

Kevin Lucan

Methodische Ermittlung von repräsentativen Lastkollektiven am Beispiel der Nutzfahrzeugbremse

D 93
ISBN 978-3-936100-12-9

Institut für Maschinenelemente

Antriebs-, Dichtungs-, Schienenfahrzeug- u. Zuverlässigkeitstechnik

Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 9
70569 Stuttgart
Tel. (0711) 685 – 66170

Prof. Dr.-Ing. B. Bertsche, Ordinarius und Direktor

Methodische Ermittlung von repräsentativen Lastkollektiven am Beispiel der Nutzfahrzeugbremse

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte
Abhandlung

Vorgelegt von

Dipl.-Ing. Kevin Lucan

aus Herrenberg

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Bernd Bertsche

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Ferit Küçükay

Tag der mündlichen Prüfung: 01.06.2021

Institut für Maschinenelemente der Universität Stuttgart
2021

Meinen Eltern gewidmet

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter des Instituts für Maschinenelemente (IMA) und im Rahmen des Arbeitskreises „Standard Load Spectra for Commercial Vehicle Brakes“ (CV-Brakes).

Mein ganz besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Professor Dr.-Ing. Bernd Bertsche. Sein mir entgegengebrachtes Vertrauen, die Unterstützung und das von ihm geförderte Institutsklima waren wesentliche Voraussetzungen für die Entstehung dieser Arbeit.

Herrn Professor Dr.-Ing Ferit Küçükay danke ich für die Übernahme des Mitberichts und die kritische Durchsicht meiner Arbeit.

Bedanken möchte ich mich auch beim Arbeitskreis CV-Brakes für die fachlichen Diskussionen und die gute Zusammenarbeit.

Mein großer Dank gilt außerdem allen Kolleginnen und Kollegen des Instituts für Maschinenelemente für das freundschaftliche und produktive Arbeitsklima. Hervorheben möchte ich an dieser Stelle Matthias Stohrer und Mark Henß, die mich zu Beginn des Arbeitskreises „CV-Brakes“ tatkräftig unterstützt haben. Außerdem danke ich Martin Dazer, Martin Diesch und Alexander Kremer für die fachlichen und außerfachlichen Diskussionen. Mein Dank gilt auch allen wissenschaftlichen Hilfskräften, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Herzlichst bedanke ich mich bei meinen Eltern für die Unterstützung während Schulzeit und Studium, was diese Arbeit erst ermöglicht hat. Mein letzter Dank gilt meiner Partnerin Lisa für Ihren Rückhalt und Ihre Geduld während der Entstehung dieser Arbeit.

Herrenberg im Juni 2021

Kevin Lucan

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
Inhaltsverzeichnis	VII
Verzeichnis der Abkürzungen und Formelzeichen	X
Abstract	XIII
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation und Problemstellung	1
1.2 Ziele dieser Arbeit	3
1.3 Aufbau der Arbeit	3
2 Grundlagen	5
2.1 Grundbegriffe der Statistik und Zuverlässigkeitstechnik	5
2.2 Statistische Verteilungsfunktionen	8
2.2.1 Normalverteilung	9
2.2.2 Logarithmische Normalverteilung	10
2.2.3 Weibullverteilung	10
2.3 Lastannahme und Laststandards	12
2.3.1 Belastungs-Zeit-Funktion	12
2.3.2 Lastkollektive	13
2.3.3 Laststandards	16
2.4 Konzepte der Lebensdauerberechnung	17
2.4.1 Stress-Strength Interference	18
2.4.2 Schadensakkumulation	19

3	Entwicklung der Methodik	22
3.1	Vorgehensweise zur Entwicklung der Methodik	22
3.2	Forschungsziel	23
3.3	Deskriptive Studie zu repräsentativen Lastkollektiven	24
3.3.1	Repräsentative Lastkollektive.....	25
3.3.2	Konzepte zur Ermittlung repräsentativer Lastkollektive.....	27
3.3.3	Datengrundlage für die Lastkollektivermittlung	32
3.3.4	Fazit der deskriptiven Studie	35
3.4	Anforderungen an die Methodik	37
3.4.1	Funktionale Anforderungen.....	38
3.4.2	Allgemeine Anforderungen	40
3.4.3	Zusammenfassung der Anforderungen.....	42
3.5	Konzeption der Methodik.....	42
3.5.1	Lösungsfindung.....	42
3.5.2	Aufbau der Methodik	44
4	Methodik zur Lastkollektivermittlung	46
4.1	System- und Lastanalyse	48
4.1.1	Systemanalyse.....	48
4.1.2	Lastanalyse.....	51
4.1.3	Bestimmung der relevanten Lasten.....	54
4.2	Nutzraumanalyse.....	55
4.2.1	Einsatzartensammlung	56
4.2.2	Umgang mit Missbrauch	58
4.2.3	Ermittlung des relevanten Nutzraums	61
4.3	Zielsetzung und Datenspezifikation.....	62
4.3.1	Zielsetzung der Lastkollektivermittlung	63
4.3.2	Auswahl der Datenquelle	66
4.3.3	Datenspezifikation	68
4.4	Repräsentative Lastkollektivermittlung.....	70
4.4.1	Datenaufbereitung.....	71
4.4.2	Einsatz-Klassifikation	75
4.4.3	Lastkollektivermittlung	79
5	Anwendungsbeispiel Nutzfahrzeugbremse	90
5.1	Die Nutzfahrzeugbremse.....	90
5.2	System- und Lastanalyse	92
5.2.1	Systemanalyse.....	92

5.2.2	Lastanalyse	94
5.2.3	Bestimmung der relevanten Lasten	95
5.3	Nutzraumanalyse	97
5.3.1	Einsatzartensammlung	98
5.3.2	Umgang mit Missbrauch	99
5.3.3	Ermittlung des relevanten Nutzraums.....	101
5.4	Zielsetzung und Datenspezifikation	104
5.4.1	Zielsetzung der Lastkollektivermittlung.....	105
5.4.2	Auswahl der Datengrundlage	105
5.4.3	Datenspezifikation.....	105
5.5	Repräsentative Lastkollektivermittlung.....	110
5.5.1	Datenaufbereitung.....	111
5.5.2	Einsatzklassifikation.....	112
5.5.3	Lastkollektivermittlung.....	113
5.6	Zusammenfassung und Fazit.....	118
6	Zusammenfassung und Ausblick	120
7	Literaturverzeichnis	123
8	Anhang	131
8.1	Lastkollektive der Radbremse für Trailer	131
8.2	Lastkollektive der Radbremse für NFZ und Busse.....	133

Verzeichnis der Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen

AK CV-Brakes	Arbeitskreis „Standard Load Spectra for Commercial Vehicle Brakes“
BBA	Betriebsbremsbetätigung
BPZ	Bereichspaarzählung
D	Dauerfestigkeitsbereich der Wöhlerlinie
DRM	Design Research Methodology
EBS	Elektronisches Bremssystem
FBA	Federspeicherbremsbetätigung (Parkbremse)
KGÜZ	Klassengrenzüberschreitungszählung
NFZ	Nutzfahrzeug
MCS	Monte-Carlo-Simulation
POT	Peak Over Threshold Methode
PSD	Frequenzspektrum
RZ	Rainflow-Zählverfahren
S	Quasistatischer Bereich der Wöhlerlinie
SAH	Lineare Schadensakkumulationshypothese
SSI	Stress-Strength Interference
Z	Zeitfestigkeitsbereich der Wöhlerlinie

Formelzeichen

\bar{x}	Arithmetischer Mittelwert
μ	Lageparameter

b	Weibull-Formparameter
c	Cluster-Anzahl
D	Gesamtschädigung
D_i	Teilschädigung
$D_{p,PA}$	Quantil-Schädigungswert bei geforderter Aussagewahrscheinlichkeit
e	Extrapolationsfaktor
$F(t)$	Ausfallwahrscheinlichkeit, Verteilungsfunktion
$f(t)$	Dichtefunktion
f_B	Stochastische Verteilung der Belastung
f_W	Stochastische Verteilung der Belastbarkeit
k	Wöhlerexponent
n	Stichprobenumfang
N_E	Ersatz-Schwingspielzahl
N_i	Ertragbare Schwingspielzahl
n_i	Tatsächlichen Schwingspielzahl
N_L	Schwingspielzahl der gesamten Lebensdauer
N_M	Gemessene Schwingspielzahl
p	Quantil in Prozent
P_A	Aussagewahrscheinlichkeit
P_C	Simulativ bestimmtes Vertrauensniveau
P_E	Simulativ bestimmter p -%-Einsatz
$R(t)$	Zuverlässigkeit
s	Empirische Standardabweichung
s^2	Empirische Varianz
T	Charakteristische Lebensdauer
x_p	Wert eines p -%-Quantils

$\lambda(t)$	Ausfallrate
σ	Standardabweichung
σ_a	Spannungsamplitude
σ_E	Ersatz-Spannungsamplitude
η_{mech}	Wirkungsgrad NFZ-Bremse
i	Hebelübersetzung
A_{Zyl}	Zylinderfläche
C^*	Bremsenkennwert
r_{eff}	Wirksamer Reibradius

Abstract

Methodical Determination of Representative Load Spectra at the Example of the Commercial Vehicle Brake

For product design as well as for reliability testing, load spectra are of high importance. They are key factors for component dimensioning and reliability demonstration tests. Load spectra have to represent the customer usage of the product in field, to make the results of reliability demonstration tests valid and enable a sustainable product design for the field application. Thus, the result of a reliability demonstration with a load spectrum that is not representative for the actual field application is not meaningful. In worst case non-representative load spectra in the tests can lead to an unexpectedly high failure probability and recall action for the product in field. Already at the beginning of the development process load spectra are crucial, since only representative load spectra allow a component dimensioning without safety factors and thus lightweight design.

This background makes representative load spectra to key factors for the development of reliable and sustainable products. Despite this importance, there is no consistent methodology for the determination of representative load spectra. Therefore, this thesis introduces a methodology for the determination of representative load spectra.

The methodology was developed using the design research methodology (DRM), beginning with the analysis of the state of the art for representative load spectra. The analysis showed, there is no comprehensive and consistent methodology for determining representative load spectra. Based on this initial situation, development priorities for the methodology were derived and specified as requirements. Based on these requirements the methodology for the determination of representative load spectra was developed and validated at the example of the commercial vehicle brake.

The methodology is divided into four phases, described in the following. In the first phase "System and Load Analysis" the definition of the system is carried out. Main objective of this phase is the determination of the relevant loads. In phase 2 "Use Case Parameter Space Analysis" the use cases are collected and the relevant use case parameter space is determined considering the relevant loads. For this determination a

guideline was developed to distinguish between normal use, special use and misuse. In phase 3 "Objective and Data Specification" the objective of the load spectra determination and the required data base including measurement variables are specified. In phase 4 "Representative Load Spectra Determination" the load spectrum determination takes place. For this purpose, the data are prepared and measurement inaccuracies are corrected or extracted. Then the data are classified into the application classes for the load spectrum determination. The representative load spectrum determination is carried out on a design-dependent or design-independent basis. The load spectrum determination using base load spectra and representative application usage distributions is also considered.

The developed methodology was applied for validation at the example of the commercial vehicle brake. This application was carried out within the working group "Standard Load Spectra for Commercial Vehicle Brakes". Participants of this working group were: BPW, DAF Trucks, Daimler, Haldex, IVECO, Knorr-Bremse, MAN, Meritor, SAF-Holland und WABCO. Within this working group, representative load spectra for the commercial vehicle brake were developed. Within the scope of this working group, it was shown, how the relevant loads clamping force and braking torque could be determined using the developed methodology. The collected use case parameter space was reduced to the relevant use case parameter space for the data specification. The defined objective was the determination of application-specific load spectra based on the basic braking maneuvers during forward driving, reversing, standstill and parking. For this determination operating data were specified as necessary database. The load spectrum determination itself was independent of the brake design. The determined load spectra were validated on the basis of a measurement campaign at the customer's site. The result was published as a technical recommendation by AK CV-Brakes.

The successful application of the methodology shows that the introduced method is suitable for determining representative load spectra. In addition, the application example shows that the methodology fulfils the requirements and thus represents a comprehensive and consistent procedure for determining representative load spectra.

1 Einleitung

Die Zuverlässigkeit von Produkten ist eine wichtige Anforderung an die Produktentwicklung. Wird diese Anforderung nicht erfüllt, ist der Kunde mit Rückrufaktionen konfrontiert. Dass Rückrufaktionen häufiger werden, zeigt das Beispiel der Fahrzeugbranche. So war 2018 ein neues Rekordjahr hinsichtlich Rückrufaktionen von Fahrzeugen in Deutschland [GAN19]. Seit 2009 stieg die Anzahl der Rückrufaktionen um 284 % an. Die Gründe hierfür beschreiben Bertsche et. al bereits im Jahr 2004: Hauptinflüsse sind die steigende Komplexität und zunehmenden Funktionalitäten der Produkte, bei gleichzeitig verringerten Entwicklungskosten und -zeiten [BL04]. Der steigende Umfang an Funktionalitäten im Automobil ist Teil des Digitalisierungstrends, der Elektrifizierung des Antriebsstranges und des autonomen Fahrens in der Automobilindustrie [FVS19]. Um den Trend der steigenden Rückrufzahlen zu stoppen, muss neben einer optimierten Produktauslegung die Zuverlässigkeit statistisch nachgewiesen werden.

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Die Zuverlässigkeit eines Produktes kann durch die Zuverlässigkeitserprobung auf Prüfständen oder im Feld nachgewiesen werden. Für diesen Nachweis ist eine Zuverlässigkeitstestplanung erforderlich, die sich mit den zentralen Fragestellungen auseinandersetzt: „Wie viele Prüflinge werden benötigt?“ und „Wie lange muss getestet werden?“. Für eine aussagekräftige Zuverlässigkeitserprobung reicht eine Beantwortung dieser Fragen alleine nicht aus. Eine aussagekräftige Zuverlässigkeitserprobung steht auf den Säulen „Stichprobe“, „Prüfbedingungen“ und „Lastkollektive“, wie in Abbildung 1.1 dargestellt ist. Bei der Auswahl der Stichprobe muss dafür gesorgt werden, dass die Prüflinge aus der Serienfertigung stammen und aus dieser zufällig entnommen werden. Hinsichtlich der Prüfbedingungen ist es insbesondere bei Subsystem- oder Komponententests unabdingbar dieselbe Umgebung und Belastung, wie im Gesamtsystem abzubilden und die Streuung von Prüfstand und Messequipment zu beherrschen. Lastkollektive beschreiben Form und Häufigkeit der Lasten

bei der Zuverlässigkeitserprobung. Für einen aussagekräftigen Zuverlässigkeitsnachweis sind sie so zu definieren, dass sie der Feldbelastung durch den Kunden entsprechen. Das bedeutet, dass die Lastkollektive repräsentativ für den Kundeneinsatz des Produktes sein müssen. Da der Kundeneinsatz stark variieren kann, ist bereits die passende Definition eines repräsentativen Lastkollektives essentiell für eine aussagekräftige Zuverlässigkeitserprobung. Dies gilt insbesondere für die Erprobung von Subsystemen, da diese häufig in verschiedenen Gesamtsystemen betrieben werden, wodurch sich die Einsatzvariabilität weiter erhöht. In diesem Zusammenhang stellt sich jedoch die Frage welchen Einsatz oder welche Einsätze Lastkollektive abbilden sollen. Im Stand der Technik gibt es hierfür keine einheitliche Definition, obwohl sich gerade die Betriebsfestigkeit mit der Fragestellung der Lastannahme und standardisierter Lastkollektive auseinandergesetzt hat [HBK05], [HFR11].

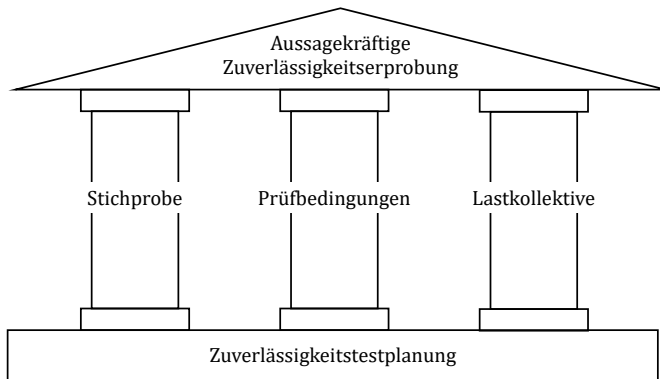


Abbildung 1.1: Aussagekräftige Zuverlässigkeitserprobung

Repräsentative Lastkollektive sind nicht nur für die Zuverlässigkeitserprobung von großer Bedeutung. Bereits in der Produktentwicklung ist die Lastannahme für die Auslegung der Produkte erforderlich. Hier werden nach wie vor hohe Sicherheitsfaktoren verwendet, da die Feldbelastung häufig nicht ausreichend genau bekannt ist [HFR11]. Dieser Zusammenhang macht repräsentative Lastkollektive zur Grundvoraussetzung für eine optimale Produktauslegung. Die Ermittlung repräsentativer Lastkollektive kann entsprechend der Variabilität der Einsätze und der relevanten Lasten beliebig umfangreich und komplex werden. In diesem Fall wird die Abdeckung der Einsätze eines Produktes durch eine Messkampagne extrem umfangreich. Aus dieser Problematik heraus ergibt sich die Fragestellung wie die notwendige Datenbasis reduziert werden kann, ohne die Repräsentativität der Lastkollektive zu beeinflussen.

Denn diese ist sowohl für die Produktauslegung als auch für die Zuverlässigkeitserprobung von entscheidender Bedeutung. Nur repräsentative Lastkollektive ermöglichen eine ressourceneffiziente Produktauslegung und eine aussagekräftige Zuverlässigkeitserprobung.

1.2 Ziele dieser Arbeit

Aufgrund der geschilderten Bedeutung repräsentativer Lastkollektive für Produktauslegung und Zuverlässigkeitserprobung ist es das Ziel dieser Arbeit eine Methodik für die Ermittlung repräsentativer Lastkollektive zu entwickeln, um dadurch einen Beitrag zur Zuverlässigkeitserprobung und einer belastungsgerechten Produktauslegung zu leisten. Die Methodik soll als Leitfaden für Anwender aus unterschiedlichen Branchen dienen und soll in Abhängigkeit von Zielsetzung und Datenverfügbarkeit variabel anwendbar sein. Dies gilt sowohl für Gesamtsystem- als auch für Subsystem-Hersteller, die in der Lastkollektivermittlung hinsichtlich der benötigten Messdaten nur eingeschränkte Möglichkeiten besitzen. Ein Teilziel der Methodik ist eine effiziente Lastkollektivermittlung, was vor allem für die Definition der benötigten Daten und dem damit verbundenen Messaufwand von großer Bedeutung ist. Darüber hinaus sind die notwendigen Daten für die Lastkollektivermittlung so zu spezifizieren, dass ein günstiges Aufwand-Nutzen-Verhältnis gewählt werden kann. Ein weiteres Teilziel in diesem Zusammenhang ist die Definition der notwendigen Messgrößen sowohl zur Last- als auch zur Einsatzarten-Klassifizierung. Im Zusammenhang mit der Klassifizierung von verschiedenen Einsätzen oder Kundengruppen sollen außerdem explorative Data Mining Methoden in dieser Methodik integriert werden, um auch bei sehr umfangreichen Datenmengen die Anwendbarkeit der Methodik zu ermöglichen. Die Lastkollektivermittlung selbst, soll auf Grundlage einer statistischen Analyse sowohl designabhängig als auch designunabhängig erfolgen können.

1.3 Aufbau der Arbeit

Diese Arbeit untergliedert sich, wie in Abbildung 1.2 dargestellt, in sechs Kapitel. Zunächst werden die notwendigen Grundlagen beschrieben. Ein Fokus liegt dabei auf Lastkollektiven und deren Annahme. In Kapitel 3 erfolgt die Entwicklung der Methodik auf Grundlage der Design Research Methode [BC09]. Hierfür wird zunächst betrachtet, wie repräsentative Lastkollektive im Stand der Technik definiert werden.

Weiterführend werden bestehende Konzepte der repräsentativen Lastkollektivermittlung untersucht und bewertet. Diese Bewertung wird genutzt, um funktionale sowie allgemeine Anforderungen für die Konzeption der Methodik abzuleiten. Kapitel 4 stellt die entwickelte Methodik und ihre vier Phasen detailliert vor. Unterkapitel 4.1 beschreibt, wie die relevanten Lasten für ein Produkt ermittelt werden. Diese werden in der Phase „Nutzaumanalyse“ genutzt, um einen relevanten Nutzraum zu ermitteln, was in Unterkapitel 4.2 erläutert wird. Außerdem wird hier beschrieben wie Missbrauchsfälle systematisch klassifiziert werden können. Die Ableitung der notwendigen Daten für die relevanten Lasten und den relevanten Nutzraum wird in 4.3 beschrieben. Die letzte Phase der Methodik wird in Unterkapitel 4.4. beschrieben und umfasst: Datenaufbereitung, Einsatzklassifikation und Lastkollektivermittlung. Hier werden Methoden beschrieben mit denen spezifizierte Einsatzarten identifiziert werden können. Außerdem wird der Umgang mit fehlerhaften Daten und die Extrapolation von Lastkollektiven diskutiert. Fokus des Unterkapitels ist jedoch die Lastkollektivermittlung, die designabhängig als auch -unabhängig beschrieben ist. Die Anwendung der Methodik wird in Kapitel 5 am Beispiel der Nutzfahrzeugbremse beschrieben. Abschließend folgt die Zusammenfassung der Ergebnisse und der Ausblick auf weiterführende Forschungsschwerpunkte.



Abbildung 1.2: Aufbau der Arbeit

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die Grundlagen für diese Arbeit beschrieben. Beginnend mit der Einführung in die Grundbegriffe von Statistik und Zuverlässigkeit, wird folgend der relevante Stand von Forschung und Technik aus der Zuverlässigkeitstechnik und der Betriebsfestigkeit eingeführt.

2.1 Grundbegriffe der Statistik und Zuverlässigkeitstechnik

Die nachfolgenden Grundbegriffe und Maßzahlen dienen als Einführung in die Statistik und die Zuverlässigkeitstechnik. Ihre Beschreibung erfolgt maßgeblich auf Grundlage von: [BL04], [CK17], [VDA16], [KJP12], [BIR14].

Mittelwert, Varianz und Standardabweichung

Der arithmetische Mittelwert \bar{x} einer Stichprobe gibt als Lageparameter an, wo die betrachtete Stichprobe der Größe n im Mittel liegt. Er wird mit nachfolgender Gleichung berechnet:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.1)$$

Ein großer Nachteil des Mittelwertes ist seine Empfindlichkeit gegenüber Ausreißern.

Die Varianz s^2 ist ein Maß für die Streuung einer Stichprobe. Sie beschreibt die Abweichung der Einzelwerte vom arithmetischen Mittelwert und lässt sich wie folgt berechnen:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (2.2)$$

Da bei der Varianz die Abweichungen vom Mittelwert quadriert aufsummiert werden, liegt die Streuung nicht in derselben Dimension wie die Messwerte vor. Die Standardabweichung s hingegen berechnet sich nach Gleichung (2.3) aus der Wurzel der Varianz und liegt somit in derselben Dimension wie die Messwerte vor.

$$s = \sqrt{s^2} \quad (2.3)$$

Median und Quantil

Der Median ist wie der Mittelwert als Lageparameter einzuordnen. Er beschreibt dabei den Wert der genau zwischen den 50% der kleinsten und 50% der größten Einzelwerte einer Stichprobe liegt. Dadurch ist der Median im Vergleich zum Mittelwert unempfindlich gegen Ausreißer. Der Median kann verallgemeinert auch als 50%-Quantil bezeichnet werden. Ein Quantil gibt den p -%-Wert einer Stichprobe oder Verteilung an. Der Wert p liegt dabei zwischen 0% und 100%. Die Berechnung eines Quantils erfolgt bei statistischen Verteilungen direkt aus der geschätzten Verteilungsfunktion oder rein empirisch aus einer Stichprobe mit folgender Gleichung nach [HS18], wobei der Operator $\lceil \cdot \rceil$ die kleinste ganze Zahl, die nicht kleiner als das Ergebnis aus $n \cdot p$ ist:

$$x_p = \begin{cases} x_k: k = \lceil n \cdot p \rceil & \text{wenn } n \cdot p \text{ nicht ganzzahlig ist} \\ \frac{1}{2}(x_k + x_{k+1}): k = n \cdot p & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.4)$$

Zuverlässigkeit

Die Zuverlässigkeit $R(t)$ von Produkten ist nach [BL04] und [BIR14] definiert als die Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein Produkt unter gegebenen Betriebsbedingungen während einer definierten Zeitspanne nicht ausfällt. Vergleichbare Definitionen finden sich auch in folgenden Normen und Richtlinien: [VDA16], [DIN90], [IEC15]. Die Zuverlässigkeit ist das Komplement der Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t)$, die in der Statistik allgemein als Verteilungsfunktion bezeichnet wird:

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (2.5)$$

Ausfallrate und Ausfallarten

Die Ausfallrate $\lambda(t)$ ist definiert als das Verhältnis der ausgefallenen zu den noch intakten Produkten zum Zeitpunkt t . Sie beschreibt das Risiko des Ausfalls eines Produktes, das bis zum Zeitpunkt t überlebt hat. Wird die Fehlerrate über den kompletten Lebenszyklus eines Produktes betrachtet, ergibt sich ein Verlauf, der in seiner Form

einer Badewanne ähnelt und deshalb als Badewannenkurve bezeichnet wird. Die Badewannenkurve in Abbildung 2.1 veranschaulicht in ihren drei Bereichen die drei typischen Ausfallarten: Früh-, Zufalls-, und Verschleißausfall. Nimmt die Fehlerrate ab, treten Frühausfälle wie Montage-, Fertigungs- oder Konstruktionsfehler auf. Zufallsausfälle treten im Bereich einer konstanten Fehlerrate auf und folgen keiner Systematik. Eine mit der Zeit zunehmende Fehlerrate ist typisch für Verschleiß- und Ermüdungsausfälle. Sie definieren im Allgemeinen die geplante Lebensdauer eines Produktes.

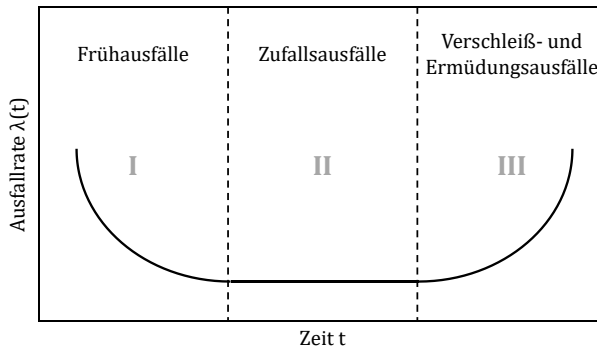


Abbildung 2.1: Die drei Bereiche der Badewannenkurve nach [BL04]

Belastung und Beanspruchung

Als Belastung werden die von außen auf ein Produkt einwirkenden Kräfte und Momente bezeichnet. Aufgrund der Produktgestalt resultieren aus den von außen wirkenden Belastungen innere Kräfte und Momente, die lokale Spannungen in den Bauteilen verursachen. Diese inneren Kräfte, Momente und Spannungen werden als Beanspruchung bezeichnet. Die Belastung und die Beanspruchung sind maßgebliche Einflussgrößen auf die Zuverlässigkeit eines Produktes. Dies macht sie zum essentiellen Bestandteil der Entwicklung zuverlässiger Produkte.

Vertrauensbereiche und Aussagewahrscheinlichkeit

Das Ergebnis eines Lebensdauerversuches hängt von der gewählten Stichprobe ab, damit repräsentiert der Versuch auch nur die geprüfte Stichprobe, wie die Weibullgerade in Abbildung 2.2. Ziel eines Nachweises ist es jedoch eine Aussage für die gesamte Population zu erbringen. Um auf Grundlage eines Stichprobenergebnisses einen Nach-

weis für die gesamte Population zu erbringen, werden Vertrauensbereiche berücksichtigt. Der Vertrauensbereich gibt an, dass die Gesamtpopulation mit einer definierten Wahrscheinlichkeit innerhalb der linken und der rechten Vertrauensgrenze liegt. Im fiktiven Beispiel, das in Abbildung 2.2 zu sehen ist, beträgt die rechte Vertrauensgrenze 5 % und die linke 95 %. Damit liegt die Gesamtpopulation mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 % innerhalb des Vertrauensbereiches. Der Vertrauensbereich wird im Zusammenhang mit dem Zuverlässigkeitsnachweis auch als Aussagewahrscheinlichkeit P_A bezeichnet. Für die Vertrauensbereich-Ermittlung werden verschiedene Methoden verwendet, die den Vertrauensbereichen auch den Namen geben. Darunter fallen z. B.: Beta-Binomial-, Fisher- oder Likelihood-Ratio-Vertrauensbereiche [ME14].

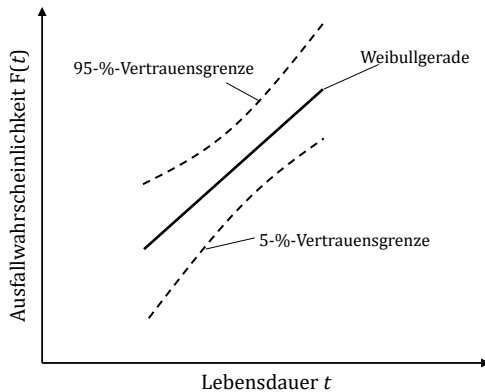


Abbildung 2.2: Weibullgerade mit 90%-Vertrauensbereich nach [BL04]

2.2 Statistische Verteilungsfunktionen

Statistische Verteilungsfunktionen beschreiben zufallsbehaftete oder komplexe Prozesse, deren exakte Prognose unmöglich ist. Typische Anwendungsgebiete liegen in den Bereichen der Physik, Medizin, Wirtschaft und Technik. Verteilungsfunktionen werden basierend auf einer repräsentativen Stichprobe geschätzt. Hierfür werden Schätzmethoden wie die Methode der kleinsten Fehlerquadrate oder die Maximum-Likelihood-Methode verwendet [BL04]. In der Zuverlässigkeitstechnik werden Verteilungsfunktionen eingesetzt, um das Ausfallverhalten von Produkten oder auch die Belastung im Feld statistisch zu beschreiben. Das Ausfallverhalten von Produkten un-

terliegt Material- und Fertigungseinflüssen, die für das einzelne Produkt nicht vorhergesagt werden können. Auch die Belastung ist nicht exakt vorhersagbar und wird statistisch beschrieben. In den nächsten drei Absätzen werden die wichtigsten Verteilungsfunktionen für die Beschreibung von Lebensdauer und Belastung erläutert.

2.2.1 Normalverteilung

Die Normalverteilung wird nach Carl Friedrich Gauß auch Gauß-Verteilung oder nach ihrer Form auch als Glockenkurve bezeichnet. Sie wird beschrieben über den Lageparameter μ und die Standardabweichung σ . Nachfolgend sind Dichtefunktion und Verteilungsfunktion der Normalverteilung angegeben:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.6)$$

$$F(t) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} d\tau \quad (2.7)$$

Das Maximum der Normalverteilung liegt im Lageparameter, der aufgrund der Symmetrie der Normalverteilung auch Median und Mittelwert darstellt. In Abbildung 2.3 sind beispielhaft Dichtefunktionen und Verteilungsfunktionen der Normalverteilung abgebildet. Anwendung findet die Normalverteilung in weiten Teilen von Naturwissenschaft und Technik. Jedoch zur Beschreibung von Lebensdauern ist die Normalverteilung nur bedingt geeignet, da sie auch negative Zeitbereiche beschreibt. Dasselbe gilt für die Häufigkeit einer Last, die wie die Lebensdauer nie negativ werden kann. Deshalb muss bei der Verwendung der Normalverteilung geprüft werden, ob sie negative Wertebereich umfasst.

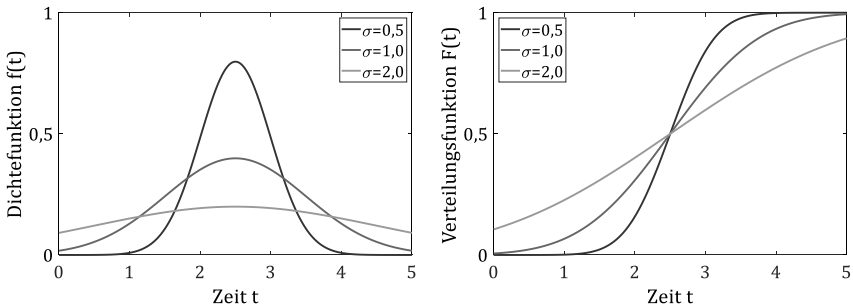


Abbildung 2.3: Funktionen der Normalverteilung

2.2.2 Logarithmische Normalverteilung

Die logarithmische Normalverteilung basiert auf der Normalverteilung, was den Vorteil hat, dass bei ihr auch statistische Standardverfahren, wie z. B. der t-Test, angewendet werden können. Sie unterscheidet sich von der Normalverteilung dadurch, dass die statistische Variable t logarithmiert in die Gleichungen (2.6) und (2.7) eingesetzt wird, was zu den Gleichungen (2.8) und (2.9) führt:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\lg(t)-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.8)$$

$$F(t) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{(\lg(\tau)-\mu)^2}{2\sigma^2}} d\tau \quad (2.9)$$

Die logarithmische Normalverteilung besitzt im Vergleich zur Normalverteilung für Lebensdauermerkmale den Vorteil, dass nur der positive Wertebereich beschrieben wird. Außerdem ist die Dichtefunktion nicht symmetrisch, wie links in Abbildung 2.4 zu sehen ist. Die logarithmische Normalverteilung findet breite Anwendung in der Betriebsfestigkeit zur Beschreibung von Ermüdungsausfällen und auftretenden Belastungen [HAI06].

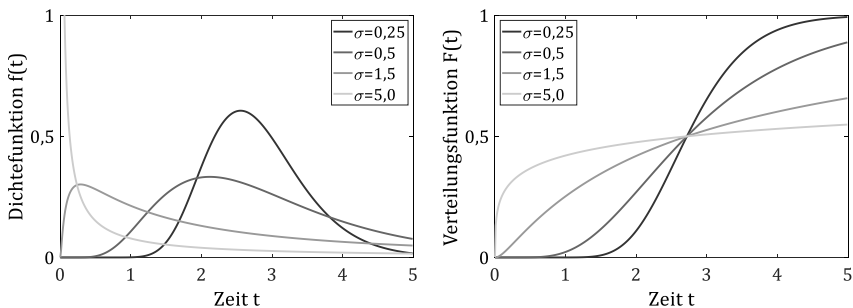


Abbildung 2.4: Funktionen der logarithmischen Normalverteilung

2.2.3 Weibullverteilung

Die Weibullverteilung wurde von Waloddi Weibull 1951 eingeführt [WAL51]. Sie ist definiert durch die charakteristische Lebensdauer T und den Weibull-Formparameter

b. Wie die logarithmische Normalverteilung, beschreibt sie nur den positiven Wertebereich. Die Dichtefunktion $f(t)$ und die Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t)$ sind im Folgenden nach der Nomenklatur von [BL04] definiert:

$$f(t) = \frac{b}{T} \cdot \left(\frac{t}{T}\right)^{b-1} e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b} \quad (2.10)$$

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b} \quad (2.11)$$

Die Weibullverteilung hat den großen Vorteil, dass sie in der Lage ist Früh-, Zufalls- und Ermüdungsausfälle über den Weibull-Formparameter b abzubilden, wie in Abbildung 2.5 zu sehen ist. Umgekehrt lässt sich anhand des geschätzten Formparameters auch eine Zuordnung zu den Bereichen der Badewannenkurve und damit zur Ausfallart vornehmen. Für $b < 1$ besitzt die Weibullverteilung eine sinkende Ausfallrate, was Frühausfällen entspricht. Zufallsausfälle und damit eine konstante Ausfallrate nimmt die Weibullverteilung bei $b = 1$ an. Eine steigende Ausfallrate und somit Ermüdungsausfälle werden mit $b > 1$ beschreiben. Dadurch ist die Weibullverteilung in der Lage das Ausfallverhalten von Produkten über deren gesamten Lebenszyklus zu beschreiben. Die Weibullverteilung bietet außerdem die Möglichkeit eine ausfallfreie Zeit zu berücksichtigen, wodurch die Dichtefunktion entlang der Zeitachse nach rechts verschoben wird.

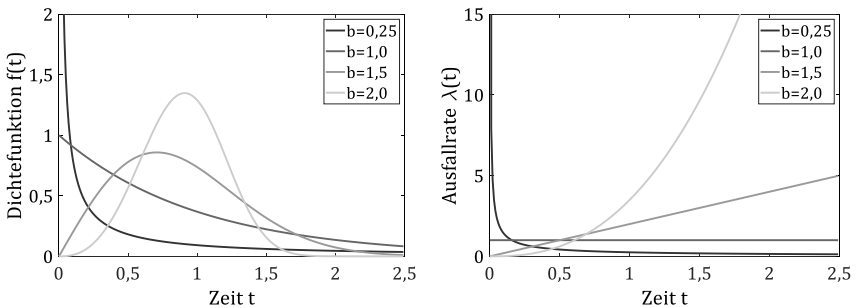


Abbildung 2.5: Funktionen der Weibullverteilung

2.3 Lastannahme und Laststandards

Die Lastannahme ist essentieller Bestandteil für die Entwicklung zuverlässiger und gleichzeitig beanspruchungsgerecht ausgelegter Produkte, da nur bei korrekter Lastannahme eine korrekte Zuverlässigkeitserprobung und Produktauslegung erfolgen kann. Dabei müssen sowohl statische als auch dynamische Lasten berücksichtigt werden. Aus diesem Grund werden in diesem Unterkapitel die Grundlagen von Belastungs-Zeit-Funktionen und der Lastkollektivermittlung erläutert. Außerdem wird ein Überblick über industrielle Laststandards gegeben.

2.3.1 Belastungs-Zeit-Funktion

Die auf ein Produkt einwirkende Belastungen teilen sich in statische und dynamische Belastungen auf. Diese werden in der Belastungs-Zeit-Funktion beschrieben und lassen sich systematisch in deterministische und stochastische Vorgänge aufteilen, wie in Abbildung 2.6 zu sehen ist.

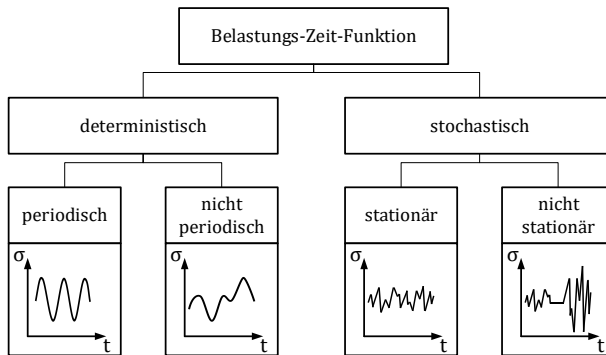


Abbildung 2.6: Klassierung der Belastungs-Zeit-Funktion nach [BUX92]

Deterministische Vorgänge sind aufgrund des Produkteinsatzes vorhersagbar und können sowohl periodisch als auch nicht periodisch auftreten. Ein Beispiel hierfür ist die Klemmkraft einer Scheibenbremse, die beim Abstellen des Fahrzeuges und dem damit verbundenen Einlegen der Parkbremse erzeugt wird. Im Gegensatz dazu sind stochastische Vorgänge nicht vorhersagbar, da sie entweder rein dem Zufall unterliegen oder eine Prognose der Belastungen zu komplex ist. Ein stationärer stochastischer

Vorgang liegt vor, wenn dessen statistischen Kennwerte konstant bleiben. Ein typisches Beispiel für eine stochastische Belastung ist die Vibrationsanregung von Fahrzeugen aufgrund der Straßenunebenheit. Deterministische und stochastische Vorgänge können sich auch überlagern. Ein Beispiel hierfür ist die konstante Streuung bei gleichzeitiger Veränderung des Lageparameters aufgrund der Überlagerung des stochastischen Vorgangs mit einem deterministischen Vorgang. Heruntergebrochen auf die Bauteilebene gilt diese Einteilung auch für die Beanspruchung über die Zeit.

2.3.2 Lastkollektive

Die zuvor beschriebene Belastungs-Zeit-Funktion kann sowohl im Betrieb beim Kunden als auch unter Testbedingungen gemessen werden. Um aus der Belastungs-Zeit-Funktion die Belastung zu veranschaulichen, zu vergleichen oder für die Lebensdauerberechnung zu benutzen, wird diese in eine Häufigkeitsverteilung der Einzelschwingungen überführt. Diese Häufigkeitsverteilung wird in der Betriebsfestigkeit als Lastkollektiv bezeichnet. Es beschreibt die Häufigkeiten oder die Verweildauern für definierte Lastklassen. Lastkollektive verlieren durch die Überführung der Belastungs-Zeit-Funktion in den Häufigkeitsbereich allerdings Frequenz, Form und Reihenfolge der Lastzyklen. Die Überführung in Lastkollektive erfolgt mit amplitudenbasierten Zähl- und Klassierverfahren. In Abhängigkeit der Anzahl an Parametern werden ein- und zweiparametrische Zähl- und Klassierverfahren verwendet. Eine Übersicht dieser Verfahren ist in Abbildung 2.7 gegeben.

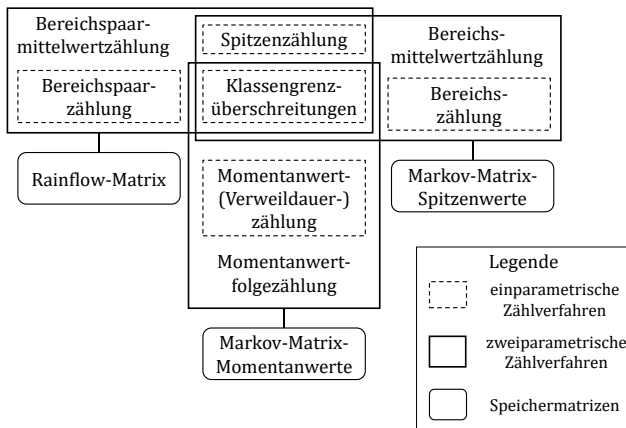


Abbildung 2.7: Übersicht Zählverfahren nach [BL04]

In Abbildung 2.7 ist zu sehen, dass die einparametrischen aus den zweiparametrischen Verfahren abgeleitet werden können und aus welchen Speichermatrizen diese wiederum ermittelt werden. Das passende Klassierverfahren wird für den jeweiligen Fall anhand der Charakteristik der Belastungs-Zeit-Funktion gewählt. Dabei müssen Mittellastschwankungen, Überlagerungen und Dämpfungen in der Belastungs-Zeit-Funktion berücksichtigt werden [KJP12]. Nachfolgend werden zwei der am häufigsten eingesetzten Zählverfahren nach [KJP10], [KJP12], [HAI06], [BL04] und [JS14] vorgestellt.

Rainflow-Zählverfahren

Das von Matsuishi und Endo [ME68] entwickelte Rainflow-Zählverfahren (RZ) zählt geschlossene Hystereseschleifen einer Belastungs-Zeit-Funktion. Da für das Bilden einer Hysterese eine sequentielle Zählung von Minima und Maxima nicht ausreichend ist, gehört das RZ nicht zu den sequenziellen Zählverfahren. Der Name des Verfahrens leitet sich aus dem Regentropfenmodell des ursprünglichen Berechnungsalgorithmus ab. Für dieses Modell wird die Belastungs-Zeit-Funktion, die in Abbildung 2.8 links zu sehen ist, gedanklich um 90° nach rechts gedreht und als Dach betrachtet. Fällt ein Tropfen auf das Dach, fließt er die Flanke a-b herunter bis er auf das Extremum b trifft. Hier fällt der Tropfen auf die nächste Flanke c-d herunter. Fließt der Tropfen von einem Extremum zum nächsten „bergab“, wie an Flanke a-b, oder kommt der herabfließende Tropfen an den Auftreffpunkt eines vom Extremum abfallenden Tropfens, ist ein Halbzyklus für die Zählung relevant. Zwei Halbzyklen mit gleichen Extrema und Schwingbreite ergeben einen Vollzyklus, unter anderem die Zyklen a-d-e und b-c-b in Abbildung 2.8. Für das abgebildete Beispiel ergeben sich die rechts in Abbildung 2.8 dokumentierten Spannungs-Dehnungs-Hysteresen. Zusätzlich zum Regentropfen-Algorithmus gibt es noch Dreipunkt- und Vierpunkt-Algorithmen, die weniger zeitintensiv und besser automatisierbar sind [KJP12].

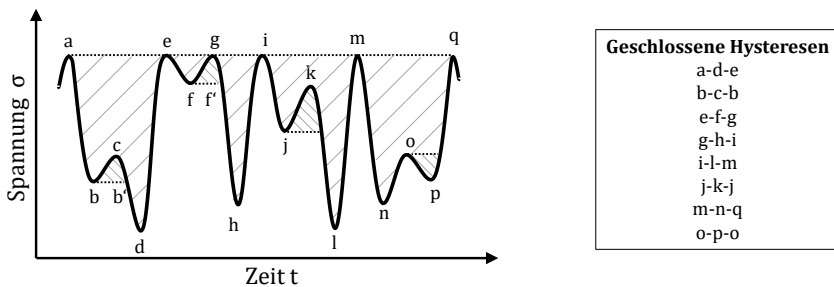


Abbildung 2.8: Beispiel Rainflow-Zählverfahren nach [KJP12]

Das Ergebnis der Rainflow-Zählung wird in der Rainflow-Matrix festgehalten, die beispielhaft in Abbildung 2.9 als Vollmatrix (links) und als Halbmatrix (rechts) abgebildet ist. In dieser werden die Start- und Endklassen der Zyklen eingetragen und gezählt. Der Vorteil der Voll- im Gegensatz zur Halbmatrix ist, dass hier zwischen steigender oder hängender Hysterese unterschieden werden kann. Die Halbmatrix hat bei der Online-Klassierung in Steuergeräten allerdings durchaus eine Berechtigung, da sie nur den halben Speicherplatz der Vollmatrix benötigt. Das RZ grenzt sich von den anderen Zählverfahren deutlich ab, da das Ergebnis als werkstoffmechanisch begründete Beschreibung der Schädigung einer Belastungs-Zeit-Funktion gilt [HAI06], [KJP10].

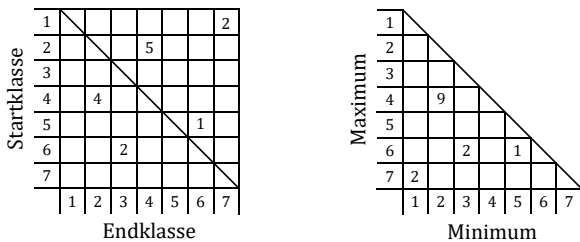


Abbildung 2.9: Ergebnis Rainflow-Zählverfahren nach [KJP10]

Verweildauerzählverfahren

Im Gegensatz zum Rainflow-Verfahren wird beim Verweildauerzählverfahren nicht die Häufigkeit einer auftretenden Lastklasse, sondern die Zeit, die das Produkt der Lastklasse ausgesetzt ist, gezählt. Daraus ergibt sich als Besonderheit, dass die aufsummierte Zeit aller Klassen der Länge der Belastungs-Zeit-Funktion entspricht. Das Verfahren lässt sich sowohl ein- als auch zweiparametrisch durchführen. In dem Beispiel in Abbildung 2.10 handelt es sich um die zweiparametrische Variante des Verweildauerzählverfahrens. Bei dieser Variante werden die Klassen aus Signal b während dem Zählvorgang von Signal a gezählt. Das Ergebnis wird dann in Form einer Matrix dargestellt, wie beispielhaft in Abbildung 2.10 zu sehen ist. Diese zweiparametrische Zählweise ist bei Verweildauerzählverfahren notwendig, wenn die Kombination aus zwei Lasten zur Bauteilschädigung beiträgt, wie beispielsweise bei Lagern [GKF73], [FEL80] oder Zahnradern [PIN87].

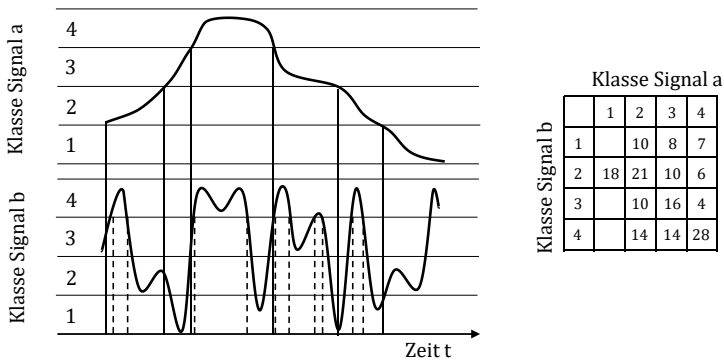


Abbildung 2.10: Verweildauerzählverfahren nach [KJP12]

Frequenzbasierte Zählverfahren

Neben den amplitudenbasierten Zählverfahren gibt es noch frequenzbasierte Zählverfahren. Diese werden zum einen eingesetzt, wenn der Frequenzeinfluss schädigungsrelevant ist. Zum anderen werden sie bei der Betrachtung von Gesamtsystemen verwendet, da sich hier alle Eigenschaften der Belastungs-Zeit-Funktion auf die lokale Beanspruchung von Bauteilen im System auswirken können [JS14]. Im Gegensatz zu den klassischen Zählverfahren wird hier das Frequenzspektrum, aus dem englischen kurz PSD, und nicht die Belastungsamplitude und deren Häufigkeit ermittelt. Zentraler Bestandteil dabei ist die Fourier Transformation. Die frequenzbasierten Zählverfahren sind nicht im Fokus dieser Arbeit, weshalb für eine detaillierte Beschreibung auf [JS14] verwiesen wird.

2.3.3 Laststandards

Der Trend zur Standardisierung in Form von Normen und Richtlinien basiert nicht nur auf gesellschaftlichem Nutzen, sondern auch auf dem Nutzen von Unternehmen [HKM09]. Diese profitieren unter anderem durch kürzere Produktentwicklungszeiten aufgrund des in technischen Normen und Standards beschriebenen Wissens. Außerdem sind gerade technische Normen in Bezug auf die Produkthaftung von Bedeutung [HKM09], [LP12]. Diese Punkte stellen auch die Haupttreiber für die Entwicklung von

Laststandards dar, die repräsentative Lastkollektive für spezifische Anwendungen beschreiben. Eine Auswahl dieser Laststandards ist in Tabelle 2.1 zu sehen. Für eine umfassende Aufzählung wird auf [BEH02] und [HBK05] verwiesen. Getrieben von der Leichtbauweise ist die Luftfahrzeugindustrie ein Treiber hinter den Bestrebungen standardisierte Lastabläufe, Lastkollektive und Prüfungen zu entwickeln [HBK05]. Mit dem Laststandard TWIST [SCH73] kommt daher auch einer der ersten Laststandards aus dieser Branche. Auch in der PKW-Industrie sind Laststandards als Auslegungs- oder Prüfgrundlage von Bedeutung. So beschreibt die VDA-Richtlinie 311 nicht nur die Belastung auf eine Bremse im Betrieb, sondern auch deren Lebensdauernachweis im Versuch.

Tabelle 2.1: Auszug bestehender Laststandards

Name	Anwendung	Last	Jahr	Literaturhinweise
TWIST	Transportflugzeuge	Biegemoment des Flü- gels	1973	[SCH73]
HELIX, FELIX	Hubschrauber	Rotorblattbiegung	1984	[ED84], [ED84]
CARLOS	PKW	Vertikale, laterale, lon- gitudinale Kräfte auf Bauteile der Vorderrad- aufhängung	1990	[SKS90]
CARLOS TC	PKW	Vertikale, laterale, lon- gitudinale Kräfte auf Anhängerkupplung	2003	[KLÄ03]
VDA 311	PKW	Bremsmoment und Spannkraft auf NFZ- Bremse	2015	[VDA16]

2.4 Konzepte der Lebensdauerberechnung

Fokus dieses Unterkapitels sind Berechnungskonzepte der Lebensdauer, die auf Grundlage von Belastung und Belastbarkeit durchgeführt werden. Dabei wird zunächst auf das Konzept der Stress-Strength Interference aus der Zuverlässigkeitstechnik eingegangen. In der Betriebsfestigkeit gibt es vier unterschiedliche Bemessungsmethoden: das Nennspannungs-, das Strukturspannungs-, das Bruchmechanikkonzept sowie das Örtliche Konzept [SON08]. Davon werden die Schadensakkumulation und die Lebensdauerberechnung nach dem Nennspannungskonzept beschrieben,

Für eine vertiefende Beschreibung der Konzepte wird auf die nachfolgende Literatur verwiesen: [HAI06], [GUD99] und [BUX92].

2.4.1 Stress-Strength Interference

Die Stress-Strength Interference (SSI) [BL04] ist ein Konzept aus der Zuverlässigkeitstechnik mit dem die Ausfallwahrscheinlichkeit eines Produktes in Abhängigkeit der Belastung und der Belastbarkeit für einen bestimmten Zeitpunkt berechnet wird. Umgekehrt lässt sich somit auch für eine geforderte Zuverlässigkeit die Lebensdauer eines Produktes ermitteln. Belastung f_B und Belastbarkeit f_W sind dabei stochastische Verteilungen. Dies begründet sich darin, dass die Belastung in Abhängigkeit von Kunden und Einsatzbedingungen nur als streuende Größe beschrieben werden kann und auch die Belastbarkeit von Produkten unter anderem werkstoff- und fertigungsbedingt streut. Der Grundgedanke der SSI ist beispielhaft in Abbildung 2.11 zu sehen. Überlappen sich Belastungs- und Belastbarkeitsverteilung, treffen in diesem Bereich Bauteile mit schwacher Belastbarkeit auf eine hohe Belastung und es kommt zu Ausfällen. Für bekannte Belastungs- und Belastbarkeits-Verteilungen lässt sich die Zuverlässigkeit nach folgender Gleichung berechnen [BL04]:

$$R = \int_{-\infty}^{\infty} f_B(\sigma) \cdot \left[\int_{\sigma_x}^{\infty} f_W(\sigma) \cdot d\sigma \right] \cdot d\sigma \quad (2.12)$$

Das Konzept der SSI ist unabhängig von den verwendeten Verteilungen anwendbar. Im Fall von variablen Betriebslasten müssen diese allerdings mit Hilfe von Schadensakkumulationshypothesen, wie in Absatz 2.4.2 beschrieben, in schädigungsäquivalente Rechteck-Ersatzkollektive umgerechnet werden.

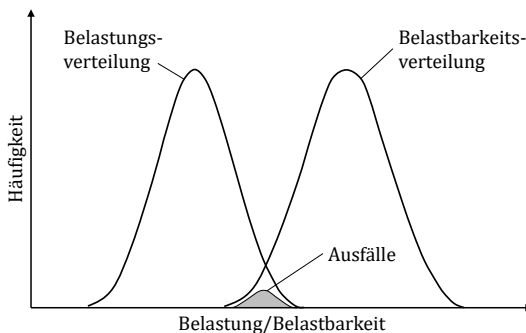


Abbildung 2.11: Stress-Strength Interference nach [BL04]

2.4.2 Schadensakkumulation

Um eine Lebensdauerberechnung nach dem Nennspannungskonzept durchzuführen, wird neben einer Beschreibung der Belastung die Wöhlerlinie zur Beschreibung der Belastbarkeit benötigt. In Abbildung 2.12 ist beispielhaft eine Wöhlerlinie mit ihren drei charakteristischen Bereichen gezeigt: der quasistatische Bereich S, der Zeitfestigkeitsbereich Z und der Dauerfestigkeitsbereich D. An einer 50%-Wöhlerlinie lässt sich direkt die Zahl der Lastzyklen ablesen, bei der ein Bauteil unter vorgegebener Last im Median ausfällt. Eine Ermittlung der Wöhlerlinie für andere Quantile ist ebenfalls möglich und für einen Lebensdauernachweis von entscheidender Bedeutung. Für eine ausführliche Beschreibung der Ermittlung von Wöhlerlinien wird auf die DIN 50100:2016-12 – Schwingfestigkeitsversuch [DIN16] verwiesen.

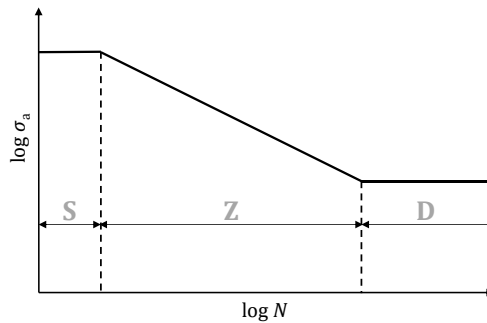


Abbildung 2.12: Bereiche der Wöhlerlinie

Außer der Belastbarkeit wird für die Lebensdauerberechnung die Betriebsbelastung in Form eines Lastkollektives benötigt. Wenn ein Lastkollektiv aus mehr als einem Lastniveau besteht, lässt sich die Lebensdauer anhand der Wöhlerlinie nicht mehr direkt ablesen. Für dieses Problem haben Palmgreen [PAL24] und Miner [MIN45] das Konzept der linearen Schadensakkumulationshypothese (SAH) entwickelt. Dabei wird jedem Lastniveau eine ertragbare Schwingspielzahl N_i anhand der Wöhlerlinie des Bauteils zugeordnet. Das Verhältnis der tatsächlichen Schwingspielzahl n_i einer Last zu N_i gibt die Schädigung D_i des Bauteils an. Aufsummiert nach Gleichung (2.13) ergibt sich für ein Lastkollektiv die Gesamtschädigung D . Erreicht die Schädigung den Wert 1 gilt das Bauteil als ausgefallen.

$$D = \sum_i^m \frac{n_i}{N_i} \quad (2.13)$$

Zum Umgang mit dem Dauerfestigkeitsbereich gibt es verschiedene Modifikationen der Miner-Regel, die zusammengefasst in Abbildung 2.13 dargestellt sind. Die Anwendung der elementaren Miner-Regel, stellt eine Verlängerung der Zeitfestigkeitsgerade in den Dauerfestigkeitsbereich dar, was zu konservativen Ergebnissen in der Lebensdauerberechnung führt. Bei der Miner-Regel Original wiederum wird keine Schädigung durch Lasten unterhalb der Dauerfestigkeitsbelastung verursacht und sie ist damit zu optimistisch, da Lasten unterhalb der Dauerfestigkeit zur Schädigung beitragen können [HA106]. Deshalb ist die modifizierte Miner-Regel entwickelt worden, bei der die Zeitfestigkeitsgerade mit einer Steigung von $(2k-1)$ in den Dauerfestigkeitsbereich verlängert wird.

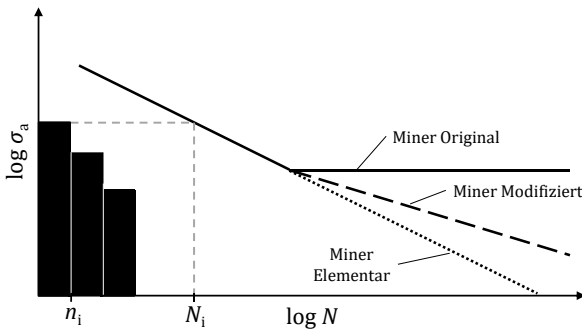


Abbildung 2.13: Schadensakkumulation und Modifikation der Miner-Regel

Die SAH stellt nur ein Konzept zur Lebensdauerabschätzung und nicht für den Lebensdauernachweis dar. So haben unter anderem die Versuche mit Stahl, Aluminium und Ti-Legierungen von [SZ73] gezeigt, dass die tatsächliche Schädigungssumme bei Ausfall der Komponenten sowohl deutlich kleiner als auch größer als 1 ist. Diese Abweichung lässt sich unter anderem durch die Vernachlässigung der Reihenfolgeeffekte bei der Verwendung der SAH erklären. Neben der Lebensdauerberechnung wird die SAH auch verwendet, um schädigungsäquivalente Prüfkollektive zu erstellen.

Schädigungsäquivalente Rechteck-Ersatzkollektive

Die Verwendung eines kompletten Betriebslastenkollektives in der Erprobung ist aufgrund der langen Versuchszeiten mit großen zeitlichen Aufwendungen verbunden.

Um Versuchsaufwände einzusparen, können schädigungsäquivalente Einstufenversuche auf entsprechend erhöhtem Lastniveau durchgeführt werden. Dadurch wird je Lastzyklus eine größere Schädigung erzielt als im Betrieb, wodurch die Versuchszeit reduziert wird. Als Grundlage für die Umrechnung ist die SAH und die Kenntnis der Wöhlerlinie notwendig. Damit lässt sich die Ersatz-Schwingspielzahl N_E in Abhängigkeit der zur Verfügung stehenden Versuchszeit festlegen. Eingesetzt in die nachfolgende Gleichung lässt sich die Ersatz-Spannungsamplitude σ_E bestimmen:

$$\sigma_E = \left(\frac{\sum n_i \cdot \sigma_{a,i}^k}{N_E} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (2.14)$$

Äquivalent lässt sich mit folgender Gleichung die Ersatz-Schwingspielzahl N_E bei festgelegter Ersatz-Spannungsamplitude σ_E ermitteln:

$$N_E = \frac{\sum n_i \cdot \sigma_{a,i}^k}{\sigma_E^k} \quad (2.15)$$

Durch die Anwendung dieser Gleichung lassen sich beliebige Rechteck-Ersatzkollektive ermitteln, wie beispielhaft in Abbildung 2.14 für die Spannungen σ_{E1} und σ_{E2} zu sehen ist. Außerdem lässt sich diesem Beispiel entnehmen, dass sich die Ersatzschwingspielzahl bei sinkender Belastung erhöht. Daraus lässt sich folgern, dass für eine wirtschaftliche Bauteilprüfung die Ersatz-Spannungsamplitude möglichst hoch gewählt werden muss. Außerdem hängen die bestimmten Rechteck-Ersatzkollektive vom Wöhlerexponenten k ab. Dies hat zur Folge, dass eine Anpassung der Rechteck-Ersatzkollektive bei veränderter Bauteil-Wöhlerlinie erfolgen muss.

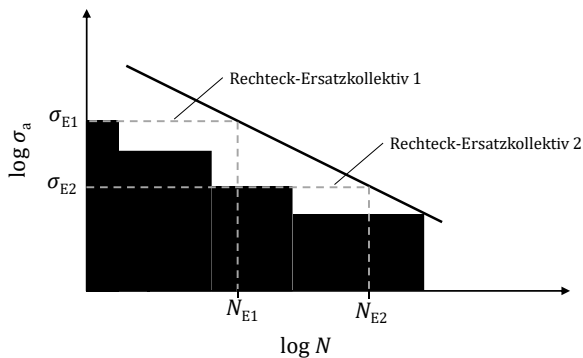


Abbildung 2.14: Schädigungsäquivalente Rechteck-Ersatzkollektive

3 Entwicklung der Methodik

In diesem Kapitel wird die Entwicklung der Methodik zur Ermittlung repräsentativer Lastkollektive beschrieben. Dabei wird zunächst in 3.1 die wissenschaftliche Vorgehensweise für die Entwicklung und Validierung der Methodik vorgestellt. 3.2 beschreibt mit dem Forschungsziel und den übergeordneten Forschungsfragen das Ergebnis des ersten Schrittes dieser Vorgehensweise. Anschließend wird in 3.3 der Stand der Forschung zu repräsentativen Lastkollektiven diskutiert und der Beitrag einer Methodik für die Ermittlung repräsentativer Lastkollektive zum Stand der Forschung aufgezeigt. Danach werden in 3.4 die Anforderungen an die Methodik beschrieben. Diese setzen sich aus allgemeinen Anforderungen an eine Methodik und den zuvor abgeleiteten Entwicklungsschwerpunkten zusammen. Auf Grundlage dieser Anforderungen beschreibt 3.5 die Konzeption der Methodik zur repräsentativen Lastkollektivermittlung.

3.1 Vorgehensweise zur Entwicklung der Methodik

Für eine effiziente und zielgerichtete Entwicklung einer Methodik ist eine systematische Vorgehensweise notwendig. Bekannte Vorgehensweisen für Forschungsvorhaben aus der Produktentwicklung sind die „Design Research Methodology“ (DRM) [BC09] nach Blessing und Chakrabarti und das „Validation Square“ [PAM00] nach Pedersen et al. In [PAM00] liegt der Fokus auf der Validierung der Forschungsergebnisse, die im sogenannten Validierungsquadrat erfolgt. Blessing und Chakrabarti wiederum zeigen in [BC09] eine Methodik zur Bearbeitung von Forschungsvorhaben auf, die bei der Klärung der Aufgabenstellung beginnt und mit der Validierung der Forschungsergebnisse endet. Außerdem ist die DRM flexibel anwendbar, da sie ein Vorgehen mit unterschiedlichen Optionen und nicht nur eine strikte Vorgehensweise beschreibt. Wegen dieser Flexibilität in der Anwendung und dem ganzheitlichen Ansatz orientiert sich dieses Forschungsvorhaben an der DRM.

Die DRM ist in vier essentielle Phasen aufgeteilt: Klärung des Forschungsziels, Deskriptive Studie I, Präskriptive Studie, Deskriptive Studie II. Diese Phasen werden auf

die Entwicklung der Methodik für die Ermittlung repräsentativer Lastkollektive übertragen und sind in Abbildung 3.1 dargestellt. Zu Beginn der Arbeit wurde das Forschungsziel auf Basis einer Literaturrecherche geklärt. Dieses Ziel und die damit verbundenen Forschungsfragen werden in 3.2 dargelegt. Für die Deskriptive Studie I wird die durchgeführte Literaturrecherche erweitert. Der Stand der Forschung zu repräsentativen Lastkollektiven wird beschrieben, bewertet und Entwicklungspotential aufgezeigt. Dieses Entwicklungspotential ist Input für die Präskriptive Studie, in der die Konzeption der Methodik erfolgt. Dafür werden zunächst die Anforderungen an die Methodik festgelegt, bevor die notwendigen Funktionen definiert und anschließend ausdetailliert werden. Die entwickelte Methodik wird abschließend in der Phase der Deskriptiven Studie II am Beispiel der Nutzfahrzeugbremse angewendet und validiert.

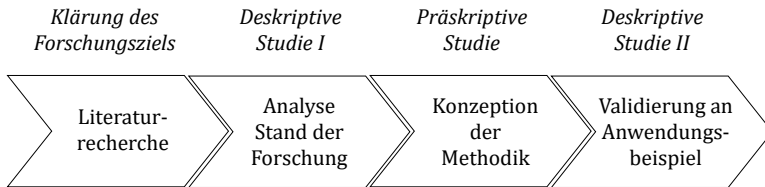


Abbildung 3.1: Vorgehensweise zur Entwicklung der Methodik

3.2 Forschungsziel

Grundvoraussetzung für eine valide Zuverlässigkeitserprobung und eine Produktauslegung ohne hohe Sicherheitsfaktoren ist die Kenntnis der Belastung im Feld. Aus dieser Feldbelastung lassen sich repräsentative Lastkollektive für die Auslegung und die Erprobung ableiten. In der Praxis fehlen repräsentative Lastkollektive jedoch oft. Aus diesem Grund werden beispielsweise nach wie vor hohe Sicherheitsfaktoren in der Auslegung von Produkten angewendet [HFR11]. Das Fehlen repräsentativer Lastkollektive lässt sich zum einen auf fehlende oder zu wenige Daten aus dem Produkteinsatz im Feld zurückführen. Zum anderen hat die Literaturrecherche im Rahmen dieser Arbeit gezeigt, dass es keine umfassende Methodik zur Ermittlung repräsentativer Lastkollektive gibt, was in 3.3.2 und 3.3.4 ausführlich dargelegt wird. Aus diesem Grund wurde die Entwicklung einer Methodik zur systematischen Ermittlung von re-

präsentativen Lastkollektiven als übergeordnetes Forschungsziel dieser Arbeit definiert. Um den Fokus der Arbeit weiter zu schärfen, wurde die nachfolgende zentrale Forschungsfrage formuliert:

Wie müssen Methoden der Zuverlässigkeitstechnik und der Lastannahme verknüpft und in einer Methodik strukturiert werden, um die systematische Ermittlung von repräsentativen Lastkollektiven zu ermöglichen?

Zur Beantwortung dieser zentralen Forschungsfrage werden funktionale und allgemeine Anforderungen an die Methodik systematisch aus dem Stand der Forschung abgeleitet, bevor die Konzeption und die Ausdetaillierung der Methodik erfolgt. Hierfür wird zu Beginn geklärt, welche Anforderungen an ein repräsentatives Lastkollektiv gestellt werden. Dafür wird der Stand der Technik hinsichtlich bestehender Definitionen zu repräsentativen Lastkollektiven untersucht. Nachfolgend stellt sich die untergeordnete Forschungsfrage: Welche Methoden für die Ermittlung repräsentativer Lastkollektiven erforderlich sind und wie diese für diesen Zweck adaptiert werden müssen? Außerdem wird in diesem Kontext untersucht, welche Datengrundlage für die Ermittlung von repräsentativen Lastkollektiven erforderlich ist. Beiden Forschungsfragen wird nachgegangen indem der Stand der Forschung untersucht und bewertet wird. Anhand dieser Bewertung werden Entwicklungsschwerpunkte und funktionale Anforderungen an die Methodik abgeleitet.

Elementar für das Erreichen des Forschungsziels ist die Gewährleistung der Anwendbarkeit der Methodik. Dafür sind unterschiedliche Rahmenbedingungen und Zielsetzungen für die Lastkollektivermittlung in Abhängigkeit von Unternehmen und Produkt zu berücksichtigen. So haben beispielsweise Gesamtsystem-Hersteller zu meist bessere Möglichkeiten an Felddaten zu gelangen als Subsystem-Hersteller. Außerdem sind Methodik und Methoden anwendungsfreundlich zu gestalten. Dafür sind einerseits gängige und anerkannte Methoden des Ingenieurwesens in die Methodik zu integrieren. Andererseits sind neue Methoden eindeutig zu beschreiben, sodass diese korrekt angewendet werden können. Ferner ist der Ablauf bei der Ermittlung der repräsentativen Lastkollektiven stets durchgängig, transparent und nachvollziehbar zu definieren.

3.3 Deskriptive Studie zu repräsentativen Lastkollektiven

In diesem Absatz wird die durchgeführte Deskriptive Studie I zum Themengebiet der repräsentativen Lastkollektive vorgestellt. Dafür wird zunächst der Begriff des „repräsentativen Lastkollektiv“ diskutiert. Danach werden verschiedene Konzepte für

die Ermittlung von repräsentativen Lastkollektiven sowie die Datengrundlage für die Ermittlung von Lastkollektiven vorgestellt. Abschließend wird der Stand der Forschung bewertet und Entwicklungsschwerpunkte für die Methodik abgeleitet.

3.3.1 Repräsentative Lastkollektive

Das Adjektiv „repräsentativ“ hat laut dem Duden die Bedeutung: „*verschiedene [Interessen]gruppen in ihrer Besonderheit, typischen Zusammensetzung berücksichtigend*“ [DUD11]. Diese Bedeutung gilt übertragen auf die Kundeneinsätze von Produkten auch für Lastkollektive. Die Aufgabe repräsentativer Lastkollektive ist es, die Belastung auf System-, Subsystem- oder Bauteilebene unter dem Einfluss der Einsatzarten, der Einsatzbedingungen und der Kunden zu beschreiben. Hierfür muss eine typische Zusammensetzung an Kundeneinsätzen berücksichtigt und vom repräsentativen Lastkollektiv abgedeckt werden. Deshalb wird in diesem Zusammenhang auch die Begrifflichkeit der „kundenrelevanten“ Lastkollektive [WEI15] verwendet.

Eine allgemeingültige Definition für repräsentative Lastkollektive existiert nicht. Im Stand der Technik lassen sich, die in Abbildung 3.2 dargestellten, drei prinzipielle Arten von repräsentativen Lastkollektiven identifizieren. Repräsentative Lastkollektive können demnach repräsentativ für die maximale Schädigung auf Bauteilebene, einen p-%-Kunden oder einen als repräsentativ festgelegten Einsatzmix sein. Die drei benannten Arten repräsentativer Lastkollektive werden nachfolgend näher erläutert.

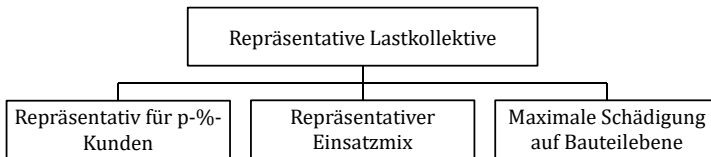


Abbildung 3.2: Übersicht über repräsentative Lastkollektive

Maximale Schädigung auf Bauteilebene

Die Definition eines repräsentativen Lastkollektives, das die maximale Schädigung auf Bauteilebene hervorruft, stammt von Müller-Kose [MÜL02] und lautet:

„Ein repräsentatives Lastkollektiv umfasst die Belastungen hinsichtlich Amplitude und Häufigkeit, die an einem Bauteil während der Nutzung des Fahrzeugs im Kundeneinsatz die maximale Schädigung und damit die minimale Lebensdauer bewirken.“

Damit entspricht es dem Worst Case des Kundeneinsatzes bezogen auf eine Komponente und hat zur Folge, dass mehrere repräsentative Lastkollektive für ein Gesamtsystem notwendig sind. Zur Berechnung der Schädigung eines Lastkollektives wird ein Lebensdauermodell, wie beispielsweise die Wöhlerlinie für strukturmechanisches Versagen eines Bauteils benötigt. Mithilfe der Bauteil-Wöhlerlinie und der SAH wird der Schädigungswert für ein Lastkollektiv berechnet. Anhand wiederholter Lastkollektivmessungen im Feld kann auf diese Weise das Lastkollektiv mit der maximalen Schädigung je Ausfallmechanismus ermittelt werden. Dieselbe Definition gibt Eckstein, der ein repräsentatives Lastkollektiv als kritischste Kombination der Lastfälle innerhalb der Nutzerpopulation definiert. Dies entspricht nach seiner Definition dem Auslegungsnutzer [ECK17].

Repräsentativ für p-%-Kunden

Da es sich bei Lastkollektiven mit der maximalen Schädigung für ein Bauteil um Extremeinsätze handelt, ist die Auslegung nach diesen Lastkollektiven mit Überdimensionierung für den durchschnittlichen Kunden verbunden. Um Überdimensionierung zu reduzieren, können Lastkollektive, die anstatt 100 % aller Kunden nur einen definierten Anteil der Kunden abdecken, verwendet werden. Typische Werte hierbei sind 95 % und 99 % der Kundeneinsätze. Häufig wird beim Abdecken von 99 % der Kundeneinsätze auch vom 1-%-Kunden gesprochen. Statistischer Hintergrund dieser Herangehensweise ist die Lebensdauerberechnung nach SSI (siehe Absatz 2.4.1). Nach diesem Konzept muss für einen Ausfall erst ein Extremeinsatz auf ein Bauteil mit zu geringer Belastbarkeit treffen. Eine Auslegung auf den Worst Case ist für eine hohe Produktzuverlässigkeit also nicht notwendig. Bei der Ermittlung von p-%-Lastkollektiven kann nach der zuvor erklärten Berechnung der Schädigungswerte für Lastkollektive vorgegangen werden. Anschließend werden die Schädigungswerte statistisch analysiert und das gewünschte Quantil ermittelt. Ein Beispiel hierfür ist die Ermittlung der 95-%-Lastkollektive für Ackerschlepper-Komponenten in [ECK17]. Eckstein definiert diese Komponenten-Lastkollektive für das 95-%-Quantil eines definierten Nutzersegments und deren auf die Betriebsstunde normierte Schädigung. Für die Schädigungsrechnung sind aber auch andere Lebensdauermodelle anwendbar. Ein Beispiel hierfür findet sich in [SSS15] für die thermische Belastung von Steuergeräten. Darin berechnen Streit et. al. die Schädigungswerte verschiedener Kunden nach dem Arrhenius und dem Coffin-Manson-Modell und führen statistische Analysen dieser Ergebnisse für verschiedene Kundengruppen durch. Eine vom Ausfallmechanismus unabhängige Ermittlung eines p-%-Lastkollektives kann auch aufgrund der Klassen-Häufigkeiten von mehreren Lastkollektiven [SDS10] oder einer statistisch beschriebenen Kundeneinsatzverteilung [WEI15] erfolgen.

Repräsentativer Einsatzmix

Ein repräsentatives Lastkollektiv kann auch für einen als repräsentativ definierten Einsatzmix ermittelt werden. Ein Beispiel hierfür ist der repräsentative Einsatzmix eines Teleskopladers nach Huber [HUB10], der in Abbildung 3.3 zu sehen ist. Huber definiert den repräsentativen Einsatz anhand der Arbeitstätigkeiten eines Teleskopladers auf einem durchschnittlichen deutschen Landwirtschaftsbetrieb. Für die Ermittlung der prozentualen Verteilung der Arbeitstätigkeiten eines Teleskopladers werden Messungen und eine Kundenbefragung verwendet [HUB10]. Weitere Möglichkeiten einen repräsentativen Einsatzmix zu definieren sind: Analyse der Kundenverteilungen für bestimmte Betriebszustände aus Betriebsdaten oder eine simulative Nutzeranalyse. Einflüsse auf die Belastung, die nicht durch die Betriebszustände abgedeckt sind, müssen bei Messungen stochastisch erfasst und ausgewertet werden. Solche Einflussgrößen können beispielsweise Umgebungsbedingungen oder auch der Kunde selbst sein. Beispiele für die Ermittlung eines 1%-Kunden auf Basis von Messungen eines repräsentativen Einsatzes, sind die Laststandards CARLOS ein- und multiaxial [SKS90].

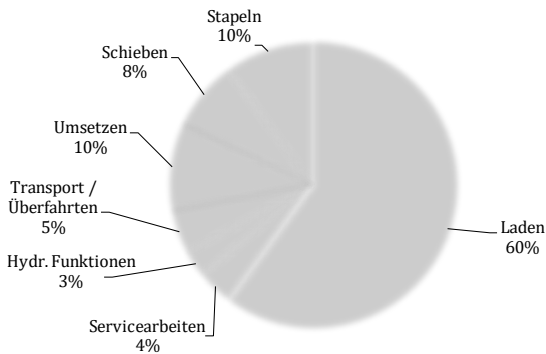


Abbildung 3.3: Repräsentativer Einsatzmix eines Teleskopladers für den durchschnittlichen deutschen landwirtschaftlichen Betrieb nach [HUB10]

3.3.2 Konzepte zur Ermittlung repräsentativer Lastkollektive

Wie bereits bei der Definition repräsentativer Lastkollektive deutlich geworden ist, liegt ein Fokus bei deren Ermittlung in der Analyse und Beschreibung des Produkteinsatzes. Dieser Produkteinsatz unterliegt nicht nur dem jeweiligen Kundenverhalten, sondern auch Einflüssen aus den Umgebungsbedingungen. Daher ist eine Analyse des

Produkteinsatzes Grundvoraussetzung für die Ermittlung repräsentativer Lastkollektive. Methoden wie die „3F-Methode“ oder der „U Sim-Prozess“ greifen diese Problemstellung auf und werden genutzt, um systematisch den Produkteinsatz zu ermitteln. Einen anderen Ansatz verfolgen Streicher et. al [SDS10], die aufgrund der Messung einer repräsentativen Strecke und einer nachgelagerten Monte-Carlo-Simulation (MCS) repräsentative Lastkollektive für die Fahrzeuglebensdauer ermitteln. Diese drei Methoden werden in den nachfolgenden Absätzen näher erläutert.

3F-Methode

Die "3F-Methode wurde von Küçükay entwickelt und in [KÜC90] erstmalig vorgestellt. Sie wird eingesetzt, um repräsentative Kundenanforderung für Fahrzeuge zu ermitteln und wurde am Institut für Fahrzeugtechnik der TU Braunschweig über die letzten Jahrzehnte weiterentwickelt, wie anhand der folgenden wissenschaftlichen Arbeiten nachvollzogen werden kann: [MÜL02], [JAN07], [FUG10], [KOL12], [WEI15], [WAG17]. Dabei wurde diese Methode an PKWs und Nutzfahrzeugen (NFZ) mit unterschiedlichen Zielstellungen angewendet. Bei der 3F-Methode wird zunächst der Nutzungsraum des Fahrzeuges ermittelt, anhand dessen die Referenz-Lastkollektive bestimmt werden. Diese werden dann repräsentativ für das Kundennutzungsverhalten superpositioniert. Das zentrale und namensgebende Element dieser Methode ist der 3F-Parameterraum, der in Abbildung 3.4 dargestellt ist.

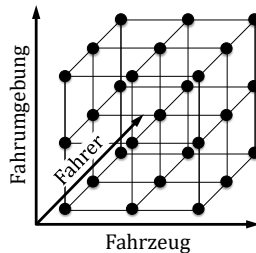


Abbildung 3.4: 3F-Parameterraum nach Küçükay

Dieser Nutzraum ermöglicht eine systematische Beschreibung und Modellierung des Kundeneinsatzes von Fahrzeugen anhand der Parameter: Fahrer, Fahrzeug und Fahrumgebung. Durch diese Unterteilung der Einsatzbedingungen können die notwendigen Kategorien zur Beschreibung der Parameter systematisch ermittelt werden. Nach der Sammlung der Kategorien für die Parameter werden diese im Parameterraum kombiniert, woraus die Beschreibung des Nutzungsraumes resultiert. Aus

diesem lassen sich dann die Einsatzkombinationen der Fahrzeuge und somit die unterschiedlichen elementaren Einsatzarten für die Lastkollektivermittlung bestimmen.

Auf Grundlage des 3F-Parameterraumes werden Referenzmessungen und Lastsimulationen der elementaren Einsatzarten durchgeführt und damit Referenz-Lastkollektive ermittelt. Die Messkampagnen lassen sich dabei systematisch anhand des 3F-Parameterraumes planen. Ein Beispiel hierfür zeigt die Forschungsarbeit von Fugel [FUG10] auf. Anhand der elementaren Einsatzarten werden Fahrzeug, Fahrzeugbeladung und der Streckenmix für die Versuchsfahrten definiert. Außerdem werden Versuchsfahrer anhand der Fahrertypen objektiv eingeteilt. Da eine Messkampagne für eine Vielzahl von Einsatzarten sehr aufwendig ist, können zeitliche Lastverläufe auch simulativ ermittelt werden. Diesen Weg wählt beispielsweise Müller-Kose zur Ermittlung repräsentativer Lastkollektive für Fahrzeuggetriebe [MÜL02]. Mit dem Programm „Statistical Driver Simulation“ werden die elementaren Belastungskollektive für den Antriebsstrang im 3F-Parameterraum in Abhängigkeit von den Modellen für Fahrstrecke, Fahrzeug und Fahrer ermittelt.

Die Lastkollektive der elementaren Betriebszustände bilden die Grundlage für die Bestimmung der repräsentativen Kundenanforderung, entsprechen der Anforderung aber nicht. Denn in der Realität werden Fahrzeuge nicht nur schonend oder rein sportlich gefahren. Außerdem sind Fahrzeuge nicht nur im Stadtverkehr oder im vollbeladenen Zustand unterwegs. Der reale Kunde entspricht einem Mix aus den elementaren Einsatzarten des Parameterraumes, der aus der Einsatzartenverteilung ermittelt werden muss. Dafür werden im Rahmen der 3F-Methode Kundenbefragungen und Langzeitmessungen durchgeführt. In Weilers Arbeit [WEI15] werden beispielsweise mehr als 200 Fahrzeuge im Kundenbetrieb erfasst. Diese Daten stammen von einem NFZ-Hersteller, der diese im Kundenbetrieb anonym und entsprechend der 3F-Parameter erfasst. Die Zuordnung der elementaren Betriebsdaten erfolgt auf Grundlage der charakteristischen Merkmale im Betrieb. Müller-Kose führt Langzeitmessungen im Kundenbetrieb durch, wobei die Fahrer sogar Fahrtlänge und Beladungszustand in einem Fahrtenbuch dokumentierten [MÜL02]. Aufgrund dieser Ergebnisse wird ein repräsentativer Kunde festgelegt und die simulierten Referenz-Lastkollektive superpositioniert. Ein anderer Ansatz zur Ermittlung einer repräsentativen Kundenanforderung kann auch über die Simulation des Kundeverhaltens und der jeweiligen Schädigungsrechnung mit anschließender Quantil-Bestimmung erfolgen. Dieses Vorgehen zeigt Wagner auf. Er berechnet in einer MCS fiktive Belastungskennzahlen in Abhängigkeit von Laufleistungs- und Belastungsverteilung [WAG17]. Daraus werden dann die Lastkollektive für beliebige Quantil-Kunden bestimmt. Bei dieser Vorgehensweise ist das repräsentative Lastkollektiv allerdings unter anderem abhängig vom zugrunde

gelegten Schädigungsmodell und damit von einem Ausfallmechanismus auf Komponentenebene. Ändert sich der Schädigungsmechanismus und damit das Lebensdauermodell, ist auch das ermittelte Lastkollektiv nicht länger repräsentativ.

U Sim-Prozess

Der U Sim-Prozess ist eine Methode zur Ermittlung repräsentativer Lastkollektive, die am ITWM entwickelt und für Bagger [SDS09], Traktoren [ECK17] und Nutzfahrzeuge [DSM09] erfolgreich angewendet wurde. Eine grafische Darstellung der Methode nach [ECK17] ist in Abbildung 3.5 zu finden.

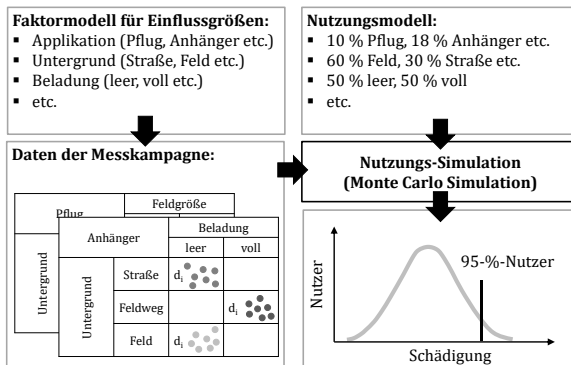


Abbildung 3.5: Anwendung des U Sim-Prozess nach [ECK17]

Kern des U Sim-Prozesses ist die separate Beschreibung von Faktor- und Nutzungsmodell. Das Faktormodell beschreibt, ähnlich dem 3F-Parameterraum, die relevanten Einflussgrößen auf die Belastung. Durch die Kombination dieser im Faktormodell werden die grundlegenden Nutzungsarten ermittelt. Das Faktormodell wird außerdem direkt mit den fiktiven Schädigungswerten verknüpft. Für die Berechnung dieser Werte werden in einer Messkampagne die Referenzkollektive für jede Nutzungsart ermittelt und über ein Lebensdauermodell in Schädigungswerte überführt. Das Nutzungsmodell beschreibt anhand statistischer Verteilungen die Häufigkeiten der Nutzungsarten. Basis für die statistischen Verteilungen sind dabei Umfragen oder Kundennmessungen. Beide Modelle werden separat ermittelt und sind die Eingangsgrößen für die Nutzungssimulation. In dieser Simulation werden fiktive Nutzer basierend auf den Nutzungsverteilungen ermittelt und deren Gesamtschädigung aufsummiert. Dieser Prozess wird in einer MCS wiederholt bis eine ausreichend große Datengrundlage

erzeugt ist. Für diese Datengrundlage wird eine passende statistische Verteilung ermittelt, anhand derer ein p -%-Nutzer ermittelt wird. Für diesen Nutzer wird dann ein repräsentatives Lastkollektiv bestimmt. Das Ergebnis dieses Prozesses hängt dabei von dem Lebensdauermodell, das in der Schädigungsrechnung verwendet wird, ab. Wird ein zweiter Ausfallmechanismus betrachtet, muss der Schädigungswert anhand der gemessenen Referenz-Lastkollektive und dem Lebensdauermodell neu berechnet werden. Mit dem angepassten Faktormodell muss der U Sim-Prozess dann erneut durchlaufen und der repräsentative Nutzer für den zweiten Ausfallmechanismus ermittelt werden.

Ermittlung repräsentativer Lastkollektive nach Schindler, Dietrich und Streicher

Ein weiteres Konzept zur Ermittlung repräsentativer Lastkollektive stellen Schindler, Dietrich und Streicher in ihrem Beitrag „Beanspruchungskollektive für Nutzfahrzeuge in Gesamteuropa – Ein innovativer Extrapolationsansatz“ [SDS10] vor. Wenn auch im Titel von einem Extrapolationsansatz die Rede ist, wird vielmehr ein Verfahren beschrieben, mit dem ein p -%-Beanspruchungskollektiv für einen definierten Vertrauensbereich ermittelt werden kann. Eine Besonderheit dabei ist, dass hierfür im Vergleich zur 3F-Methode und zum U Sim-Prozess kein Schädigungswert ermittelt wird und somit bei den Lastkollektiven Unabhängigkeit vom Ausfallmechanismus besteht. Initialpunkt des Verfahrens ist die Festlegung einer repräsentativen Strecke, die so gewählt wird, dass ein möglichst großer Streubereich der Kundeneinsätze abgedeckt wird. Diese Strecke wird mit einem Versuchsfahrzeug unter repräsentativen Betriebsbedingungen, wie beispielsweise Fahrzeugtyp und Beladungszustand, abgefahren. Dabei wird neben den relevanten Lasten auch der Ort des Versuchsfahrzeuges mittels GPS aufgezeichnet, wodurch eine Verknüpfung von Belastungs-Zeit-Funktion und Ort entsteht. Im nächsten Schritt des Konzeptes wird die Belastungs-Zeit-Funktion der gesamten Strecke in 50 km lange Abschnitte unterteilt und jedem Abschnitt wird eine feste Ordnungszahl j zugewiesen. Diese Abschnitte werden dann in einer MCS zufällig auf die geforderte Lebensdauer superpositioniert. Die sich bei dieser Auswertung ergebende Rainflow-Matrix entspricht dem Einsatz eines Kunden. Dieses Sampling wird n -mal wiederholt bis eine ausreichend große Anzahl an Kundeneinsätzen erzeugt ist. Die Einzelhäufigkeiten der n Rainflow-Matrizen werden der Größe nach sortiert und anhand Gleichung (3.1) wird der p -%-Einsatz P_E ermittelt [SDS10]. Dieser Wert stellt allerdings nur den p -%-Einsatz bezogen auf die Stichprobe mit der Größe n dar. Um eine Aussage auf die Grundgesamtheit treffen zu können, wird das beschriebene Sampling Verfahren m -mal wiederholt, wobei bei jeder Wiederholung der p -%-Einsatz ermittelt wird. Auf diese Weise wird die Streuung des p -%-Einsatzes erzeugt. Aus dieser wiederum, wird mit Gleichung (3.2) das Beanspruchungskollektiv für den p -%-Einsatz mit einem Vertrauensniveau P_C aus den Einzelhäufigkeiten der Klassen in der

Rainflow-Matrix ermittelt. Diese vom fiktiven Schädigungswert unabhängige Vorgehensweise ermöglicht somit eine statistische Aussage über den Kundeneinsatz im Feld unter Berücksichtigung vielfältiger Kundeneinsätze.

$$P_E = \frac{j}{(n + 1)} \quad (3.1)$$

$$P_C = \frac{1 - i}{(m + 1)} \quad (3.2)$$

3.3.3 Datengrundlage für die Lastkollektivvermittlung

In diesem Absatz wird gezeigt, welche Datengrundlage für die Ermittlung von repräsentativen Lastkollektiven notwendig ist. Außerdem wird anhand von Beispielen aus dem Stand der Forschung die Analyse der Datengrundlage aufgezeigt. Für die Ermittlung von Lastkollektiven werden Daten über die Belastung von Systemen, Subsystemen und Komponenten sowie Daten über die Einsatzarten und deren Verteilung im Kundeneinsatz benötigt. Die Einsatzartenverteilung wird benötigt, um repräsentative Kunden zu definieren oder auf Grundlage von Basiskollektiven ein repräsentatives Lastkollektiv zu superpositionieren. Diese werden aus Betriebsdaten, Kundenbefragungen oder Vorwissen ermittelt. Quellen für die Datengrundlage können Betriebs-, Feldversuchs- und Simulationsdaten sein, bei denen eine Belastungs-Zeit-Funktion erfasst wird.

Betriebs-, Feldversuchs- und Simulationsdaten

Lastkollektive stellen eine vereinfachte Darstellung der Belastungs-Zeit-Funktion dar, die in Form von Messungen, Simulationen oder einem Mix aus beidem ermittelt werden. Bei der Messung der Belastungs-Zeit-Funktion lässt sich grundlegend zwischen der Betriebsdatenerfassung beim Kunden und der Messung mit Versuchsfahrzeugen unterscheiden. Für die Bestimmung repräsentativer Lastkollektive für den Kundeneinsatz stellen Daten aus dem Feldeinsatz die höchstverfügbare Informationsgüte dar, da nur hier alle im Feldeinsatz auftretenden Streuungen erfasst werden. Ein Beispiel für die Lastkollektivvermittlung aus Betriebsdaten zeigt die Arbeit von Wagner [WAG17]. Im Rahmen dieser wurden die Belastungen von Nutzfahrzeugen im Realbetrieb erfasst. Die Erfassung solcher Betriebsdaten ist jedoch aus wirtschaftlicher Sicht nicht immer sinnvoll oder auch aus Gründen des Datenschutzes nicht möglich. Eine Alternative stellen daher Messungen mit Versuchsfahrzeugen auf vorgegebenen re-

präsentativen Routen dar. Nachteil dabei ist die fehlende Kundenstreuung, die ebenfalls nur mit großen Aufwänden durch den Einsatz einer repräsentativen Fahrerauswahl berücksichtigt werden kann. Die Erfassung der Kundenstreuung auf vorgegebenen Strecken ist unter anderem in [WIM84] und [SKS90] beschrieben.

Lastkollektive lassen sich auch ohne Messungen mithilfe von Simulationsmethoden ermitteln. Ein Ansatz hierfür ist die „Virtuelle Messkampagne VMC“. Mit der VMC können Lastkollektive für Längs-, Quer- und Vertikaldynamik auf Basis von Umgebungs-, Nutzungs- und Fahrzeugmodellen simuliert werden [SDR14]. Da Simulationen nur so gut sind wie die zugrundeliegenden Modelle und deren Annahmen, sind Lastkollektive auf dieser Basis mit Unsicherheiten behaftet. Allerdings können Simulationsmethoden verwendet werden, um eine Messkampagne optimal zu planen, in dem simulierte Lastkollektive für unterschiedliche Regionen vorab verglichen werden [WSO15]. Simulationsmethoden in der Lastkollektivermittlung können auch in Kombination mit Betriebs- oder Messdaten verwendet werden. Hierfür wird z. B. in [SDS09], [DSM09], [ECK17] die MCS benutzt, um anhand des Nutzungsmodells und der Messdaten Schädigungswerte für alle potentiellen Einsätze zu simulieren, aus diesen der p -%-Einsatz ermittelt wird.

Kundenbefragungen

Die Durchführung von Langzeitmessungen im Kundebetrieb ist zeit- und kostenintensiv. Ein alternativer Weg das Kundennutzungsverhalten zu ermitteln, ist das Durchführen von Kundenbefragungen. Voraussetzung bei Umfragen aller Art ist jedoch die repräsentative Auswahl der zu Befragenden entsprechend der Gesamtpopulation [BD06]. Ein Beispiel für eine breite statistische Erhebung von Kundennutzungsverhalten in diesem Zusammenhang ist die Entwicklung des Laststandards CARLOS TC BC [WEI07]. Im Rahmen des Arbeitskreises CARLOS TC II befragte die DEKRA mehr als 1200 Personen zur Ermittlung des Kundennutzungsverhaltens von Anhängervorrichtungen. Die Kundenbefragung umfasste dabei im Wesentlichen Angaben zum PKW, zur Verwendung der Anhängervorrichtung, zum Beladungszustand, zur zurückgelegten Strecke und zu den Streckentypen. Das Ergebnis dieser Befragung war die Grundlage für die aus Betriebslastenmessung und Kundennutzungsverhalten resultierende Lastannahme für die Anhängervorrichtung [WEI07].

Ein Beispiel für die Kombination von Langzeitmessung und Kundenbefragung findet sich in [HUB10] für die Ermittlung des repräsentativen Einsatzmix eines Teleskopladers. Ziel war die Abschätzung der zeitlichen Anteile von typischen Tätigkeiten eines Teleskopladers auf einem durchschnittlichen deutschen Landwirtschaftsbetrieb. Hierfür wurde deren Einsatz auf drei Testbetrieben gemessen und eine Kundenbefragung durchgeführt. Die Auswahl der elf befragten Kunden erfolgte in Zusammenarbeit

mit dem Hersteller des Teleskopladers, um eine repräsentative Auswahl an landwirtschaftlichen Betrieben sicherzustellen. Hauptteil der Befragung ist der zeitliche Anteil der Tätigkeiten: Laden, Stapeln, Schieben, Umsetzen, Transport, hydraulische Funktionen und Sonstiges. Zusätzlich wurden auch Angaben zur Betriebsform, -größe, Mitarbeiterzahlen, Ausstattungen und Werkzeuge erhoben. Auf Grundlage dieser Befragungsergebnisse sowie den Messungen an den drei Testbetrieben wurde der durchschnittliche Betrieb eines Teleskopladers in einem deutschen Landwirtschaftsbetrieb ermittelt. Daraus und aus den durchgeführten Messungen für die Tätigkeiten eines Teleskopladers wurden 50%-Bemessungskollektive für den Teleskoplader abgeleitet [HUB10].

Vor- und Expertenwissen

Für die Definition des relevanten Auslegungsnutzers wird häufig auf Vor- oder Expertenwissen zurückgegriffen. Dieses Wissen kann in Form von historisch gewachsenen Auslegungsspezifikationen, Standards oder auch Statistiken über das Kundennutzungsverhalten vorliegen. Bei der Erarbeitung des Laststandards CARLOS-multiaxial wird beispielsweise auf das Einsatzprofil des bereits bestehenden Standards CARLOS-einaxial zurückgegriffen [SKH94]. Dieser definiert den prozentualen Fahranteil aufgrund des Streckenmix aus Autobahn, Landstraße, Stadt und Schlechtweg. Wimmer greift im Gegensatz dazu für den Streckenmix auf eine ADAC Statistik des durchschnittlichen deutschen Autofahrers zurück [WIM84]. Wie in Tabelle 3.1 zu sehen ist, unterscheiden sich beide Profile im Autobahnanteil und in der Definition der Landstraße. Hier wird nach [SKH94] zusätzlich zwischen einer guten und einer schlechten Landstraße differenziert.

Tabelle 3.1: Definitionen des Einsatzprofils für PKW-Fahrer

Fahranteil nach	Autobahn	Landstraße		Stadt	Schlechtweg
		gut	schlecht		
[SKH94]	30 %	29 %	14 %	23 %	4 %
[WIM84]	20 %		48 %	20 %	2 %

Für die Verwendung von historisch gewachsenen Auslegungsspezifikationen findet sich kein Beispiel, da diese Firmengeheimnisse darstellen und nicht veröffentlicht werden. Allerdings wird in [VDA16] ein Betriebslastkollektiv abgeleitet, das neben dem normalen Kundenbetrieb auch die „hausspezifischen Auslegungstrecken“ der Fahrzeughersteller abdeckt. Bei Auslegungstrecken ist davon auszugehen, dass diese auch die historisch gewachsene Anforderung der Fahrzeughersteller abdecken.

3.3.4 Fazit der deskriptiven Studie

Der in den Absätzen 3.3.1 bis 3.3.3 beschriebene Stand der Forschung zu repräsentativen Lastkollektiven und deren Datengrundlage wird nachfolgend analysiert. Dabei werden Rückschlüsse für die zu entwickelnde Methodik getroffen und abschließend als Entwicklungsschwerpunkte zusammengefasst.

Analyse der Definition „Repräsentative Lastkollektive“

Die Untersuchung des Stands der Forschung für repräsentative Lastkollektive hat gezeigt, dass keine einheitliche Definition für repräsentative Lastkollektive existiert. Zwar wird in [MÜL02] definiert, dass das meist schädigende Lastkollektiv dem repräsentativen Lastkollektiv entspricht. Allerdings zeigen die neueren Forschungsbeiträge von [HUB10], [WEI15], [SDS10] und [SDS09], dass sich diese Definition nicht durchgesetzt hat. Stattdessen wird unter einem repräsentativen Lastkollektiv auch ein p -%Lastkollektiv oder ein Lastkollektiv basierend auf einer repräsentativen Einsatzverteilung verstanden, siehe [WEI15] und [HUB10]. Gründe für die verschiedenen Arten repräsentativer Lastkollektive sind unterschiedliche Zielsetzungen in der Produktauslegung und unterschiedliche Randbedingungen der Unternehmen und Produkte. Dies hat zur Folge, dass keine eindeutige Definition repräsentativer Lastkollektive gegeben werden kann. Stattdessen müssen in der zu entwickelnden Methodik die verschiedenen Zielsetzungen für repräsentative Lastkollektiven berücksichtigt werden.

Analyse der Konzepte zur Lastkollektivermittlung

Im Stand der Forschung existieren drei Konzepte zur repräsentativen Lastkollektivermittlung: 3F-Methode, U Sim-Prozess und die Methode nach Streicher et al. Eine ganzheitliche Methodik zur Ermittlung von repräsentativen Lastkollektiven existiert jedoch nicht, sondern nur Konzepte, die auf die beschriebenen Anwendungsfälle im Automobil- und Nutzfahrzeugbereich, zugeschnitten sind.

Der Fokus bei 3F und U Sim liegen auf der Ermittlung eines repräsentativen Lastkollektives basierend auf einem Lebensdauermodell, beispielsweise der Wöhlerlinie. Die 3F-Methode teilt dafür den Nutzraum systematisch nach Parametern für Fahrer, Fahrzeug und Fahrumgebung ein. Dadurch wird eine systematische Beschreibung des Nutzraumes ermöglicht, aus dem die relevanten Einsätze abgeleitet werden können. Der U Sim Prozess benutzt ähnlich zur 3F-Methode ein Faktormodell zur Beschreibung des Nutzraumes und zur Ermittlung der grundlegenden Betriebszustände. Außerdem wird ein Nutzungsmodell verwendet, das das Nutzungsverhalten der Kunden statistisch beschreibt. Nachteil an beiden Methoden ist der Fokus auf schädigungsbezogene Lastkollektive, die nur gültig sind solange sich das Produkt und

damit das Lebensdauermodell nicht ändert. Diese Problematik haben Streicher et al erkannt und in ihrer Methode den Fokus auf designunabhängige Lastkollektiven gelegt. Dafür definieren Sie eine repräsentative Strecke und fahren diese mit einem repräsentativen Fahrzeug ab. Die Messungen werden anschließend in gleich große Abschnitte aufgeteilt und mit einer MCS auf die gewünschte Länge zufällig gesampelt. Dabei werden Lastkollektive erzeugt, die nicht nur für ein bestimmtes Quantil gelten, sondern auch mit einem vorgegebenen Vertrauensniveau. Nachteil an der MCS ist das Streckenabschnitte superpositioniert werden, die so in der Realität nicht vorkommen. Etwaige Ungenauigkeiten daraus sollten allerdings nur zur konservativeren Lastkollektiven führen.

Alle Konzepte gehen davon aus, dass sowohl die Parameter für den Nutzraum bzw. der repräsentative Einsatz als auch die zu berücksichtigenden Lasten bekannt sind. Eine Vorgehensweise für die Parameterermittlung des Nutzraumes und der Identifikation der relevanten Lasten enthalten diese Konzepte nicht. Für eine ganzheitliche Methodik zur Ermittlung repräsentativer Lastkollektive müssen aber gerade diese Schritte integriert werden, denn die Definition des korrekten Nutzraumes und der relevanten Lastarten ist essentiell für die Repräsentativität der Lastkollektive.

Analyse der Datengrundlage für Lastkollektivermittlung

Der Stand der Forschung stützt sich bei der Lastkollektivermittlung überwiegend auf Messungen bei einzelnen Kunden oder gezielten Testfahrten für die Messung von Basiskollektiven oder repräsentativen Einsätzen. Einzig in [WEI15] werden Felddaten verwendet, um Basiskollektive und deren Verteilung zu bestimmen. Auch Vor- und Expertenwissen wird genutzt, so z. B. in den Standards CARLOS. Hier wird auf einen repräsentativen Einsatzmix aus dem Stand der Technik zurückgegriffen, der mit repräsentativen Fahrern und Fahrzeugen nachgefahren und gemessen wird. Generell sollte Experten- und Vorwissen aus dem Stand der Technik oder Firmenknowhow genutzt werden. Es sollte aber auch überprüft werden, ob das Wissen noch auf die aktuelle Problemstellung anwendbar ist. Dass Mittel der Kundenbefragung kommt zum Einsatz, wenn eine Einsatzverteilung kundenrepräsentativ ermittelt werden soll. Beispiele hierfür finden sich in: [WEI07] und [HUB10]. Beide Beispiele zeigen auf, wie eine Kundenbefragung zu einer zeit- und kostenoptimalen Messung der Betriebszustände genutzt werden kann. Außerdem wird deutlich, dass neben der Kundennutzung auch eine Beschreibung der Einsatzart und der Einsatzbedingungen wichtig sind, um selbige zu klassifizieren.

Zusammenfassend zeigt der Stand der Forschung noch Lücken bezüglich der Datennutzung von Felddaten aus Steuergeräten zur Lastkollektivermittlung. Hier muss ein Schwerpunkt der zu entwickelnden Methodik liegen, da diese Daten in Zukunft in

noch größerem Umfang zur Verfügung stehen werden. Aber auch Messdaten aus Feldversuchen müssen für die Lastkollektivermittlung berücksichtigt werden, da nicht immer eine Datenbasis aus dem Feld zur Verfügung steht, beispielsweise bei Neuentwicklungen oder für Subsysteme.

Entwicklungsschwerpunkte für die Methodik

Die Analyse vom Stand der Forschung hat gezeigt, dass es vielversprechende Konzepte für die Ermittlung repräsentativer Lastkollektive gibt. Allerdings sind diese Konzepte zugeschnitten auf spezifische Anwendung der Automobil- und Nutzfahrzeugindustrie unter gegebenen Randbedingungen wie bekannter Lasten und Nutzräumen. Aus diesem Grund stellt eine ganzheitliche Methodik zur Ermittlung repräsentativer Lastkollektive einen Beitrag zum Stand der Forschung dar. Hierfür werden folgende Entwicklungsschwerpunkte basierend auf dem Stand der Forschung gesetzt:

- Berücksichtigung verschiedener Zielsetzungen für die repräsentative Lastkollektivermittlung
- Anwendbarkeit der Methodik unabhängig vom Produkttyp
- Systematische Vorgehensweise für die Ermittlung der relevanten Last- und Einsatzarten
- Spezifikation notwendiger Messgrößen, Randbedingungen und Einsatz-Klassifikationsverfahren für die Lastmessung von verschiedener Betriebsmodi
- Repräsentative Lastkollektivermittlung auf Grundlage von Mess- und Betriebsdaten

3.4 Anforderungen an die Methodik

Die in 3.3.4 aufgezeigten Entwicklungsschwerpunkte werden als Anforderungen an die Methodik aufgenommen und weiter ausdetailliert. Dadurch wird die Grundlage für die Konzeption der Methodik geschaffen und deren funktionaler Umfang definiert. Die Definition dieser Anforderungen erfolgt in Anlehnung an das Vorgehen in der Produktentwicklung. Hier lassen sich Anforderungen nach der Disziplin des Anforderungsmanagements in funktionale und nicht-funktionale Anforderungen gliedern [DHJ17]. Die abgeleiteten Entwicklungsschwerpunkte sind dabei überwiegend den funktionalen Anforderungen zuzuordnen, und werden in 3.4.1 beschrieben. In diese gehen bereits die Rahmenbedingungen bezüglich des Lösungsraumes ein. Dabei handelt es sich um thematische Abgrenzungen und Fokussierungen bei der Methodenentwicklung. Neben den funktionalen Anforderungen müssen auch nicht-funktionale Anforderungen berücksichtigt werden, wie z. B. Anwendbarkeit oder Transparenz. Diese

werden in 3.4.2 näher beschrieben. Alle Anforderungen an die Methodik werden in 3.4.3 zusammengefasst und bilden die Grundlage für die Konzeption der Methodik in 3.5.

3.4.1 Funktionale Anforderungen

Unter funktionalen Anforderungen sind alle notwendigen Funktionen und damit auch die Leistungsfähigkeit eines Produktes oder eines Prozesses zu verstehen. Nachfolgend werden die notwendigen Anforderungen für die Methodik spezifiziert.

Zieldefinition für die Ermittlung repräsentativer Lastkollektive

Repräsentative Lastkollektive lassen sich in die drei Kategorien maximale Schädigung auf Komponentenebene, den p-%-Kunden und den repräsentativen Einsatzmix einteilen. Entsprechend der beabsichtigten Verwendung des repräsentativen Lastkollektives müssen diese repräsentativen Lastkollektive in der Methodik variabel als Ziel definiert werden können. Dabei gilt es zusätzlich die Unterscheidung zwischen designunabhängigen und -abhängigen Lastkollektiven zu berücksichtigen. Unabhängig von dieser Zieldefinition muss die Methodik sowohl die Ermittlung von anwendungsspezifischen als auch von Worst Case Lastkollektiven umfassen. So können anwendungsspezifische Lastkollektive unter anderem Entwicklungspotential für spezifische Anwendungen aufzeigen. Worst Case Lastkollektive hingegen können ressourceneffizient anhand der Worst Case Anwendung ermittelt werden.

Anwendbarkeit auf Gesamtsystem-, Subsystem- und Komponentenebene

Von der Gesamtsystem- bis zur Komponentenauslegung ist die Kenntnis der Belastung im Feld für eine kundenrelevante Auslegung entscheidend. Damit ist nicht nur der Gesamtsystem-Hersteller an der Ermittlung repräsentativer Lastkollektive interessiert, sondern auch Subsystem- und Komponenten-Hersteller. Deshalb muss in der Methodik aus funktionaler Sicht die Produktebene im Kontext von Gesamtsystem, Subsystem und Komponentenebene bei der Lastkollektivermittlung berücksichtigt werden. Dies ist von großer Bedeutung für die angreifenden Lasten und Umgebungsbedingungen sowie für die Definition der benötigten Messgrößen. Aus diesem Grund muss ein Teil der Methodik eine Abgrenzung des zu betrachtenden Systems von seiner Umgebung sein. Gleichzeitig muss die Anwendbarkeit der Methodik unabhängig von der definierten Systemgrenze gegeben sein.

Ermittlung der relevanten Lasten

Mit der der Definition einer Systemgrenze ist das System zu seiner Umgebung abgegrenzt. An dieser Grenze muss daher die Ermittlung der relevanten Lasten erfolgen. Bei der Sammlung von Lasten an dieser Grenze müssen funktionale und umweltbedingte Lasten oder Einflussgrößen berücksichtigt werden. Dafür muss die Methodik ein Vorgehen zur Sammlung dieser Lasten sowie zur Ermittlung der relevanten Lasten beinhalten. Die Lastartensammlung soll gestützt auf vorhandenem Wissen und Erfahrungen der Produktentwickler und anhand bestehender Normen und Standards erfolgen. Außerdem soll das Expertenwissen auch für die Ermittlung der relevanten Lasten genutzt werden, da hier im Allgemeinen bereits große Vorkenntnisse bezüglich Ausfallursachen vorliegen. Dieses Expertenwissen muss für die Lastsammlung und für die Ermittlung der relevanten Lasten systematisch eingehen, sodass eine hohe Reproduzierbarkeit auch bei Austausch der Experten gegeben ist. Insbesondere die Bewertung der Lasten sollte aus diesem Grund einem möglichst einfachen und bekannten Bewertungsschema folgen.

Ermittlung der relevanten Einsatzarten

Essentieller Bestandteil der Methodik muss die Ermittlung der relevanten Einsatzarten sein, da diese vorgeben für was das Lastkollektive repräsentativ ist. Dafür muss die Verwendung des Produktes durch den Kunden ermittelt werden. Das Ziel ist die Ermittlung der relevanten Einsatzarten und damit die Festlegung der notwendigen Daten für die Lastkollektivermittlung. Wie bei der Ermittlung der relevanten Lasten, soll hier der Einsatz von qualitativem Expertenwissen anhand einer systematischen und reproduzierbaren Vorgehensweise verwendet werden. Zentraler Bestandteil dieser Vorgehensweise muss die Reduktion der Einsatzarten auf einen handhabbaren Umfang sein, um insbesondere Messkampagnen effizient planen zu können. Zusätzlich muss für die Festlegung der relevanten Einsatzarten auch der Umgang mit Missbrauchsfällen berücksichtigt werden. Dabei muss im Fall des nicht-bestimmungsgerichteten Gebrauches die Nachweisbarkeit und der gesetzliche Rahmen berücksichtigt werden.

Messgrößen-Spezifikation

Für die Ermittlung von Lastkollektiven muss sichergestellt werden, dass die erforderlichen Messgrößen an den erforderlichen Stellen mit der notwendigen Messauflösung erfasst werden. Außerdem sind Messgrößen zur Bestimmung der Einsatzdauer und der Betriebsmodi notwendig. Diese Spezifikation muss anhand der Systemgrenze, Lastarten, Einsatzarten und in Abhängigkeit der Zielsetzung für die Lastkollektiver-

mittlung erfolgen. In der Methodik sollen dabei auch physikalische Modelle zur Ermittlung der inneren Kräfte berücksichtigt werden, sodass auf Grundlage von Messungen auf der Gesamtsystem- oder Subsystemebene auf die Lasten an einer Komponente geschlossen werden kann. Dies ist insbesondere für im Betrieb erfasste Signale aus Steuergeräten notwendig, die im Allgemeinen mehr Steuer- als Lastgröße darstellen.

Auswahl des erforderlichen Klassierverfahren

Um aus einem Last-Zeit-Schrieb Lastkollektive zu ermitteln, werden je nach Lastfall verschiedene Zähl- und Klassierverfahren angewendet. Die Wahl des passenden Verfahrens für den jeweiligen Lastfall erfolgt dabei meist auf Basis von Erfahrungswissen. Da das falsche Verfahren keine belastbaren Ergebnisse für den jeweiligen Lastfall liefert, gilt es diese Fehlerquelle zu entschärfen. Deshalb soll für diese Methodik eine Hilfestellung für die Auswahl des Klassierverfahrens in Abhängigkeit von Belastungs-Zeit-Funktion und Schädigungsmechanismus entwickelt werden.

Lastkollektivermittlung für Mess- und Betriebsdaten

Zentraler Bestandteil der Methodik soll die Lastkollektivermittlung auf Basis von Mess- und Betriebsdaten sein. Lastkollektive aus Simulationen eignen sich aufgrund der sich noch ändernden Geometrien und der teils noch unbekanntem Einsatzarten vor allem in der frühen Entwicklungsphase von neuen Produkten. Außerdem sind Simulationen mit vergleichsweise hohen Unsicherheiten verbunden. Aus diesen Gründen wird die simulative Ermittlung von Lastdaten für die Ermittlung repräsentativer Lastkollektive in dieser Methodik nicht verwendet.

3.4.2 Allgemeine Anforderungen

Unter den allgemeinen Anforderungen an die Methodik sind die nicht-funktionalen Anforderungen an die Methodik aufgeführt. Sie beschreiben, im Gegensatz zum funktionalen Umfang, allgemeine Anforderungen an ein Produkt oder einen Prozess.

Anwendbarkeit

Entgegen dem Stand der Forschung zur Lastkollektivermittlung soll diese Methodik nicht nur für Fahrzeuge, sondern explizit produktunabhängig anwendbar sein. Dafür müssen bestehende Methodiken, wie beispielsweise der 3F-Parameterraum, auf eine allgemeine Produktebene übertragen werden. Außerdem ist es für die Anwendbarkeit wichtig, dass die Methodik unabhängig vom Stand des Produktentwicklungsprozesses

angewendet werden kann. Dafür gilt es zu berücksichtigen, dass in Abhängigkeit dieses Standes verschiedene Startpunkte im Gesamtprozess sinnvoll sind. So können für eine Produktverbesserung schon relevante Ausfallmechanismen und Lastarten als Ausgangslage für die Einsatzartenanalyse bekannt sein.

Durchgängigkeit und Transparenz

Eine weitere Anforderung ist die Durchgängigkeit der Methode. Darunter ist eine systematische Vorgehensweise zu verstehen, bei der jederzeit der Überblick über bereits getätigte und noch zu tätige Schritte gegeben ist. Dies ist notwendig, um die Planbarkeit der nächsten Schritte zu gewährleisten. Teil der Durchgängigkeit sind außerdem die Nachvollziehbarkeit und die Transparenz der Methodik für außenstehende Personen. Diese Anforderungen stellen sicher, dass innerhalb eines Unternehmens die Methodik und auch deren Ergebnis optimal verstanden, akzeptiert und genutzt werden können. Insbesondere die Transparenz hilft dabei das Ergebnis und die Randbedingungen unter denen dieses zustande gekommen ist zu verstehen, was für die Akzeptanz der repräsentativen Lastkollektive notwendig ist.

Eindeutig- und Wiederholbarkeit

Für die Anwendung der Methodik gilt es die einzelnen Schritte möglichst eindeutig zu gestalten, um Fehlentscheidungen zu minimieren. Neben dieser Eindeutigkeit in der Vorgehensweise muss außerdem sichergestellt werden, dass die erzielten Teilergebnisse und das Gesamtergebnis auch unter veränderten Randbedingungen wiederholt erzielt werden können. Dafür müssen Prozesse so gestaltet sein, dass bei Entscheidungen auf Grundlage von Expertenwissen, dieses Wissen systematisch bewertet und dadurch weitgehend quantifiziert werden kann.

Ressourceneffizienz

Im wirtschaftlichen Wettbewerb ist der effiziente Einsatz der zur Verfügung stehenden Ressourcen notwendig. Bei der repräsentativen Lastkollektivermittlung kommt zusätzlich hinzu, dass nicht immer die gleichen technischen Voraussetzungen in den Firmen bestehen. So haben in der Fahrzeugbranche OEMs beispielsweise eine ganz andere Möglichkeit der Betriebsdatenerfassung als Subsystem-Hersteller. Es muss daher Anspruch der Methodik sein, die Lastkollektivermittlung in Abhängigkeit der jeweiligen technischen Optionen bei einem ressourceneffizienten Aufwand zu ermöglichen und somit das optimale Ergebnisse unter den gegebenen Randbedingungen zu erzielen.

3.4.3 Zusammenfassung der Anforderungen

Zur Übersicht werden die ermittelten Anforderungen an die Methodik in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst:

Tabelle 3.2: Anforderung an Methodik

Funktionale Anforderungen
- Zieldefinition für die Ermittlung repräsentativer Lastkollektive
- Anwendbarkeit auf Gesamtsystem-, Subsystem- und Komponentenebene
- Ermittlung der relevanten Lasten
- Ermittlung der relevanten Einsatzarten
- Messgrößen-Spezifikation
- Auswahl des erforderlichen Klassierverfahren
- Lastkollektivermittlung für Mess- und Betriebsdaten

Allgemeine Anforderungen
- Anwendbarkeit
- Durchgängigkeit und Transparenz
- Eindeutigkeit und Wiederholbarkeit
- Ressourceneffizienz

3.5 Konzeption der Methodik

Die in 3.4 beschriebenen Anforderungen sind die Grundlage für die Konzeption der Methodik. Anhand dieser ergeben sich Aufbau und Ablauf der Methodik sowie deren funktionalen Umfänge. Nachfolgend wird zunächst in 3.5.1 die Lösungsfindung beschrieben, bevor in 3.5.2 das Grobkonzept der Methodik vorgestellt wird. Vollumfänglich wird die Methodik dann in Kapitel 4 beschrieben.

3.5.1 Lösungsfindung

Für den Lösungsfindungsprozess ist es essentiell, die gestellten funktionalen Anforderungen vollständig und die allgemeinen Anforderungen bestmöglich zu erfüllen. Die funktionalen Anforderungen stellen daher notwendige Umfänge der Methodik dar. Für die Eindeutigkeit, Durchgängigkeit und die Transparenz der Methodik bietet

sich ein schrittweises Vorgehen in der Methodik an. Da für die Ermittlung repräsentativer Lastkollektive eine Vielzahl von Schritten notwendig ist, ist es sinnvoll diese in einigen Phasen zusammenzufassen, um Transparenz und Übersichtlichkeit zu gewährleisten. Anhand dieser Phasen kann der Überblick über den Gesamtprozess behalten werden. Außerdem kann die Phasendefinition genutzt werden, um verschiedene Einstiegspunkte in die Methodik zu definieren.

Ziel der Methodik ist die Ermittlung repräsentativer Lastkollektive für ein Produkt auf Basis von Expertenwissen, Mess- und Betriebsdaten. Das Produkt dabei kann sowohl Gesamtsystem, Subsystem oder Komponente sein und muss an der jeweiligen Systemgrenze von seiner Umgebung getrennt werden. An dieser Systemgrenze werden die eingehenden Lasten gesammelt und anschließend qualitativ bewertet, um die relevanten Lasten zu ermitteln. Somit lässt sich die 1. Phase der Methodik, die „System- und Lastanalyse“, mit folgenden funktionalen Inhalten definieren:

- Systemanalyse mit Definition der Systemgrenze
- Lastanalyse an Systemgrenze
- Ermittlung der relevanten Lasten

Für die 2. Phase der Methodik sind die relevanten Lasten erforderlich, um in einem folgenden Schritt die relevanten Einsatzarten für die Lastkollektivermittlung einzuzugrenzen. Phase 2 beginnt mit der Sammlung der Einsatzarten des zu betrachtenden Systems, wobei explizit der Einfluss von Gesamt- oder Subsystem auf die zu betrachtende Ebene zu berücksichtigen ist. Zu klären ist außerdem der Umgang mit Missbrauchsfällen in der Lastkollektivermittlung. Zusammenfassend sind folgende funktionalen Umfänge in der Phase „Nutzraumanalyse“ notwendig:

- Einsatzartensammlung
- Vorgehensweise für Umgang mit Missbrauchsfällen
- Ermittlung der relevanten Einsatzarten

Nachdem in den Phasen 1 und 2 die relevanten Lasten und die abzudeckenden Einsatzarten ermittelt werden, legt Phase 3 die Abdeckung des Nutzraumes fest. Dabei muss berücksichtigt werden, dass es ausreichend sein kann nur die Einsatzart zu erfassen, aus der im Betrieb das schädigendste Lastkollektiv folgt. Damit kommt dieser Phase eine große Bedeutung für die Lastkollektivermittlung zu, da hier die Zieldefinition erfolgt. Es wird festgelegt welche repräsentative Lastkollektive ermittelt werden und welche Vereinfachungen und Annahmen in der Abdeckung des Nutzungsraumes erfolgen. Außerdem wird festgelegt, ob Mess- oder Betriebsdaten für die Lastkollektivermittlung verwendet werden und welche Messgrößen notwendig sind. Phase 3 trägt somit den Titel „Zielsetzung und Datenspezifikation“ und umfasst die notwendigen Schritte:

- Zieldefinition der Lastkollektivermittlung
- Auswahl der Datengrundlage
- Spezifikation der notwendigen Daten

In Phase 4 sind die Vorarbeiten abgeschlossen und die Lastkollektivermittlung beginnt. Diese erfolgt entsprechend dem Fokus dieser Arbeit auf Grundlage von Mess- oder Betriebsdaten. Für die Lastkollektivermittlung müssen zunächst die Daten von Messfehlern befreit und fehlerhafte Datensätze entfernt werden. Für die Repräsentativität der Lastkollektive muss außerdem eine Klassifikation der Einsätze erfolgen. Die Lastkollektivermittlung erfolgt anschließend unter Berücksichtigung der verschiedenen Arten repräsentativer Lastkollektive. Somit erhält die vierte Phase den Titel „Repräsentative Lastkollektivermittlung“ und muss folgende Umfänge beinhalten:

- Datenaufbereitung
- Einsatz-Klassifikation
- Lastkollektivermittlung

Die Verknüpfung der vier beschriebenen Phasen anhand der jeweiligen Eingangs- und Ausgangsgrößen wird nachfolgend in 3.5.2 beschrieben. Außerdem wird diskutiert in welcher Phase, in Abhängigkeit des vorhandenen Vorwissens, in die Methodik eingestiegen werden kann.

3.5.2 Aufbau der Methodik

Aus dem Lösungsfindungsprozess resultieren vier Phasen für die Methodik. Diese werden sequentiell angeordnet und über Input- und Outputgrößen verbunden. In Abbildung 3.6 ist der gesamte Aufbau der Methodik, sowie Ziel-, Input- und Outputgrößen für die einzelnen Phasen abgebildet. Zielsetzung und Output von Phase 1 ist die Ermittlung der relevanten Lastarten, die basierend auf den grundsätzlichen Produktinformationen, wie beispielsweise Konstruktionszeichnungen, Vor- und Expertenwissen ermittelt werden. Die relevanten Lasten sind notwendiger Input für die Nutzraumanalyse in Phase 2. Hier werden die relevanten Einsatzarten ermittelt, wofür Vor- und Expertenwissen aber auch Normen benutzt werden. Eine Problemstellung bei der Ermittlung des Nutzraumes ist der Messaufwand bei großen Nutzräumen. Um den Nutzraum sinnvoll auf die relevanten Einsatzarten zu begrenzen, sind die relevanten Lasten notwendig. Anhand dieser können nicht relevante Einsatzarten aus dem Nutzraum entfernt werden. Der relevante Nutzraum ist Output von Phase 2 und somit Input für Phase 3. Hier wird anhand der zu verfolgenden Zielsetzung der Lastkollektivermittlung festgelegt, wie der relevante Nutzraum mit Betriebs- und Messdaten erfasst werden muss. Dazu gehört die Festlegung der notwendigen Messgrößen

anhand derer die Lastkollektive für die festgelegten Einsatzarten bestimmt werden. Hierfür ist die Berücksichtigung des Systemaufbaus und damit auch der Systemgrenze notwendig, um die benötigten Messgrößen festzulegen. Die Mess- und Betriebsdatenerfassung ist zwar nicht Teil der Methodik aber das Resultat dieser ist der Input für die Lastkollektivermittlung in Phase 4, in welcher die repräsentativen Lastkollektive ermittelt werden.

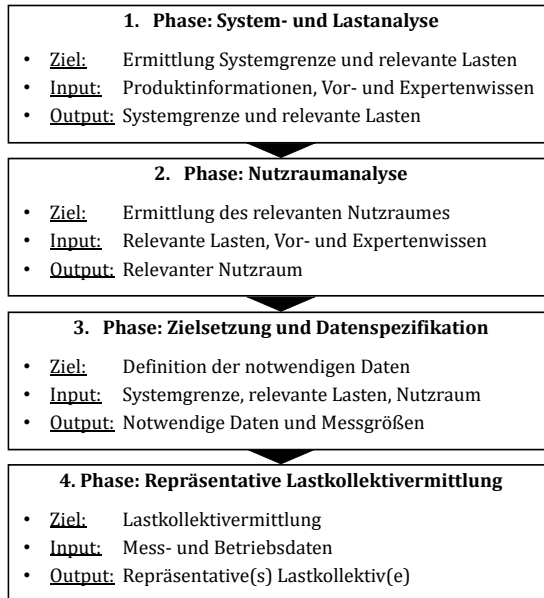


Abbildung 3.6: Aufbau der Methodik

Die Methodik kann in Abhängigkeit von Vorwissen sowohl in Phase 2 als auch in Phase 3 begonnen werden. Wichtig ist allerdings, dass als Input für Phase 2 die Systemgrenze und die relevanten Lasten bereits vorhanden sind. Wird die Methode in Phase 3 begonnen, ist als zusätzliches Vorwissen auch der relevante Nutzraum notwendig. Grundsätzlich muss jedoch die Güte des Vorwissens überprüft werden. Soll ein bereits nach dieser Methodik ermitteltes repräsentatives Lastkollektiv durch zusätzliche Messungen optimiert werden, ist ein erneuter Einstieg bei Phase 4 denkbar.

4 Methodik zur Lastkollektivermittlung

Die in Abbildung 4.1 dargestellte Methodik umfasst vier sequentiell angeordnete Phasen. Innerhalb der Phasen sind die notwendigen Einzelschritte ebenfalls als sequentieller Ablauf angeordnet. In den Unterkapiteln dieses Kapitels werden diese detailliert beschrieben, weshalb nachfolgend nur eine Übersicht über Methodik, Phasen und Einzelschritte gegeben wird.

In Phase 1 der „System- und Lastanalyse“ sind die Einzelschritte: „Systemanalyse“, „Lastanalyse“ und „Relevante Lasten“ durchzuführen. Ziel dieser Phase ist die Ermittlung der relevanten Lasten. Dafür wird zunächst eine Systemgrenze festgelegt und die Belastungen an dieser Systemgrenze gesammelt. Aus dieser Sammlung werden abschließend die relevanten Lasten abgeleitet.

Die Einzelschritte: „Einsatzartensammlung“, „Umgang mit Missbrauch“ und „Relevanter Nutzraum“ sind in Phase 2 durchzuführen, um den relevanten Nutzraum für die Lastkollektivermittlung zu bestimmen. Für die Bestimmung des Nutzraumes werden zunächst alle Einsatzarten des Systems gesammelt. Vor der Ermittlung des relevanten Nutzraumes wird zunächst der Umgang mit missbräuchlichen Einsatzarten festgelegt. Danach wird der abzudeckende Nutzraum für die relevanten Lasten bestimmt.

Der relevante Nutzraum für die Lastkollektivermittlung ist der zentrale Input für Phase 3 „Zielsetzung und Datenspezifikation“. In der „Definition Zielsetzung“ wird entsprechend der technischen, zeitlichen und aufwandsbezogenen Randbedingungen die Nutzraumabdeckung festgelegt. In „Definition Datengrundlage“ sind im Kontext von Betriebs- und Messdaten die Vor- und Nachteile der Datentypen abzuwägen, um die optimale Datengrundlage für die Lastkollektivermittlung zu wählen. Hiervon abhängig ist neben der Definition der notwendigen Messdaten auch die der Messgrößen, was in der „Datenspezifikation“ geschieht.

In Phase 4 „Repräsentative Lastkollektivermittlung“ wird die Datenanalyse und die Ableitung der repräsentativen Lastkollektive durchgeführt. Hierfür sind die Schritte: „Datenaufbereitung“, „Einsatzklassifikation“ und „Lastkollektivermittlung“ durchzuführen. Vor der Lastkollektivermittlung müssen die Datensätze von Fehlern bereinigt und den zu repräsentierenden Einsatzklassen zugewiesen werden. Danach erfolgt die Ermittlung der repräsentativen Lastkollektive und deren Validierung.

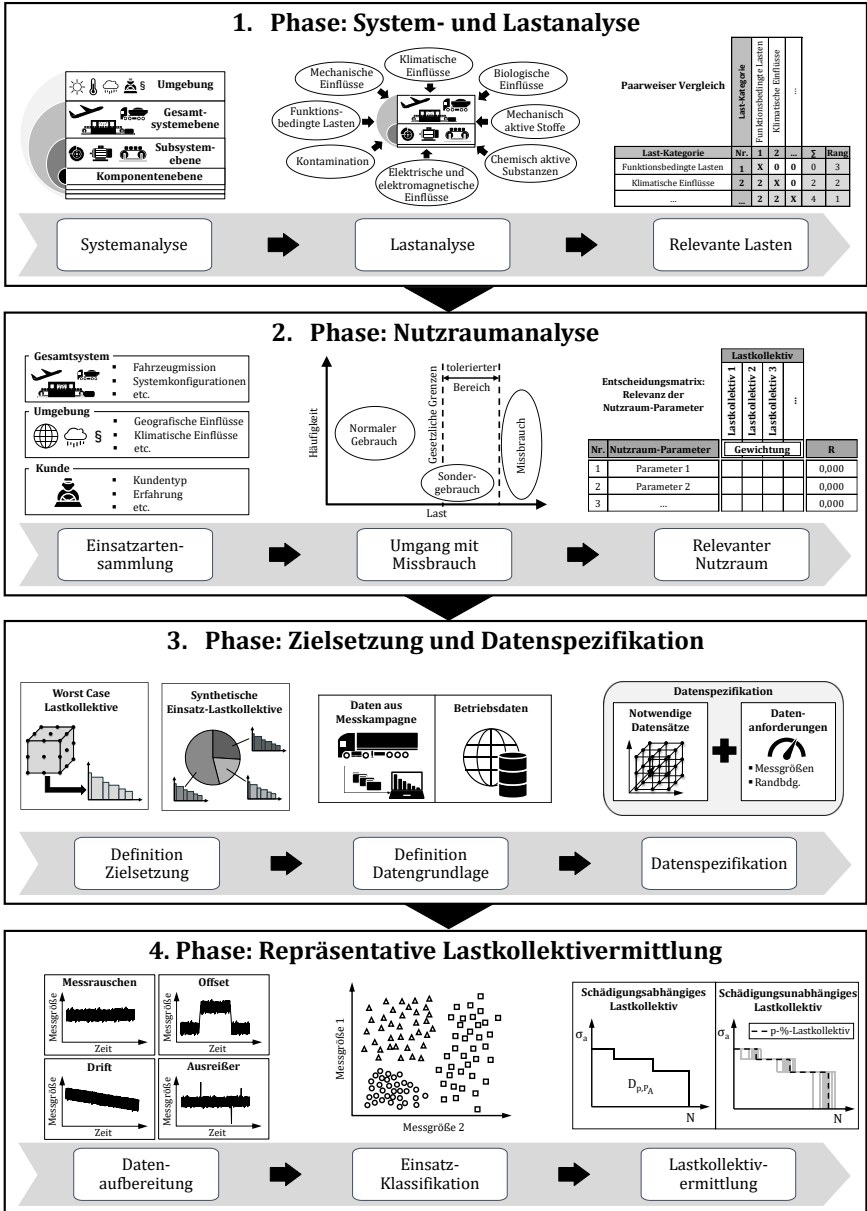


Abbildung 4.1: Methodik zur Lastkollektivermittlung

4.1 System- und Lastanalyse

Initialpunkt der Methodik ist die Phase der „System- und Lastanalyse“. Hier wird das System detailliert betrachtet und die relevanten Lasten bestimmt. Dafür sind die drei in Abbildung 4.2 dargestellten Schritte sequentiell durchzuführen. Der erste Schritt „Systemanalyse“ wird in Absatz 4.1.1 detailliert erläutert. In dieser wird das System von seiner Umgebung abgegrenzt. Darauf folgt die „Lastanalyse“ in der die funktionsbedingten Lasten ermittelt und die umweltbedingten Lasten an der Systemgrenze gesammelt werden, was in Absatz 4.1.2 beschrieben ist. Da für umweltbedingte Einflussgrößen eine große Sammlung an potentiellen Lasten zu erwarten ist, muss diese auf die relevanten Lasten reduziert werden. Dies geschieht im letzten Schritt dieser Phase, in der die Lasten entsprechend ihrer Bedeutung für die Systemlebensdauer bewertet werden. Daraus folgt ein Ranking der Lasten, woraus die weiter zu betrachten Lasten aufwandsgerecht abgeleitet werden. Ergebnis dieser Phase ist ein Blockschaltbild des Systems und die relevanten Lasten, die an der Systemgrenze wirken.

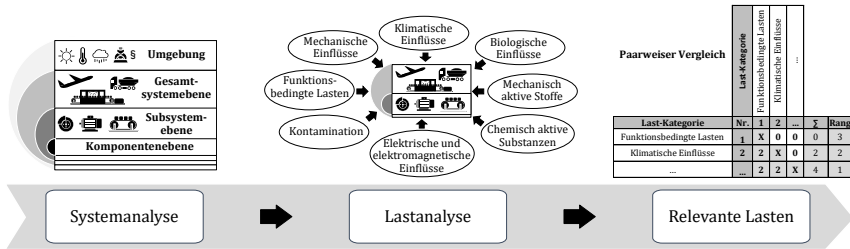


Abbildung 4.2: Phase 1: System- und Lastanalyse

4.1.1 Systemanalyse

Für die Festlegung der Systemgrenze, wird das System mitsamt seiner Umgebung betrachtet. Hierfür wird zunächst nach Gesamtsystem-, Subsystem- und Komponentenebene unterschieden. Erweitert wird diese Betrachtung durch die Umgebung in der das Gesamtsystem agiert. Insgesamt ergibt sich dadurch ein zwiebelartiger Aufbau mit vier Ebenen, der in Abbildung 4.3 zu sehen ist. In dieser Darstellung sind die Systemebenen eines Produktes innerhalb der Umgebung dargestellt.

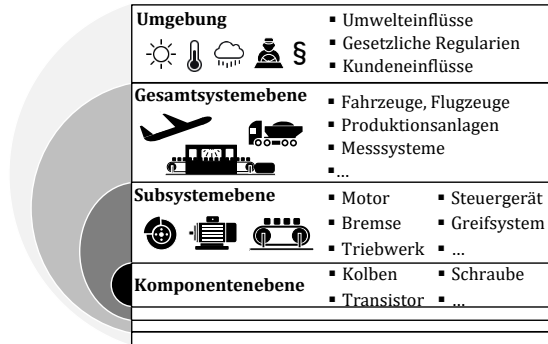


Abbildung 4.3: Produktebenen als Teil der Umgebung

Die Umgebung beeinflusst dabei den Einsatz des Gesamtsystems durch indirekte Lasten aus der Umwelt aber auch direkt, wie z. B. durch den Kunden. Dieser gibt die Art und die Häufigkeit der Produktnutzung vor, auch wenn diese beispielsweise im Falle des Automobils im Straßenverkehr durch den Gesetzgeber reglementiert ist. Trotz dieser Reglementierung bleibt es jedoch der Kunde und vor allem die Vielfalt der Kundeneinsätze, die bei einer Lastkollektivermittlung berücksichtigt werden müssen. Dieser Einfluss betrifft nicht nur das Gesamtsystem, sondern wird auf die Subsystem- und die Komponentenebene weitergegeben. Typische Beispiele für Gesamtsysteme sind Fahrzeuge, Flugzeuge, Produktionsanlagen aber auch elektronische Geräte wie Computer und Mobiltelefone. Jedes dieser Gesamtsysteme lässt sich in Subsysteme aufteilen, wie z. B. Elektromotoren, Bremsen, Steuergeräte oder Platinen. Werden diese als Teil der Gesamtsysteme betrachtet, fällt am Beispiel des Nutzfahrzeuges auf, dass dieselben Subsysteme in unterschiedlichen Varianten des Gesamtsystems verbaut werden. Dieser Sachverhalt erweitert die Einsatzvielfalt und somit auch den abzudeckenden Nutzraum bei der Lastkollektivermittlung. Dieselbe Situation ergibt sich bei der Betrachtung der Komponenten als Teil der Subsysteme, die in Abbildung 4.3 den inneren Kern darstellen. Aus diesem Modell wird ersichtlich, dass sich die Anzahl der zu berücksichtigen Faktoren für die Lastkollektivermittlung schnell vervielfachen können, wenn sich das zu betrachtende System auf der Subsystem- oder Komponentenebene befindet. Dieser Zusammenhang macht die Festlegung der Systemgrenze des Produktes und damit die Abgrenzung zu den anderen Systemebenen zum ersten Schritt in der Lastkollektivermittlung. Die Systemgrenze ist allerdings auch für die Ermittlung der relevanten Lasten notwendig, denn die Systemebene hat eine Auswir-

kung auf die angreifenden Lasten. Insbesondere bei klimatischen Lasten ist zu unterscheiden, ob diese auf der Gesamtsystemebene direkt auf das System einwirken oder ob das System durch ein geschlossenes Gehäuse diesen nur eingeschränkt oder gar nicht ausgesetzt ist. Auch Interaktionen zwischen dem System und anderen Subsystemen, Komponenten und dem Gesamtsystem werden durch Informations-, Signal- und Stoffflüsse über die Systemgrenze hinweg ersichtlich.

Das Vorgehen bei der Festlegung der Systemgrenze beginnt bei der Unterscheidung zwischen Gesamtsystem-, Subsystem- und Komponentenebenen, was in Abbildung 4.3 zu sehen ist. Dabei wird zunächst eine grobe Festlegung der Systemgrenze vorgenommen, die davon abhängt für welches Produkt repräsentative Lastkollektive ermittelt werden sollen. Anschließend wird eine detaillierte Betrachtung des Systems und seiner angrenzenden Umgebung durchgeführt. Eine passende Methode hierfür ist die Darstellung des Systems als Blockdiagramm, wie es beispielsweise auch in der Zuverlässigkeitstechnik und der Produktentwicklung angewendet wird [BL04], [PB06]. In diesem werden alle Subsysteme und Komponenten des Systems sowie Schnittstellen zu dessen direkter Umgebung ersichtlich. Als Grundlage für die Abstraktion des Produktes in ein Blockdiagramm dienen technische Zeichnungen und Expertenwissen aus dem Entwicklerteam, wie schematisch in Abbildung 4.4 dargestellt.

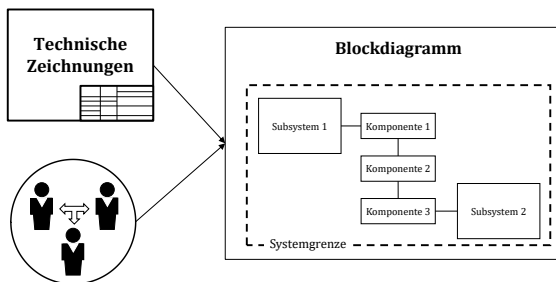


Abbildung 4.4: Blockdiagramm und Definition der Systemgrenze

Bei der Erstellung des Blockdiagrammes ist es auf Systemebene zweckmäßig zunächst nur bis auf Subsystemebene herunter zu brechen. Anschließend muss jedoch geprüft werden, ob auf dieser Grundlage eine sinnvolle Systemgrenze festgelegt werden kann oder ob hierfür ein detaillierteres Blockdiagramm benötigt wird. Maßgeblich ist hierfür das Produkt für das die Lastkollektive ermittelt werden sollen. Anhand des erstellten Blockdiagrammes wird die exakte Systemgrenze definiert, in dem festgelegt wird, welche Subsysteme oder Komponenten Teil der Systembetrachtung für die Lastkollektivvermittlung sind. Dabei werden auch die Verbindungen vom System zu seiner Umgebung ersichtlich, was in der nachfolgenden Lastanalyse genutzt wird.

4.1.2 Lastanalyse

Der Schritt der Lastanalyse hat das Ziel alle funktions- und umweltbedingten Lasten zu sammeln. Dies erfolgt anhand der festgelegten Systemgrenze und dem ermittelten Blockdiagramm. Bereits am Blockdiagramm werden Inputs, Outputs und Wechselwirkungen mit anderen Systemen an der Systemgrenze ersichtlich. Es fehlen jedoch systemunabhängige Umgebungsbedingungen, weshalb die Blockdiagrammbetrachtung für die Lastanalyse nicht ausreicht. Ein Werkzeug zur systematischen Ermittlung aller an der Systemgrenze auftretende Größen ist das Parameterdiagramm, das auch als P-Diagramm bezeichnet wird [YAN07] und in Abbildung 4.5 zu sehen ist. Das P-Diagramm ist eine Abstrahierung des Systems in Form einer Black Box in die Eingangsgrößen in Form von Stoff-, Signal- oder Energieflüssen eingehen. Über die Funktionen des Systems werden diese in die Zielgrößen umgewandelt. Beeinflusst wird die Funktionserfüllung durch die kontrollierbaren Größen des Systems. Diese sind Designparameter, die in der Produktentwicklung so zu wählen sind, dass das System seine Funktion optimal erfüllt. Außerdem wirken auf das System Störgrößen ein zu denen unter anderem die Umgebungsbedingungen und die Wechselwirkung mit anderen Systemen, Subsystemen oder Komponenten gehören. Durch die systematische Ermittlung von Eingangs-, Stör- und Zielgrößen eignet sich das P-Diagramm zur Lastanalyse. Zusätzlich lassen sich hier auch bereits gewonnene Erkenntnisse aus dem Blockdiagramm berücksichtigen, was es zum optimalen Werkzeug der Lastanalyse macht und aus diesem Grund für die Methodik gewählt wird.

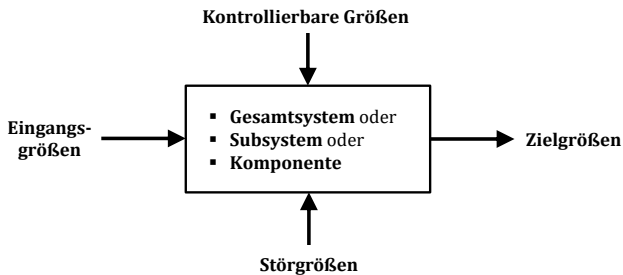


Abbildung 4.5: P-Diagramm

Die Lastsammlung beginnt mit den Eingangs- und den Zielgrößen in das System, da diese bereits aus dem erstellten Blockdiagramm ersichtlich sind. Als Subsystemlieferrant sind diese Größen auch als Anforderung in den Lastenheften der Systemhersteller zu finden, da die Zielgrößen auf Basis der Eingangsgrößen funktional erzielt werden müssen. Aus dieser funktionalen Erfüllung innerhalb des Systems kann direkt auf

die funktionsbedingten Lasten des Systems geschlossen werden. Oft handelt es sich dabei um die Eingangs- oder die Zielgrößen des Systems. Beispiele für funktionsbedingte Lasten aus den Eingangsgrößen sind Spannung und Stromstärke für das Betreiben eines Steuergerätes. Momente und Kräfte sind typische Beispiele für Zielgrößen in mechanischen Systemen.

Des Weiteren werden aus dem Blockdiagramm bereits Wechselwirkungen des Systems mit anderen Komponenten und Subsystemen ersichtlich und erfasst. Typische Beispiele hierfür sind Abwärme oder Vibrationsanregung aus den Nachbarsystemen. Solche Störgrößen können auch innerhalb der Systemgrenze entstehen und dürfen nicht vernachlässigt werden. Zu den Störgrößen zählt auch die Gruppe der umweltbedingten Einflussgrößen. Der Einfluss dieser Umweltbedingungen hängt maßgeblich von der Systemebene und der Einbausituation ab. So wird ein Subsystem, das direkten Kontakt zur Umwelt hat auch direkt diesen Lasten ausgesetzt sein. Im Gegensatz dazu ist ein Subsystem innerhalb eines Gehäuses diesen Lasten nicht direkt ausgesetzt, allerdings kann sich dies z. B. in Form von Erwärmung aufgrund der eigenen Funktion oder anderer Subsysteme im Gehäuse auch negativ auswirken. Für die Sammlung der Störgrößen ist also eine genaue Betrachtung von System und Umgebung notwendig.

Als Grundlage für die Sammlung der umweltbedingten Lasten können bestehende Umweltstandards und Normen verwendet werden. Eine dieser Normen ist die DIN EN 60721-1 „Klassifikation von Umweltbedingungen“ [DIN97], aus der ein Auszug an umweltbedingter Einflussgrößen in Tabelle 4.1 dargestellt ist.

Tabelle 4.1: Auszug umweltbedingter Einflussgrößen aus [DIN97]

Klimatische Umweltbedingungen	- Temperatur - Luftfeuchte	- Druck - etc.
Biologische Umweltbedingungen	- Flora - Fauna	
Chemisch aktive Stoffe	- Meersalz - Auftausalz	- Schwefeldioxid - etc.
Mechanisch aktive Stoffe	- Sand - Staub	- Schlamm - etc.
Kontaminationsmittel	- Motoröl - Hydrauliköl	- Kühlmittel - etc.
Mechanische Umweltbedingungen	- Schwingungen - Freier Fall	- Aufprall Fremdkörper - etc.
Elektrische und elektromagnetische Beeinflussung	- Magnetfeld - Elektrisches Feld	- Induzierte Spannung - etc.

Die DIN EN 60721-1 umfasst eine sehr umfangreiche Sammlung für umweltbedingte Einflüsse. Diese Sammlung ist, wie in Tabelle 4.1 ersichtlich wird, anhand verschiedener Last-Kategorien gruppiert. Außerdem werden nicht nur klimatische Bedingungen beschrieben, sondern auch systembedingte Störgrößen wie die Vibrationsanregung. Für viele der aufgeführten Lasten werden außerdem bereits Grenzwerte angegeben. Insgesamt ist diese Norm eine solide Grundlage zur Ermittlung der umweltbedingten Lasten an der Systemgrenze und wird daher als Grundlage für die Lastanalyse verwendet. Da sie keinen Anspruch auf Vollständigkeit besitzt, muss die Lastsammlung jedoch auf fehlende umweltbedingte Lasten geprüft werden.

Zusammengefasst werden in der Lastanalyse alle funktions- und umweltbedingten Lasten an der Systemgrenze gesammelt. Eine Übersicht über die zu berücksichtigenden Last-Kategorien an der Grenze des Gesamtsystems ist in Abbildung 4.6 zu sehen. Die Last-Kategorien setzen sich aus den funktionsbedingten Lasten und den Last-Kategorien nach [DIN97] zusammen. Bei der Sammlung werden zunächst alle in Betracht kommenden Lasten berücksichtigt und der jeweiligen Last-Kategorie zugeordnet. Komplette irrelevante Lasten werden nicht in die Sammlung aufgenommen. Ist die Last-Sammlung vollständig, wird im nächsten Schritt eine qualitative Bewertung der Relevanz der Lasten für die Lebensdauer des Produktes durchgeführt. Das Ergebnis dieser Bewertung wird genutzt, um die relevanten Lasten für die Lastkollektivermittlung zu bestimmen.

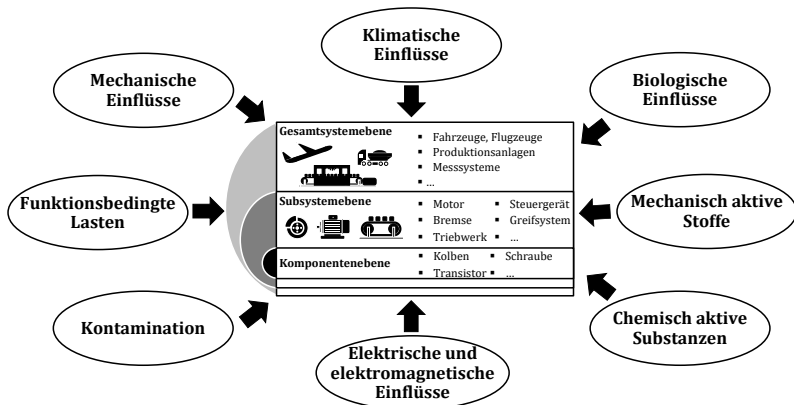


Abbildung 4.6: Funktions- und umweltbedingte Last-Kategorien

4.1.3 Bestimmung der relevanten Lasten

Resultat der Last-Sammlung kann eine sehr große Anzahl an funktions- und umweltbedingten Lasten sein. Um diese Sammlung auf ein handhabbares Maß zu reduzieren, wird die Sammlung um die weniger bedeutsamen Lasten reduziert. Diese Reduktion ist zulässig, da davon auszugehen ist, dass für die geplante Lebensdauer eines Produktes nur eine überschaubare Anzahl an Schädigungsmechanismen und damit auch Lasten relevant sind. Die Ermittlung der relevanten Lasten erfolgt qualitativ mit der Methode des Paarweisen Vergleiches, bei dem generell eine Rangfolge für die Bedeutung der zu vergleichenden Parameter basierend auf Expertenwissen ermittelt wird. Anhand dieser Rangfolge und der dazugehörigen Gewichtung der Parameter werden die relevanten Parameter bestimmt. Der Paarweise Vergleich ist für diese Methodik optimal geeignet, da seine simple Funktionsweise die Anwendbarkeit der Methodik garantiert. Die Anwendung des Paarweisen Vergleiches für Lasten wird nachfolgend beschrieben.

Für die Handhabung des Paarweisen Vergleiches muss auf eine überschaubare Anzahl an Lasten geachtet werden. Aus diesem Grund kann es bei der Lastsammlung sinnvoll sein, wie in Abbildung 4.7 zu sehen ist, zuerst die Last-Kategorien zu bewerten und anschließend eine separate Bewertung innerhalb der jeweiligen Kategorie vorzunehmen. Der Vergleich erfolgt indem bewertet wird, ob „Last 1“ wichtiger (2), gleichbedeutend (1) oder weniger wichtig (0) als „Last 2“ ist. Bei dieser Bewertung sind folgende Fragestellungen zu berücksichtigen:

- Wie stark ausgeprägt ist die Last?
- Wie häufig oder lange tritt die Last auf?
- Verursacht die Last einen kritischen Schädigungsmechanismus?

Durch diese Fragestellungen wird sichergestellt, dass die Bewertung auch relevant für das Produkt und den zu erwartenden Einsatz ist. Nach dem Vergleich von „Last 1“ mit „Last 2“, wird mit derselben Bewertung von „Last 1“ gegenüber „Last 3“ fortgefahren. Ist der Vergleich abgeschlossen, lässt sich ein Ranking der Lasten und deren Gewichtung bestimmen. Anhand dieses Ergebnisses werden dann z. B. nach dem Pareto-Prinzip die relevanten Lasten festgelegt.

Paarweiser Vergleich der Last-Kategorien

...ist/sind weniger wichtig als... (0)
 ...ist/sind gleich wichtig als... (1)
 ...ist/sind wichtiger als... (2)

Last-Kategorie	Nr.	Last-kategorie								Summe	Gewicht [%]	Rang
		1	2	3	4	5	6	7	8			
Funktionsbedingte Lasten	1	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	8
Klimatische Einflüsse	2	2	X	0	0	0	0	0	0	2	3,571	7
Biologische Einflüsse	3	2	2	X	0	0	0	0	0	4	7,143	6
Chemisch aktive Substanzen	4	2	2	2	X	0	0	0	0	6	10,714	5
Mechanisch aktive Stoffe	5	2	2	2	2	X	0	0	0	8	14,286	4
Kontamination	6	2	2	2	2	2	X	0	0	10	17,857	3
Mechanische Einflüsse	7	2	2	2	2	2	2	X	0	12	21,429	2
Elektr. und elektromagn. Einflüsse	8	2	2	2	2	2	2	2	X	14	25,000	1

Abbildung 4.7: Paarweiser Vergleich

4.2 Nutzraumanalyse

Ziel der Nutzraumanalyse ist die Ermittlung des Nutzraums, welcher bei der Lastkollektivermittlung berücksichtigt werden muss. Hierfür werden die in Phase 1 ermittelten relevanten Lasten für die Eingrenzung des Nutzraumes benötigt. Zu Beginn der Phase werden in der Einsatzartensammlung alle Nutzraum-Parameter gesammelt. Ist der Nutzraum aufgespannt, gilt es die enthaltenen Missbrauchsfälle zu identifizieren und den Nutzraum um diese zu verkleinern. Der reduzierte Parameterraum wird anschließend weiter verkleinert. Dafür wird geprüft, welche Nutzraum-Parameter sich auf die relevanten Lasten auswirken. Nur diese sind für die Lastkollektivermittlung relevant. Alle notwendigen Teilschritte dieser Phase sind in Abbildung 4.8 zur Übersicht dargestellt und werden in den Absätzen 4.2.1, 4.2.2 und 4.2.3 detailliert beschrieben. Das Ergebnis der Phase ist der relevante Nutzraum, der alle relevanten Einsatzarten für die Lastkollektivermittlung umfasst.

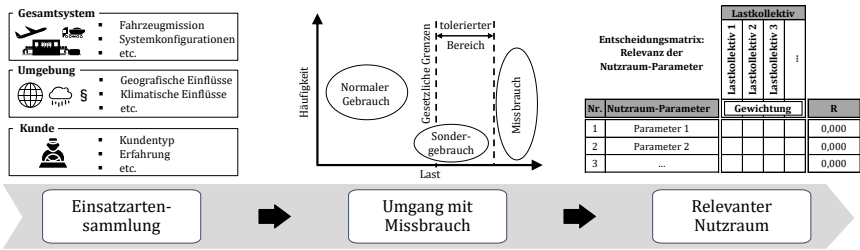


Abbildung 4.8: Phase 2: Nutzraumanalyse

4.2.1 Einsatzartensammlung

Eine grundsätzliche Problemstellung bei der Ermittlung repräsentativer Lastkollektive ist die Ermittlung der dafür zu berücksichtigenden Einsatzarten des Produktes. Die Repräsentativität eines Lastkollektives wird durch die Einsatzarten, die ein Lastkollektiv abbildet, definiert. Diese Problemstellung ist insbesondere dann relevant, wenn Messkampagnen mit Versuchsträgern für die Lastkollektivvermittlung durchgeführt werden. Werden Betriebsdaten für die Lastkollektivvermittlung benutzt, muss allerdings auch sichergestellt sein, dass diese für alle relevanten Einsatzarten vorliegen. Die Sammlung der Einsatzarten ist deshalb von entscheidender Bedeutung für die Ermittlung repräsentativer Lastkollektive.

Eine vollumfängliche Sammlung der Einsatzarten ist die zentrale Anforderung an diesen Teilschritt der Phase 2. Dafür wird eine systematische Vorgehensweise benötigt, mit der auch die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse sichergestellt ist. Im Stand der Technik ist bereits die 3F-Methode nach Küçükay beschrieben, die eine systematische Ermittlung der Einsatzarten von Automobilen und Nutzfahrzeugen über die Beschreibung des 3F-Parameterraums ermöglicht. Die 3F stehen dabei für die drei Dimensionen: Fahrzeug, Fahrumgebung und Fahrer [KÜC90]. Für jede dieser Dimension werden die relevanten 3F-Parameter gesammelt, woraus ein mehrdimensionaler Parameterraum resultiert, der alle Einsatzarten beinhaltet. Diese Systematik wird übernommen, wofür allerdings die 3F-Methode verallgemeinert wird, um eine Anwendung über den Fahrzeugbau hinaus zu ermöglichen. Dafür wird, wie in Abbildung 4.9 dargestellt, die Dimension „Fahrzeug“ verallgemeinert zu „Gesamtsystem“, „Fahrumgebung“ zu „Umgebung“ und „Fahrer“ zu „Kunde“.

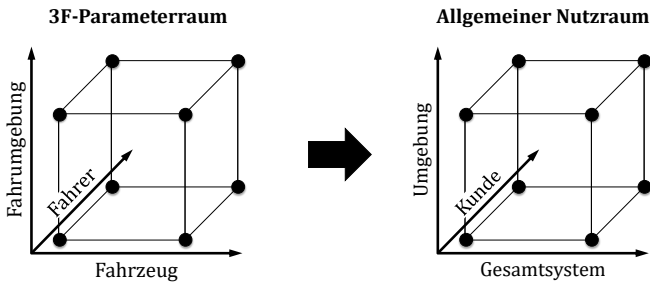


Abbildung 4.9: 3F-Parameterraum nach Küçükay [KÜC90] und allgemeiner Nutzraum

Die Dimensionen „Gesamtsystem“, „Umgebung“ und „Kunde“ spannen, wie in Abbildung 4.10 zu sehen ist, den allgemeingültigen Nutzraum für beliebige Produkte auf. Anhand dieser Dimensionen erfolgt die Parametersammlung, wofür auf nachfolgende Quellen und Werkzeuge zurückgegriffen werden kann:

- Expertenwissen insbesondere aus dem Vertrieb
- Kundenbefragungen
- Leitfragenkataloge
- Normen und Richtlinien

Die Sammlung der Nutzraum-Parameter erfolgt separat je Dimension des Nutzraumes. Dabei werden ebenso deren Ausprägungen, die im nachfolgenden als Parameterstufen bezeichnet werden, gesammelt. Der Unterschied zwischen Parameter und Stufe wird anhand des Gesamtsystems am Beispiel von Nutzfahrzeugen deutlich. Ein Nutzraum-Parameter ist die Fahrzeugmission, die dazugehörigen Parameterstufen sind in diesem Fall die unterschiedlichen Missionen Fernverkehr, Baustellenverkehr oder Verteilerverkehr. Die Dimension des Gesamtsystems beschreibt dabei alle relevanten Nutzraum-Parameter, die Mission, Zustand oder Konfiguration des Gesamtsystems betreffen und sich dadurch auf die relevanten Lasten und deren Häufigkeit auswirken. Bei der Umgebung werden alle geografischen, klimatischen und gesetzlichen Einflüsse gesammelt, in der das Gesamtsystem agiert. Beispiel hierfür können unterschiedliche Märkte sein, die sich aufgrund ihrer Geografie, gesetzlichen Vorgaben oder des Klimas unterscheiden. Die Dimension des Kunden deckt Nutzraum-Parameter wie den Kundentyp ab. Außerdem gehen Parameter wie Erfahrung im Umgang mit dem Produkt und die Art und Weise des Produkteinsatzes ein. Ein typisches Beispiel hierfür sind PKW-Fahrer, die auf denselben Straßen schonend oder sportlich unterwegs sein können.

Bei der Sammlung der Nutzraum-Parameter muss darauf geachtet werden, dass die einzelnen Parameter oder deren Stufen nicht voneinander abhängen. Ein Beispiel für abhängige Parameter ist zum Beispiel die Fahrzeugmission „Mobilkran“ und die gleichzeitige Systemkonfiguration „Kran“, wenn der Kran nur in dieser Fahrzeugmission verbaut ist. Daher muss der Nutzraum auf solche Abhängigkeiten nach Abschluss der Parametersammlung geprüft und angepasst werden, bevor mit dem nächsten Schritt der Phase begonnen wird.

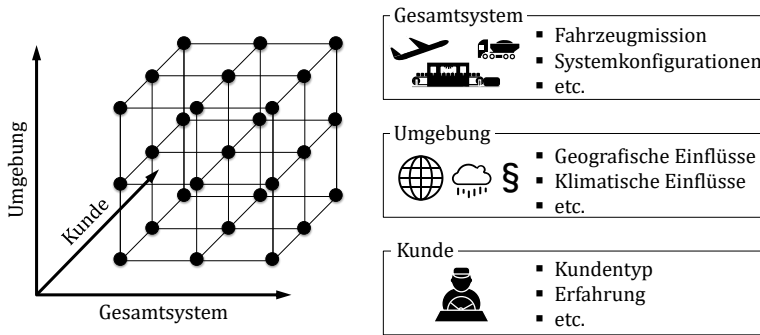


Abbildung 4.10: Nutzraum-Parameter für Lastkollektivvermittlung

4.2.2 Umgang mit Missbrauch

Bei der Sammlung der Nutzraum-Parameter und deren Stufen werden auch extreme Einsatzarten berücksichtigt, bei denen sich die Frage nach dem Umgang mit diesen vermeintlichen Missbrauchsfällen stellt. Gerade extreme Einsatzarten sind meist mit hohen Lasten verbunden und wirken sich maßgeblich auf die zu ermittelten Lastkollektive und damit auf die Lebensdauer aus. Die Antwort zum Umgang mit Missbrauch findet sich beim Gesetzgeber, der zwischen bestimmungsgemäßen und nicht bestimmungsgemäßen Gebrauch unterscheidet. Die Produkthaftungsgesetze in der Europäischen Union richten sich nach einer Richtlinie aus dem Jahr 1985 in der für den Produkthaftungsfall der bestimmungsgemäße Gebrauch definiert ist als „des Gebrauchs des Produkts, mit dem billigerweise gerechnet werden kann“ [Off85]. Davon abgedeckt ist auch vorhersehbarer bzw. üblicher Gebrauch, wie z. B. das Verschlucken von Kleinteilen bei Kinderspielzeug. Missbrauch ist demzufolge als nicht bestimmungsgemäßer Gebrauch einzuordnen und muss daher nicht in der Lastkollektivvermittlung berücksichtigt werden. Nur normaler Gebrauch und Sondergebrauch gelten als bestimmungsgemäßer Gebrauch und müssen berücksichtigt werden. Die Schwierigkeit

mit vermeintlichen Missbrauchsfällen liegt in deren eindeutigen Identifikation. Hierfür muss zwischen normalem Gebrauch, Sondergebrauch und Missbrauch unterschieden werden. Eine Unterscheidung die übertragen aus der Betriebsfestigkeit [SON08] und der Definition des bestimmungsgemäßen Gebrauchs nach dem Produkthaftungsgesetz qualitativ in Abbildung 4.11 dargestellt ist. Normaler Gebrauch ist charakterisiert durch eine begrenzte Last, wobei die auftretenden Lasten bis zu dieser Grenze in sehr großer Häufigkeit auftreten. Sondergebrauch ist dadurch gekennzeichnet, dass er sich bereits an der gesetzlichen Grenze des bestimmungsgemäßen Gebrauchs befindet und mit großen Lasten verbunden ist. Gleichzeitig tritt Sondergebrauch nur mit geringer Häufigkeit auf. Sonderlasten können auch über den nichtbestimmungsgemäßen Gebrauch und damit über die gesetzliche Grenze hinausgehen. Das liegt daran, dass die Grenze zwischen Sondergebrauch und Missbrauch nicht eindeutig definiert werden kann und dem Kunden Missbrauch nicht immer nachzuweisen ist. So können Hersteller aufgrund von unbekanntem oder nicht nachweisbarem Missbrauchsfall gezwungen sein, defekte Produkte trotz nicht bestimmungsgemäßen Gebrauch umzutauschen. Daraus ergibt sich in der Praxis ein vom Hersteller tolerierter Bereich. Rechts vom tolerierten Bereich in Abbildung 4.11 liegen die Missbrauchsfälle. Sie sind charakterisiert als nicht bestimmungsgemäßer Gebrauch mit extrem großen Lasten.

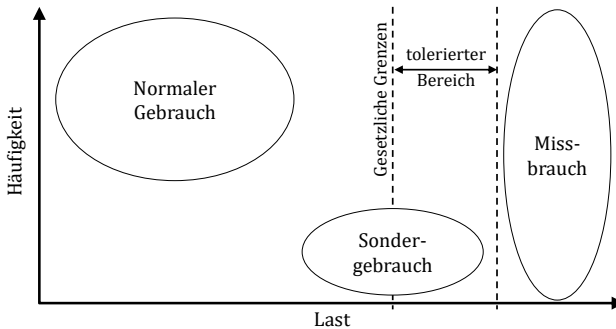


Abbildung 4.11: Normaler Gebrauch, Sondergebrauch und Missbrauch

Da die Unterscheidung zwischen Sondergebrauch und Missbrauch nicht einfach, gleichzeitig jedoch von großer Bedeutung für die Lastkollektivvermittlung ist, wird für die eindeutige Klassifizierung von Gebrauchsfällen der Leitfaden, der in Abbildung 4.12 zu sehen ist, benutzt. Dieser Leitfaden bietet zum einen Orientierung für den technisch und rechtlich nicht versierten Anwender und stellt gleichzeitig sicher, dass bei der Gebrauchsfall-Klassifizierung reproduzierbare Ergebnisse erzielt wer-

den. Der Leitfaden berücksichtigt außerdem den praxisrelevanten Punkt der Nachweisbarkeit von Missbrauchsfällen und kann auf alle aus dem Nutzraum resultierende Einsatzarten angewendet werden.

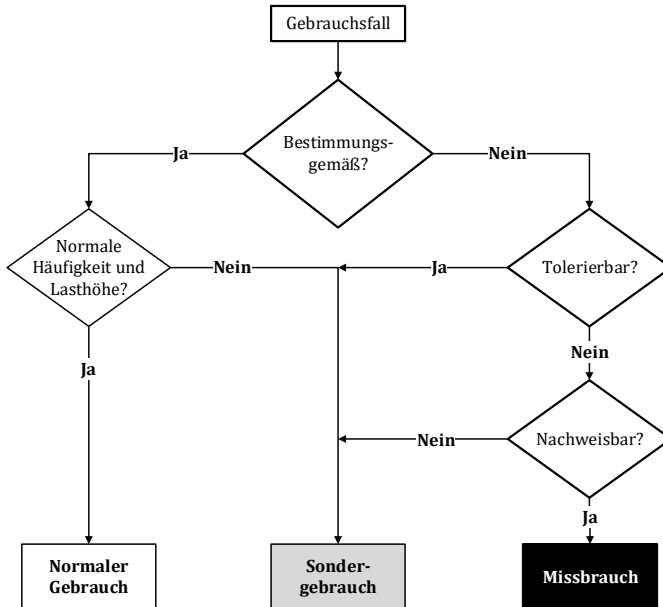


Abbildung 4.12: Klassifizierung von Gebrauchsfällen

Der Leitfaden prüft zunächst, ob bestimmungsgemäßer Gebrauch vorliegt. Dabei muss auch vorhersehbarer aber üblicher Fehlgebrauch berücksichtigt werden. Liegt bestimmungsgemäßer Gebrauch vor, kann es sich um normalen Gebrauch oder Sondergebrauch handeln. Diese Unterscheidung wird durchgeführt, indem die Häufigkeit und Lasthöhe überprüft wird. Befindet sich beides im üblichen Rahmen, handelt es sich um normalen Gebrauch. Liegt kein bestimmungsgemäßer Gebrauch vor, bedeutet dies noch nicht, dass dieser Fall zwingend als Missbrauch klassifiziert wird. Zunächst muss geklärt werden ob der Gebrauchsfall tolerierbar ist. Ist er tolerierbar, wird er dem Sondergebrauch zugeordnet und muss bei der Lastkollektivvermittlung berücksichtigt werden. Ist der Fall nicht tolerierbar wird noch dessen Nachweisbarkeit überprüft. Ist diese gegeben, wird er dem Missbrauch zugeordnet und kann aus dem Nutzraum entfernt werden. Ist Missbrauch nicht nachweiszuweisen, wird er für die Lastkollektivvermittlung dem Sondergebrauch zugeordnet.

Bei der Klassifizierung der Gebrauchsfälle kann es vorkommen, dass der Betrag der resultierenden Last den Unterschied zwischen normalem Gebrauch, Sondergebrauch und Missbrauch definiert. Ein Beispiel hierfür ist das Gesamtgewicht von Fahrzeugen. Bewegt sich das Gesamtgewicht in dem vom Hersteller vorgegebenen zulässigen Gewicht, liegt normaler Gebrauch vor. Übersteigt das Fahrzeuggewicht das zulässige Gesamtgewicht muss die Fragestellung geklärt werden, wie viel Überladung vom Hersteller toleriert wird. Hier muss eine klare Grenze definiert werden, um zwischen Missbrauch und Sondergebrauch unterscheiden zu können. Der Gebrauchsfall bis zu dieser Grenze wird dem Sondergebrauch zugeordnet und muss bei der Lastkollektivmittlung berücksichtigt werden. Der Gebrauchsfall über dieser Grenze wird als Missbrauch deklariert und aus dem Nutzraum entfernt.

4.2.3 Ermittlung des relevanten Nutzraums

Nach der Ermittlung der Nutzraum-Parameter im ersten Schritt dieser Phase und der Entfernung der Missbrauchsfälle im vorigen Schritt, wird der relevante Nutzraum für die Lastkollektivmittlung bestimmt. Ansatz dabei ist die Verknüpfung der gesammelten Nutzraum-Parameter mit den relevanten Lasten. Denn einige der Nutzraum-Parameter wirken sich gar nicht oder nur sehr gering auf die zu ermittelnden Lastkollektive aus und können somit im Nutzraum vernachlässigt werden. Die Bewertung der Relevanz eines Nutzraum-Parameters auf die Lastkollektive erfolgt qualitativ unter Verwendung der Entscheidungsmatrix-Methode, die bereits in angepasster Form für diese Methodik in Abbildung 4.13 dargestellt ist. In der Entscheidungsmatrix findet eine Bewertung des Effektes eines Nutzraum-Parameters auf das Lastkollektiv von sehr gering (1), gering (2), mittel (3), hoch (4) und sehr hoch (5) statt. Dabei wird die Auswirkung der jeweiligen Parameterstufen eines Nutzraum-Parameters auf das jeweilige Lastkollektiv bewertet. Als Hilfestellung bei dieser Bewertung müssen die nachfolgenden Fragestellungen berücksichtigt werden:

- Hat der Parameter einen Effekt auf die Höhe der Last?
- Hat der Parameter einen Effekt auf die Häufigkeit der Last?

**Entscheidungsmatrix:
Relevanz der
Nutzraum-Parameter**

		Lastkollektiv						
		Lastkollektiv 1	Lastkollektiv 2	Lastkollektiv 3	...			
						Sehr hoch	5	Sehr hoher Effekt auf Lastkollektiv
						Hoch	4	Hoher Effekt auf das Lastkollektiv
						Mittel	3	Mittlerer Effekt auf das Lastkollektiv
						Gering	2	Geringer Effekt auf das Lastkollektiv
						Sehr gering	1	Sehr geringer Effekt auf das Lastkollektiv

Nr.	Nutzraum-Parameter	Gewichtung				R	Rang
1	Parameter 1					0,000	1
2	Parameter 2					0,000	1
3	Parameter 3					0,000	1
4	Parameter 4					0,000	1
5	...					0,000	1

Abbildung 4.13: Bewertung der Nutzraum-Parameter

Das Ergebnis der Bewertung ist eine Rangfolge, die sowohl über alle relevanten Lasten als auch separat je Last erfolgt. Soll eine gesamtheitliche Rangfolge der Nutzraum-Parameter für alle Lasten erfolgen, können die Lastkollektive mit einem Gewicht entsprechend ihrer Bedeutung für das System versehen werden. Dadurch gehen die bedeutenden Lasten stärker in die Rangfolge ein als die weniger bedeutsamen. Für die Ermittlung der Gewichte der relevanten Lasten kann das Ergebnis des durchgeführten Paarweisen Vergleiches verwendet werden. Anhand der Rangfolge und damit der Relevanz der Nutzraum-Parameter wird der Nutzraum auf die relevante Größe eingeschränkt, womit das Ziel von Phase 2 erreicht ist.

4.3 Zielsetzung und Datenspezifikation

Nachdem in den vorangegangenen Phasen die relevanten Lasten und der relevante Nutzraum ermittelt wurden, wird in Phase 3 festgelegt, wie der relevante Nutzraum abgedeckt wird und welche Messgrößen für die Lastkollektivermittlung notwendig sind. Dafür sind drei sequentielle Teilschritte nötig, die in Abbildung 4.14 dargestellt sind.

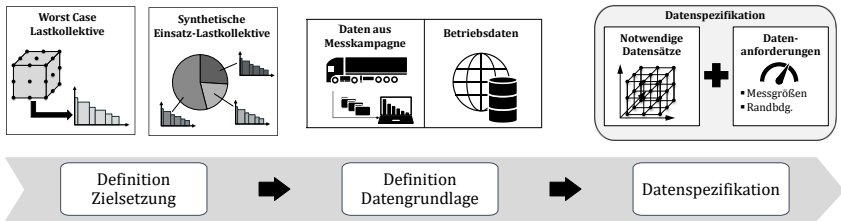


Abbildung 4.14: Phase 3: Zielsetzung und Datenspezifikation

In der Zieldefinition wird in Absatz 4.3.1 betrachtet welche Optionen bei der Lastkollektivvermittlung und der damit verbundenen Nutzraumabdeckung bestehen. In Abwägung der Vor- und Nachteile dieser Optionen wird problemspezifisch die passende Zielsetzung gewählt. Unabhängig von der Zielsetzung werden Daten für die Lastkollektivvermittlung benötigt. Die Auswahl der passenden Datengrundlage wird die in Absatz 4.3.2 beschrieben. Diese Auswahl ist ein essentieller Schritt dieser Phase, da die Datengrundlage einen Einfluss auf die Repräsentativität der Lastkollektive besitzt. Aus Sicht der Praxis müssen bei der Auswahl allerdings auch technische, finanzielle und zeitliche Randbedingungen einfließen. Nach der Definition von Zielsetzung und Datengrundlage sind die notwendigen Messdaten zu spezifizieren. Dabei ist sicherzustellen, dass ausgehend von den Messgrößen direkt oder indirekt auf die relevanten Lasten geschlossen werden kann. Außerdem müssen sekundäre Messgrößen und Randbedingungen definiert werden, anhand derer beispielsweise die Parameterstufen des Nutzraumes identifiziert werden können. Dieser abschließende Schritt der Datenspezifikation wird in Absatz 4.3.3 erläutert. Ergebnis dieser Phase ist die Definition der benötigten Datengrundlage in Abhängigkeit der Zielsetzung und die Anforderung an diese Daten für die Lastkollektivvermittlung.

4.3.1 Zielsetzung der Lastkollektivvermittlung

Der relevante Nutzraum gibt bei der Lastkollektivvermittlung vor welche Einsatzarten von den Lastkollektiven abgedeckt werden müssen. Offen ist jedoch wie diese Abdeckung erreicht werden soll. Von entscheidender Bedeutung ist dafür die Zielsetzung bei der Ermittlung der repräsentativen Lastkollektiven: Sie gibt vor mit welchen Lastkollektiven der Nutzraum abgedeckt werden soll. Drei Optionen hierfür sind in Abbildung 4.15 dargestellt. Alle Vor- und Nachteile dieser Optionen werden nachfolgend ausführlich beschrieben.



Abbildung 4.15: Zielsetzungen bei der Lastkollektivvermittlung

Ein Ziel bei der Lastkollektivvermittlung kann es sein, mit nur einem Lastkollektiv den gesamten Nutzraum abzudecken. Dafür wird entweder aus Messungen des gesamten Nutzraumes ein Worst Case Lastkollektiv ermittelt oder es werden lediglich Messungen mit der Worst Case Einsatzklasse, die alle anderen Einsatzklassen abdeckt, für die Lastkollektivvermittlung verwendet. Diese Zielsetzung hat den Vorteil, dass sie die Möglichkeit bietet bei reduziertem Messaufwand den Nutzraum abzudecken. Dies ist besonders dann effizient, wenn dasselbe Systemdesign im gesamten Nutzraum verwendet wird. Außerdem ist ein Worst Case Lastkollektiv im Vergleich zu mehreren Lastkollektiven in Zuverlässigkeitsnachweis oder Produktentwicklung einfacher anzuwenden. Nachteilig ist diese Zielsetzung, wenn es große Unterschiede zwischen der Worst Case Anwendung und der durchschnittlichen Anwendung gibt. In diesem Fall resultiert aus der Verwendung des Worst Case Lastkollektives eine Überdimensionierung für einen Großteil der Produkte im Feld. Ein weiterer Nachteil ist die fehlende Kenntnis der Belastung der anderen Einsatzklassen. Durch diese werden sonst differenzierte Zuverlässigkeitsprognose für das gesamte Feld oder auch gezielte Rückrufe der kritischen Einsatzklassen ermöglicht. Die Ermittlung von anwendungsspezifischen Lastkollektiven berücksichtigt genau dies. Dabei wird für jede relevante Einsatzklasse ein repräsentatives Lastkollektiv ermittelt, was allerdings auch mit größeren Aufwänden als bei einer Worst Case Lastkollektivvermittlung verbunden ist. Dafür kann anhand anwendungsspezifischer Lastkollektive eine anwendungsgerechte Auslegung erfolgen, was zum einen Überdimensionierung reduziert und zum anderen Entwicklungspotentiale für anwendungsspezifische Konstruktionslösungen aufzeigt. Für diese Zielsetzung ist es hilfreich, sich bereits im Vorfeld von Messungen Gedanken zu machen, welche Einsätze zu Klassen zusammengefasst werden können, um eine möglichst effiziente Messkampagne zu planen. Bei der Betriebsdatenanalyse hingegen müssen diese Klassen anhand der Datenauswertung identifiziert werden. Sollten die Unterschiede zwischen den Einsatzklassen entgegen der Erwartung klein ausfallen,

lässt sich hieraus auch ein Worst Case Lastkollektiv ableiten. Ein Ansatz der sich optimal eignet, um möglichst präzise Feldprognosen für eine Vielzahl verschiedener Einsatzklassen treffen zu können, ist die Ermittlung von synthetischen Einsatz-Lastkollektiven. Bei dieser Zielsetzung wird jede Einsatzklasse aus Basiskollektiven und deren Verteilung ermittelt. Dies hat den Vorteil, dass der Nutzraum detailliert abgedeckt werden kann, wenn hierfür auch die Kenntnis der repräsentativen Einsatzverteilungen notwendig ist. Ein anschauliches Beispiel hierfür bietet das Automobil, das sich in Stadt-, Landstraßen-, Autobahn- und Offroad-Verkehr bewegt. Werden Lastkollektive für diese Verkehrsarten ermittelt, kann entsprechend der Verkehrsverteilung für jeden Kunden ein repräsentatives Lastkollektiv synthetisch superpositioniert werden. Ein großer Vorteil von diesem Ansatz ist, dass auch Einsatzklassen modelliert werden können, die noch nicht im Feld sind oder für die keine Messungen zur Verfügung stehen. Dafür muss jedoch die anteilige Zusammensetzung des Lastkollektives bekannt sein. Letzten Endes bietet dieser Ansatz dieselben Vorteile wie die Lastkollektivermittlung je Einsatzklasse bei allerdings zusätzlichem Aufwand für die Ermittlung der Einsatzverteilung. Dafür lassen sich sowohl Lastkollektive je Einsatzklasse oder auch ein Worst Case Lastkollektiv aus den Ergebnissen ableiten. Die Vor- und Nachteile aller drei Zielsetzungen sind zur Übersicht in Tabelle 4.2 abgebildet. Anhand dieser kann die passende Zielsetzung gewählt werden.

Tabelle 4.2: Vor- und Nachteile der Zielsetzungen bei der Lastkollektivermittlung

Worst Case Lastkollektiv	+	Geringer Aufwand auch bei großen Nutzräumen
	+	Einfache Anwendung des Lastkollektives
	-	Gefahr der Überdimensionierung
Lastkollektiv je Einsatzklasse	+	Vermeidung von Überdimensionierung
	+	Identifizierung von Entwicklungspotenzialen
	+	Anwendungsspezifische Feldprognose
	+	Gezielter Rückruf von kritischen Einsatzklassen
	-	Aufwand steigt mit zunehmender Anzahl von Einsatzklassen
Synthetische Einsatz- Lastkollektive	+	Ableitung der Lastkollektive für jede Einsatzklasse
	+	Vermeidung von Überdimensionierung
	+	Identifizierung von Entwicklungspotenzialen
	+	Anwendungsspezifische Feldprognose
	+	Gezielter Rückruf von kritischen Einsatzklassen
	-	Zusätzliche Ermittlung der Einsatzverteilung notwendig

4.3.2 Auswahl der Datenquelle

Die im Absatz zuvor beschriebenen Zielsetzungen sind grundsätzlich unabhängig von der Datenquelle erreichbar, auch wenn sich Betriebs- oder Messdaten unterschiedlich gut für die Lastkollektivvermittlung je nach Produkt, Nutzraum und den Rahmenbedingungen der Hersteller eignen. Generell gilt es drei Arten von Datenquellen zu unterscheiden: Prüfstandsdaten, Daten aus Messkampagnen und Betriebsdaten aus dem Kundeneinsatz. Entsprechend der Darstellung in Abbildung 4.16 stehen die Daten zu unterschiedlichen Zeitpunkten während des Produktentwicklungsprozess (PEP) zur Verfügung und werden mit fortschreitenden PEP immer repräsentativer. Gleichzeitig nehmen Streuungen durch Umwelteinflüsse und Kundeneinsatz zu.

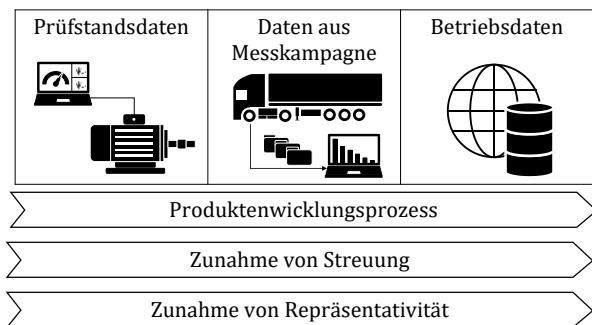


Abbildung 4.16: Datenquellen für Lastkollektivvermittlung

Wird ein neues Produkt entwickelt, sind die ersten Daten aus Versuchen im Labor. Dabei unterliegt das Produkt aufgrund der gleichbleibenden Versuchsbedingungen nur einer begrenzten Anzahl an Streuungen. Diese konstanten Laborbedingungen und damit die fehlenden Kunden- und Umgebungseinflüssen machen Prüfstandsdaten jedoch nicht repräsentativ für den Feldeinsatz. Dadurch sind Prüfstandsdaten für die Ermittlung repräsentativer Lastkollektive zumeist ungeeignet. Hat das System die Erprobung am Prüfstand erfolgreich absolviert, werden Versuche beim Kunden bzw. Feldversuche durchgeführt. Dabei ist das System bereits Teil des Gesamtsystems und unterliegt den Umgebungsbedingungen im Feld, was die Messdaten wesentlich repräsentativer im Vergleich zum Prüfstand macht. Handelt es sich dabei auch noch um eine Messkampagne durch den Kunden selbst, steigert das die Repräsentativität der Messkampagne, da auch der Kunde als Einflussgröße in die Messungen eingeht. Die Umgebungseinflüsse und das Kundenverhalten führen gleichzeitig vermehrt zu Streuungen und Unsicherheiten in den Messdaten. Mit der Einführung des Systems in den Markt

beginnt auch das Sammeln von Betriebsdaten. Diese werden beispielsweise in den Steuergeräten erfasst und über Telemetrie oder während Wartungen vom Hersteller abgerufen. Betriebsdaten sind sehr repräsentativ für den Produkteinsatz im Feld, da hier die Variation von Umgebung und Kundenverhalten vollumfänglich erfasst werden kann. Betriebsdaten sind jedoch wegen der geringeren Auflösung als im Versuch, der Onlineklassierung und auftretenden Softwarefehlern mit größeren Streuungen und Unsicherheiten behaftet [VDA16]. Dazu gehören unvollständige und fehlerhafte Daten genauso wie eine fehlerhafte Zuordnung der Daten [VDA16]. Eine Unsicherheit resultiert aus dem Zeitpunkt der Inbetriebnahme durch den Kunden, so können zwischen Produktion und Übergabe an den Kunden sowie Inbetriebnahme durch den Kunden nicht exakt quantifizierbare Zeitspannen liegen. Ein weiteres Problem kann die Aufzeichnung der BZF sein, die aus Speicherkapazitätsgründen auf den Steuergeräten oft nur klassiert gespeichert werden können. Sind die Klassen dabei ungünstig gewählt, resultiert daraus eine falsche Kollektivform. Sind die Klassen jedoch ausreichend fein aufgelöst und gelingt es die vorhandenen Fehler während der Datenanalyse ausreichend gut zu reduzieren, sind Betriebsdaten die optimale Quelle für die Ermittlung repräsentativer Lastkollektive.

Für die Ermittlung repräsentativer Lastkollektive eignen sich Daten aus Messkampagnen beim Kunden oder in einem kundennahen Einsatz sowie Betriebsdaten. Eine generelle Empfehlung ist nicht möglich da eine Vielzahl von Randbedingungen diese Auswahl beeinflussen wie:

- Verfügbarkeit und Qualität von Betriebsdaten
- Relevanter Nutzraum und Lasten
- Zielsetzung der Lastkollektivermittlung
- Hersteller-Kunden-Beziehung
- Personal, Budget und Zeitplan

Anhand der Zielsetzungen aus Absatz 4.3.1 werden einige Möglichkeiten und deren Eignung nachfolgend exemplarisch erläutert. Generell muss bei der Auswahl zwischen Mess- und Betriebsdaten geprüft werden, ob die Betriebsdaten fehlerfrei und eine ausreichend feine Auflösung besitzen. Unter dieser Voraussetzung eignen sie sich hervorragend für die Ermittlung von Worst Case Lastkollektiven. Unter der Bedingung das in den Betriebsdaten zwischen Einsatzklassen unterschieden werden kann, eignen sie sich auch für die Lastkollektivermittlung Einsatzklasse. Für das Ermitteln von Basiskollektiven können Betriebsdaten ebenfalls geeignet sein. Allerdings sind dafür detaillierte Informationen notwendig anhand derer die Basiskollektive eindeutig klassiert werden können. Besser geeignet für das Ermitteln von Basiskollektiven sind gezielte Messkampagnen unter Berücksichtigung der streuenden Nutzraum-Parameter. Messdaten eignen sich allerdings auch für die repräsentative Lastkollektivermittlung,

wenn Messkampagnen gezielt für die notwendigen Einsatzklassen durchgeführt werden. Um hier jedoch streuende Einflüsse zu berücksichtigen, sind sehr umfangreiche Messkampagnen bei entsprechend langer Dauer notwendig, was bei der Planung von Budget und dem zeitlichen Rahmen berücksichtigt werden muss. Auch ein Mix von Mess- und Betriebsdaten ist denkbar beispielsweise können Basiskollektive anhand von Messdaten und die Einsatzverteilung anhand von Betriebsdaten ermittelt werden.

4.3.3 Datenspezifikation

In Abhängigkeit von Zielsetzung und Datenquelle erfolgt die Datenspezifikation. Diese Spezifikation umfasst die Definition der notwendigen Daten und die Anforderungen an die benötigten Messgrößen. Die notwendigen Daten lassen sich aus dem relevanten Nutzraum (4.2.3) und der Zielsetzung für die Lastkollektivvermittlung (4.3.1) ableiten. Jeder dieser Datensätze muss aber auch die notwendigen Messgrößen zur Last- und der Zeiterfassung beinhalten. Außerdem sind zusätzlich Informationen in Form von sekundären Messgrößen und den Randbedingungen zu Gesamtsystem und Umgebung erforderlich, um spezifische Einsatzklassen erkennen zu können. Die in der Datenspezifikation zu definierenden Inhalte sind als Übersicht in Abbildung 4.17 zu sehen. Da sich die notwendigen Daten direkt aus dem Nutzraum und der gewählten Zielsetzung ableiten, wird nachfolgend nur die Spezifikation der Messgrößen und der Randbedingungen ausführlich erläutert.

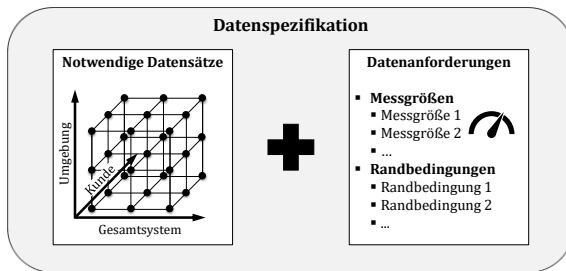


Abbildung 4.17: Datenspezifikation für Lastkollektivvermittlung

Neben den relevanten Lastgrößen müssen in Abhängigkeit der gewählten Zielsetzung weitere Eigenschaften von Gesamtsystem und Umgebung erfasst werden. Diese Eigenschaften werden nachfolgend als Randbedingungen bezeichnet. Dabei gilt, umso genauer Einsatzklassen erfasst werden müssen, umso mehr Randbedingungen sind

notwendig, wie beispielhaft in Tabelle 4.4 dargestellt ist. Soll beispielsweise für jede Einsatzklasse ein repräsentatives Lastkollektiv ermittelt werden, ist diese Information in den Daten erforderlich. Soll darüber hinaus auch noch die Region des Produkteinsatzes klassifiziert werden, muss diese ebenfalls als Messgröße erfasst werden. Weitere notwendige Informationen sind der Zeitpunkt der Produktauslieferung und die Betriebszeit des Produktes.

Tabelle 4.3: Notwendige Randbedingungen in Abhängigkeit der Zielsetzung

Zielsetzung	Lastkollektiv über alle Einsatzklassen	Lastkollektiv je Einsatzklasse	Lastkollektiv je Einsatzklasse und Region
Notwendige Randbedingung	- keine	- Einsatzklasse	- Einsatzklasse - Region

Für die Festlegung der notwendigen Messgrößen wird das Blockdiagramm mit den relevanten Lastarten als Grundlage verwendet. Denn ist es nur unter großen Aufwänden oder auch gar nicht möglich die relevanten Lasten direkt im Betrieb oder während Messkampagnen zu erfassen, dann muss, wie in Abbildung 4.18 dargestellt, ein Übertragungsmodell ermittelt werden, das den Zusammenhang zwischen den messbaren Größen und der relevanten Last herstellt.

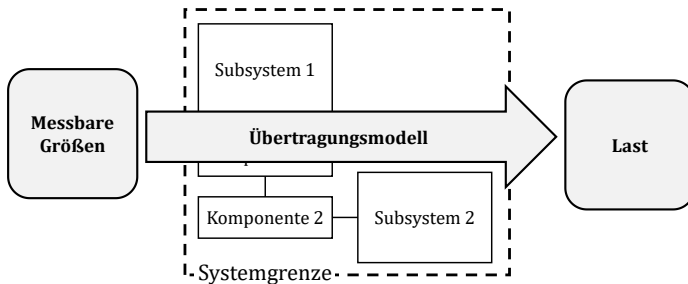


Abbildung 4.18: Übertragungsmodell zwischen messbaren Größen und Last

Startpunkt bei der Ermittlung des Übertragungsmodells ist das Blockdiagramm mit allen Subsystemen, Komponenten und notwendigen Messgrößen. Anhand der funktionalen Kette zwischen Messgröße und Last wird das Übertragungsmodell ermittelt. Die Disziplin der virtuellen Sensoren beschäftigt sich mit der Ermittlung von Modellen für diese Problemstellung. Hier wird für die Ermittlung unbekannter Messgrößen aus

den vorhandenen Messgrößen nach Fortuna et. al zwischen Black und White Box Modellen unterschieden [FGR07]. Bei White Box Modellen werden die grundlegenden Naturgesetze für die Modellierung verwendet, während bei Black Box Modellen unter Verwendungen von Methoden des Maschinellen Lernens ein Modell ermittelt wird. Zwischen Black und White Box Modellen gibt es Abstufungen im Graubereich, wie in Abbildung 4.19 zu sehen ist. Die Thematik der Übertragungsmodelle muss individuell für das vorhandene System, die verfügbaren Messgrößen und die zu ermittelnden Lastgrößen betrachtet werden.

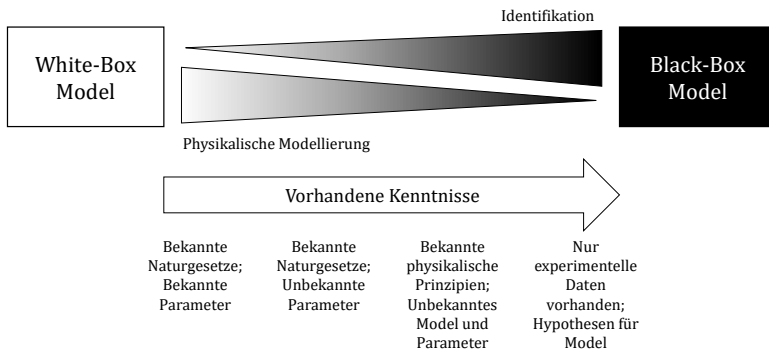


Abbildung 4.19: White und Black Box Modell nach [FGR07]

4.4 Repräsentative Lastkollektivermittlung

Nachdem die Zielsetzung für die Lastkollektivermittlung und die dafür notwendigen Daten festgelegt und als Ergebnis einer Messkampagne oder Betriebsdatensammlung vorliegen, erfolgt die repräsentative Lastkollektivermittlung. Für diese sind die drei in Abbildung 4.20 dargestellten Schritte notwendig, beginnend mit der Datenaufbereitung. Hier werden fehlerhafte Datensätze aus den Betriebsdaten oder Messkampagnen korrigiert oder aussortiert. Dieser in Absatz 4.4.1 beschriebene Schritt ist notwendig, um die Unsicherheiten in den erfassten Daten zu minimieren. Danach erfolgt der für die Repräsentativität der Lastkollektive bedeutende Schritt der Einsatz-Klassifikation. Diese ist wichtig, da die Lastkollektive die vorab definierten Einsatzklassen repräsentieren müssen. Dies macht die richtige Klassifikation der Datensätze zur Grundvoraussetzung für die Repräsentativität der Lastkollektive. Die Zuordnung der Datensätze zu den Klassen kann, wie in Absatz 4.4.2 beschrieben wird, anhand be-

kannter Merkmale der Klassen oder durch Methoden der Klassifikation oder der Clusteranalyse erfolgen. Nach der Einsatz-Klassifikation beginnt die eigentliche Lastkollektivvermittlung. Diese ist, wie in Absatz 4.4.3 beschrieben, unterteilt in die vier Teilschritte: Auswahl Klassierverfahren, Extrapolation, Ermittlung repräsentativer Lastkollektive und Validierung. Ergebnis der repräsentativen Lastkollektivvermittlung sind Lastkollektive, die für ein spezifiziertes Quantil der definierten Einsatzklassen repräsentativ sind. Die einzelnen Schritte Datenaufbereitung, Einsatzklassifikation und Lastkollektivvermittlung werden in den nachfolgenden Absätzen 4.4.1 bis 4.4.3 ausführlich beschrieben.

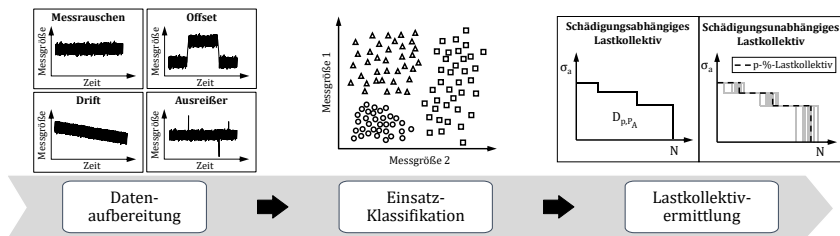


Abbildung 4.20: Phase 4: Repräsentative Lastkollektivvermittlung

4.4.1 Datenaufbereitung

Wichtiger Schritt bei der Lastkollektivvermittlung ist die Vorverarbeitung der Daten, um Messsignale auf eine einheitliche Messfrequenz anzupassen, enthaltene Messfehler zu korrigieren und nicht plausible Datensätze zu entfernen. Für den Umgang mit Fehlern in Daten ergeben sich nach [RUN15] die fünf Optionen:

1. Dokumentation der fehlerhaften Daten
2. Ersetzen der Fehlerwerte im Datensatz durch eindeutigen Fehlercode
3. Korrektur des fehlerhaften Merkmalwertes
4. Entfernen des fehlerhaften Datensatzes
5. Entfernen des fehlerhaften Messsignals aus allen Datensätzen

Während bei fehlerhaften Messsignalen eine Korrektur zwar mit Aufwand verbunden aber möglich ist, so ist dies bei onlineklassierten Betriebsdaten meist nicht möglich, da die für eine Korrektur notwendigen Informationen fehlen. So können bei onlineklassierten Betriebsdaten meist auch nur die Optionen 1, 2, 4 angewendet werden. Option 5 wird angewendet, wenn beispielsweise ein Messsignal über alle Anwendun-

gen falsch erfasst oder abgespeichert wurde. Um nach Option 3 fehlerhafte Messsignale aus Messkampagnen zu korrigieren, müssen die vorliegenden Fehler identifiziert werden. Allgemein lassen sich Messabweichungen in systematische und zufällige Messabweichungen unterteilen [DIN95]. Typische systematische Messfehlerarten sind: Offset, Drift oder auch der zeitliche Versatz zwischen zwei Messsignalen. Zu den zufälligen Messfehlerarten zählen hingegen Messrauschen, Signalausfälle und Ausreißer. Diese Fehlerarten sind grafisch in Abbildung 4.21 abgebildet und werden nachfolgend erläutert. Außerdem werden Korrekturoptionen aufgezeigt.

Liegt Messrauschen vor, streut das Messsignal zufällig um den wahren Wert. Dieses Rauschen lässt sich Glätten in dem beispielsweise aus zehn aufeinanderfolgenden Messpunkten ein Mittelwert oder Median gebildet wird, der die einzelnen Messpunkte ersetzt. Dieses Vorgehen wird auch als gleitender Mittelwert oder Median bezeichnet [MEY17]. Alternativ können allerdings auch spezielle Glättungsfilter verwendet werden, um die Streuung zu reduzieren [MEY17].

Beim Offset-Fehler liegt der gemessene Wert um einen konstanten Wert über oder unter dem wahren Wert. Ursache hierfür kann z. B. eine falsche Kalibrierung des Messgerätes oder ein zweizeitweise erhöhter Betriebsstrom sein. Bei der Fehlerart Drift, driftet das Messsignal kontinuierlich vom wahren Wert ab, als Folge beispielsweise von Verschleiß oder Temperaturabhängigkeit. Die Korrektur dieser Fehler kann z. B. anhand einer Mittelwert- oder Mediankorrektur sowie unter Anwendung von Hochpass-Filtern erfolgen [JS14].

Liegt ein Signalausfall für einen bestimmten Zeitraum der Messung vor, kommt es bei der Korrektur darauf an wie lange das Signal ausgefallen ist. Fehlen ganze Tage, oder Stunden wird zunächst geprüft, ob die Messung absichtlich pausiert hat. Ist dies nicht der Fall und ist aufgrund der großen Zeitspanne keine Rekonstruktion der fehlenden Messpunkte möglich, wird der Zeitraum der Messung entfernt. Dabei muss die gesamte Messdauer angepasst werden, da es sonst zu falschen Prognosen bezüglich der Lastzyklen pro Zeiteinheit kommt. Fehlen nur einzelne oder wenige Messpunkte können diese auch rekonstruiert werden. Hierfür kann z. B. die Methode der Linearen Interpolation oder die Methode des „Nächsten Nachbarn“ verwendet werden. Bei der Auswahl der Korrekturmethode muss der generelle Signalverlauf berücksichtigt werden. So eignet sich die Methode des „Nächsten Nachbarn“ für binäre Verläufe während die Lineare Interpolation sich für stetige Verläufe eignet. Der Unterschied des Ergebnisses beider Methoden ist für die Abtastratenerhöhung in Abbildung 4.22 zu sehen. Auf eine genaue Erläuterung und weitere Verfahren wird an dieser Stelle verzichtet und auf [RUN15] verwiesen.

Ausreißer sind einzelne oder einige wenige aufeinanderfolgende Messpunkte, die abseits von den anderen Messpunkten liegen. Sie unterliegen dabei einer extrem schnellen Signaländerungen, was ein Indiz für die Ausreißer-Identifikation sein kann.

Weiterhin muss bei der Identifikation betrachtet werden, ob die vermeintlichen Ausreißer innerhalb des erwarteten oder des physikalisch möglichen Rahmens liegen [JS14]. Liegen sie außerhalb dessen, können sie eindeutig als Ausreißer identifiziert werden. Die Korrektur erfolgt mit Hilfe der Methoden der Linearen Interpolation oder des „Nächsten Nachbarn“, was beispielhaft in Abbildung 4.22 dargestellt ist. Eine weitere Möglichkeit der Ausreißer-Korrektur ist der zuvor beschriebene gleitende Median. Da der Median unempfindlich gegenüber Ausreißern ist, werden diese automatisch korrigiert [RUN15]. Für die Ausreißer-Identifikation existieren auch statistische Tests wie der Grubbs-Test oder der Q-Test nach Dixon [HS18].

Zeitlicher Versatz mehrerer Messsignale kann durch einen nicht exakt synchronisierten Messbeginn entstehen. Er führt bei unabhängiger und absoluter Zeitzählung dazu, dass die Kombination mehrerer Signale zu falschen Ergebnissen führt. Eine Korrektur ist entweder über die Differenz zwischen den erreichten absoluten Messzeiten möglich oder über die Identifikation und den Abgleich von eindeutigen Events in den Messsignalen. Aber auch diese Korrekturmöglichkeiten sind mit Unsicherheiten verbunden, weshalb im Vorfeld von Messungen explizit auf eine synchrone Messung bei den notwendigen Messkanälen geachtet werden muss.

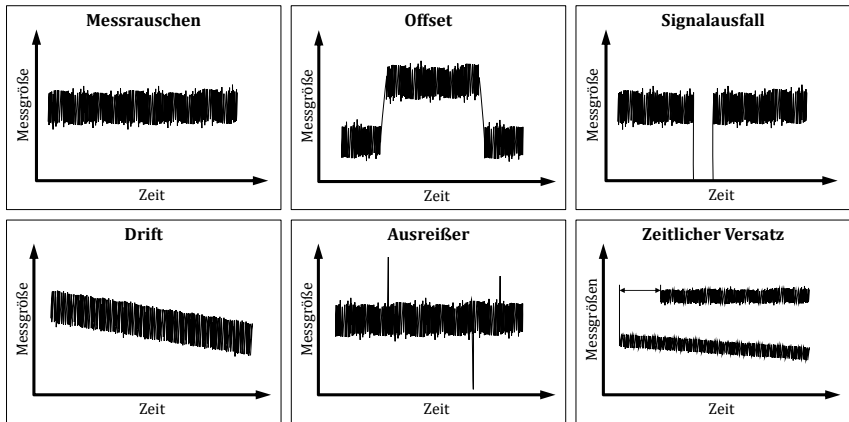


Abbildung 4.21: Fehlerarten in Messsignalen

Haben Messsignale unterschiedliche Abtastraten ist das zwar nicht als Fehler zu bewerten, allerdings müssen Messfrequenzen häufig vereinheitlicht werden. Grund hierfür ist die Nutzung von zwei oder mehrerer Messsignalen in Kombination wie z. B.

bei der Drehmoment-Drehzahl Belastung von Getrieben. Eine Reduktion auf eine einheitlich geringere Messfrequenz kann allerdings auch aufgrund der Datengröße und der damit verbundenen Handhabbarkeit der Daten notwendig sein. Bei der Anpassung der Abtastrate wird zwischen der Abtastratenerhöhung (Upsampling) und der Abtastratenverringern (Downsampling) unterschieden. Bei der Verringerung muss darauf geachtet werden, dass die tatsächlichen Signalverläufe noch erkennbar sind, wohingegen bei der Erhöhung der Abtastrate die Wahl der Methode entscheidend ist, wie in Abbildung 4.22 zu sehen ist. Darin sind die resultierenden Signalverläufe aus dem Upsampling nach den Methoden der Linearen Interpolation und der „Nächster Nachbar“ zu sehen. Für die Wahl der passenden Methode gilt es den zu erwartenden Signalverlauf zu berücksichtigen. Bei stetigen Verläufen ist die Interpolation besser geeignet, wohingegen bei binären Verläufen die Methode „Nächster Nachbar“ besser geeignet ist.

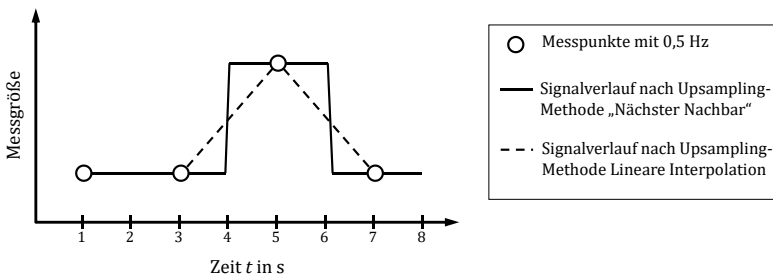


Abbildung 4.22: Abtastratenerhöhung

So wie die in Abbildung 4.21 dargestellten Fehlerarten das Messsignal beeinflussen, können diese auch einen Einfluss auf die Zähler in der Betriebsdatenerfassung haben. Allerdings ist eine Korrektur der Zähler meist nicht möglich, da hier die notwendigen Informationen für eine Korrektur-Methode fehlen. Außerdem muss bei der Onlineklassierung mit Fehleintragungen, zurückgestellten und vollen Zählern gerechnet werden. Liegen derartige Fehlerbilder vor, muss die Notwendigkeit eines Ausschlusses des fehlerbehafteten Datensatzes geprüft werden. Handelt es sich um ein generelles Problem mit einem Zähler, kann es notwendig sein diesen Wert aus allen Datensätzen zu entfernen. Bei nicht plausiblen Datensätzen muss analog zu den Messsignalen eine Ausreißer-Überprüfung durchgeführt werden. Liegen Ausreißer vor, muss vor deren Ausschluss allerdings geprüft werden, ob es um extreme aber bestimmungsgemäße Einsatzarten handelt. In diesem Fall dürfen diese nicht entfernt werden [RUN15]. Handelt es sich jedoch um einen Missbrauch, muss dieser aus der

Datenbasis ausgeschlossen werden. Aus diesem Grund empfiehlt es sich für die jeweilige Anwendung klare Grenzen zu definieren, anhand derer zulässiger vom unzulässigen Gebrauch unterschieden wird. Zur Orientierung bei der Definition dieser Grenzen können die Produktspezifikationen herangezogen werden.

4.4.2 Einsatz-Klassifikation

Sollen repräsentative Lastkollektive für die spezifizierten Einsatzklassen bestimmt werden, ist die Identifikation dieser Klassen in den Mess- und Betriebsdaten erforderlich. Diese Identifikation kann anhand der Randbedingungen der zur Verfügung stehenden Daten erfolgen. Diese können zur Klassifikation ausreichen, wenn die Einsatzklasse hier eindeutig hinterlegt ist. Stammen die Messdaten hingegen aus einer geplanten Messkampagne, lassen sich aus der Planung dieser direkt die Einsatzklassen ableiten.

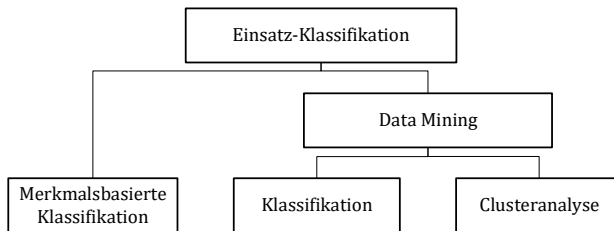


Abbildung 4.23: Übersicht Methoden zur Einsatz-Klassifikation

Häufig kann jedoch nicht auf in den Daten vorgegebene oder anhand der Planung der Messkampagne ableitbare Einsatzklassen geschlossen werden. Ein Grund für eine fehlende Zuordnung in Betriebsdaten ist beispielsweise das fehlende Wissen darüber, wie und wo das Produkt vom Kunden eingesetzt wird. Um in dieser Ausgangsposition einsatzspezifische Lastkollektive abzuleiten, ist eine Klassifikation der Datensätze notwendig, die diese Einsatzklassen zuordnet. Für die Einsatz-Klassifikation kann, wie in Abbildung 4.23 dargestellt ist, aus drei prinzipiellen Methoden gewählt werden. Die merkmalsbasierte Klassifikation führt die Zuordnung aufgrund in den Datensätzen enthaltenen sekundären Merkmalen, wie die Produktkonfiguration oder den Einsatz indirekt beschreibender Messgrößen, durch. Weitere Klassifikationsmethoden finden sich im Data Mining, das sich mit der Verarbeitung sogenannter Big Data befasst. Da-

bei werden ähnliche Gruppen mit Hilfe der Klassifikation und der Clusteranalyse direkt anhand der Datensätze klassifiziert. Diese Methoden und die merkmalsbasierte Klassifikation werden nachfolgend näher erläutert.

Merkmalsbasierte Klassifikation

Ansatz der merkmalsbasierten Klassifikation ist die Klassifizierung anhand sekundärer Merkmale, wie die Gesamtsystemkonfiguration oder auch anhand von Messgrößen aus deren Ausprägung indirekt auf eine spezifische Einsatzart geschlossen werden kann. Die Güte der Klassifikation hängt dabei von der Klassendefinition und der Unterscheidbarkeit der Klassen anhand der vorhandenen Merkmale ab. Dabei gibt es Klassen denen eindeutig die passenden Datensätze zugeordnet werden können und es gibt Datensätze, die zwischen vorhandenen Klassen liegen und deren Zuteilung in die jeweilige Klasse dadurch mit Unsicherheit verbunden ist. Dies ist eine generelle Problematik, die direkt aus der Definition der Einsatz-Klassen resultiert. Allgemein lässt sich das Vorgehen bei der merkmalsbasierten Einsatz-Klassifikation in die nachfolgenden drei Schritte einteilen:

1. Identifikation der Einsatz-Merkmale
2. Definition der Merkmalsgrenzen
3. Klassifikation der Datensätze

Die Erläuterung dieser Schritte erfolgt anhand des Beispiels eines PKWs dessen Einsatz anhand der Fahrertypen: Hausfrau, Pendler und Taxifahrer eingeteilt ist. Die Identifikation der Einsatz-Merkmale erfolgt über die Einsatzdefinition im Abgleich mit den vorhandenen Merkmalen in den Datensätzen. Im beschriebenen Beispiel sollen die Datensätze den Klassen Hausfrau, Pendler und Taxifahrer zugeordnet werden. Die Identifikation der Merkmale beginnt mit einer Beschreibung der Einsatzcharakteristik der Klassen. Der Taxifahrer macht dabei die meisten Fahrten pro Tag, um seine Kunden zu befördern. Der durchschnittliche Pendler kommt vermutlich mit zwei bis drei Fahrten pro Tag aus, bestehend aus dem Pendeln zur Arbeit und Freizeitfahrten. Die durchschnittliche Hausfrau mit Kind bringt dieses zur Kita und holt es wiederum ab. Außerdem erledigt Sie mit dem PKW Einkäufe. Somit kommt die Hausfrau ebenfalls durchschnittlich auf zwei bis drei Fahrten. Ist die Anzahl der Fahrten in den Datensätzen vorhanden, kann anhand einer im zweiten Schritt zu definierender Grenze der Taxifahrer eindeutig identifiziert werden, wohingegen Hausfrau und Pendler noch nicht klar getrennt werden können. Für diese Trennung müssen weitere Merkmale samt Grenzen für den jeweiligen Einsatz identifiziert und festgelegt werden. Sobald die notwendigen Einsatz-Merkmale identifiziert und spezifische Grenzen festgelegt sind, erfolgt im dritten Schritt die Klassifizierung der Datensätze.

Klassifikation auf Grundlage bekannter Einsätze

Im Kontext von Data Mining ist die Klassifikation ein zweistufiges prädiktives Verfahren, um unbekannte Datensätze auf Grundlage eines Klassifikationsmodells bekannter Klassen zuzuordnen. In der ersten Stufe wird ein Klassifikationsmodell antrainiert und in der zweiten Stufe wird die Klassifikation auf Grundlage dieses Modells durchgeführt [HKP12]. Das Grundprinzip der Klassifikation ist in Abbildung 4.24 zu sehen. Die Klassifizierung der unbekanntenen Daten erfolgt über das in Stufe 1 antrainierte Klassifikations-Modell, für deren Training bereits eindeutig zugordnete Datensätze zur Verfügung stehen müssen. Als Modell für die Klassifikation stehen unter anderem der Bayes-Klassifikator, die lineare Diskriminanzanalyse, die Supportvektormaschine, die Nächste-Nachbarn-Klassifikatoren, die lernende Vektorquantifizierung und Entscheidungs bäume zur Verfügung [RUN15]. Neben der Wahl des Modells ist die Abdeckung des Nutzraumes und die Qualität der zum Training benutzten Daten entscheidend für die Güte der Klassifizierung.

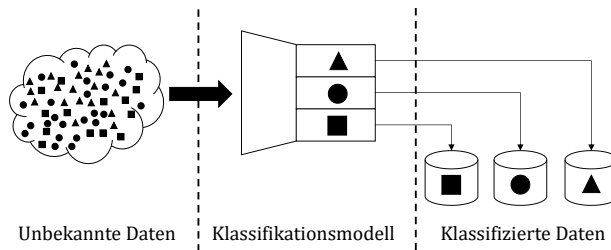


Abbildung 4.24: Grundprinzip der Klassifikation

Für die Anwendung der Klassifikation in der Lastkollektivermittlung sind die nachfolgenden fünf Schritte durchzuführen:

1. Datenvorverarbeitung bekannter Einsätze
2. Antrainieren der Klassifikationsmodelle
3. Auswahl des besten Klassifikationsmodells
4. Datenvorverarbeitung der unbekanntenen Daten
5. Klassifizierung unbekannter Daten

Die Schritte 1-3 entsprechen dabei dem Training der Modelle. Dabei sind für die festgelegten Einsatz-Klassen jeweils eindeutig zugeordnete Datensätze notwendig, die zunächst entsprechend der in Absatz 4.4.1 beschriebenen Datenaufbereitung vorverarbeitet werden müssen. Anschließend werden Klassifikationsmodelle für die ver-

schiedenen Modellarten antrainiert. In Schritt 3 wird anhand von Testdaten mit bekannten Einsatzklasse die Güte der Klassifikationsmodellen ermittelt. Daraus wird das Modell mit der besten Güte ausgewählt. Mit diesem Modell wird nach der Vorverarbeitung der unbekanntenen Daten in Schritt 5 die Klassifizierung durchgeführt.

Datenbasierte Clusteranalyse

Im Vergleich zur Klassifikation sind bei der Clusteranalyse weder Trainingsdaten, noch die Vorkenntnis der Einsatzklassen notwendig. Bei der Clusteranalyse werden, wie in Abbildung 4.25 dargestellt, Klassen anhand der natürlichen Struktur der Daten ermittelt.

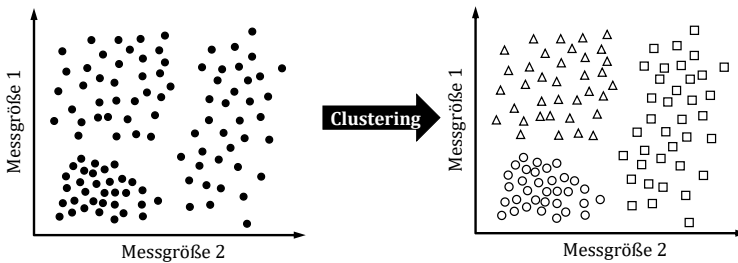


Abbildung 4.25: Grundprinzip der Clusteranalyse

Allgemein wird bei der Clusteranalyse zwischen hierarchischen und partitionierenden Verfahren unterschieden, wobei partitionierende Verfahren eine Sammlung von Datensätzen iterativ in c Cluster aufteilen. Hierarchische Verfahren hingegen benötigen keine Vorgabe der Cluster-Anzahl c und betrachten daher jeden Datensatz als potentielles Cluster. Sie teilen sich in agglomerative und divisive Verfahren auf. Das agglomerative Verfahren startet mit der Vorgabe, dass jeder Datensatz ein Cluster darstellt und verbindet schrittweise ähnliche Cluster zu gemeinsamen Clustern. Das divisive Verfahren hat als Ausgangsposition ein umfassendes Cluster über alle Datensätze, was schrittweise in feinere Cluster aufgeteilt wird. Partitionierende und hierarchische Verfahren arbeiten auf Basis der Distanzen der einzelnen Datensätze zum Clusterzentrum. [HS15]

Eine Clusteranalyse kann neben der Einsatz-Klassifikation auch für die Ausreißeranalyse verwendet werden [HKP12]. Für die Durchführung der Clusteranalyse kann die nachfolgende Vorgehensweise benutzt werden:

1. Datenvorverarbeitung
2. Auswahl Distanzmaß
3. Entfernung von Ausreißern
4. Festlegung der Merkmals-Gewichtung
5. Auswahl und Durchführung Clusterverfahren
6. Bestimmung der optimalen Clusteranzahl

In der Datenvorbereitung müssen die Datensätze zunächst auf die relevanten Variablen reduziert werden. Anschließend erfolgt die Auswahl des Distanzmaßes, wofür unter anderem nachfolgende Maße zur Verfügung stehen: Euklidische Distanz, Manhattan-Distanz, Cityblock-Distanz, Mahalanobis etc. [HKP12]. In der anschließenden Ausreißeranalyse werden die Ausreißer anhand ihrer sehr kleinen Cluster erkannt: Beispielsweise 1-2 Datensätze pro Cluster. Diese können dann aus der weiteren Analyse entfernt werden. Anschließend wird in Schritt 4 die Merkmals-Gewichtung festgelegt, um bedeutsame Merkmale bei der Clusteranalyse stärker hervorzuheben. In Schritt 5 wird das zu verwendende Clusterverfahren ausgewählt und durchgeführt. Hierfür stehen unter anderem nachfolgende Verfahren zur Auswahl: Single Linkage, Complete Linkage, Average Linkage, Centroid, Median, Ward etc. [HKP12]. In Schritt 6 wird abschließend die optimale Clusteranzahl, die die natürliche Struktur der Daten am besten beschreibt, bestimmt. Hierfür können beispielsweise die Silhouetten-Analyse oder die Elbow-Methode verwendet werden [HKP12]. Anhand der optimalen Clusteranzahl wird dann das Ergebnis der Clusteranalyse ermittelt.

4.4.3 Lastkollektivermittlung

Auf Datenaufbereitung und Einsatz-Klassifikation folgt die Lastkollektivermittlung. Diese lässt sich in vier Teilschritte gliedern: Wahl des Klassierverfahrens, Extrapolation der Lastkollektive, Ermittlung der repräsentativen Lastkollektive und Validierung. Für die Klassierung der Last-Zeit-Schriebe erfolgt zunächst die Wahl des passenden Zähl- und Klassierverfahrens in Abhängigkeit von Schadensmechanismus und den Eigenschaften des Last-Zeit-Verlaufes. Mit dem passenden Zählverfahren werden dann aus den Belastungs-Zeit-Funktionen die Lastkollektive klassiert. Diese Lastkollektive entsprechen jeweils der Betriebsdauer. Diese müssen für die Ermittlung repräsentativer Lastkollektive auf eine einheitliche Lebensdauer inter- oder extrapoliert werden. Da eine Extrapolation der Lastkollektive auf die vom Produkt geforderte Lebensdauer erfolgen muss, wird in dieser Methodik nur die Extrapolation der Lastkollektive durchgeführt. Liegen die extrapolierten Lastkollektive vor, werden aus die-

sen die repräsentativen Lastkollektive für die relevanten Einsatzklassen ermittelt. Dabei wird unterschieden zwischen schädigungsabhängigen und -unabhängigen repräsentativen Lastkollektiven, die jeweils einen zu quantifizierenden Anteil an Einsätzen innerhalb einer Einsatzklasse abdecken. Diese Lastkollektive sind damit repräsentativ für ein definiertes Quantil an Einsätzen innerhalb einer Einsatzklasse. Ein repräsentatives Lastkollektiv lässt sich aber auch, in Abhängigkeit eines als repräsentativ betrachteten Einsatzmix, synthetisch aus den elementaren Basiskollektiven superpositionieren. Bei den dabei resultierenden repräsentativen Lastkollektiven, aber auch bei Lastkollektiven auf Grundlage von Mess- oder Betriebsdaten, ist abschließend eine Validierung der Lastkollektive anhand von Messungen im Kundenbetrieb vorgesehen. Dadurch wird sichergestellt, dass die vorhandenen Unsicherheiten aus den Betriebsdaten oder der Abschätzung des repräsentativen Einsatzes auf ein akzeptables Niveau reduziert werden. Ist dies der Fall, ist die Ermittlung der repräsentativen Lastkollektive abgeschlossen.

Auswahl Klassierverfahren

Zähl- und Klassierverfahren sind elementarer Bestandteil jeder Lastkollektivermittlung, da erst durch ihre Anwendung die vereinfachte Darstellung der Lasten in Kollektivform möglich wird. Bei Betriebsdaten erfolgt diese Klassierung in der Regel bereits im Steuergerät, da das Abspeichern einer vollständigen Belastungs-Zeit-Funktion einen zu großen Speicherbedarf erfordert. Egal ob die Klassierung bereits online oder erst bei der Datenanalyse geschieht, die Wahl des passenden Klassierverfahrens ist von entscheidender Bedeutung. Dabei müssen die relevanten Schadensmechanismen und die Eigenschaften der vorliegende Belastungs-Zeit-Funktion selbst berücksichtigt werden. In diesem Absatz werden die grundlegenden Fragestellungen, die für die Auswahl des passenden Zählverfahrens geklärt werden müssen, diskutiert und anhand von Beispielen erläutert.

Bei der Wahl des passenden Verfahrens wird zunächst der Schadensmechanismus hinsichtlich der schädigungsrelevanten Einflussgrößen betrachtet. Während davon ausgegangen werden kann, dass der quantitative Betrag der Last bzw. deren Amplitude immer zu berücksichtigen ist, muss betrachtet werden, ob die Zeitdauer, die Anzahl der Schwingspiele oder die Frequenz der Amplitude die Schädigung maßgeblich verursachen. Um diese Betrachtung durchzuführen, ist eine grobe Kenntnis des Schädigungsmechanismus als Input notwendig, siehe Abbildung 4.26. Liegt z. B. der Schadensmechanismus Bruch durch zyklische Ermüdung vor, so ist neben der Lastamplitude die Schwingspielzahl relevant. Daraus folgt, dass ein amplitudenbasiertes Zählverfahren zu verwenden ist. Ist für den Bruch allerdings, wie beim Resonanzfall, maßgeblich eine Frequenz verantwortlich, müssen frequenzbasierte Verfahren verwendet werden. Bei umlaufenden Komponenten wie beispielsweise Zahnräder

ist hingegen die kumulierte Zeitdauer, bei der ein Zahnrad ein bestimmtes Moment überträgt, die relevante Einflussgröße. In diesem Fall ist ein zeitbasiertes Zählverfahren zu wählen.

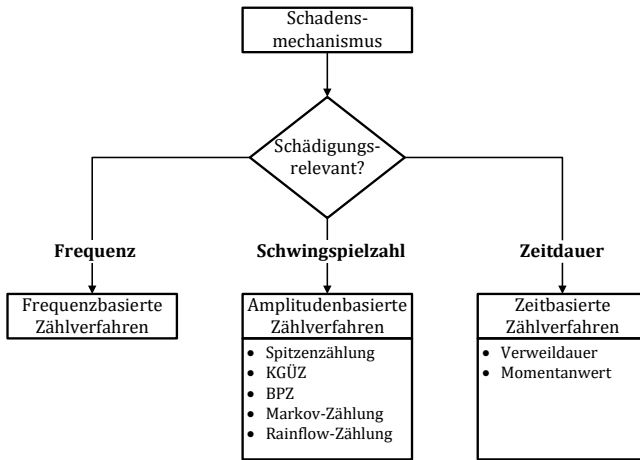


Abbildung 4.26: Auswahl Zählverfahren

Wie in Abbildung 4.26 dargestellt, gibt es verschiedene Verfahren für amplituden- und zeitbasierte Schädigungsmechanismen. Um das optimale Verfahren auszuwählen, wird im nächsten Schritt die Belastungs-Zeit-Funktion genauer betrachtet. Ein- oder zweiparametrischen Verweildauer- und Momentanwertzählung eignen sich als zeitbasiertes Zählverfahren. Bei der Verweildauerzählung wird die Zeit, in der sich ein Signal innerhalb einer Klasse befindet, aufsummiert. Bei der Momentanwertzählung hingegen wird der Signalwert in vorgegebenen Abtastabständen erfasst und der jeweiligen Klasse zugeordnet. Sind die Abtaststraten in der zu klassierenden Belastungs-Zeit-Funktion klein, stimmen die Ergebnisse beider Zählverfahren überein [KJP12]. Nur bei großen Abtaststraten eignet sich das Verweildauerzählverfahren besser als die Momentanwertzählung.

Bei den amplitudenbasierten Zählverfahren werden die fünf nachfolgenden Zählverfahren betrachtet: Spitzenzählung, Klassengrenzüberschreitungszählung (KGÜZ), Bereichspaarzählung (BPZ), Markov-Zählung und Rainflow-Zählung. Für die Auswahl eines dieser Verfahren ist die Betrachtung des Signalverlaufes erforderlich. Dabei wird geprüft, ob eine Mittellastschwankung, eine Signaldämpfung oder eine Signalüberlagerung vorliegen. Dies ist notwendig da die Verfahren, wie in der Übersicht in Tabelle 4.4 dargestellt, unterschiedlich gut oder auch gar nicht mit diesen Einflüssen

umgehen können, woraus eine fehlerhafte Klassierung folgt. Die Übersicht in Tabelle 4.4 resultiert aus den Ergebnissen aus [KJP12], welches als Standardwerk für die Beschreibung der Zähl- und Klassierverfahren gilt.

Tabelle 4.4: Eignung amplitudenbasierter Zählverfahren für Mittellastschwankungen, Überlagerung und Dämpfung in Signalen

	Mittellast- schwankungen	Überlagerung	Dämpfung
Spitzenzählung	+	-	+
KGÜZ	-	-	+
BPZ	-	+	-
Markov-Zählung	+	-	+
Rainflow-Zählung	+	+	-

Die Spitzenzählung ermittelt die Häufigkeitsverteilung der Extrempunkte einer Belastungs-Zeit-Funktion. Das Verfahren liefert auch unter Mittellastschwankung und Dämpfung gute Ergebnisse, ist jedoch anfällig gegenüber Überlagerungen. Das KGÜZ zählt die Überschreitungshäufigkeit festgelegter Klassengrenzen. Sie liefert verlässliche Resultate bei gedämpften Signalverlauf, ist jedoch ungeeignet bei Signalen mit Überlagerung oder Mittellastschwankungen. Bei der BPZ wird die Amplitudengröße und deren Häufigkeit gezählt. Sie eignet sich nicht bei Mittellastschwankungen oder Dämpfung, kann aber verglichen mit den anderen Verfahren besser mit Signalüberlagerung umgehen. Die Markov-Zählung, auch Von-Bis-Zählung genannt, zählt den Start- und Endwert fallender oder steigender Flanken. Sie ist robust gegenüber Dämpfung und Mittellastschwankung, kann aufgrund ihres sequentiellen Charakters allerdings keine überlagerten Schwingungen erkennen. Das Rainflow-Zählverfahren erfasst geschlossene Hysteresen einer Belastungs-Zeit-Funktion, was den Vorteil hat, dass dieses Verfahren aufgrund seines nicht sequentiellen Vorgehens auch für überlagerte Schwingungen geeignet ist. Genauso gut eignet sich die Rainflow-Zählung auch bei Mittellastschwankungen, wohingegen bei gedämpften Signalen keine geschlossenen Hysteresen vorliegen. Die Rainflow-Zählung eignet sich insbesondere für werkstoffmechanische Schädigungsmechanismen, aufgrund der werkstoffmechanischen Analogie der geschlossenen Hysteresen. [KJP12]

Extrapolation

Um Lastkollektive zu ermitteln, die repräsentativ für die geforderte Produktlebensdauer sind, ist die Extrapolation der Lastkollektive erforderlich. Denn Lastkollektive

aus Mess- oder Betriebsdaten decken in der Regel nicht die gesamte Produktlebensdauer ab. Der Extrapolationsfaktor e ist nach folgender Gleichung in Abhängigkeit der gemessenen Schwingenspielzahl N_M und der Schwingenspielzahl für die gesamte Lebensdauer N_L definiert [HMM11]:

$$e = \frac{N_L}{N_M} \quad (4.1)$$

Der naheliegende Extrapolationsansatz ist die lineare Extrapolation um den Faktor e , wie es auch in Abbildung 4.27 dargestellt ist. Durch die Multiplikation der Häufigkeiten des Lastkollektives um den Faktor e , erfolgt eine Verschiebung des Lastkollektives nach rechts. Diese Methode ist sehr gut anwendbar, wenn der Kollektivhöchstwert $\hat{\sigma}_{aL}$ in den durchgeführten Messungen enthalten ist. Dies ist gegeben, wenn die Messungen 10^6 Schwingenspiele umfassen, denn nach [HAI06] tritt der Kollektivhöchstwert einmal bei 10^6 Schwingenspielen auf. Ist der Kollektivhöchstwert enthalten, kann eine Waagrechte gezogen werden, wie im Fall der gepunkteten Linie in Abbildung 4.27.

Ziel bei der Ermittlung repräsentativer Lastkollektive sollte immer sein, den Kollektivhöchstwert über die gesamte Messkampagne zu erfassen. Ist dies nicht möglich und bei den vorliegenden Daten unklar ob der Kollektivhöchstwert bereits enthalten ist, lässt sich das ggfs. aus einer technischen Einschränkung des Produktes ableiten und mit der Messung abgleichen. Ist dieser Wert enthalten, kann erneut eine waagrechte Linie gezogen werden. Ist dieser Wert nicht enthalten kann er beispielsweise künstlich als Block in das Kollektiv über den Extrapolationszeitraum eingefügt werden. Dies ist zwar konservativ aber nicht unüblich, wie der Industriestandard für die PKW-NFZ-Bremse [VDA16] zeigt.

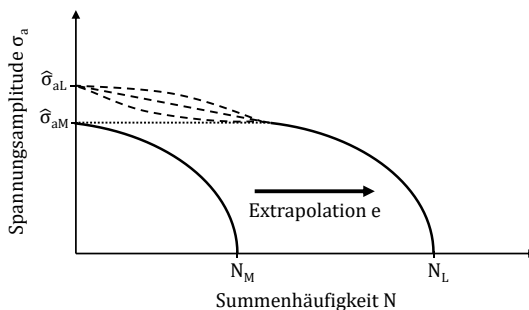


Abbildung 4.27: Problemstellung bei der Extrapolation nach [HMM11]

Ist die Kenntnis über den Kollektivhöchstwert nicht vorhanden, müssen Extrapolationsmethoden verwendet werden, die den Verlauf für den extrapolierten Bereich und

den Kollektivhöchstwert abschätzen. Zu den bekanntesten Methoden hierbei gehören die Peak Over Threshold Methode (POT) nach [JOH06] oder die Rainflowmatrix-Extrapolation nach [JJ01]. Während die Rainflowmatrix-Extrapolation anhand der Rainflowmatrix die Extrapolation durchführt, extrapoliert die POT direkt die Belastungs-Zeit-Funktion. In [HMM11] ist außerdem eine analytische Extrapolationsmethode beschrieben, die nur bei mathematischen Lastkollektiven angewendet werden kann und die als Voraussetzung die Kollektivform benötigt. Da die Extrapolationsmethoden nicht im Fokus dieser Arbeit stehen, wird an dieser Stelle für Details der Extrapolationsmethoden auf die nachfolgende Literatur verwiesen: [HMM11], [JS14]. Genereller Nachteil an diesen Extrapolationsmethoden ist, dass sie den Kollektivhöchstwert genauso unter als auch überschätzen können und damit bei der Lastkollektivvermittlung ein weiterer Unsicherheitsfaktor sind. Aus diesem Grund sollten Messkampagnen immer so geplant werden, dass der Kollektivhöchstwert enthalten ist, damit Fehler durch die lineare Extrapolation vermieden werden.

Ermittlung repräsentativer Lastkollektive

Liegen die extrapolierten Lastkollektive für die definierten Einsatzklassen oder Basis-kollektive vor, erfolgt aus diesen die Ermittlung der repräsentativen Lastkollektive. Wie Abbildung 4.28 zeigt, kann diese Ermittlung schädigungsabhängig und -unabhängig durchgeführt werden. Dabei ist es irrelevant ob als Zielsetzung Worst Case, ein-satzklassenspezifische oder synthetische Lastkollektive definiert sind.

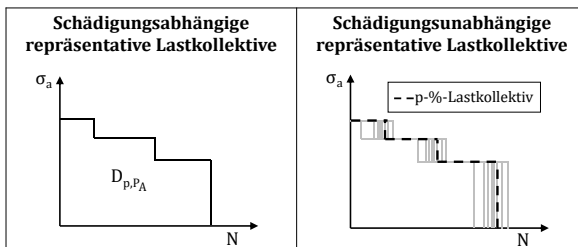


Abbildung 4.28: Varianten repräsentativer Lastkollektivvermittlung

Schädigungsabhängige und -unabhängige Lastkollektive lassen sich für einsatzklassenspezifische und Worst Case Lastkollektive wie auch für Basiskollektive gleichermaßen bestimmen. Dabei entscheidend ist die Fragestellung welchen Anteil an Kundeneinsätzen ein Lastkollektiv repräsentieren und damit abdecken soll. Für die Beschreibung dieses Zusammenhanges werden in der Statistik Quantile verwendet. Denn für ein beliebiges p -%-Quantil gilt der Zusammenhang, dass p % der Messwerte

kleiner und $100-p$ % größer als das p -%-Quantil sind. Damit lässt sich bei der Ermittlung eines repräsentativen Lastkollektives exakt der Prozentwert an Kundeneinsätzen festlegen, die dieses abdeckt. Die schädigungsabhängige und unabhängige Lastkollektivermittlung für ein definiertes Quantil wird nachfolgend näher erläutert. Außerdem wird abschließend die Vorgehensweise zur Ermittlung eines synthetischen Einsatz-Lastkollektives erklärt.

Schädigungsabhängige repräsentative Lastkollektivermittlung

Soll ein repräsentatives Lastkollektiv für einen spezifischen und bereits bekannten Schadensmechanismus ermittelt werden, kann die Variante des schädigungsabhängigen Lastkollektives verwendet werden. Dabei wird in Abhängigkeit von den Lastkollektiven und dem Schädigungsmodell ein p -%-Lastkollektiv abgeleitet. Dies hat den Vorteil, dass das Kollektiv passend für den Schadensmechanismus ermittelt wird. Nachteil ist jedoch gleichzeitig, dass dieses Kollektiv nicht demselben p -%-Quantil für einen anderen Schädigungsmechanismus entspricht. Ändert sich also das Lebensdauermodell beispielsweise durch Produktweiterentwicklungen, ist das ermittelte Lastkollektiv nur noch bedingt repräsentativ. Stellt sich sogar ein anderer Schädigungsmechanismus als relevant für die Lebensdauer heraus, muss die Aussage dieses Lastkollektives gänzlich in Frage gestellt werden. Ein weiterer Nachteil ist, dass gängige Lebensdauermodelle, wie beispielsweise das Wöhlermodell und die dazugehörige Schadensakkumulation, in der Anwendung mit Unsicherheiten behaftet sind, wie bereits in Absatz 2.4.1 beschrieben wurde. Sind diese Unsicherheiten im jeweiligen Fall jedoch vernachlässigbar klein und der relevante Schädigungsmechanismus und das dazugehörige Lebensdauermodell bekannt, ist das schädigungsabhängige, repräsentative Lastkollektiv die optimale Wahl für den aktuellen Produktstand. Die Vorgehensweise zur Ermittlung eines schädigungsabhängigen Lastkollektives ist in Abbildung 4.29 dargestellt und wird nachfolgend anhand des Beispiels eines Wöhlermodells ausführlich beschrieben.

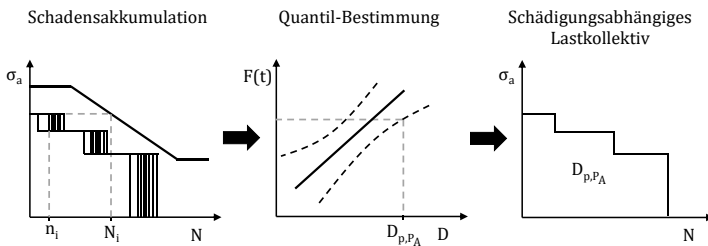


Abbildung 4.29: Schädigungsabhängige repräsentative Lastkollektivermittlung

Liegen die Lastkollektive für die Einsatzklassen oder Basiskollektive vor, werden diese in einen Schädigungswert D umgerechnet. Dafür wird für dieses Beispiel das Wöhlermodell gewählt, anhand dessen für jedes Lastkollektiv mittels Schadensakkumulation ein Schädigungswert D_i berechnet wird. Der daraus resultierende Datensatz für die Schädigungswerte der Lastkollektive wird statistisch analysiert. Mittels Verteilungsidentifikation wird die statistische Verteilungsfunktion ermittelt, die die Schädigungswerte am besten beschreibt. Bei der Verteilungsschätzung werden ebenfalls Vertrauensbereiche ermittelt, die genutzt werden, um aus dem Stichprobenergebnis der erfassten Lastkollektive eine Aussage auf die Grundgesamtheit der Lastkollektive im Feld treffen zu können. Dies ist insbesondere bei kleiner Stichprobengröße notwendig. Hierfür ist es eine unverzichtbare Grundvoraussetzung, dass eine repräsentative Stichprobe an Lastkollektiven aus dem Feld vorliegt. Anhand der ermittelten Verteilungsfunktion und der dazugehörigen Vertrauensbereiche, wird im letzten Schritt das gewünschte p -%-Quantil bei gewünschter Aussagesicherheit ermittelt. Anhand des dabei ermittelten Schädigungswertes $D_{p,PA}$ wird das Lastkollektiv gewählt, das diesem Wert entspricht. Entspricht keines der vorhandenen Lastkollektive direkt diesem Schädigungswert, was insbesondere für hohe Quantile und kleine Datenbasis der Fall sein kann, wird das dem Schädigungswert am nächsten kommende Lastkollektiv gewählt und mittel linearer Extrapolation auf diesen Schädigungswert extrapoliert. Aus dem nachfolgenden Zusammenhang lässt sich dann mit dem Extrapolationsfaktors e die Schwingspielzahl je Klasse ermitteln:

$$D_{p,PA} = \sum_i^m \frac{n_i \cdot e}{N_i} \quad (4.2)$$

Dasselbe gilt für einen Schädigungswert der zwischen zwei Lastkollektiven liegt, hier wird das Lastkollektiv mit dem kleineren Schädigungswert als Ausgangspunkt für die Extrapolation gewählt.

Tritt der Fall auf, dass keine Verteilung die Schädigungswerte hinreichend genau beschreibt, kann das an stark unterschiedlichen Einsatzarten innerhalb einer definierten Einsatzklasse liegen. Ggfs. lassen sich diese Klassen aus der vorhandenen Mischverteilung extrahieren und separate Verteilungsfunktionen schätzen. Ist dies nicht möglich oder aufgrund der Produktstrategie auch gar nicht gewünscht, kann bei ausreichend großer Datengrundlage auch eine empirische Abschätzung erfolgen. Sind generell hohe Quantile für das repräsentative Lastkollektiv gefragt, ist auch bei hoher Verteilungsgüte, die Anpassung im oberen Bereich der Verteilung separat zu prüfen. Werden die oberen 5-%-Einsätze beispielsweise deutlich unterschätzt, darf die Verteilung nicht zur Prognose dieser Quantile benutzt werden. Auch hier kann eine empirische Schätzung der Quantile bei großer Datengrundlage zu genaueren Ergebnissen führen. Diese Vorgehensweise lässt sich auf beliebige Lebensdauer- und

Schadensmodelle übertragen, wie es beispielweise in [SSS15] mit dem Arrhenius, dem Lawson und dem Coffin-Manson-Modell für Steuergeräte erfolgte.

Schädigungsunabhängige repräsentative Lastkollektivermittlung

Schädigungsunabhängige Lastkollektive werden nur auf Grundlage der Schwingungsspielzahlen ermittelt. Dabei wird das p -%-Quantil für die Summenhäufigkeit jeder Lastklasse ermittelt, woraus ein zu p % einhüllendes Lastkollektiv folgt. Dieses Lastkollektiv hat den Vorteil, dass durch kein Lebensdauermodell eine Gewichtung der verschiedenen Lastklassen erfolgt, wodurch dieses unabhängig vom exakten Schädigungsmodell ist und deshalb auch unabhängig angewendet werden kann. Nachteil wiederum ist, dass ein einhüllendes Kollektiv nicht notwendigerweise aus einer Messung resultiert. So kann ein einhüllendes Kollektiv entsprechend der Anzahl an Lastklassen aus derselben Anzahl an Messungen resultieren. Dieser Zusammenhang macht das schädigungsunabhängige Lastkollektiv deutlich konservativer als ein schädigungsabhängiges Lastkollektiv. Als Voraussetzung für die Ermittlung schädigungsunabhängiger Lastkollektive reicht die passende Klassierung zum generell vorliegenden Schadensmechanismus aus. Ein Modell ist nicht notwendig. In Abbildung 4.30 ist der Ablauf der Ermittlung von schädigungsunabhängigen repräsentativen Lastkollektiven abgebildet. Ausgangspunkt der Ermittlung sind die erfassten Lastkollektive. Wie bei der Darstellung der Lastkollektive, wird bei der Quantil-Ermittlung die kumulierte Häufigkeit der jeweiligen Lastklasse der Messung verwendet. Hierfür wird die Schwingungsspielanzahl der größeren Lastklassen auf die zu betrachtende Lastklasse addiert. Aus den Summenhäufigkeiten aller Messungen erfolgt dann die Quantil-Bestimmung der Lastklassen. Diese erfolgt entweder, wie zuvor beschrieben, mittels statistischer Verteilungsfunktionen und der Berücksichtigung von Vertrauensbereichen oder bei ausreichend großer Datengrundlage empirisch. Ein Beispiel für die Ermittlung eines solchen schädigungsunabhängigen Lastkollektives findet sich in dem Beitrag von [SDS10].

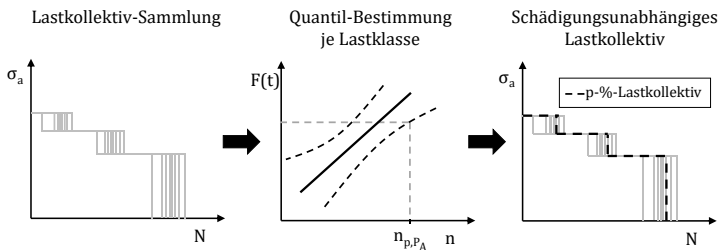


Abbildung 4.30: Schädigungsunabhängige repräsentative Lastkollektive

Anstatt der Verwendung der Summenhäufigkeit einer Lastklasse ist auch die Verwendung der Einzelhäufigkeiten denkbar, wobei dadurch das bereits konservative Ergebnis des einhüllenden Lastkollektives noch konservativer wird. Denn bei der Verwendung von Einzelhäufigkeiten kann es dazu führen, dass das schädigungsunabhängige Lastkollektiv nicht länger die Einzelkollektive zu p % einhüllt, sondern zu einem deutlich größeren Wert. Dieser Zusammenhang wird anhand des vereinfachten Beispiels in Abbildung 4.31 verdeutlicht. Kunde 1 betreibt das fiktive Produkt mit einer größeren Amplitude als Kunde 2. Kunde 2 hingegen erreicht eine größere Schwingungszahl als Kunde 1 im selben Zeitraum. Wird nun das schädigungsunabhängige Lastkollektiv, das beide Einsätze zu 100 % abdeckt, ermittelt, entfallen auf die Einhüllende aus den Einzelhäufigkeiten eine deutlich größere Schwingungszahl als für das Ergebnis aus den Summenhäufigkeiten. Das vermeintliche 100-%-Lastkollektiv weist damit eine um Δn größere Gesamtschwingungszahl auf, als bei beiden Kunden tatsächlich aufgetreten ist. Aus diesem Grund wird empfohlen, die Berechnung der schädigungsunabhängigen Lastkollektive auf Basis der Summenhäufigkeiten durchzuführen.

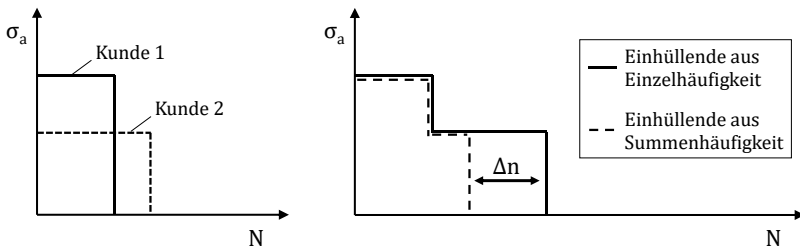


Abbildung 4.31: Lastkollektivvermittlung für Summen- und Einzelhäufigkeit

Ermittlung synthetischer Einsatz-Lastkollektive

Die Ermittlung repräsentativer Lastkollektive basiert auf Basiskollektiven, die die grundlegenden Einsatzarten eines Produktes im Feld repräsentieren. Unter der Kenntnis der prozentualen Verteilung dieser Einsatzarten, kann mit diesen Basiskollektiven jede denkbare Einsatzklasse synthetisch abgeleitet werden. Die Repräsentativität der bestimmten Lastkollektive hängt maßgeblich von der Einsatzverteilung ab. Der große Vorteil an dieser Vorgehensweise ist das auch gänzlich neue Einsatzklassen abgeleitet werden können. Die in Abbildung 4.32 dargestellte Vorgehensweise beginnt mit der Ermittlung der Basiskollektive. Diese erfolgt schädigungsabhängig oder -unabhängig, wie in den vorherigen Absätzen beschrieben, für ein definiertes Quantil. Dieses Quantil ist dabei für alle Basiskollektive gleich zu definieren. Für die Synthese dieser Basiskollektive werden dann im zweiten Schritt die Anteile der Basiskollektive

an der jeweiligen Einsatzverteilung ermittelt. Hierfür kann, wie in [WEI07], [HUB10] beschrieben ist, eine Kundenbefragung durchgeführt werden. Alternativ lassen sich auch aus bestehenden Felddaten oder Expertenwissen repräsentative Einsatzverteilungen ermitteln. Sind Einsatzverteilung und Basiskollektive bekannt, müssen die Basiskollektive entsprechend der Anteile synthetisch superpositioniert werden und auf die Ziellebensdauer inter- oder extrapoliert werden. In den zuvor erwähnten Arbeiten [WEI07], [HUB10] wurde diese Variante der Lastkollektivermittlung bereits erfolgreich durchgeführt.

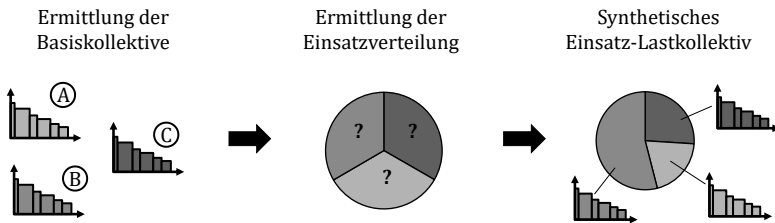


Abbildung 4.32: Repräsentative Lastkollektivermittlung auf Grundlage von Basiskollektiven und einer repräsentativen Einsatzverteilung

Validierung

Die Validierung der repräsentativen Lastkollektiven ist der letzte Schritt der Lastkollektivermittlung. Dieser Schritt ist zum einen wichtig, wenn die Lastkollektive rein aus Betriebsdaten abgeleitet sind. Hier sollte anhand der Ergebnisse einer kleinen Messkampagne überprüft werden, ob die vorhandenen Unsicherheiten in den Betriebsdaten vernachlässigbar klein sind. Dazu reicht ein einfacher Vergleich der repräsentativen Lastkollektiven mit den Lastkollektiven der Messkampagne aus. Zum anderen ist auch bei synthetischen Einsatz-Lastkollektiven eine Validierung in Form einer kleineren Messkampagne sinnvoll. Hier gilt es neben den resultierenden Lastkollektiven auch die als repräsentativ definierte Einsatzverteilungen zu überprüfen. Dazu muss die Einsatz-Klassifikation im laufenden Betrieb ermöglicht werden. Das resultierende Lastkollektiv kann anhand einer Messkampagne bei vorgegebener Einsatzverteilung validiert werden.

5 Anwendungsbeispiel Nutzfahrzeuggesteuerung

Die in Kapitel 4 vorgestellte Methodik wird nachfolgend anhand des Beispiels der Nutzfahrzeuggesteuerung (NFZ-Bremse) angewendet und validiert. Dieses Beispiel eignet sich für die Validierung der Methodik, da die NFZ-Bremse vielfältigen Einsatzarten und Lasten ausgesetzt ist, aber keine standardisierte Beschreibung dieser Einsatzarten und Lasten in Form von repräsentativen Lastkollektiven im Stand der Technik existiert. Aus dieser Problemstellung heraus hat der Arbeitskreis „Standard Load Spectra for Commercial Vehicle Brakes“, kurz AK CV-Brakes, über drei Jahre zusammengearbeitet, um repräsentative Lastkollektive für die NFZ-Bremse zu ermitteln. Der AK CV-Brakes setzte sich dabei aus Bremsen-, Achs- und Fahrzeugherstellern zusammen. Namentlich bildeten den Arbeitskreis die nachfolgenden Firmen: BPW, DAF Trucks, Daimler, Haldex, IVECO, Knorr-Bremse, MAN, Meritor, SAF-Holland und WABCO. Ein Ziel der Industriepartner war dabei eine repräsentative Auslegungsgrundlage für die NFZ-Bremse zu ermitteln und diese als neuen Stand der Technik der gesamten Branche frei verfügbar zu machen [LB19]. Die Schritte zur Ermittlung repräsentativer Lastkollektive werden in den nachfolgenden Unterkapiteln 5.2 bis 5.5, die die Phasen der Methodik zur Ermittlung repräsentativer Lastkollektive widerspiegeln, beschrieben. Zunächst wird jedoch die Funktionsweise der NFZ-Bremse in 5.1 beschrieben.

5.1 Die Nutzfahrzeuggesteuerung

Bei Nutzfahrzeugen ist die Bremsanlage als pneumatisches System mit oder ohne Retarder aufgebaut und umfasst die Funktionen der Betriebsbremse und der Feststellbremse. Außerdem muss als Sicherheitsfunktion eine Hilfs-Bremsanlage vorhanden sein, die bei Ausfall der Betriebsbremse das Fahrzeug abbremst. Die pneumatische Bremsanlage besteht aus den Hauptkomponenten: Kompressor, Druckluftbehälter, Druckleitungen, Betriebsbrems- und Handbremsventil, Betriebsbrems- und Feststellbremszylinder und der NFZ-Bremse. Die NFZ-Bremse selbst ist als Scheiben- oder Trommelbremse ausgeführt, die beide im Schnitt in Abbildung 5.1 zu sehen sind. Die

notwendige Kraft zum Abbremsen des Fahrzeuges wird dabei mithilfe von Betriebsbremszylindern erzeugt, in denen der Druck über die Aktuatorfläche in eine Kraft umgewandelt wird. Dadurch lässt sich die maximal notwendige Kraft für den Bremsvorgang durch die Zylindergröße einstellen. Das für die Verzögerung notwendige Bremsmoment wird über die mit dem Rad verbundene Scheibe oder Trommel erzeugt. Dieses wird über den effektiven Reibradius der Scheibenbremse oder den Trommelradius vorgegeben. Bei der Feststellbremsfunktion muss die Bremse das Parken im Gefälle mit einer Steigung von bis zu 18 % sicherstellen [UN 10]. Da im geparkten Zustand keine Druckluft mehr zur Verfügung steht, wird für diese Funktion ein Federspeicher-Zylinder verwendet. Dieser erzeugt die notwendige Klemmkraft im drucklosen Zustand über eine stark vorgespannte Feder. Um die Feststellbremse vor der Fahrt zu lösen, wird die Feder mithilfe von Druckluft gespannt. Die Feststellbremse erfüllt im Falle eines Ausfalls der Betriebsbremse die Funktion der Hilfsbremsanlage, indem mithilfe der Einstellmöglichkeiten des Handbremsventils das Fahrzeug zum Stillstand gebracht wird. [ABB13], [BB12], [DAY14], [MAN16]

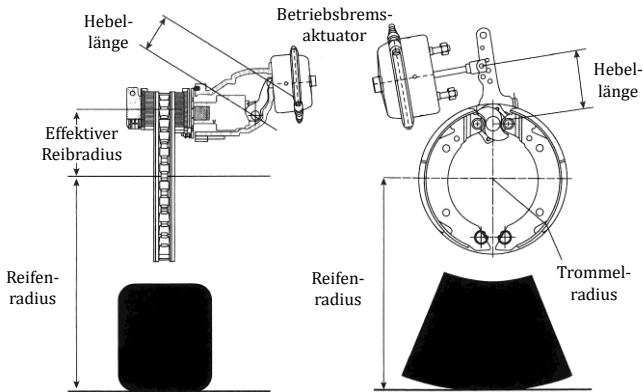


Abbildung 5.1: Aufbau von Scheiben- (l.) und Trommelbremse (r.) nach [DAY14]

Die Trommelbremse in Simplex- oder Duplex-Bauform mit Spreizkeil oder S-Nocken erzeugt das notwendige Bremsmoment für die Fahrzeugverzögerung, indem die mit der Achse verbundenen Bremsbeläge gegen die mit dem Rad rotierende Bremsstrommel gespannt werden. Bei der Bauform die rechts in Abbildung 5.1 zu sehen ist, handelt es sich um die Simplex-Bauform mit S-Nocken. Ein Vorteil der Trommelbremse ist die geringe Schmutzempfindlichkeit aufgrund ihrer Bauform, weshalb sie vermehrt in Offroad- und Baustellenanwendung auf dem europäischen Markt verbaut wird. In den anderen Anwendungen wie Fern- oder Distributionsverkehr wird die

Scheibenbremse bevorzugt eingesetzt. Grund hierfür sind Kennwertschwankungen bei thermischer Belastung, dem sogenannten Fading, von Trommelbremsen. Die Scheibenbremse besitzt nicht nur hinsichtlich des geringeren Fadings Vorteile, sondern zeichnet sich generell durch eine größere thermische Belastungsfähigkeit und eine höhere Servicefreundlichkeit aus. Bei der links in Abbildung 5.1 gezeigten Scheibenbremse handelt es sich um die Bauform als Schwimmsattel. Die erzeugte Zylinderkraft wird bei der Scheibenbremse über den Hebel erhöht und bis zu den Bremsbelägen weitergegeben. Zwischen den Bremsbelägen rotiert die mit dem Rad verbundene Bremsscheibe, worüber beim Zuspinnen der mit der Achse verbundenen Bremsbeläge das Bremsmoment für die Fahrzeugverzögerung erzeugt wird. [ABB13], [BB12], [DAY14], [MAN16]

5.2 System- und Lastanalyse

Wie in Unterkapitel 4.1 beschrieben, ist das Ziel der System- und Lastanalyse die relevanten Lasten für das zu betrachtende System zu ermitteln. Dies wird nachfolgend für die NFZ-Bremse beschrieben, wobei zunächst die Abgrenzung der Bremse vom Gesamtsystem Nutzfahrzeug erfolgt (5.2.1), bevor die potentiellen Einflüsse gesammelt (5.2.2) und daraus die relevanten Lasten abgeleitet werden (5.2.3).

5.2.1 Systemanalyse

Wird die NFZ-Bremse, wie in Abbildung 5.2 gezeigt, als Teil des Fahrzeuges betrachtet, wird ersichtlich, dass sie einer Vielzahl an Nutzraum-Parametern unterliegt. Sie wird in unterschiedlichen Fahrzeugmissionen und bei verschiedenen Fahrzeugkonfigurationen betrieben. Aber auch das Design des Bremssystems variiert, so werden beispielsweise Dauerbremsen nicht in jedem Fahrzeug eingesetzt und auch der Systemdruck variiert zwischen Trailer und Truck von 8,5-10 bar. Auch die Umwelteinflüsse und die gesetzlichen Rahmenbedingungen variieren im weltweiten Einsatz. Eine ausführliche Betrachtung einiger hier bereits vorweggenommenen Nutzraum-Parametern erfolgt in der Nutzraumanalyse im nächsten Unterkapitel.

Aufgrund der bereits in dieser Phase absehbaren Vielfältigkeit und Komplexität der verschiedenen Einsätze und Lasten werden Einschränkungen für die zu ermittelnden Lastkollektive getroffen. Zum einen wird die Betriebsfestigkeit der NFZ-Bremse als Zielsetzung für die Lastkollektivermittlung festgelegt. Zum anderen wird das Einsatzgebiet auf Europa beschränkt, um extreme Umgebungsbedingungen auszuschließen. Außerdem werden nur Bremsen für den Standardeinsatz in 22,5" Felgen betrachtet,

um Sondereinsätze und -fahrzeuge wie Minenfahrzeuge, die gesonderten Betriebs- und Wartungs-Regeln unterliegen, auszuschließen. Fokus der Lastkollektivermittlung bleibt sowohl die Scheiben- als auch die Trommelbremse. Deshalb erfolgt die Systemabgrenzung zwischen Scheiben- oder Trommelbremse und dem Nutzfahrzeug.

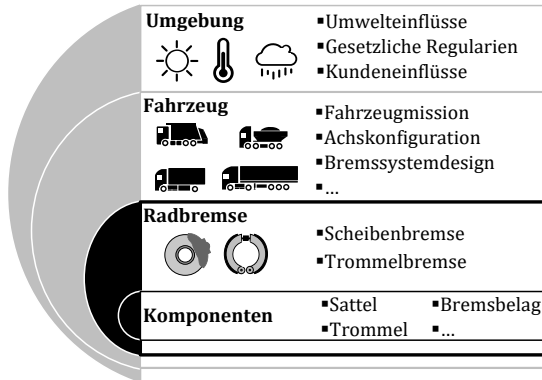


Abbildung 5.2: Die NFZ-Bremse als Teil von Fahrzeug und Umgebung

Für die Erstellung des Blockdiagramms der NFZ-Bremse wird zunächst die exakte Systemgrenze definiert. Hierbei muss festgelegt werden, ob die Bremszylinder und der Rotor innerhalb oder außerhalb der Systemgrenze liegen. Im Fall der Bremszylinder ist es sinnvoll, dass Sie innerhalb der Systemgrenze liegen, da die Signalgrößen Betriebs- und Parkbremsbetätigung als Input in das System erfasst werden können. Eine Messung der Zylinderkraft im Betrieb ist hingegen mit großen Aufwänden verbunden. Außerdem kann anhand der Zylinderkraft nicht zwischen Betriebs- und Parkbremsbetätigung unterschieden werden. Aus diesen Gründen liegen Betriebsbrems- und Parkbremszylinder, wie in Abbildung 5.3 dargestellt, innerhalb der Systemgrenze. Auch der Rotor liegt innerhalb der Systemgrenze. Über ihn kommt die kinetische Energie des Fahrzeuges in das System. Außerdem gibt die Dimensionierung von Reib- und Trommelradius das maximal erreichbare Bremsmoment vor. Innerhalb der Systemgrenze sind damit die NFZ-Bremse, die Bremszylinder und der Rotor. Über die Bremszylinder geht die Betriebs- oder Parkbremsbetätigung des Fahrers in Form eines Drucksignals in das System ein. Im Zylinder wird der Druckluftstrom in eine Zylinderkraft umgewandelt und erzeugt über die Hebel von Scheiben- oder Trommelbremse die Klemmkraft. Über den Rotor wird diese durch dessen Rotation in ein Bremsmoment umgewandelt. Durch die Reibung zwischen Rotor und Bremsbelägen

entstehen Abwärme, Bremsstaub, Vibrationen und Geräuschemission (NVH). Vibration tritt aufgrund der Straßenanregung in das System ein, genauso wie Umwelteinflüsse, denen das Fahrzeug und damit auch die Bremse ausgesetzt sind. Die funktionsbedingten Lasten Klemmkraft und Bremsmoment sind im Blockdiagramm als Doppelpfeile an der Systemgrenze dargestellt, da diese innerhalb und außerhalb des definierten Systems wirken. Damit ist das Blockdiagramm der NFZ-Bremse für die Lastkollektivermittlung ausreichend beschrieben. Eine detailliertere Beschreibung auf Komponentenebene ist im Fall des AK CV-Brakes nicht notwendig, da die zu bestimmenden Lastkollektive designunabhängig sein müssen, damit diese industrieweit angewendet werden können. Als nächstes folgt die Lastanalyse anhand der definierten Systemgrenze.

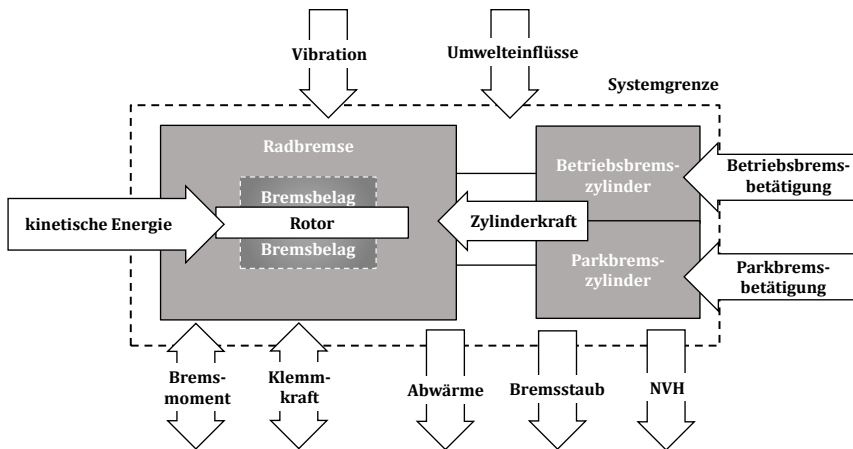


Abbildung 5.3: Blockdiagramm für die NFZ-Bremse

5.2.2 Lastanalyse

Ausgangslage für die Lastanalyse bildet das Blockdiagramm aus Abbildung 5.3 in der bereits die funktionsbedingten Lasten Klemmkraft und Bremsmoment aufgeführt sind. Ebenfalls aufgeführt ist die Vibration aus der Straßenanregung sowie umweltbedingte Lasten, die an der Systemgrenze angreifen. Die Zylinderkraft der Bremszylinder wird dabei als Größe zwischen dem Bremsdruck und der Klemmkraft betrachtet, die sich in Abhängigkeit der Zylindergröße ergibt. Wohingegen die funktionsbedingten Lasten mit der Klemmkraft und dem Bremsmoment bereits bekannt sind, ist von

den Umwelteinflüssen nichts bekannt, außer dass diese aufgrund der exponierten Position der NFZ-Bremse direkt auf diese einwirken können. Die Sammlung der Umwelt-Lasten erfolgt auf Basis der Norm EN 60721-1 [DIN97]. Dabei werden alle relevanten Umwelt-Lasten anhand der in der Norm vorgegebenen Last-Kategorien an der Systemgrenze gesammelt.

Die Sammlung der relevanten Umwelt-Lasten im AK CV-Brakes erfolgt dabei in Form einer Befragung der AK-Teilnehmer. Das Ergebnis dieser Befragung ist, dass zunächst alle in der Norm definierten Umwelt-Lasten weiter berücksichtigt werden müssen, da eine Auswirkung dieser Lasten, auch wenn sie gering ist, auf die NFZ-Bremse als möglich betrachtet wird. Die Separation der wichtigen von den unwichtigen Lasten erfolgt deshalb rein auf Basis des Paarweisen Vergleiches. Hierfür werden Umweltbedingungen wie z. B. der Aufprall von Fremdkörpern weiter detailliert, so dass unterschieden werden kann, ob die Last während der Fahrt oder der Wartung der Bremse in der Werkstatt auftritt. Somit ergibt sich für den nächsten Schritt des Paarweisen Vergleiches die in Tabelle 5.1 abgebildete Lastarten-Sammlung.

Tabelle 5.1: Lastarten-Sammlung für die NFZ-Bremse

Lastkategorie	Last
- Funktionsbedingte Lasten	- Klemmkraft - Bremsmoment
- Klimatische Umweltbedingungen - Biologische Umweltbedingungen - Chemisch aktive Stoffe - Mechanisch aktive Stoffe - Kontaminationsmittel - Mechanische Umweltbedingungen - Elektrische und elektromagnetische Beeinflussung	Alle in der Norm enthaltenen Umwelteinflüsse werden an dieser Stelle weiter berücksichtigt.

5.2.3 Bestimmung der relevanten Lasten

Nachdem die Sammlung der Umwelt-Lasten zu keiner Einschränkung der potentiellen Lastarten geführt hat, müssen die relevanten Lasten aus mehr als 50 Lasten ermittelt werden. Aufgrund dieser Anzahl an Lasten wird der Paarweise Vergleich zum einen auf der Ebene der Lastkategorien aus Tabelle 5.1 und zum anderen für alle Lasten in-

nerhalb der Lastkategorien durchgeführt. Dabei wird zunächst ermittelt, welche Lastkategorien relevanten sind und erst nach diesem Schritt erfolgt die Ermittlung der relevanten Lasten aus diesen Kategorien. Durch dieses Vorgehen wird ein wenig aussagekräftiges Ergebnis eines Paarweisen Vergleiches mit sehr vielen Parametern vermieden. Die Durchführung des Paarweisen Vergleiches erfolgt separat durch jeden AK-Teilnehmer, hinsichtlich der Fragestellung welche Last relevanter für die Betriebsfestigkeit der NFZ-Bremse ist. Die Ergebnisse werden anschließend zusammengefasst und normalisiert, um die verschiedenen Kategorien vergleichen zu können, da die relative Gewichtung von der Anzahl der zu vergleichenden Parameter abhängt.

Abbildung 5.4 zeigt das Ergebnis des Paarweisen Vergleiches für die Lastkategorien. Dieses zeigt, dass die funktionsbedingten Lasten mit über 90 % die höchste Bedeutung für die Lastkollektivermittlung besitzen. Des Weiteren sind mit über 70 % die mechanischen Einflüsse relevant für die Betriebsfestigkeit der NFZ-Bremse. Alle weiteren Lastkategorien erhalten deutlich niedrigere Bewertungen und daher wurde vom AK CV-Brakes entschieden, diese nicht weiter zu berücksichtigen.

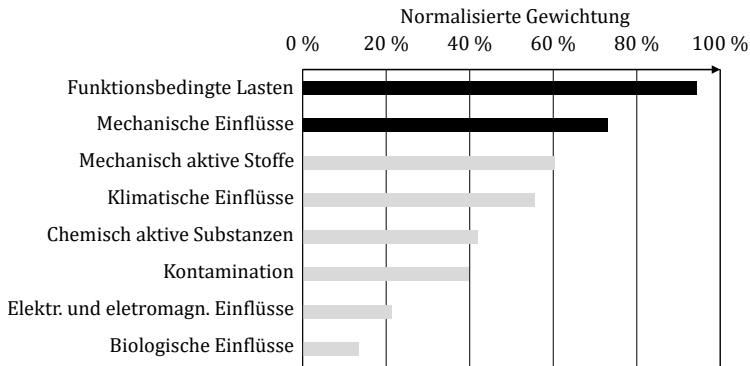


Abbildung 5.4: Paarweiser Vergleich der Lastkategorien

Dass die funktionsbedingten Lasten hoch bewertet werden, ist nicht überraschend, da die Klemmkraft und das Bremsmoment die relevanten Größen für die Dimensionierung der NFZ-Bremse sind. Die Lastkollektive von Klemmkraft und Bremsmoment beeinflussen maßgeblich Design und Gewicht der NFZ-Bremse und sind daher weiter zu berücksichtigen. Bei den Lasten in der Kategorie der mechanischen Einflüsse fällt diese Aussage nicht so leicht, weshalb hier der Paarweise Vergleich innerhalb dieser Lastkategorie herangezogen wird. Dieses Ergebnis ist in Abbildung 5.5 dargestellt. Dabei wird ersichtlich, dass die Lastkategorie der mechanischen Einflüsse aufgrund der

Vibrationsanregung durch die Straße so hoch bewertet ist. Mit einem normalisierten Gewicht von über 90 % ist die Vibration mit deutlichem Abstand vor dem Aufprall von Fremdkörpern während der Fahrt platziert. Da sich ein Aufprall von Fremdkörpern an der Bremse grundsätzlich nicht messen bzw. per Lastkollektiv beschreiben lässt und alle weiteren Lasten eine geringe Bedeutung besitzen, ist die Vibration die einzige Last aus der Kategorie mechanische Einflussgrößen, die weiter betrachtet wird.

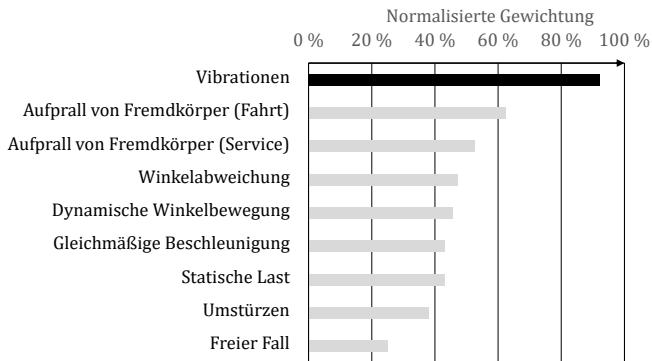


Abbildung 5.5: Paarweiser Vergleich der mechanischen Einflüsse

Bei der Betrachtung der Vibration wird deutlich, dass diese nicht nur für die Betriebsfestigkeit, sondern vielmehr für die Funktion der Nachstelleinheit der NFZ-Bremse von Bedeutung ist. So wirken sich die Lastkollektive für Bremsmoment und Klemmkraft stärker auf das Gewicht der Bremse aus, als die Vibrationsanregung. Gleichzeitig stellt sich bei diesen Betrachtungen der Aufwand für die Ermittlung repräsentativer Vibrationslastkollektive als hoch heraus. Der Aufwand wird vom AK CV-Brakes so groß eingeschätzt, dass dieser innerhalb drei Jahren nicht parallel zur Ermittlung der Lasten Klemmkraft und Bremsmoment aufgebracht werden konnte. Aus diesem Grund wurde der Fokus zunächst auf die Lasten Klemmkraft und Bremsmoment gelegt und die Vibrationsbelastung als Ausblick für eine Verlängerung des AK CV-Brakes definiert.

5.3 Nutzraumanalyse

Ziel der Nutzraumanalyse für die NFZ-Bremse ist die Ermittlung des relevanten Nutzraumes für die Ermittlung repräsentativer Lastkollektive für die Klemmkraft und das

Bremsmoment. Hierfür erfolgt zu Beginn die Ermittlung der Nutzraum-Parameter der NFZ-Bremse in der Einsatzartensammlung (5.3.1). Anschließend werden Einsatzarten, die als potentieller Missbrauchsfall betrachtet werden, bewertet und die weitere Berücksichtigung dieser Fälle festgelegt (5.3.2). Abschließend wird der relevante Nutzraum der NFZ-Bremse für Klemmkraft und Bremsmoment ermittelt (5.3.3).

5.3.1 Einsatzartensammlung

Die Einsatzartensammlung für die NFZ-Bremse wird durchgeführt indem alle Nutzraum-Parameter und deren Stufen für das Gesamtsystem, die Umgebung und den Kunden ermittelt werden. Die gesammelten Parameter sind in Tabelle 5.2 aufgelistet und werden nachfolgend beginnend mit dem Gesamtsystem diskutiert. Das Gesamtsystem entspricht bei der NFZ-Bremse dem Nutzfahrzeug, das in Abhängigkeit des Fahrzeugtyps verschiedene Missionen erfüllt. Dazu gehören Fern-, Distributions-, Baustellenverkehr, kommunaler Verkehr und Stadtbusse. Außerdem wird hier berücksichtigt, ob es sich beim Fahrzeug um einen Truck oder einen Trailer handelt. Die Parameter Gesamtgewicht, Beladung und nominale Achslast beeinflussen das tatsächlich erzeugbare Moment, genauso wie die Rad- oder die Zylindergröße. Retarder und Zylindertyp wirken sich direkt auf die Last an der NFZ-Bremse aus. So übernehmen Dauerbremsen die Anteile des Bremsmoments für Anpassungsbremungen.

Tabelle 5.2: Sammlung der Nutzraum-Parameter für die NFZ-Bremse

Gesamtsystem	Umgebung	Kunde
- Fahrzeugtyp	- Region	- Typ
- Gesamtgewicht	- Klimatische Bedingungen	- Erfahrung
- Beladung	- Straßentypen	- Fahrmanöver
- Achszahl	- Verkehrsdichte	
- Nominale Achslast	- Straßenoberfläche	
- Radgröße	- Straßenqualität	
- Motorleistung	- Topographie	
- Retarder		
- Elektronisches Bremsystem		
- Systemdruck		
- Bremstyp		
- Einbaulage		
- Zylindertyp		
- Zylindergröße		

Der Tristop-Zylinder der NFZ-Bremse verursacht den für die Auslegung relevanten Lastfall der Überlast. Auch Achszahl, Motorleistung, Systemdruck und Bremsentyp wirken sich auf die Lasten an der NFZ-Bremse aus. Außerdem lassen sich aus ihnen Einsatzarten und Fahrzeugtypen ableiten. Weitere Gesamtsystem-Parameter sind das Elektronische Bremssystem (EBS) und die Einbaulage der Bremse, beispielsweise 9, 12 oder 3 Uhr. Nutzraum-Parameter, die den Einfluss der Umgebung auf die NFZ-Bremse beschreiben sind die Region, ihre Topographie und ihre klimatischen Bedingungen. Außerdem werden in den Straßentypen Stadt, Land, Autobahn und Offroad neben der Verkehrsdichte die relevanten Einsatzparameter einer Fahrzeugmission beschrieben. Weiterer Umgebungs-Parameter ist die Straßenoberfläche in Form von Beton oder Asphalt sowie die Qualität dieser Straßen. Der Kunde, der das Nutzfahrzeug steuert, kann beschrieben werden als Kundentyp mit den Stufen aggressiv, normal oder schonend. Eine weitere Beschreibung für den Kunden ist die Erfahrung des Fahrers worunter z. B. ein professioneller LKW-Fahrer oder auch der unerfahrene Gelegenheitsfahrer fällt. Außerdem lässt sich der Kunde über die Fahrmanöver und deren Anteil beschreiben. Da sich diese Beschreibungen hinsichtlich des Fahrers deutlich überschneiden wird im Folgenden der Kunden-Parameter zum Fahrer zusammengefasst.

5.3.2 Umgang mit Missbrauch

In der Sammlung der Nutzraum-Parameter wurden Einsätze erfasst, bei denen sich die Frage stellt ob es sich noch um den bestimmungsgemäßen Gebrauch der NFZ-Bremse handelt. Diese Einsätze sind als potentielle Missbrauchsfälle in Tabelle 5.3 aufgelistet und werden nachfolgend anhand des entwickelten Leitfadens aus Abbildung 4.12 dem bestimmungsgemäßen Gebrauch, dem Sondergebrauch und dem Missbrauch zugeordnet, woraus sich der weitere Umgang mit diesen Einsatzarten ableitet. Zum potentiellen Missbrauch durch den Kunden gehört die Überladung des Fahrzeuges, das Ignorieren der Bremsbelag-Verschleißgrenze, der nicht über Luftdruck- oder Signalleitung mit dem Zugfahrzeug verbundene Trailer, der deaktivierte Retarder, der aggressive Fahrer sowie der Fahrer der das Bremspedal als Sportgerät für das Beintaining missbraucht. Ein recht populärer Fall des Missbrauchs durch den Kunden ist der sogenannte „Schneerüttler“, bei dem der Fahrer sein Fahrzeug durch schnelles Anfahren gefolgt von scharfem Abbremsen vom Schnee befreit. Ein ähnlicher Fall liegt bei Baustellenfahrzeugen vor, wenn die Fahrer festgesetztes Schüttgut mit demselben Fahrmanöver aus der Mulde schütteln. Es sind aber auch potentielle Missbrauchsfälle, die auf die technische Funktion oder Fehlfunktion vom Bremssystem zurückzuführen sind erfasst: der Überlastfall, Überdruck im Bremssystem und die Hilfsbremsfunktion

der Parkbremse. Der Überlastfall ist definiert als der Zustand, bei dem die die Feststellbremsbetätigung (FBA) durch die Betriebsbremsbetätigung (BBA) überlagert wird. Dies führt zu einer deutlich überhöhten Klemmkraft.

Tabelle 5.3: Potentielle Missbrauchsfälle für die NFZ-Bremse

- Überladung	- Deaktivierter Retarder
- Ignorieren der Bremsbelag-Verschleißgrenze	- Aggressiver Fahrer
- Milchsammler-Einsatz	- Beintraining durch Bremspedalbetätigung
- Schnee-/ Schüttgutrüttler	- Überlast (BBA+FBA)
- Keine Luftdruck- oder Signalverbindung zwischen Truck und Trailer	- Überdruck in Bremssystem
	- Parkbremse als Hilfsbremsanlage

Das Ergebnis der Klassierung durch den Leitfaden aus Abbildung 4.12 ist in Tabelle 5.4 abgebildet und wird nachfolgend erläutert. Der deaktivierter Retarder gehört nicht zum Missbrauch, da die Ausstattung mit einem Retarder nicht für alle Fahrzeuge standardmäßig erfolgt. Folglich ist der deaktivierter Retarder normaler Gebrauch. Der Überlastfall durch die Überlagerung von Betriebsbrems- und Federspeicherzylinder wird ebenfalls als normaler Gebrauch festgelegt, da eine Überlast zumeist in den Bremssystemen der Trucks nicht verhindert wird. Eine Ausnahme dabei sind Trailer, da hier der Überlastfall aufgrund der Bremssystemarchitektur nicht auftritt. Auch bei der Benutzung der Parkbremse als Hilfsbremsanlage handelt es sich um bestimmungsgemäßen Gebrauch, da der Gesetzgeber diesen vorschreibt. Für den Fall des überladenen Fahrzeuges liegt grundsätzlich nicht bestimmungsgemäßer Gebrauch vor, der anhand der Fahrzeugdaten auch nachgewiesen werden kann. Im AK CV-Brakes wird jedoch festgelegt, dass eine Überladung bis 10 % noch als Sondergebrauch toleriert wird wohingegen eine Überladung größer 10 % einen Missbrauch darstellt, den die NFZ-Bremse nicht mehr abdecken muss. Der extreme Einsatz des Milchsammlers wird als bestimmungsgemäßer Gebrauch betrachtet. Aufgrund der hohen Belastung der Bremse dieses Einsatzes und die gleichzeitig vergleichsweise wenigen Fahrzeuge wird dieser Einsatz als Sondergebrauch festgelegt. Ebenfalls als Sondergebrauch wird der Schnee-/ Schüttgutrüttler klassiert, auch wenn es sich nicht um bestimmungsgemäßen Gebrauch handelt, wird er doch toleriert. Der aggressive Fahrer benutzt die NFZ-Bremse entsprechend des bestimmungsgemäßen Gebrauches, gehört aber aufgrund seiner Fahrweise mit den zu erwartenden scharfen Bremsungen und damit hohen Klemmkraften und Bremsmomenten zum Sondergebrauch. Das Ignorieren der Bremsbelag-Verschleißgrenze, die fehlende Signalübertragung

zwischen Zugfahrzeug und Trailer, das Beintraining und der Überdruck im Bremssystem gehören zum nicht bestimmungsgemäßen Gebrauch. Außerdem werden diese Fälle auch nicht toleriert und können mit Hilfe der modernen Steuerungsgeräte in den Bremssystemen nachgewiesen werden, weshalb sie dem Missbrauch zugeordnet werden.

Tabelle 5.4: Klassifizierung der potentiellen Missbrauchsfälle für die NFZ-Bremse

Normaler Gebrauch	Sondergebrauch	Missbrauch
<ul style="list-style-type: none"> - Deaktivierter Retarder - Überlast (BBA+FBA) - Parkbremse als Hilfsbremsanlage 	<ul style="list-style-type: none"> - Überladung bis 10 % - Milchsammler-Einsatz - Schnee- / Schüttgutrüttler - Aggressiver Fahrer 	<ul style="list-style-type: none"> - Überladung größer 10 % - Ignorierung der Bremsbelag-Verschleißgrenze - Keine Luftdruck- oder Signalverbindung zwischen Truck und Trailer - Beintraining durch Bremspedalbetätigung - Überdruck in Bremssystem

Für den weiteren Umgang mit den Gebrauchsfällen aus Tabelle 5.4 gilt das Missbrauch vernachlässigt wird und in den vorhandenen Datensätzen identifiziert und entfernt werden muss. Normaler Gebrauch und Sondergebrauch bleiben hingegen Teil des relevanten Nutzraumes.

5.3.3 Ermittlung des relevanten Nutzraums

Ein vollumfänglicher Nutzraum, wie er sich aus den aufgelisteten Parametern in Tabelle 5.2 ergibt, ist nicht nur extrem aufwendig mit Messfahrten abzudecken, sondern beinhaltet auch Parameter, die auf die relevanten Lasten der NFZ-Bremse keinen Einfluss haben. Aus diesem Grund wird eine qualitative Bewertung der Nutzraum-Parameter hinsichtlich ihres Effektes auf die zu ermittelnden Klemmkraft- und Bremsmomentkollektive durchgeführt. Hierfür wird die Entscheidungsmatrix von der ein Ausschnitt in Abbildung 5.6 zu sehen ist verwendet und von jedem Teilnehmer des AK CV-Brakes wird eine separate Bewertung durchgeführt. Die Bewertung erfolgt mit einer Skala von 1 bis 5, wobei 1 für einen sehr geringen Effekt auf das Lastkollektiv steht und 5 für einen sehr großen Effekt. Diese Bewertung wird für jedes Lastkollektiv se-

parat angewendet. Das Gesamtranking ergibt sich dann zu gleichen Teilen aus den Bewertungen der Lastkollektive. Die Ergebnisse aller AK-Teilnehmer werden anschließend zum Gesamtergebnis des AK CV-Brakes zusammengefasst.

**Entscheidungsmatrix:
Relevanz der
Nutzraum-Parameter**

		Lastkollektiv			
		Klemmkraft	Bremsmoment		
		0,50	0,50	R	Rang
1	Fahrzeugtyp				
2	Gesamtgewicht				
3	Beladung				
4	Achszahl				
5	...				

Sehr hoch	5	Sehr hoher Effekt auf Lastkollektiv...
Hoch	4	Hoher Effekt auf das Lastkollektiv...
Mittel	3	Mittlerer Effekt auf das Lastkollektiv...
Gering	2	Geringer Effekt auf das Lastkollektiv...
Sehr gering	1	Sehr geringer Effekt auf das Lastkollektiv...

Abbildung 5.6: Entscheidungsmatrix für die Nutzraum-Parameter

Das Ergebnis der Entscheidungsmatrix des AK CV-Brakes ist in Abbildung 5.7 zusammengefasst dargestellt. Aufgetragen ist die qualitative Effekthöhe über den Nutzraum-Parametern, die bereits in absteigender Effekthöhe von links nach rechts sortiert sind. Das Ergebnis zeigt, dass es zwölf Parameter gibt, die einen mittleren bis sehr hohen Effekt auf die Lastkollektive haben. Die zehn Parameter die unterhalb eines mittleren Effektes liegen werden aufgrund des geringen Effektes im Folgenden aus dem Nutzparameterraum gestrichen. Dies bedeutet nicht, dass sie in einer Felddatenerfassung nicht vorhanden sein werden, sie werden allerdings nicht explizit gefordert. So ist z. B. klar, dass die Lastkollektive in der Region Europa ermittelt werden müssen und das dabei verschiedene klimatische Bedingungen vorliegen. Die Unterschiede und die Auswirkung auf die relevanten Lasten innerhalb von Europa werden allerdings als gering bewertet. Dasselbe gilt für die Straßentypen und die Straßenqualität in Europa. Motorleistung und Einbaulage der Bremse wirken sich auf den Verzögerungswunsch des Fahrers und damit auf die Last an der NFZ-Bremse ebenfalls gering aus. Dasselbe gilt für den Bremsentyp. Den Fahrer interessiert nicht, welche Bremse verbaut ist, er fordert nur die gewünschte Verzögerung des Fahrzeuges. Die Anzahl der Achsen ist vom Gesamtgewicht des Fahrzeuges abhängig, was wiederum zur Folge hat, dass dadurch keinesfalls eine höhere Bremsenbelastung bei geringerer Achszahl zu erwarten ist. Die Effekthöhe der Radgröße und des Elektronischen Bremssystems (EBS) wird als gering bis mittel eingeschätzt. Eine Variation dieser Parameter ist implizit in

Betriebsdaten oder Messungen verschiedener Fahrzeuge vorhanden und wird daher nicht explizit in den Nutzraum aufgenommen.

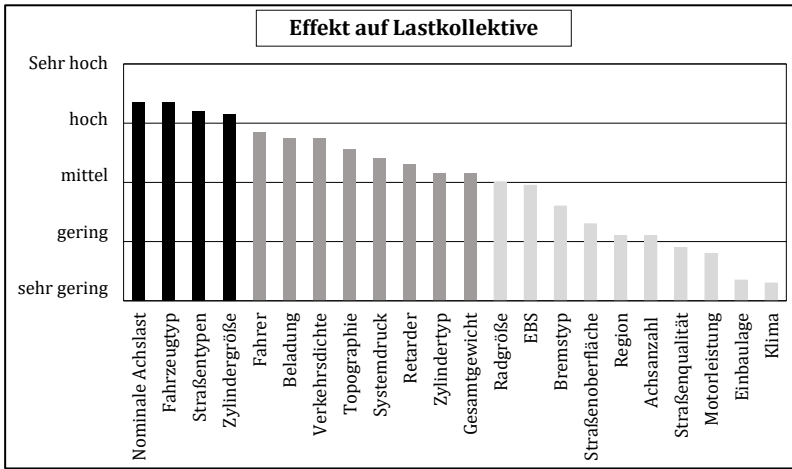


Abbildung 5.7: Ranking der Nutzraum-Parameter für Klemmkraft und Bremsmoment

Von den als hoch bis sehr hoch eingeschätzten Parametern fällt auf, dass mit der nominalen Achslast, der Beladung und dem Gesamtgewicht drei Parameter vorhanden sind, die die Auswirkung des Gewichtes auf das Bremsmoment und damit auch die Klemmkraft beschreiben. Für eine einheitliche Beschreibung werden diese Parameter daher unter dem Gesamtgewicht zusammengefasst. Dabei muss berücksichtigt werden, dass nur eine Überladung von 10 % bezogen auf das zulässige Gesamtgewicht im Nutzraum berücksichtigt wird. Ein weiterer explizit zu berücksichtigender Parameter ist der Fahrzeugtyp, wobei hier im Folgenden die Bezeichnung Fahrzeugmission weiterverwendet wird. Diese lässt sich in die folgenden Missionen aufteilen: Fern-, Distributions-, Baustellenverkehr, kommunaler Verkehr, Stadtbuss und Trailer. In diesen bereits implizit enthalten sind die Straßentypen Autobahn, Stadt, Landstraße oder auch Offroad, genauso wie verschiedene Verkehrsdichten und Topographien. Die Zylindergröße, die sich in Abhängigkeit des Drucks direkt auf die Klemmkraft auswirkt, ist ebenfalls zu erfassen, wie der verbaute Zylindertyp. Dieser gibt vor, ob die NFZ-Bremse auch die Parkbremsfunktion realisiert und ob der Überlastfall möglich ist. Der maximale Systemdruck, der die maximale Klemmkraft erzeugt, ist für den Trailer und den Truck unterschiedlich, weshalb auch dieser Parameter für die Lastkollektivermittlung berücksichtigt werden muss. Außerdem ist der Fahrereinfluss genauso vom

Nutzraum abzudecken, wie der Einfluss des Retarders. Hierfür ist es wichtig Fahrzeuge mit und ohne Retarder zu erfassen, dass auch der Sondergebrauch der deaktivierten Dauerbremse abgedeckt ist. Eine Übersicht über den relevanten Nutzraum der NFZ-Bremse ist der nachfolgenden Tabelle 5.5 zu entnehmen.

Tabelle 5.5: Relevanter Nutzraum der NFZ-Bremse

Nutzraum-Parameter	Parameterstufen	
- Fahrzeugmission	- Fernverkehr - Distributionsverkehr - Baustellenverkehr	- Kommunalen Verkehr - Stadtbus - Trailer
- Straßentypen	- Stadt - Landstraße	- Autobahn - Offroad
- Gesamtgewicht	- Leergewicht bis 110 % zulässiges Gesamtgewicht	
- Topographie	- Flach bis bergig	
- Fahrer	- Schonend bis aggressiv	
- Verkehrsdichte	- Niedrig bis hoch	
- Retarder	- Vorhanden oder nicht vorhanden	
- Zylindergröße	- 17" – 24"	
- Zylindertyp	- Betriebsbremszylinder - Betriebsbremszylinder mit Federspeicher	
- Systemdruck	- Truck: 10 bar - Trailer: 8,5 bar	

5.4 Zielsetzung und Datenspezifikation

Nachdem die relevanten Lasten und der relevante Nutzraum ermittelt sind, wird in dieser Phase die detaillierte Zielsetzung festgelegt (5.4.1). Anhand dieser erfolgt die Auswahl der Datengrundlage (5.4.2) und die Datenspezifikation (5.4.3).

5.4.1 Zielsetzung der Lastkollektivermittlung

Als Ziel für die Lastkollektivermittlung der NFZ-Bremse hat der AK CV-Brakes anwendungsspezifische Lastkollektive festgelegt, die designunabhängig 99 % aller Einsätze der im relevanten Nutzraum festgelegten Fahrzeugmissionen: Fernverkehr, Distributionsverkehr, Baustellenverkehr, Kommunaler Verkehr und Stadtbus abdecken. Die Lastkollektive sollen aus Fahrzeugdaten der Region Europa ermittelt werden und entsprechend ihrer Mission einen repräsentativen Straßentypenmix darstellen. Dabei muss allerdings zwischen Truck und Trailer und Hinter- sowie Vorderachse differenziert werden. Außerdem muss hinsichtlich des Bremssystems differenziert werden, ob eine NFZ-Bremse mit einem Betriebsbrems- oder einem Tristop-Zylinder mit Parkbremse ausgestattet ist und ob der Überlastfall relevant ist. Diese Differenzierung des technischen Aufbaus des Bremssystems ist nur möglich indem separate Basiskollektive für die Betriebs- und Parkbremse sowie für den Überlastfall ermittelt werden. Diese Spezifikation erfolgt ausführlich in Absatz 5.4.3. Zuvor wird die Datengrundlage für die Lastkollektivermittlung festgelegt.

5.4.2 Auswahl der Datengrundlage

Um eine möglichst vollständige Abdeckung des Nutzraumes zu erreichen, wird auf Betriebsdaten der AK-Teilnehmer zurückgegriffen. Auf Basis der Betriebsdaten werden die Lastkollektive für die zuvor definierten Fahrzeugmissionen abgeleitet. Damit sind auch die Nutzraum-Parameter: Gesamtgewicht, Retarder, Straßentyp, Topographie, Fahrer, Verkehrsdichte, etc. repräsentativ für das Feld abgedeckt. Dadurch ist eine aufwendige Messkampagne, in denen diese Parameter variiert werden müssten nicht notwendig. Allerdings ist eine kleine Messkampagne notwendig, um die Güte der Betriebsdaten zu validieren.

5.4.3 Datenspezifikation

Aus der Zielsetzung der Lastkollektivermittlung ergibt sich, dass Betriebsdaten aus Nutzfahrzeugen und Trailern für den Fernverkehr, Distributionsverkehr, Baustellenverkehr, Kommunaler Verkehr und Stadtbusse benötigt werden. Die dabei zu erfassenden Messgrößen werden ausgehend vom Bremswunsch des Fahrers anhand der physikalischen Kette bis hin zu Klemmkraft und Bremsmoment beschrieben. Daraus lässt sich eine Übertragungsfunktion zwischen den vorhandenen Messgrößen, Randbedingungen und den Ziel-Lasten ermitteln.

Der Fahrer fordert von der Bremse in Form der Betriebsbremsbetätigung eine Fahrzeugverzögerung oder ein Fahrzeughalten ein. Die Betriebsbremsbetätigung wird entsprechend der Bremspedalbetätigung in einen Betriebsbremsdruck umgewandelt mit dem der Betriebsbremszylinder beaufschlagt wird. In Abhängigkeit der Zylinderfläche A_{Zyl} , wird die Zylinderkraft erzeugt, die an die NFZ-Bremse weitergegeben wird. Die Parkbremsbetätigung erfolgt entweder beim Halten in der Steigung oder beim Parken des Fahrzeuges. Im Fall der Parkbremsbetätigung erfolgt die Signalübertragung ebenfalls mit einem Drucksignal. Der Druckkreislauf der Parkbremse wird entlüftet, wenn die Parkbremse eingelegt wird. Durch das Entlüften erzeugt die Feder im Parkbremszylinder die Parkbremszylinderkraft und gibt sie an die NFZ-Bremse weiter. In der NFZ-Bremse werden Betriebsbremszylinderkraft und Parkbremszylinderkraft über einen Hebel mit dem Verhältnis i übersetzt. Die daraus resultierende Klemmkraft verringert sich allerdings um den mechanischen Wirkungsgrad NFZ-Bremse η_{mech} . Treten Betriebsbrems- und Parkbremsbetätigung gleichzeitig auf, kommt es zur Überlagerung der beiden Zylinderkräfte, was zu einer deutlich erhöhten Zylinderkraft führt. Dieser sogenannte Überlastfall kann durch konstruktive Maßnahmen im Bremssystem vermieden werden, beispielsweise über die Verwendung von Anti-Compound-Ventilen. Im Trailer ist dieser Fall bereits aus technischer Sicht verhindert, da hier bei einer Parkbremsbetätigung der Betriebsbremszylinder mit Druck beaufschlagt wird, was den Überlastfall unmöglich macht. Die in diesem Absatz beschriebene Übertragungsfunktion von der Bremsbetätigung zur Klemmkraft ist in Abbildung 5.8 schematisch zusammengefasst.

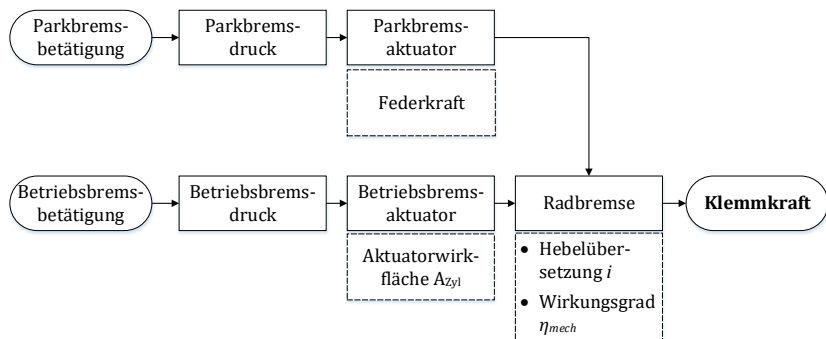


Abbildung 5.8: Übertragungsfunktion von Bremsbetätigung zu Klemmkraft

Ausgehend von der Klemmkraft wird die physikalische Kette zum Bremsmoment weiter betrachtet und in Abbildung 5.9 zusammengefasst. Wirkt eine Klemmkraft auf Trommel oder Scheibe, muss zunächst unterschieden werden, ob das Fahrzeug steht

oder sich bewegt. Im Fall eines stehenden Fahrzeuges hängt das Bremsmoment nicht von der wirkenden Klemmkraft ab, sondern nur von Straßenneigung, dem Fahrzeuggewicht, dessen Schwerpunkt sowie dem Reifenradius. Befindet sich das Fahrzeug im Fahrzustand lässt sich über den Betrag der Klemmkraft, den Bremsenkennwert C^* und den wirksamen Reibradius r_{eff} das Bremsmoment berechnen. Dabei muss allerdings die Fahrtrichtung des Fahrzeuges bekannt sein, um auch die Richtung des wirkenden Bremsmomentes zu berücksichtigen.

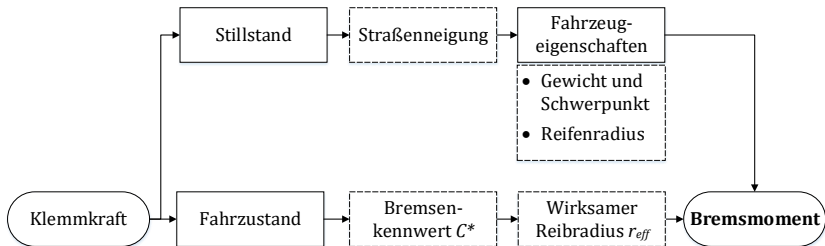


Abbildung 5.9: Übertragungsfunktion von Klemmkraft zu Bremsmoment

Wie aus den Übertragungsfunktionen in Abbildung 5.8 und Abbildung 5.9 ersichtlich wird, ist der Betriebsbremsdruck und die Parkbremsbetätigung geeignet, um auf Klemmkraft und Bremsmoment zu schließen. Für die Zylinderkraftberechnung ist hierfür allerdings Kenntnis über die Betriebsbremszylindergröße und die Federkraft der Parkbremszylinder nötig. Die Klemmkraft ergibt sich dann aus der Zylinderkraft, der Hebelübersetzung und dem Wirkungsgrad der NFZ-Bremse. Da die Federkraft der Parkbremse je nach verbautem Zylinder individuell angepasst werden kann, reicht hier als Messgröße die Häufigkeit der Parkbremsbetätigungen aus. Hebelübersetzung und Wirkungsgrad können für die Klemmkraftberechnung entsprechend des Bremsendesigns angenommen werden, genauso wie der Bremsenkennwert und der wirksame Reibradius für die Bremsmomentberechnung. Hier muss allerdings die Fahrtrichtung als Messgröße erfasst werden. Das aus der Hangabtriebskraft resultierende Bremsmoment beim Parken, lässt sich aufgrund der notwendigen Straßenneigung nicht berechnen, da eine Messung im Betrieb nicht stattfindet. Hier kann nur über Annahmen das Bremsmoment für das Parken bestimmt werden. Da dieser Lastfall im Vergleich zu den Bremsmomenten im Fahrzustand wesentlich geringere Bremsmomente erzeugt, hat der AK CV-Brakes beschlossen, das Parken am Hang komplett zu vernachlässigen. Nicht vernachlässigt werden kann jedoch der Überlastfall weshalb in den Messdaten erfasst werden muss, wann Betriebsbrems- und Parkbremsbetätigung simultan und bei welchem Betriebsbremsdruck erfolgen.

Ein Lastfall den Betriebsbremsdruck und Parkbremsbetätigung nicht abbilden können, ist der Knockback. Der Knockback-Lastfall tritt auf, wenn ein Fahrzeug scharf bis zum Stillstand abbremst und der Fahrer bei Fahrzeugstillstand die Bremse weiter betätigt. In diesem Fall neigt sich die Fahrzeugkarosse während des Bremsvorgangs erst in Fahrrichtung in die Federung. Ist der Stillstand erreicht federt die Karosse mit samt ihrer Masse entgegen der vorherigen Fahrtrichtung zurück. Dabei kehrt sich die Richtung des Bremsmomentes aufgrund der relativen Massebewegung der Fahrzeugkarosse um. Der dabei entstehende Schwingvorgang und das damit verbundene Bremsmoment wurde im AK CV-Brakes in einer Versuchsmessung erfasst, siehe Abbildung 5.10. In dieser wird ersichtlich, dass der Knockback eine um den Faktor zwei erhöhte Bremsmomentamplitude zur Folge haben kann. Dieser Lastfall ist allerdings im Betrieb nicht zu erfassen, weshalb der AK CV-Brakes diesen Lastfall zwar in seiner technischen Empfehlung als zu berücksichtigen beschreibt, ihn jedoch nicht in Häufigkeit und Lasthöhe beschreiben kann.

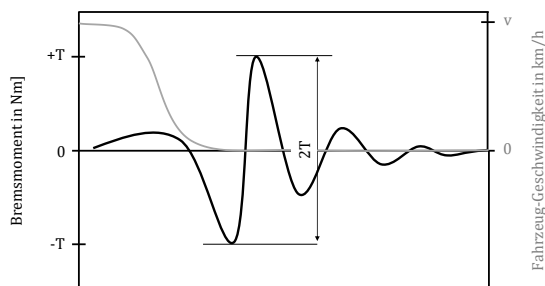


Abbildung 5.10: Qualitative Darstellung des Knockback-Lastfalls

Um die in Absatz 5.4.1 definierte Zielsetzung für die Lastkollektivermittlung mit der Notwendigkeit zwischen den technischen Unterschieden in den Bremssystemen differenzieren zu können, lässt sich nur durch modular superpositionierbare Lastkollektive erfüllen. Dafür müssen bereits hier in der Datenspezifikation die notwendigen Messgrößen für die Ermittlung dieser Basiskollektive festgelegt werden. Aus diesem Grund muss zunächst festgelegt werden, welche Basiskollektive wie zu den Lastkollektiven von Klemmkraft und Bremsmoment zu kombinieren sind. Hierbei helfen die bereits diskutierten Übertragungsfunktionen für die NFZ-Bremse anhand derer die Leitfäden in Abbildung 5.11 entwickelt wurden. Sie gelten in Abhängigkeit von Fahrzeugmission und Achse.

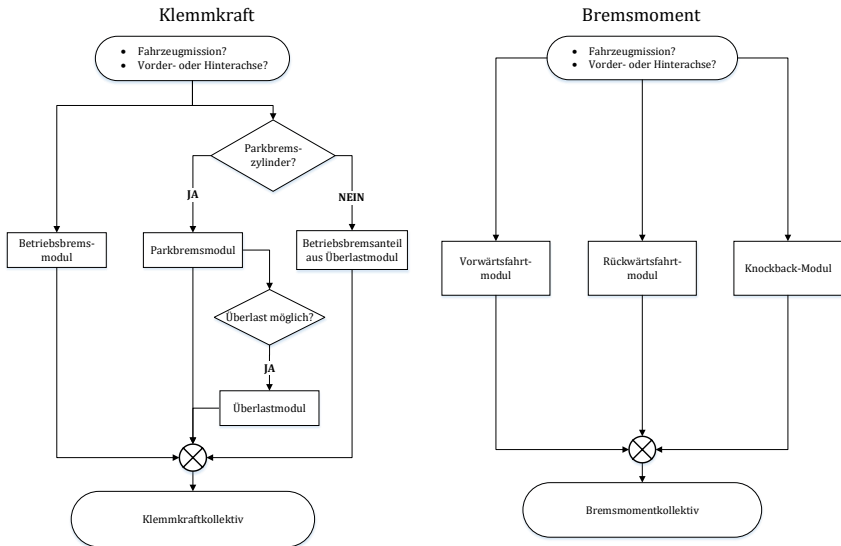


Abbildung 5.11: Leitfäden zur Superpositionierung der Basiskollektive

Für die Klemmkraft ist der Fahrzustand irrelevant, weshalb hier die Betriebsbremsbetätigungen, bis auf diese bei denen die Parkbremse betätigt ist, zusammengefasst werden können. Dieses Modul wird als Betriebsbremsmodul bezeichnet. Für die Parkbremsfunktion ist ein separates Parkbremsmodul notwendig, da der Parkbremszylinder nicht an jeder NFZ-Bremse verbaut ist. Außerdem muss der Anteil an Betriebsbremsungen, während die Parkbremse eingelegt ist, erfasst werden. Dieses Modul geht bei vorhandenem Parkbremszylinder zusammen mit dem Parkbremsanteil als Überlastmodul in die Superpositionierung ein, außer der Überlastfall wird technisch verhindert. Besitzt die NFZ-Bremse keinen Parkbremszylinder, muss der Betriebsbremsanteil des Überlastmoduls zusätzlich berücksichtigt werden. Für das Bremsmoment müssen die Betriebsbremsungen bei Vorwärts- und Rückwärtsfahrt erfasst und anschließend zusammen mit dem Knockback-Modul superpositioniert werden.

Zusammenfassend lässt sich die Datenanforderung nach Basiskollektiven, Messgrößen und Randbedingungen, wie in Tabelle 5.6 dargestellt, einteilen. Erforderlich sind die Basiskollektive: Betriebsbremsmodul, Vorwärtsfahrtmodul, Rückwärtsfahrtmodul, Parkbremsmodul, und Überlastmodul zu ermitteln. Hierfür werden entsprechend der Übertragungsfunktionen die Messgrößen: Betriebsbremsdruck, Parkbremsbetätigung, Fahrzustand und Fahrtrichtung benötigt. Der Betriebsbremsdruck

ist dabei separat für Vorder- und Hinterachse erforderlich. Notwendige Randbedingungen sind Zylindergröße, Radformel, Durchschnittsgeschwindigkeit und Fahrzeuggewicht. Wohingegen die Zylindergröße notwendig ist um die Klemmkraft umzurechnen, sind die Radformel und die Durchschnittsgeschwindigkeit notwendiger Input für die Klassierung der Fahrzeugmissionen. Das Fahrzeuggewicht wird benötigt um überladene Fahrzeuge auszuschließen. Außerdem ist eine Zeitgröße erforderlich, die erfasst wie lange das Fahrzeug mit der Bremse bereits im Feld ist. Hierfür eignen sich Betriebsstunden, Laufleistung in Kilometer oder die Zeit die vergangen ist seitdem der Kunde das Fahrzeug in Betrieb genommen hat. Zusammengefasst ergeben die Datenanforderung aus Tabelle 5.6 und der relevante Nutzraum aus Tabelle 5.5 die notwendige Datenspezifikation für die Lastkollektivermittlung der NFZ-Bremse.

Tabelle 5.6: Datenanforderung für relevanten Nutzraum

Basiskollektive	Messgrößen	Randbedingungen
- Betriebsbremsmodul	- Betriebsbremsdruck – Vorderachse	- Zylindergröße
- Vorwärtsfahrtmodul	- Betriebsbremsdruck – Hinterachse	- Radformel
- Rückwärtsfahrtmodul	- Parkbremsbetätigungen	- Durchschnittsgeschwindigkeit
- Parkbremsmodul	- Fahrzustand	- Fahrzeuggewicht
- Überlastmodul	- Fahrtrichtung	- Zeitgröße

5.5 Repräsentative Lastkollektivermittlung

In der vierten und letzten Phase der Methodik werden die repräsentativen Lastkollektive für die NFZ-Bremse aus den Betriebsdaten abgeleitet. Dafür wird die vorhandene Datenbasis zunächst überprüft und für die nachfolgenden Schritte aufbereitet (5.5.1). Anschließend erfolgt die Klassifikation der Datensätze zu den relevanten Anwendungsfällen (5.5.2). Abschließend werden die repräsentativen Basiskollektive ermittelt und validiert (5.5.3).

5.5.1 Datenaufbereitung

Die zur Verfügung stehende Datenbasis für die Lastkollektivvermittlung lässt sich in Betriebsdaten und Messdaten unterteilen. Betriebsdaten und Messdaten gleichermaßen stammen aus dem realen Kundeneinsatz im Feld. Für die Erfassung der Messdaten wurden ca. 30 Kundenfahrzeuge mit Messsystemen ausgestattet und über einen begrenzten Zeitraum vom Kunden betrieben. Aus den Betriebsdaten wiederum liegen ca. 100 000 Nutzfahrzeuge vor, bei denen die Park- und Fußbremsbetätigung aufgezeichnet wurden. Hieraus lässt sich das Parkbremsmodul ermitteln. Außerdem sind ca. 10 000 Datensätze vorhanden, bei denen die Bremsdruckkollektive nahezu übereinstimmend zu den benötigten Basiskollektiven vorliegen. Vorhanden sind Vorwärtsfahrt-, Rückwärtsfahrt-, Überlastmodul und ein Modul das, sämtliche Betriebsbremsbetätigungen im Stand beschreibt. Aus diesem Betriebsbremse-im-Stand-Modul lässt sich zusammen mit Vorwärts- und Rückwärtsfahrtmodul das notwendige Betriebsbremsmodul ableiten. Alle Module sind dabei aufgelöst in 1-bar-Schritten von 1-10 bar im Maximum. Allerdings ist zu allen Datensätzen der Betriebsdaten keine Kenntnis über die Zylindergröße vorhanden, wodurch eine Umrechnung nur aufgrund einer Worst Case Annahme mit dem größten Zylinder möglich ist. Deshalb bleibt eine Unschärfe nach der Umrechnung in Klemmkraft und Bremsmoment vorhanden. Aus diesem Grund beschloss der AK-CV-Brakes, dass eine Umrechnung der Lastkollektive in Klemmkraft und Bremsmoment nicht im Rahmen dieser Arbeit erfolgt, sondern bei den Entwicklern vor Ort. Diese müssen dann mit der Unschärfe, die durch die fehlende Kenntnis aus der Zylindergröße resultiert, umgehen. Von der Zylindergröße abgesehen sind alle notwendigen Mess- und Randgrößen für das Nutzfahrzeug vorhanden. Was in der Datenbasis fehlt sind Trailer-Daten für die Lastkollektivvermittlung. Aus diesem Grund beschloss der AK CV-Brakes, dass die Lastkollektive der Nutzfahrzeuge für die Trailer genutzt werden. Sinnvoll ist das aber nur bei Datensätzen der Sattelzugmaschinen, da nur diese nahezu die ganze Zeit mit angehängtem Semitrailer unterwegs sind. Bei Distribution- oder Baustellenverkehr ist diese Übertragbarkeit nicht gegeben, da es in diesen Kategorien durchaus denkbar ist, dass später Lastkollektive für den Trailer als repräsentativ angenommen werden, obwohl gar kein Trailer mit dem Nutzfahrzeug verbunden ist. Daraus folgt, dass für den Trailer nur Lastkollektive für den Semitrailer im Fernverkehr und Offroad ermittelt werden können. Außerdem muss das Druckniveau in diesen Lastkollektiven an das maximale Druckniveau von 8,5 bar im Trailer angepasst werden. Die Messdaten aus der Messkampagne besitzen alle notwendigen Messgrößen für die Ermittlung der Basiskollektive, um die Güte der Betriebsdaten zu validieren. Nach der Sichtung der

Datenbasis folgt die Datenaufbereitung, bei der fehlerhafte Datensätze und Datensätze, die einen Missbrauch darstellen, aus der Datenbasis entfernt werden. Zusätzlich werden die nachfolgenden Plausibilitätsgrenzen definiert:

- Zeitraum zwischen Produktionsdatum und erster Messung ≥ 1 und ≤ 90 Tage
- Durchschnittsgeschwindigkeit ≤ 75 km/h
- Durchschnittsgewicht $\leq 110\%$ ZGG
- Betriebsstunden $\leq 6\,500$ h/Jahr (3 Schichtbetrieb)
- Minimale Messdauer ab der ersten Messung: 90 Tage

Die Grenze für den Zeitraum zwischen der ersten Messung und dem Produktionsdatum wird definiert für den Fall, dass Fahrzeuge bereits vor der ersten Messung in Betrieb genommen wurden. Denn daraus erfolgt eine falsche Extrapolation der Lastkollektive auf die Lebensdauer. Die maximale Durchschnittsgeschwindigkeit wird definiert, um fehlerhafte Datensätze, bei denen vermeintlich Durchschnittsgeschwindigkeiten von weit über 100 km/h erreicht werden, auszusortieren. Mit der Grenze von 10 % durchschnittliche Überladung bezogen auf das ZGG werden insbesondere in der Kipper-Anwendung Einsätze herausgefiltert bei denen die Überladung der Normalfall ist. Da hier leider nur der Durchschnittswert vorhanden ist, können nur dauerhaft überladene Fahrzeuge aussortiert werden. Außerdem müssen die maximalen Betriebsstunden pro Jahr kleiner als 6 500 Stunden sein, was in etwa einem Dreischichtbetrieb entspricht. Wird dieser Wert überschritten, ist der Datensatz fehlerhaft hinsichtlich seiner zeitlichen Aufzeichnung und muss entfernt werden. Außerdem wird als untere Grenze festgelegt, dass nur Fahrzeuge berücksichtigt werden, die länger als 90 Tage im Betrieb sind. Alle Datensätze die eine oder mehrere dieser Grenzen nicht einhalten, werden aus der Datenbasis entfernt. Darüber hinaus wird die ganze Datenbasis auf fehlerhafte Messgrößen überprüft und betroffene Datensätze werden ausgeschlossen.

5.5.2 Einsatzklassifikation

Die Zuordnung der Datensätze zu den geforderten Missionen erfolgt anhand der Radformel und der Durchschnittsgeschwindigkeit der Fahrzeuge. Außerdem wird zwischen Sattelzugmaschine, Chassis-Fahrzeugen und Bussen unterschieden. Für den Kommunalverkehr erfolgt darüber hinaus eine genauere Betrachtung des Aufbaus hinsichtlich müllfahrzeugspezifischer Merkmale, die als Hauptanwendung für den Kommunalverkehr gilt. Das anstatt des Distributionsverkehrs nur der Regionale Verteiler betrachtet wird, liegt daran, dass in der Gruppe der „Chassis 4x2, 6x2“ auch

Fernverkehrseinsätze enthalten sind. Um eine klare Verteileranwendung zu beschreiben, wird deshalb nur der regionale Verteiler betrachtet, der den kritischen Fall im Distributionsverkehr darstellt. Aus diesem Grund ist das Merkmal der Durchschnittsgeschwindigkeit für die Missionen „Regionaler Verteiler“ und „Stadtbus“ notwendig, da ohne diese Angabe keine Zuordnung für Fahrzeuge im überwiegend städtischen Einsatz möglich ist. Für die Baustelle/Offroad-Kategorie werden alle Chassis mit mehr als einer angetriebenen Achse betrachtet, da für diese Fahrzeugkonfiguration von einem Einsatz auch auf unbefestigten Straßen ausgegangen wird. Dieselbe Unterscheidung erfolgt an der Sattelzugmaschine zwischen den Semitrailer-Missionen Fernverkehr und Offroad-Einsatz. Der Fernverkehr setzt sich aus Sattelzügen mit der Radformel 4x2 und 6x2 zusammen. Eine Übersicht über die gesamte Klassifikation der Datensätze ist nachfolgend in Tabelle 5.7 gegeben.

Tabelle 5.7: Einsatz-Klassifikation

Mission	Radformel	Durchschnittsgeschwindigkeit
Fernverkehr	Sattelzugmaschine: 4x2, 6x2	Keine Einschränkung
Regionaler Verteiler	Chassis: 4x2, 6x2	< 40 km/h
Baustelle/Offroad	Chassis: 4x4, 6x4, 6x6, 8x4, 8x6, 8x8	Keine Einschränkung
Kommunalverkehr	Chassis: 4x2, 6x2, 6x4, 8x2	Keine Einschränkung
Stadtbus	Chassis: 4x2	< 40 km/h
Semitrailer Fernverkehr	Semitrailer an Stallzugmaschine mit: 4x2, 6x2	Keine Einschränkung
Semitrailer Offroad	Semitrailer an Stallzugmaschine mit: 4x4, 6x4, 6x6, 8x4	Keine Einschränkung

5.5.3 Lastkollektivvermittlung

Ziel der Lastkollektivvermittlung sind designunabhängige Lastkollektive, die 99 % aller Einsätze innerhalb einer Mission abdecken. Dafür müssen aus der Datengrundlage die für die Leitfäden notwendigen Basiskollektive aus Abbildung 5.11 ermittelt werden. Da die Lastkollektive bereits in klassierter Form aus den Fahrzeugen vorliegen, müssen diese auf eine einheitliche Lebensdauer linear interpoliert oder extrapoliert

werden. Hierfür wurde vom AK CV-Brakes eine Fahrstrecke von 100 000 km als einheitliche Lebensdauer definiert. Die lineare Extrapolation ist aus zwei Gründen für die vorliegenden Datensätze geeignet. Zum einen ist aufgrund der großen Datenbasis bereits sichergestellt, dass die Maximallast in den Messungen enthalten ist. Zum anderen ist die Maximallast mit 10 bar im Betriebsbremszylinder bekannt. So zeigt bereits die Datenaufbereitung, dass diese Maximallast in den Daten vorhanden ist. Die 100 000 km bilden dann die Grundlage für eine Extrapolation auf die firmenspezifischen Lebensdauieranforderungen. Dabei sei jedoch angemerkt, dass hierfür nicht nur die Laufleistung, sondern auch die Betriebsstunden und die Einsatzzeit im Feld berücksichtigt werden müssen. Denn gerade Einsätze mit hohen Bremshäufigkeit erreichen die Lebensdauieranforderung in Betriebsstunden deutlich früher anstatt der Laufleistung. Deshalb muss die Entscheidung auf wie viele Kilometer die 99 %-Lastkollektive extrapoliert werden individuell getroffen werden. Eine einheitliche Vorgabe ist aufgrund der unterschiedlichen bestehenden Lebensdauieranforderungen für Nutzfahrzeuge nicht möglich.

Repräsentative Basiskollektive

Die Ermittlung der repräsentativen Basiskollektiven erfolgt rein auf der Summenhäufigkeit der Druckklassen, was eine Anwendung unabhängig vom exakten Lebensdauermodell des Ausfallmechanismus sicherstellt. Das 99-%-Quantil wird dabei rein empirisch ermittelt, da keine Verteilung für die Beschreibung dieses hohen Quantils eine ausreichend gute Anpassung an die Datensätze liefert. Für die Semitrailer-Missionen werden aufgrund der fehlenden Datenbasis die Lastkollektive aus den Sattelzugmaschinen verwendet. Dafür werden alle Druckniveaus über 8 bar der 8-8,5 bar-Klasse zugeordnet, da diese Klasse den maximal möglichen Systemdruck im Bremssystem des Trailers darstellt. Die ermittelten Basiskollektive in Abbildung 5.12, Tabelle 5.8 und Abbildung 5.13 zeigen große Unterschiede in der Nutzung der NFZ-Bremse zwischen den Missionen auf. Wie erwartet kommt der Kommunalverkehr auf die größte und der Fernverkehr auf die geringste Bremshäufigkeit aller Missionen bezogen auf die Fahrstrecke 100 000 km. Dieses auf die Laufleistung bezogene Ergebnis, gilt es hinsichtlich der tatsächlichen Lebensdauer der Fahrzeuge, bei der auch eine maximale Betriebsstundenanzahl vorgegeben ist, individuell zu bewerten. Alle Basiskollektive sind in tabellierter Form dem Anhang dieser Arbeit beigelegt.

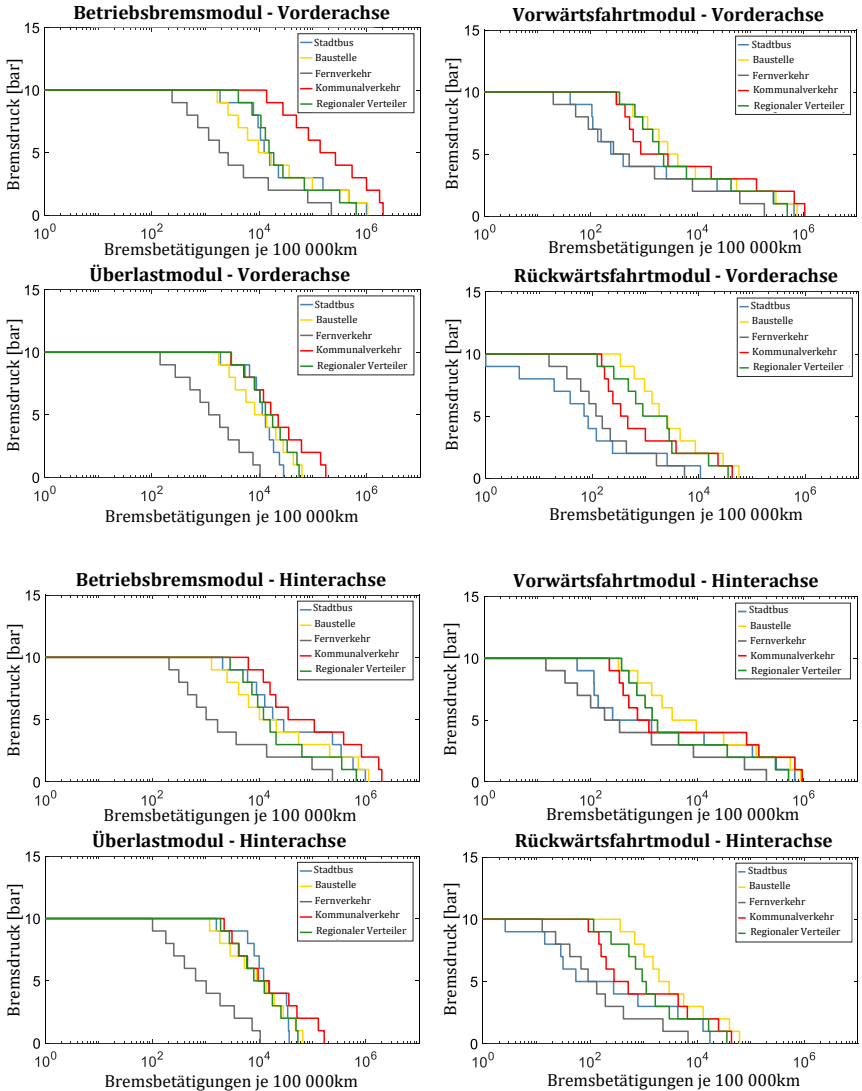


Abbildung 5.12: Repräsentative 99%-Basiskollektive für Vorder- und Hinterachse

Tabelle 5.8: Parkbremsmodul für Nutzfahrzeuge, Busse und Trailer (100 000 km)

Fahrzeug-Mission	Parkbremsbetätigungen
Fernverkehr	28 350
Regionaler Verteiler	191 710
Baustelle/Offroad	170 061
Kommunalverkehr	260 110
Stadtbus	39 115
Semitrailer Fernverkehr	28 350
Semitrailer Offroad	58 100

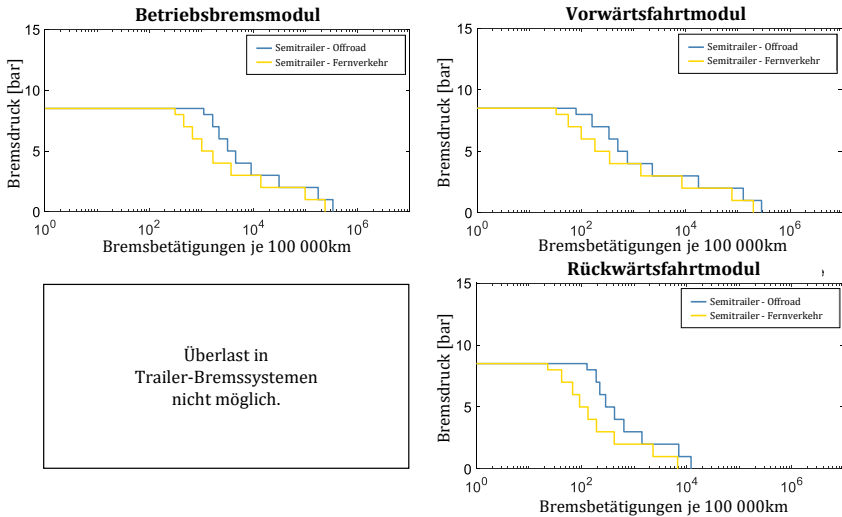


Abbildung 5.13: Repräsentative 99 % Basiskollektive für Semitrailer

Validierung

Als letzter Schritt der Lastkollektivermittlung für die NFZ-Bremse wird die Validierung der repräsentativen Basiskollektive mit den detaillierteren Messdaten aus der Messkampagne durchgeführt. Dabei werden die vorhandenen Basiskollektive der Betriebsdaten für den Vergleich herangezogen: Vorwärtsfahrtmodul, Rückwärtsfahrtmodul, Überlastmodul und die Betriebsbremse im Stand. Dieselben Basiskollektive

werden aus den Belastungs-Zeit-Funktionen der Messkampagne ermittelt. Für diese Klassierung wird die Rainflowzählung verwendet, da diese für strukturmechanische Ermüdungsmechanismen am besten geeignet ist. Für den Vergleich zwischen Messkampagne und Betriebsdaten wird die Mittelspannung der Schwingspiele nicht verwendet, da diese in den Betriebsdaten nicht vorhanden ist.

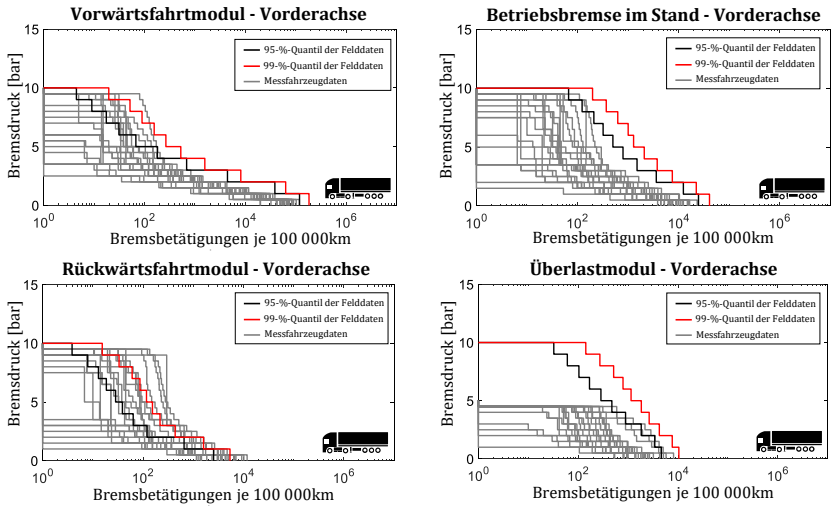


Abbildung 5.14: Vergleich Lastkollektive aus Messkampagne mit Fernverkehr

Wie der in Abbildung 5.14 dargestellte Vergleich an der Vorderachse zwischen den grau gekennzeichneten Einzelkollektive aus der Messkampagne mit dem 95%- und 99%-Quantil des Fernverkehrs zeigt, weicht das Ergebnis der Betriebsdaten nur gering von dem der Messkampagne ab. Eine Ausnahme hierbei bildet das Überlastmodul, dessen Form gut bis zum Druckniveau von 4,5 bar mit der Messkampagne übereinstimmt. Ab diesem Druckniveau ist die Überlagerung in den Fahrzeugen der Messkampagne jedoch limitiert. Grund hierfür ist, dass bei diesen Fahrzeugen ein Überlastventil im Einsatz ist, welches den Überlastfall durch einen maximalen Druck von 4,5 bar an der Betriebsbremse limitiert. Dies ist der Grund warum trotzdem Form und Häufigkeit der Überlast bis 4,5 bar mit den Betriebsdaten gut übereinstimmt. Da ein solches Überdruckventil nicht grundsätzlich verbaut wird und Fahrzeuge ohne dieses Ventil die 99%-Quantile vorgeben, ist das Überlastmodul der Betriebsdaten als plausibel zu bewerten. Dieser Abgleich erfolgte für alle definierten Missionen an

Vorder- und Hinterachse und bestätigte die Plausibilität der Ergebnisse aus den Betriebsdaten. Damit ist nicht nur die Validierung abgeschlossen, sondern auch die letzte Phase der Methodik zur repräsentativen Lastkollektivermittlung.

5.6 Zusammenfassung und Fazit

Bei der Anwendung der Methode konnte gezeigt werden, dass diese eine systematische Ermittlung der relevanten Lasten ermöglicht. Im Fall der NFZ-Bremse: Bremsmoment, Klemmkraft und Vibrationen. Außerdem wurde der relevante Nutzraum entsprechend der zu betrachtenden Lasten sinnvoll eingegrenzt, um eine aufwandseffiziente Lastkollektivermittlung zu ermöglichen. Die Abdeckung des Nutzraumes erfolgte im Anwendungsbeispiel auf der Basis von Betriebsdaten. Für die Spezifikation der notwendigen Daten wurde gezeigt, wie anhand einer Übertragungsfunktion die notwendigen Messgrößen und Randbedingungen spezifiziert werden. So konnte aus den Hauptmessgrößen Betriebsdruck, einem Zähler für die Parkbremsbetätigungen und des Fahrzustandes alle relevanten Lastkollektive ermittelt werden. Die Ermittlung der Basiskollektive erfolgte unabhängig vom exakten Bremsendesign und Ausfallverhalten für ein Quantil von 99 % und 100 000 km. Da diese Lastkollektive aus Betriebsdaten ermittelt wurden, erfolgte außerdem eine Validierung mit einer Messkampagne. Die Superposition dieser Basiskollektive erfolgt anwendungsspezifisch anhand der entwickelten Leitfäden für Klemmkraft und Bremsmoment. Diese sind mitsamt der Lastkollektive in der technischen Empfehlung des AK CV-Brakes [WOR19] veröffentlicht und dienen der Branche als neuer Stand der Technik.

Das übergeordnete Forschungsziel der Arbeit war die Entwicklung einer Methodik zur systematischen Ermittlung von repräsentativen Lastkollektiven. Die erfolgreiche Anwendung am Beispiel der NFZ-Bremse zeigt, dass dieses Ziel erreicht wurde. Für die Entwicklung der Methodik wurde der nachfolgenden zentralen Forschungsfrage nachgegangen: *Wie müssen Methoden der Zuverlässigkeitstechnik und der Lastannahme verknüpft und in einer Methodik strukturiert werden, um die systematische Ermittlung von repräsentativen Lastkollektiven zu ermöglichen?*

Zur Beantwortung der zentralen Forschungsfrage wurden systematisch funktionale und allgemeine Anforderungen an die Methodik zur Ermittlung von repräsentativen Lastkollektiven vom Stand der Forschung abgeleitet. Dafür wurde zu Beginn untersucht, wie repräsentative Lastkollektive definiert sind. Bestehende Definitionen sind nicht einheitlich und resultieren aus den unterschiedlichen Zielsetzungen bei der repräsentativen Lastkollektivermittlung. Diese bilden unterschiedliche Randbedingungen der Unternehmen und der Produkte ab. Für die Methodik leitet sich deshalb

als Anforderung ab, dass unterschiedliche Zielsetzungen bei der Lastkollektivermittlung berücksichtigt werden müssen. Für die Entwicklung der Methodik musste außerdem geklärt werden, welche Schritte, Methoden und Datengrundlagen notwendig sind, um diese Zielsetzungen zu erreichen. Dafür wurden aus dem Stand der Forschung weitere funktionale Anforderungen an die Methodik abgeleitet. Die Entwicklung der Methodik erfolgte dann anhand der nachfolgend definierten funktionalen und allgemeinen Anforderungen:

- Zieldefinition für die Ermittlung repräsentativer Lastkollektive
- Anwendbarkeit auf Gesamtsystem-, Subsystem- und Komponentenebene
- Ermittlung der relevanten Lasten
- Ermittlung der relevanten Einsatzarten
- Messgrößen-Spezifikation
- Auswahl des erforderlichen Klassierverfahren
- Lastkollektivermittlung für Mess- und Betriebsdaten
- Anwendbarkeit der Methodik
- Durchgängigkeit und Transparenz der Methodik
- Eindeutigkeit und Wiederholbarkeit der Methodik
- Ressourceneffizienz

Das Anwendungsbeispiel NFZ-Bremse zeigt, dass diese Anforderungen von der Methodik erfüllt werden und damit auch die zentrale Forschungsfrage dieser Arbeit beantwortet ist. Ausgehend von einem Blockschaltbild mit definierter Systemgrenze werden die relevanten Lasten und der relevante Nutzraum im Rahmen der Methodik systematisch bestimmt. Qualitatives Expertenwissen wird dabei quantifiziert, um die Wiederholbarkeit der Ergebnisse zu garantieren. Aus demselben Grund besitzt die entwickelte Methodik Leitfäden zum Umgang mit Missbrauch und zur Auswahl von Klassierverfahren. Auch die unterschiedlichen Zielsetzungen und Rahmenbedingungen für die Lastkollektivermittlung werden berücksichtigt. So können mithilfe der Methodik Worst Case, anwendungsspezifische und synthetische Lastkollektive auf Grundlage von Feld- und Messdaten ermittelt werden. Dadurch wird eine ressourceneffiziente Lastkollektivermittlung für die jeweilige Problemstellung ermöglicht. Außerdem werden Möglichkeiten zur Messgrößenspezifikation aufgezeigt und diskutiert. Bei der Lastkollektivermittlung sind in der Methodik sowohl designabhängige als auch -unabhängige Ansätze berücksichtigt, sodass die individuell beste Lösung realisiert werden kann. Generell bietet der Aufbau der Methodik Durchgängigkeit und Transparenz für die optimale Planung der Lastkollektivermittlung und eine größtmögliche Akzeptanz der ermittelten Lastkollektive.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Repräsentative Lastkollektive haben eine große Bedeutung für Zuverlässigkeitserprobung und Bauteil-Dimensionierung, da sie das Ergebnis der Erprobung valide machen und eine belastungsgerechte Bauteil-Dimensionierung ermöglichen. So ist das Ergebnis eines Zuverlässigkeitsnachweises mit einem Lastkollektiv, das nicht repräsentativ für den tatsächlichen Einsatz ist, auch nicht aussagekräftig. Dies kann schlimmstenfalls zu einer unerwartet hohen Ausfallwahrscheinlichkeit im Feld, verbunden mit einer Rückrufaktion führen. Doch bereits zu Beginn des Entwicklungsprozesses ist die Kenntnis repräsentativer Lastkollektive erforderlich, da erst repräsentative Lastkollektive eine belastungsgerechte Bauteil-Dimensionierung ohne Sicherheitsfaktoren und damit Leichtbau ermöglichen. Dieser Hintergrund macht repräsentative Lastkollektive zum notwendigen Bestandteil für die Entwicklung zuverlässiger und nachhaltiger Produkte. Da es jedoch trotz dieser Bedeutung keine durchgängige Methodik zur systematischen Ermittlung repräsentativer Lastkollektive gibt, war es Ziel der Arbeit diese Methodik zu entwickeln

Für die Entwicklung der Methodik wurde zunächst der Stand der Technik zur repräsentativen Lastkollektivermittlung untersucht. Diese Untersuchung bestätigte, dass es keine vollumfängliche und durchgängige Methodik für die Ermittlung repräsentativer Lastkollektive gibt, obwohl bereits verschiedene Konzepte zur Lastkollektivermittlung existieren. Aus dieser Ausgangssituation heraus wurden aus dem Stand der Technik Entwicklungsschwerpunkte für die Methodik abgeleitet. Die Entwicklungsschwerpunkte wurden als funktionale Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik definiert. Bei der Untersuchung von bestehenden Definitionen für repräsentative Lastkollektive zeigte es sich, dass keine einheitliche Definition besteht. Die bestehenden Definitionen resultieren aus den unterschiedlichen Zielsetzungen bei der repräsentativen Lastkollektivermittlung. Diese wiederum hängen maßgeblich von den unterschiedlichen Randbedingungen der Unternehmen und der Produkte ab. Die Methodik wurde daher so entwickelt, dass entsprechend dieser Randbedingungen zwischen drei verschiedenen Zielsetzungen gewählt werden kann. Neben verschiedenen Zielsetzungen wurden auch die Spezifikation der notwendigen Daten und Messgrößen in der Methodik berücksichtigt. Zusätzlich zu den funktionalen Anforderungen wurden auch allgemeine Anforderungen definiert. Essentielle Anforderung hierbei

war es, die Anwendbarkeit der Methodik zu gewährleisten. Aufgrund der Anforderungsdefinition erfolgte die Konzeption der Methodik. In dieser wurden vier sequentielle Phasen für die Ermittlung repräsentativer Lastkollektive festgelegt. In der 1. Phase „System- und Lastanalyse“ erfolgt die Definition des zu betrachtenden Systems, indem es von seiner Umgebung abgegrenzt wird. Hauptziel dieser Phase ist die Ermittlung der relevanten Lasten, was auf qualitativer Basis unter Verwendung des Paarweisen Vergleiches erfolgt. In Phase 2 „Nutzraumanalyse“ erfolgt die Einsatzartensammlung auf Basis der relevanten Lasten wird der relevante Nutzraum ermittelt. Für diese Definition war außerdem die Entwicklung eines Leitfadens notwendig, der eine Unterscheidung zwischen normalem Gebrauch, Sondergebrauch und Missbrauch ermöglicht. Mit dem relevanten Nutzraum wird in Phase 3 „Zielsetzung und Datenspezifikation“ das Ziel der Lastkollektivermittlung und die dafür benötigte Datenbasis samt Messgrößen definiert. In der 4. Phase „Repräsentative Lastkollektivermittlung“ findet die Lastkollektivermittlung statt. Dafür wird die Datenbasis zunächst aufbereitet und von Messungenauigkeiten befreit. Danach erfolgt die Klassifikation der Datensätze für die Lastkollektivermittlung. Die repräsentative Lastkollektivermittlung erfolgt mittels Quantil-Berechnung auf designabhängiger oder -unabhängiger Berechnungsgrundlage. Auch die Lastkollektivermittlung auf Grundlage von Basislastkollektiven und einem repräsentativen Einsatzmix wurde berücksichtigt. Phase 4 endet mit der Validierung der ermittelten Lastkollektive.

Die entwickelte Methodik wurde zur Validierung am Beispiel der NFZ-Bremse angewendet. Diese Anwendung erfolgte im Rahmen des AK CV-Brakes, dessen Ziel die Ermittlung standardisierter Lastkollektive für die NFZ-Bremse war. Im Rahmen dieses Arbeitskreises wurde aufgezeigt, wie mit Hilfe der entwickelten Methodik zunächst die relevanten Lasten Klemmkraft und Bremsmoment ermittelt werden konnten. Der gesammelte Nutzraum wurde anschließend unter Berücksichtigung der relevanten Lasten auf den relevanten Nutzraum für die Datenspezifikation reduziert. In der Zielsetzung wurde festgelegt, dass anwendungsspezifische Lastkollektive aufgrund der elementaren Bremsmanöver bei Vorwärtsfahrt, Rückwärtsfahrt, Stillstand und Überlagerung ermittelt werden sollen. Als notwendige Datengrundlage wurden Betriebsdaten gewählt, die mit einer kleinen Messkampagne validiert werden sollten. Die Lastkollektivermittlung selbst erfolgte designunabhängig. Die ermittelten Lastkollektive wurden anhand der Messkampagne beim Kunden validiert. Das Ergebnis wurde als Technische Empfehlung vom AK CV-Brakes veröffentlicht, welche einen neuen Stand der Technik in der Nutzfahrzeuggestaltung darstellt.

Die erfolgreiche Anwendung der Methodik am Beispiel der Nutzfahrzeuggestaltung zeigt, dass die Methodik für die Ermittlung repräsentativer Lastkollektive geeignet ist. Zudem zeigt das Anwendungsbeispiel, dass die entwickelte Methodik die an sich gestellten Anforderungen erfüllt. Auf Grundlage von Betriebs- oder Messdaten können

sowohl Worst Case als auch einsatzspezifische Lastkollektive ermittelt werden. Dadurch ermöglicht die Methodik eine ressourceneffiziente Ermittlung repräsentativer Lastkollektive in Abhängigkeit von Datengrundlage und Zielsetzung. Dabei werden auch unterschiedliche Produkte und Systemebenen berücksichtigt. Außerdem leitet die Methodik systematisch durch die Ermittlung der relevanten Lasten und Einsatzarten. Hierfür werden die gängigen Methoden des Paarweisen Vergleiches und der Entscheidungsmatrix verwendet, um qualitatives Expertenwissen zu quantifizieren. Zusätzlich wurden Richtlinien für die Klassifizierung von Missbrauch und der Wahl des passenden Klassierverfahrens entwickelt und in den Ablauf integriert. Die entwickelte Methodik stellt damit eine durchgängige und vollumfängliche Vorgehensweise zur Ermittlung repräsentativer Lastkollektive dar. Diese Arbeit leistet dadurch einen wichtigen Beitrag zur Zuverlässigkeitserprobung und einer belastungsgerechten Produktauslegung.

Um die zukünftig noch zunehmende Datenverfügbarkeit zu nutzen, wurden im Rahmen dieser Arbeit bereits Data Mining Methoden für die Einsatz-Klassifikation eingeführt. Steigt die Datenverfügbarkeit weiter, steigt auch der Aufwand bei der Datenauswertung. Aus diesem Grund sollte der Umgang mit Big Data und Data Mining Methoden ein zukünftiger Forschungsschwerpunkt in der Lastkollektivermittlung sein. Dabei müssen neben der Einsatz-Klassifikation auch Methoden zur automatisierten Datenaufbereitung und Lastkollektivermittlung entwickelt werden. In der Datenaufbereitung müssen intelligente Methoden entwickelt werden, die in der Lage sind Ausreißer automatisiert zu erkennen und auszuschließen. Außerdem bedarf es neuer Methoden zur Extrapolation von Lastkollektiven, die auch einen Kundenwechsel und damit einen Wechsel der Einsatzart des Produktes berücksichtigen. Diese Problemstellung ist insbesondere für PKWs von hoher Relevanz, werden diese doch eher selten über die gesamte Lebensdauer vom selben Kunden gefahren. Ein weiteres interessantes Forschungsfeld für die Lastkollektivermittlung sind virtuelle Sensoren. Diese ermöglichen es Lasten an Bauteilen ohne den Einsatz von zusätzlichen Messsensoren zu ermitteln. Dies stellt nicht nur ein Potential zur Kostenreduktion dar, sondern ist manchmal auch notwendig, da sich nicht an jedem Bauteil Sensoren befestigen lassen ohne dieses so zu beschädigen, dass die Messung bereits beeinflusst wird. Durch den Einsatz von virtuellen Sensoren ließen sich damit Lasten und Spannungen bis auf jede Bauteilebene ohne direkte Messung herunterbrechen, was wiederum zur belastungsgerechten Produktentwicklung und einem aussagekräftigen Zuverlässigkeitsnachweis beitragen würde.

7 Literaturverzeichnis

- [ABB13] Appel, W.; Brähler, H.; Breuer, S.; Dahlhaus, U.; Esch, T.; Hoepke, E.; Kopp, S.; Rhein, B.: Nutzfahrzeugtechnik. 7. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2013.
- [BB12] Breuer, B.; Bill, K. H.: Bremsenhandbuch. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2012.
- [BC09] Blessing, L. T.; Chakrabarti, A.: DRM, a Design Research Methodology. Springer London, London, 2009.
- [BD06] Bortz, J.; Döring, N.: Forschungsmethoden und Evaluation, Für Human- und Sozialwissenschaftler. 4. Auflage. Springer-Medizin-Verl., Heidelberg, 2006.
- [BEH02] Berger, C.; Eulitz, K. G.; Heuler, P.; Kotte, K. L.; Naundorf, H.; Schuetz, W.; Sonsino, C. M.; Wimmer, A.; Zenner, H.: Betriebsfestigkeit in Germany - An Overview. In: International Journal of Fatigue, Nr. 6, 2002; S. 603–625.
- [BIR14] Birolini, A.: Reliability Engineering, Theory and Practice. 7. Edition. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2014.
- [BL04] Bertsche, B.; Lechner, G.: Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau, Ermittlung von Bauteil- und System-Zuverlässigkeiten. 3. Auflage. Springer, Berlin, 2004.
- [BUX92] Buxbaum, O.: Betriebsfestigkeit, Sichere und wirtschaftliche Bemessung schwingbruchgefährdeter Bauteile. 2. Auflage. Stahl Eisen, Düsseldorf, 1992.
- [CK17] Cramer, E.; Kamps, U.: Grundlagen der Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik, Eine Einführung für Studierende der Informatik, der Ingenieur- und Wirtschaftswissenschaften. 4. Auflage. Springer Spektrum, Berlin, 2017.

- [DAY14] Day, A. J.: Braking of road vehicles. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2014.
- [DHJ17] Dick, J.; Hull, E.; Jackson, K.: Requirements engineering. Fourth edition. Springer, Cham, Switzerland, 2017.
- [DIN16] DIN 50100:2016-12, Schwingfestigkeitsversuch - Durchführung und Auswertung von zyklischen Versuchen mit konstanter Lastamplitude für metallische Werkstoffproben und Bauteile, 2016.
- [DIN90] DIN 40041:1990-12, Zuverlässigkeit; Begriffe. Beuth, Berlin, 1990.
- [DIN95] DIN 1319-1:1995-01, Grundlagen der Meßtechnik - Teil 1: Grundbegriffe. Beuth, Berlin, 1995.
- [DIN97] DIN EN 60721-1:1997-02, Klassifizierung von Umweltbedingungen - Teil 1: Vorzugswerte für Einflußgrößen. Beuth, Berlin, 1997.
- [DSM09] Dreßler, K.; Speckert, M.; Müller, R.; Weber, C.: Customer loads correlation in truck engineering. Berichte des Fraunhofer-Instituts für Techno- und Wirtschaftsmathematik, Nr. 151. Fraunhofer ITWM, Kaiserslautern, 2009.
- [DUD11] Duden - Das große Wörterbuch der deutschen Sprache, Die umfassende Dokumentation der deutschen Gegenwartssprache. 2. Auflage. Bibliographisches Institut, Mannheim, 2011.
- [ECK17] Eckstein, C.: Ermittlung repräsentativer Lastkollektive zur Betriebsfestigkeit von Ackerschleppern. Dissertation. Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern, 2017.
- [ED84] Edwards, P. R.; Darts, J.: Standardised Fatigue loading Sequences for Helicopter Rotors (Helix and Felix), Part 1. Background and Fatigue Evaluation. Royal Aircraft Establishment, Ft. Belvoir, 1984a.
- [ED84] Edwards, P. R.; Darts, J.: Standardised Fatigue loading Sequences for Helicopter Rotors (Helix and Felix), Part 2. Final Definition of Helix and Felix. Royal Aircraft Establishment, Ft. Belvoir, 1984b.
- [FEL80] Fischer, W.; Eisbrecher, H.; Laumann, W.; Kuitsch, W.: Ermittlung und Auswertung von Lastkollektiven. FVA-Heft, Nr. 83. FVA, Frankfurt, 1980.

-
- [FGR07] Fortuna, L.; Graziani, S.; Rizzo, A.; Xibilia, M. G.: *Soft Sensors for Monitoring and Control of Industrial Processes*. Springer, London, Berlin, Heidelberg, 2007.
- [FUG10] Fugel, M.: *Parallele Hybridantriebe im Kundenbetrieb*. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2009. Shaker, Aachen, 2010.
- [FVS19] Frieske, B.; van den Adel, B.; Schwarz-Kocher, M.; Stieler, S.; Knüttgen, I.; Fischer, W.: *Strukturstudie BWe mobil 2019, Transformation durch Elektromobilität und Perspektiven der Digitalisierung*. <https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publikationen/Studien/Strukturstudie2019.pdf>, 23.10.2019.
- [GAN19] Ganzer, N.: *Rückruf-Rekordjahr 2018*. <https://www.kfz-rueckrufe.de/rueckruf-rekordjahr-2018/5279/>, 27.09.2019.
- [GKF73] Griese, F.; Kruse, K.; Fischer, W.: Die Verknüpfung von Last-Zeit-Funktionen zu zweidimensionalen Verteilungen und ihre Nutzung zur Analyse des Bauteilverhaltens. In: *Archiv Eisenhüttenwesen* 44, Nr. 12, 1973; S. 945–951.
- [GUD99] Gudehus, H.: *Leitfaden für eine Betriebsfestigkeitsrechnung, Empfehlung zur Lebensdauerabschätzung von Maschinenbauteilen*. 4. Auflage. Stahleisen, Düsseldorf, 1999.
- [HAI06] Haibach, E.: *Betriebsfestigkeit, Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung*. Springer, Berlin, 2006.
- [HBK05] Heuler, P.; Bruder, T.; Klätschke, H.: Standardised Load-Time Histories - A Contribution to Durability Issues Under Spectrum Loading. In: *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, Nr. 11, 2005; S. 669–677.
- [HFR11] Heuler, P.; Frost, M.; Rochlitz, H.: Ansätze zur Lastannahme für die PKW-Betriebsfestigkeitsauslegung. In: *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, Nr. 42, Nr. 4, 2011; S. 279–288.
- [HKM09] Hartlieb, B.; Kiehl, P.; Müller, N.: *Normung und Standardisierung, Grundlagen*. Beuth, Berlin, 2009.
- [HKP12] Han, J.; Kamber, M.; Pei, J.: *Data mining, Concepts and techniques*. 3. Edition. Elsevier, Amsterdam, 2012.
- [HMM11] Hinkelmann, K.; Müller, C.; Masendorf, R.; Esderts, A.: *Extrapolation von Beanspruchungskollektiven*. Technical Report Series. Institut für

- Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit, Clausthal-Zellerfeld, 2011.
- [HS15] Härdle, W.; Simar, L.: Applied Multivariate Statistical Analysis. 4. Edition. Springer, Berlin, 2015.
- [HS18] Hedderich, J.; Sachs, L.: Angewandte Statistik, Methodensammlung mit R. 16., überarbeitete und erweiterte Auflage. Springer Spektrum, Berlin, Germany, 2018.
- [HUB10] Huber, A.: Ermittlung von prozessabhängigen Lastkollektiven eines hydrostatischen Fahrantriebsstrangs am Beispiel eines Teleskopladens. Dissertation. KIT, Karlsruhe, 2010.
- [IEC15] IEC 60050-192: International Electrotechnical Vocabulary (IEV) - Part 192: Dependability. Berlin, VDE Verlag, 2015.
- [JAN07] Janssen, A.: Repräsentative Lastkollektive für Fahrwerkkomponenten. Dissertation. TU Braunschweig, Braunschweig, 2007.
- [JJ01] Johannesson, P.; Jean-Jacques, T.: Extrapolation of Rainflow Matrices. In: Extremes 4:3, 2001; S. 241–262.
- [JOH06] Johannesson, P.: Extrapolation of Load Histories and Spectra. In: Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, Nr. 29. Wiley, 2006; S. 201–207.
- [JS14] Johannesson, P.; Speckert, M.: Guide to Load Analysis for Durability in Vehicle Engineering. Wiley, Chichester, 2014.
- [KJP10] Köhler, M.; Jenne, S.; Pötter, K.; Zenner, H.: Zählverfahren, Zählverfahren zur Bildung von Kollektiven und Matrizen aus Zeitfunktionen. FVA Richtlinie, Nr. 131 IV. FVA, Frankfurt, 2010.
- [KJP12] Köhler, M.; Jenne, S.; Pötter, K.; Zenner, H.: Zählverfahren und Lastannahme in der Betriebsfestigkeit. Springer, Berlin, 2012.
- [KLÄ03] Klätschke, H.: Standardized load spectra and sequences for trailer couplings of passenger cars as an amendment of the EU-Directive 94/20/EC – CARLOS TC. LBF-Bericht, Nr. 110833. Fraunhofer LBF, Darmstadt, 2003.
- [KOL12] Kollmer, H.: Marktspezifische Anforderungen an die Festigkeit von Fahrwerken. Dissertation. TU Braunschweig, Braunschweig, 2012.

-
- [KÜC90] Kücükay, F.: Rechnerunterstützte Getriebedimensionierung mit repräsentativen Lastkollektiven. In: ATZ Automobiltechnische Zeitschrift, Nr. 92, Nr. 6, 1990; S. 328–333.
- [LB19] Lucan, K.; Bertsche, B.: Standard-Lastkollektive für die Nutzfahrzeugbremse. In: ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift, Nr. 121, Nr. 5, 2019; S. 78–83.
- [LP12] Lach, S.; Polly, S.: Produktsicherheitsgesetz, Leitfaden für Hersteller und Händler. Gabler, Wiesbaden, 2012.
- [MAN16] Grundlagen der Nutzfahrzeugtechnik LKW und Bus, Lehrbuch der MAN Academy. 4. Auflage. Kirschbaum, Bonn, 2016.
- [ME14] Meeker, W. Q.; Escobar, L. A.: Statistical Methods for Reliability Data. John Wiley & Sons, New York, NY, 2014.
- [ME68] Matsuishi; Endo: Fatigue of metals subjected to varying stress. In: Proceedings of the Kyushu Branch of Japan Society of Mechanical Engineering, 1968; S. 37–40.
- [MEY17] Meyer, M.: Signalverarbeitung, Analoge und digitale Signale, Systeme und Filter. 8., verbesserte Auflage. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2017.
- [MIN45] Miner, M. A.: Cumulative Damage in Fatigue. In: Journal of Applied Mechanics, Nr. 12, 1945; A159-A164.
- [MÜL02] Müller-Kose, J.-P.: Repräsentative Lastkollektive für Fahrzeuggetriebe. Dissertation. TU Braunschweig, Braunschweig, 2002.
- [Off85] Official Journal of the European Communities: Council Directive of 25 July 1985 on the approximation of the laws, regulations and administrative provisions of the Member States concerning liability for defective products, (85/374/EEC). <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=celex:31985L0374>.
- [PAL24] Palmgren, A.: Die Lebensdauer von Kugellagern. In: Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure (ZVDI), Nr. 14, 1924; S. 339–341.
- [PAM00] Pederson, K.; Allen, J.; Mistree, F.; Bailey, R.; Emblemsvåg, J.: Validating Design Methods & Research: The Validation Square. In: Proceedings of DETC '00, 2000.

- [PB06] Pahl, G.; Beitz, W.: Konstruktionslehre, Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden und Anwendung. 7. Springer, Berlin, 2006.
- [PIN87] Pinnekamp, W.: Lastkollektive und Betriebsfestigkeit von Zahnrädern. In: VDI Berichte, Nr. 626, 1987; S. 131–145.
- [RUN15] Runkler, T. A.: Data Mining, Modelle und Algorithmen intelligenter Datenanalyse. 2., aktualisierte Auflage. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015.
- [SCH73] Schütz, D.: Standardisierter Einzelflug-Belastungsablauf für Schwingfestigkeitsversuche an Tragflächenbauteilen von Transportflugzeugen. Fraunhofer-Ges. zur Förderung der Angewandten Forschung, München, 1973.
- [SDR14] Speckert, M.; Dreßler, K.; Ruf, N.: The Virtual Measurement Campaign (VMC) concept, A methodology for geo-referenced description and evaluation of environmental conditions for vehicle loads and energy efficiency. In: Commercial Vehicle Technology. Proceedings of the 3rd Commercial Vehicle Technology Symposium (CVT 2014). Shaker, Herzogenrath, 2014; S. 88–98.
- [SDS09] Streit, A.; Dreßler, K.; Speckert, M.; Lichter, J.; Zenner, T.; Bach, P.: Anwendung statistischer Methoden zur Erstellung von Nutzungsprofilen für die Auslegung von Mobilbaggern. Berichte des Fraunhofer-Instituts für Techno- und Wirtschaftsmathematik, Nr. 163, Kaiserslautern, 2009.
- [SDS10] Schindler, M.; Dietrich, J.; Streicher, M.: Beanspruchungskollektive für Nutzfahrzeuge in Gesamteuropa, Ein innovativer Extrapolationsansatz. In: DVM-Berichte, Nr. 137, Berlin, 2010; S. 9–18.
- [SKH94] Schütz, D.; Klätschke, H.; Heuler, P.: Standardisierte mehraxiale Lastabläufe für Bauteile von PKW-Radaufhängungen, Darmstadt, 1994.
- [SKS90] Schütz, D.; Klätschke, H.; Steinhilber, H.; Heuler, P.; Schütz, W.: Standardisierte Lastabläufe für Bauteile von PKW Radaufhängungen, Standardized load sequences for car wheel suspension components car loading standard - CARLOS. LBF, Darmstadt, 1990.

-
- [SON08] Sonsino, C. M.: Betriebsfestigkeit — Eine Einführung in die Begriffe und ausgewählte Bemessungsgrundlagen. In: *Materials Testing*, Nr. 50, Nr. 1-2, 2008; S. 77–90.
- [SSS15] Streit, A.; Seifen, S.; Speckert, M.; Seebich, H.; Simatos, A.; Büttner, M.: Simulation von Kundenbeanspruchungen für Steuergeräte unter thermischer Belastung. In: *DVM-Berichte*, Nr. 142, Berlin, 2015; S. 11–24.
- [SZ73] Schütz, W.; Zenner, H.: Schadensakkumulationshypothesen zur Lebensdauervorhersage bei schwingender Beanspruchung. Teil 1, Ein kritischer Überblick. In: *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, Nr. 1, 1973; S. 25–33.
- [UN 10] Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung von Regelung Nr. 13 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN/ECE) - Fahrzeugen der Klassen M, N und O hinsichtlich der Bremsen, 2010.
- [VDA16] VDA: Zuverlässigkeitssicherung bei Automobilherstellern und Lieferanten, Zuverlässigkeits-Methoden und -Hilfsmittel. 4. VDA-Band, Nr. 3.2. VDA, Frankfurt am Main, 2016a.
- [VDA16] VDA: Betriebsfestigkeit Radbremse - Anforderungen und Prüfungen. VDA-Empfehlung, Nr. 311. VDA, Berlin, 2016b.
- [WAG17] Wagner, M.: Dataloggerbasierte Kundenkollektivermittlung für die Fahrzeugerprobung. Dissertation. Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, 2017.
- [WAL51] Wallodi Weibull: A Statistical Distribution Function of Wide Applicability. In: *Journal of Applied Mechanics*, Nr. 18, 1951; S. 293–297.
- [WEI07] Weiland, S.: Laststandard zur betriebsfesten Auslegung und Optimierung von PKW-Anhängevorrichtungen bei Fahrradheckträgernutzung. Dissertation. TU Darmstadt, Darmstadt, 2007.
- [WEI15] Weiler, B.: Kundenrelevante Auslegung von Nutzfahrzeugen. Dissertation. TU Braunschweig, Braunschweig, 2015.
- [WIM84] Wimmer, A.: Erarbeitung fahrzeugunabhängiger Parameter zur betriebsfesten Dimensionierung lebenswichtiger Bauteile. In: *Tagungsband Arbeitskreis Betriebsfestigkeit*, 1984; S. 119–133.
- [WOR19] Working Group Standard Load Spectra for Commercial Vehicle Brakes: Standard Load Spectra for Commercial Vehicle Brakes.

https://www.ima.uni-stuttgart.de/dokumente/forschung/zuverlaessigkeitstechnik/publikationen/Standard_Lastkollektive.pdf,
27.11.2019.

[WSO15] Weyh, T.; Speckert, M.; Opalinski, A.; Wagner, M.: Planung einer Messkampagne durch Osteuropa mittels der Fraunhofer Software VMC. In: VDI-Bericht: Nutzfahrzeuge 2015 Commercial Vehicles 2015 Truck, Nr. 2247, 2015.

[YAN07] Yang, G.: Life Cycle Reliability Engineering. John Wiley & Sons Inc., Hoboken, 2007.

8 Anhang

8.1 Lastkollektive der Radbremse für Trailer

Tabelle 8.1: Betriebsbremsmodul für Trailer (100 000 km)

Druck [bar]	Semitrailer Fernverkehr	Semitrailer Offroad
	Häufigkeit	Häufigkeit
0-1	138854	160467
1-2	84487	144044
2-3	10154	22025
3-4	2053	4480
4-5	654	1374
5-6	344	1005
6-7	217	531
7-8	147	540
8-8,5	314	1116

Tabelle 8.2: Vorwärtsfahrtmodul für Trailer (100 000 km)

Druck [bar]	Semitrailer Fernverkehr	Semitrailer Offroad
	Häufigkeit	Häufigkeit
0-1	121238	157425
1-2	68403	109485
2-3	7083	15271
3-4	1032	1530
4-5	167	264
5-6	82	162
6-7	44	178
7-8	24	82
8-8,5	32	79

Tabelle 8.3: Rückwärtsfahrtmodul für Trailer (100 000 km)

Druck [bar]	Semitrailer Fernverkehr	Semitrailer Offroad
	Häufigkeit	Häufigkeit
0-1	4446	5051
1-2	1873	5668
2-3	227	772
3-4	60	216
4-5	42	137
5-6	25	65
6-7	26	33
7-8	20	63
8-8,5	22	127

8.2 Lastkollektive der Radbremse für NFZ und Busse

Tabelle 8.4: Betriebsbremsmodul der Vorderachse für NFZ und Busse (100 000 km)

Druck [bar]	Fernver- kehr	Regionaler Verteiler	Stadtbus	Baustelle/ Offroad	Kommunal- verkehr
	Häufigkeit	Häufigkeit	Häufigkeit	Häufigkeit	Häufigkeit
0-1	141345	327773	532974	589071	285033
1-2	65526	246914	314294	362996	754196
2-3	9681	41691	131605	61881	463492
3-4	2447	9067	7149	19407	275231
4-5	833	3400	3317	7056	127236
5-6	663	2197	1796	3625	54246
6-7	427	2287	1036	2011	33219
7-8	265	3404	1723	1433	21724
8-9	213	3265	5942	968	13953
9-10	237	4085	1860	1655	13742

Tabelle 8.5: Betriebsbremsmodul der Hinterachse für NFZ und Busse (100 000 km)

Druck [bar]	Fernver- kehr	Regionaler Verteiler	Stadtbus	Baustelle/ Offroad	Kommunal- verkehr
	Häufigkeit	Häufigkeit	Häufigkeit	Häufigkeit	Häufigkeit
0-1	138854	311304	403980	411766	248736
1-2	84487	290228	232319	515058	916858
2-3	10154	42685	107113	155181	445383
3-4	2053	4711	208552	34132	275828
4-5	654	3995	10985	10876	73385
5-6	344	2688	5207	3837	14538
6-7	217	2078	3825	2195	4521
7-8	147	2353	2871	1630	4027
8-9	109	2128	4018	1229	5728
9-10	206	2869	2079	1289	6304

Tabelle 8.6: Überlastmodul der Vorderachse für NFZ und Busse (100 000 km)

Druck [bar]	Fernver- kehr	Regionaler Verteiler	Stadtbus	Baustelle/ Offroad	Kommunal- verkehr
	Häufigkeit	Häufigkeit	Häufigkeit	Häufigkeit	Häufigkeit
0-1	2725	4733	4666	19624	34838
1-2	3436	17387	5318	15116	78262
2-3	1578	8695	3042	7617	25854
3-4	803	6788	2378	6674	12909
4-5	693	4755	1696	5519	6219
5-6	356	2781	983	2574	4381
6-7	278	2012	1544	2066	3897
7-8	241	2863	2267	843	2979
8-9	131	2363	4706	1002	2189
9-10	141	3031	1893	1745	2968

Tabelle 8.7: Überlastmodul der Hinterachse für NFZ und Busse (100 000 km)

Druck [bar]	Fernver- kehr	Regionaler Verteiler	Stadtbus	Baustelle/ Offroad	Kommunal- verkehr
	Häufigkeit	Häufigkeit	Häufigkeit	Häufigkeit	Häufigkeit
0-1	3093	4115	1060	17792	36997
1-2	3984	23593	1224	19762	77804
2-3	1580	7961	1683	9058	15124
3-4	838	5219	17056	5698	20817
4-5	377	4572	3504	4663	5761
5-6	248	2090	2110	3550	3522
6-7	147	1668	1980	2462	1942
7-8	75	1431	1980	1030	1016
8-9	79	882	4524	660	892
9-10	101	1904	1587	1185	2222

Tabelle 8.8: Vorwärtsfahrtmodul der Vorderachse für NFZ und Busse (100 000 km)

Druck [bar]	Fernver- kehr	Regionaler Verteiler	Stadtbus	Baustelle/ Offroad	Kommunal- verkehr
	Häufigkeit	Häufigkeit	Häufigkeit	Häufigkeit	Häufigkeit
0-1	120324	219376	394000	453256	387300
1-2	55086	231254	246160	247311	538966
2-3	6567	37037	21034	45930	112295
3-4	1050	3945	2228	4924	15508
4-5	260	440	169	1531	1952
5-6	111	438	102	878	240
6-7	67	513	27	741	93
7-8	38	272	4	549	95
8-9	33	328	64	303	139
9-10	19	346	40	316	300

Tabelle 8.9: Vorwärtsfahrtmodul der Hinterachse für NFZ und Busse (100 000 km)

Druck [bar]	Fernver- kehr	Regionaler Verteiler	Stadtbus	Baustelle/ Offroad	Kommunal- verkehr
	Häufigkeit	Häufigkeit	Häufigkeit	Häufigkeit	Häufigkeit
0-1	121238	221555	371560	316866	250472
1-2	68403	257008	194577	428614	535460
2-3	7083	32060	94913	96161	58832
3-4	1032	2656	12002	21604	82947
4-5	167	376	1126	6205	480
5-6	82	370	120	1201	236
6-7	44	316	23	791	112
7-8	24	213	1	632	61
8-9	19	141	60	426	122
9-10	14	379	55	331	223

Tabelle 8.10: Rückwärtsfahrtmodul der Vorderachse für NFZ und Busse (100 000 km)

Druck [bar]	Fernver- kehr	Regionaler Verteiler	Stadtbus	Baustelle/ Offroad	Kommunal- verkehr
	Häufigkeit	Häufigkeit	Häufigkeit	Häufigkeit	Häufigkeit
0-1	3787	20193	8196	28188	19465
1-2	1167	12151	2310	20030	19205
2-3	219	343	122	4154	2746
3-4	64	240	36	1851	531
4-5	37	1647	14	812	123
5-6	31	237	32	476	98
6-7	27	178	20	363	43
7-8	28	222	15	348	32
8-9	18	130	4	273	21
9-10	15	123	0	338	149

Tabelle 8.11: Rückwärtsfahrtmodul der Hinterachse für NFZ und Busse (100 000 km)

Druck [bar]	Fernver- kehr	Regionaler Verteiler	Stadtbus	Baustelle/ Offroad	Kommunal- verkehr
	Häufigkeit	Häufigkeit	Häufigkeit	Häufigkeit	Häufigkeit
0-1	4446	19441	4418	21484	18605
1-2	1873	13272	8462	27015	18420
2-3	227	1362	3572	7341	2138
3-4	60	531	506	2575	3893
4-5	42	180	221	1063	236
5-6	25	234	23	438	81
6-7	26	176	3	480	39
7-8	20	284	15	335	15
8-9	10	131	12	316	54
9-10	12	116	2	366	92

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Kevin Lucan

Geburtsdatum: 28.02.1987

Ausbildung

07/2003 – 06/2006 Technisches Gymnasium Nagold

10/2007 – 03/2015 Studium Maschinenwesen (Diplom)
Universität Stuttgart

10/2015 – 06/2021 Promotion
Universität Stuttgart

Beruflicher Werdegang

10/2006 – 07/2007 Zivildienst
Friedrich Fröbelschule Herrenberg

06/2012 – 08/2012 Wissenschaftliche Hilfskraft – Tutor
Institut für Strömungsmechanik und
Hydraulische Strömungsmaschinen

02/2013 – 03/2014 Wissenschaftliche Hilfskraft
Institut für Maschinenelemente

10/2013 – 03/2015 Industriepraktikum, Werkstudent, Diplomarbeit
MAHLE International GmbH

04/2015 – 04/2021 Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Institut für Maschinenelemente

Seit 12/2018 Gründer und Projektleiter
RelTest-Solutions an der TTI GmbH

Liste der bisher erschienenen Berichte aus dem IMA:

Nr.	Verfasser	Titel
1	H.K. Müller	Beitrag zur Berechnung und Konstruktion von Hochdruckdichtungen an schnellaufenden Wellen
2	W. Passera K. Karow	Konzentrisch laufende Gewinde-Wellen-Dichtung im laminaren Bereich Konzentrische Doppelgewindewellendichtung im laminaren Bereich
3	F.E. Breit W. Sommer	Die Kreiszyinderschalendichtung: Eine Axialspaltdichtung mit druckabhängiger Spaltweite Dichtungen an Mehrphasensystemen: Berührungsfreie Wellendichtungen mit hochviskosen Sperrflüssigkeiten
4	K. Heitel	Beitrag zur Berechnung und Konstruktion konzentrisch und exzentrisch betriebener Gewin- dewellendichtungen im laminaren Bereich
5	K.-H. Hirschmann	Beitrag zur Berechnung der Geometrie von Evolventenverzahnungen
6	H. Däuble	Durchfluß und Druckverlauf im radial durchströmten Dichtspalt bei pulsierendem Druck
7	J. Rybak	Einheitliche Berechnung von Schneidrädern für Außen- und Innenverzahnungen. Beitrag zu Eingriffsstörungen beim Hohlrad-Verzahnens mittels Schneidräder
8	D. Franz	Rechnergestütztes Entwerfen von Varianten auf der Grundlage gesammelter Erfahrungs- werte
9	E. Lauster	Untersuchungen und Berechnungen zum Wärmehaushalt mechanischer Schaltgetriebe
10		Festschrift zum 70. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. K. Talke
11	G. Ott	Untersuchungen zum dynamischen Leckage- und Reibverhalten von Radialwellen- dichtungen
12	E. Fuchs	Untersuchung des elasto-hydrodynamischen Verhaltens von berührungsfreien Hochdruck- dichtungen
13	G. Sedlak	Rechnerunterstütztes Aufnehmen und Auswerten spannungsoptischer Bilder
14	W. Wolf	Programmsystem zur Analyse und Optimierung von Fahrzeuggetrieben
15	H. v. Eiff	Einfluß der Verzahnungsgeometrie auf die Zahnfußbeanspruchung innen- und außenver- zahnter Geradstirnräder
16	N. Messner	Untersuchung von Hydraulikstangendichtungen aus Polytetrafluoräthylen
17	V. Schade	Entwicklung eines Verfahrens zur Einflanken-Wälzprüfung und einer rechnergestützten Auswertemethode für Stirnräder
18	A. Gührer	Beitrag zur Optimierung von Antriebssträngen bei Fahrzeugen
19	R. Nill	Das Schwingungsverhalten loser Bauteile in Fahrzeuggetrieben
20	M. Kammüller	Zum Abdichtverhalten von Radial-Wellendichtungen
21	H. Truong	Strukturorientiertes Modellieren, Optimieren und Identifizieren von Mehrkörpersystemen
22	H. Liu	Rechnergestützte Bilderfassung, -verarbeitung und -auswertung in der Spannungsoptik
23	W. Haas	Berührungsfreie Wellendichtungen für flüssigkeitsbespritzte Dichtstellen
24	M. Plank	Das Betriebsverhalten von Wälzlagern im Drehzahlbereich bis 100.000/min bei Kleinstmen- gensmierung
25	A. Wolf	Untersuchungen zum Abdichtverhalten von druckbelastbaren Elastomer- und PTFE- Wellendichtungen
26	P. Waidner	Vorgänge im Dichtspalt wasserabdichtender Gleitringdichtungen
27	Hirschmann u.a.	Veröffentlichungen aus Anlaß des 75. Geburtstags von Prof. Dr.-Ing. Kurt Talke
28	B. Bertsche	Zur Berechnung der Systemzuverlässigkeit von Maschinenbau-Produkten
29	G. Lechner; K.-H.Hirschmann; B. Bertsche	Forschungsarbeiten zur Zuverlässigkeit im Maschinenbau
30	H.-J. Prokop	Zum Abdicht- und Reibungsverhalten von Hydraulikstangendichtungen aus Polytetrafluor- äthylen
31	K. Kleinbach	Qualitätsbeurteilung von Kegelradsätzen durch integrierte Prüfung von Tragbild, Einflan- kenwälzabweichung und Spielverlauf
32	E. Zürn	Beitrag zur Erhöhung der Meßgenauigkeit und -geschwindigkeit eines Mehrkoordinaten- tasters
33	F. Jauch	Optimierung des Antriebsstranges von Kraftfahrzeugen durch Fahrsimulation
34	J. Grabscheid	Entwicklung einer Kegelrad-Laufprüfmaschine mit thermografischer Tragbilderfassung
35	A. Hölderlin	Verknüpfung von rechnerunterstützter Konstruktion und Koordinatenmeßtechnik
36	J. Kurfess	Abdichten von Flüssigkeiten mit Magnetflüssigkeitsdichtungen
37	G. Borenius	Zur rechnerischen Schädigungsakkumulation in der Erprobung von Kraftfahrzeugteilen bei stochastischer Belastung mit variabler Mittellast
38	E. Fritz	Abdichtung von Maschinenspindeln
39	E. Fritz; W. Haas; H.K. Müller	Berührungsfreie Spindelabdichtungen im Werkzeugmaschinenbau. Konstruktionskatalog

Nr.	Verfasser	Titel
40	B. Jenisch	Abdichten mit Radial-Wellendichtringen aus Elastomer und Polytetrafluorethylen
41	G. Weidner	Klappern und Rasseln von Fahrzeuggetrieben
42	A. Herzog	Erweiterung des Datenmodells eines 2D CAD-Systems zur Programmierung von Mehrkoordinatenmeßgeräten
43	T. Roser	Wissensbasiertes Konstruieren am Beispiel von Getrieben
44	P. Wäschle	Entlastete Wellendichtringe
45	Z. Wu	Vergleich und Entwicklung von Methoden zur Zuverlässigkeitsanalyse von Systemen
46	W. Richter	Nichtwiederholbarer Schlag von Wälzlagereinheiten für Festplattenlaufwerke
47	R. Durst	Rechnerunterstützte Nutprofilentwicklung und clusteranalytische Methoden zur Optimierung von Gewindewerkzeugen
48	G.S. Müller	Das Abdichtverhalten von Gleitringdichtungen aus Siliziumkarbid
49	W.-E. Krieg	Untersuchungen an Gehäuseabdichtungen von hochbelasteten Getrieben
50	J. Grill	Zur Krümmungstheorie von Hüllflächen und ihrer Anwendung bei Werkzeugen und Verzahnungen
51	M. Jäckle	Entlüftung von Getrieben
52	M. Köchling	Beitrag zur Auslegung von geradzahnten Stirnrädern mit beliebiger Flankenform
53	M. Hildebrandt	Schadensfrüherkennung an Wälzkontakten mit Körperschall-Referenzsignalen
54	H. Kaiser	Konstruieren im Verbund von Expertensystem, CAD-System, Datenbank und Wiederholteil-suchsystem
55	N. Stanger	Berührungsfrei abdichten bei kleinem Bauraum
56	R. Lenk	Zuverlässigkeitsanalyse von komplexen Systemen am Beispiel PKW-Automatikgetriebe
57	H. Nauhheimer	Beitrag zur Entwicklung von Stufenlosgetrieben mittels Fahrsimulation
58	G. Neumann	Thermografische Tragbilderfassung an rotierenden Zahnradern
59	G. Wüstenhagen	Beitrag zur Optimierung des Entlasteten Wellendichtrings
60	P. Brodbeck	Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Bauteilzuverlässigkeit und zur Systemberechnung nach dem Booleschen Modell
61	Ch. Hoffmann	Untersuchungen an PTFE-Wellendichtungen
62	V. Hettich	Identifikation und Modellierung des Materialverhaltens dynamisch beanspruchter Flächen-dichtungen
63	K. Riedl	Pulsationsoptimierte Außenzahnpumpen mit ungleichförmig übersetzenden Radpaaren
64	D. Schwuchow	Sonderverzahnungen für Zahnpumpen mit minimaler Volumenstrompulsation
65	T. Spörl	Modulares Fahrsimulationsprogramm für beliebig aufgebaute Fahrzeugtriebstränge und Anwendung auf Hybridantriebe
66	K. Zhao	Entwicklung eines räumlichen Toleranzmodells zur Optimierung der Produktqualität
67	K. Heusel	Qualitätssteigerung von Planetengetrieben durch Selektive Montage
68	T. Wagner	Entwicklung eines Qualitätsinformationssystems für die Konstruktion
69	H. Zelßmann	Optimierung des Betriebsverhaltens von Getriebeentlüftungen
70	E. Bock	Schwimmende Wellendichtringe
71	S. Ring	Anwendung der Verzahnungstheorie auf die Modellierung und Simulation des Werkzeug-schleifens
72	M. Klöpfer	Dynamisch beanspruchte Dichtverbindungen von Getriebegehäusen
73	C.-H. Lang	Losteilgeräusche von Fahrzeuggetrieben
74	W. Haas	Berührungsfreies Abdichten im Maschinenbau unter besonderer Berücksichtigung der Fang-labyrinth
75	P. Schiberna	Geschwindigkeitsvorgabe für Fahrsimulationen mittels Verkehrssimulation
76	W. Elser	Beitrag zur Optimierung von Wälzgetrieben
77	P. Marx	Durchgängige, bauteilübergreifende Auslegung von Maschinenelementen mit unscharfen Vorgaben
78	J. Kopsch	Unterstützung der Konstruktionstätigkeiten mit einem Aktiven Semantischen Netz
79	J. Rach	Beitrag zur Minimierung von Klapper- und Rasselgeräuschen von Fahrzeuggetrieben
80	U. Häussler	Generalisierte Berechnung räumlicher Verzahnungen und ihre Anwendung auf Wälzfräse-herstellung und Wälzfräsen
81	M. Hüsges	Steigerung der Tolerierungsfähigkeit unter fertigungstechnischen Gesichtspunkten
82	X. Nastos	Ein räumliches Toleranzbewertungssystem für die Konstruktion
83	A. Seifried	Eine neue Methode zur Berechnung von Rollenlagern über lagerinterne Kontakt-Beanspruchungen
84	Ch. Dörr	Ermittlung von Getriebebelastkollektiven mittels Winkelbeschleunigungen
85	A. Veil	Integration der Berechnung von Systemzuverlässigkeiten in den CAD-Konstruktionsprozeß
86	U. Frenzel	Rückenstrukturierte Hydraulikstangendichtungen aus Polyurethan
87	U. Braun	Optimierung von Außenzahnpumpen mit pulsationsarmer Sonderverzahnung
88	M. Lambert	Abdichtung von Werkzeugmaschinen-Flachführungen
89	R. Kubalczyk	Gehäusegestaltung von Fahrzeuggetrieben im Abdichtbereich

Nr.	Verfasser	Titel
90	M. Oberle	Spielbeeinflussende Toleranzparameter bei Planetengetrieben
91	S. N. Dogan	Zur Minimierung der Loseilgeräusche von Fahrzeuggetrieben
92	M. Bast	Beitrag zur werkstückorientierten Konstruktion von Zerspanwerkzeugen
93	M. Ebenhoch	Eignung von additiv generierten Prototypen zur frühzeitigen Spannungsanalyse im Produktentwicklungsprozess
94	A. Fritz	Berechnung und Monte-Carlo Simulation der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit technischer Systeme
95	O. Schrems	Die Fertigung als Versuchsfeld für die qualitätsgerechte Produktoptimierung
96	M. Jäckle	Untersuchungen zur elastischen Verformung von Fahrzeuggetrieben
97	H. Haier	PTFE-Compounds im dynamischen Dichtkontakt bei druckbelastbaren Radial-Wellendichtungen
98	M. Rettenmaier	Entwicklung eines Modellierungs-Hilfssystems für Rapid Prototyping gerechte Bauteile
99	M. Przybilla	Methodisches Konstruieren von Leichtbauelementen für hochdynamische Werkzeugmaschinen
100	M. Olbrich	Werkstoffmodelle zur Finiten-Elemente-Analyse von PTFE-Wellendichtungen
101	M. Kunz	Ermittlung des Einflusses fahrzeug-, fahrer- und verkehrsspezifischer Parameter auf die Getriebebelastkollektive mittels Fahrsimulation
102	H. Ruppert	CAD-integrierte Zuverlässigkeitsanalyse und -optimierung
103	S. Kilian	Entwicklung hochdynamisch beanspruchter Flächendichtverbindungen
104	A. Flaig	Untersuchung von umweltschonenden Antriebskonzepten für Kraftfahrzeuge mittels Simulation
105	B. Luo	Überprüfung und Weiterentwicklung der Zuverlässigkeitsmodelle im Maschinenbau mittels Mono-Bauteil-Systemen
106	L. Schüppenbauer	Erhöhung der Verfügbarkeit von Daten für die Gestaltung und Berechnung der Zuverlässigkeit von Systemen
107	J. Ryborz	Klapper- und Rasselgeräuschverhalten von Pkw- und Nkw- Getrieben
108	M. Würthner	Rotierende Wellen gegen Kühlschmierstoff und Partikel berührungsfrei abdichten
109	C. Gitt	Analyse und Synthese leistungsverzweigter Stufenlosgetriebe
110	A. Krolo	Planung von Zuverlässigkeitstests mit weitreichender Berücksichtigung von Vorkenntnissen
111	G. Schöllhammer	Entwicklung und Untersuchung inverser Wellendichtsysteme
112	K. Fronius	Gehäusegestaltung im Abdichtbereich unter pulsierendem Innendruck
113	A. Weidler	Ermittlung von Raffungsfaktoren für die Getriebeerprobung
114	B. Stiegler	Berührungsfreie Dichtsysteme für Anwendungen im Fahrzeug- und Maschinenbau
115	T. Kunstfeld	Einfluss der Wellenoberfläche auf das Dichtverhalten von Radial-Wellendichtungen
116	M. Janssen	Abstreifer für Werkzeugmaschinenführungen
117	S. Buhl	Wechselbeziehungen im Dichtsystem von Radial-Wellendichting, Gegenauflfläche und Fluid
118	P. Pozsgai	Realitätsnahe Modellierung und Analyse der operativen Zuverlässigkeitskennwerte technischer Systeme
119	H. Li	Untersuchungen zum realen Bewegungsverhalten von Loseilen in Fahrzeuggetrieben
120	B. Otte	Strukturierung und Bewertung von Eingangsdaten für Zuverlässigkeitsanalysen
121	P. Jäger	Zuverlässigkeitsbewertung mechatronischer Systeme in frühen Entwicklungsphasen
122	T. Hitziger	Übertragbarkeit von Vorkenntnissen bei der Zuverlässigkeitstestplanung
123	M. Delonga	Zuverlässigkeitsmanagementsystem auf Basis von Felddaten
124	M. Maisch	Zuverlässigkeitsorientiertes Erprobungskonzept für Nutzfahrzeuggetriebe unter Berücksichtigung von Betriebsdaten
125	J. Orso	Berührungsfreies Abdichten schnelllaufender Spindeln gegen feine Stäube
126	F. Bauer	PTFE-Manschettendichtungen mit Spirallrille - Analyse, Funktionsweise und Erweiterung der Einsatzgrenzen
127	M. Stockmeier	Entwicklung von Klapper- und rasselgeräuschfreien Fahrzeuggetrieben
128	M. Trost	Gesamtheitliche Anlagenmodellierung und -analyse auf Basis stochastischer Netzverfahren
129	P. Lambeck	Unterstützung der Kreativität von verteilten Konstrukteuren mit einem Aktiven Semantischen Netz
130	K. Pickard	Erweiterte qualitative Zuverlässigkeitsanalyse mit Ausfallprognose von Systemen
131	W. Novak	Geräusch- und Wirkungsgradoptimierung bei Fahrzeuggetrieben durch Festradentkopplung
132	M. Henzler	Radialdichtungen unter hoher Druckbelastung in Drehübertragern von Werkzeugmaschinen
133	B. Rzepka	Konzeption eines aktiven semantischen Zuverlässigkeitsinformationssystems
134	C.G. Pflüger	Abdichtung schnelllaufender Hochdruck-Drehübertrager mittels Rechteckring und hocheffizient strukturierter Gleitfläche
135	G. Baitinger	Multiskalenansatz mit Mikrostrukturanalyse zur Drallbeurteilung von Dichtungsgegenauflflächen

Nr.	Verfasser	Titel
136	J. Gäng	Berücksichtigung von Wechselwirkungen bei Zuverlässigkeitsanalysen
137	Ch. Maisch	Berücksichtigung der Ölalterung bei der Lebensdauer- und Zuverlässigkeitsprognose von Getrieben
138	D. Kirschmann	Ermittlung erweiterter Zuverlässigkeitsziele in der Produktentwicklung
139	D. Weber	Numerische Verschleißsimulation auf Basis tribologischer Untersuchungen am Beispiel von PTFE-Manschettendichtungen
140	T. Leopold	Ganzheitliche Datenerfassung für verbesserte Zuverlässigkeitsanalysen
141	St. Jung	Beitrag zum Einfluss der Oberflächencharakteristik von Gegenläufigen auf das tribologische System Radial-Wellendichtung
142	T. Prill	Beitrag zur Gestaltung von Leichtbau-Getriebegehäusen und deren Abdichtung
143	D. Hofmann	Verknüpfungsmodell zuverlässigkeitsrelevanter Informationen in der Produktentwicklung mechatronischer Systeme
144	M. Wacker	Einfluss von Drehungleichförmigkeiten auf die Zahnradlebensdauer in Fahrzeuggetrieben
145	B. Jakobi	Dichtungsergüsse am Beispiel von Pkw-Lenkungen – Analyse und Abhilfemaßnahmen
146	S. Kiefer	Bewegungsverhalten von singulären Zahnradstufen mit schaltbaren Koppelungseinrichtungen
147	P. Fietkau	Transiente Kontaktberechnung bei Fahrzeuggetrieben
148	B. Klein	Numerische Analyse von gemischten Ausfallverteilungen in der Zuverlässigkeitstechnik
149	M. Kläiber	Betriebs- und Benutzungsbedingungen im Dichtsystem Radial-Wellendichtung am Beispiel von additiven synthetischen Schmierölen
150	A. Baumann	Rasselgeräuschminimierung von Fahrzeuggetrieben durch Getriebeöle
151	M. Kopp	Modularisierung und Synthese von Zuverlässigkeitsmethoden
152	M. Narten	Abdichten von fließfettgeschmierten Getrieben mit Radialwellendichtungen – Reibungsminimierung durch Makrostrukturierung der Dichtungsgegenläufige
153	P. Schuler	Einfluss von Grenzflächeneffekten auf den Dichtmechanismus der Radial-Wellendichtung
154	A. Romer	Anwendungsspezifischer Zuverlässigkeitsnachweis auf Basis von Lastkollektiven und Vorwissen
155	A. Daubner	Analyse, Modellierung und Simulation von Verschleiß auf mehreren Skalen zur Betriebsdauervorhersage von Wellendichtungen aus PTFE-Compound
156	J. Rowas	Ökologischer Einsatz der Traktionsarten im System Bahn
157	D. J. Maier	Sensorlose online Zustandserfassung von Vorschubantriebskomponenten in Werkzeugmaschinen
158	J.-P. Reibert	Statisches Abdichten auf nicht idealen Dichtflächen in der Antriebstechnik
159	M. Sommer	Einfluss des Schmierfettes auf das tribologische System Radial-Wellendichtung – Betriebsverhalten und Funktionsmodell
160	W. Haas	Basics der Dichtungstechnik
161	U. Nißler	Dichtheit von Hydraulikstangendichtungen aus Polyurethan
162	S. M. Neuburger	Entwicklung einer gasgeschmierten Gleitringdichtung für den Einsatz im Verbrennungsmotor
163	W. Goujavin	Strömungsmechanische Untersuchungen zur Funktionsweise von Manschetendichtungen aus PTFE-Compounds mit Rückförderstrukturen
164	K. Mutter	Simulation der Zuverlässigkeit von Gesamtfahrzeugfunktionen am Beispiel Fahrkomfort
165	S. Sanzenbacher	Reduzierung von Getriebegeräuschen durch Körperschallminderungsmaßnahmen
166	O. Koller	Zuverlässigkeit von Leistungsmodulen im elektrischen Antriebsstrang
167	M. Rempis	Untersuchungen zum Förderverhalten von Dichtsystemen mit Radial-Wellendichtungen aus Elastomer
168	M. Baumann	Abdichtung drallbehalteter Dichtungsgegenläufigen – Messung, Analyse, Bewertung und Grenzen
169	M. Schenk	Adaptives Prüfstandsverhalten in der PKW-Antriebsstrangerprobung
170	J. Gözl	Manschettendichtungen aus PTFE-Compounds, Funktionsmechanismus von PTFE-Manschettendichtungen und Entwicklung von Rückförderstrukturen für beidseitig drehende Wellen
171	J. Kümmel	Schmutzabdichtung mittels Fettgefüllter Berührungsfreier Wellendichtungen
172	S. Bader	Gehäusedichtungen unter korrosiver Last
173	J. Juskowiak	Beanspruchungsgerechte Bestimmung des Weibull-Formparameters für Zuverlässigkeitsprognosen
174	F. Jakob	Nutzung von Vorkenntnissen und Raffungsmodellen für die Zuverlässigkeitsbestimmung
175	N. P. Tonius	Klauenschaltelemente in Stufenautomatgetrieben
176	V. Schweizer	Berücksichtigung und Bewertung streuender Einflussgrößen in der Zuverlässigkeitssimulation
177	F. Bosch	Abdichtung trockener Stäube mit fettgefüllten berührungsfreien Wellendichtungen
178	M. Botzler	Präventive Diagnose abnutzungsabhängiger Komponentenausfälle
179	C. Fehrenbacher	Förderverhalten im Dichtsystem Radial-Wellendichtung

Nr.	Verfasser	Titel
180	B. Heumesser	Optimierung des Klapper- und Rasselgeräuschverhaltens bei Doppelkupplungsgetrieben
181	A. Eipper	Einfluss transienter Betriebsbedingungen auf den RWDR im System Radial-Wellendichtung
182	Alexander Buck	Einfluss der Oberflächenrauheit auf den Verschleiß an Hydraulikstangendichtungen
183	Andrea Buck	Simulation und Optimierung der Instandhaltung unter Berücksichtigung sich ändernder Belastungen mittels Petrinetzen
184	St. Kemmler	Integrale Methodik zur Entwicklung von robusten, zuverlässigen Produkten
185	T. Rieker	Modellierung der Zuverlässigkeit technischer Systeme mit stochastischen Netzverfahren
186	M. Bartholdt	Kunden- und kostenorientierte Zuverlässigkeitszielermittlung
187	V. Warth	Systematische Synthese und Bewertung von Stufenlosgetrieben
188	N. Nowizki	Funktionale Sicherheit und Zuverlässigkeit in frühen Phasen der Produktentwicklung
189	F. Schiefer	Additive Fertigung von Radial-Wellendichtungen
190	M. Dazer	Zuverlässigkeitstestplanung mit Berücksichtigung von Vorwissen aus stochastischen Lebensdauerberechnungen
191	J. Totz	Funktionsuntersuchungen an Dichtsystemen mit weichgeschliffenen Dichtungsgegenläufflächen und Radial-Wellendichtungen aus NBR
192	M. Stoll	Entwicklung und Funktionsanalyse rückenstrukturierter Manschettendichtringe aus PTFE-Compound
193	N. Dakov	Elastohydrodynamische Simulation von Wellendichtungen am Beispiel der PTFE-Manschettendichtung mit Rückförderstrukturen
194	Z. Beslic	Modellierung der Schadensdegradation Zahnradgrübchen bei Fahrzeuggetrieben
195	St. Jetter	Zuverlässigkeitsprognose mechanischer Komponenten auf Basis simulierter Betriebsfestigkeit
196	O. R. Orozco	Availability of Particle Accelerators: requirements, prediction methods and optimization
197	V. Schramm	Dependable System Development Methodology and Case Study for the LHC Beam Loss Monitoring System at CERN
198	J. Gröber	Zuverlässigkeitsanalyse neuartiger mechatronischer Systeme