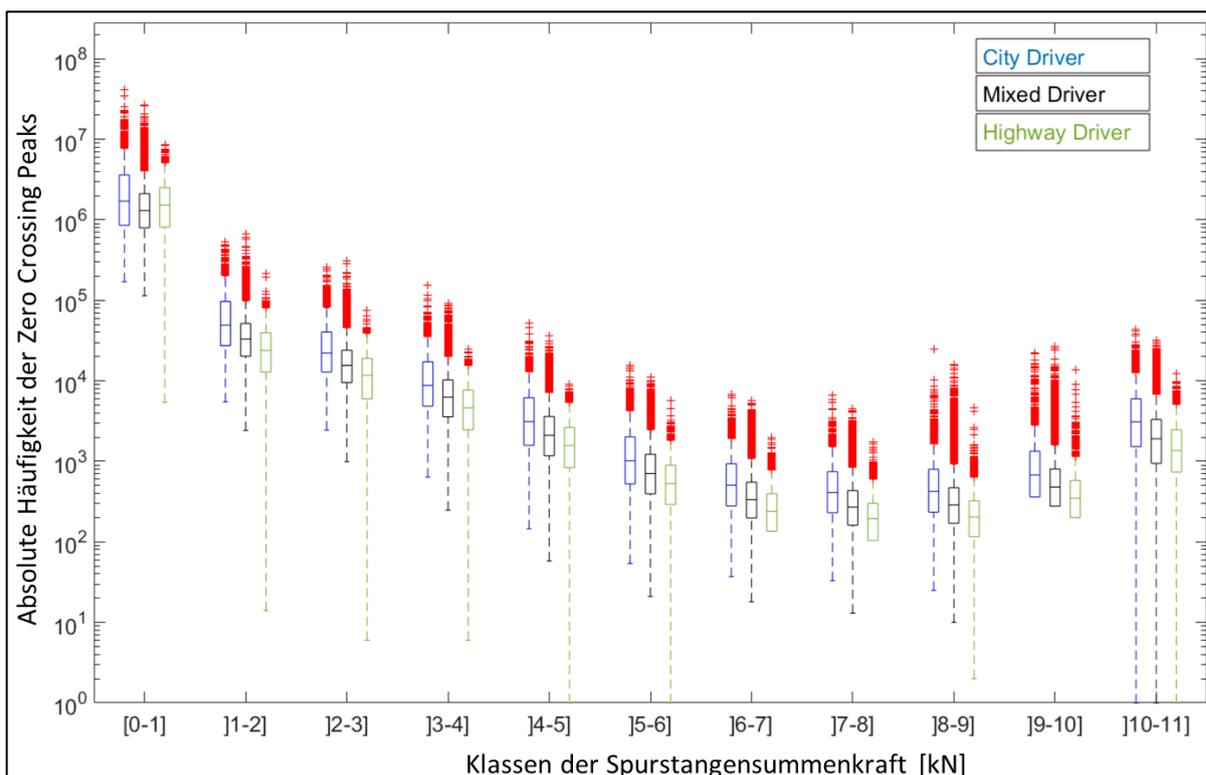


Abbildung 4-30 Box Plot der Zero Crossing Peaks in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeitsprofile

Der aus den Zero Crossing Peaks zu berechnende Damage Counter weist dann dieselbe Charakteristik wie der Load Counter auf, wenn es um die Korrelation zu der Laufleistung und der Betriebszeit geht. In Abbildung 4-31 ist die lineare Regression von LC, DC und der

Durchschnittsgeschwindigkeit dargestellt. Analog zu Abbildung 4-29 fällt auf, dass es eine ähnliche bauchige Ausformung der Datenwolke gibt, welche vermutlich auf dieselben Verzerrungseffekte zurückzuführen ist. Die geplottete Regressionsebene unterstützt die Visualisierung der Zusammenhänge und weist darauf hin, dass zwischen Load Counter und Damage Counter ein positiver Zusammenhang besteht. Beide Parameter weisen jedoch eine negative Korrelation mit der Durchschnittsgeschwindigkeit auf.

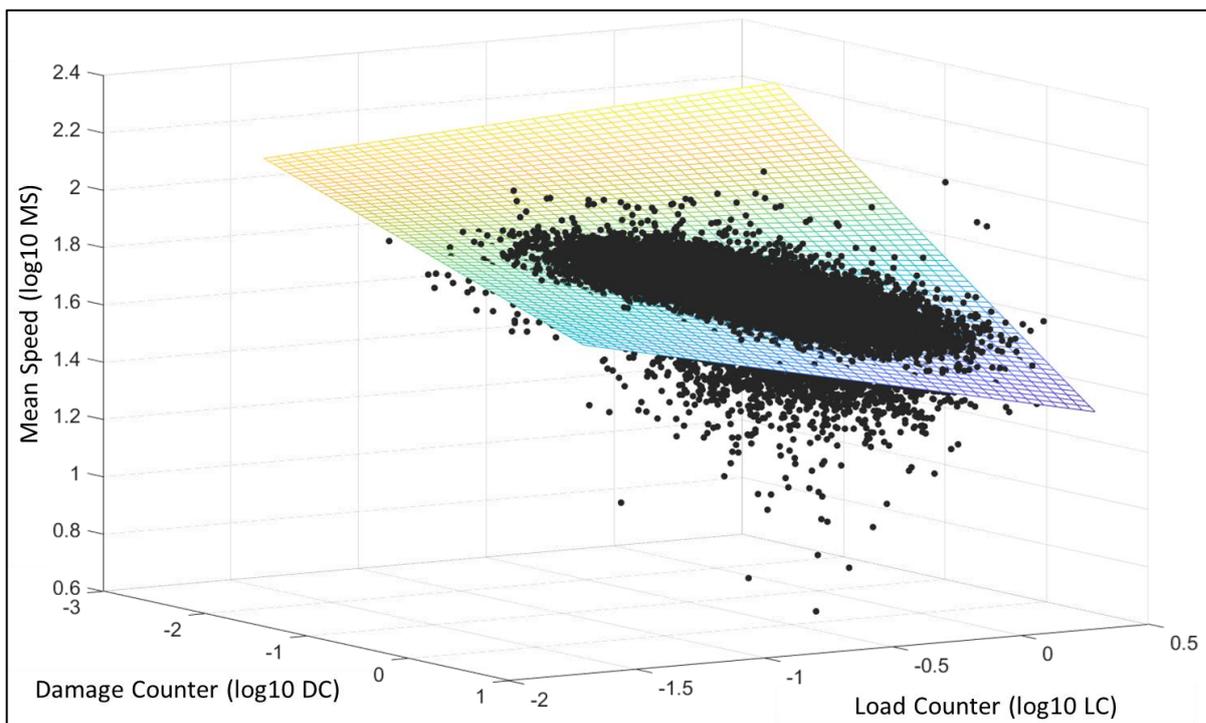


Abbildung 4-31 Multiple lineare Regression der Pseudoschädigungswerte DC und LC mit der Durchschnittsgeschwindigkeit; Die Regression zeigt einen negativen Zusammenhang zwischen der Durchschnittsgeschwindigkeit und den Pseudoschädigungsparametern

Neben den bereits untersuchten Pseudoschädigungsparametern verdeutlicht auch eine Vielzahl anderer lenkungsspezifischer Parameter den negativen Zusammenhang mit der Durchschnittsgeschwindigkeit. Einzig die durchschnittliche Lenkwinkelgeschwindigkeit zeigt einen positiven Zusammenhang. In Abbildung 4-32 sind die Korrelationskoeffizienten der untersuchten Parameter tabellarisch und farblich dargestellt. Reihe II zeigt die Korrelation der Durchschnittsgeschwindigkeit mit allen aufgeführten Parametern. Der erste Bereich (I) zeigt auf, dass die vorgestellten Pseudoschädigungsparameter untereinander korrelieren. Die Korrelation ist jedoch nicht als so stark einzuordnen, dass eine Reduktion der Parameteranzahl zu rechtfertigen wäre. Anders kann bei den Lenkvorgängen (III) entschieden werden. Hier liegen die Koeffizienten deutlich oberhalb von 0.75. Die Spurwechselforgänge, die durchschnittlichen Lastwechsel und die durchschnittliche Lenkwinkelgeschwindigkeit zeigen die geringste Korrelation mit der Durchschnittsgeschwindigkeit. Ihre Korrelationskoeffizienten liegen unterhalb eines

Wertes von 0.5. Anzumerken ist die Tatsache, dass die Lenkwinkelgeschwindigkeit als einziger Parameter einen schwach positiven Zusammenhang mit der Durchschnittsgeschwindigkeit aufzeigt.

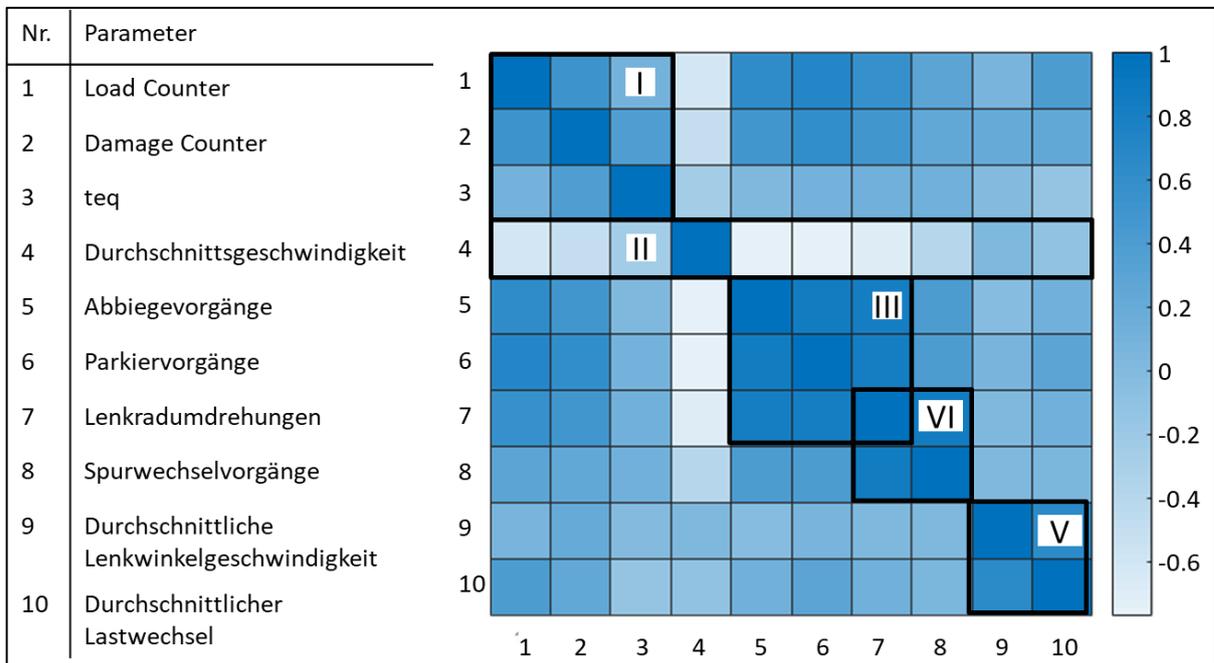


Abbildung 4-32 Korrelationskoeffizienten- Matrix der Pseudoschädigungswerte und der Beanspruchungsindikatoren; Aus der Korrelationskoeffizienten- Matrix ergeben sich fünf zu berücksichtigende Bereiche. Für Bereiche mit starker Korrelation untereinander kann die Anzahl der zu berücksichtigenden Parameter reduziert werden (III – V). Für die Bereich I – II wird die Parameteranzahl, aufgrund der schwächeren Korrelation untereinander, beibehalten

Aus der Korrelation- und Regressionsanalyse sind die nachfolgenden Schlussfolgerungen zu ziehen. Der Parameter Durchschnittsgeschwindigkeit ist ein nicht zu vernachlässigender Indikator für die Beanspruchungsintensität eines Lenksystems im Feld. Auch wenn die Durchschnittsgeschwindigkeit keine direkte Einflussgröße darstellt, so bedingt sie doch die Rahmenbedingungen für eine intensive Nutzung. Für die Auswahl der Feldsysteme bedeutet dies eine Berücksichtigung des Geschwindigkeitsprofils in den Auswahlkriterien. Wie ebenfalls aus der Analyse resultiert, kann der Parameterraum für die Lenkvorgänge auf einen Parameter reduziert werden, wohingegen alle Pseudoschädigungswerte weiterhin vertreten sein müssen.

4.3.3 Einfluss des Fahrzeugaufbaus auf die Beanspruchung

Der Fahrzeugaufbau und, damit verbunden, die Einbindung im Fahrzeugverbund spielen eine wichtige Rolle für die Beanspruchung einer Lenkung. Wichtige Einflussfaktoren sind hier die Einbaulage, die Achslast und die Achsgeometrie. Je nach Fahrzeugkonfiguration werden unter-

schiedliche systemseitige Ausprägungen der Merkmale Hub, der Zahnstangensummenkraft, des Übersetzungsverhältnisses, des Lenkwinkels und des Motormomentes realisiert.

Abbildung 4-33 veranschaulicht den Einfluss der Motorisierung auf die Beanspruchungsintensität einzelner Geschwindigkeitsprofile am Beispiel der Kompaktkwagenklasse in Europa.

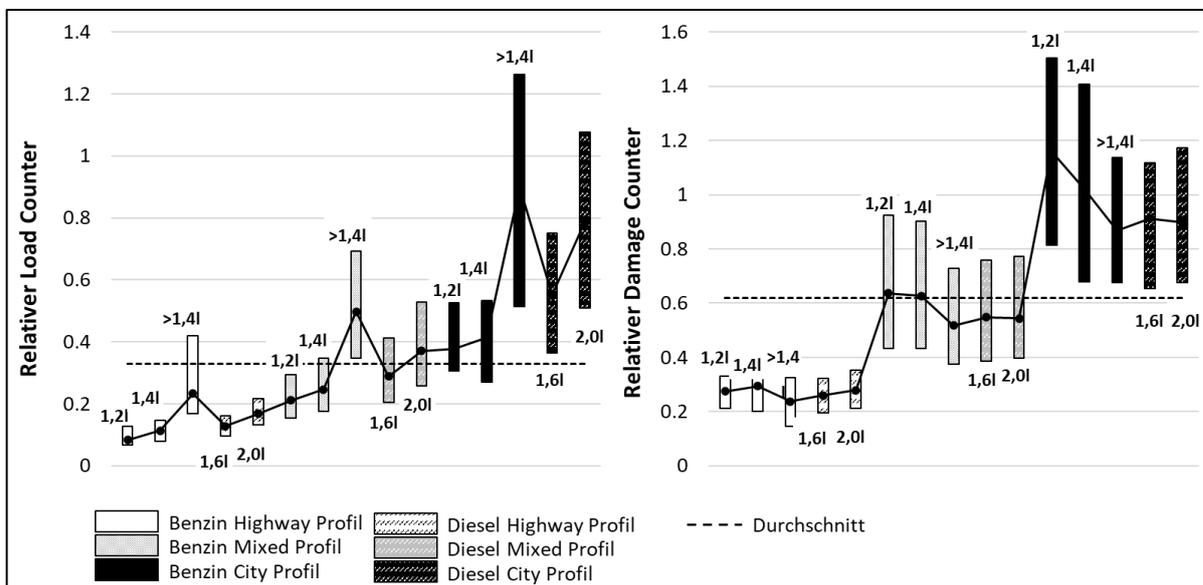


Abbildung 4-33 Einfluss der Motorisierung auf die Beanspruchungsintensität einzelner Geschwindigkeitsprofile

Links: Zunahme des Load Counters bei einer Motorisierung und einer Abnahme der Durchschnittsgeschwindigkeit (dargestellt durch die Fahrprofile)

Rechts: Zunahme des Damage Counters bei einer Steigerung der Motorisierung und einer Abnahme der Durchschnittsgeschwindigkeit (dargestellt durch die Fahrprofile)

Die Bewertung der im Feld erfahrenen Beanspruchungsintensität erfolgt unter Verwendung der Pseudoschädigungsparameter LC und DC. Beide Parameter wurden dazu auf ein Feldleben extrapoliert. Die horizontale Linie (schwarz gestrichelt) stellt den Durchschnittswert aller Datensätze der ausgewählten Fahrzeugkategorie in Europa dar. Die einzelnen Balken zeigen die Spanne der Schädigungsparameter von ihrem Minimum bis zu ihrem Maximum. Die Punkte der Verbindungslinie zeigen den Datenmittelpunkt je Balken. Aus der Darstellung des LC gehen mehrere Trends hervor. Zum einen nimmt der LC für jede Kraftstoffvariante und für jedes Fahrprofil mit zunehmendem Hubraum zu. Weiterhin ist auch der bereits aufgezeigte Zusammenhang zwischen der Durchschnittsgeschwindigkeit und dem LC vorzufinden. Ebenfalls zu beachten ist der im Mittel höhere LC für Benzinmotoren mit einem Hubraum größer als 1,4l, und zwar im direkten Vergleich zu den Dieselmotoren des gleichen Fahrprofils. Für das gemischte Fahrprofil liegt der Datenschwerpunkt für Benzinmotoren mit 1,4l Hubraum bereits über dem europäischen Durchschnitt der LC Werte. Dieses Faktum muss bei der Auswahl der Feldsysteme für die physische Studie berücksichtigt werden. Im Gegensatz dazu zeigt der DC

weniger Unterschiede zwischen den einzelnen Kraftstoffvarianten. Für das Stadtfahrprofil und das gemischte Fahrprofil weisen geringer motorisierte Fahrzeuge der Kraftstoffklasse Benzin etwas höhere DC Werte auf.

Folgende Schlussfolgerung kann in Bezug auf den Einfluss des Fahrzeugaufbaus gezogen werden. Der LC liefert Indizien für einen Zusammenhang zwischen Beanspruchung, Hubraum und Motorenart. Für die Feldstudie bedeutet dies eine entsprechende Berücksichtigung von Fahrzeugen mit möglichst großem Hubraum, auch wenn der DC hier keinen eindeutigen Trend aufzeigt.

4.3.4 Einfluss der Fahrzeugumgebung auf die Beanspruchung

Umwelteinflüsse sind ein nicht zu vernachlässigender Faktor während der Feldnutzung eines Lenksystems. Insbesondere die Temperatur spielt eine Rolle bei der Alterung von Elektronikkomponenten. Auch auf das Setzverhalten des Getriebes übt die Temperatur einen Einfluss aus.

Im Folgenden wird der klimatische Einfluss der Regionen West- und Südeuropa auf den LC und die äquivalente Temperaturverweildauer untersucht. Abbildung 4-34 vermittelt zunächst eine Übersicht über die Jahresmitteltemperaturen für die Hauptstädte West- und Mitteleuropas. Ebenfalls dargestellt ist der relative Anteil der verfügbaren Daten, unterteilt in Länder.

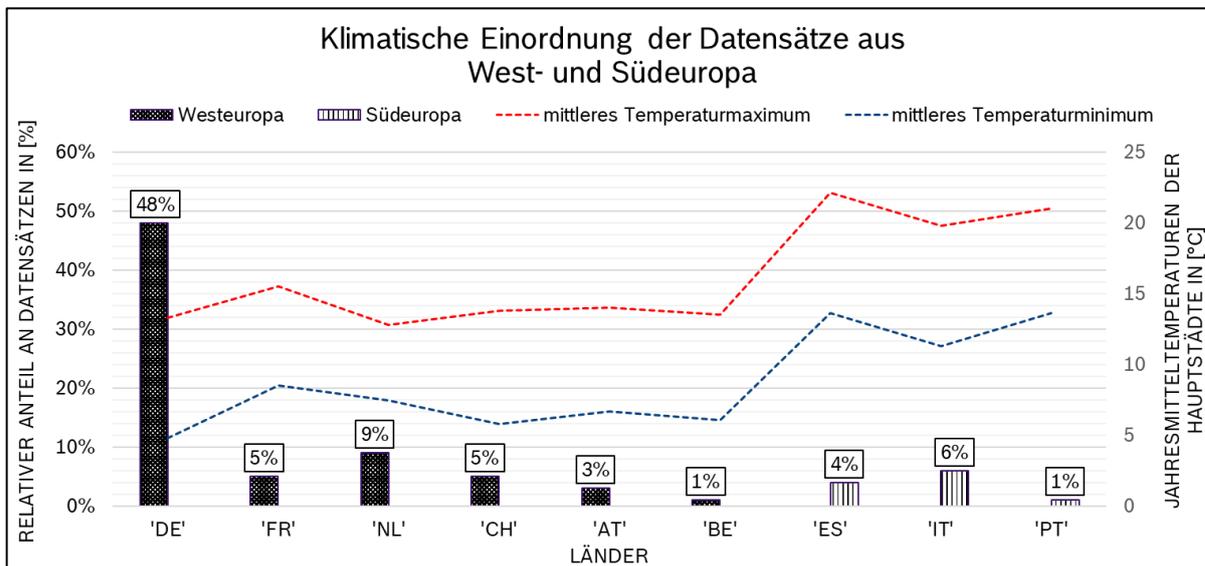


Abbildung 4-34 Klimatische Einordnung der Datensätze aus West- und Südeuropa (Eigene Darstellung unter Verwendung der Temperaturdaten aus [92])

Anhand der maximalen und minimalen Temperaturmittelwerte ist zu erkennen, dass die Hauptstädte Südeuropas deutlich wärmer sind als die Hauptstädte Westeuropas. Betrachtet man nun den LC und die äquivalente Temperaturverweildauer für Datensätze aus West- und Südeuropa, so erhält man die in Abbildung 4-35 dargestellten Ergebnisse. Die Daten beider Parameter

basieren auf einem Stadtfahrprofil und sind zudem auf ein Feldleben extrapoliert worden. Der LC und die äquivalente Temperaturverweildauer des Stadtfahrers aus Südeuropa weisen im Mittel höhere Werte auf als der Stadtfahrer aus Westeuropa. Um eine Verzerrung auszuschließen, werden zudem die Durchschnittsgeschwindigkeit des Stadtfahrprofils, der DC und die Anzahl der Parkiervorgänge untersucht. Die Durchschnittsgeschwindigkeit für das Stadtfahrprofil beträgt in beiden Regionen ca. 25 km/h. Fahrzeuge in Südeuropa haben im Mittel fünf Prozent weniger Parkiervorgänge innerhalb eines Feldlebens zu bewältigen. Der DC ist hingegen für Fahrzeuge aus Südeuropa geringer als für Fahrzeuge aus Westeuropa. Ein klimatischer Einfluss auf die Höhe der beiden Pseudoschädigungswerte LC und t_{eq} kann daher nicht ausgeschlossen werden und ist in der Auswahl der Feldsysteme zu berücksichtigen.

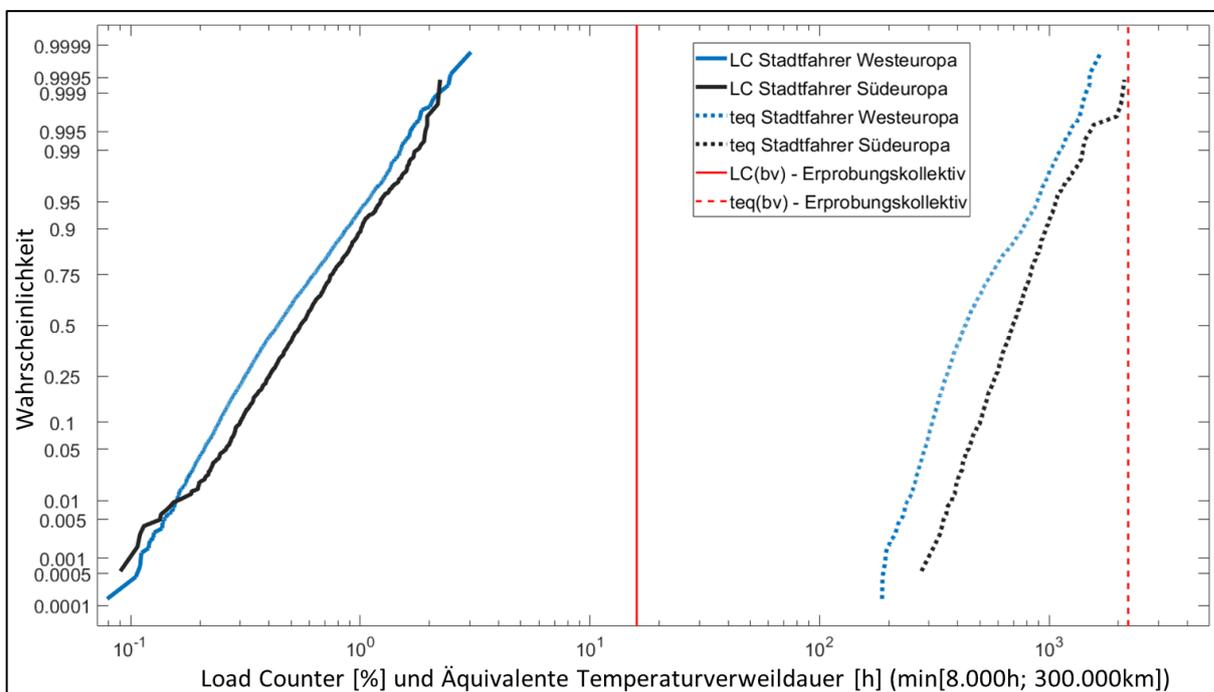


Abbildung 4-35 Vergleich der auf ein spezifiziertes Feldleben extrapolierten Pseudoschädigungswerte LC und t_{eq} anhand der Regionen West- und Südeuropa; Höhere Jahresmitteltemperaturen (Südeuropa > Westeuropa) führen zwangsläufig zu einem höheren Load Counter und einer höheren äquivalenten Temperaturverweildauer (beide Temperaturabhängig)

4.4 Übersicht über ausgewählte Feldsysteme

Die Auswahl für die Feldbeanspruchung repräsentativer Lenksysteme bildet einen elementaren Bestandteil für die Verknüpfung der realen Feldschädigung mit der systematischen Felddatenerfassung. Mittels der Schädigungsanalyse sollen Informationslücken in Bezug auf die Vorbeanspruchung und den heterogenen Feldverschleiß geschlossen werden. Zudem soll auch die Prognose der zukünftigen Schädigung im Feld verbessert werden. Die Repräsentativität der



ausgewählten Feldsysteme erweist sich daher für die Aussagekraft der Verknüpfung als richtungsweisend. Für ihre Bewertung werden die vorgestellten Pseudoschädigungsparameter Load Counter, Damage Counter und die äquivalente Temperaturverweildauer herangezogen. Die aus der Korrelationsanalyse ebenfalls als relevant identifizierten Parameter der Spurwechsellvorgänge und der Lenkwinkelgeschwindigkeit werden als Bestandteil der Pseudoschädigungswerte und aufgrund ihrer mangelnden Vergleichbarkeit mit den Erprobungsergebnissen, bei der Bewertung der Feldsysteme nicht berücksichtigt.

Insgesamt wurden 190 Lenksysteme der untersuchten Plattform aus dem Feld zurückgeholt und neun Dauerlaufergebnisse auf verschiedenen Stufen ausgewertet. Die aus dem Feld zurückgeholt Feldsysteme bestehen aus 78 Lenksystemen, die innerhalb der Garantiezeit ausgetauscht wurden, und 112 Lenksystemen, die außerhalb der Gewährleistung ausgetauscht wurden. Unter diesen Systemen befinden sich drei mit einer sehr hohen Vorbeanspruchung, von denen sogar zwei als repräsentativ für ein Feldleben eingestuft werden können. Die beiden repräsentativen Systeme wurden in einem Fahrschulbetrieb in Deutschland genutzt. Das erste Fahrschulsystem FS1 stammt aus einem Fahrzeug der Kompaktkwagenklasse mit einem 2,0l Dieselmotor und einer Laufleistung von 355.000 Kilometern sowie einer Betriebszeit von 9.946 Stunden. Die Durchschnittsgeschwindigkeit liegt mit 35,7 km/h im unteren Bereich des gemischten Fahrprofils und deutet auf hohe Lenkanteile im städtischen Betrieb hin. Die zweite Fahrschullenkung FS2 stammt ebenfalls auch aus einem Fahrzeug der Kompaktkwagenklasse, jedoch mit einem 1,4l Otto Motor. Außerdem liegt die FS2 mit 208.000 Kilometern und 7.462 Stunden deutlich unterhalb der Laufleistung und Betriebszeit der FS1. Mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 28 km/h ist sie dem Stadtfahrprofil zuzuordnen und lässt ebenfalls auf hohe Lenkanteile im städtischen Betrieb schließen.

Abbildung 4-36 Einordnung der Feldsysteme in Bezug auf den Load Counter veranschaulicht die Einordnung der Feldsysteme und der Dauerlaufergebnisse auf der Basis des LC. Die horizontalen Linien beschreiben das 95% und das 50% Quantil der auf ein Feldleben extrapolierten Felddaten. Erwartungsgemäß befinden sich die Dauerlaufergebnisse um mehrere Faktoren von den Feldsystemen und den Quantilen der Felddaten entfernt. Für die Feldsysteme ist zudem eine Unterteilung in Bezug auf das Jahr der Studie aus der Abbildung zu entnehmen. Ebenfalls wird zwischen den für die physische Studie ausgewählten Systemen (blaues Quadrat), den repräsentativen Feldsystemen (gelbes Quadrat) und den übrigen Feldsystemen unterschieden, welche lediglich ausgelesen wurden.

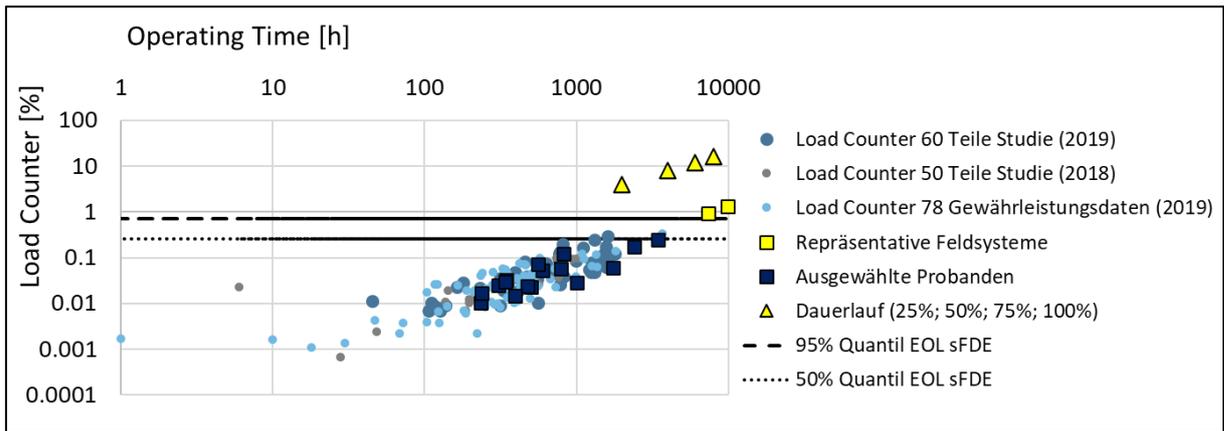


Abbildung 4-36 Einordnung der Feldsysteme in Bezug auf den Load Counter; Die repräsentativen (Fahrschullensysteme) liegen oberhalb des 95% Quantils der Felddaten für den Parameter Load Counter

Der Großteil der Feldsysteme ist unterhalb des 50% Quantils zu verorten. Die beiden Fahrschullensysteme sind hingegen oberhalb des 95% Quantils verortet. Während die FS2 im Bereich des 95% Quantils liegt, repräsentiert die FS1 sogar das 99% Quantil der extrapolierten LC Werte. Der Abstand zwischen den Fahrschullenkungen und den Dauerlaufergebnissen ist dennoch beachtlich. In Abbildung 4-37 sind beide Fahrschullensysteme noch einmal vergleichend dargestellt worden.

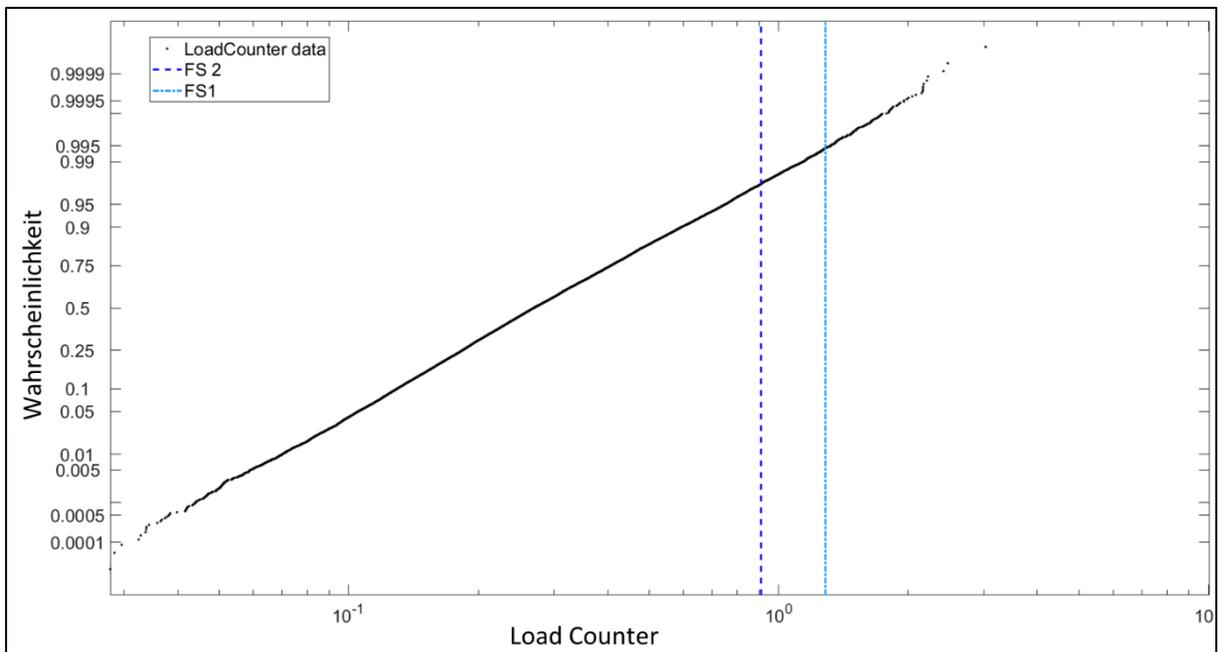


Abbildung 4-37 LC der Fahrschullensysteme und der Felddaten

Auch in Bezug auf den Damage Counter zeigen die beiden Fahrschullensysteme deutlich höhere Werte als die restlichen Feldsysteme, Abbildung 4-38. Beide Systeme liegen weit oberhalb des 50% Quantils. Für die restlichen Feldsysteme zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei dem LC

und der Großteil liegt unterhalb des 50% Quantils. Die Dauerlaufergebnisse liegen hingegen in Bezug auf den DC im Bereich der Fahrshullenksysteme, was den gravierendsten Unterschied im Vergleich zum LC ausmacht.

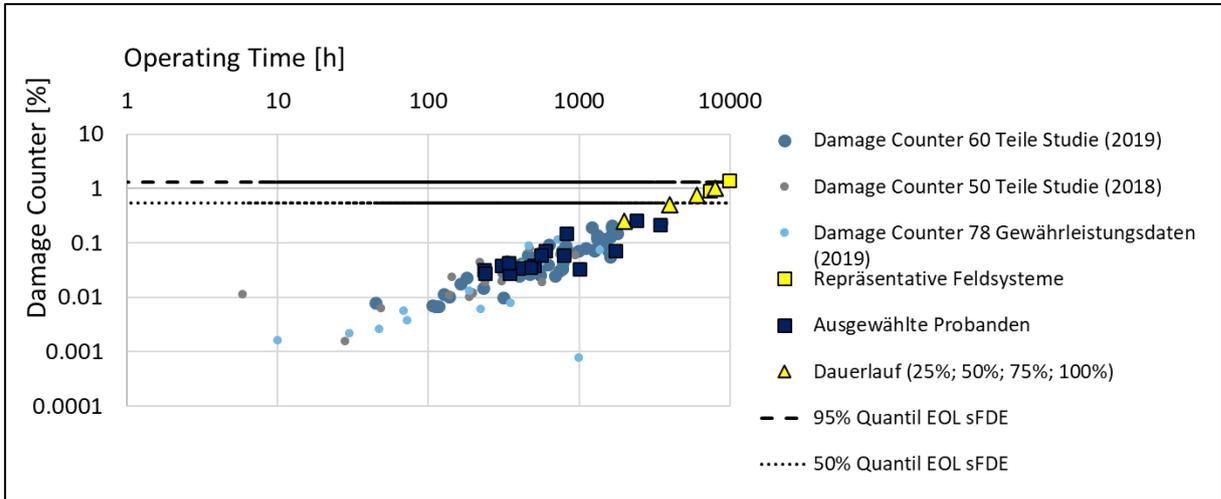


Abbildung 4-38 Einordnung der Feldsysteme in Bezug auf den Damage Counter; Die repräsentativen (Fahrshullenksysteme) liegen deutlich oberhalb des 50% Quantils der Felddaten für den Parameter Damage Counter

Eine vergleichende Einordnung der Felddaten und der beiden Fahrshullenkungen kann Abbildung 4-39 entnommen werden. Die FS2 gehört zu den 25% mit dem höchsten DC zum Ende eines Feldlebens und die FS1 liegt sogar oberhalb des 95% Quantils. Beide Systeme können für den Parameter DC als Systeme mit einer hohen Vorbeanspruchung eingestuft werden.

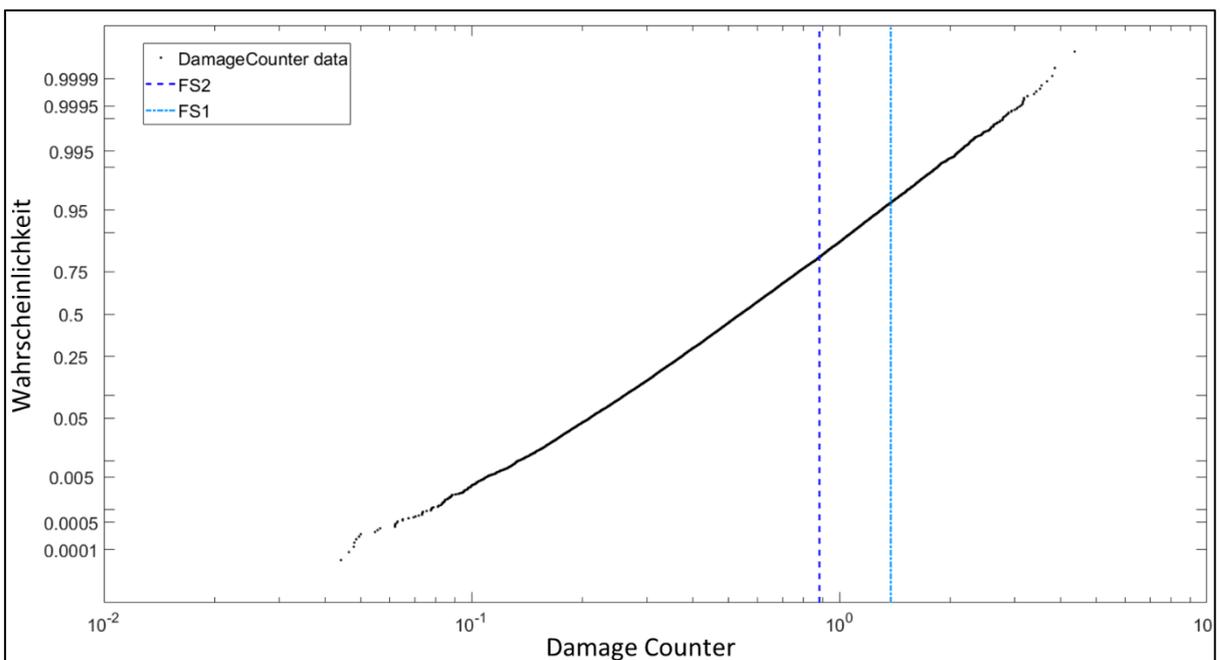


Abbildung 4-39 DC der Fahrshullenksysteme

Die Einordnung der äquivalenten Temperaturverweildauer ist ebenfalls durch eine ähnliche Charakteristik gekennzeichnet wie die Auswertung der beiden anderen Pseudoschädigungsparameter, Abbildung 4-40. Der Großteil der Feldsysteme liegt wieder unterhalb des 50% Quantils, wohingegen beide Fahrshullen Systeme oberhalb des 95% Quantils einzuordnen sind. Die Dauerlaufergebnisse sind oberhalb der Feldsysteme zu verorten. Einzig die Fahrshullenkungen präsentieren ähnliche äquivalente Temperaturverweildauern und entsprechen Verweildauern, welche nach ca. 50% der Erprobung zu erwarten sind.

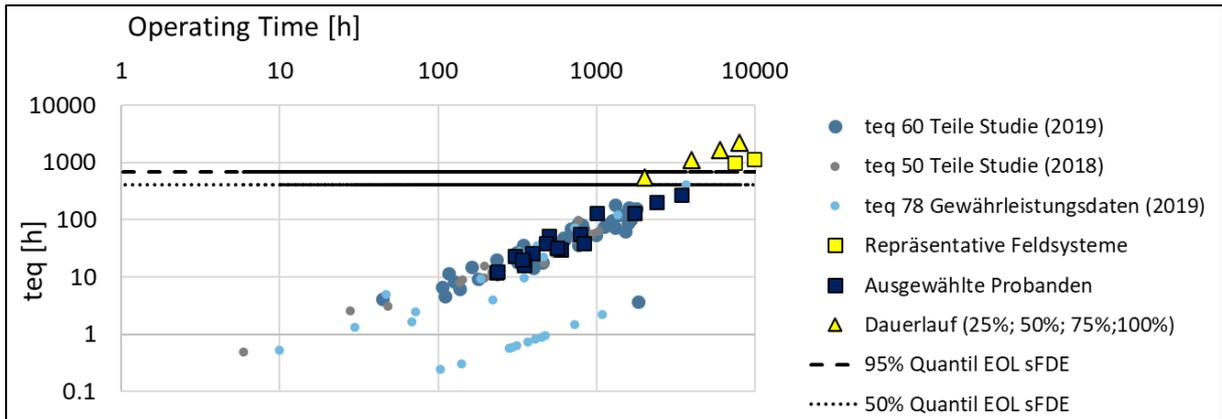


Abbildung 4-40 Einordnung der Feldsysteme in Bezug auf die äquivalente Temperaturverweildauer; Die repräsentativen (Fahrshullen Systeme) liegen oberhalb des 95% Quantils der Felddaten für den Parameter äquivalente Temperaturverweildauer

Im direkten Vergleich, Abbildung 4-41, wird ersichtlich, dass die Fahrshullen Systeme sogar dem 99% Quantil entsprechen.

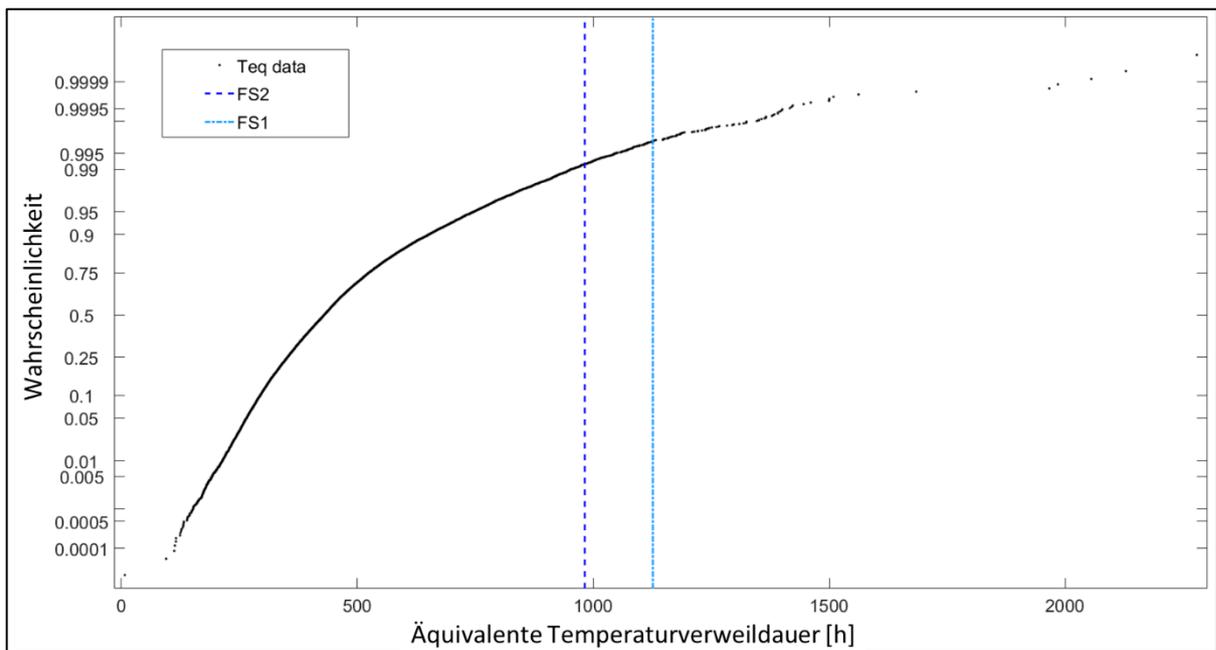


Abbildung 4-41 Äquivalente Temperaturverweildauer der Fahrshullen Systeme

Für den Parameter äquivalente Temperaturverweildauer können beide aus diesem Grund als Systeme mit repräsentativer Vorbeanspruchung eingestuft werden.

Resümierend können sowohl die FS1 als auch die FS2 auf der Grundlage der Pseudoschädigungswerte als repräsentativ für die Beanspruchung am Ende eines Feldlebens eingeordnet werden. Die FS1 weist dennoch höhere absolute Pseudoschädigungswerte auf und liegt bei allen Parametern oberhalb des 95% Quantils. Das heißt 95% der Feldpopulation erfahren im Rahmen ihres Feldlebens eine geringere Feldbeanspruchung. Die Aggregate mit geringer Feldbeanspruchung dienen zur besseren Einordnung und zur Abschätzung des Verschleiß- und Schädigungsverhaltens. Sie stützen im weiteren Verlauf der Modellentwicklung die Korrelations- und Regressionsanalyse von Beanspruchung und Vorschädigung.

4.5 Schädigungsanalyse

In diesem Abschnitt erfolgt die Auswertung der physischen Analyse ausgewählter Feldsysteme. Ziel ist das Ableiten von Schädigungsmodellen für relevante Schädigungsmechanismen. Die Performance Analyse wurde anhand der am höchsten beanspruchten Feldlenkung FS1 durchgeführt. Die FS1 liegt, wie im vorherigen Kapitel bereits aufgezeigt, in allen Bereichen mindestens oberhalb des 95% Quantils der Felddaten. Nach der Analyse auf der Fahrzeug- und der Systemebene wird eine Detailanalyse der mechanischen und elektronischen Komponenten durchgeführt. Neben den Fahrschullenkungen werden auch weitere Feldsysteme mit niedrigerer Vorbeanspruchung untersucht und bewertet. Die anschließende Übertragung der Schädigungsmodelle auf den Kontext der sFDE ermöglicht die Definition von Wiederverwendungsgrenzwerten vor dem Hintergrund der erwartbaren Schädigung. Auf dieser Basis kann die Übertragung auf einen zeitlichen Rahmen, wie zum Beispiel auf einen Gewährleistungszeitraum oder auf ein Feldleben, erfolgen.

4.5.1 Performance Analyse

Im Folgenden wird die Performance am Ende eines Feldlebens von Lenksystemen der ausgewählten Plattform untersucht. Die FS1 wird dazu sowohl auf der Fahrzeugebene als auch auf der Systemebene hinsichtlich Funktionalität, Qualität und Schädigung bewertet. Im Anschluss daran wird eine Zusammenfassung der Ergebnisse vorgenommen.

4.5.1.1 Analyse auf Fahrzeugebene

Um die Gesamtperformance eines Feldsystems nach einem Feldleben bewerten zu können, wird die Fahrshullenkung FS1 zunächst in einem neuwertigen Fahrzeug verbaut und in Bezug auf Fahrgefühl, Fahrverhalten und Akustik untersucht. Abbildung 4-42 skizziert den Aufbau der Teststrecke, auf welcher die Performance Prüfung des Fahrshullensystems durchgeführt wird.

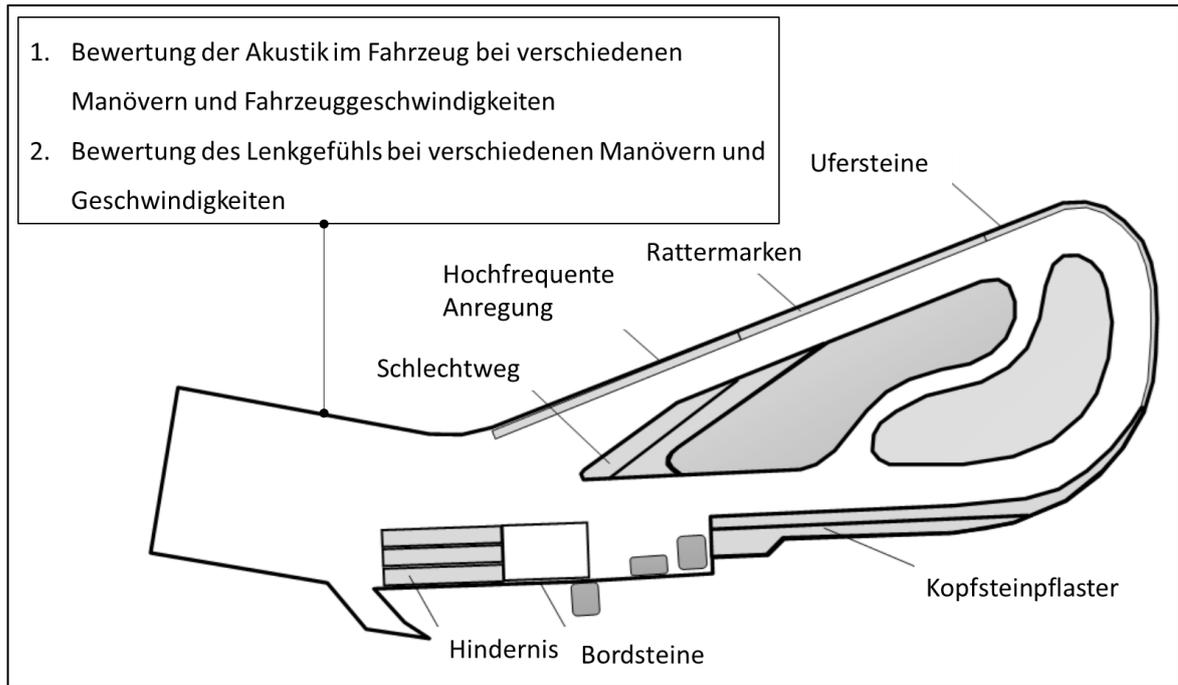


Abbildung 4-42 Aufbau der Teststrecke

Die Bewertung der Akustik und des Fahrgefühls erfolgt bei verschiedenen Manövern, auf unterschiedlichen Fahrbahnbelägen und bei verschiedenen Geschwindigkeiten. Tabelle 4-3 präsentiert die Zusammenfassung der Subjektivbewertung für die FS1. Der Kommentarspalte ist zudem die nähere Erklärung zur Bewertung zu entnehmen.

Bewertung je Manöver	Parkieren 10 km/h	Manövrieren 10 km/h	Stadtfahrt 10-50 km/h	Schlechtweg	Handling 50-100 km/h	Autobahn
Fahrgefühl	ausreichend	gut	gut	ausreichend	ausreichend	ausreichend
Akustik	grenzwertig	gut	-	schwach störend	-	-
Kommentar	Umlenk- klopfen und Spielgefühl			Klappern beim Fahren über Kopf- steinpflaster	Spielgefühl und Dämp- fung bei Rückstellung schwach stö- rend	Spielgefühl und Dämp- fung bei Rückstellung schwach stö- rend

Tabelle 4-3 Subjektivbewertung der Fahrshullenkung bei verschiedenen Fahrmanövern auf der Teststrecke



Das Lenksystem zeigt beim Fahrgefühl eine gut bis ausreichende Performance und ist in diesem Zusammenhang als nicht reklamationswürdig einzustufen. Jedoch gehen aus der Subjektivbewertung ein vergrößertes Totband (Ansprechverhalten), ein erhöhtes Spiel in der Mittenstellung sowie eine geringere Hysterese und Dämpfung im nicht endkundenrelevanten Bereich hervor. Ursachen hierfür können in Verschleißerscheinungen in der Verzahnung von Zahnstange und Ritzel und in der Verzahnung von Schnecke und Schneckenrad begründet sein. Die akustische Subjektivbewertung fällt deutlich negativer aus. Insbesondere bei kleinen ($\pm 5^\circ$) und mittleren ($\pm 15^\circ$) Lenkwinkeln ist ein deutliches Umlenkklopfen wahrnehmbar, welches bereits von Durchschnittsanwendern als störend empfunden wird. Ebenfalls fällt ein Klappern bei leichten Lenkbewegungen auf der Schlechtwegstrecke auf, welches als sehr störend zu qualifizieren ist. Die akustischen Auffälligkeiten können ebenfalls auf einen Verzahnungsverschleiß und ein daraus resultierendes erhöhtes Druckstückspiel zurückzuführen sein. Insgesamt ist die Akustik des Lenkgetriebes daher mit unzureichend zu bewerten. Dennoch ist zu konstatieren, dass die Gesamtperformance im Fahrzeug für ein Lenksystem am Ende eines Feldlebens und mit der hohen Vorbelastung als überraschend positiv einzuordnen ist.

4.5.1.2 Analyse auf Systemebene

Das Lenksystem FS1 ist im nächsten Schritt auf der Systemebene in einer Prüfstands Umgebung zu bewerten. Es werden relevante Verschleißparameter auf dieser Ebene erhoben, welche später direkt in die Entwicklung der Schädigungsmodelle einfließen.

Druckstückspiel

Das Druckstückspiel, das in Abschnitt 4.5.2.2 näher erläutert wird, ist ein mechanischer Schädigungsparameter zur Bestimmung des Verschleißes der Verzahnung von Ritzel und Zahnstange. Abbildung 4-43 veranschaulicht das Druckstückspiel $xYoke$ über den Lenkwinkelverlauf des Lenkrades ϕ_{STW} . Insbesondere das motorseitige Druckstückspiel (b) weist ein hohes Spiel in der Zahnstangenmittenstellung auf und bestätigt die Subjektivbewertung des Fahrversuches.

Übliche Einstellwerte für das Druckstückspiel liegen in Bereichen von $100 \mu m$ [7]. Eine Druckstückspielzunahme und eine erhöhte Spieldifferenz (Grabenbildung) in der Zahnstangenmittenstellung können zu akustischen Auffälligkeiten wie Zahnstangenklappern und Umlenkklopfen führen.

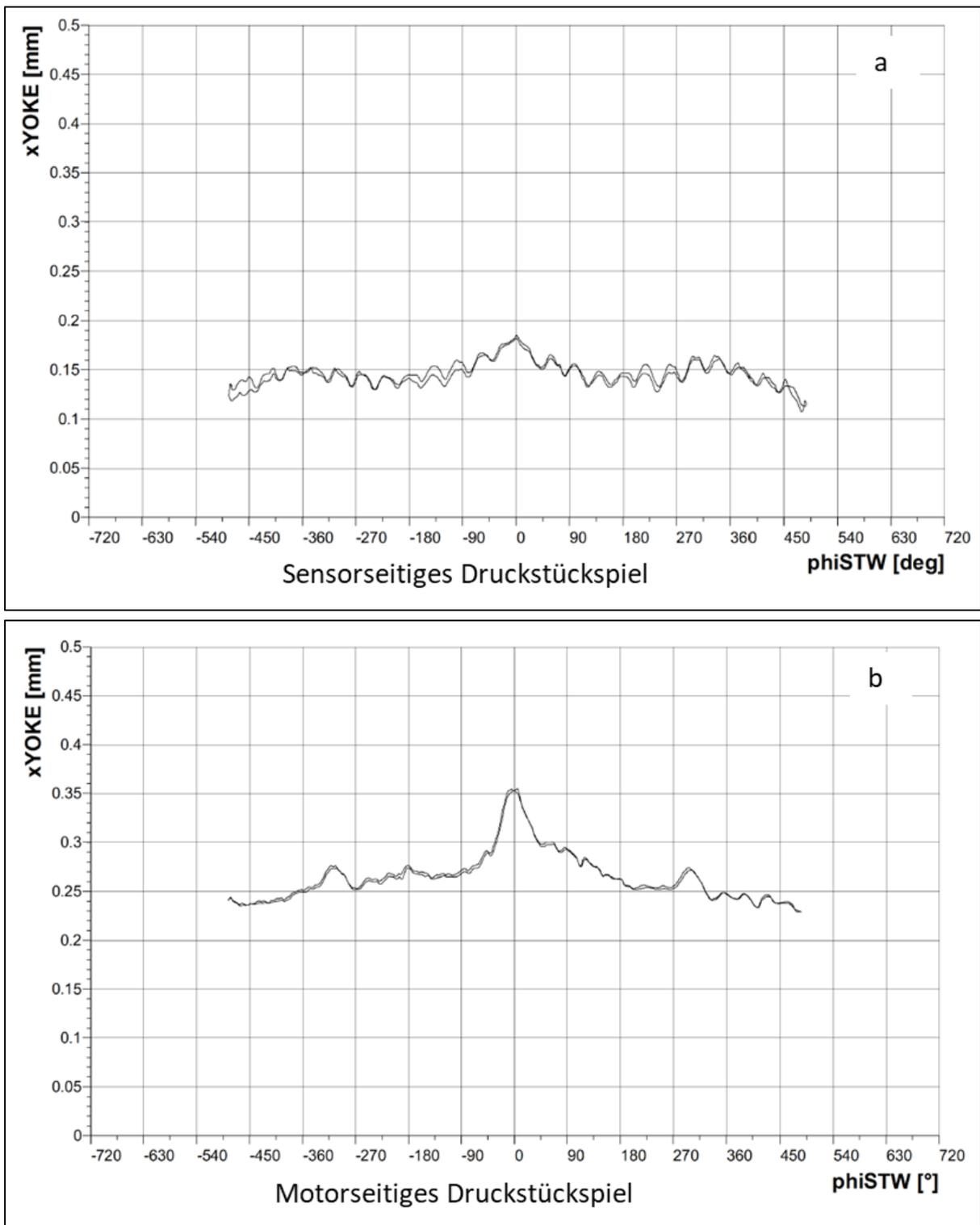


Abbildung 4-43 Druckstückspielmessung der Fahrshullenkung FS1

- a. Die sensorseitige Druckstückspielverlaufsmessung zeigt ihr maximum in der Zahnstangenmitte (0° Lenkwinkel) und lokale Maxima im Bereich von 300° Lenkwinkel
- b. Die motorseitige Druckstückspielverlaufsmessung zeigt ihr maximum ebenfalls in der Zahnstangenmitte (0° Lenkwinkel) und lokale Maxima im Bereich von 300° Lenkwinkel. Die Motorseite weist einen deutlich höheren Verschleiß aufgrund der eingebrachten Servounterstützung auf

Unterstützungscharakteristik

Die Funktionalität der FS1 wird auf der Grundlage von fünf Funktionsprüfungen verifiziert. Alle Prüfungen werden auf einem Funktionsprüfstand vorgenommen. Das Lenksystem ist dabei ohne Spurstangen und bei einer simulierten Fahrzeuggeschwindigkeit von null Kilometern pro Stunde servoseitig gegen einen Kraftaufnehmer blockiert. Bei der ersten Messung werden die Zahnstangensummenkraft (f_{RODT}) und die Stromstärke (cur_{BAT}) überprüft, Abbildung 4-44. Als Eingangssignal dient das über ein Lenkrad aufgebrachte Lenkmoment (tor_{SW}).

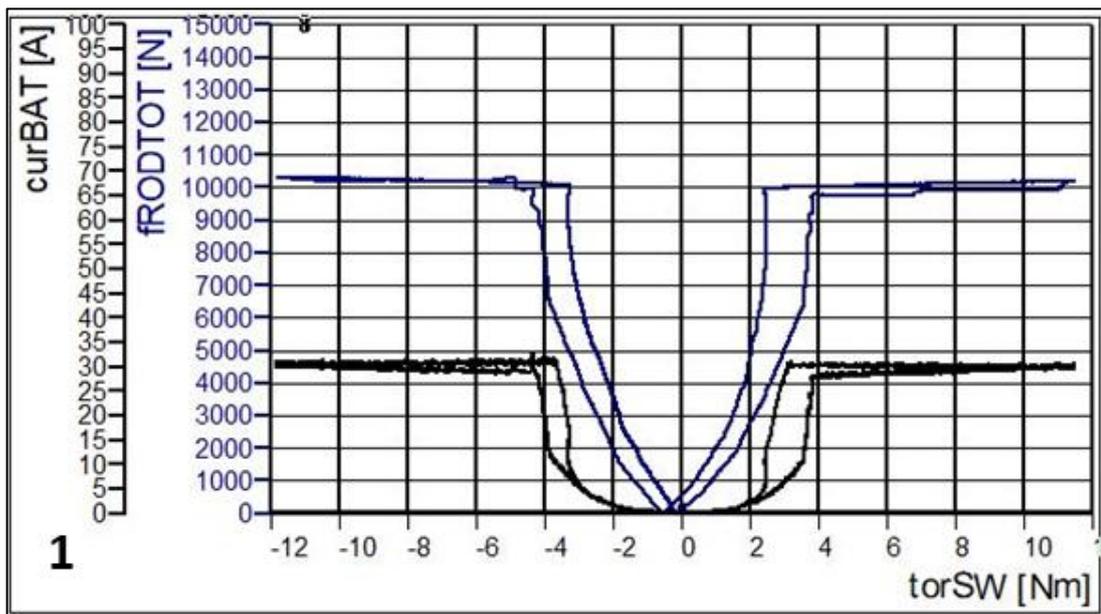


Abbildung 4-44 Zahnstangensummenkraft als Resultat des aufgebrauchten Lenkmoments am Lenkrad

Die zweite Prüfung bewertet die Linearität des Sensorsignals, Abbildung 4-45.

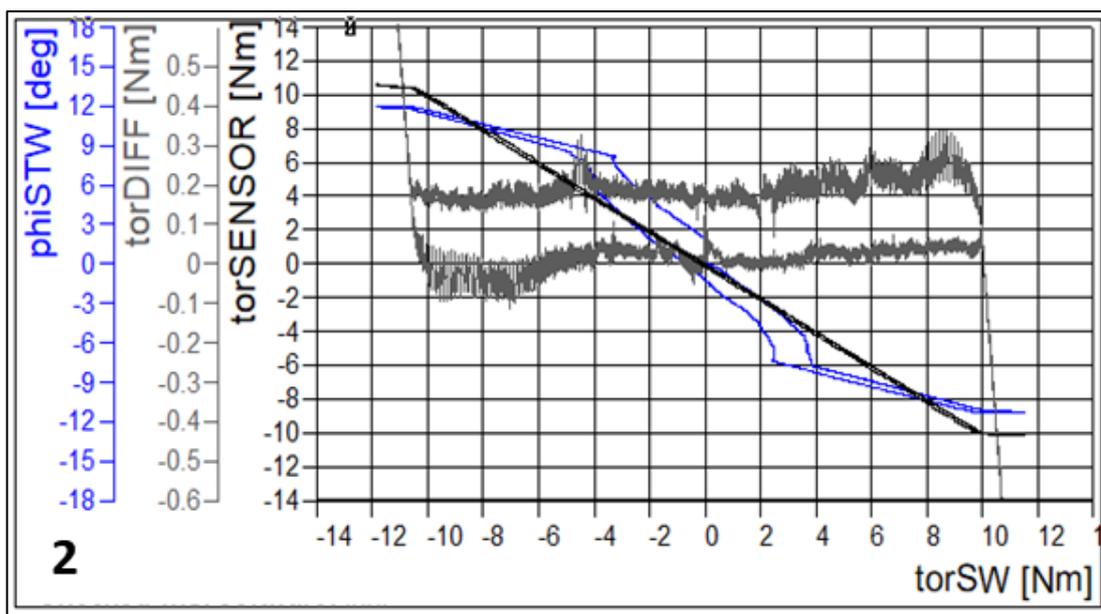


Abbildung 4-45 Linearität des Sensorsignals

Die Linearität des Sensorsignals ist aus der Differenz des Sensormoments (tor_{SENSOR}) und des Lenkmoments (tor_{SW}) beim Lenken nach links und rechts jeweils beim selben Lenkmoment zu berechnen.

Prüfung drei untersucht die Symmetrie der Eingangskennlinie ($symmetry\ tor_{SW}$), welche der Summe des Sensormomentsignals beim Lenken nach links und rechts jeweils beim betragsmäßig selben Lenkmoment entspricht, Abbildung 4-46. Ebenfalls im selben Diagramm abgebildet ist die Hysterese der Eingangskennlinie. Diese stellt die Differenz des aufsteigenden und fallenden Astes des Sensormomentsignals beim jeweils selben Lenkmoment dar.

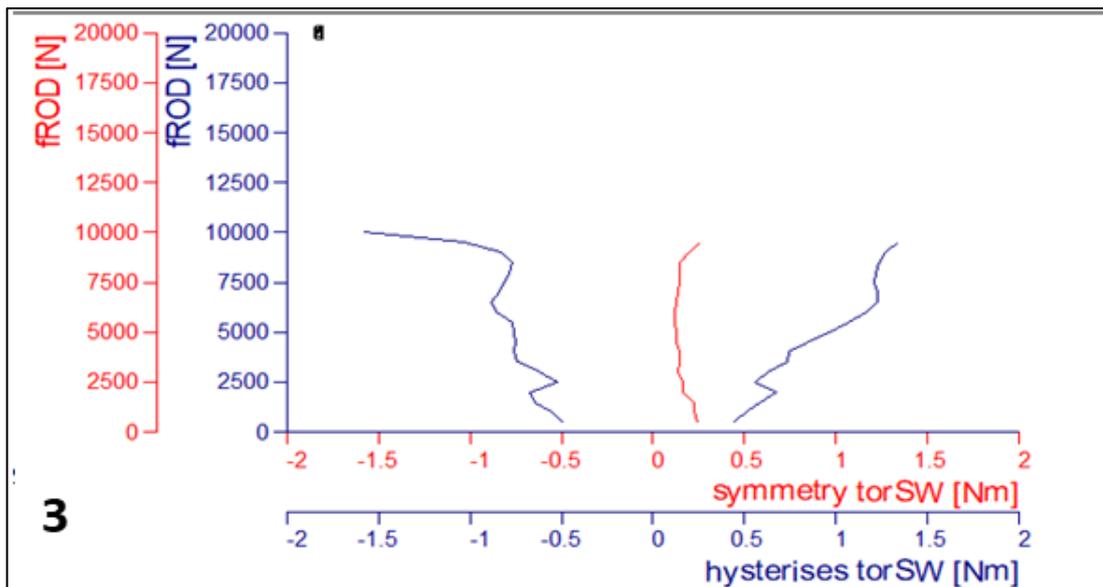


Abbildung 4-46 Symmetrie und Hysterese der Eingangskennlinie

Abbildung 4-47 veranschaulicht die Linearität der Unterstützungskennlinie und bildet die Zahnstangenkraft (f_{RODT}) als statische Funktion über dem Motorsollmoment (tor_{MOTreq}) ab.

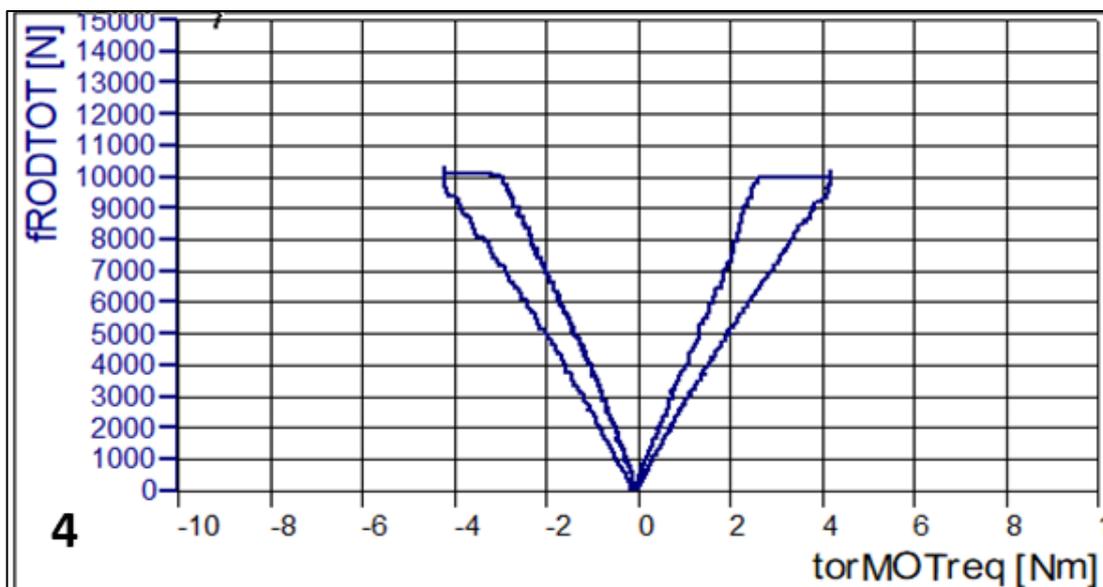


Abbildung 4-47 Linearität der Unterstützungskennlinie

Die fünfte Messung stellt die Rotorlagesteifigkeit dar, Abbildung 4-48. Diese erfolgt bei einem blockierten Lenksystem mit einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 80 Kilometern pro Stunde. Das initiierte Motormoment (tor_{MOT}) wird über den Rotorlagewinkel (phi_{WRS}) aufgetragen. Waagerechte Anteile deuten bei dieser Prüfung auf ein erhöhtes Spiel in der Servoeinheit hin.

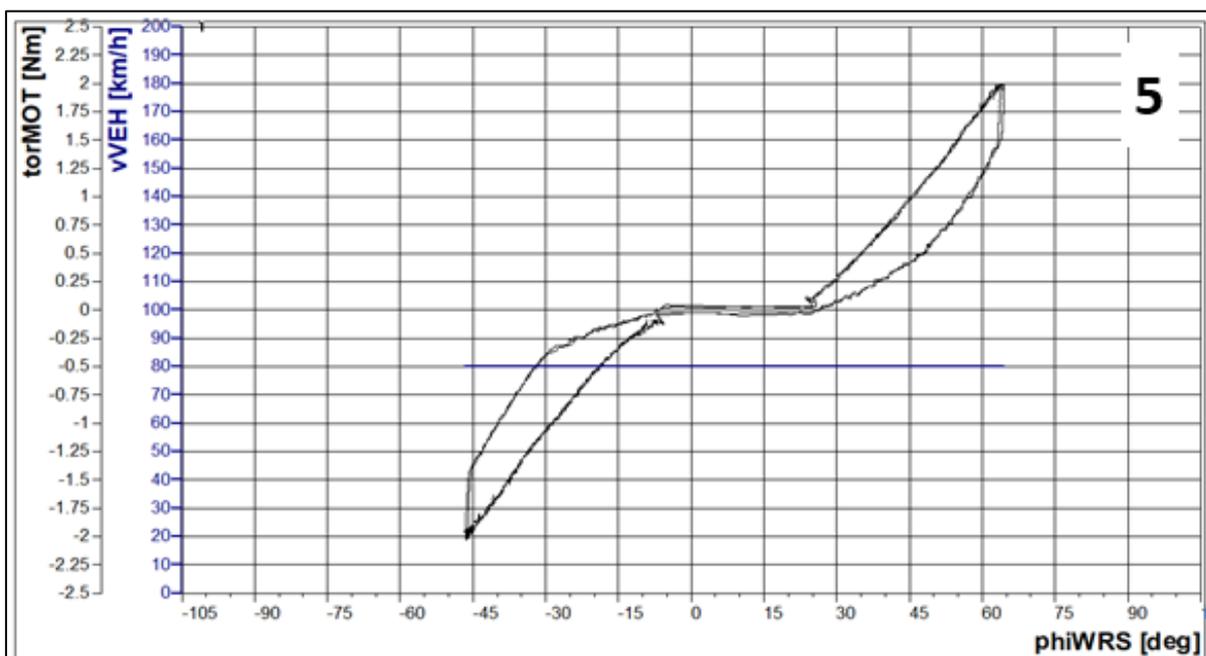


Abbildung 4-48 Rotorlagesteifigkeit

Anhand der Funktionsprüfungen lassen sich keine Anomalien oder Beeinträchtigungen des Funktionsumfangs feststellen. Das Lenksystem ist voll funktionstüchtig, weist jedoch ein erhöhtes Spiel in der Servoeinheit auf.

Akustische Bewertung

Nach der subjektiven Akustikbewertung der FS1 im Fahrzeug wird eine objektive Bewertung auf dem Prüfstand vorgenommen. Insbesondere das Umlenkklopfen und das Zahnstangenklappern sind noch einmal objektiv zu bewerten.

Abbildung 4-49 stellt die gemessenen maximalen Peaks an verschiedenen Positionen und bei verschiedenen Lenkwinkel für das Umlenkklopfen dar. Ähnlich wie bei der Subjektivbewertung zeigt die FS1 bei kleinen ($\pm 5^\circ$) und mittleren ($\pm 15^\circ$) Lenkwinkeln Auffälligkeiten. Die maximalen Beschleunigungspeaks überschreiten im Spurstangenbereich sogar den definierten Grenzwert. Damit stützt die objektive Bewertung das Ergebnis aus dem Fahrversuch. Das Klappern wird bei drei verschiedenen Laststufen untersucht, um zu ermitteln, wie sensitiv das System auf eingeleitete Kräfte reagiert, Abbildung 4-50. Im oberen Diagramm sind die eingeleiteten Zahnstangenlasten und der initiierte Lenkwinkel abzulesen.

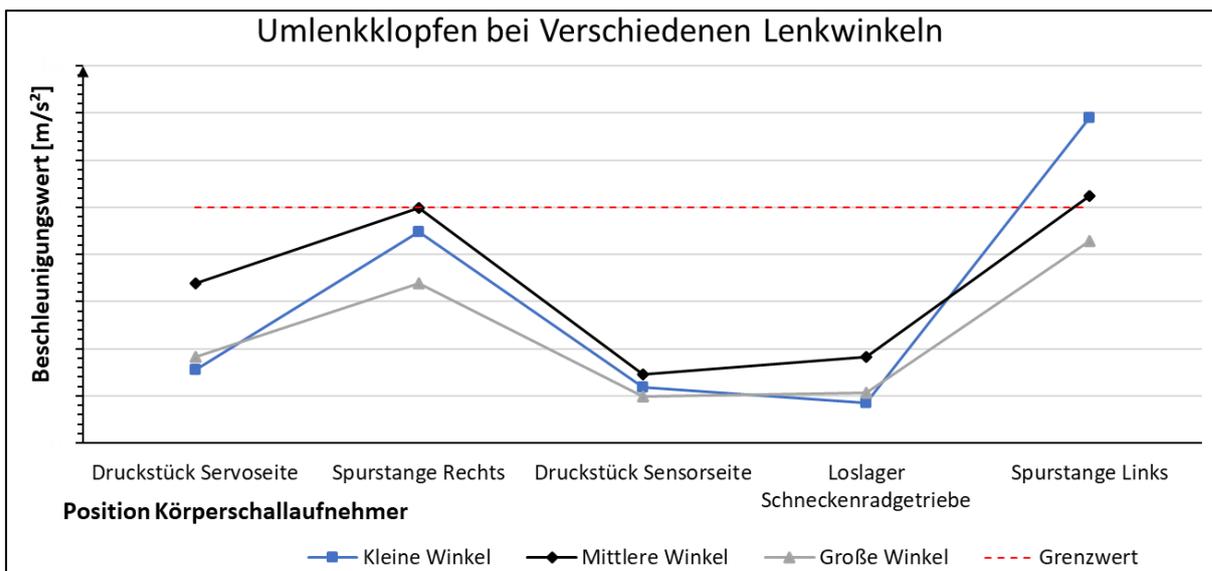


Abbildung 4-49 Bewertung des Umlenkklopfen bei verschiedenen Lenkwinkeln; Hohe Beschleunigungswerte im Bereich der rechten und linken (oberhalb des Grenzwertes) Spurstange über alle Lenkwinkelkategorien hinweg

In den ersten beiden Laststufen, der Geradeausfahrt und der Geradeausfahrt mit leichtem Lenken, ist das Lenksystem jeweils durch ein ähnliches Verhalten gekennzeichnet und reagiert vergleichbar. In der dritten Laststufe zeigt insbesondere die Loslagerposition des Schneckenradgetriebes hohe Beschleunigungswerte. Dies lässt auf eine unzureichende Anfederkraft und ein erhöhtes Spiel innerhalb des Schneckenradgetriebes schließen. Vereinzelt sind auch hohe Peaks an der servoseitigen Druckstückposition messbar. Dies ist auf das bereits aufgezeigte und erhöhte Druckstückspiel zurückzuführen

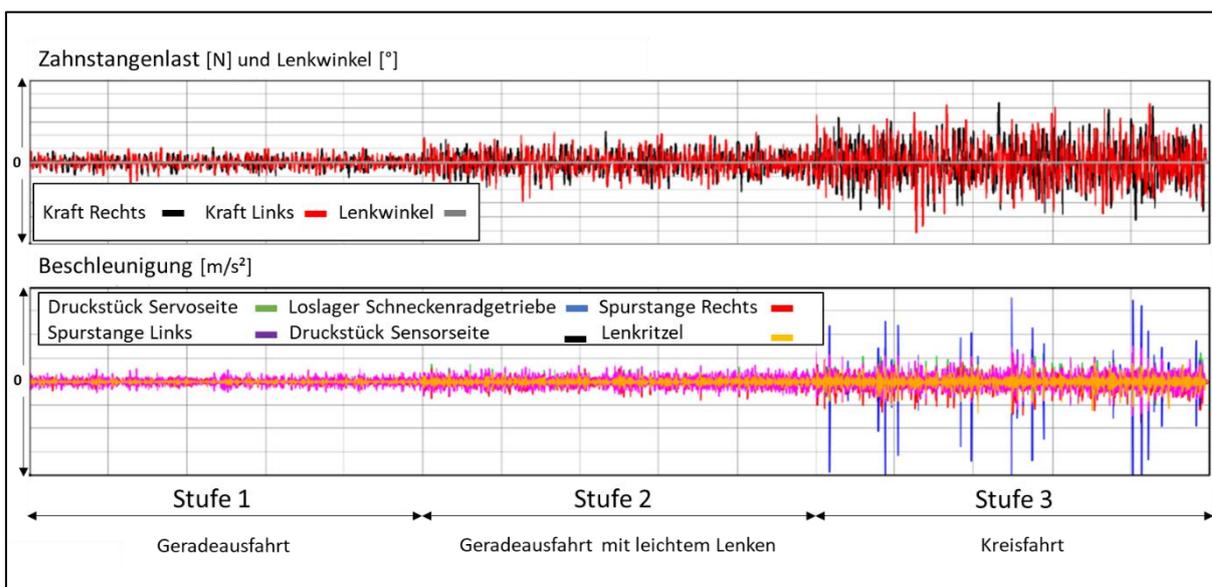


Abbildung 4-50 Bewertung des Klapperns bei verschiedenen Laststufen; Auffälligkeiten bei hohen Lenkwinkeln und hohen Kräften im Bereich der rechten Spurstange, des servoseitigen Druckstücks und der Loslagerposition des Getriebes

4.5.1.3 Zusammenfassung der Ergebnisse auf der Systemebene

Das Lenksystem zeigt nach einem Feldeinsatz im Fahrschulbetrieb von 355.000 Kilometern und 9.946 Stunden deutliche akustische Auffälligkeiten. Diese würden mit einer hohen Wahrscheinlichkeit auch von einem Durchschnittsfahrer als störend empfunden werden. Eine akzeptable Performance unter Anwendung derselben Anforderungen, wie sie an ein Neuteil gestellt werden, ist daher aus akustischer Sicht nicht gegeben. Insbesondere das Reduktionsgetriebe weist unter Last hohe Körperschallpeaks auf. Die Haptik schneidet deutlich besser ab und würde auch bei einem Neuteil zu keinem reklamationwürdigen Gewährleistungsfall führen. Die Funktionsprüfungen haben darüber hinaus die volle Einsatzfähigkeit des Lenksystems nachgewiesen. In diesem Zusammenhang fallen ein erhöhtes Spiel des servoseitigen Druckstücks und ein Spiel im Schneckenradgetriebe auf. Insgesamt stützen die Schädigungsbilder der Objektivbewertung die subjektive Bewertung im Fahrzeug. Berücksichtigt man die Tatsache, dass die FS1 auf der Basis der definierten Pseudoschädigungsparameter zu den 5% am höchsten beanspruchten Lenksystemen zählt, ist ein anderer Bewertungsmaßstab anzusetzen. Vor diesem Hintergrund erzielt das System eine gute Performance. Auch die akustische Bewertung im Fahrzeug ist dann mit anderen Maßstäben zu betrachten, wenn das potenzielle Fahrzeugalter und die Vorbelastung im Fahrzeugverbund berücksichtigt werden. Für die Aufarbeitung bedeutet dies, dass Verschleißerscheinungen auf der Systemebene untersucht werden und in die Wiederverwendungsbewertung einfließen müssen.

4.5.2 Detailanalyse mechanischer und elektronischer Komponenten

Im Folgenden sind die Ergebnisse der komponentenbasierten Detailanalyse aufgeführt. Neben den Fahrschulensystemen werden in diesem Abschnitt sowohl die Feldsysteme mit geringer Vorschädigung als auch die Ergebnisse aus der Erprobung untersucht. Die Pseudoschädigungsbilder dienen in diesem Zusammenhang als Grundlage für die Einordnung der Vorbeanspruchung.

4.5.2.1 Getriebeispiel

Das Getriebeispiel stellt ein Maß für den mechanischen Verschleiß des Schraubradgetriebes der EPSdp dar. Im Fokus steht dabei die sich im Eingriff befindende Bauteilpaarung von Schnecke und Schneckenrad. Abbildung 4-51 veranschaulicht das Vorgehen zur Messung des Getriebeispiels. Das Getriebeispiel wird an verschiedenen Positionen des Schneckenrades gemessen.

Dabei müssen die Positionen berücksichtigt werden, an denen das Leerdrehmoment (LDDM) ein Minimum aufweist. Das LDDM stellt das Drehmoment dar, welches benötigt wird, um den Verbund aus Motor und Getriebe zu drehen. Die Unterstützungseinheit ist für die Durchführung der Messung von dem Lenksystem zu separieren und in eine Vorrichtung einzuspannen. Das Ritzel wird mit einer Winkelgeschwindigkeit von $90^\circ/\text{s}$ gedreht und das benötigte Drehmoment wird über den Rollwinkel des Schneckenrades erfasst. Dieses Vorgehen ermöglicht eine Zuordnung der Messergebnisse zu verschiedenen Schraubrad- Schnecke Kombinationen. Eine Reduzierung des LDDM und damit der Getriebereibung über den zeitlichen Verlauf der Feldbenutzung hinweg, resultiert aus Verschleiß- und Setzerscheinungen [89].

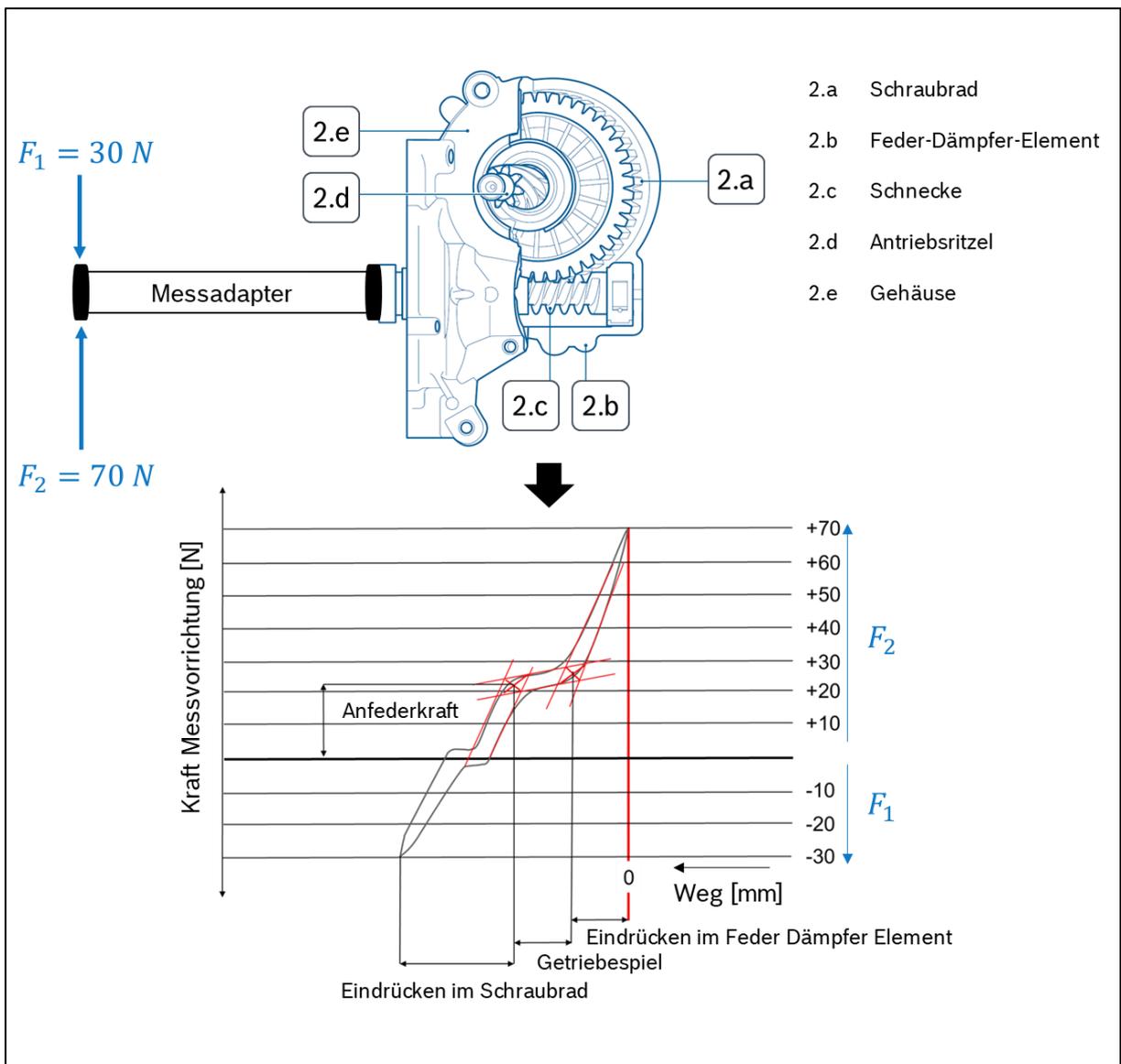


Abbildung 4-51 Messen des Getriebespiels aus der Getriebesteifigkeitscharakteristik; Das Getriebespiel wird über das Eindrücken der Schnecke in das Schraubrad und das anschließende Eindrücken in das Feder Dämpfer Element ermittelt

Im Anschluss an die LDDM Messung werden die relevanten Positionen markiert und ein Messadapter im Bereich des Festlagers in die Schnecke eingeschraubt. Der Messadapter entspricht dabei exakt einer Schneckenlänge. Das sorgt dafür, dass durch die am freien Ende des Messadapters wirkende Kraft der Drehpunkt des Hebels in das Schwenklager verschoben wird. Mit dem Einleiten einer Radialkraft F_1 erfolgt das Eindrücken der Schnecke in das Schneckenrad. Anschließend wird in entgegengesetzter Krafrichtung eine Kraft F_2 aufgebracht, welche die Schnecke aus dem Schneckenrad heraushebelt und gegen das Feder- Dämpfer Element drückt. Die dafür notwendige Kraft wird als Anfederkraft bezeichnet. Der zurückgelegte Weg nach dem Ausheben bis zum Eindrücken in das Feder- Dämpfer- Element wird als das Getriebespiel charakterisiert.

Hohe Getriebespielwerte führen oft zu akustischen Auffälligkeiten im Fahrbetrieb. Dies kann innerhalb der gesetzlichen Gewährleistungsfrist einen Regressanspruch zur Folge haben. Aus diesem Grund sind zu hohe Getriebespielwerte innerhalb des Gewährleistungszeitraumes aufgearbeiteter Systeme zu vermeiden und es ist erforderlich, entsprechende Wiederverwendungsgrenzen zu setzen. Abbildung 4-52 veranschaulicht die Spielzunahme und die Abnahme der Anfederkraft über den Verlauf der Getriebebenutzung.

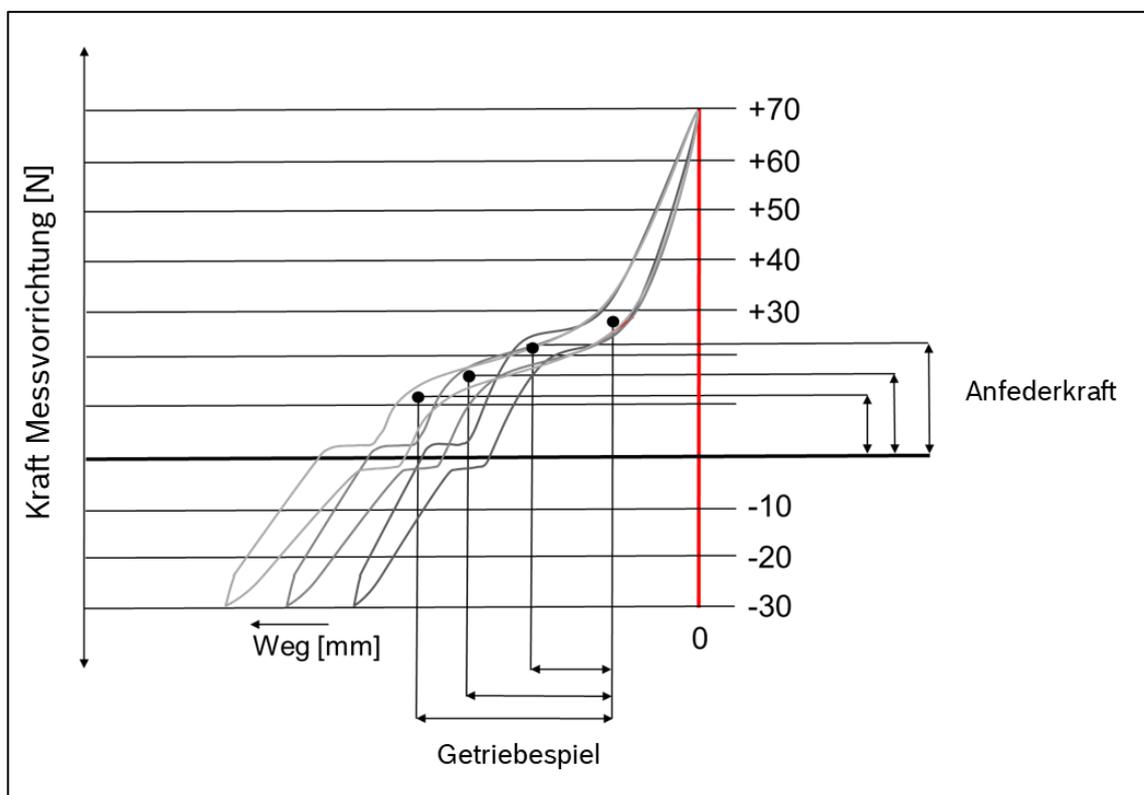


Abbildung 4-52 Getriebespielzunahme eines Schneckenradgetriebes; Im Feldbetrieb erfährt das Getriebespiel mit fortwährender Nutzung eine Zunahme. Zum einen kann die Schnecke weiter ins Schraubrad gedrückt werden und zum anderen ist eine sukzessive Reduktion der Anfederkraft zu beobachten

Wie dargestellt, ist eine Veränderung der Steifigkeitscharakteristik in Richtung einer geringeren Steigung und einer Zunahme des Weges mit zunehmender Feldnutzung zu erwarten. Eine Ursache für die Getriebespielzunahme ist das Setzen an den Zahnflanken. Mittels Kugelmaßmessungen kann die Differenz, vor und nach der Nutzung als sogenannter Setzbetrag abgeleitet werden. Abbildung 4-53 visualisiert die Regression von Setzbetrag und Getriebespiel.

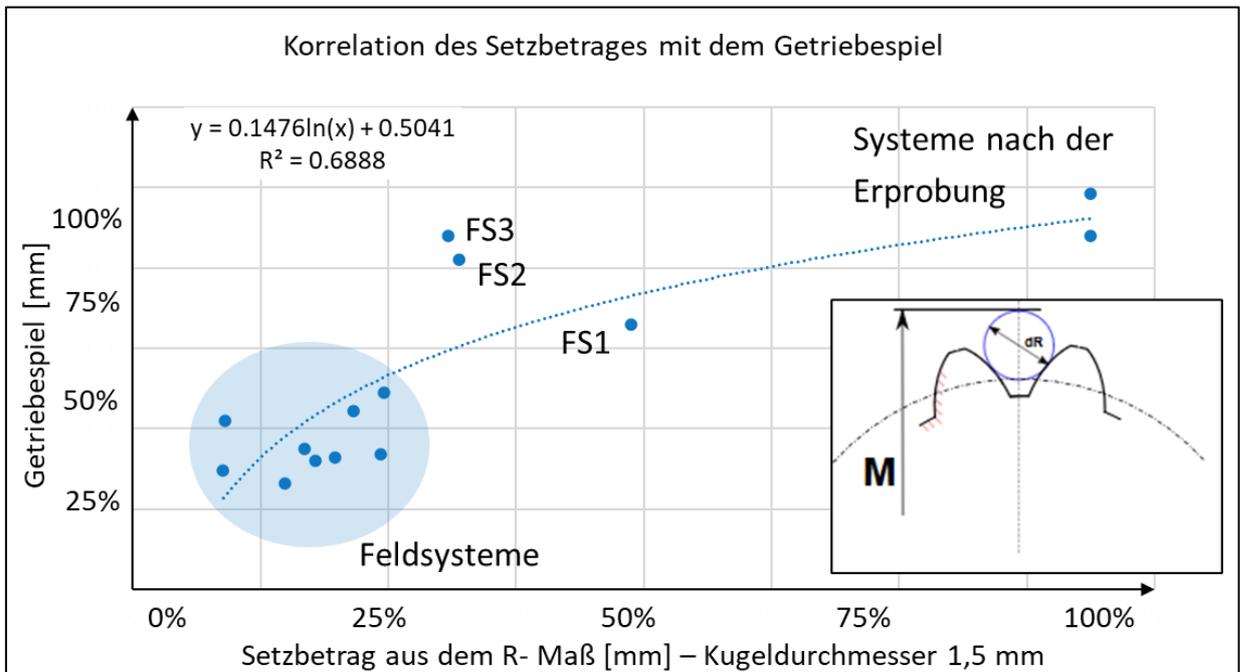


Abbildung 4-53 Regression von Setzbetrag und Getriebespiel; Die Fahrschulsysteme weisen bei ähnlichen Getriebespielwerten einen um 50% geringeren Setzbetrag auf als die Systeme nach der Erprobung. Die Systeme nach der Erprobung stellen für die Relation die 100% des Getriebespiels und des Setzbetrages dar (Eigene Darstellung unter Verwendung von [93])

In der Abbildung sind die beiden Getriebe der Fahrschullenkungen FS1 und FS2 sowie das Getriebe einer dritten Fahrschullenkung FS3 dargestellt. Die FS3 hat eine Laufleistung von 156.000 Kilometer und eine Betriebszeit von über 5.000 Stunden im Feld erreicht. Ebenfalls in der Darstellung sind weitere Feldsysteme mit geringer Vorbeanspruchung und das Ergebnis von zwei Systemen nach der Erprobung enthalten. Es ist festzuhalten, dass Systeme mit einer hohen Vorbeanspruchung auch ein hohes Spiel und einen hohen Setzbetrag aufweisen. Das Getriebespiel der FS2 und der FS3 fällt höher aus als das der FS1. Beide Getriebespiele liegen auf einem Niveau mit den Systemen nach der Erprobung. Die FS1 weist hingegen einen höheren Setzbetrag auf als die beiden anderen Fahrschullenkungen. Das Getriebespiel nimmt zu Beginn der Getriebebenutzung aufgrund des Einlaufverhaltens der Stahl (Schnecke) – Kunststoff (Schneckenrad) Paarung in relativ starkem Maß zu. Die Spielzunahme flacht über den weiteren Verlauf der Feldnutzung ab. Dies wird auch durch den Verlauf der Regressionskurve beschrieben, welche einen logarithmischen Zusammenhang zwischen Spiel und Setzbetrag aufzeigt.

Aus den vorherigen Kapiteln ist bekannt, dass die Fahrerschulenkungen FS1 und FS2 hochbeanspruchte Systeme repräsentieren. Ebenfalls bekannt ist, dass die Getriebebeanspruchung während der Erprobung um ein Vielfaches höher liegt, als die Feldsituation zeigt. Aus der Darstellung jedoch geht keine Zunahme des Getriebespiels im gleichen Maße, wie der Setzbetrag für die Erprobungslenkungen eine Zunahme aufweist, hervor. Dieses Faktum kann durch die Mehrzahl der sich im Eingriff befindenden Zähne erklärt werden. Die Schnecke kann nicht unbegrenzt in das Schraubrad gedrückt werden und der Weg bis zum Eindringen in das Feder-Dämpfer- Element somit nicht alle Facetten des Verschleißverhaltens abbilden. Relevant ist in diesem Zusammenhang das Zurückfallen der Schnecke in das Schraubrad. Ab einem Wert von GS_w führt dies mit erhöhter Wahrscheinlichkeit zu einer Reklamation aufgrund akustischer Auffälligkeiten. Eine Prognose des Getriebespiels ist deshalb unerlässlich, um die Gewährleistungsperiode in der Nutzungsphase II gegen das Fehlerbild Akustik abzusichern. Pech [94] untersucht in seiner Dissertation das Tragfähigkeitsverhalten und die Zahnverformung von Schraubradgetrieben der Werkstoffpaarung Stahl/ Kunststoff. Er verweist insbesondere auf die Temperaturabhängigkeit des Elastizitätsmoduls und der Querkontraktionszahlen. Pech verwendet zudem eine Näherungsgleichung zur Abschätzung der mittleren Flankenpressung $\sigma_{HmG}(\vartheta)$, in Anlehnung an [95]:

$$\sigma_{HmG}(\vartheta) = \frac{4}{\pi} * \sqrt{\frac{P_m^* * M_{SRcrit} * 1000 * E_{red}(\vartheta)}{a^3}} \quad (4.47)$$

$\sigma_{HmG}(\vartheta)$	Mittlere Flankenpressung für Globoidräder [N/mm ²]
P_m^*	Kennwert für die Mittlere Hertzsche Pressung [-]
M_{SRcrit}	Für das Schneckenrad kritische Abtriebsdrehmomente [Nm]
$E_{red}(\vartheta)$	Reduziertes E-Modul [N/mm ²]
a	Achsabstand [mm]

Der Kennwert für die mittlere Hertzsche Pressung P_m^* wird aus den getriebespezifischen Verzahnungsparametern berechnet.

$$P_m^* = Z_{pG} * \left[1,8986 + 2,488 * 10^{-4} * \left(\frac{u+1}{u} \right)^{5,2627} * ((0,012 * z_2 - 1) * z_2 - 47,1025) * (b_{2eff}^{0,0042} + 0,1056) * ((0,4509 * x_2 - 1) * x_2 - 2,0149) * (1,0187^{\alpha_n} + 0,1289) * \left(\frac{(\tan \beta_{s2})^{1,3228} + 0,7153}{(\tan \beta_{s2} + 4,7185)^{0,4733}} - 0,6943 * \tan \beta_{s2} \right) * ((0,0975 * (q - 1) * q - 52,2534) \right] \quad (4.48)$$

Z_{pG}	Geometriefaktor in Abhängigkeit der Makrogeometrie [-]
u	Zähnezahlverhältnis [-]

z_2	Zähnezahl des Rades [-]
$b_{2eff}(\vartheta)$	Effektive Radzahnbreite [mm]
x_2	Profilverschiebungsfaktor des Rades [-]
α_n	Eingriffswinkel im Normalschnitt [°]
β_{s2}	Schrägungswinkel des Rades [°]
q	Formzahl der Schnecke

Für den Geometriefaktor der Makrogeometrie Z_{pG} wird ein vollständig eingelaufenes Schneckenrad angenommen

$$Z_{pG} = 1,28. \quad (4. 49)$$

Das Ersatz E-Modul bei der Temperatur ϑ wird aus dem E – Modul für den Schneckenwerkstoff Stahl E_1 sowie aus dem E – Modul E_2 für den Schneckenradwerkstoff PA66 und die jeweiligen Querkontraktionszahlen ν_1 und ν_2 berechnet.

$$E_{red}(\vartheta) = \frac{2}{\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2(\vartheta)^2}{E_2(\vartheta)}} \quad (4. 50)$$

Die temperaturabhängige Querkontraktionszahl ist nach dem Ansatz von Gienke und Meder zu berechnen [96]

$$\nu = 0,3 + 0,2 * \left(\frac{1-E(\vartheta)}{E_0} \right). \quad (4. 51)$$

Aus den materialspezifischen Eigenschaften werden die temperaturabhängige Zugfestigkeit R_m [97] und das temperaturabhängige E- Modul [98] des konditionierten Werkstoffes PA66 mit einer Wasseraufnahme von 2,5 %, gewählt. Durch Umstellen von (4. 47) wird das kritische Abtriebsdrehmoment in Abhängigkeit von der Werkstofftemperatur bestimmt. Mit der in (4. 19) dargestellten Beziehung kann die Temperatur am Schneckenrad je Temperaturklasse bestimmt werden. Die Temperaturklassen entsprechen der in Kapitel 4.2.2.2 vorgestellten Klassierung. Das Moment am Schneckenrad ist aus den Levelcrossings der Lenkwinkel und der Beziehung zu dem Unterstützungsmoment (4. 18) herzuleiten. Als kritische Lastwechsel werden solche bezeichnet, deren Momente oberhalb des kritischen Abtriebsdrehmomentes liegen. Mit der relativen Temperaturverweildauer (4. 23) sind die zu den Temperaturklassen korrespondierenden kritischen Lastwechsel zu gewichten und in Bezug auf das Erprobungskollektiv zu normieren.

$$L_{crit}^{rel}(x_{ij}) = \frac{\sum L_{crit}^{T_i}(x_{ij}) * t_{rel.T_i}(x_{ij})}{\sum L_{crit}^{T_i}(b_v) * t_{rel.T_i}(b_v)} \quad (4.52)$$

Abbildung 4-54 veranschaulicht die Regression der berechneten kritischen Lastwechsel L_{crit}^{rel} mit dem Getriebeispiel.

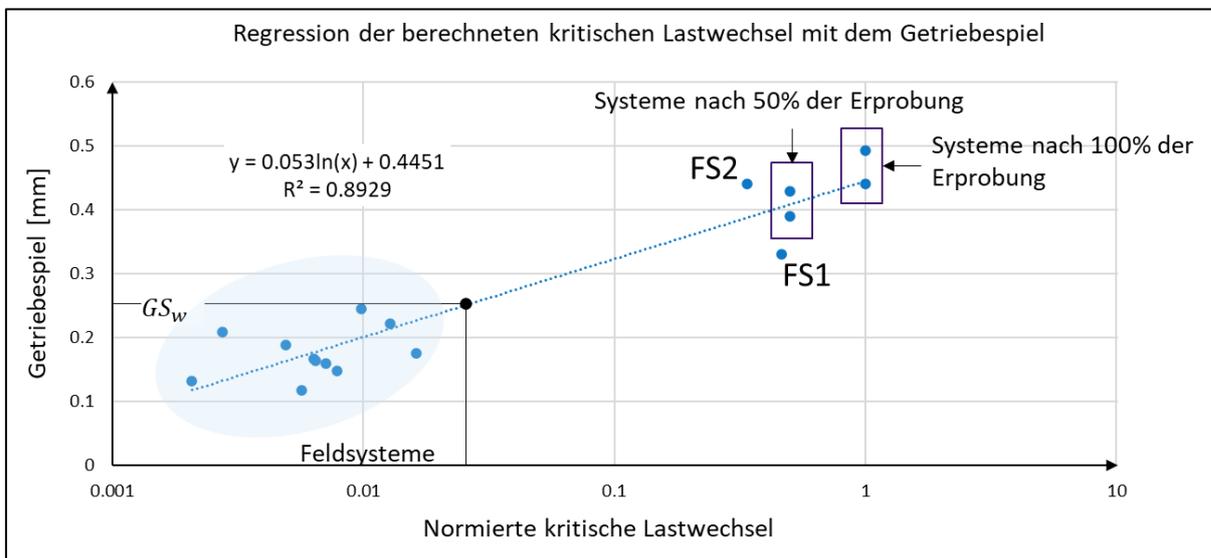


Abbildung 4-54 Regression zwischen den berechneten kritischen Lastwechseln und dem Getriebeispiel; Die Fahrschullensysteme weisen ein ähnliches Getriebeispiel wie die Systeme nach 50% der Erprobung auf, jedoch bereits bei einer geringeren Anzahl kritischer Lastwechsel

Für die Regression zwischen Getriebeispiel und den kritischen Lastwechseln resultiert eine logarithmische Charakteristik. Es ist erkennbar, dass insbesondere im Bereich zwischen den Fahrschullensystemen und den Erprobungsdaten weitere Felddaten für eine Verbesserung der Anpassungsgüte unabdingbar sind. Die Verwendung der Fahrschullenkungen und der Erprobungsergebnisse stellt in diesem Zusammenhang jedoch eine konservative Abschätzung für das weitere Vorgehen dar.

4.5.2.2 Druckstückspiel

Das Druckstückspiel (DS) ist sowohl in der Produktion von neuen Lenkaggregaten als auch in der Aufarbeitung ein wichtiger Einstellparameter. In der Neuteilproduktion erfolgt das Einstellen über das Öffnen und Schließen einer Stellschraube. Es soll ein möglichst geringes axiales und radiales Spiel erzielt und gewährleistet werden, um akustischen Auffälligkeiten vorzubeugen, gleichzeitig soll aber auch ein Mindestspiel vorhanden sein, um einer zu hohen Reibung oder einem Klemmen entgegenzuwirken [7] [99]. In der Aufarbeitung dient das DS zunächst zur Bestimmung des mechanischen Verschleißes von Zahnstange und Ritzel. Aus dem

mechanischen Verschleiß können darüber hinaus auch Rückschlüsse auf die im Feld erfahrene Beanspruchungsintensität gezogen werden. Abbildung 4-55 vermittelt einen Überblick über den Aufbau und die Messmethode zur Bestimmung des Druckstückspiels.

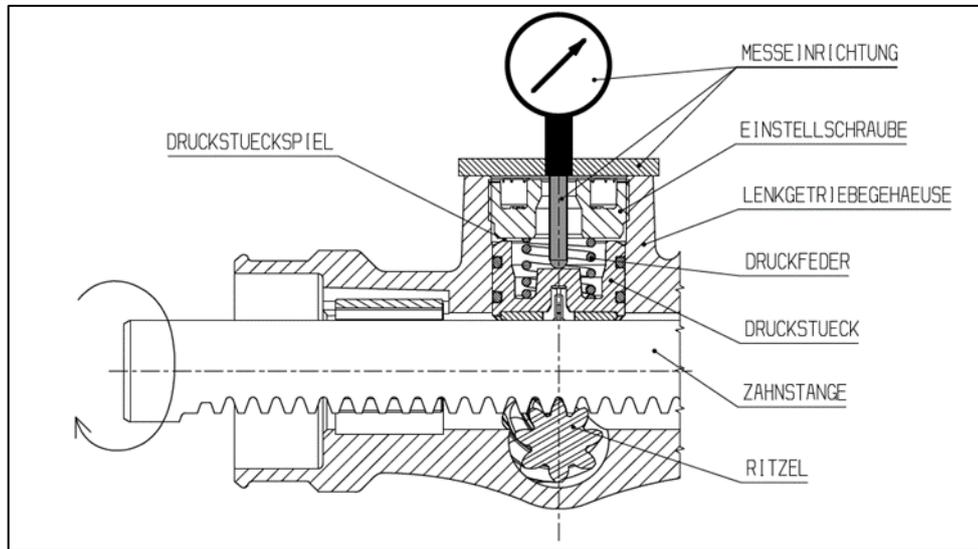


Abbildung 4-55 Messung des Druckstückspiels durch Aufbringen eines Auslenkmomentes [7]

Durch eine Bohrung in der Stellschraube wird die Bewegung des Druckstücks in Relation zur Stellschraube gemessen. In der Regel wird zwischen verschiedenen Messbereichen über den Lenkungshub differenziert. In der Analyse gebrauchter Lenksysteme wird eine Messung im Bereich von -90° bis $+90^\circ$ vorgenommen, mindestens aber an drei Punkten (-90° , 0° , $+90^\circ$), bezogen auf den Lenkwinkel. Die Zahnstange wird durch ein Moment (oder eine Kraft), aufgebracht am jeweiligen Ende der Zahnstange, ausgelenkt. Das Auslenken hat ein Eindringen des Druckstücks in Richtung der Stellschraube zur Folge. Nach dem Auslenken fällt das Druckstück zurück in seine Ausgangsposition und die gemessene Relativbewegung entspricht dem Wert des Druckstückspiels [7].

Ein Lenksystem erfährt im Rahmen seines Nutzungszeitraumes eine Zunahme des Druckstückspiels. Die Spielzunahme hängt direkt von der Nutzung und Beanspruchung des Systems ab. Insbesondere im Bereich der Zahnstangenmittelposition ergeben sich hohe Spieldifferenzen über den gesamten Lenkungshub. Abbildung 4-56 präsentiert die Druckstückspielverlaufsmessungen der FS1 und eines vergleichbaren Lenksystems derselben Plattform vor (1) und nach (2) dem Erprobungskollektiv. Die Fahrerschullenkung weist ein vergleichsweise hohes Druckstückspiel auf. Es ist zudem ein regelrechter Graben (3) im Bereich von -90° bis $+90^\circ$ zu erkennen. Ebenfalls zu beachten sind die kleineren Gräben (3.a) im äußeren Lenkwinkelbereich. Diese resultieren aus dem Ritzelverschleiß in der Mittenposition. Das Lenksystem aus der Erprobung zeigt ein deutlich geringeres Druckstückspiel als die FS1. Der Verlauf wirkt zudem

gleichmäßiger über den gesamten Zahnstangenhub hinweg und es sind keine hohen Spieldifferenzen zu erkennen.

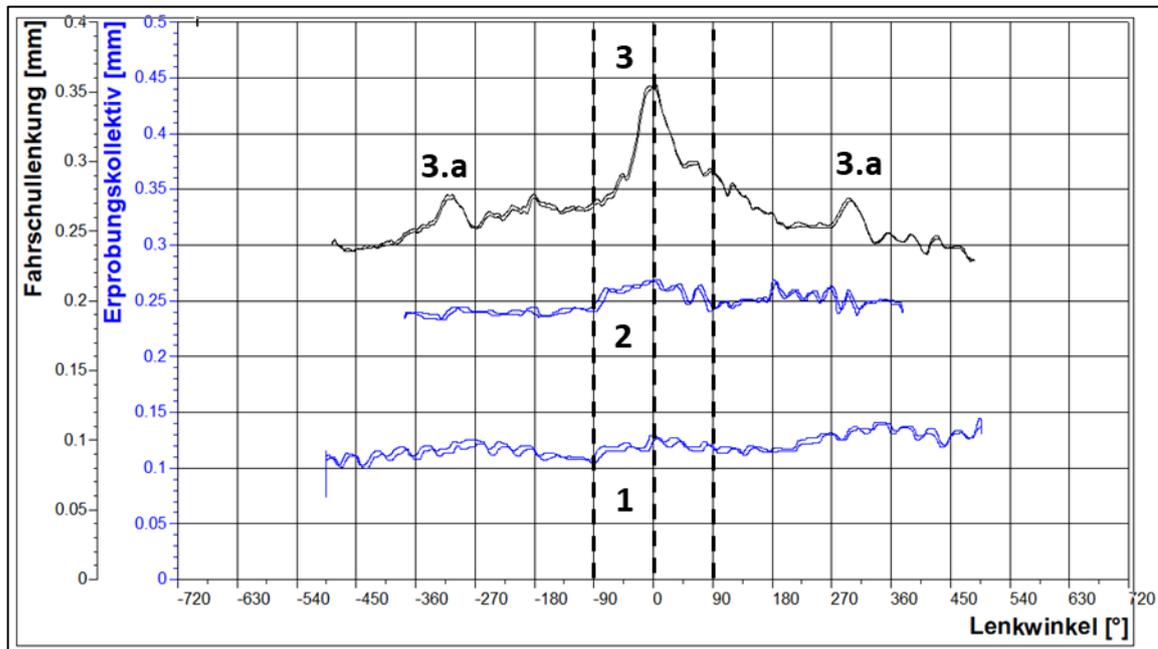


Abbildung 4-56 Vergleich der Druckstückspielverlaufsmessung von einer Fahrschullenkung und einem Lenksystem nach der Dauerläuferprobung; Das Druckstückspiel weist bei der Fahrschullenkung (schwarze Linie) deutlich höhere Maximalwerte auf als bei den erprobten Systemen (blaue Linie)

Für die Wiederverwendung der Zahnstangen und Ritzel resultieren zwei Grundanforderungen:

- Die Paarung von Ritzel und Zahnstange muss im Rahmen der geforderten Druckstückspieltoleranzen einstellbar sein.
- Ein maximal zulässiger Verzahnungsverleiß ist unter der Berücksichtigung der Restlebensdauernanforderungen zu definieren.

Das maximale Spiel $D_{S_{max}}$ dient als Grenzwert für den zulässigen Verzahnungsverleiß. Der Differenzwert $D_{S_{diff}}$ beschreibt den Grenzwert für die Differenz zwischen der minimalen und maximalen Relativbewegung innerhalb eines Lenkwinkelbereiches. Auf diesem Weg kann ein Einstellen im Montageprozess trotz Vorverschleiß sichergestellt werden.

$$D_S(x_{jn}) \leq D_{S_{max}}(x_j) \quad (4.53)$$

$$[\max(D_S(x_{jn})) - \min(D_S(x_{jn}))] \leq D_{S_{diff}}(x_j) \quad (4.54)$$

Zur Verknüpfung der sFDE mit dem Druckstückspiel wird der Damage Counter vorgeschlagen, da dieser auch Lenkbewegungen ohne motorische Unterstützung und kleinere Lastintensitäten

berücksichtigt. Abbildung 4-57 visualisiert die Regression des Damage Counters mit dem maximalen servoseitigen Druckstückspiel.

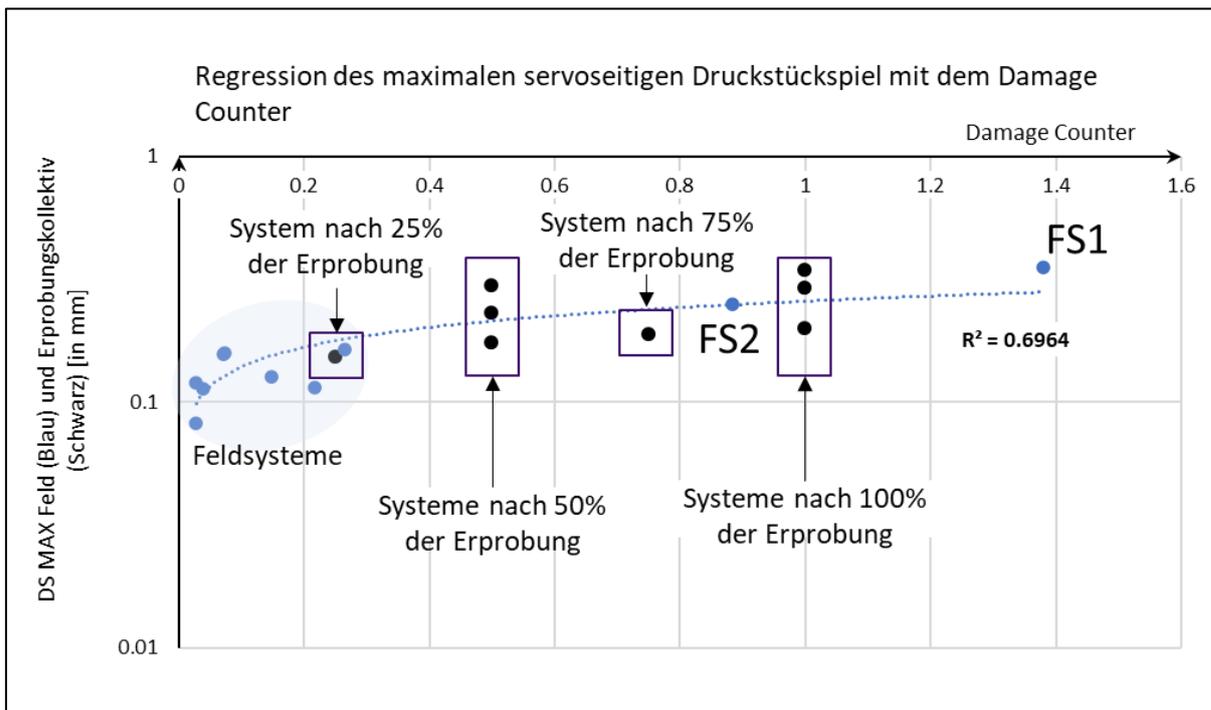


Abbildung 4-57 Regression zwischen Damage Counter und Druckstückspiel; Zunahme des maximalen Druckstückspiels mit zunehmendem Damage Counter. Streuung der Dauerlaufergebnisse deutet auf einen Einfluss der Einstelltoleranz hin

Die Regression bildet eine logarithmische Zunahme des Druckstückspiels mit zunehmendem Damage Counter ab. Die Fahrschulenkungen zeigen ein ähnliches, wenn auch leicht höheres maximales Druckstückspiel als die Lenksysteme nach der Erprobung. Ebenfalls aus der Darstellung geht die Streuung des DS bei den Erprobungsdaten hervor. Diese Streuung basiert unter anderem auf der fehlenden Berücksichtigung der Einstelltoleranz aus der Montage. Für eine bessere Regression von Druckstückspiel und Damage Counter ist anstatt des maximalen DS die DS Zunahme $\Delta D_{S_{max}}$ zu verwenden, Abbildung 4-58. Die Druckstückspielzunahme ist über die Differenz des Druckstückspiels nach dem Einstellen in der Montage und nach dem Feldeinsatz zu berechnen. Für die Berechnung von $\Delta D_{S_{max}}$ wurde das Druckstückspiel im Komfortbereich ($-90^\circ - +90^\circ$) herangezogen. Unter Verwendung der Einstelltoleranzen kann zudem ein Bereich für das erwartbare Druckstückspiel aufgespannt werden, Tabelle 4-4. Voraussetzung dafür ist die Annahme vernachlässigbarer Unterschiede bei der Druckstückspielzunahme unterschiedlich voreingestellter Spiele. Je nach Restlebensduranforderungen ist der Grenzwert des DS für die Aufarbeitung zu setzen. Die dargestellte Regression der DS Zunahme mit dem Damage Counter ist analog zu dem maximalen DS durch einen logarithmischen Verlauf gekennzeichnet.

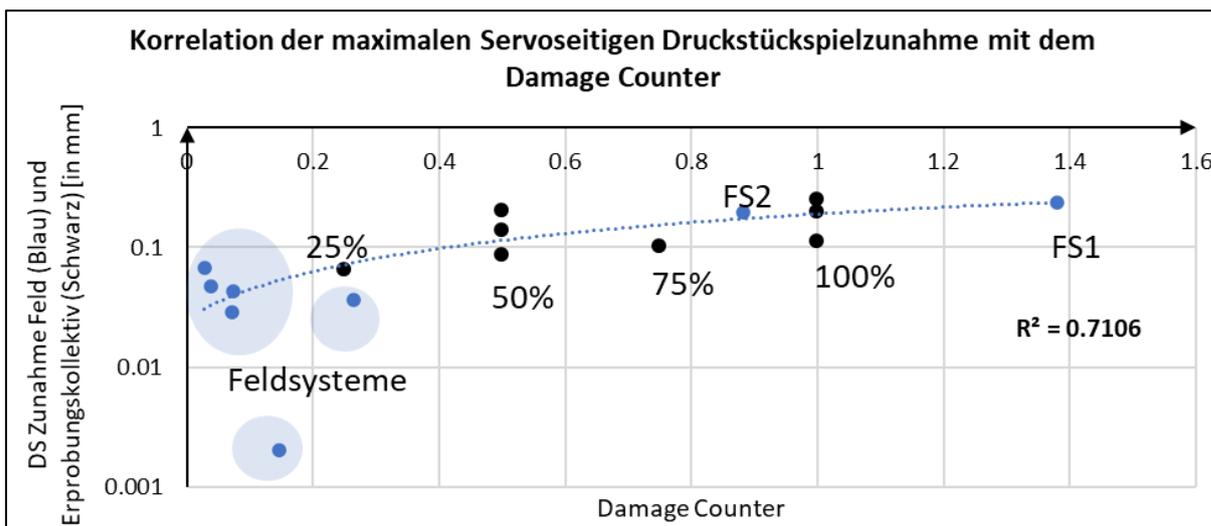


Abbildung 4-58 Regression des Damage Counter und der Druckstückspielzunahme

Einstellwerte	Geschätztes Druckstückspiel
D_{Smin}	$D_{Smax}(DC) = D_{Smin} + \Delta D_{Smax}(DC)$
$D_{Smin} + \frac{1}{2} * (D_{Smax} - D_{Smin})$	$D_{Smax}(DC) = D_{Smin} + \frac{1}{2} * (D_{Smax} - D_{Smin}) + \Delta D_{Smax}(DC)$
D_{Smax}	$D_{Smax}(DC) = D_{Smax} + \Delta D_{Smax}(DC)$

Tabelle 4-4 Druckstückspielwerte unter Berücksichtigung der Einstelltoleranz

4.5.2.3 Sensor Offset

Die Sensoreinheit misst unter Verwendung eines magnetoresistiven Prinzips das vom Fahrer auf das Lenkrad aufgebrachte Handmoment. Über eine kabelgebundene Verbindung wird das Signal an die elektronische Steuereinheit des Servomotors übertragen [7]. Der Servomotor stellt anschließend ein von der Lenkparametrierung abhängiges Unterstützungsmoment bereit. Als sicherheitskritisches Bauteil muss die Funktionsfähigkeit der Sensoreinheit zu jedem Zeitpunkt gewährleistet sein und darf nicht zu unerwünschten Fehlfunktionen bzw. fehlerhaft berechneten Unterstützungsmomenten führen. Der Drehmomentsensor sollte unempfindlich gegenüber Verschmutzung, Vibration und Verschleiß sein [7]. Am Beispiel des Differenzmomentes soll nachfolgend herausgearbeitet werden, dass kein verschleißbehafteter Offset durch die Sensoreinheit im Rahmen eines Feldlebens erwartbar ist. Wie in Kapitel 4.5.1.2 nachzulesen, wird das Differenzmoment zur Überprüfung der Linearität des Sensorsignals mit folgendem Ansatz berechnet:

$$Linearität\ des\ Sensorsignals = tor_{DIF} = tor_{Sensor}(tor_{SW}) - tor_{SW} \quad (4.55)$$

Abbildung 4-59 veranschaulicht das Differenzmoment von ausgewählten Feldsystemen inklusive der FS1. In Rot eingetragen sind die Grenzen für das Differenzmoment aus der Neuteilproduktion. Wie aus der Abbildung zu entnehmen ist, bewegen sich alle geprüften Lenksysteme innerhalb dieser Grenzen. Selbst die FS1 als repräsentatives Lenksystem für eine intensive Feldnutzung zeigt keinerlei Auffälligkeiten.

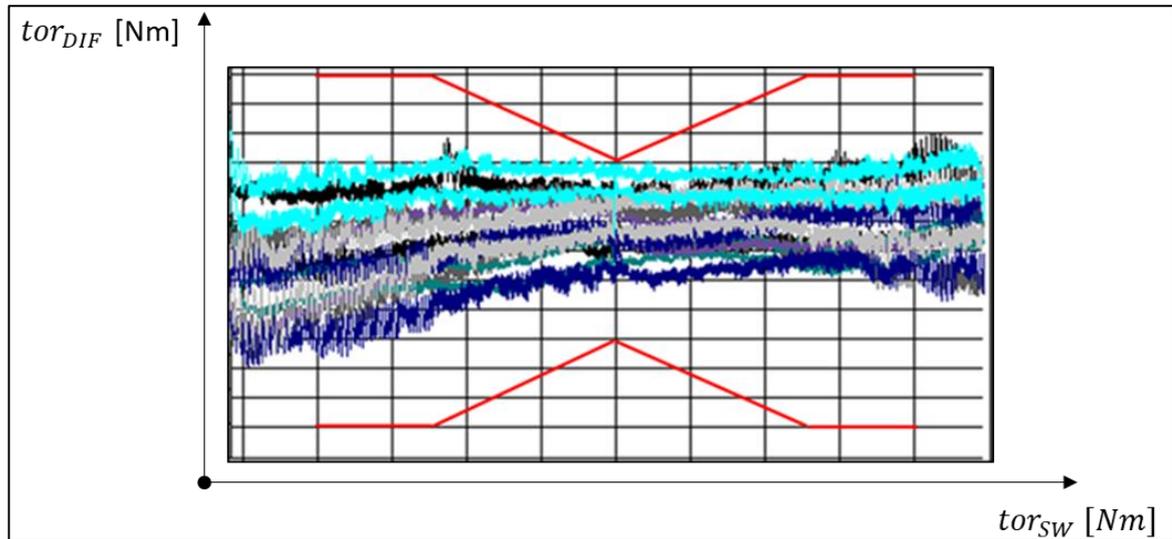


Abbildung 4-59 Analyse des Sensor Offset von Feldsystemen; Die Differenzmomente aller Feldsysteme befinden sich innerhalb der festgelegten Grenzen und zeigen keine Auffälligkeiten

Vergleichend zu den Feldsystemen, ist in Abbildung 4-60 die Messung vor und nach dem Erprobungskollektiv für ein beliebiges System der gleichen Plattform dargestellt. Auch für die Erprobung kann keine verschleißbedingte Zunahme des Sensors Offset nachgewiesen werden.

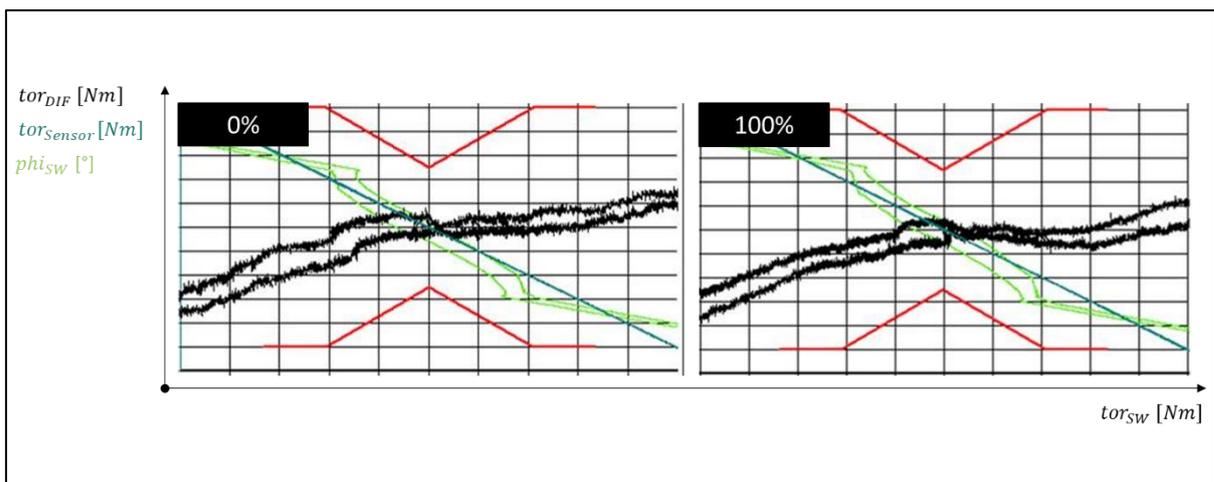


Abbildung 4-60 Analyse des Sensor Offset von Lenksystemen nach dem Erprobungskollektiv; Keine verschleißbedingte Zunahme des Sensor Offset nach dem Erprobungskollektiv nachweisbar. Die Linearität des Sensorsignals zeigt keine Auffälligkeiten

Aus den erhobenen Daten konnten keine verschleißbehaftete Zunahme des Differenzmomentes und damit auch kein beanspruchungsabhängiger Offset abgeleitet werden. Eine verschleiß-abhängige Definition der Wiederverwendungsgrenzen ist aus diesem Grund als nicht zielführend für die Sensoreinheit zu bewerten. Die Wiederverwendungsgrenzen der Sensoreinheit orientieren sich daher an der definierten Lebensdauer des Lenksystems. Eine Überprüfung der Sensorfunktionalität und des Offsets wird dennoch als Teil des Aufarbeitungskonzeptes vorgeschlagen.

4.5.2.4 Leistung, Drehmomentwelligkeit und Rast/Reibmoment

Die Lenkkraftunterstützungseinheit (SCU) bildet einen zentralen Bestandteil des mechatronischen Lenksystems und besteht, wie in Abschnitt 4.2.1 nachzulesen, aus einem Steuergerät (ECU) und einem bürstenlosen Gleichstrommotor. Im Folgenden wird die SCU der Fahrschulenkung FS1 auf ihre Funktionalität hin untersucht, um einen möglichen beanspruchungsabhängigen Vorverschleiß zu identifizieren. Abbildung 4-61 zeigt die Leistungsmessung der Fahrschul SCU. Dargestellt sind das Soll- und das Ist- Moment unter Vollast bei verschiedenen Drehzahlniveaus und für beide Drehrichtungen. Die Messung zeigt keine Performanceeinbußen sowie Auffälligkeiten, die auf einen relevanten Einfluss des Vorverschleißes schließen lassen können.

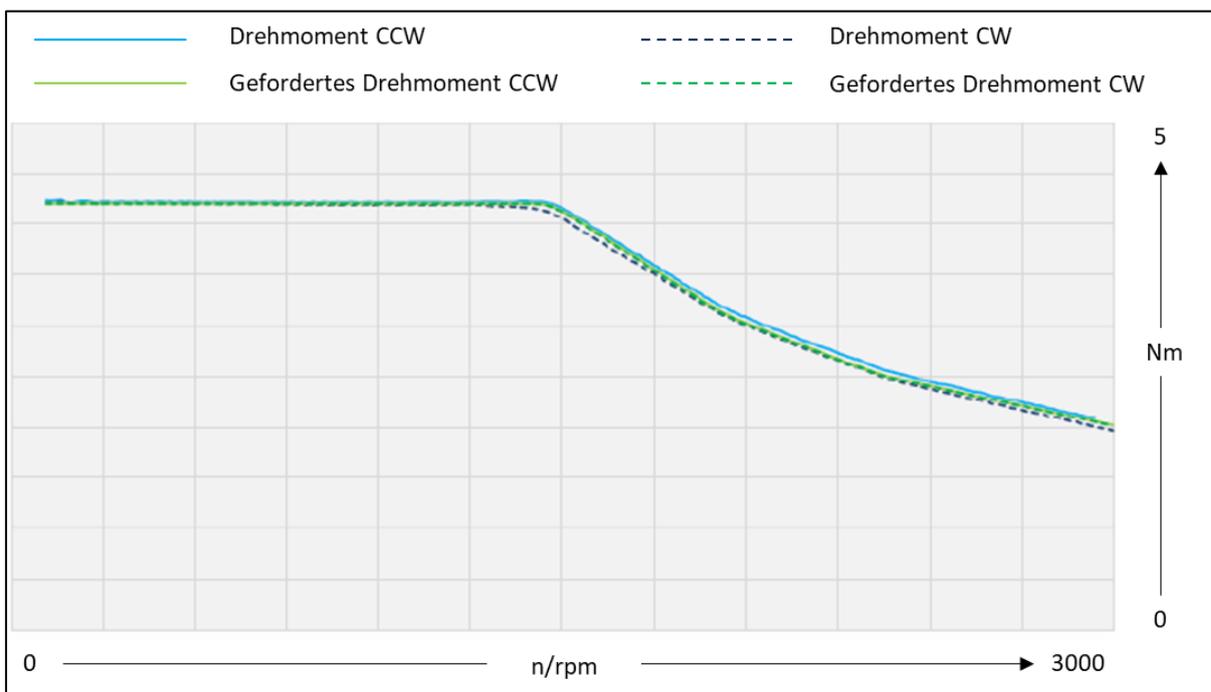


Abbildung 4-61 Leistungsmessung der Fahrschul- SCU; Der Drehmomentverlauf der Fahrschul- Steering Control Unit weist in beide Drehrichtungen über den gesamten Drehzahlbereich keine Auffälligkeiten auf

Eine Einordnung der akustischen Performance ist durch die Campbell Diagramme in Abbildung 4-62 gegeben. Zur Erfassung der Drehmomentwelligkeit wird die Messnabe direkt im Antriebsstrang platziert. Die farbliche Skalierung in Dezibel ist mit 10^{-6} Nm normiert. Für die farbliche Skalierung des radialen Körperschalls liegt die Beschleunigung in mm/s^2 als Basis zugrunde. Beide Messungen weisen keine Auffälligkeiten nach, erfüllen die erforderliche Spezifikation und sind als vergleichbar zu anderen SCUs derselben Plattform einzuordnen.

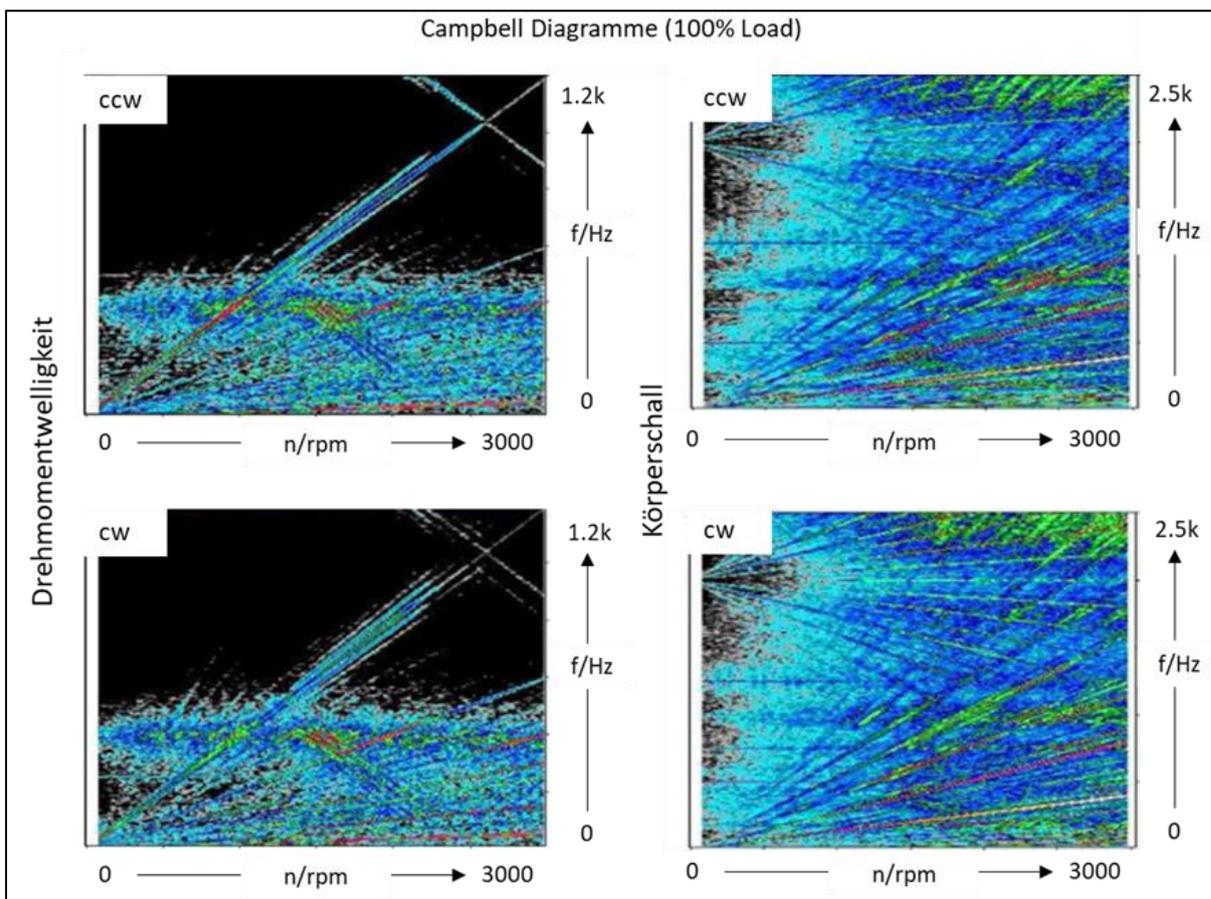


Abbildung 4-62 Akustische Bewertung der Fahrschul- SCU

Das Rast- und das Reibmoment der FS1 SCU ist ebenfalls ohne Auffälligkeiten. Basierend auf den Versuchsergebnissen der FS1, konnte kein beanspruchungsabhängiger Vorverschleiß für die SCU der untersuchten Plattform identifiziert werden, zumindest nicht in einem Maß, welches die Funktionsfähigkeit beeinträchtigt und die Definition eines zusätzlichen beanspruchungsabhängigen Wiederverwendungsgrenzwertes für die untersuchte Plattform rechtfertigen würde. Aus diesem Grund wird der in der Erstausslegung spezifizierte Lebenszyklus als Lebensdauergrenze für die Wiederverwendungsentscheidung verwendet. Weitere Alterungsmechanismen durch thermische Wechselbeanspruchung oder Vibrationen sind nicht Bestandteile der Feldstudie, werden aber durch die in der Erstausslegung spezifizierte Lebenszeit abgedeckt.

4.5.3 Zusammenfassung und Übertragung der Schädigung in den Kontext der sFDE

Für die mechanischen Komponenten der mechatronischen Lenksysteme haben die Untersuchungen nachgewiesen, dass es möglich ist, einen Zusammenhang zwischen der Vorbeanspruchung und der realen physischen Schädigung herzustellen. Dieser Zusammenhang muss nun in den Kontext der sFDE überführt werden. Darauf aufbauend, soll der Beanspruchungsrahmen für den ersten und zweiten Lebenszyklus als Grundlager für die Wiederverwendungsentscheidung definiert werden. Für die elektronischen Bauteile war es nicht möglich, einen beanspruchungsabhängigen Vorverschleiß nachzuweisen. Es wird daher für alle elektronischen Bauteile die in der Erstausslegung definierte Lebensdauer zugrunde gelegt.

Zur Modellierung der Schädigungsverteilungsfunktionen ist der Zusammenhang zwischen Pseudoschädigung und der realen Schädigung mit den Felddaten zu verknüpfen. Abbildung 4-63 veranschaulicht das schematische Vorgehen.

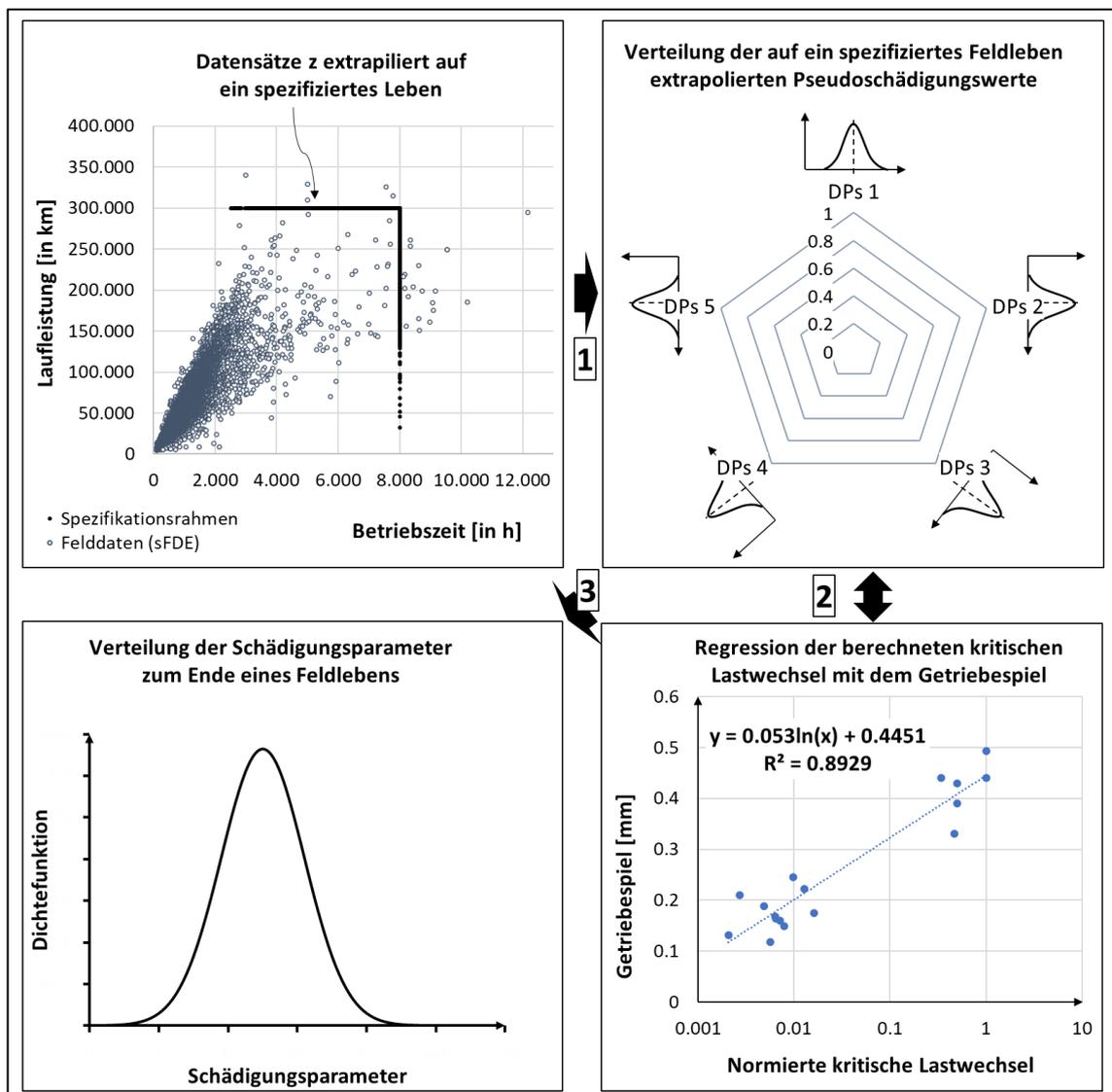


Abbildung 4-63 Übertragung der Schädigungsparameter in den sFDE Kontext

Wie dargestellt, bilden die extrapolierten Daten der sFDE die Basis für die Einordnung (1). Aus der Regression zwischen Pseudoschädigung und realer Schädigung (2) können im Anschluss die Verteilungsfunktionen der Schädigungsparameter (3) abgeleitet werden.

Unabhängig von den Zuverlässigkeitsanforderungen ist es auf diesem Weg möglich, eine Verteilungsfunktion für die einzelnen Schädigungsmechanismen zu bestimmen. Unter Verwendung von Gl. (3. 22) und den Verteilungsparametern $\mu_{D_{PS}}$ und $s_{\log D_{PS}}$ der auf ein Feldleben extrapolierten Pseudoschädigungsparameter können die Verteilungsparameter für die Schädigungswerte wie folgt analytisch berechnet werden:

$$\log_{10}(\mu_{s_q}) = \log_{10}(a) + b * \log_{10}(\mu_{D_{PS}}) \quad (4. 56)$$

$$s_{\log s_q} = \sqrt{(b * s_{\log D_{PS}})^2 + \varepsilon^2} \quad (4. 57)$$

Alternativ können die Verteilungsparameter auch mittels einer Monte Carlo Simulation bestimmt werden.

Aus den vorangegangenen Analysen ergeben sich für die individuelle Wiederverwendungsentscheidung die folgende Auswahl zu berücksichtigender Parameter:

Parameter	Kategorie	Begründung
Laufleistung	Referenzparameter	Die Referenzparameter spannen den Lebensdauerrahmen insbesondere für die Elektronikkomponenten auf und beziehen sich dabei auf die spezifizierte Lebensdauer
Alter		
Betriebsstunden		
Load Counter	Pseudoschädigungsparameter	Die Pseudoschädigungsparameter dienen zur Abschätzung der bereits konsumierten Lebensdauer bezogen auf die im Feld ertragende Beanspruchung die definierten Beanspruchbarkeitsgrenzen
Damage Counter		
Äquivalente Temperaturverweildauer		
Druckstückspiel	Schädigungsparameter	Der Schädigungsparameter Druckstückspiel wird auf der Basis der Analyse als zusätzlicher Parameter empfohlen da eine Abschätzung aus den Daten zwar auf einen positiven aber nicht auf einem besonders starken Zusammenhang hindeutet ($R^2 < 0.7$).

Tabelle 4-5 Auswahl in der Individualentscheidung zu berücksichtigender Parameter



Die in den Kapiteln 4.3 bis 4.5 vorgenommene Analyse von Feld- und Schädigungsdaten von Lenksystemen ist in ihrem Umfang und in ihrer Form bisher nicht im Stand des Wissens verankert. Auf ihrer Grundlage können Annahmen sowohl für die Nutzung und Schädigung anderer automobiler Systeme als auch für die Entwicklung von Lenksysteme getroffen werden.

.

5 Wiederverwendungsentscheidung

Unter Verwendung der gewonnenen Erkenntnisse aus der Feldstudie und den daraus abgeleiteten Schädigungsmodellen erfolgt in diesem Abschnitt die Anwendung des neuen Ansatzes zur Definition der Wiederverwendungsgrenzwerte. Ebenfalls enthalten ist die Einordnung der konsumierten Lebensdauer.

Die Bewertung eines zurückgeführten Altteils (Core) wird in zwei Schritte unterteilt. Zunächst wird die konsumierte Lebensdauer bestimmt. Anschließend erfolgt die Gegenüberstellung mit den Wiederverwendungsgrenzwerten. Abbildung 5-1 visualisiert die Einordnung der konsumierten Lebensdauer für einen Wiederverwendungsgrenzwert von 50%, bei einer direkten Wiederverwendung sowie für einen Wiederverwendungsgrenzwert von 70% bei einer Wiederverwendung mit Nacharbeit. Die relativen Angaben der Grenzwerte entsprechen den korrespondierenden Parametern zur Sicherstellung der geforderten Restlebensdauer.

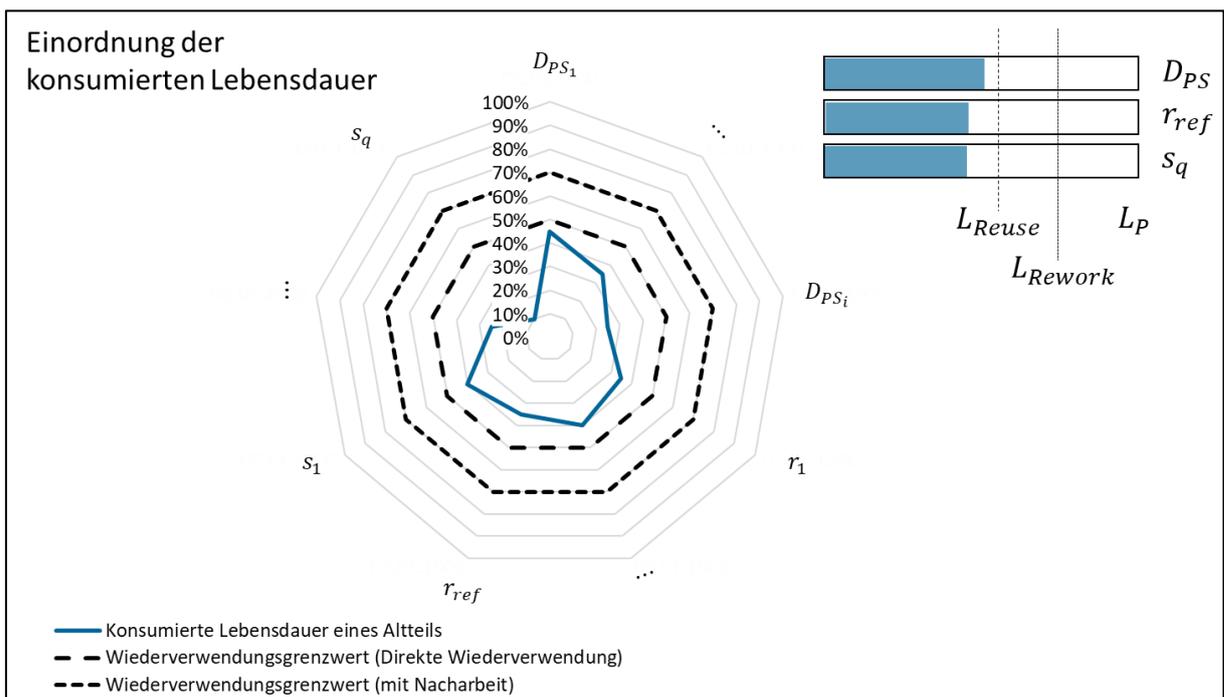


Abbildung 5-1 Einordnung der konsumierten Lebensdauer; Bewertung des zurückgeführten Altteils (blaue Linie) anhand der definierten Parameter zur Einordnung der konsumierten Lebensdauer

Auf jeder Ebene, und zwar von der System- bis zur Komponentenebene, wird erneut eine Entscheidung in Bezug auf die Wiederverwendung gefällt, Abbildung 5-2. Die ausgewählten Parameter ermöglichen auf jeder Stufe einen mehrschichtigen Ansatz zur Einordnung der konsumierten Lebensdauer und berücksichtigen die Vorbeanspruchung und die Vorschädigung. Das Ziel ist darauf ausgerichtet, eine ausreichende Entscheidungsgrundlage für die elektronischen

und die mechanischen Bauteile zu schaffen. Der zugrundeliegende schematische Ablauf kann noch einmal in Kapitel 3.1 nachgelesen werden.

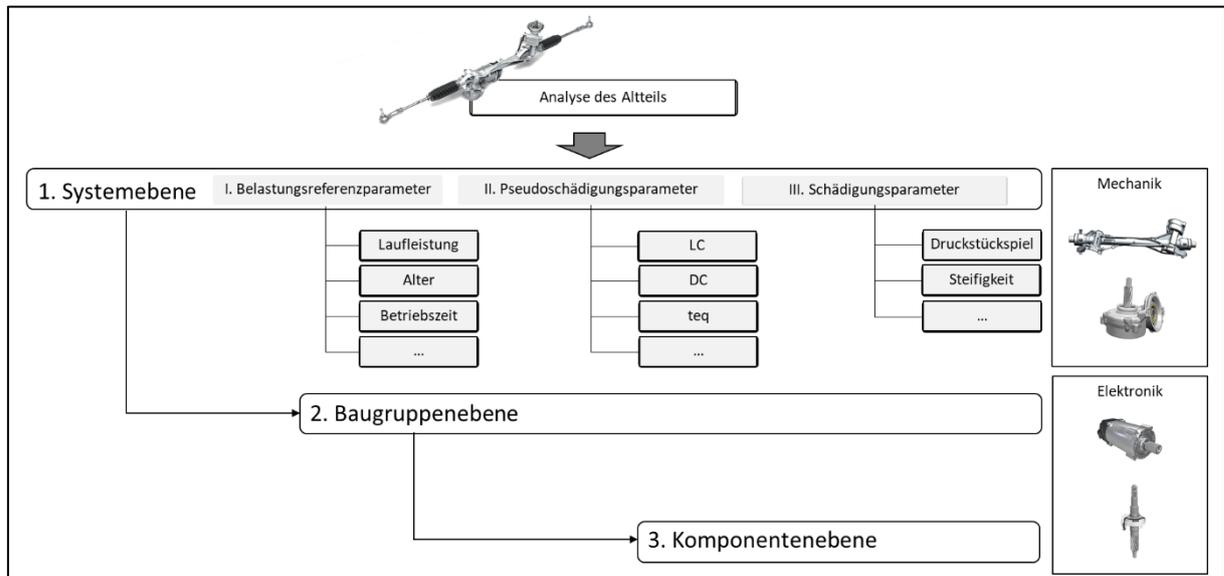


Abbildung 5-2 Stufen und Parameterkategorien der Aufarbeitung

5.1 Definition der Wiederverwendungsgrenzwerte

Die Wiederverwendungsgrenzen beziehen sich ebenfalls auf die drei Kategorien Referenzparameter, Pseudoschädigungsparameter und Schädigungsparameter.

Die Referenzparameter spannen, wie in Kapitel 3.2.1 konkretisiert, den definierten Rahmen für einen Lebenszyklus des Systems, und zwar inklusive der damit verbundenen Zuverlässigkeitsanforderungen, auf. Sie dienen aus diesem Grund als Basis für die Einordnung der Lebensdaueranforderung an die Nutzungsphase II. Die Grenzwertdefinition für die Referenzparameter folgt direkt den Anforderungen an die Restlebensdauer, welche in Abhängigkeit der Produktlebenszykluszeit zu verstehen sind. Als Ausgangsbasis wird der spezifizierte Lebensdauer Rahmen von 300.000 Kilometern, 8.000 Betriebsstunden und 15 Jahren empfohlen. Bei einer geforderten Restlebensdauer von 50% für eine direkte Wiederverwendung wäre der zuverlässigkeitsorientierte Wiederverwendungsgrenzwert bei 150.000 Kilometern, 4.000 Betriebsstunden und 7,5 Jahren festzulegen. Es muss berücksichtigt werden, dass, wie in Kapitel 4 erarbeitet, die Referenzparameter insbesondere für die Wiederverwendung der Elektronikkomponenten relevant sind und eine untergeordnete Rolle für die mechanischen Baugruppen und Bauteile eines Lenksystems spielen. Die Gleichung (5. 1) verdeutlicht den beschriebenen Zusammenhang.

$$L_{WG}^R(t_p, r_{ref}) = (1 - y(t_p)) * r_{ref}^* \quad (5. 1)$$

Die Pseudoschädigungswerte stützen im Gegensatz zu den Referenzparametern direkt die Einordnung der im Feld ertragenen Beanspruchungsintensität zurückgeführter Altteile. Aus den vorangegangenen Untersuchungen in Kapitel 4.3 und Kapitel 4.5 sind Schätzungen für die Verteilungsfunktionen der Feldbeanspruchung und Feldschädigung bekannt. Unter der Annahme einer Normalverteilung der logarithmierten Parameter und analog zu Gl. (3. 12) wird die Berechnung der Grenzwerte vorgenommen. Die zulässige Überschreitungswahrscheinlichkeit α_i des Lebensdauer Grenzwertes G_i und die Restlebensdaueranforderung $y(t_p)$ bestimmen den zuverlässigkeitsorientierten Wiederverwendungsgrenzwert L_{WG}^R für die Optionen Reuse und Rework. Da die tatsächliche systemische Lebensdauer in vielen Fällen nicht bekannt ist, wird eine Ersatzlebensdauer μ_{G_i} bestimmt

$$L_P^R(D_{PS_i}) = \mu_{G_i} = 10^{(\log_{10}(G_i(D_{PS_i})) - z_{\alpha_i} * s_{\log s_{FDE}})}. \quad (5. 2)$$

Die Ersatzlebensdauer entspricht dem Mittelwert einer Feldverteilung, bei dem exakt die Anforderungen in Bezug auf die Überschreitungswahrscheinlichkeit α_i des Grenzwertes G_i erfüllt sind. Der Wiederverwendungsgrenzwert bildet die maximal zulässige (Pseudo-) Vorschädigung des jeweiligen Parameters ab. Der Lebensdauer Grenzwert G_i basiert auf den erarbeiteten Zusammenhängen von Beanspruchung und Schädigung und beschreibt den zulässigen Wert des jeweiligen Parameters nach dem ersten und zweiten Lebensabschnitt. Er kann zum Beispiel das 95% Quantil des Load Counters nach einem Feldleben darstellen. Gleichung (5. 3) verdeutlicht die zugrunde liegende Berechnung aus der Ersatzlebensdauer.

$$L_{WG}^R(t_p, D_{PS_i}) = L_P^R(D_{PS_i}) - y(t_p) * 10^{\mu_{B_{sFDE}}} \quad (5. 3)$$

Analog zu den Pseudoschädigungsparametern stützen die Schädigungsparameter die Einordnung der im Feld ertragenen Beanspruchungsintensität zurückgeführter Altteile. Die Wiederverwendungsgrenzwerte beruhen auf der Regression von Schädigung und Pseudoschädigung sowie auf einer Prognose der zukünftigen Schädigungsumfänge. Existiert ein Schädigungsgrenzwert G_q , kann aus der Regression und der sFDE die Wahrscheinlichkeit für ein Überschreiten des Grenzwertes bestimmt werden. Die Berechnung erfolgt auf derselben Grundlage wie die Berechnung der Pseudoschädigungsgrenzwerte, Gleichung (5. 4).

$$L_{WG}^R(t_p, s_q) = L_P^R(s_q) - y(t_p) * 10^{\mu_{B_{sFDE}}} \quad (5. 4)$$

Der kostenseitige Einfluss komplettiert die Definition der Wiederverwendungsgrenzwerte. Je nach Vorbeanspruchung und Vorschädigung ändern sich die Gewährleistungskosten und es

kommt zu einer Verschiebung des kostenseitigen Grenzwertes. Gleichung (5. 5) zeigt den Zusammenhang zwischen Kosten in der Aufarbeitung und der Ausfallrate.

$$C^A = C_w * \lambda(t_w) + C_M^A + C_P^A, \text{ mit} \quad (5. 5)$$

C^A = Kosten der Aufarbeitungsoption

C_w = Gewährleistungskosten

C_M^A = Materialkosten der Aufarbeitungsoption

C_P^A = Produktionskosten der Aufarbeitungsoption.

$\lambda(t_w)$ = Ausfallrate innerhalb des Gewährleistungszeitraumes

Der Ausfall eines Systems kann mit der Überschreitungswahrscheinlichkeit der definierten Lebensdauergrenzen oder der qualitätsrelevanten Grenzwerte in Beziehung gesetzt werden. Der für die Wiederverwendungsentscheidung als führender Wiederverwendungsgrenzwert heranzuziehende Parameter ist unter Verwendung der Gleichung (3. 24) und (3. 25) zu bestimmen.

5.2 Einordnung der konsumierten Lebensdauer

Für die vorgestellten Parameterkategorien wird die Einordnung der konsumierten Lebensdauer eines Altteils vorgenommen. Die Bewertung erfolgt für jeden Parameter und auf jeder Stufe unter Berücksichtigung der jeweiligen Komponente.

Referenzparameter

Das Alter des Altaggregate $r_a(x_j)$ kann über das Systemlabel oder das Auslesen des Produktionsdatums aus dem Steuergerät bestimmt werden. In Kapitel 2.2.3 wurde bereits auf den Umstand der passiven Lagerzeit t_{pl} eingegangen, welcher eine nicht unerhebliche Rolle bei der Abschätzung der konsumierten Lebensdauer vereinnahmter Altteile spielt. Unter der Annahme einer bekannten Laufleistung und einer bekannten Betriebszeit kann der folgende Berechnungsansatz zur Bestimmung der aktiven Nutzungsphase I angewandt werden:

$$r_{a_{NI}} = r_a(x_{jn}) - t_{pl}(x_{jn}), \text{ für } t_{pl}(x_{jn}) > 0 \quad (5. 6)$$

$r_{a_{NI}}$ beschreibt die aktive Feldnutzung in der Nutzungsphase I (NI). Die passive Lagerzeit kann über eine Näherung, basierend auf der Annahme einer linear konsumierten Lebensdauer, hergeleitet werden

$$t_{pl}(x_{jn}) = r_a(x_{jn}) - \max \left[\frac{r_m(x_{jn})}{\left(\frac{r_m^*}{r_a^*}\right)}, \frac{r_t(x_{jn})}{\left(\frac{r_t^*}{r_a^*}\right)} \right] \quad (5. 7)$$

Für den Sonderfall, dass ein für die Einordnung notwendiger Parameter in der Aufarbeitung nicht zur Verfügung steht, jedoch in der sFDE enthalten ist, kann auf Methoden des Machine Learning zurückgegriffen werden. Als Eingangsgrößen zur Bestimmung der Regressionsfunktion dienen die Parameter der sFDE $l_p(x_{jn})$ und die daraus abgeleiteten Pseudoschädigungswerte $D_{P_{Si}}(x_{jn})$. Abbildung 5-3 veranschaulicht die Schätzung der Laufleistung mithilfe von Bagged Trees. Bagged Tree, im Englischen auch „Bootstrap aggregating decision tree“ genannt, ist ein Verfahren zur Verbesserung der Aussagefähigkeit von Entscheidungsbäumen. Der Bagging Algorithmus für die Regressionsanalyse kann [100] entnommen werden. Das verwendete Bagged Tree Verfahren liefert eine hinreichend exakte Schätzung der Laufleistung mit einem mittleren quadratischen Fehler (RSME) von 12.167 km und einem Bestimmtheitsmaß von 0,88. Insbesondere für hohe Laufleistungen scheint die Schätzung stärker von den realen Werten zu divergieren, genügt aber für eine Einordnung in der Aufarbeitung.

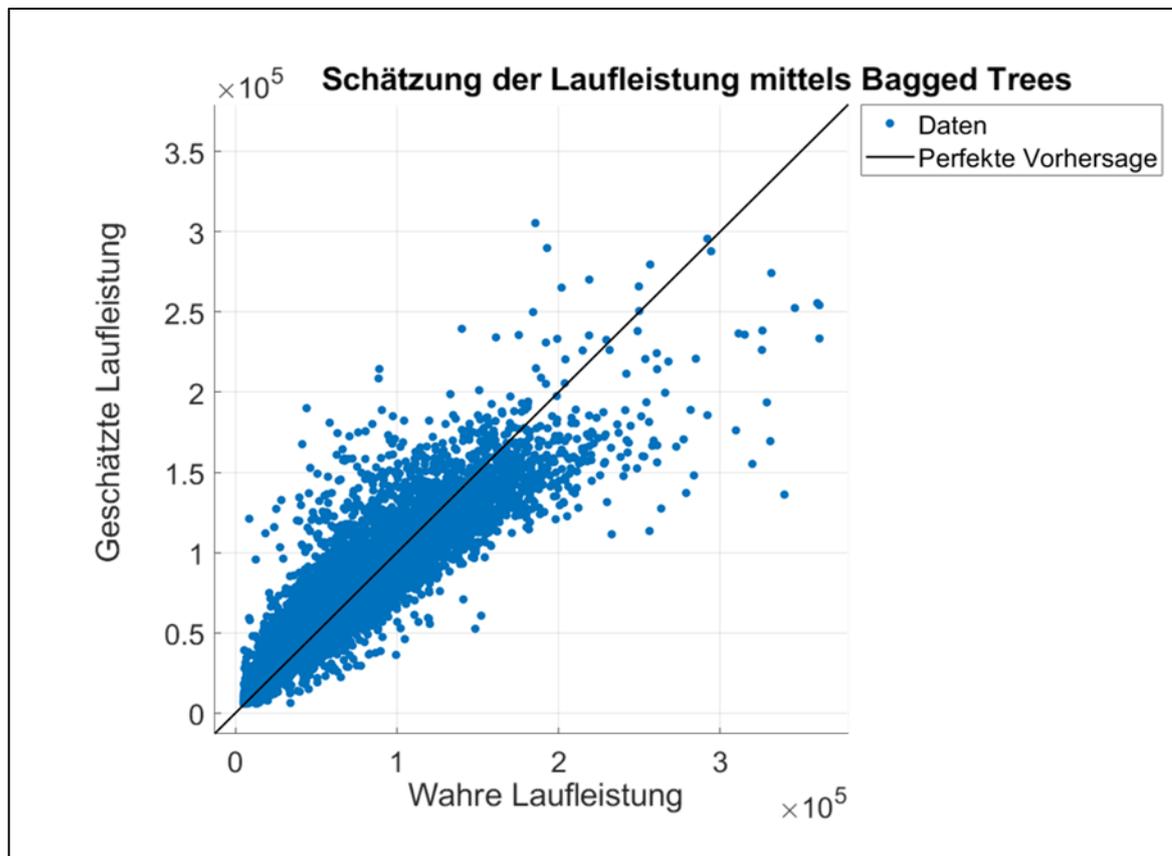


Abbildung 5-3 Schätzung der Laufleistung mittels Bagged Trees

Für die Abschätzung der konsumierten Lebensdauer ist der folgende Ansatz mit einer linearen Abnahme der Restlebensdauer und der Einbindung von Gl. (3. 23) zu verwenden:

$$L_K^{r_{ref}}(x_{jn}) = \left(\frac{r_{ref}(x_{jn})}{r_{ref}^*} \right) = \max \left(\frac{r_{aNI}(x_{jn})}{r_a^*}; \frac{r_m(x_{jn})}{r_m^*}; \frac{r_t(x_{jn})}{r_t^*} \right). \quad (5. 8)$$

Abbildung 5-4 visualisiert das Vorgehen zur Bewertung der Referenzparameter. Der relativ zu der Gesamtlebensdauer am meisten konsumierte Parameter bestimmt die Restlebensdauer.

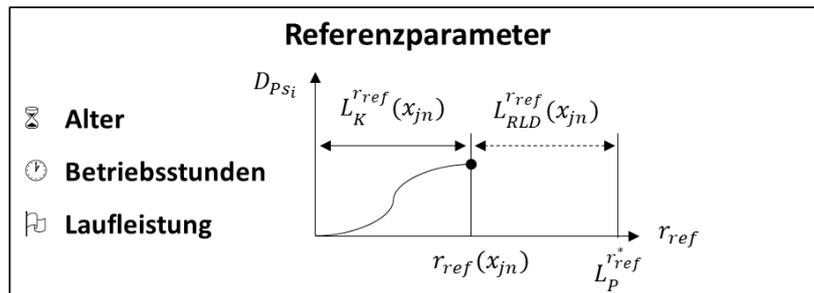


Abbildung 5-4 Bewertung der Referenzparameter

Pseudoschädigungswerte

Die konsumierte Lebensdauer wird aus der Relation zwischen der erfassten (Pseudo-) Vorschädigung, der hergeleiteten Ersatzlebensdauer und dem Median der extrapolierten sFDE Daten ermittelt

$$L_K^R((x_{jn})) = \left\{ 1 - \max \left[\frac{\mu_{G_i} - D_{P_{Si}}(x_{jn})}{\mu_{B_{sFDE}}} \right] \right\}. \tag{5.9}$$

Die Berücksichtigung der sFDE Daten in der konsumierten Lebensdauerberechnung ermöglicht eine realistische Einordnung und das Ausnutzen eventuell existenter Lastreserven. Die zuverlässigkeitsorientierte, relative Restlebensdauer kann unter Verwendung von Gl. (5.9) und (3.23) bestimmt werden

$$L_{RLD}^R((x_{jn})) = \max \left[\frac{\mu_{G_i} - D_{P_{Si}}(x_{jn})}{\mu_{B_{sFDE}}} \right]. \tag{5.10}$$

Abbildung 5-5 visualisiert das beschriebene Vorgehen zur Abschätzung der konsumierten Lebensdauer.

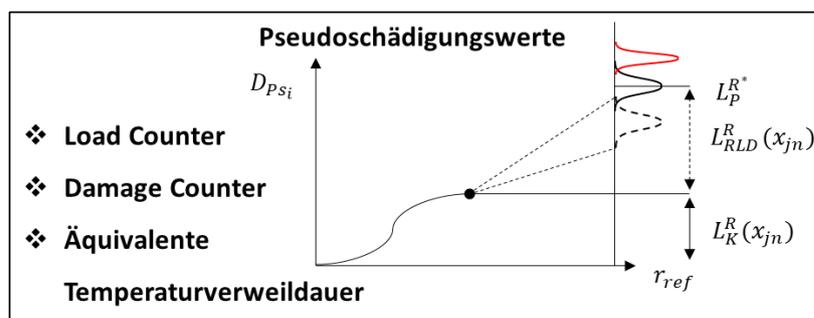


Abbildung 5-5 Bewertung der Pseudoschädigungsparameter

Schädigungswerte

In die nächste Stufe fließen die messbaren Schädigungsparameter der jeweiligen Betrachtungseinheit ein. Sie stützen die Wiederverwendungsentscheidung über die Einordnung der konsumierten Lebensdauer anhand der realen Verschleiß- und Schädigungsbilder. Aus kommerzieller Sicht ist die reine pseudoschädigungs- und referenzparameterbasierte Entscheidungsfindung sicherlich deshalb die kostengünstigere Alternative, da ein zusätzliches Handling und Messen der Schädigung entfallen. Ein hybrides Vorgehen im Sinne der bestmöglichen Entscheidungsgrundlage ist dennoch anzustreben. Die Testumfänge sind produktspezifisch zu variieren und der Schädigungswert bildet das messbare Resultat einer solchen Prüfung ab. Abbildung 5-6 veranschaulicht das allgemeine Vorgehen zur Bewertung der Schädigungsparameter. Der dargestellte grüne Bereich symbolisiert den Wiederverwendungsrahmen für den Schädigungsparameter und den Pseudoschädigungswert. Beide Parameter spannen einen Rahmen auf, in dessen Grenzen das System liegen muss, um für die jeweilige Wiederverwendungsoption infrage zu kommen.

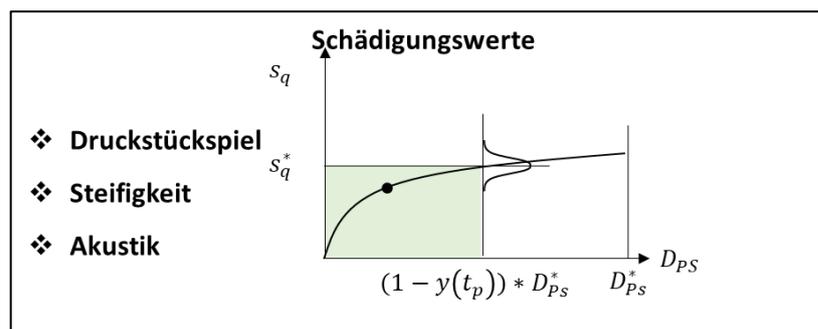


Abbildung 5-6 Bewertung der Schädigungsparameter

6 Diskussion des Ansatzes

Der neu entwickelte Ansatz ermöglicht ein generelles Vorgehen zur Definition der Wiederverwendungsgrenzwerte für die Aufarbeitung von Systemen, Baugruppen und Komponenten. Das Problem fehlender oder unzureichender Ausfalldaten, wie es zum Beispiel bei wartungsfreien Systemen zu verzeichnen ist, ist durch die Nutzung von Felddaten kompensierbar. Es konnten unter ihrer Verwendung die benötigten Grundlagen für eine Zuverlässigkeitsabschätzung in der Aufarbeitung hergeleitet werden. Der Vorteil einer Nutzung von Felddaten besteht in der Abbildung der realen Beanspruchungssituation im Feld. Insbesondere bei einer hohen Nutzungsvariabilität und Anwendungsvielfalt ist es dennoch möglich, die Verteilung der Feldbeanspruchung zu schätzen. Wie bereits aufgezeigt wurde, funktioniert dies auch dann, wenn keine Zeitreihendaten, sondern nur eine akkumulierte Datengrundlage zur Verfügung stehen. Eine Grundanforderung des Ansatzes betrifft die Verfügbarkeit von Felddaten mit entsprechendem Umfang und entsprechender Güte. Die Erweiterung der 3F Methode um eine systemspezifische Varianz stützt in diesem Kontext die Bestimmung repräsentativer Lastkollektive aus den Felddaten. Das hat den Vorteil, dass die physische Studie auf relevante Systeme eingegrenzt und der Analyseaufwand insgesamt reduziert wird. Die aus der heterogenen Feldbeanspruchung hervorgehende Streuung der Schädigung wird in diesem Zusammenhang ebenfalls auf die relevanten Anteile beschränkt. Darüber hinaus ermöglicht die Einordnung der repräsentativen Schädigungsbilder in den Felddatenkontext die Ableitung für die Aufarbeitung benötigter Schädigungsmodelle. Dies ist besonders wichtig für komplexe Systeme, bei welchen keine Beanspruchbarkeitsgrenzen bekannt sind und eine Einordnung der Vorschädigung zurückgeführter Altteile vorgenommen werden muss. Ein weiterer Vorteil des neuen Ansatzes besteht daher in einer beanspruchungs- und vorschädigungsorientierten Wiederverwendungsentscheidung. Dadurch werden das Ausnutzen vorhandener Beanspruchbarkeitsreserven, aber auch die frühzeitige Identifikation potenzieller Risiken ermöglicht. Die der Lebensdauerauslegung zugrundeliegenden Prüfumfänge stellen insbesondere bei sicherheitsrelevanten Systemen eine Überbewertung der Situation im Feld dar. Für die Aufarbeitung bietet eine beanspruchungs- und vorschädigungsorientierte Definition der Wiederverwendungsgrenzwerte aus diesem Grund eine direkte Optimierung der nutzbaren Menge an Altteilen. Einen nachteiligen Einfluss übt der Aufbau der Schädigungsmodelle auf die Analyse repräsentativer Feldsysteme dennoch aus. Auch unter ihrer Verwendung erfolgt eine Überbewertung der Feldsituation, wenn auch weniger stark als bei der Erprobungsbeanspruchung. In diesem Zusammenhang gilt es, die Feldstudie bei Bedarf auch auf mittlere Beanspruchungsprofile auszuweiten. Abbildung 6-1 ver-

deutlich die Einordnung der Feldbeanspruchung für die Absicherung der mechanischen Grenzen am Beispiel eines Lenksystems. Wie aus der Darstellung hervorgeht, ist die erprobte Beanspruchbarkeit deutlich höher als die tatsächliche Beanspruchung über die Lebensdauer im Feld. Wenn die Feldbeanspruchungsverteilung so weit nach rechts verschoben wird, bis die zulässige Ausfallrate erreicht ist, bleibt sogar ein Faktor von 3.4 im Vergleich zu der ursprünglichen Verteilung bestehen.

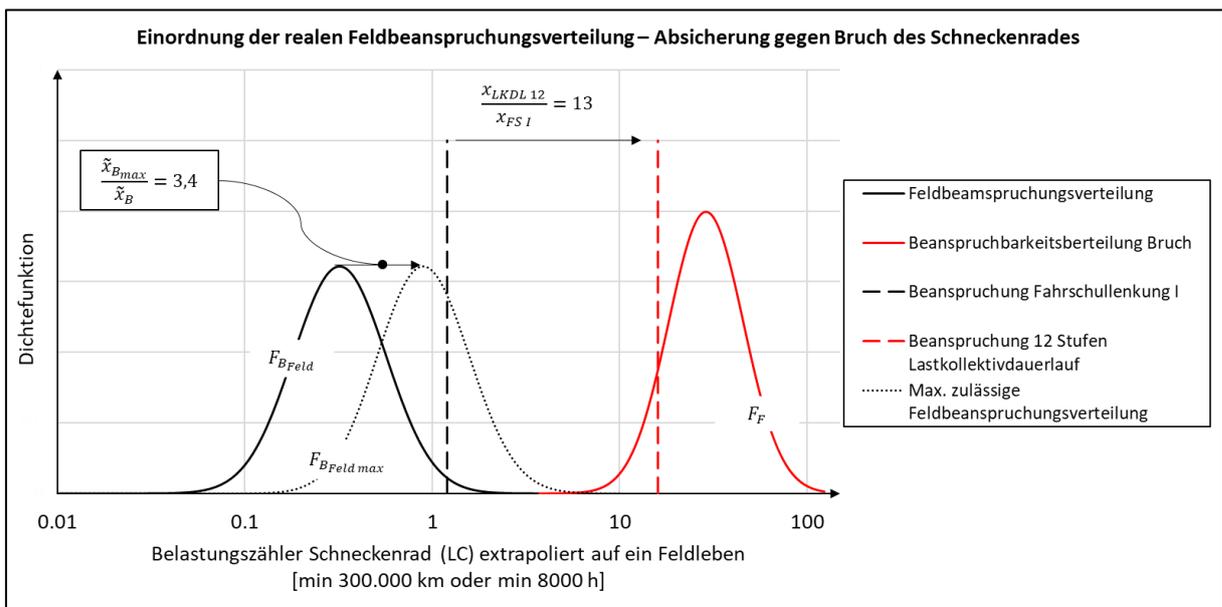


Abbildung 6-1 Einordnung der realen Feldbeanspruchungsverteilung für die Absicherung der mechanischen Grenzen eines Lenksystems; Die Fahrerschullenkung zeigt, basierend auf dem Load Counter, eine um den Faktor 13 geringere Beanspruchung. Eine Feldverteilung welche die maximal zulässige Beanspruchung ausreizt, liegt um den Faktor 3,4 von den realen Feld-daten zum Ende eines Feldlebens entfernt

Ein weiterer Vorteil ergibt sich für Systeme, Baugruppen und Komponenten, deren Lebensdauer nicht vordergründig aufgrund ihrer Laufleistung, ihrer Betriebszeit und ihres Alters, sondern aufgrund der Intensität ihrer Nutzung im Feld abnimmt. Eine alleinige Einordnung nach den Referenzparametern führt somit zu einer Überbewertung dieser Parameter und zu einer Reduktion der nutzbaren Menge an Altteilen. Abbildung 6-2 verdeutlicht am Beispiel einer statischen Restlebensdauernforderung von 50% die unterschiedliche Wiederverwendungswahrscheinlichkeiten. Dargestellt sind die Wiederverwendungswahrscheinlichkeiten für eine referenzparameterbasierte Entscheidung und für eine Bewertung mittels der Pseudoschädigungswerte. Für beide Ansätze wird eine lineare Zunahme der Vorbeanspruchung über das Systemalter angenommen. Wie der Abbildung entnommen werden kann, unterscheidet der Standardansatz zwischen zwei Bereichen. Der erste Bereich kennzeichnet alle Systeme, die weniger als 50% in Bezug auf die Parameter Laufleistung, Alter und Betriebszeit gesehen haben. Im Gegensatz dazu vereint der zweite Bereich alle Systeme, die für mindestens einen der

Referenzparameter oberhalb der 50% liegen. Die Fläche zwischen beiden Kurven beschreibt den Unterschied beider Ansätze in Bezug auf die Wiederverwendungswahrscheinlichkeit. Mit zunehmendem Feldalter der Systeme überwiegt der positive Effekt der beanspruchungsorientierten Grenzen. Eine passive Lagerzeit beeinträchtigt bei einer reinen referenzparameterbasierten Entscheidung die Wiederverwendungsrate zusätzlich negativ.

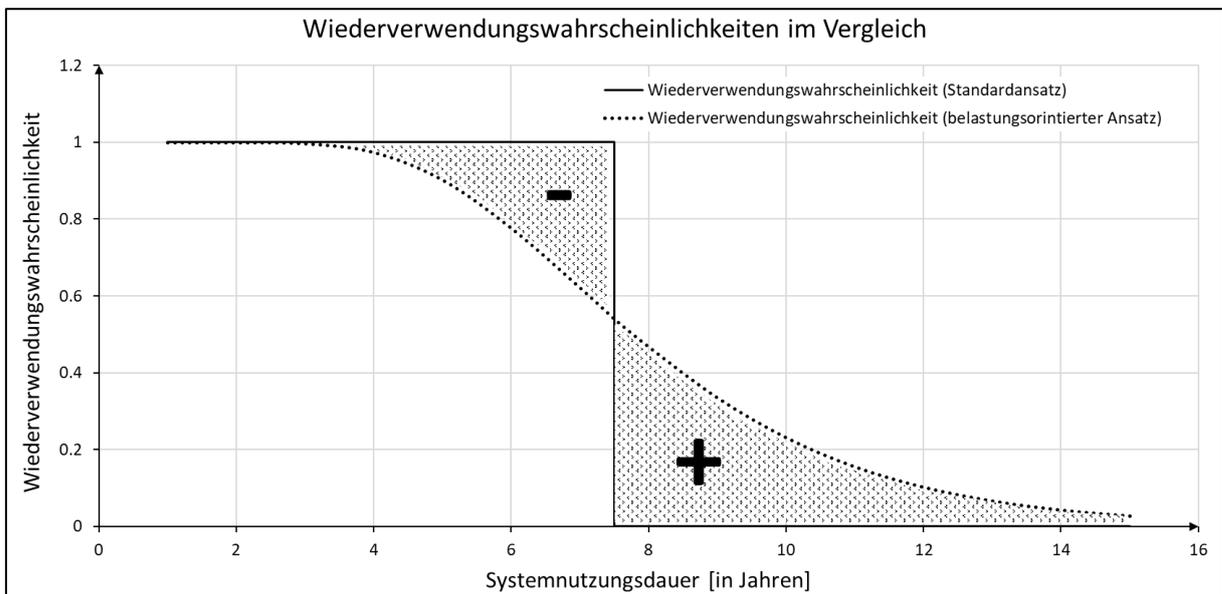


Abbildung 6-2 Wiederverwendungswahrscheinlichkeiten im Vergleich; Der statische Ansatz führt im Vergleich zum exponentiellen Ansatz zu einer Über- sowie Unterschätzung der Wiederverwendbarkeit. In Summe überwiegt der positive Effekt einer dynamischen Modellierung der Grenzen

Die Wahl des Wiederverwendungsgrenzwertes und die Art der Modellierung nehmen ebenfalls einen entscheidenden Einfluss auf die Nutzbarkeit der Feldpopulation. Der entwickelte Ansatz schlägt eine dynamische Modellierung der Grenzwerte vor und ermöglicht somit eine Anpassung an die Restlebensduranforderung in den verschiedenen Phasen des Lebenszyklus. Unter Verwendung der Felddaten und des Verkaufsvolumens aus Tabelle 6-1 wird das Potential zur Wiederverwendung simuliert.

Relatives Feldvolumen einer Plattform										
2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
0,07%	8,72%	13,08%	15,64%	17,57%	16,41%	14,22%	12,97%	1,27%	0,04%	0,01%

Tabelle 6-1 Relatives Feldvolumen einer Plattform

Unter Verwendung der gleichen Ausgangsbedingungen ergibt sich das in Abbildung 6-3 dargestellte Wiederverwendungspotential. Bei der Wahl des statischen Modells sinkt die Altteilerverwendbarkeit mit zunehmendem Alter der Feldpopulation in rapider Weise. Mit dem linearen

Ansatz ist nach den ersten beiden Jahren eine weniger starke Abnahme zu beobachten. Der exponentielle Ansatz kommt der realen Systemnutzung im Feld am nächsten. Dieser sorgt für einen ausgeglichenen Wiederverwendungsanteil, welcher erst deutlich beim Erreichen der minimalen Restlebensdaueranforderung sinkt. Dies verdeutlicht noch einmal den Mehrwert einer dynamischen Anpassung der Wiederverwendungsgrenzen innerhalb des Produktlebenszyklus.

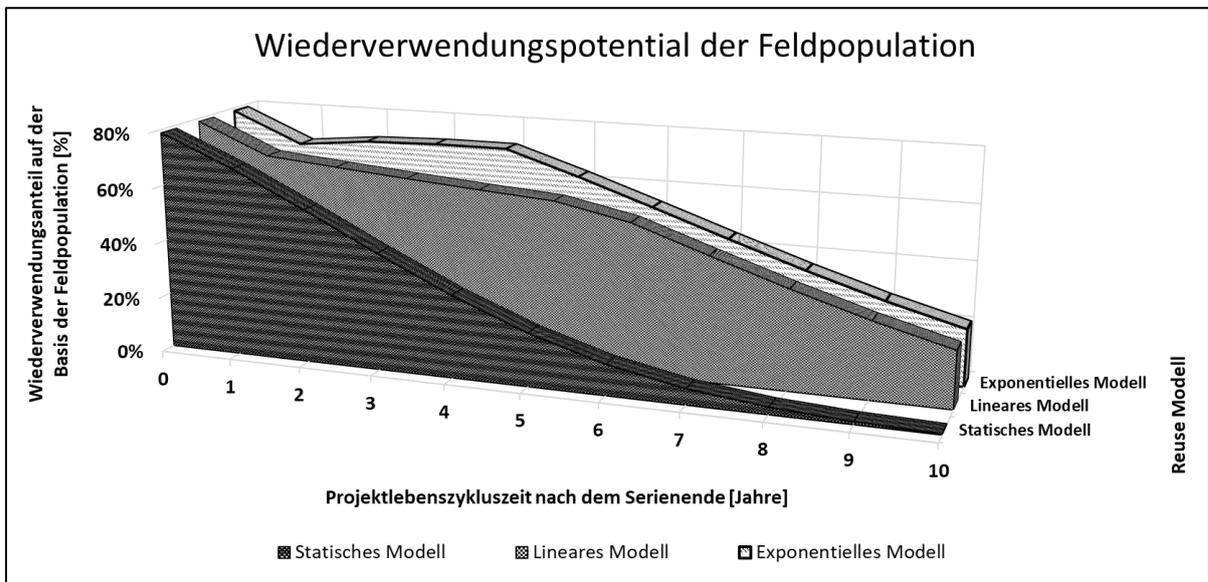


Abbildung 6-3 Wiederverwendungspotential der Feldpopulation; Die dargestellte Fläche je Modell beschreibt den Wiederverwendungsanteil mit zunehmender Projektlebenszykluszeit. Die dynamischen Modelle weisen ein deutlich höheres Wiederverwendungspotential auf (Faktor 1.85 – Faktor 1.9)

Gegenübergestellt sind die drei diskutierten Ansätze zur Definition der Wiederverwendungsgrenzwerte. Das statische Modell stellt den aktuell verwendeten Ansatz dar. Vergleichend dazu ermöglichen das lineare Modell bereits ein um den Faktor 1.85 und der exponentielle Ansatz ein um den Faktor 1.9 größeres Wiederverwendungspotential bei einer Projektlebenszykluszeit von 10 Jahren nach dem Serienende.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Eine Wiederverwendung von Systemen, Baugruppen und Komponenten gewinnt in der Automobilindustrie zunehmend an Relevanz. Die Ursachen dafür sind vielfältig und basieren sowohl auf ökonomischen als auch auf ökologischen Vorteilen. Ein auch in der Aufarbeitung ansteigender Kostendruck erfordert geeignete Konzepte und Methoden, welche eine möglichst hohe Wiederverwendung von Altteilen ermöglichen. Gleichzeitig müssen die Anforderungen an die Qualität und Zuverlässigkeit der Produkte erfüllt werden. Die Verwendung von Ausfall- und Felddaten rückt dabei immer mehr in den Vordergrund, um die vorhandenen Beanspruchbarkeitsreserven zu identifizieren und möglichst bis zur Betriebsfestigkeitsgrenze auszureizen. Das Verständnis der im Feld auftretenden Beanspruchung ist dabei ebenso wichtig wie die Interpretierbarkeit der Vorschädigung. Eine Abschätzung der Feldbeanspruchung automobiler Systeme ist jedoch aufgrund der Nutzungsvariabilität und der Anwendungsvielfalt oftmals mit Unsicherheiten behaftet. Als Konsequenz ergibt sich für die erwartbare Schädigung ebenfalls eine hohe Streuung. Zeit- und kostenintensive Feldstudien sind hier unerlässlich, um die Zusammenhänge von Beanspruchung und Schädigung zu herauszuarbeiten. Sie erfordern zudem eine gewisse Repräsentativität, um die angesprochene Unsicherheit beherrschbar zu machen.

Die vorliegende Arbeit beschreibt eine systematische Vorgehensweise zur Definition der Wiederverwendungsgrenzwerte für mechatronische Lenksysteme. Auf der Basis von Felddaten erfolgten die Erarbeitung der Feldbeanspruchungsverteilung und die Herleitung von Nutzungsprofilen zur Identifikation der meistschädigenden Kombinationen. Pseudoschädigungswerte bilden die Indikatoren für die Einordnung der Nutzungsintensität im Feld. Als Ergebnis wurden intensiv genutzte Feldsysteme für die physische Analyse ausgewählt. Durch die Untersuchung hoch beanspruchter Systeme konnte der Analyseumfang erheblich gemindert und auf die wesentlichen Feldsysteme reduziert werden. In Verbindung mit einer Einordnung ihrer Vorschädigung in den Kontext der Felddaten wurde der Nachweis des Repräsentativitätsanspruches für die Verknüpfung von Schädigung und Pseudoschädigung vorgenommen. Die erarbeiteten Schädigungsmodelle bilden eine wichtige Basis zur Einordnung der konsumierten Lebensdauer zurückgeführter Altteile. Der neu entwickelte Ansatz beinhaltet somit eine beanspruchungsorientierte Definition der Wiederverwendungsgrenzen und ermöglicht das geforderte Ausreizen vorhandener Lastreserven. Die Gegenüberstellung von Zuverlässigkeit und Kosten garantiert zudem eine wirtschaftliche Aufarbeitung. Für die Wahl der richtigen Aufarbeitungsstrategie bilden dynamische Wiederverwendungsgrenzwerte die Basis. Diese bilden, wie aufgezeigt wurde, für alle Phasen des Produktlebenszyklus eine optimale Entscheidungsgrundlage.



Der entwickelte Ansatz kann in Verbindung mit den nachfolgend zusammengefassten Problemstellungen Anwendung finden.

- Auswertung der Nutzung eines Produktes bei einer hohen Nutzungsvariabilität und Anwendungsvielfalt
- Einordnung der Vorbeanspruchung von Bauteilen in den Kontext der Feldbeanspruchung und der Serienerprobung
- Herleitung einer beanspruchungsorientierten Lebensdauerabschätzung ohne Ausfalldaten
- Identifikation repräsentativer Feldsysteme für die physische Analyse von Bauteilen zur Reduktion von Unsicherheiten bei einer heterogenen Beanspruchung
- Definition von dynamischen Wiederverwendungsgrenzen als Entscheidungsgrundlage für die Auswahl der optimalen Aufarbeitungsstrategie über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg

Die Nutzbarkeit des vorgeschlagenen Ansatzes bedingt eine entsprechende Güte der Felddaten. In einigen Punkten besteht sicherlich noch weiteres Untersuchungspotential. So erfordern die am Beispiel der Referenzplattform hergeleiteten Zusammenhänge von Schädigung und Pseudoschädigung generell eine Erweiterung der Studie in Bezug auf die Anzahl mittlerer Beanspruchungsprofile. Das Verwenden von Pseudoschädigungswerten, welche nicht auf Zeitreihendaten basieren, liefert zudem nur eine akkumulierte Sicht der Realität. Es können daher heute noch keine einzelnen Lastkollektive in der Auswertung berücksichtigt werden. Hier wäre eine Erweiterung der Datengrundlage der nächste logische Schritt, wobei dessen Umsetzung als eher schwierig einzuordnen ist. Ebenfalls zu überprüfen sind die Schädigungszusammenhänge im internationalen Vergleich. Für die physische Analyse wurden nur Teile derselben Plattform und Teile aus der Bundesrepublik Deutschland zurückgeführt, was auch in der Auswertung einen regionalen Einfluss zur Folge hatte. Die Übertragbarkeit des entwickelten Vorgehens auf andere Produkte, wie zum Beispiel Bremssysteme, ist in jedem Baustein gegeben und ermöglicht eine produktspezifische Anpassung in Form der Feldnutzung, der Restlebensdaueranforderung und der Auswahl der relevanten Parameter. Dazu wurde sichergestellt, dass sowohl die Analysetiefe, und zwar von der System- bis zur Komponentenebene, als auch die Bewertung durch individuelle Parameter und Grenzwerte gegeben sind.

8 Literaturverzeichnis

- [1] Deutsches Institut für Normung e.V., Hrsg., „DIN 40 041:1990-12: Zuverlässigkeit Begriffe“. Dezember 1990.
- [2] S. Gerhard, „Importance of different vehicle features“, GfK - Growth from Knowledge, Februar 2017.
<https://www.gfk.com/insights/car-features-which-are-very-important> (zugegriffen 30. März 2017).
- [3] F. Klug, Logistikmanagement in der Automobilindustrie. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010. doi: 10.1007/978-3-642-05293-4.
- [4] M. Anityasari, „Reuse of Industrial Products A Technical and Economic Model for Decision Support“, Dissertation, School of Mechanical and Manufacturing Engineering The University of New South Wales, Sydney, Australia, 2008.
- [5] U. Lange, Ressourceneffizienz durch Remanufacturing - Industrielle Aufarbeitung von Altteilen. Berlin: VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE), 2017.
- [6] H. Stoll, Fahrwerktechnik: Lenkanlagen und Hilfskraftlenkungen, 1. Aufl., Bd. 1. Würzburg: Vogel Communications Group GmbH & Co. KG, 1992.
- [7] P. Pfeffer und M. Harrer, Hrsg., Lenkungshandbuch: Lenksysteme, Lenkgefühl, Fahrdynamik von Kraftfahrzeugen. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013. doi: 10.1007/978-3-658-00977-9.
- [8] Robert Bosch Automotive Steering GmbH, „Steering System - EPS Lenkungen“, AS-Wiki.
<https://inside-docupedia.bosch.com/confluence/pages/viewpage.action?pageId=621514529> (zugegriffen 24. Mai 2021).
- [9] Deutsches Institut für Normung e.V., Hrsg., „ISO 26262:2018-2: Road vehicles - Functional safety“. Dezember 2018.
- [10] D. Dusterloh, „Funktionsoptimierung und Komplexitätsbeherrschung im Entwicklungsprozess mechatronischer Fahrwerkssysteme am Beispiel elektromechanischer Lenksysteme“, Dissertation, Universität Duisburg-Essen, Duisburg, 2018.
- [11] B. Bertsche, Hrsg., Zuverlässigkeit mechatronischer Systeme: Grundlagen und Bewertung in frühen Entwicklungsphasen. Berlin: Springer, 2009.
- [12] M. Maisch, Zuverlässigkeitsorientiertes Erprobungskonzept für Nutzfahrzeuggetriebe unter Berücksichtigung von Betriebsdaten. Stuttgart: IMA, 2007.
- [13] G. Härtler, Statistik für Ausfalldaten. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016. doi: 10.1007/978-3-662-50303-4.
- [14] L. Rüschendorf, Mathematische Statistik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014. doi: 10.1007/978-3-642-41997-3.
- [15] U. Hassler, Statistik im Bachelor-Studium. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018. doi: 10.1007/978-3-658-20965-0.
- [16] L. Meier, Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik: Eine Einführung für Verständnis, Intuition und Überblick. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2020. doi: 10.1007/978-3-662-61488-4.
- [17] A. Krolo, „Planung von Zuverlässigkeitstests mit weitreichender Berücksichtigung von Vorkenntnissen“, Dissertation, Inst. für Maschinenelemente, Stuttgart, 2004.
- [18] E. Haibach, Betriebsfestigkeit: Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung, 3., Korrigierte und Ergänzte Auflage. Berlin: Springer, 2006.
- [19] M. Köhler, S. Jenne, K. Pötter, und H. Zenner, Zählverfahren und Lastannahme in der Betriebsfestigkeit. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012. doi: 10.1007/978-3-642-13164-6.

- [20] S. Götz und K.-G. Eulitz, Betriebsfestigkeit: Bauteile sicher auslegen! Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020. doi: 10.1007/978-3-658-31169-8.
- [21] D. Joensson, „Betriebsfestigkeit“, Vorlesungs- Skript, HTW Berlin, Berlin, 2016. [Online]. Verfügbar unter: <https://docplayer.org/99493671-Vorlesungs-skript-betriebsfestigkeit-prof-dr-dieter-joensson-htw-berlin-2016-fachbereich-ingenieurwissenschaften-technik-und-leben.html>
- [22] T. Preussler, „10. Schadensakkumulation“, Vorlesungs- Skript, Fachhochschule Trier, Trier. Zugegriffen: 13. März 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.umwelt-campus.de/fileadmin/Umwelt-Campus/User/TPreussler/Download/Maschinendynamik_und_Betriebsfestigkeit/Foliensaetze/10_Schadensakkumulation.pdf
- [23] T. Amezquita, R. Hammond, M. Salazar, und B. Bras, „Characterizing the Remanufacturability of Engineering Systems“, gehalten auf der Proceedings 1995 ASME Advances in Design Automation Conference, Boston, Sep. 1995.
- [24] R. T. Lund, „Remanufacturing: The Experience of the United States and Implications for Developing Countries“, World Bank Technical Paper Number 31, Bd. UNDP Project Management Report Number 2, 1984. [Online]. Verfügbar unter: documents.worldbank.org/curated/en/792491468142480141/pdf/WTP310PUB0REPL00Box367874B00PUB-LIC0.pdf
- [25] H. C. Haynsworth und R. T. Lyons, „Remanufacturing By Design, The Missing Link“, Production and Inventory Managemet Journal, 1987.
- [26] Ardenham, Court, „What is Remanufacturing and how does it benefit jobs, the economy and the environment?“, What is Remanufacturing, 12. Dezember 2022. <https://www.remanufacturing.eu/about-remanufacturing.php> (zugegriffen 12. Dezember 2022).
- [27] F. Ahmadzadeh und J. Lundberg, „Remaining useful life estimation: review“, International Journal of System Assurance Engineering and Management, Bd. 5, Nr. 4, S. 461–474, Dez. 2014, doi: 10.1007/s13198-013-0195-0.
- [28] Y. Peng, M. Dong, und M. J. Zuo, „Current status of machine prognostics in condition-based maintenance: a review“, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Bd. 50, Nr. 1–4, S. 297–313, Sep. 2010, doi: 10.1007/s00170-009-2482-0.
- [29] X.-S. Si, W. Wang, C.-H. Hu, und D.-H. Zhou, „Remaining useful life estimation – A review on the statistical data driven approaches“, European Journal of Operational Research, Bd. 213, Nr. 1, S. 1–14, Aug. 2011, doi: 10.1016/j.ejor.2010.11.018.
- [30] Q. Wang, S. Zheng, A. Farahat, S. Serita, und C. Gupta, „Remaining Useful Life Estimation Using Functional Data Analysis“, Industrial AI Laboratory, Hitachi America, Ltd R&D., Santa Clara, CA, USA, 2019. Zugegriffen: 27. März 2020. [Online]. Verfügbar unter: <http://arxiv.org/abs/1904.06442>
- [31] J. Gokulachandran, „Prediction of Remaining Useful Life of used Components of Systems for Reuse“, Synopsis, Amrita School of Engineering, Tamil Nadu, Indien, 2012.
- [32] Y. Wu, W. Li, und P. Yang, „A Study of Fatigue Remaining Useful Life Assessment for Construction Machinery Part in Remanufacturing“, Procedia CIRP, Bd. 29, S. 758–763, 2015, doi: 10.1016/j.procir.2015.01.018.
- [33] J. M. Karandikar, N. H. Kim, und T. L. Schmitz, „Prediction of remaining useful life for fatigue-damaged structures using Bayesian inference“, Engineering Fracture Mechanics, Bd. 96, S. 588–605, Dez. 2012, doi: 10.1016/j.engfracmech.2012.09.013.
- [34] K. Fitzgibbon, R. Barker, T. Clayton, und N. Wilson, „A failure-forecast method based on Weibull and statistical-pattern analysis“, in Annual Reliability and Maintainability Symposium. 2002 Proceedings (Cat. No.02CH37318), Seattle, WA, USA, 2002, S. 516–521. doi: 10.1109/RAMS.2002.981696.

- [35] S. Kara, M. Mazhar, H. Kaebernick, und A. Ahmed, „Determining the Reuse Potential of Components Based on Life Cycle Data“, *CIRP Annals*, Bd. 54, Nr. 1, S. 1–4, 2005, doi: 10.1016/S0007-8506(07)60036-5.
- [36] M. I. Mazhar, S. Kara, und H. Kaebernick, „Reusability Assessment of Components in Consumer Products-A statistical and condition monitoring Data Analysis Strategy“, gehalten auf der 4th Australian LCA Conference, Sydney, Australia, 2005, S. 8.
- [37] M. I. Mazhar, S. Kara, und H. Kaebernick, „Remaining life estimation of used components in consumer products: Life cycle data analysis by Weibull and artificial neural networks“, *Journal of Operations Management*, Bd. 25, Nr. 6, S. 1184–1193, Nov. 2007, doi: 10.1016/j.jom.2007.01.021.
- [38] H. Khorasgani, G. Biswas, und S. Sankararaman, „Methodologies for system-level remaining useful life prediction“, *Reliability Engineering & System Safety*, Bd. 154, S. 8–18, Okt. 2016, doi: 10.1016/j.ress.2016.05.006.
- [39] L. H. Shu und W. C. Flowers, „Application of a design-for-remanufacture framework to the selection of product life-cycle fastening and joining methods“, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Bd. 15, Nr. 3, S. 179–190, Juni 1999, doi: 10.1016/S0736-5845(98)00032-5.
- [40] D. Mangun und D. L. Thurston, „Incorporating component reuse, remanufacture, and recycle into product portfolio design“, *IEEE Transactions on Engineering Management*, Bd. 49, Nr. 4, S. 479–490, Nov. 2002, doi: 10.1109/TEM.2002.807292.
- [41] Y. Umeda, T. Daimon, und S. Kondoh, „Proposal of Decision Support Method for Life Cycle Strategy by Estimating Value and Physical Lifetimes — Case Study —“, in 2005 4th International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, Tokyo, Japan, 2005, S. 606–613. doi: 10.1109/ECODIM.2005.1619308.
- [42] Y. Umeda, S. Kondoh, und T. Sugino, „Analysis of Reusability using ‘Marginal Reuse Rate’“, *Annals of the CIRP*, Bd. Vol. 55/1/2006, 2006.
- [43] S. Kondoh, H. Komoto, und K. Masui, „Interlinking Multiple Decision Variables Over Different Life Cycle Stages to Realize Effective Reuse and Recycling from a Strategic Viewpoint“, *Procedia CIRP*, Bd. 61, S. 245–250, 2017, doi: 10.1016/j.procir.2016.11.256.
- [44] S. G. Lee, S. W. Lye, und M. K. Khoo, „A Multi-Objective Methodology for Evaluating Product End-of-Life Options and Disassembly“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Bd. 18, Nr. 2, S. 148–156, Juli 2001, doi: 10.1007/s001700170086.
- [45] H. B. Lee, N. W. Cho, und Y. S. Hong, „A hierarchical end-of-life decision model for determining the economic levels of remanufacturing and disassembly under environmental regulations“, *Journal of Cleaner Production*, Bd. 18, Nr. 13, S. 1276–1283, Sep. 2010, doi: 10.1016/j.jclepro.2010.04.010.
- [46] M. Anityasari und H. Kaebernick, „A concept of reliability evaluation for reuse and remanufacturing“, *International Journal of Sustainable Manufacturing*, Bd. 1, Nr. 1/2, S. 3, 2008, doi: 10.1504/IJSM.2008.019224.
- [47] M. Anityasari, Han Bao, und H. Kaebernick, „Evaluation of product reusability based on a technical and economic model: a case study of televisions“, in *Proceedings of the 2005 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, 2005., New Orleans, LA, USA, 2005, S. 199–204. doi: 10.1109/ISEE.2005.1437024.
- [48] M. Anityasari, H. Kaebernick, und H. Bao, „Reuse in Action: A study of ‘Trade-In’ practices of electrical appliances in Indonesia“, gehalten auf der 1st International Conference on Operations and Supply Chain Management, Bali, 2005, S. 9.
- [49] M. Anityasari, H. Kaebernick, und S. Kara, „The Role of Warranty in the Reuse Strategy“, in *Advances in Life Cycle Engineering for Sustainable Manufacturing Businesses*, S. Takata und Y. Umeda, Hrsg. London: Springer London, 2007, S. 335–340. doi: 10.1007/978-1-84628-935-4_58.

- [50] X. Zhang, H. Zhang, Z. Jiang, und Y. Wang, „A decision-making approach for end-of-life strategies selection of used parts“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Bd. 87, Nr. 5–8, S. 1457–1464, Nov. 2016, doi: 10.1007/s00170-013-5234-0.
- [51] Y. Hu, S. Liu, H. Lu, und H. Zhang, „Remaining Useful Life Assessment and its Application in the Decision for Remanufacturing“, *Procedia CIRP*, Bd. 15, S. 212–217, 2014, doi: 10.1016/j.procir.2014.06.052.
- [52] Y. Hu, S. Liu, und H. Zhang, „Remanufacturing Decision Based on RUL Assessment“, *Procedia CIRP*, Bd. 29, S. 764–768, 2015, doi: 10.1016/j.procir.2015.01.027.
- [53] S. Freiberger, M. Albrecht, und J. Käufl, „Reverse Engineering Technologies for Remanufacturing of Automotive Systems Communicating via CAN Bus“, *Journal of Remanufacturing*, Bd. 1, Nr. 1, Dez. 2011, doi: 10.1186/2210-4690-1-6.
- [54] B. Weiler, T. Kassel, F. Kücükay, R. Deisinger, M. Hertweck, und F. Loogen, „Repräsentative Erprobung von Nutzfahrzeugen“, *ATZ*, S. 678–683, März 2010.
- [55] F. Kücükay, „3F-Methode, Requirement Engineering (Anforderungsermittlung)“, Braunschweig, Niedersachsen, Deutschland, 17. Juni 2010. Zugegriffen: 8. April 2020. [Online]. Verfügbar unter: http://www.iff.tu-braunschweig.de/fileadmin/files/forschung/3F-Methodik_dt.pdf
- [56] K. Dreßler, M. Speckert, R. Müller, und Ch. Weber, „Customer loads correlation in truck engineering“, *Fraunhofer- Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik, Kaiserslautern*, 151, 2009. Zugegriffen: 8. April 2020. [Online]. Verfügbar unter: http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-933368.pdf
- [57] M. Speckert, N. Ruf, K. Dreßler, R. Müller, C. Weber, und S. Weihe, „Ein neuer Ansatz zur Ermittlung von Erprobungslasten für sicherheitsrelevante Bauteile“, 14. VDI-Fachtagung Erprobung und Simulation in der Fahrzeugentwicklung - Mess und Versuchstechnik, Bd. 14, 2009.
- [58] A. Streit, K. Dreßler, M. Speckert, J. Lichter, T. Zenner, und P. Bach, „Anwendung statistischer Methoden zur Erstellung von Nutzungsprofilen für die Auslegung von Mobilbaggern“, *VDI- Verlag GmbH Düsseldorf*, Bd. Nr. 2065, S. 65–77, 2009.
- [59] C. Eckstein, „Ermittlung repräsentativer Lastkollektive zur Betriebsfestigkeit von Ackerschleppern“, *Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern*, 2017. Zugegriffen: 8. April 2020. [Online]. Verfügbar unter: https://kluedo.ub.uni-kl.de/frontdoor/deliver/index/docId/4882/file/Eckstein_2017+-+Repr%c3%a4sentative+Lastkollektive+f%c3%bcr+Ackerschlepper.pdf
- [60] E. W. U. Küppers, *Eine transdisziplinäre Einführung in die Welt der Kybernetik: Grundlagen, Modelle, Theorien und Praxisbeispiele*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019. doi: 10.1007/978-3-658-23725-7.
- [61] Kraftfahrt Bundesamt, „Fahrzeugalter - Bestand in den Jahren 2010 bis 2019 nach ausgewählten Fahrzeugklassen mit dem Durchschnittsalter der Fahrzeuge“. https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Fahrzeugalter/b_alter_kfz_z.html?nn=645784 (zugegriffen 28. April 2019).
- [62] AAMPACT e.V. und The International Independent Aftermarket Association, „Durchschnittliche Fahrleistung Pkw Deutschland“. <https://www.mein-autolexikon.de/magazin/tipps-und-tricks-fuer-autofahrer/fahrleistung-bundesland-fahrzeugalter-geschlecht-alter.html> (zugegriffen 4. Mai 2020).
- [63] G. Papadimitriou und L. Ntziachristos, „TRACCS - Transport data collection supporting the quantitative analysis of measures relating to transport and climate change.“ <https://traccs.emisia.com/download.php> (zugegriffen 11. Mai 2020).
- [64] H.-L. Ross, *Funktionale Sicherheit im Automobil: ISO 26262, Systemengineering auf Basis eines Sicherheitslebenszyklus und bewährten Managementsystemen*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2014.

- [65] ACEA - European Automobile Manufacturers' Association, „Average Vehicle Age“. <https://www.acea.be/statistics/tag/category/average-vehicle-age> (zugegriffen 11. Mai 2020).
- [66] Dr. W. Tiesbohenkamp, „UN-Region Europa - Das Europa der Vereinten Nationen“. https://www.lexas.de/regionen/un_europa.aspx (zugegriffen 10. Mai 2020).
- [67] Eurostat, „Data Explorer“. <http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/submitViewTableAction.do> (zugegriffen 10. Mai 2020).
- [68] Kraftfahrt Bundesamt, „Bestand in den Jahren 2010 bis 2019 nach ausgewählten Fahrzeugklassen mit dem Durchschnittsalter der Fahrzeuge“. https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Fahrzeugalter/2019/2019_b_alter_kfz_z.html?nn=2731444 (zugegriffen 11. Mai 2020).
- [69] Eurostat, „Personenkraftwagen nach Alter“. https://ec.europa.eu/eurostat/de/web/products-datasets/product?code=road_eqs_carage (zugegriffen 4. Mai 2019).
- [70] ACEA - European Automobile Manufacturers' Association, „ACEA Report Vehicles in use Europe 2019“, 2019. https://www.acea.be/uploads/publications/ACEA_Report_Vehicles_in_use-Europe_2019.pdf (zugegriffen 11. Mai 2020).
- [71] M. Carlier, „Average age of light vehicles in the U.S. 1995-2016 1 Statistic“, Statista. <https://www.statista.com/statistics/261877/average-age-of-passenger-cars-in-the-united-states/> (zugegriffen 11. Mai 2020).
- [72] M. Carlier, „Automobile registrations - United States 2016 | Statistic“, Statista. <https://www.statista.com/statistics/192998/registered-passenger-cars-in-the-united-states-since-1975/> (zugegriffen 4. Mai 2019).
- [73] Bureau of Transportation Statistics, „Average Age of Automobiles and Trucks in Operation in the United States“. <https://www.bts.gov/content/average-age-automobiles-and-trucks-operation-united-states> (zugegriffen 4. Mai 2019).
- [74] Bureau of Transportation Statistics, „Table 1-26: Average Age of Automobiles and Trucks in Operation in the United States“. https://www.bts.gov/archive/publications/national_transportation_statistics/table_01_26 (zugegriffen 11. Mai 2020).
- [75] M. Carlier, „Forecast: U.S. average age of vehicles 2019“, Statista. <https://www.statista.com/statistics/1266927/us-average-annual-mileage-of-vehicles-in-use/> (zugegriffen 4. Mai 2019).
- [76] Kraftfahrt-Bundesamt, „Statistik Kraftverkehr 2016“, 2016. https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/VerkehrKilometer/2016/2016_verkehr_in_kilometern_node.html (zugegriffen 4. Mai 2019).
- [77] Federal Highway Administration, „Average Annual Miles per Driver by Age Group“. <https://www.fhwa.dot.gov/ohim/onh00/bar8.htm> (zugegriffen 10. Mai 2019).
- [78] M. Carlier, „U.S.: average mileage of vehicles in use 2020“, Statista, 2021. <https://www.statista.com/statistics/1266927/us-average-annual-mileage-of-vehicles-in-use/> (zugegriffen 9. Februar 2022).
- [79] Robert Bosch GmbH, „Systemmappe Lenksysteme PKW“, Bosch Mobility Solutions, 2020. <https://de.scribd.com/document/384357560/As-Systemmappe-Servolectric-E-Lowres-20150513> (zugegriffen 17. Mai 2020).
- [80] M. Wächter, C. Müller, und A. Esderts, Angewandter Festigkeitsnachweis nach FKM-Richtlinie. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017. doi: 10.1007/978-3-658-17459-0.
- [81] Wirtschafts- und Sozialwissenschaftliche Fakultät, „Statistik für Sozialwissenschaften Multivariate lineare Regression“, Vorlesungs- Skript, Universität Köln, Köln, 2020. Zugegriffen: 24. Juni 2020. [Online]. Verfügbar unter: www.uni-koeln.de/wiso-fak/fisoz/Mitarbeiter/Best/S10.pdf

- [82] „2. Korrelation, Linear Regression und multiple Regression“, Vorlesungs- Skript, Ruhr - Universität- Bochum, Bochum, 2019. Zugegriffen: 2. November 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ruhr-uni-bochum.de/imperia/md/content/mathematik3/lehre/ss09/statmethlehre2/teil2-regression220609.pdf>
- [83] „Konfidenzintervalle, Hypothesentests, und einfache Prognosen“, Vorlesungs- Skript, Universität Innsbruck, Innsbruck, 2019. Zugegriffen: 2. November 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.uibk.ac.at/econometrics/einf/kap05.pdf>
- [84] Deutsches Institut für Normung e.V., „DIN_45667_1969-10:1996-10 Klassierverfahren für das Erfassen regelloser Schwingungen“. 1969.
- [85] A. Middendorf, „Lebensdauerprognostik unter Berücksichtigung realer Belastungen am Beispiel von Bondverbindungen bei thermomechanischen Wechselbeanspruchungen“, Dissertation, Technische Universität Berlin, Berlin, 2010. Zugegriffen: 24. Juni 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://d-nb.info/1004395345/34>
- [86] C. Griebhaber, R. Schroth, und M. Kopp, „Methoden für eine bessere Zuverlässigkeit von E-Motoren mit optimierten Leistungshalbleitern“, ATZelektronik, Bd. 13, Nr. 4, S. 52–57, Aug. 2018, doi: 10.1007/s35658-018-0046-5.
- [87] R. Higgelke, „Lebensdauer, MTBF und Zuverlässigkeit: Fit & Forget“. /design-el-ektronik/power/fit-forget-133979.html (zugegriffen 10. Februar 2019).
- [88] Burn-In, F. Jensen, N. Petersen, und Wiley and Sons, „Reliability and the electronic Engineer- Activation Energy“, 1982. https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwig5Mmg6Yr3AhVKLTQIHQ_7DIMQFnoE-CAgQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.renesas.com%2Fus%2Fen%2Fdocument%2Fapn%2Fan1104-elantec-reliability-reliability-and-electronic-engineer&usg=AOvVaw0VU16MMSdqoyuNG08BVT-_ (zugegriffen 11. April 2022).
- [89] P. Pfeffer und M. Harrer, „Anforderungen an die Lenkung – ein Überblick“, in Lenkungshandbuch, P. Pfeffer und M. Harrer, Hrsg. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2011, S. 43–50. doi: 10.1007/978-3-8348-8167-0_3.
- [90] P. Pfeffer und M. Harrer, „Auslegung von Lenkungen“, in Lenkungshandbuch, P. Pfeffer und M. Harrer, Hrsg. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2011, S. 143–160. doi: 10.1007/978-3-8348-8167-0_8.
- [91] V. Schmidt, „Elementare Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik“, Vorlesungs-Skript, Universität Ulm, Ulm, 2009. Zugegriffen: 19. Juni 2019. [Online]. Verfügbar unter: https://www.uni-ulm.de/fileadmin/web-site_uni_ulm/mawi.inst.110/lehre/ws08/wr/WR_Skript_neu.pdf
- [92] „Klimadiagramme und Klimatabellen für Europa“. <https://www.wetter.de/klima/europaco6.html> (zugegriffen 28. Juni 2020).
- [93] D. Gräfe, „Abbildung Rollenmaß bei Außenverzahnung“. https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/67/Rollenma%C3%9F_bei_Au%C3%9Fenverzahnung.svg (zugegriffen 4. Juli 2020).
- [94] M. Pech, „Tragfähigkeit und Zahnverformung von Schraubadgetrieben der Werkstoffpaarung Stahl/Kunststoff“, Ruhr - Universität- Bochum, Bochum, 2011.
- [95] Deutsches Institut für Normung e.V., „DIN_3996: 2012-09_Tragfähigkeitsberechnung Schneckengetriebe“. 2012.
- [96] E. Baur, T. A. Osswald, N. Rudolph, und H. Saechtling, Saechtling Kunststoff Taschenbuch. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2013.
- [97] Toray Industries. INC., „Technical Information about heat-resistant nylon resins CM1026 and CM3006 -General properties“, 2019. https://www.toray.jp/plastics/en/amilan/technical/tec_021.html (zugegriffen 12. Juli 2020).

- 
- [98] BASF, „Ultramid (PA) Hauptbroschüre“, 2020. <https://docplayer.org/11017229-Ultramid-pa-hauptbroschuere-ultramid-im-internet-www-ultramid-de.html> (zugegriffen 12. Juli 2020).
- [99] A. Piantoni u. a., „Modelling and simulation of rack-pinion steering systems with manufacturing errors for performance prediction“, *IJVSMT*, Bd. 13, Nr. 2, S. 178, 2018, doi: 10.1504/IJVSMT.2018.10019728.
- [100] S. Richter, *Statistisches und maschinelles Lernen: Gängige Verfahren im Überblick*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019. doi: 10.1007/978-3-662-59354-7.