

# **Ermittlung repräsentativer Lastkollektive zur Betriebsfestigkeit von Ackerschleppern**

Dem Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik  
der Technischen Universität Kaiserslautern  
zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)**

genehmigte

**Dissertation**

vorgelegt von

Herrn Dipl.-Ing. Christian Eckstein

aus Heppenheim

Tag der Einreichung: 03.05.2017

Tag der Verteidigung: 07.09.2017

Dekan: Prof. Dr.-Ing. Seewig

Prüfungsvorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Günthner

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Sauer

Prof. Dr. Franke

D 386



## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit bei der John Deere GmbH & Co.KG in Mannheim als Mitarbeiter des Product Engineering im Bereich Product Verifikation & Validation.

Mein ganz besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing B. Sauer, dem Lehrstuhlleiter des Instituts für Maschinenelemente und Getriebetechnik der technischen Universität Kaiserslautern, der mir als Doktorvater die Möglichkeit zur Promotion eröffnet hat und mich durch seine wertvollen Anregungen während der Durchführung meiner Arbeit stets freundlich und motivierend unterstützt hat.

Weiterhin bedanke ich mich bei Herrn Dr. M. Speckert für die anregende und kritische Durchsicht meiner Arbeit, sowie der sich daraus ergebenden wissenschaftlichen Anregungen und Verbesserungen. Mein Dank gilt ebenso Prof. Dr. Franke für die Durchsicht und Übernahme der Mitberichterstattung. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Günthner möchte ich mich für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission bedanken.

Ein besonderer Dank geht an die Herrn Dr.-Ing. P. Pirro und Dipl.-Ing. B. Wolf der Fachabteilung Product Verification & Validation der John Deere GmbH & Co.KG und an Herrn Dr. K. Dressler des Fraunhofer Instituts für Techno- und Wirtschaftsmathematik (ITWM), die mir durch die Schaffung einer Projektkooperation in deren Zuge diese Arbeit entstand, die Möglichkeit und das notwendige Vertrauen entgegen brachten.



Mein Dank gilt auch allen John Deere und Fraunhofer ITWM Mitarbeitern, die mich während der Anfertigung der Arbeit unterstützt haben. In besonderem Maße seien hier die Herrn Dr.-Ing. P. Back und Dipl.-Ing. M. Rimkus und Dipl.-Ing. W. Leutnecker für die wertvolle Unterstützung während der Messkampagne und Herrn Dr. M. Speckert und Frau Dr. A. Streit bei der Methodenentwicklung erwähnt.

In besonderem Maße möchte ich mich ebenfalls bei meiner Frau Kristina und bei meinen Eltern bedanken, die mich durch ihre große Unterstützung und ihr ausdauerndes Verständnis während der gesamten Arbeit angetrieben haben.

Kaiserslautern, September 2017



## Kurzfassung

Bei der Entwicklung moderner Landmaschinen besteht der Zielkonflikt zwischen Zuverlässigkeit und Dauerhaltbarkeit auf der einen Seite und Kosten- und Fahrzeugeffizienz auf der anderen Seite. Repräsentative Lastkollektive zur Beschreibung der Betriebsbelastungen im Nutzungsbetrieb sind dabei eine zentrale Forderung zur Dimensionierung von Bauteilen. Eine große Herausforderung besteht in der adäquaten Beschreibung der Nutzungsvariabilität einer Kundenpopulation und der Identifikation der kritischsten Kombination der Lastfälle.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Ermittlung und Erprobung eines Verfahrens zur Beschreibung der wirkenden Belastungen von Traktoren im Anwendungsbetrieb. Im Fokus steht die Ableitung repräsentativer Lastkollektive, die als Grundlage für Betriebsfestigkeitsprüfungen dienen. Inhaltlich basiert das eingesetzte Verfahren auf der systematischen Trennung der auftretenden Betriebszustände (Faktormodell) und deren Einsatzverteilung im Kundenbetrieb (Nutzungsmodell). Die im Faktormodell identifizierten Betriebszustände werden dabei durch repräsentative Lastmessungen im Kundenbetrieb beschrieben. Mittels Monte-Carlo-Simulation erfolgt die Erzeugung einer beliebigen Anzahl virtueller Nutzer auf Basis der definierten Randbedingungen des Nutzungsmodells. Die erzeugten Nutzer besitzen jeweils eine individuelle Einsatzverteilung und das Verfahren ordnet ihnen abhängig von der vorgegebenen Nutzungsdauer die Lastdaten der korrespondierenden Betriebszustände zu. Die ausgewählten Lastdaten werden entsprechend der spezifischen Einsatzverteilung in Form von Pseudo-Schädigungszahlen für die Ziellebensdauer des Fahrzeugs aufsummiert. Die ermittelten Gesamtschädigungen sind dabei als Maß für die Härte der Belastungen im Anwendungsbetrieb zu verstehen. Auf Basis der Verteilung der Gesamtschädigungen einer Nutzerpopulation erfolgt die Identifikation des Referenz- oder Auslegungsnutzers (z. B.: 95% oder 99% Quantil). Die hinter dem ausgewählten Nutzer steckende Kombination der Lastfälle ermöglicht die Berechnung von repräsentativen Lastkollektiven. Das Verfahren ist zur Ermittlung von Eingangsbelastungen für Prüfprozeduren und die numerische Betriebsfestigkeitssimulation nutzbar. Es eignet sich weiterhin zur Durchführung von Sensitivitätsstudien bei der Entwicklung neuer Fahrzeuge wie auch zur Identifikation von marktspezifischem Kostenreduzierungspotential.

---

## Abstract

For the development of modern tractors there is a conflict between reliability and durability on the one hand and cost and vehicle efficiency on the other hand. Important requirements for a sufficient component design are representative duty load cycles to describe the customer intended loads within the tractor life. A big challenge is the description of the usage variability within the customer population and the identification of the most critical customer usage.

Goal of this thesis is to determine a procedure to describe the acting loads on tractors within customer usage, focused on the derivation of representative duty load cycles as a baseline for durability verification. The developed procedure is based on the systematic separation of the existing customer applications (factor model) and their usage in terms of duration and frequency (usage model). The identified applications within the factor model are described by representative load measurements during customer operation. Based on a Monte-Carlo-Simulation a specific number of virtual users is created under consideration of the requirements of the usage model. The created users have an individual usage distribution and the process assigns the application specific load data to each user. The selected load data will be transferred to pseudo damage values and will be combined to a total damage value for each user. The total damage value of each user is referred to the life goal of the vehicle and is a variable to describe the severity of the applied loads of each user. Based on the total damage distribution of a user population the representative user (95% or 99% quantile) will be identified. The load sequence behind the selected user will be used to calculate a representative duty load cycle.

The process is useful to determine input loads for fatigue life calculations or to evaluate test procedures for components or structures. Furthermore the process is valid for sensitivity studies during the development of new vehicles and also for the identification of market specific cost reduction potential.

## Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Abkürzungen.....	IV
1 Einleitung.....	1
1.1. Motivation und Zielsetzung .....	2
1.2. Aufbau und Inhalt der Arbeit .....	3
2 Grundlagen und Stand der Forschung.....	5
2.1. Grundlagen der Betriebsfestigkeit .....	5
2.2. Stand der Forschung zur Ermittlung von Lastkollektiven .....	25
2.3. Bewertung der angewendeten Methoden.....	31
3 Konzept und Vorgehensweise .....	35
3.1. Grundlagen des Verfahrens.....	35
3.2. Definition der Einflussfaktoren .....	47
3.3. Definition des Nutzungsmodells .....	57
3.4. Übertragbarkeit und Anwendungsgrenzen .....	63
4 Fahrzeugmessungen.....	64
4.1. Versuchsfahrzeug .....	64
4.2. Instrumentierung des Versuchsträgers.....	65
4.3. Kundenbetriebe & Einsatzbedingungen .....	67
4.4. Messkampagne.....	69
4.5. Validierung der Rohdaten .....	71
5 Datenanalyse und Faktormodell .....	75
5.1. Datenanalyse .....	75
5.2. Schnittkriterien .....	76
5.3. Erforderliche Messdauer.....	82
5.4. Verifikation der Einflussfaktoren .....	90
5.5. Skalierung von Feldgrößen.....	96
5.6. Finales Faktor- und Nutzungsmodell.....	101
6 Ergebnisse der Nutzungssimulation.....	109
6.1. Ermittlung des repräsentativen Nutzertyps.....	109
6.2. Ableitung von Lastkollektiven .....	119
6.3. Anwendungsbeispiel .....	122
7 Zusammenfassung und Ausblick .....	134
Glossar .....	136
Anhang .....	140
Literaturverzeichnis .....	148

## Formelzeichen und Abkürzungen

### Lateinische Buchstaben:

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
$F$	N	Kraft
$A_0$	mm <sup>2</sup>	Ursprüngliche Querschnittsfläche
$\Delta l$	mm	Längenänderung
$L_0$	mm	Ursprüngliche Länge
$E$	N/mm <sup>2</sup> , -	Elastizitätsmodul, Erhöhungsfaktor (Zeichen abhängig vom Kontext)
$R_m$	N/mm <sup>2</sup>	Zugfestigkeit
$R_e$	N/mm <sup>2</sup>	Streckgrenze
$R_{p0,2}$	N/mm <sup>2</sup>	0,2% Dehngrenze
$S_D$	N/mm <sup>2</sup>	Spannungsamplitude an der Dauerfestigkeitsgrenze
$N_D$	-	Lastwechselzahl an der Dauerfestigkeitsgrenze
$S_o$	N/mm <sup>2</sup>	Oberspannung eines Schwingspiels
$S_m$	N/mm <sup>2</sup> , N, Nm	Mittelspannung eines Schwingspiels, Einheit abhängig vom Kontext
$S_u$	N/mm <sup>2</sup>	Unterspannung eines Schwingspiels
$S_a$	N/mm <sup>2</sup> , N, Nm	Spannungsamplitude eines Schwingspiels, Einheit abhängig vom Kontext
$\Delta S$	N/mm <sup>2</sup>	Schwingbreite eines Schwingspiels
$R$	-, %	Spannungsverhältnis eines Schwingspiels, Zuverlässigkeit (Zeichen abhängig vom Kontext)
$D$	-	Schädigungssumme über alle Laststufen
$d_i$	-	Schädigungssumme einer Laststufe
$n_i$	-	Erreichte Lastwechselzahl einer Laststufe
$N_i$	-	Erreichbare Lastwechselzahl einer Laststufe
$k$	-	Steigungskoeffizient der Wöhlerlinie
$S_e$	N/mm <sup>2</sup> , N, Nm	Lastamplitude bei statischem Bauteilversagen, Einheit abhängig vom Kontext
$t_M$	s	Messdauer eines Betriebszustandes
$t_N$	s	Nutzungsdauer eines Betriebszustandes
$S_T$	N/mm <sup>2</sup> , N, Nm	Spannungsamplitude - schädigungsäquivalente Ersatzlast, Einheit abhängig vom Kontext

$N_T$	-	Anzahl der Lastwechsel einer schädigungsäquivalenten Ersatzlast
$M$	-, Nm	Mittelspannungsempfindlichkeit, Moment (abhängig vom Kontext)
$f_B$	-	Beanspruchungsverteilung einer Nutzerpopulation
$F_F$	-	Festigkeitsverteilung einer Bauteilpopulation
$T$		Lageparameter der Weibullverteilung (Festigkeit)
$R$	%	Zuverlässigkeit
$L_V$	-	Lebensdauerverhältnis
$N$	-	Anzahl der Prüfteile
$L$	-	Prüfdauer
$q_0$	-	Auslegungsfestigkeit
$p_i$	%	Mittelwerte der Betriebszustände „i“ der Randverteilung
$w_i$	%	Einsatzzeit (Gewicht) eines Lastfalls „i“ eines Nutzes
$X$	-	Extrapolationsfaktor
$Var$	-	Varianz
$Q_R$	-	auf Referenzdauer normierte Schädigungssumme
$Q_i$	-	auf Messdauer normierte Schädigungssumme
$Z$	-	Anzahl der Messungen des Nutzerzyklus
$D_{AZ}$	-	Schädigungssumme eines Arbeitszyklus
$Q_{AZ}$	-	auf Dauer des Arbeitszyklus normierte Schädigungssumme
$V$	s	Variabilität
$VarK$	-	Variationskoeffizient
$P$	W	Leistung
$n$	U/min	Umdrehungszahl
$m$	kg	Masse
$g$	m/s <sup>2</sup>	Gravitationskonstante
$\widehat{S}_a$	-	Kollektivhöchstwert
$H(x)$	-	Anzahl der Überschreitungen eines Horizonts
$H_0$	-	Kollektivumfang
$x$	-	Normierte Spannungsamplitude
$e$	-	Extrapolationsfaktor
$D_{skal}$	-	Pseudo-Schädigungszahl der skalierten Segmentlänge

$D_{Seg}$	-	Pseudo-Schädigungszahl der ursprünglichen Segmentlänge
$D_{B_1}$	-	Pseudo-Schädigungszahl ohne Residuum der ersten Bahn des ursprünglichen Segments
$D_{B_2}$	-	Pseudo-Schädigungszahl ohne Residuum der zweiten Bahn des ursprünglichen Segments
$SF$	-	Skalierungsfaktor aus vorhandener und gewünschter Bahnlänge
$l_{skal}$	m	Skalierte Bahnlänge eines Segments
$l_{Bl}$		Ursprüngliche Bahnlänge eines Segments
$W_B$	mm <sup>3</sup>	Widerstandsmoment gegen Biegung
$d$	mm	Durchmesser
$r$	mm	Radius
$W_\tau$	mm <sup>3</sup>	Widerstandsmoment gegen Torsion
$M_B$	Nm	Biegemoment
$M_\tau$	Nm	Torsionsmoment

**Griechische Buchstaben:**

<b>Zeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bezeichnung</b>
$\sigma$	N/mm <sup>2</sup>	Mechanische Spannung
$\varepsilon$	-	Dehnung
$\tau$	N/mm <sup>2</sup>	Schubspannung
$\alpha$	Pa, %	Materialkonstante, Signifikanz, Einheit je nach Kontext
$\gamma$	%	Ausfallrate
$\beta$	-	Formparameter der Weibullverteilung
$\alpha_k$	-	Kerbformzahl
$\mu$	-	Erwartungswert
$\sigma_i$	-	Standardabweichung der Betriebszustände „i“ der Randverteilung
$\eta$		Wirkungsgrad
$\nu$	-	Parameter für veränderliche Kollektivform
$\sigma_B$	N/mm <sup>2</sup>	Biegespannung
$\sigma_\tau$	N/mm <sup>2</sup>	Biegespannung

**Abkürzungen:**

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
<i>PKW</i>	Personenkraftwagen
<i>ITWM</i>	Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik
<i>MKS</i>	Mehrkörpersimulation
<i>BZF</i>	Belastung-Zeit-Funktion
<i>DMS</i>	Dehnungsmessstreifen
<i>NSH</i>	Normalspannungshypothese
<i>SSH</i>	Schubspannungshypothese
<i>GEH</i>	Gestaltänderungshypothese
<i>U-Sim</i>	Usage Simulation
<i>VDA</i>	Verband der Automobilindustrie
<i>PPM</i>	Parts per Million
<i>IPM</i>	Intelligent Power Management
<i>PTO</i>	Power Torque Operation
<i>RMS</i>	Root Mean Square
<i>SRI</i>	Speed Radius Index

## 1 Einleitung

Ständig steigende Anforderungen in der modernen Landwirtschaft stellen Traktorenhersteller vor große Herausforderungen. Eine zeitgemäße Landmaschine ist nicht nur mit modernsten Datenerfassungssystemen zur Optimierung der Feldarbeit ausgerüstet, sondern erfüllt ebenfalls hohe Anforderungen was Komfort und Einsatzmöglichkeiten betrifft. Weiterhin hat der strukturelle Wandel in der Landwirtschaft hin zu Großbetrieben, zur Sicherstellung der wirtschaftlichen Konkurrenzfähigkeit, das Anforderungsprofil an einen Traktor nachhaltig verändert. Aufgrund der Betriebsgröße sind weite Transportwege zurückzulegen, so dass der Traktor nicht nur als landwirtschaftliche Zugmaschine eingesetzt wird, sondern mehr und mehr als Transportfahrzeug. Dadurch ist bei Traktoren ein Trend hin zu größeren Motorleistungen, zunehmend höheren Betriebsstundenzahlen und ein Anstieg der zulässigen Höchstgeschwindigkeit festzustellen. Weiterhin treiben der fortwährend steigende Kostendruck, die hohen Effizienzanforderungen und die verschärften Emissionsgesetze die Hersteller zu immer kürzeren Entwicklungszyklen, um die aktuellen Regularien und Kundenwünsche zu erfüllen.

Die beschriebenen Zusammenhänge konfrontieren die Hersteller von Traktoren mit der Herausforderung, technisch leistungsfähige Systeme in stark verkürzten Entwicklungszyklen zur Serienreife zu führen. Zur Steigerung der Effizienz und Schaffung höherer Zuladungen nehmen moderne Entwicklungsmethoden unter Berücksichtigung des Leichtbauprinzips und der Einsatz der numerischen Betriebsfestigkeitssimulation eine zentrale Rolle ein. Den der Prüfvorschrift zugrunde liegenden Lastkollektiven kommt dabei eine entscheidende Bedeutung zu. Denn Bauteiloptimierung kann nicht nur durch geeignete konstruktive Maßnahmen (Materialauswahl & Bauteilgeometrie) erfolgen, sondern ebenfalls durch Verringerung des Sicherheitsabstandes zwischen Bauteilbelastung und deren Belastbarkeit. Bestehende herstellereigenspezifische Prüfprozeduren sind oftmals durch langjährige Erfahrungen gewachsen und haben ihre Tragfähigkeit über zahlreiche Serienfreigaben unter Beweis gestellt. Unbekannt ist in diesem Zusammenhang häufig der Sicherheitsabstand zwischen Prüfvorschrift und der Beanspruchungsverteilung im Nutzungsbetrieb. Die Dimensionierung nach repräsentativen Lastkollektiven erfordert jedoch die adäquate Kenntnis der im Nutzungsbetrieb



auftretenden Betriebsbelastungen. Es ist daher notwendig die wirkenden Einflussfaktoren auf die Fahrzeugbelastungen zu identifizieren, um daraus in geeigneter Weise Lastkollektive abzuleiten.

Aufgrund des großen Einsatzspektrums von Ackerschleppern ist der Aufwand nur durch den Einsatz weiterentwickelter Berechnungsverfahren zu bewältigen, um die Ausfallsicherheit von Bauteilen nicht zu gefährden. Aktuelle Untersuchungen zeigen, dass dieser Schritt bei der Entwicklung von Straßenfahrzeugen bereits erfolgt ist und die entwickelten Verfahren produktiv eingesetzt werden [1, 2, 3, 4]. Aufgrund der großen Nutzungsvariabilität von Traktoren ist der Nachweis der Einsatzfähigkeit dieser Berechnungsverfahren im Bereich landwirtschaftlicher Nutzfahrzeuge noch zu erbringen.

### **1.1. Motivation und Zielsetzung**

Die Verfügbarkeit von realen Eingangsbelastungen zur Beurteilung der Bauteillebensdauer ist im Produktentwicklungszyklus von großer Wichtigkeit. Durch die numerische Betriebsfestigkeitssimulation ist das Bauteilverhalten in der frühen Phase der Produktentwicklung abschätzbar, womit eventuelle Schadensbilder direkt eliminiert werden können. Das vermeidet aufwendige und kostenintensive Iterationsschleifen.

Die Motivation dieser Arbeit begründet sich darin, die vorhandenen Verfahren zur Erstellung von Lastkollektiven zu untersuchen und zur Beschreibung von repräsentativen Lastkollektiven für Traktoren einzusetzen. Als Ergebnis soll ein Verständnis der vorherrschenden Einflussparameter in Bezug auf die ermittelten Betriebslasten erarbeitet werden. Als Grundlage zur Ableitung repräsentativer Lastkollektive dient die kritischste Kombination der Lastfälle innerhalb einer Nutzerpopulation, welche die höchste Belastungsintensität am Bauteil aufweist. Aufgrund der großen Nutzungsvariabilität bei Traktoren wäre eine konventionelle Untersuchung all dieser Zustände nur mit erheblichem Ressourceneinsatz zu bewältigen, da viele tausend Nutzer und deren Einsatzverhalten zu erfassen wäre. Derartige Aufwände sind im Entwicklungsprozess nicht umsetzbar. Die Ziele der Arbeit sind nachfolgend stichpunktartig formuliert:

- Untersuchung und Bewertung bestehender Ansätze zur Erstellung von Lastkollektiven in der Fahrzeugtechnik

- Beschreibung der charakteristischen Einsatzzustände von Ackerschleppern unter Berücksichtigung der vorherrschenden Einflussfaktoren (z. B.: Arbeitsgeräte, Einsatzbedingungen, etc. )
- Ermittlung fahrzeugspezifischer Einsatzprofile im Kundenbetrieb
- Messung charakteristischer Eingangsbelastungen des Fahrzeugs im Kundenbetrieb
- Untersuchung und Bewertung der statistischen Sicherheit der aufgezeichneten Lastdaten
- Statistische Betrachtung und Bewertung der Einflussfaktoren (z. B.: Signifikanzniveau und Abhängigkeiten) zur Erstellung einer qualifizierten Einflussgrößenliste und Definition eines finalen Faktormodells
- Identifikation der kritischsten Kombination der Lastfälle im Nutzungsbetrieb und Erstellung von repräsentativen Lastkollektiven für ausgewählte Strukturkomponenten des Traktors

## 1.2. Aufbau und Inhalt der Arbeit

Die Arbeit ist inhaltlich nach folgenden Kapiteln aufgebaut:

Das Kapitel **Stand der Forschung** leitet mit einem Abriss zum Thema Betriebsfestigkeit und zur Erstellung von Lastkollektiven ein. Im Fokus stehen Methoden und Verfahren die im Bereich der Fahrzeugtechnik zum Einsatz kommen. Zusätzlich dazu sind Informationen zur Einsatzverteilung von Traktoren zusammengestellt.

Im Kapitel **Konzept und Vorgehensweise** ist das Verfahren zur Beschreibung der Belastungen im Nutzungsbetrieb und zur Identifikation der kritischsten Kombination der Lastfälle erläutert. Zentraler Punkt ist die systematische Untersuchung der wirkenden Einflussfaktoren auf die Belastungen im Fahrzeugeinsatz zur Erstellung eines qualifizierten Faktor- und Nutzungsmodells.

Das Kapitel **Fahrzeugmessungen** gibt einen Überblick zum eingesetzten Versuchsträger und dessen Instrumentierung. Weiterhin werden die ausgewählten Kundenbetriebe und deren vorherrschende Einsatzbedingungen innerhalb der Messkampagne vorgestellt. Abschließend erfolgt eine Plausibilitätsprüfung der gemessenen Rohdaten.

---

Im Kapitel **Datenanalyse und Faktormodell** werden Verfahren zur Validierung und Verarbeitung der gemessenen Lastdaten vorgestellt. Unter Einsatz statistischer Verfahren werden die gemessenen Betriebslasten genutzt, um die identifizierten Einflussfaktoren zu validieren. Einflussfaktoren mit signifikanter Auswirkung im Belastungsspektrum werden in einem finalen Faktormodell zusammengefasst. Abschließend erfolgt die finale Beschreibung der Einsatzverteilung im Nutzungsmodell.

Das Kapitel **Ergebnisse der Nutzungssimulation** beschreibt die Vorgehensweise der Nutzungssimulation anhand des definierten Faktor- und Nutzungsmodells des Versuchsfahrzeugs und der gemessenen Lastdaten an ausgewählten Lasteinleitungspunkten. Auf Basis der ermittelten Belastungsverteilung im Nutzungsbetrieb erfolgt die Identifikation des Auslegungsnutzer (z. B.: 95% Nutzer). Die hinter dem Auslegungsnutzer steckende Kombination der Lastfälle beschreibt die belastungsintensivste Lastfolge und dient zur Berechnung von repräsentativen Lastkollektiven an ausgewählten Lasteinleitungspunkten. Abschließend wird das erarbeitete Verfahren an einem konkreten Anwendungsbeispiel auf Bauteilebene eingesetzt.

Die Arbeit schließt mit dem Kapitel **Zusammenfassung und Ausblick**. Im Kapitel sind abschließend die zentralen Ergebnisse der Arbeit beschrieben und weiteres Untersuchungspotential aufgezeigt.

## 2 Grundlagen und Stand der Forschung

In der wissenschaftlichen Forschung gibt es aus verschiedenen Richtungen Ansätze zur Prüfung der Betriebsfestigkeit. Die Dimensionierung durch repräsentative Lastkollektive gewinnt in der heutigen Zeit jedoch mehr und mehr an Einfluss. Im vorliegenden Kapitel sind zunächst die Grundlagen zur Beurteilung der Betriebsfestigkeit zusammengefasst, gefolgt vom aktuellen Stand der Forschung zur Ermittlung repräsentativer Lastkollektive bei Nutzfahrzeugen. Abschließend erfolgt eine Bewertung der beschriebenen Verfahren.

### 2.1 Grundlagen der Betriebsfestigkeit

Die Qualifikation von Fahrzeugkomponenten und -strukturen gegen einen Betriebsfestigkeitsausfall gilt als ein zentrales Thema der Produktverifikation. Es gilt Gefahren für Mensch und Umwelt zu vermeiden und es dient zur Absicherung gegen Regressansprüche im Schadensfall. Das Ziel einer Bauteilauslegung nach den Grundsätzen der Betriebsfestigkeit ist in zweifacher Hinsicht vorgegeben: Zum einen gilt es, ein vorzeitiges Bauteilversagen durch Schwingbruch oder gefährlichen Schwinganriss mit der gebotenen Sicherheit auszuschließen, zum anderen soll diese vorrangige Forderung ohne Überbemessung der Querschnitte und ohne unnötigen Fertigungsaufwand auf wirtschaftliche Weise erfüllt werden [5]. Ziel und Pflicht der Betriebsfestigkeit muss es sein, ein nach dem Stand der Technik statisch und dynamisch ausgelegtes Bauteil zu dimensionieren. Grundsätzlich sind Komponenten nach einem statischen Festigkeitsnachweis oder einem Schwing- oder Betriebsfestigkeitsnachweis, welcher die dynamischen Lasten berücksichtigt, auszulegen.

Statisch beanspruchte Bauteile werden überwiegend nach dem Nennspannungskonzept ausgelegt. Der dabei auftretende Belastungsfall definiert sich aus den Grundbeanspruchungen (Zug-Druck, Biegung, Torsion oder Schub) und ist gegenüber einer zulässigen Beanspruchungsgröße des Bauteils zu vergleichen. Zulässige Kennwerte basieren auf der Bauteilfestigkeit (z. B.: Streckgrenze  $R_e$  oder Zugfestigkeit  $R_m$ ). Vorliegende Richtlinien zur Bauteildimensionierung im statischen und dynamischen Lastfall, wie beispielsweise die FKM-Richtlinie [6] konkretisieren die Vorgehensweisen. Grundsätzlich gilt der Zugversuch für die statische Bemessung als wichtigster Lastfall,

denn aus dem Zugversuch werden wichtige Werkstoffkennwerte zur Bauteildimensionierung gewonnen, wie das Festigkeits- und Dehnungsverhalten. Die während des Zugversuchs aufgebrauchten Kräfte bewirken eine Längenänderung an der Werkstoffprobe (Normzugstab), wodurch die Spannungs-Dehnungs-Kurve des Werkstoffs ermittelt wird. Die in der Zugprobe erzeugte Spannung  $\sigma$  berechnet sich aus der angreifenden Kraft  $F$  bezogen auf die Ausgangsfläche  $A_0$  nach Gleichung (2-1).

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2-1)$$

Die Nenndehnung  $\varepsilon$  ist nach Gleichung (2-2) definiert als gemessene Längenänderung  $\Delta l$  der Zugprobe bezogen auf die Ausgangslänge  $L_0$ :

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{L_0} \quad (2-2)$$

Abbildung 2-1 stellt typische Spannungs-Dehnungs-Verläufe für metallische Werkstoffe dar.

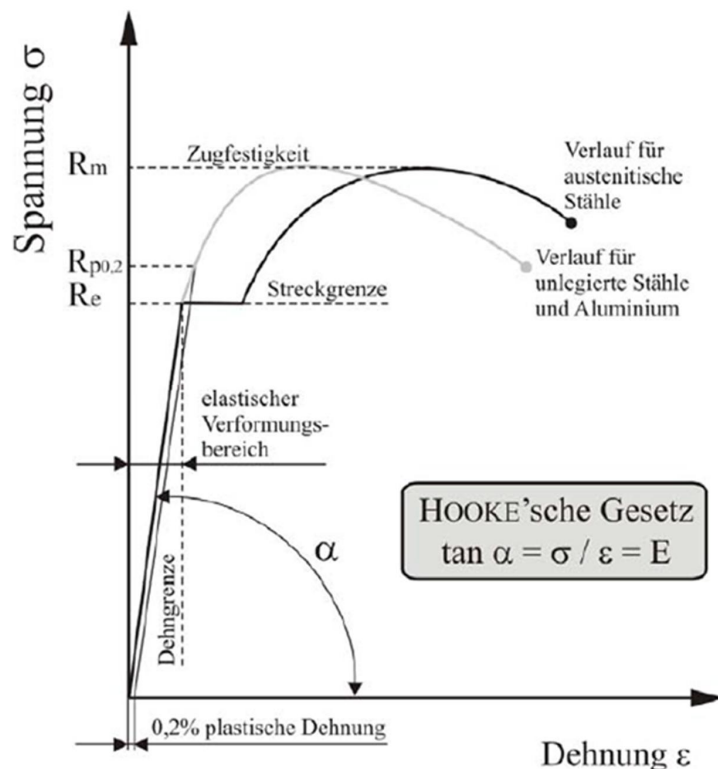


Abbildung 2-1: Spannungs-Dehnungs-Diagramm [7]

Der lineare Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung bis hin zur Streckgrenze ist von zentraler Bedeutung für die Bauteilkonstruktion. Der aus Spannung  $\sigma$  und Dehnung  $\varepsilon$  ermittelte E-Modul  $E$  für den linear elastischen Bereich ist ein Kennwert für den Widerstand gegen reversible Verformung des Bauteils. Die Zusammenhänge nach Gleichung (2-3) werden als Hook'sches Gesetz bezeichnet.

$$\sigma = E * \varepsilon \quad (2-3)$$

Die ermittelten statischen Werkstoffeigenschaften dienen schon in der frühen Phase des Entwicklungsprozess als Auslegungsgrundlage, um eine optimale Bauteilgeometrie entsprechend des statischen Belastungsfalls zu konstruieren.

Schwingend beanspruchte Bauteile sind nach den Kriterien der Schwing- oder Betriebsfestigkeit zu dimensionieren. Die Nachweisführung kann rechnerisch oder experimentell erfolgen. Die grundlegenden Zusammenhänge und der Gültigkeitsbereich der Kriterien der Betriebsfestigkeit sind in Abbildung 2-2 zusammengefasst. Dabei beschreibt die Spannungs-Dehnungs-Kurve die Werkstoffkennwerte, wie die Zugfestigkeit  $R_m$  (a) und die Streckgrenze  $R_e$  (e) als oberen Grenzwert der Beanspruchung, welche bei einmaliger Belastung zum Versagen beziehungsweise plastischer Deformation führen. Die Dauerfestigkeit liefert dagegen einen unteren Grenzwert der Beanspruchung (b), unterhalb deren Lasthöhe eine schwingende Beanspruchung länger ertragbar ist als es die Anwendung erfordert. Schwingbeanspruchungen oberhalb der Dauerfestigkeit (c), führen nach einer endlichen Zahl von Lastwechseln zum Versagen oder Bruch eines Bauteils. Der Ausfall des Bauteils tritt umso früher ein, je höher die Beanspruchung ist. Für Bauteile mit konstanter Beanspruchung sind die Zusammenhänge durch die Zeitfestigkeitslinie beschrieben.

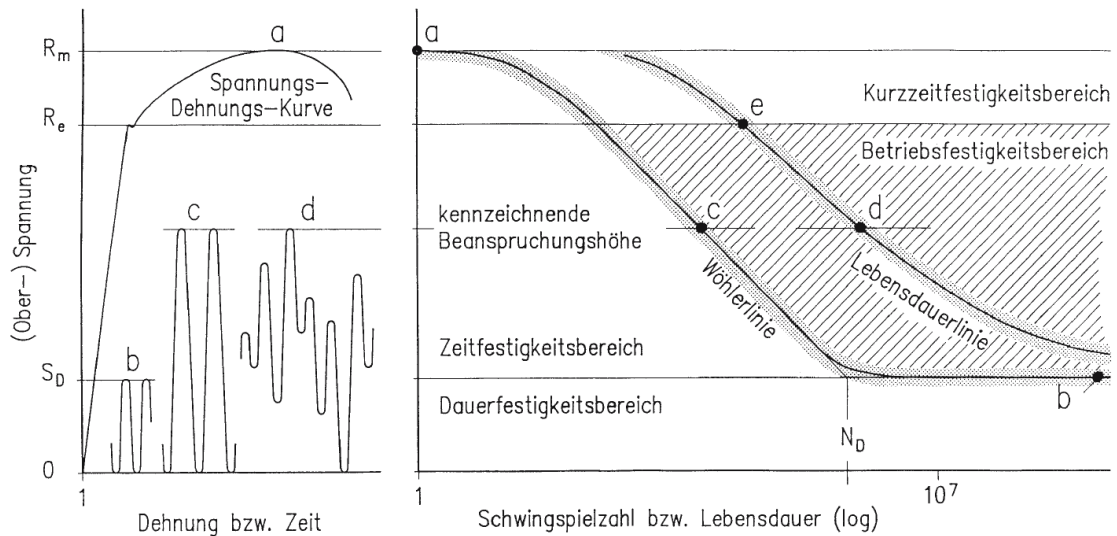


Abbildung 2-2: Grundlegende Begriffe und Zusammenhänge der Bauteilbeanspruchung in Bezug auf die Betriebsfestigkeit [5]

Die Zeitfestigkeitslinie wird auch als Wöhlerlinie bezeichnet. Eine Wöhlerlinie erstreckt sich somit von der Zugfestigkeit über die Zeitfestigkeit bis hin zur Dauerfestigkeit. Bei Auftreten einer Schwingbeanspruchung mit nicht periodischer, sondern zufallsartiger Beanspruchungsfolge (d) wird die ertragbare Schwingzahl der Wöhlerlinie überschritten. Die sogenannte Lebensdauerlinie beschreibt dabei die Abhängigkeit von maximaler Beanspruchung und endlicher Lebensdauer eines Bauteils. Die Lebensdauerlinie kann experimentell bestimmt werden oder durch Simulation von der Wöhlerlinie abgeleitet werden. Wie stark sich die Lebensdauerlinie von der Wöhlerlinie absetzt, ist abhängig von der Beanspruchungs-Zeit-Funktion (BZF) und dem daraus abgeleiteten Beanspruchungskollektiv. Die Wöhlerlinie beschreibt somit den unteren Grenzfall aller Lebensdauerlinien. Die Lage der Lebensdauerlinie kann weiterhin durch die Mittelspannung oder durch die Reihenfolge der Schwingspiele beeinflusst werden. Abhängig von Beanspruchungsamplitude und erreichter Schwingzahl ist die Schwingfestigkeit in drei Bereiche kategorisiert: Kurzzeitfestigkeit (circa  $5 \cdot 10^4$  Schwingspiele), Zeitfestigkeit (circa  $5 \cdot 10^4$  bis  $2 \cdot 10^6$  Schwingspiele) und Dauerfestigkeit ( $> 2 \cdot 10^6$  Schwingspiele). Die Kenngrößen zur Charakterisierung dynamischer Beanspruchung sind in Abbildung 2-3 dargestellt. Die Grenzwerte eines Schwingspiels

werden dabei als Oberspannung  $S_o$  und Unterspannung  $S_u$  bezeichnet. Weitere Kennwerte sind die Schwingamplitude  $S_a$ , die Mittelspannung  $S_m$ , das Spannungsverhältnis  $R$  und die Schwingbreite  $\Delta S$ .

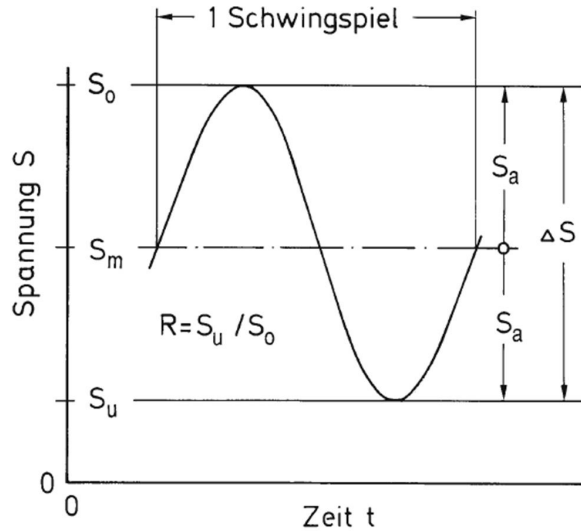


Abbildung 2-3: Kennwerte eines Schwingenspiels [5]

Als Maßzahl für die Beanspruchung kann nicht nur die Normalspannung dienen, sondern auch Schubspannungen, Dehnungen, Kräfte oder Momente. Abhängig von der Mittelspannung und je nach Lage des Spannungsverhältnisses wird die Beanspruchung in folgende Kategorien nach Abbildung 2-4 unterteilt.

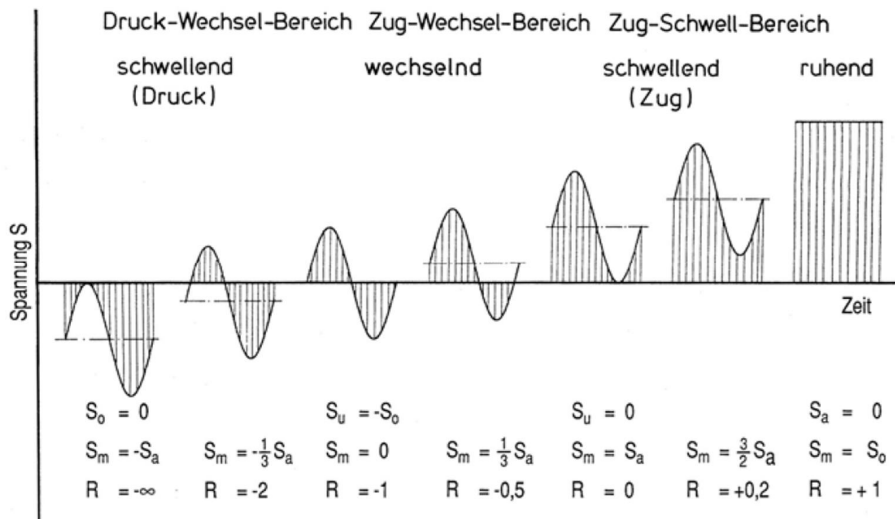


Abbildung 2-4: Beanspruchungsfälle und deren Spannungsverhältnis [5]



Die Dimensionierung von dynamisch belasteten Bauteilen ist somit abhängig von der äußeren Belastung des Bauteils, von der Werkstoffauswahl und der Konstruktion des Bauteils. Bei der Auslegung schwingend beanspruchter Bauteile erfolgt die Gegenüberstellung von Beanspruchung (Beanspruchungskollektiv) und Beanspruchbarkeit (Bauteil-Wöhlerlinie). Die Ermittlung der Beanspruchung erfolgt durch Lastmessungen der vorherrschenden Betriebszustände und durch Ableitung des Beanspruchungskollektivs. Die Bauteilwöhlerlinie ist rechnerisch oder experimentell am Bauteil zu ermitteln. Eine experimentelle Ermittlung erfolgt meist durch einstufige Schwingversuche bis zum Versagen der Probe. Diese Versuche werden auf mehreren Lasthorizonten durchgeführt. Die Wöhlerlinie beschreibt somit die statistische Ausfallwahrscheinlichkeit bei einem bestimmten Belastungsniveau beziehungsweise die ertragbare Schwingspielzahl bis zum Versagen. Die Nachweisführung muss zeigen, dass zwischen Beanspruchung und Festigkeit des Bauteils ein notwendiger Sicherheitsabstand besteht. Grundsätzlich ist zu beachten, dass sich die Werkstoffstruktur dynamisch belasteter Bauteile während der Belastungsdauer verändert. Die Fähigkeit des Werkstoffs Schwingspiele elastisch und damit reversibel zu ertragen, wird geringer, der Werkstoff ermüdet und es kommt zum Versagen. Für die Berechnung der Lebensdauer stehen in den Dimensionierungsrichtlinien drei Konzepte zur Verfügung:

- 1.) Nennspannungskonzept
- 2.) Örtliches Konzept (genannt Kerbspannungs- oder Kerbdehnungskonzept)
- 3.) Rissfortschrittskonzept

Die genannten Konzepte sind in der einschlägigen Fachliteratur [5] [8] ausführlich beschrieben, weshalb hier nicht näher darauf eingegangen wird. Aufgrund der komplexen Handhabung des örtlichen Konzepts und des Rissfortschrittskonzepts ist in den aktuellen Normen häufig das Nennspannungskonzept dominierend. Alle Lebensdauerkonzepte beziehen sich überwiegend auf den einaxialen Lastfall, konstante Belastungsamplituden sowie den technischen Anriss als zentrales Versagenskriterium. Eine Bewertung der Mittelspannung hinsichtlich der Ermüdungsschädigung erfolgt durch Diagramme oder Schädigungsparameter. Die Definition des technischen Anrisses lautet folgendermaßen:

*„Als technischer Anriss gilt ein Riss, der mit betrieblich anwendbaren, üblichen Inspektionsverfahren vor Ort detektierbar ist.“* [9]

Zur Handhabung der im realen Fall häufig vorkommenden mehraxialen Spannungszustände kommen entsprechende aus der technischen Mechanik bekannte Hypothesen zur Transformation auf den einaxialen Spannungszustand zum Tragen. Die jeweiligen Hypothesen sind mittels der Gleichungen (2-4) bis (2-6) beschrieben [7].  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  beschreiben die jeweiligen Hauptspannungen.

- Normalspannungshypothese (NSH):

$$\sigma_V = \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3 \quad (\text{betragsgrößte Spannung}) \quad (2-4)$$

- Schubspannungshypothese (SSH):

$$\sigma_V = 2 \times \tau_{max} = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (2-5)$$

- Gestaltänderungshypothese (GEH):

$$\sigma_V = \sqrt{\frac{1}{2} * [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (2-6)$$

Die Hypothesen führen bei zyklischer Belastung und abhängig vom Belastungspfad nicht immer zu befriedigenden Ergebnissen. Teilweise sind erhebliche Unterschiede zwischen berechneter und experimentell ermittelter Lebensdauer feststellbar.

Grundsätzlich werden Einflüsse, die von außen auf ein Bauteil wirken, als äußere Belastung bezeichnet. Die wirkenden Belastungen können mechanischer, thermischer, chemischer oder anderen physikalischen Ursprungs sein. Die am Bauteil wirkenden Belastungen erzeugen im Werkstoff Beanspruchungen, die als Spannungen und Dehnungen auftreten. Grundlegende Voraussetzung für die betriebsfeste Auslegung von Bauteilen ist die Kenntnis der Betriebsbelastungen. Die am Bauteil vorherrschenden Belastungs-Zeit-Funktionen (BZF) treten im Fall dynamischer Belastung üblicherweise in regelloser, stochastischer Form auf. Mittels gemessener BZF, wie angreifender Kräfte oder Momente, erfolgt die Ableitung der für den Betrieb charakteristischen Betriebslastkollektive. Zur Transformation der BZF in Lastkollektive kommen sogenannte Klassier- oder Zählverfahren zur Anwendung. Ihnen gemeinsam ist, dass Informationen über die Signalform, die Frequenz sowie die Reihenfolge des Auftretens von Ereignissen verloren gehen. In der Betriebsfestigkeit interessieren jedoch in erster Linie Belastungshöhe und deren Häufigkeit.

Bei den Zählverfahren ist zwischen ein- (z. B.: Spitzenzählung) oder zweiparametrischen (z. B.: Rainflow-Zählung) Zählalgorithmen zu unterscheiden. Ein ausführlicher Überblick zu Spannungs-Dehnungs-Hysteresen und den zugehörigen Zählverfahren ist in der ausgewiesenen Fachliteratur [10] dargestellt. Heutzutage ist vor allem die Rainflow-Zählung in der praktischen Anwendung weit verbreitet. Die Rainflow-Zählung kommt ebenfalls in der vorliegenden Arbeit zum Einsatz, daher sind die Funktionsweise und die Darstellungsformen der Zählergebnisse nachfolgend beschrieben. Bei der Rainflow-Zählung ist der Algorithmus so gewählt, dass jeweils geschlossene Hysteresen der BZF erfasst werden. Nicht geschlossene Hysteresen werden im Residuum abgelegt. Detaillierte Informationen zur Residuumsbehandlung sind ebenfalls in der Fachliteratur [11] zu finden. Die Zählergebnisse werden in Matrizenform dargestellt. Eine Grundvoraussetzung bei Zählverfahren ist die Einteilung der BZF in Klassen gleicher Größe. Die Klassen sind fortlaufend in Richtung positiver Messgrößen zu nummerieren. Die Klassenbreite und die Rückstellbreite sind in einem sinnvollen Verhältnis zur Messgenauigkeit zu wählen. Vorliegende Quellen empfehlen Rückstellbreiten kleiner 2,5% des Messbereichs [10]. Aus historischen Gründen werden oft 64 Klassen verwendet. Die Grundidee des Algorithmus beschreibt das „Regenfließen“ über die Umkehrpunkte eines Schwingenspiels wie in Abbildung 2-5 dargestellt. Dabei ist die Zeitachse um 90° gedreht zu betrachten.

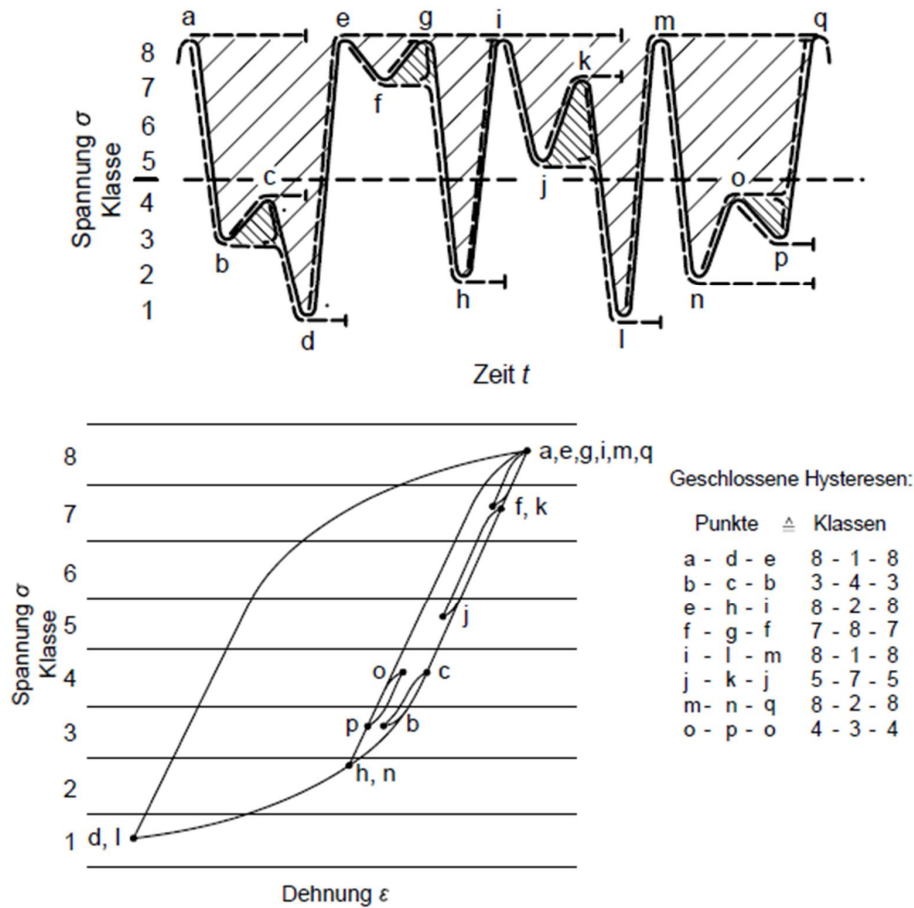


Abbildung 2-5: Vorgehensweise bei der Rainflow-Zählung und deren Zusammenhänge mit Spannungs-Dehnungs-Hysteresen in einem Bauteil [10]

Beispielhaft für eine geschlossene Hysterese ist in Abbildung 2-5 die schraffierte Fläche a-d-e zu betrachten, dabei werden die Klassen 8-1-8 durchlaufen oder das Schwingspiel b-c-b mit den Klassen 3-4-3. Der Erfolg der Rainflow-Zählung ist in der werkstoff-mechanischen Analogie begründet und beschreibt den Spannungs-Dehnungs-Verlauf innerhalb eines Bauteils. Zur Erkennung geschlossener Hysteresen werden sogenannte Drei- oder Vier-Punkt-Algorithmen eingesetzt. Dies bedeutet, dass jeweils drei oder vier Umkehrpunkte zwecks geschlossener Hysteresen untersucht werden. Die Verfahren unterscheiden sich jedoch in der Behandlung von Residuen. Abbildung 2-6 zeigt die unterschiedlichen, charakteristischen Darstellungsmöglichkeiten des Zählergebnis.

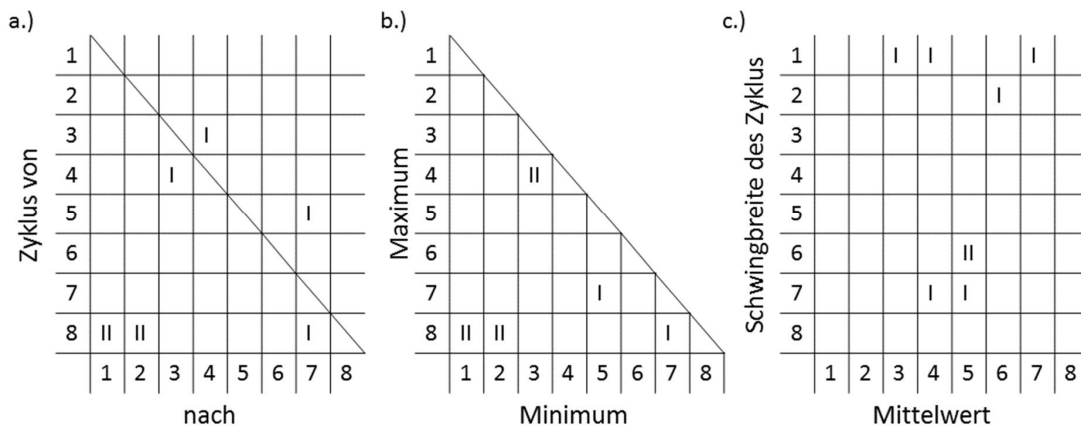


Abbildung 2-6: Mögliche Darstellungsformen der Rainflow-Matrix [10]

- Vollmatrix: Zyklen sind mit Minima und Maxima entsprechend ihrer Auftretensrichtung eingetragen.
- Halbmatrix: Zyklen sind mit Minima und Maxima angegeben. Es liegt keine Information über die Richtung in der die Zyklen durchlaufen wurden vor.
- Vollmatrix: Zyklen sind mit Schwingbreite und Mittelspannung eingetragen. Diese Zählung entspricht der Bereichspaar-Mittelwert-Zählung. Ohne Berücksichtigung der Mittelwerte ergibt sich die Bereichspaar-Zählung.

Die Rainflow-Zählung bietet außerdem die Möglichkeit der Superposition mehrerer Zählungen zu einer Gesamtmatrix [11]. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden die Zählergebnisse häufig in einparametrische Darstellungen, wie die Bereichspaar- oder Spannenpaar-Zählung überführt. Dabei ist gewährleistet, dass der maximale Informationsgehalt vorliegt, aber die Vorteile der Übersichtlichkeit der einparametrischen Zählverfahren genutzt werden.

Grundlegend gilt beim Betriebsfestigkeitsnachweis, dass jede schwingende Beanspruchung im Werkstoff eine Teilschädigung hervorruft, die sich im Laufe ihrer Wirkung aufsummiert („akkumuliert“) und zwar bis zum Erreichen eines kritischen Schädigungswerts. Ist dieser Wert erreicht, tritt theoretisch Bauteilversagen ein. Bei der Schädigungsakkumulation wird von der Ermüdungsfestigkeit eines Bauteils bei einstufiger Beanspruchung unter konstanter zyklischer Belastung auf die Ermüdungsfestigkeit bei mehrstufiger Beanspruchung unter variierender dynamischer Belastung geschlossen.

Da Fahrzeugbelastungen im Regelfall nicht ideal zyklisch auftreten, sondern als regellose stochastische BZF, besteht durch den Einsatz der Schadensakkumulationshypothese nun die Möglichkeit die Bauteillebensdauer zu bestimmen und Bemessungsgrundlagen für Betriebsfestigkeitsuntersuchungen festzulegen. Als Eingangsgrößen dienen die einwirkende Schwingbeanspruchung, nach Größe und Häufigkeit im Beanspruchungskollektiv beschrieben, und die Schwingfestigkeit, gekennzeichnet durch die Wöhlerlinie, wie in Abbildung 2-7 dargestellt.

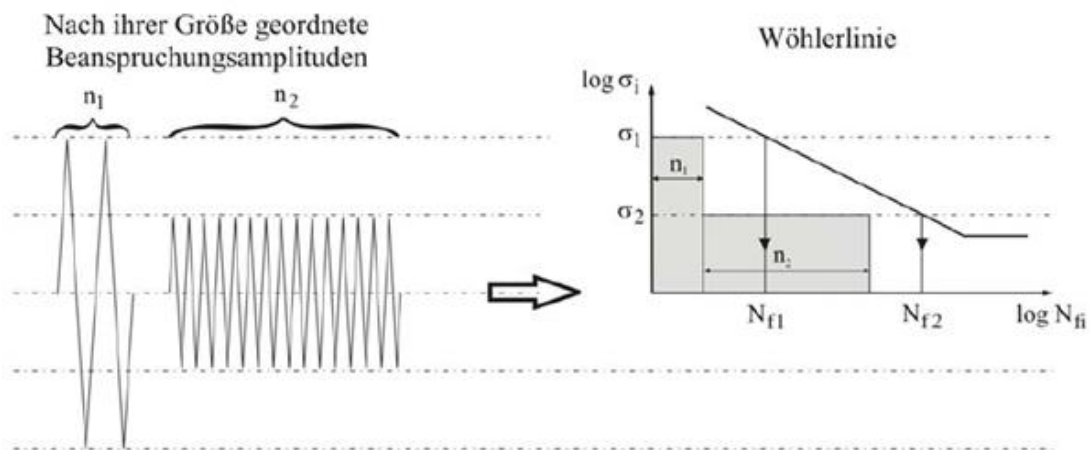


Abbildung 2-7: Darstellung der linearen Schadensakkumulation [12]

Bei der linearen Schadensakkumulationshypothese nach Miner [13, 14] bewirkt jede schwingende Beanspruchung des Werkstoffs eine Teilschädigung. Die aufgetragenen Teilschädigungen  $d_i$  sind unabhängig voneinander und werden zu einer Gesamtschädigung  $D$  aufsummiert. Dabei werden die aufgetragenen Lastzyklen einer spezifischen Schwingamplitude  $n_i$  in Beziehungen zu der theoretisch möglichen Zyklenzahl  $N_i$  der Wöhlerlinie gesetzt und das Verhältnis gebildet. Erreicht die Schädigungssumme  $D$  den Wert 1 tritt theoretisch Bauteilversagen ein.

$$D = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \dots + \frac{n_i}{N_i} = \sum_{i=1}^j \frac{n_i}{N_i} = \sum_{i=1}^j d_i \quad (2-7)$$

Die lineare Schadensakkumulations-Rechnung gestaltet sich einfach, wenn alle Schwingamplituden oberhalb der Dauerfestigkeit liegen und das gleiche Spannungsverhältnis herrscht. Somit kann die ertragbare Schwingspielzahl direkt aus der Zeitfestigkeitslinie berechnet werden. Im doppellogarithmischen Netz wird die Zeitfestigkeits-

linie als Gerade dargestellt. Die Geradengleichung ist beschrieben durch die ertragbare Schwingspielzahl  $N_A$  und die Spannungsamplitude  $S_A$  am Punkt A, sowie die Spannungsamplitude  $S_a$  am Punkt a und den Wöhlerexponent  $k$ .  $S_D$  beschreibt die Spannungsamplitude an der Dauerfestigkeitsgrenze [5]. Zur Berechnung der ertragbaren Schwingspielzahl  $N$  am Punkt a wird Gleichung (2-8) verwendet.

$$N = N_A * \left(\frac{S_a}{S_A}\right)^{-k} \quad \text{für } S_a \geq S_D \quad (2-8)$$

Haben die auftretenden Schwingamplituden ein unterschiedliches Spannungsverhältnis beziehungsweise eine variierende Mittelspannung so wird formal eine Schar von Wöhlerlinien benötigt, welche den unterschiedlichen Voraussetzungen entspricht. Weiterhin kann durch verschiedene Varianten der linearen Schadensakkumulations-Rechnung, basierend auf dem Nennspannungskonzept, dem zusätzlichen Ermüden des Werkstoffs im Dauerfestigkeitsbereich Rechnung getragen werden. Die verschiedenen Varianten der linearen Schädigungsakkumulations-Rechnung sind in Abbildung 2-8 dargestellt.

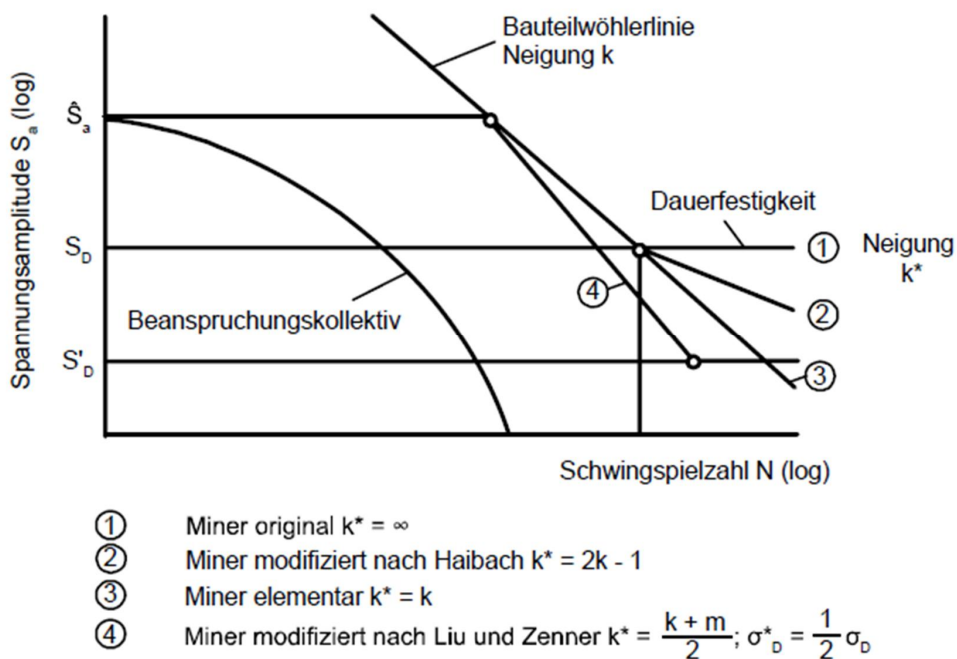


Abbildung 2-8: Bezugs-Wöhlerlinien nach „Miner original“, „Miner modifiziert nach Haibach“, „Miner elementar“ und „Miner modifiziert nach Liu und Zenner“ zur Berücksichtigung der Dauerfestigkeit bei der Schädigungsakkumulation [15]

Zur Beurteilung der Betriebsfestigkeit werden im Normalfall die wirkenden Spannungszustände an einem Bauteil untersucht. Da Messfahrzeuge zur Bestimmung der Betriebsbelastungen oftmals durch verschiedenste Randbedingungen nicht in der Lage sind vollumfänglich Betriebsspannungen an Bauteilen aufzuzeichnen, erfolgt häufig die Messung äußerer Belastungen. Zur Beurteilung der gemessenen äußeren Belastungen, die oftmals näherungsweise linear mit der Bauteilbeanspruchung zusammenhängen, hat sich der Ansatz der Pseudo-Schädigungs-Rechnung etabliert. Durch Anwendung der Pseudo-Schädigungs-Rechnung wird eine Aussage über die Schärfe der gemessenen Belastungen ermöglicht. Vor allem bei einer großen Anzahl von Messgrößen bietet dieses Verfahren einen geeigneten Überblick über alle Messgrößen und vereinfacht die Identifikation belastungskritischer Betriebszustände. Dabei ergibt sich eine betriebsfestigkeitsnahe Kennzahl, zum relativen Vergleich von Zeitreihendaten (z. B.: Kräfte, Momente, usw.). Bei der Pseudo-Schädigungs-Rechnung werden die gemessenen Lastamplituden einer BZF in Form eines Lastkollektivs auf eine fiktive Wöhlerlinie mit der Neigung  $k$  bezogen. Das Berechnungsergebnis ist eine Pseudo-Schädigungszahl. Die berechnete Kennzahl erlaubt im ersten Schritt keine direkte Aussage über die Bauteillebensdauer, jedoch über die Belastungsintensität der gemessenen BZF und den vom Bauteil aufgenommenen Energieeintrag. Durch Normierung der Pseudo-Schädigungszahlen der vorherrschenden Betriebszustände auf die Messdauer und Extrapolation entsprechend der Einsatzverteilung auf die Lebensdauer, besteht die Möglichkeit entsprechende schädigungsäquivalente Ersatzlasten für die Bauteilprüfung abzuleiten. Hierfür muss entweder die Lastamplitude der Prüfung oder die angestrebte Lastwechselzahl festgelegt werden, um die jeweilige unbekannte Größe zu bestimmen. Die folgende Vorschrift zur Pseudo-Schädigungs-Rechnung erläutert das Vorgehen detailliert [11]. Grundlage des Verfahrens ist das Verhalten metallischer Werkstoffe im Zeitfestigkeitsbereich.

In Anlehnung an Gleichung (2-8) lässt sich eine Wöhlerlinie für metallische Werkstoffe im doppellogarithmischen Netz (Zeitfestigkeitsbereich:  $5 \cdot 10^4$  bis  $2 \cdot 10^6$  Schwingspiele) durch eine Gerade beschreiben, bekannt als Basquin Gleichung [11].

$$N = \alpha * S_a^{-k} \quad (2-9)$$



In Gleichung (2-9) stellt  $N$  die ertragbare Schwingenspielzahl dar. Die Materialkonstante  $\alpha$  ist eine werkstoffabhängige Kenngröße, welche experimentell bestimmt wird.  $S_a$  bezeichnet die Spannungsamplitude. Der Exponent  $k$  ist ebenfalls materialabhängig und gibt den Abfall der Geraden über den Zeitfestigkeitsbereich an.

Anwendung des Logarithmus:

$$\lg N = \lg \alpha - k * \lg S_a \quad (2-10)$$

Einsetzen eines beliebigen Wertepaares der Wöhlerlinie ( $N_0, S_0$ ):

$$\lg N - \lg N_0 = \lg \alpha - k * \lg S_a - \lg \alpha + k * \lg S_0 \quad (2-11)$$

Somit kürzt sich die Materialkonstante  $\alpha$  heraus und der Wöhlerexponent  $k$  bleibt als einzige materialabhängige Konstante zurück.

Anwendung der Logarithmus-Gesetze und Umformung :

$$\lg \frac{N}{N_0} = \lg \left( \frac{S_0}{S_a} \right)^k \quad (2-12)$$

$$\left( \frac{N}{N_0} \right) = \left( \frac{S_0}{S_a} \right)^k \quad (2-13)$$

Anwendung auf Rainflow-Zählergebnis:

Das Rainflow-Zählergebnis enthält  $\exists j$  Klassen  $1, \dots, j$ . In jeder Klasse  $i$  gibt es  $n_i$  Lastwechsel der Größe  $S_{a,i} \rightarrow N_i$ .

$$N = N_i = N_0 * \left( \frac{S_0}{S_{a,i}} \right)^k \quad (2-14)$$

Einsetzen von Gleichung (2-14) in Gleichung (2-7):

$$D = \sum_{i=1}^j d_i = \sum_{i=1}^j \frac{n_i}{N_i} = \frac{1}{N_0} * \sum_{i=1}^j n_i * \left( \frac{S_{a,i}}{S_0} \right)^k \quad (2-15)$$

Der in Gleichung (2-15) beschriebene Formalismus wird in der Praxis auf Lasten angewendet und betrachtet die Kollektivschärfe einer Messung. Die Spannungsamplitude  $S_a$  kann daher als Kraft oder Moment verstanden werden. Die Lage der Wöhlerlinie spielt dabei eine untergeordnete Rolle, da auf Basis von Lastkollektiven

verglichen wird. Beim Vergleich der Schädigungssumme auf Basis von Beanspruchung und Festigkeit spielt die Lage der Wöhlerlinie jedoch eine wichtige Rolle. Theoretisch tritt bei einer Schädigungssumme von  $D = 1$  Bauteilversagen ein. Die Pseudo-Schädigungssumme kann abhängig von den Bezugsgrößen  $S_0$  und  $N_0$  deutlich vom Versagenskriterium  $D = 1$  abweichen. Um die fiktive Wöhlerlinie geeignet zu positionieren, ist ein Schnittpunkt mit der Y-Achse zu definieren. Ein geeigneter Punkt ist der Abknickpunkt  $S_D$  an der Grenze zur Dauerfestigkeit, jedoch ist dieser material- und bauteilspezifische Kennwert oftmals nicht bekannt. Aus diesem Grund wird häufig auf die statische Belastungsgrenze  $S_e$  eines Bauteils (z. B.: Streckgrenze  $R_e$ ) ausgewichen, da hier bei einmaliger Belastung ( $N_0 = 1$ ) Versagen eintritt. Es ist jedoch anzumerken, dass die reale Wöhlerlinie in diesem Bereich nicht mehr linear verläuft. Die Bezugsgröße  $S_0$  kann jedoch weitgehend frei gewählt werden. Die Verwendung der statischen Belastungsgrenze eines Bauteils ist ein Vorschlag, jedoch nicht zwingend erforderlich. Abbildung 2-9 veranschaulicht die Zusammenhänge.

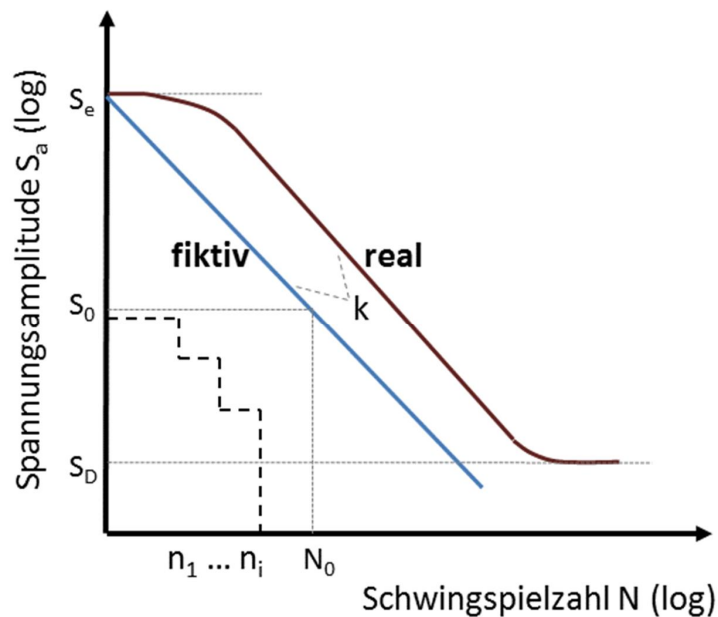


Abbildung 2-9: Darstellung von realer und fiktiver Wöhlerlinie

Einsetzen von  $S_0 = S_e$  und  $N_0 = 1$  in Gleichung (2-15):

$$D = \sum_{i=1}^j d_i = \sum_{i=1}^j n_i * \left(\frac{S_{a,i}}{S_e}\right)^k \quad (2-16)$$

In dem die Pseudo-Schädigungszahlen der vorherrschenden Betriebszustände auf die Messdauer bezogen werden, besteht die Möglichkeit der Normierung auf eine Arbeitsstunde beziehungsweise auf die Laufleistung eines jeweiligen Betriebszustandes. Mittels eines geeigneten Nutzungsmodells sind die normierten Pseudo-Schädigungszahlen der einzelnen Betriebszustände auf die Bauteillebensdauer extrapolierbar.

$$D = \sum_{i=1}^j \frac{d_i}{t_{M,i}} * t_{N,i} \quad (2-17)$$

Abschließend besteht die Möglichkeit auf Basis der Gesamtschädigung  $D$  eine schädigungsäquivalente Ersatzlast abzuleiten. Bei der Rücktransformation ist es wichtig die gleiche Bezugsgröße  $S_0$  zu verwenden. In diesem Fall wird die Pseudo-Schädigungsrechnung unabhängig von der Bezugsgröße  $S_0$ . In Gleichung (2-18) ist die Berechnung einer schädigungsäquivalenten Ersatzlast  $S_T$  dargestellt. Die Gleichung enthält die Unbekannten  $S_T$  und  $N_T$ . Zur Berechnung der schädigungsäquivalenten Ersatzlast  $S_T$  ist zunächst die Anzahl der Lastwechsel  $N_T$  festzulegen.

$$D = N_T * \left(\frac{S_T}{S_e}\right)^k \quad (2-18)$$

Umformen von Gleichung (2-18):

$$S_T = S_e * \left(\frac{D}{N_T}\right)^{\frac{1}{k}} \quad (2-19)$$

Bei der Schädigungsakkumulations-Rechnung auf der Basis von Nennspannungen ist die Berücksichtigung von der Mittelspannung  $S_m$  und dem Spannungsverhältnis  $R$  wichtig. Hängen die Bauteilspannungen näherungsweise linear mit äußeren Lasten zusammen, kann die Mittelspannungskorrektur auch auf Basis äußerer Lasten erfolgen und im Zusammenhang mit der Pseudo-Schädigungs-Rechnung eingesetzt werden. In der Praxis gibt es zwei Vorgehensweisen [10]:

1. Die Mittelspannung der Wertepaare aus der Rainflow-Matrix wird vernachlässigt und nur die Spannungsamplitude und deren Häufigkeiten berücksichtigt. Dies entspricht dem Ergebnis der Bereichspaarzählung. Diese Vorgehensweise ist nur empfehlenswert, wenn der Einfluss der Mittelspannung gering ist oder die Unterschiede zwischen Ober- und Unterspannung ähnlich sind.

$$d \sim (S_a)^k \tag{2-20}$$

2. Der Einfluss der Mittelspannung wird bei jedem Wertepaar berücksichtigt, indem die Amplitude entsprechend der Mittelspannung angepasst wird. Entsprechend dem im Haigh-Diagramm angegebenen Einfluss der Mittelspannung  $M$  auf die Lebensdauer werden die Amplituden auf ein identisches Spannungsverhältnis transformiert. Standardmäßig erfolgt die Transformation auf das Spannungsverhältnis  $R = -1$ . Nach der Amplitudentransformation ist nur eine Wöhlerlinie für die Schädigungsakkumulations-Rechnung notwendig.

$$d \sim (S_a + M * S_m)^k \tag{2-21}$$

Abbildung 2-10 zeigt die Vorgehensweise zur Mittelspannungskorrektur anhand des Haigh-Diagramms. Detaillierte Informationen zur Vorgehensweise sind in der Fachliteratur beschrieben [5].

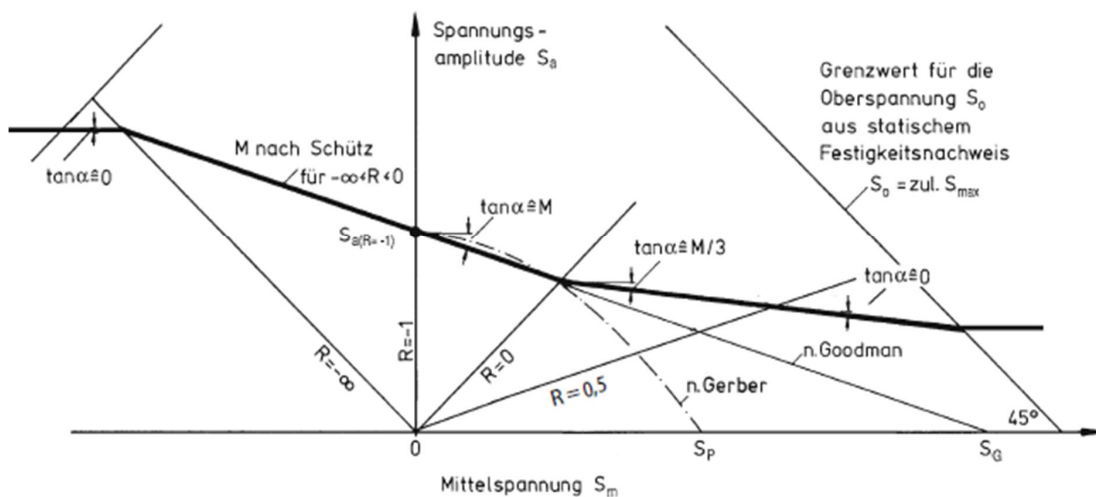


Abbildung 2-10: Haigh-Diagramm zur Amplitudentransformation entsprechend des Mittelspannungseinflusses auf die Lebensdauer [5].

Neuere Untersuchungen zeigen, dass auch die Reihenfolge der auftretenden Lastamplituden Einfluss auf die Lebensdauer nehmen. Abhängig von lokalen plastischen Verformungen, Spannungsumlagerungen am Ort des Anrisses und Effekten des Rissöffnens und Schließens die schon bei konstanter Amplitude auftreten, entsteht bei veränderlicher Mittelspannung und Spannungsamplitude eine Verzögerung oder Beschleunigung des Risswachstums. Bei zufallsartigen BZF im Kundenbetrieb treten solche Verzögerungen und Beschleunigungen des Rissfortschritts in großer Zahl auf. Ihre Wechselwirkungen sind sehr komplex und eine allgemeingültige rechnerische Quantifizierung ist bis heute nur schwer möglich [5]. Auch wenn dieser Effekt in bestimmten Anwendungen eine Rolle spielt, bleibt er im vorliegenden Fall unberücksichtigt.

Bei Fahrzeugherstellern werden abhängig von der Bauteilkomplexität unterschiedliche Betriebsfestigkeitsprüfungen durchgeführt. Im Allgemeinen erfolgt dies durch beschleunigte Bauteillebensdauerversuche, um Kosten und Zeit zu sparen. Für einfache Bauteile ist ein ein-axialer Lebensdauerversuch oftmals ausreichend, der als ein- oder mehrstufiger Blockversuch ausgeführt wird. Bei komplexen Komponenten oder Fahrzeugstrukturen erfolgt im Allgemeinen ein Betriebsfestigkeitsnachfahrversuch durch ein gerafftes Lastprofil gemessener Feldlastdaten. Entscheidend für die Auslegung von Bauteilen nach den Regeln der Betriebsfestigkeit ist die im Nutzungsbetrieb erzeugte Bauteilbelastung. Ein grundsätzliches Problem stellt die Belastungsverteilung im praktischen Einsatz dar, da anwendungsspezifisch die Belastungsart und Belastungshäufigkeit stark variieren können. Abbildung 2-11 zeigt einen Ansatz zur Erstellung von Prüfvorschriften auf Basis der statistischen Prüfplanung [16]. Grundlage des Vergleichs ist die Beanspruchungsverteilung einer Nutzerpopulation und die Festigkeitsverteilung einer Bauteilpopulation. Aufgetragen ist die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion von Bauteilbeanspruchung und Bauteilfestigkeit über die akkumulierte Schädigungssumme (Lebensdauer). Die Dichtefunktion einer Wahrscheinlichkeitsverteilung kann dabei als Maß dafür verstanden werden, wie wahrscheinlich es ist eine gewisse Lebensdauer zu beobachten. Aufgrund von Streuungen im Einsatzspektrum über eine Nutzerpopulation folgt die Beanspruchung eines Bauteils meist einer Verteilung. Die Beanspruchungsverteilung ist über entsprechende Untersuchungen, wie beispielsweise eine Nutzungssimulation mit gemessenen Lastdaten nachzuweisen und entspricht der roten Kurve in Abbildung 2-11. Der Referenznutzer beschreibt einen

definierten Quantilwert der Beanspruchungsverteilung, z. B.: das 99% Quantil und entspricht einer bestimmten Schädigungssumme. Die Festigkeit eines Bauteils folgt aufgrund von Streuungen beim Werkstoff und beim Fertigungsprozess ebenfalls einer Verteilung. Klassischerweise wird die Bauteilfestigkeit über Lebensdauerexperimente direkt am Bauteil nachgewiesen. Durch Anwendung der Pseudo-Schädigungs-Rechnung auf die Ergebnisse der Prüfung (Lastamplitude und erreichte Lastwechselzahl) ist deren Schädigungssumme entsprechend der grünen Kurve in Abbildung 2-11 darstellbar. Die Bauteilfestigkeit wird häufig durch eine Weibullverteilung beschrieben. Die Verteilung ist durch den Lageparameter  $T$  und den Formparameter  $\beta$  charakterisiert. Die Weibullverteilung hat die Eigenschaft, dass für  $\beta > 1$  die altersspezifische Ausfallrate ansteigt und somit Verschleiß- und Ermüdungsausfälle korrekt modelliert werden. Die Auslegungsfestigkeit (auch Auslegungsbauteil genannt) beschreibt ein entsprechendes Quantil der Festigkeitsverteilung (z.B. 1%-Quantil) und legt eine untere zulässige Schranke für die Bauteillebensdauer fest.

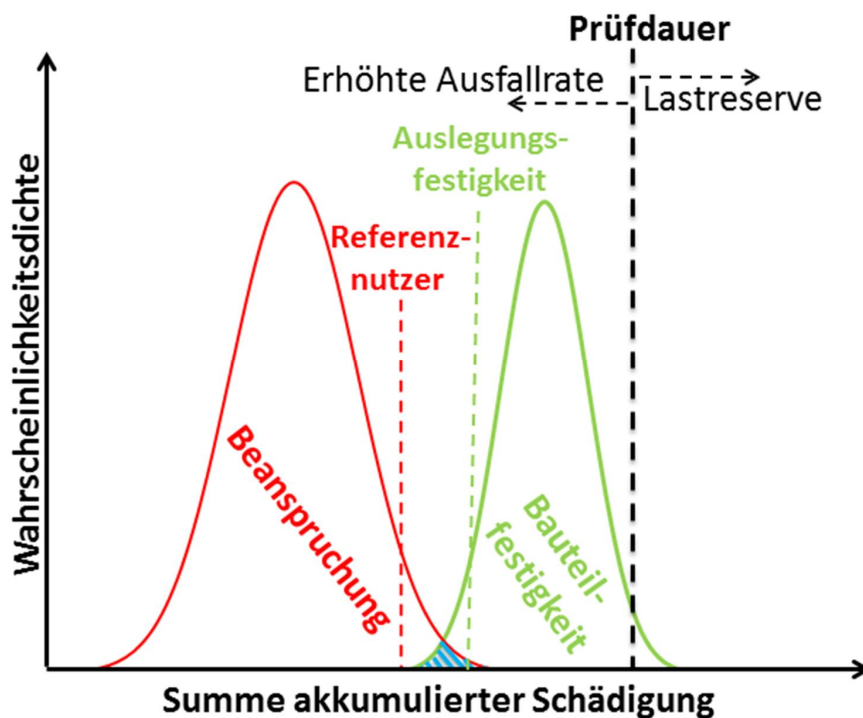


Abbildung 2-11: Ermittlung der Prüfvorschrift auf Basis der Verteilung der Bauteilbeanspruchung und -festigkeit

Die Überschneidung von Bauteilbeanspruchung und Bauteilfestigkeit beschreibt die Ausfallrate im Nutzungsbetrieb [5]. Die Ausfallrate  $\gamma$  berechnet sich entsprechend des Faltungs-Integrals von Beanspruchungsverteilung  $f_B$  und Festigkeitsverteilung  $F_F$  nach Gleichung (2-22).

$$\gamma = \int_{-\infty}^{\infty} f_B(x) * F_F(x) dx \quad (2-22)$$

Industrieübliche und herstellerepezifische Forderungen der Ausfallrate liegen zwischen 100 – 1 ppm. Die Bestimmung der Prüfdauer für eine hinreichend niedrige Ausfallrate erfolgt beispielsweise nach den Grundsätzen der statistischen Prüfplanung. Zur Prüfung von Bauteilen mit geringem Stichprobenumfang liefert der Verband der Automobilindustrie eine zielführende Vorgehensweise, welche in der Fachliteratur „Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie – Zuverlässigkeitssicherung bei Automobilherstellern und Lieferanten, Teil 2“ [16] definiert sind. Die Lage der Prüfdauer berechnet sich aus der gewünschten Zuverlässigkeit  $R$ , der Anzahl der Prüfteile  $N$ , dem Lebensdauererhältnis  $L_v$ , dem Formparameter  $\beta$  der Festigkeitsverteilung des Bauteils und der Signifikanz  $\alpha$ . Das Lebensdauererhältnis  $L_v$  definiert sich durch den Quotient aus Prüfdauer  $L$  und Auslegungsfestigkeit  $q_0$ .

$$R^{N * L_v^\beta} \leq \alpha \quad (2-23)$$

Umstellen von Gleichung (2-23) nach  $L_v$ :

$$L_v \geq \sqrt[\beta]{\frac{\log \alpha}{\log R * N}} \quad (2-24)$$

Bestimmung der Prüfdauer  $L$ :

$$L_v = \frac{L}{q_0} \quad (2-25)$$

$$L = L_v * q_0 \quad (2-26)$$

Liegt das Ergebnis der Bauteilprüfung unterhalb der geforderten Prüfdauer, ist eine erhöhte Ausfallrate im Kundenbetrieb zu erwarten. Liegt das Ergebnis oberhalb, besitzt das Bauteil eine entsprechende Lastreserve.

## 2.2. Stand der Forschung zur Ermittlung von Lastkollektiven

Die Ermittlung von Lastkollektiven ist zum einen von der Verfügbarkeit gemessener Lastdaten der vorherrschenden Betriebszustände abhängig und zum anderen von der Verfügbarkeit entsprechender Nutzungsdaten. Abbildung 2-12 gibt zunächst einen Überblick zu den Ergebnissen der Literaturrecherche und kategorisiert die Beiträge der Autoren entsprechend der Themenschwerpunkte. Die beschriebenen Literaturquellen wurden mit größter Sorgfalt zusammengestellt, erheben jedoch nicht den Anspruch auf Vollständigkeit.

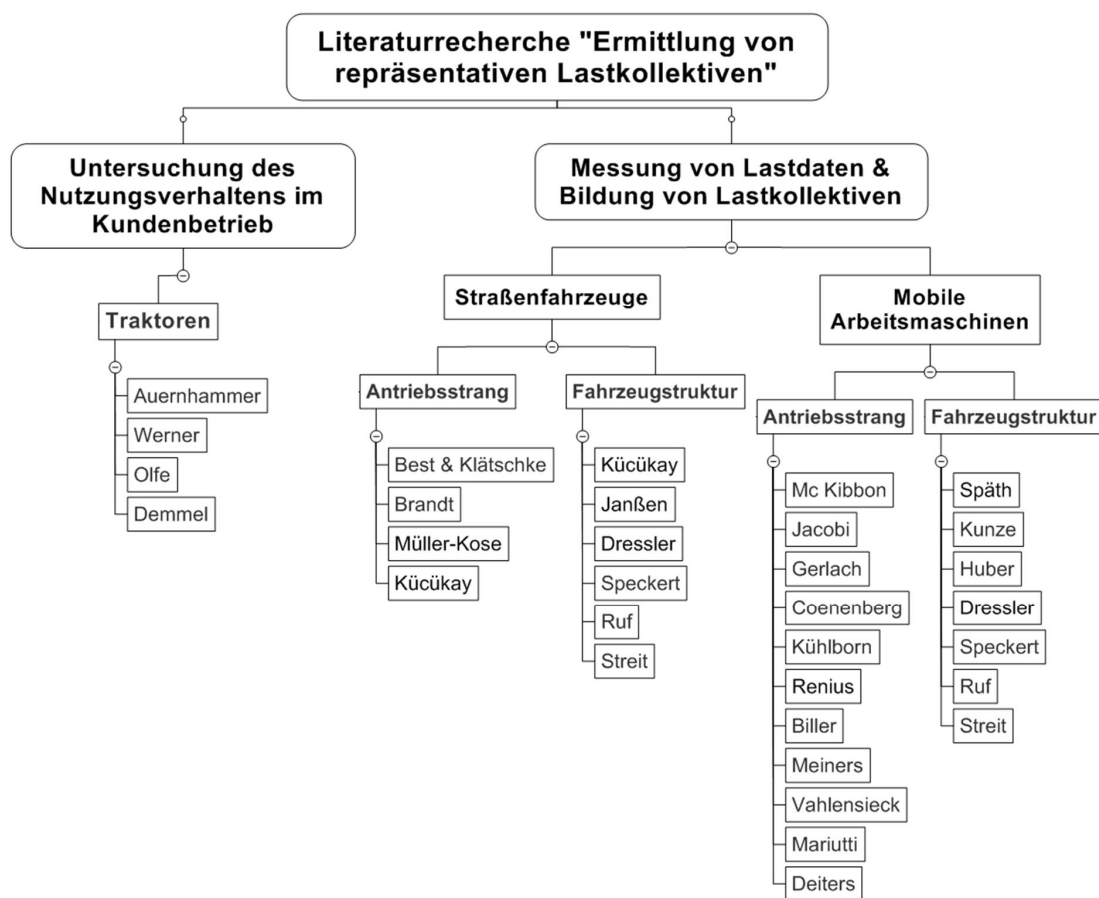


Abbildung 2-12: Literaturrecherche - Kategorisierung von Themen und Autoren

### 2.2.1 Nutzung und Einsatzverteilung von Traktoren

Repräsentative Nutzungsdaten zur Ermittlung von Lastkollektiven sind von zentraler Bedeutung. Die identifizierten Quellen von Auernhammer [17, 18, 19], Biller [20], Wen-



ner [21], Olfe [22] und Demmel [23] aus den Jahren 1980 bis 1990 basieren größtenteils auf Veröffentlichungen in Fachzeitschriften. Aktuelle Quellen konnten nicht identifiziert werden. Ein Grund hierfür ist sicherlich, dass die Fahrzeughersteller Erkenntnisse zur Einsatzverteilung nicht öffentlich machen, da somit direkt Rückschlüsse auf deren Auslegungsphilosophie möglich wären. Die ermittelten Ergebnisse der oben genannten Autoren sind nur bedingt mit der Einsatzverteilung heutiger Traktoren vergleichbar, da Leistung und Fahrzeuggröße stark gestiegen sind. Aus diesem Grund wird im weiteren Verlauf der Arbeit ein angepasstes Nutzungsmodell aus Erkenntnissen der Messkampagne und des Projektpartners genutzt. Um einen Vergleich zu den identifizierten Quellen zu ermöglichen, sind die Ergebnisse von Auernhammer nachfolgend kurz beschrieben. Abbildung 2-13 zeigt die jährliche Einsatzverteilung von Traktoren oberhalb von 40 kW Motorleistung in Form eines Balkendiagramms. Die Anzahl der verfügbaren Fahrzeuge innerhalb eines Betriebs ist auf der X-Achse aufgetragen. Die Fahrzeuge sind der Motorleistung entsprechend absteigend angeordnet, wonach der erste Traktor der leistungsstärkste und vierte der leistungsschwächste ist. Grundlage der Ergebnisse sind ausführliche Einsatzdaten von über 500 landwirtschaftlichen Betrieben. Die prozentuale Verteilung der Balken entsprechend der Y-Achse zeigt die jeweilige Einsatzverteilung des Fahrzeugs. Dabei ist feststellbar, dass das leistungsstärkste Fahrzeug den höchsten Anteil an Bodenbearbeitung aufweist. Alle weiteren Fahrzeuge zeichnen sich durch steigende Anteile bei Pflege-, Transport- und Erntearbeiten aus.

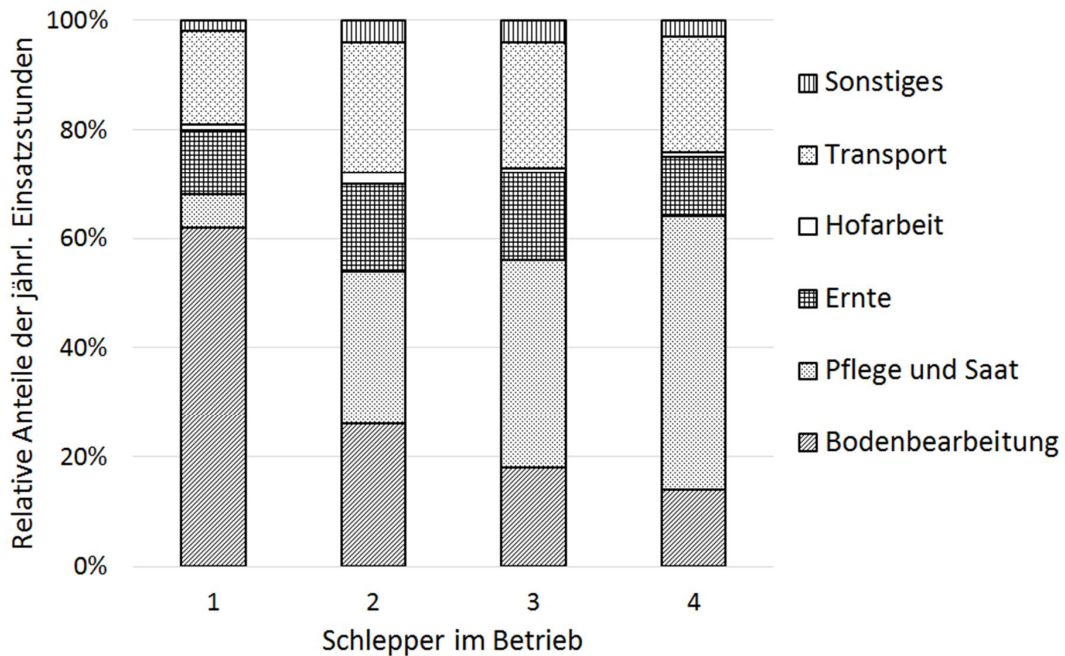


Abbildung 2-13: Einsatzverteilung der auf einem Betrieb vorhandenen Traktoren nach Auernhammer (nachgezeichnet) [18]

### 2.2.2 Messung von Lastdaten und Bildung von Lastkollektiven

Die Untersuchung von Fahrzeugbelastungen begann schon Ende der 20er Jahre des letzten Jahrhunderts und gewann in der Automobil- und Nutzfahrzeugindustrie mit den Jahren immer mehr an Bedeutung. Vor allem aus dem Bereich der Landtechnik sind zahlreiche Veröffentlichungen zu Lastmessungen [24, 25, 26, 27, 28, 29, 30] und der Ermittlung von Lastkollektiven [31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38] hervorgegangen. Die Ergebnisse vieler Quellen liegen jedoch mehr als 20 Jahre zurück, daher wird hier lediglich auf diese Quellen verwiesen. Aktuelle und für die weitere Vorgehensweise wichtige Literaturquellen sind detailliert beschrieben. Die Quellen sind nachfolgend chronologisch aufgeführt.

**Renius** [39] stellt erstmals ein motorseitiges und getriebeeingangsseitiges normiertes Gesamtkollektiv für 30kW bis circa 110kW Traktoren vor. Er veröffentlicht außerdem ein Fahrgeschwindigkeitskollektiv für den mitteleuropäischen Bereich und bezieht so-

mit das Nutzungsverhalten und die Einsatzverteilung erstmals mit in die Lastkollektivierung ein. Als vorbildlich ist die Darstellungsart der Kollektive anzusehen, die von vielen anderen Autoren übernommen wurde.

**Späth** [40] beschäftigt sich in seiner Dissertation mit der Ermittlung von dynamischen Kräften an Standardtraktoren. Er untersucht vor allem den Einfluss von äußeren Belastungen auf den Fahrzeuggrumpf und entwickelt Lastkollektive zur Auslegung von Hauptrahmenstrukturen für Ackerschlepper. Weiterhin untersucht Späth die Skalierbarkeit von dynamischen Belastungsszenarien verschiedener Traktorenbaugrößen durch den Einsatz eines MKS- basierten Wachstumsmodells.

**Kücükey** [2], **Müller-Kose** [3] und **Janßen** [4] (*alle TU Braunschweig*) beschreiben einen Prozess zur virtuellen Produktentwicklung von Antriebsstrang- und Fahrwerkskomponenten unter Berücksichtigung repräsentativer Lastkollektive durch Einsatz ihrer entwickelten 3F-Methodik. Das Vorgehen basiert auf der Modellierbarkeit des 3F-Parameterraums, indem die Einflüsse Fahrer, Fahrzeug, Fahrstrecke systematisch beschrieben sind. Durch Einsatz der 3F-Methode erfolgt die Modellierung der vorherrschenden Einsatzbedingungen. Dabei sind die einzelnen Einflüsse in Kategorien gegliedert und nochmals in Unterklassen unterteilt. Aus den Kategorien und Klassen werden Nutzertypen abgeleitet und alle belastungsrelevanten Nutzertypen untersucht. Auf Basis von gemessenen Lastdaten innerhalb der definierten Nutzergruppen erfolgt die Bestimmung der belastungsintensivsten Kombination der Lastfälle und die Ableitung repräsentativer Lastkollektive, welche als Dimensionierungsgrundlage für die Bauteilgestaltung und deren Prüfung genutzt werden. Abbildung 2-14 zeigt den Aufbau der 3F-Methodik und beispielhaft die Einsatzverteilung für den Faktor Fahrstrecke.

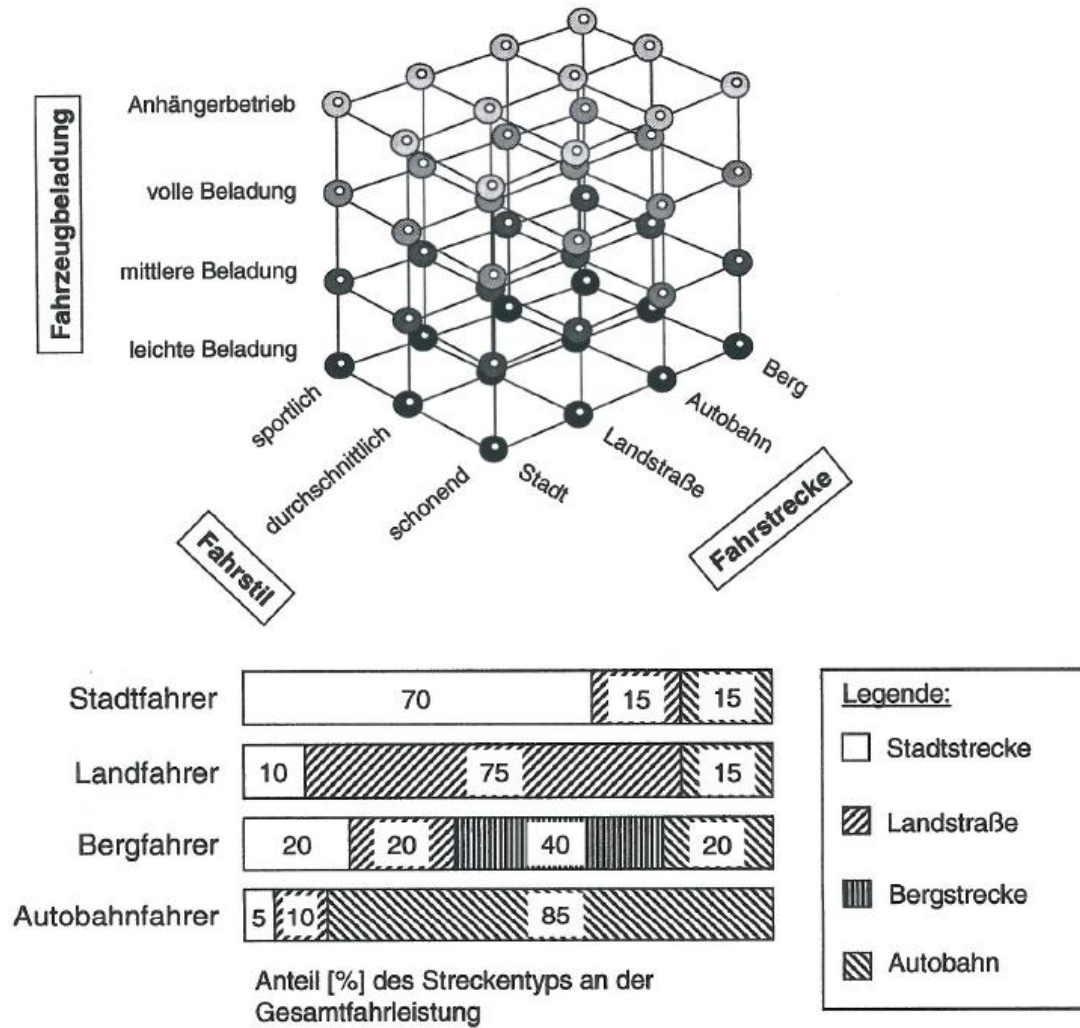


Abbildung 2-14: 3F-Parameterraum zur Beschreibung der Fahrzeugeinflüsse auf das Belastungsverhalten im Nutzungsbetrieb [4]

Die Lastkollektive basieren auf gemessenen Belastungen einiger Versuchsfahrzeuge über mehrere 10.000 km Laufleistung. Aufgrund der hohen Anzahl von Nutzungsszenarien (48 definierte Zustände) erfolgt der Einsatz von CAE-Methoden zur Simulation des Fahrverhaltens und anschließend die Analyse der auftretenden Bauteilbelastungen. Das Simulationsmodell wird durch Lastdaten einer Messkampagne für spezifische Fahrzustände validiert. Der Ansatz ermöglicht die Untersuchung des Bauteilpotenzials anhand einsatzspezifischer Belastungskollektive in einer frühen Entwicklungsphase und die Beurteilung mehrerer Bauteilvarianten hinsichtlich Dauerhaltbarkeit auf Basis einer virtuellen Bauteilgeometrie. Dies erlaubt Machbarkeitsstudien diverser

Bauteilvarianten in der Konzeptphase und die Reduzierung von Zeit- und Kostenaufwand durch aufwändige Bauteillebensdauerversuche. Die beschriebenen Erkenntnisse zeigen, dass die belastungsintensivste Kombination der Lastfälle nicht nur vom Nutzungsverhalten abhängt, sondern ebenfalls von der Bauteilgeometrie und der Aufgabe des Bauteils in der Fahrzeugstruktur. Das bedeutet, die kritischste Kombination der Lastfälle ist bauteilspezifisch variabel. Weiterhin stellen die Autoren heraus, dass die prozentualen Anteile in der Einsatzverteilung großen Einfluss auf die Bauteilbelastungen haben und sich Fehler negativ auf die reale Bauteillebensdauer auswirken.

**Dressler, Speckert, Ruf und Streit (alle Fraunhofer, Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik)** [1, 41, 42, 43] beschreiben einen weiteren Ansatz zur Ermittlung von repräsentativen Lastkollektiven. Das Verfahren basiert auf der systematischen Trennung der auftretenden Betriebszustände und deren Einsatzverteilung im Nutzungsbetrieb. Die Eingangsgrößen sind ein Faktormodell, was die fahrzeugspezifischen Einsatz- und Belastungszustände beschreibt und ein Nutzungsmodell, was die Einsatzverteilung und deren vorherrschende Streuung im Nutzungsbetrieb abbildet. Die im Faktormodell identifizierten Betriebszustände werden durch repräsentative Lastmessungen im Kundenbetrieb beschrieben. Mittels Monte-Carlo-Simulation, einem statistischen Verfahren zur Erstellung von Zufallsexperimenten, erfolgt die Erzeugung einer beliebigen Anzahl von Nutzern auf Basis der definierten Einsatzbedingungen des Nutzungsmodells. Die einzelnen Nutzer sind dabei durch eine individuelle Einsatzverteilung charakterisiert. Den erzeugten Nutzern ordnet das Verfahren abhängig von der vorgegebenen Einsatzdauer die Lastdaten der korrespondierenden Betriebszustände im Faktormodell zu. Die ausgewählten Lastdaten werden entsprechend der spezifischen Einsatzverteilung in Form von Pseudo-Schädigungszahlen für die Ziellebensdauer des Fahrzeugs aufsummiert (Schädigungsakkumulation). Auf Basis der berechneten Gesamtschädigung der einzelnen Nutzer erfolgt die Identifikation der kritischsten Kombination der Lastfälle für eine Nutzerpopulation. Durch Berechnung gewünschter Quantilwerte (95% oder 99% Quantil) wird die repräsentative Abmischung der Belastungszustände für spezifische Fahrzeugkomponenten identifiziert. Die Definition der kritischsten Kombination der Lastfälle erlaubt die Ermittlung repräsentativer Lastkollektive und anschließend die Ableitung schädigungsäquivalenter Prüfzenarien. Das beschriebene Verfahren ist nicht auf eine bestimmte Anzahl von Betriebszuständen beschränkt, individuell anpassbar und daher für vielfältige Zwecke einsetzbar.

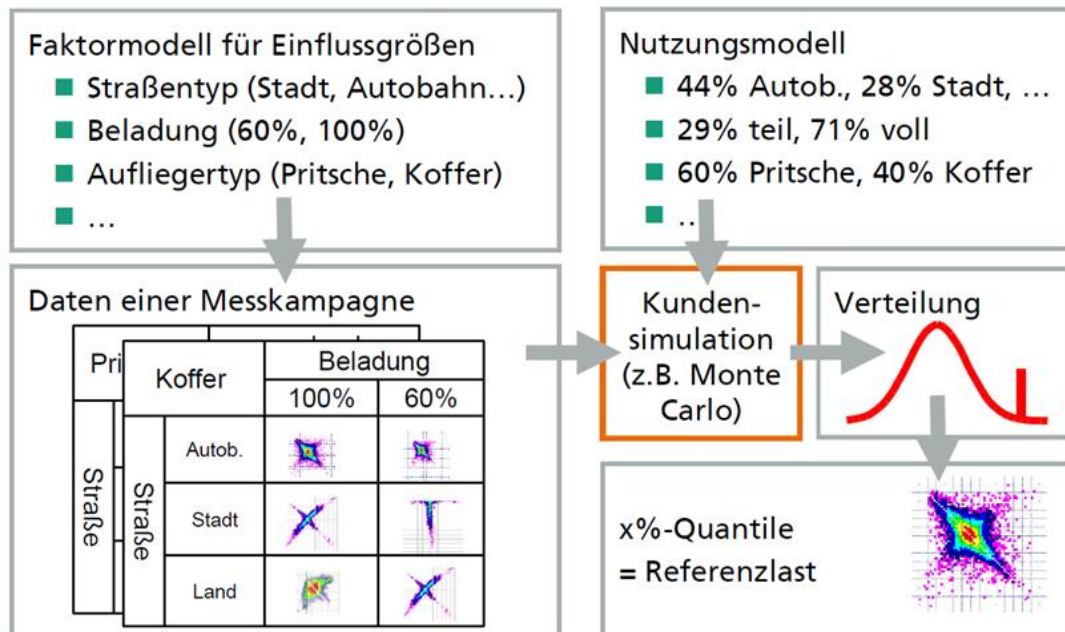


Abbildung 2-15: Verfahren von Fraunhofer ITWM zur Berechnung repräsentativer Lastkollektive unter Berücksichtigung der Nutzungsvervariabilität im Fahrzeugeinsatz über eine Nutzerpopulation [1].

Die Autoren nutzen die Vorgehensweise zur Erstellung von Lastkollektiven für Nutzfahrzeuge oder Mobilbagger. Hierbei werden statistische Methoden eingesetzt, um die notwendigen Einflussfaktoren auf die Belastungsverteilung zu identifizieren und bei der Definition des Auslegungsnutzers zu berücksichtigen. Durch den Einsatz der Varianzanalyse erfolgt die Kategorisierung von Einsatzbedingungen für die untersuchten Messgrößen, um belastungsäquivalente Einsätze zusammenzufassen. Die hinter dem Auslegungsnutzer steckende Kombination der Lastfälle dient zur Ableitung der schädigungskritischsten Bauteilbeanspruchung (repräsentatives Lastkollektiv).

### 2.3. Bewertung der angewendeten Methoden

Die aufgeführten Literaturquellen zeigen, dass die Dimensionierung von Bauteilen nach repräsentativen Lastkollektiven in der Fahrzeugtechnik zunehmend an Bedeutung gewinnt. Besonders im Bereich der Automobil- und Nutzfahrzeughersteller wurden in den letzten Jahren Fortschritte zur Beschreibung der Belastungsverteilung im Nutzungsbetrieb erzielt. Die Belastungsverteilung über eine Nutzerpopulation dient als

Grundlage zur Identifikation der kritischsten Kombination der Lastfälle für den Nutzungsbetrieb. Das daraus ermittelte Lastkollektiv des Referenz- oder Auslegungsnutzers dient als Grundlage für die Bauteildimensionierung und die Ableitung von Prüfvorschriften.

Unter anderem haben sich zwei Ansätze als zielführend erwiesen. Einerseits die Erkenntnisse von Küçükay [2], Müller-Kose [3] und Janßen [4], die Mithilfe der entwickelten 3F-Methodik (Fahrer, Fahrzeug, Fahrbahn) die vorherrschenden Betriebszustände bei Straßenfahrzeugen beschreiben. Durch Lastmessungen wird die kritischste Kombination der Betriebszustände identifiziert. Das Verfahren ist jedoch auf die spezifischen Anforderungen und den Parameterraum von Straßenfahrzeugen ausgelegt. Andererseits die Erkenntnisse von Dressler, Speckert, Ruf und Streit [1, 41, 42, 43], die ein auf statistischen Methoden basierendes Verfahren zur Beschreibung der Belastungsverteilung im Nutzungsbetrieb entwickelt haben. Mittels Monte-Carlo-Simulation erfolgt die Erzeugung einer beliebigen Anzahl von Nutzern mit individueller Einsatzverteilung entsprechend der Vorgaben einer Nutzerpopulation. Dies dient als Grundlage zur Identifikation der kritischsten Kombination der Lastfälle im Anwendungsbetrieb. Das Verfahren ist nicht auf einen festen Parameterraum beschränkt und hat sich bei Automobil-, Nutzfahrzeug- und Baumaschinenherstellern bereits im praktischen Einsatz bewährt.

Die zusammengestellten Literaturquellen zur Betriebsfestigkeit von Traktoren zeigen, dass die Dimensionierung nach Lastkollektiven weit verbreitet ist. Alle in der Literatur beschriebenen Kollektive basieren jedoch ausschließlich auf einer festen Einsatzverteilung der Betriebszustände. Aussagen darüber, inwieweit die zugrunde liegende Einsatzverteilung die untersuchte Nutzerpopulation abdeckt oder ob es sich um die Verteilung eines „Grenzlast-Nutzers“ handelt, fehlen in den meisten Fällen. Die Erkenntnisse legen nahe, dass eine belastbare Abschätzung der Ausfallrate nur unzureichend möglich ist. Die Kollektive sind somit durch entsprechende Sicherheitszuschläge abzusichern. Der Abstand zwischen Auslegungsnutzer und Prüfvorschrift bleibt unbekannt, was oftmals die Überdimensionierung von Bauteilen zur Folge hat. Das in Abbildung 2-16 zusammengestellte Blockdiagramm zeigt nochmals die Entwicklungsschritte der Automobil- und Nutzfahrzeugindustrie gegenüber der bisherigen Vorgehensweise bei Traktoren.

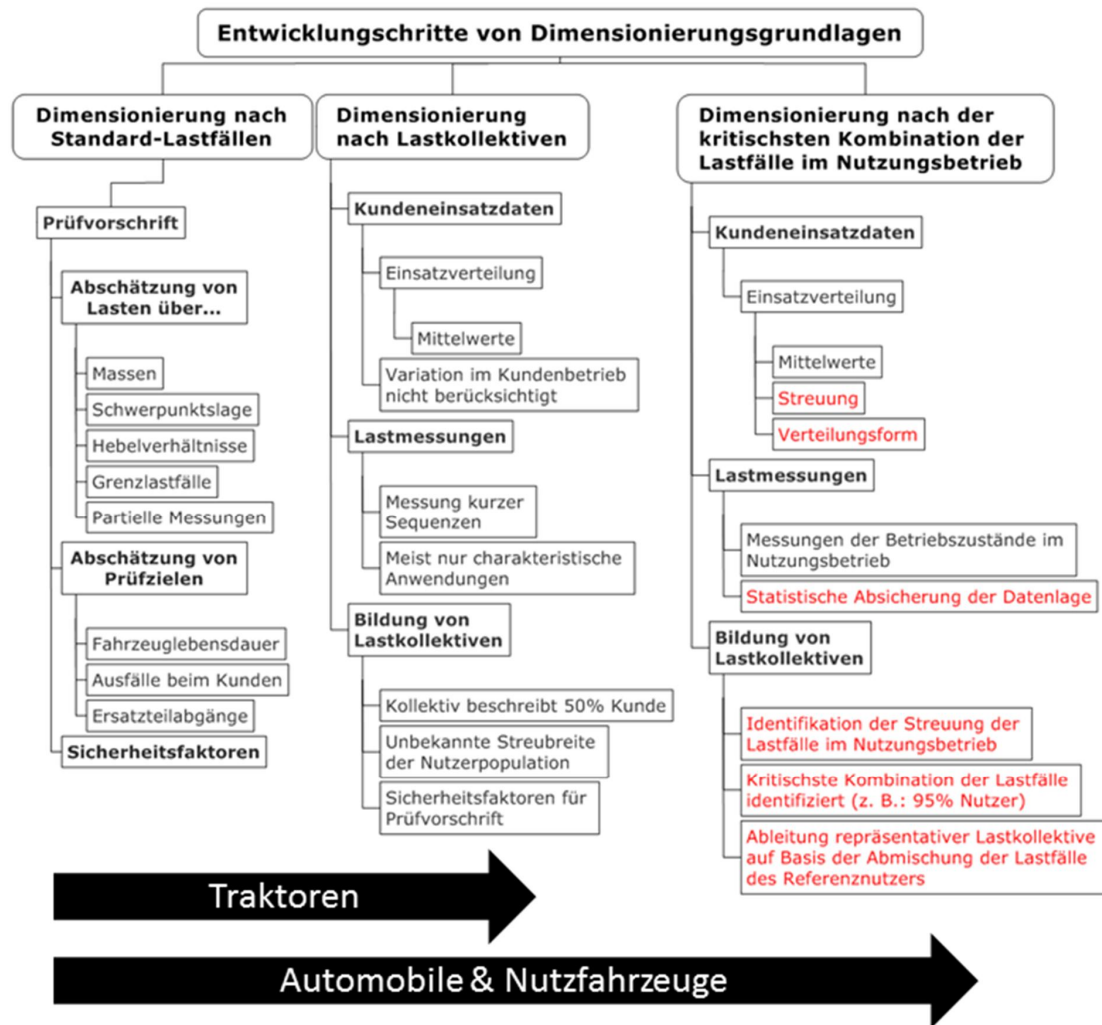


Abbildung 2-16: Entwicklungsfortschritt bei der Erstellung von repräsentativen Lastkollektiven zur Betriebsfestigkeit von Fahrzeugkomponenten

Im Bereich der Kundeneinsatzdaten wird nicht nur die mittlere Einsatzverteilung berücksichtigt, sondern gezielt die vorherrschenden Streuungen innerhalb einer Nutzerpopulation. Dies ermöglicht die Beschreibung der Belastungsverteilung über eine Nutzerpopulation und die Identifikation der kritischsten Kombination der Lastfälle im Nutzungsbetrieb. Auf Basis der ausgewählten Lastfälle des Referenznutzers erfolgt die Ableitung repräsentativer Lastkollektive zur Bauteildimensionierung.

Dabei scheint das Verfahren von Dressler, Speckert, Ruf und Streit bei Traktoren zielführend einsetzbar zu sein. Die traktorspezifischen Anforderungen an ein solches Ver-



fahren sind jedoch ungleich höher als im Bereich von Straßenfahrzeugen, da bei Traktoren eine besonders große Nutzungsvervielfältigung herrscht. Traktoren sind heutzutage variabel einsetzbare Arbeitsgeräte, deren Einsatzspektrum kundenabhängig stark variieren kann. Weiterhin gibt es abhängig vom Arbeitsgerät starke Streuungen der einwirkenden Belastungen auf das Fahrzeug, wie der Vergleich von schwerer Zugarbeit im Feld gegenüber dem Straßentransport zeigt. Dieser Effekt zeigt sich vor allem in der Getriebebeanspruchung von Traktoren, die um ein vielfaches höher ist, als beispielsweise bei einem PKW. Aufgrund des breiten Einsatzspektrums von Traktoren können Lastmessungen zu den jeweiligen Betriebszuständen nur stichpunktartig durchgeführt werden. Es sind daher Verfahren zur Untersuchung der statistischen Sicherheit der gemessenen Lastdaten einzusetzen, um den notwendigen Ressourceneinsatz innerhalb einer Messkampagne handhabbar zu gestalten. Ein möglicher Ansatz zur sinnvollen Erweiterung der Datenbasis, könnte beispielsweise in der Segmentierung der aufgezeichneten Datensätze bestehen.

Aufgrund stetig verkürzter Entwicklungszyklen und des großen Kostendrucks bei der Entwicklung neuer Traktoren ist es notwendig, weiterentwickelte Verfahren zur Bestimmung von Dimensionierungsgrundlagen einzusetzen. Die Ermittlung repräsentativer Lastkollektive für strukturelle Fahrzeugkomponenten steht im Rahmen dieser Arbeit im Fokus.

### **3 Konzept und Vorgehensweise**

Die Beschreibung der Nutzungsvariabilität einer Kundenpopulation und der damit verbundenen Belastungsverteilung eines Bauteils ist eine wichtige Grundlage zur Ableitung repräsentativer Lastkollektive. Das Verständnis über Lage und Streuung der Verteilungsfunktion ermöglicht die Identifikation der belastungsintensivsten Kombination der Lastfälle. Zur Berechnung der Belastungsverteilung ist eine Vielzahl nutzerspezifischer Einsatzprofile zu berücksichtigen, was ohne ein geeignetes computergestütztes Berechnungsprogramm nicht manuell umsetzbar ist. Ein derartiges Berechnungsprogramm entstand vor wenigen Jahren am Fraunhofer Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik (ITWM) in Zusammenarbeit mit der Nutzfahrzeugindustrie [1, 41, 42, 43]. Auf Basis dieser Verfahrensgrundlage und dem zugehörigen Softwaretool U-Sim erfolgt die Erarbeitung eines traktorspezifischen Berechnungsmodells zur Ableitung von repräsentativen Lastkollektiven.

#### **3.1. Grundlagen des Verfahrens**

Das eingesetzte Berechnungsprogramm U-Sim basiert inhaltlich auf der systematischen Trennung der auftretenden Lastfälle und deren Einsatzverteilung im Nutzungsbetrieb. Zunächst sind die notwendigen Einflussfaktoren und deren Stufen zu identifizieren. Die Kombination der Einflussfaktoren beschreibt die auftretenden Lastfälle als Zellen im Faktormodell. Gemeint sind fahrzeugtypische Anwendungen, wie die Bodenbearbeitung oder die Transportfahrt, vorherrschende Untergrundbedingungen oder der Beladungszustand. Abbildung 3-1 zeigt eine typische Auswahl von Einflussfaktoren bezüglich der wirkenden Belastungen am Traktor.

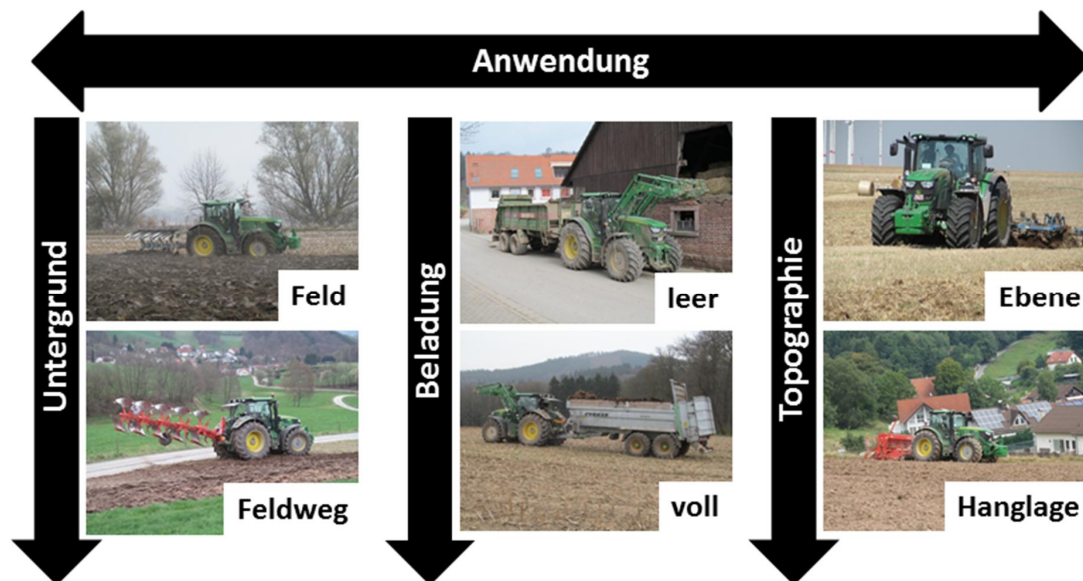


Abbildung 3-1: Auswahl traktorspezifischer Lastfälle zur Definition der Einflussfaktoren im Faktormodell

Im nächsten Schritt erfolgt die Bedatung der Zellen des Faktormodells durch Lastmessungen mit einem Messfahrzeug, wie in Kapitel 4 detailliert erläutert. Im aktuellen Fall werden äußere Messgrößen an charakteristischen Lasteinleitungspunkten der Fahrzeugstruktur aufgezeichnet, wie beispielsweise Radkräfte und Radmomente. Die gemessenen Lastdaten dienen dazu die wirkenden Belastungen im Nutzungsbetrieb repräsentativ zu beschreiben. Die BZF der jeweiligen Messgrößen werden den Zellen des Faktormodells jedoch nicht nur als Zeitreihendaten zugeordnet, sondern als Pseudo-Schädigungszahlen. Wie in Kapitel 2.1 bereits erläutert, sind Pseudo-Schädigungszahlen als Kennzahlen für die Belastungsintensität von Zeitreihendaten zu interpretieren. Nur durch das Arbeiten mit Pseudo-Schädigungszahlen wird die Berechnung einer individuellen Einsatzverteilung für eine Vielzahl von Nutzern handhabbar. Die Anwendung des Verfahrens ermöglicht somit die Berechnung der Belastungsverteilung über eine Nutzerpopulation, um die Lastdaten für eine Vielzahl von Messgrößen und für eine Vielzahl nutzungsspezifischer Einsatzprofile auf die Fahrzeuglebensdauer hochzurechnen. Die BZF der jeweiligen Datensätze werden für jede Messgröße mittels Rainflow-Zählung in den Häufigkeitsbereich transformiert. Die Zählergebnisse werden mittels Gleichung (2-16) in Pseudo-Schädigungszahlen umgerechnet und den

jeweiligen Zellen des Faktormodells zugeordnet. Abbildung 3-2 stellt den beschriebenen Ablauf zur Berechnung der Pseudo-Schädigungszahlen anhand des wirkenden Drehmoments des rechten Hinterrads beim Pflügen dar.

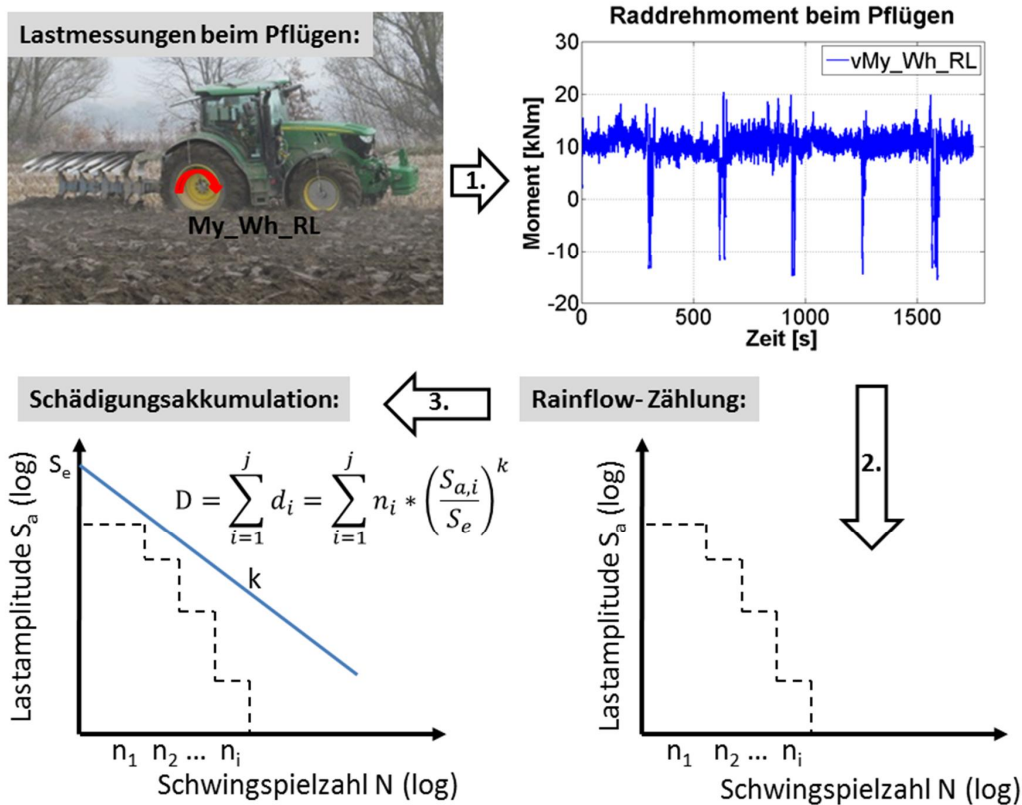


Abbildung 3-2: Berechnungsverfahren zur Erzeugung der Pseudo-Schädigungswerte aus den BZF der jeweiligen Messgrößen eines Datensatzes. Beispielhaft gezeigt für das wirkende Drehmoment ( $My\_Wh\_RL$ ) am rechten Hinterrad beim Pflügen.

Bei der Berechnung der Pseudo-Schädigungszahlen bleiben auftretende Mittellastefekte zunächst unberücksichtigt, da durch angreifende äußere Lasten abhängig von der Bauteilposition in der Fahrzeugstruktur wechselseitig Zug- oder Druckspannungen an Bauteilen herrschen können. Diese Effekte sind im Anschluss an die Identifikation der schädigungskritischsten Kombination der Lastfälle direkt an den jeweiligen Bauteilen zu untersuchen.

Auf Basis der Lastfälle des Faktormodells erfolgt die Beschreibung der Einsatzverteilung einer Kundenpopulation im Nutzungsmodell. Jede Zelle des Nutzungsmodells ist durch die Parameter  $p_i$ ,  $\sigma_i$  und die Verteilungsform charakterisiert. Der Parameter  $p_i$

beschreibt dabei die über alle erzeugten Nutzer gemittelte Einsatzzeit der einzelnen Lastfälle „i“. Die Streuung der jeweiligen Lastfälle „i“ ist durch die Standardabweichung  $\sigma_i$  angegeben. Die Bestimmung der Mittelwerte  $p_i$  im Nutzungsmodell erfolgt durch Multiplikation der Mittelwerte der Randverteilungen, also der relativen Häufigkeiten der Faktorstufen. Abbildung 3-3 zeigt beispielhaft das beschriebene Vorgehen zur Bestimmung der Mittelwerte  $p_i$  im Nutzungsmodell.

### **Einflussfaktoren:**

#### **Faktor A: Applikation**

- 50% Pflug, 30% Grubber, 20% Egge

#### **Faktor B: Untergrund**

- 70% Feld, 30% Straße

### **Nutzungsmodell:**

	Feld	Straße	
Pflug	35%	15%	$\Sigma = 50\%$
Grubber	21%	9%	$\Sigma = 30\%$
Egge	14%	6%	$\Sigma = 20\%$
	$\Sigma = 70\%$	$\Sigma = 30\%$	

Randverteilung

**Summe über alle Faktorzellen:  $\Sigma = 100\%$**

Abbildung 3-3: Beispielhaft dargestellte Einsatzverteilung der Einflussfaktoren und deren Kombination im Nutzungsmodell

Als Verteilungsfunktion der einzelnen Lastfälle im Nutzungsmodell wird eine Normalverteilung eingesetzt. Der vorliegende Fall beschreibt eine abgeschnittene Normalverteilung, da die Funktion nur im Bereich zwischen 0 und 100% vorkommen darf. Die Normalverteilung verläuft per Definition jedoch von  $+\infty$  nach  $-\infty$ , daher wird die Verteilung abgeschnitten und re-normiert. Abbildung 3-4 zeigt beispielhaft die Verteilungsfunktion einzelner Lastfälle in Bezug auf die Anzahl der virtuellen Nutzer.

### Verteilungsfunktion der Faktorzellen (Lastfälle):

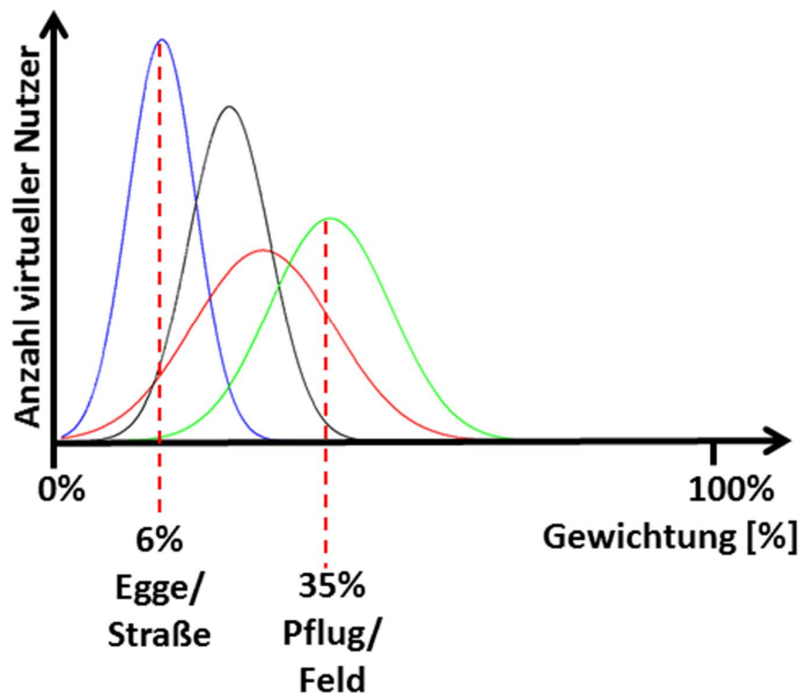


Abbildung 3-4: Verteilungsfunktion einzelner Faktorzellen über eine Nutzerpopulation

Im nächsten Schritt erzeugt das Berechnungsprogramm U-Sim mittels einer Monte-Carlo-Simulation eine beliebige Anzahl von virtuellen Nutzern entsprechend der Randbedingungen des Nutzungsmodells. Die Monte-Carlo-Simulation ist ein statistisches Verfahren zur Erzeugung von Zufallszahlen [11] anhand einer vorgegebenen Verteilung. Die spezifischen Einsatzanteile eines virtuellen Nutzers werden zufällig aus dem Mittelwert  $p_i$  und der Streuung  $\sigma_i$  der jeweiligen Lastfälle ermittelt und als Gewichte  $w_i$  bezeichnet. Die Summe der Zeitanteile über alle Lastfälle eines virtuellen Nutzers entspricht immer 100%. Somit erhält jeder virtuelle Nutzer eine individuelle Einsatzverteilung. Den erzeugten Nutzern ordnet das Verfahren nun entsprechend deren Einsatzverteilung zufällig gezogene Pseudo-Schädigungszahlen der jeweiligen Zellen des Faktormodells zu. Dabei wird nach der Methode „Ziehen mit Zurücklegen“ gearbeitet, so dass Schädigungswerte eines Betriebszustandes auch mehrfach einem Nutzer zugewiesen werden können. Jede Schädigungszahl entspricht dabei einer bestimmten Messdauer abhängig von der Länge der Datensätze. Die Messdauer der jeweiligen Lastfälle ist im Normalfall signifikant kürzer als deren Nutzungsdauer im Kundenbetrieb. Für die virtuellen Nutzer werden daher so lange Schädigungswerte gezogen bis

eine festgelegte Referenzdauer erreicht ist. Die erhaltene Schädigungssumme wird auf die Nutzungsdauer der jeweiligen Lastfälle extrapoliert. Nach diesem Verfahren wird die Schädigungssumme für jeden Lastfall eines Nutzers gebildet und daraus die Gesamtschädigung des Nutzers berechnet. Die hinter jedem virtuellen Nutzer steckende Verteilung der Lastfälle und die Abmischung der Lastdaten aus dem Faktormodell wird dabei dokumentiert. Auf dieser Grundlage ermöglicht das Vorgehen die Abbildung der Belastungsverteilung innerhalb einer Nutzerpopulation. Abbildung 3-5 veranschaulicht die Abläufe des Verfahrens nochmals.

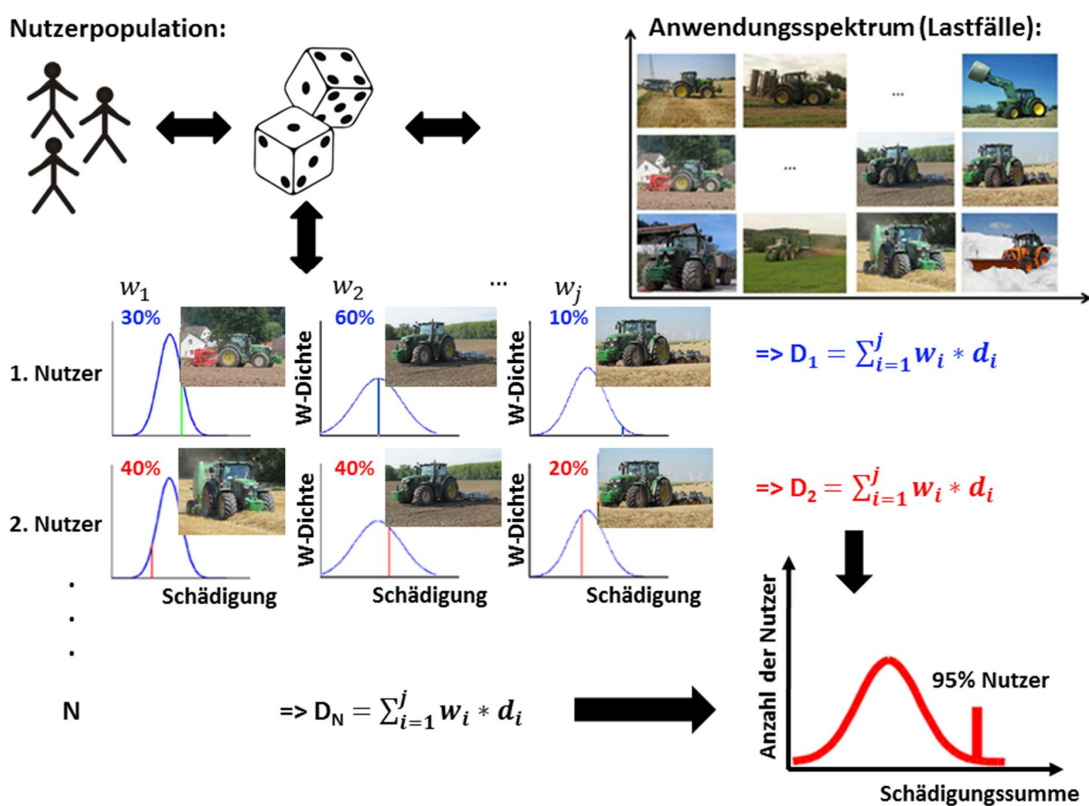


Abbildung 3-5: Berechnungsablauf der Gesamtschädigung eines virtuellen Nutzers und Bestimmung des Auslegungsnutzers innerhalb der Nutzerpopulation mittels Quantilbetrachtung (95% Nutzer)

Die anwendungsspezifische Referenzdauer der jeweiligen Lastfälle beschreibt den Aktionsradius der Nutzer und wird als Variabilität bezeichnet. Die Variabilität definiert, wie die Verteilung der Schädigungszahlen für den jeweiligen Lastfall aus den Messungen erzeugt wird. Die Wirkung und Funktionsweise der Variabilität wird nachfolgend anhand eines vereinfachten Beispiels erläutert.



Innerhalb einer Messkampagne werden 100 Messungen mit gleicher Messdauer  $t_M = 1 \text{ h}$  durchgeführt. Die aufgezeichneten Zeitreihendaten jeder Messung werden durch eine Pseudo-Schädigungszahl beschrieben. Jede Messung ist dabei repräsentativ für die vorherrschenden Belastungen im Nutzungsbetrieb. Die 100 Schädigungswerte der Messkampagne folgen einer Verteilung, die durch einen Erwartungswert  $\mu$  und eine Standardabweichung  $\sigma$  beschrieben werden kann, wie in Abbildung 3-6 mit der roten Kurve dargestellt. Die gemessenen Lastdaten sind auf eine Referenzlänge (Nutzungsdauer) von  $t_R = 100 \text{ h}$  hochzurechnen.

#### Fallbeispiel:

- Vorhandener Datenpool von 100 repräsentativen Messungen (Pseudo-Schädigungswerte) über 1h Arbeitsstunde

#### Extrapolation & Summation auf Referenzlänge:

- Variante 1 „Extrapolation“: Jede Messung  $d_i$  entspricht einem Nutzer. Hochrechnen von  $d_i$  mittels Extrapolationsfaktor  $X$  auf Referenzlänge  $t_R$
- Variante 2 „Summation“: Jede Messung  $d_i$  entspricht einem gewissen Anteil der Referenzlänge  $t_R$  und jedem Nutzer  $D_R$  werden zufällig Messungen  $d_i$  der Länge  $t_M$  zugeordnet bis die Referenzlänge  $t_R$  erreicht ist.

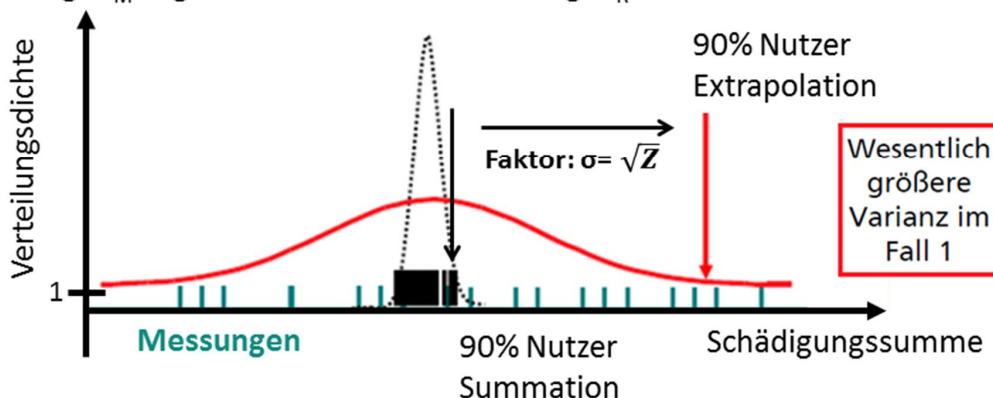


Abbildung 3-6: Fallbeispiel mit den Ansätzen „Extrapolation“ und „Summation“ zur Hochrechnung der Schädigungszahlen auf die Referenzlänge

Zur Hochrechnung der gemessenen Lastdaten auf die Referenzlänge bieten sich nach Abbildung 3-6 zunächst zwei einfache Ansätze an:

#### Variante 1: „Extrapolation individueller Messungen auf die Referenzlänge“

Jede Messung wird einem Nutzer zugeordnet und die Gesamtschädigung eines Nutzers wird mittels Extrapolationsfaktor auf die Referenzlänge hochgerechnet. In diesem



Fall entspricht die Referenzlänge der Nutzungsdauer. Aus den berechneten Gesamtschädigungen der einzelnen Nutzer wird mittels Quantilbetrachtung der Auslegungsnutzer (z. B.: 90% Quantil) ermittelt. Die Varianz innerhalb der Nutzerpopulation entspricht somit der Varianz der Messungen des Datenpools. Die Zusammenhänge sind durch Gleichung (3-1) bis (3-5) dargestellt.

Extrapolationsfaktor:

$$X = 100 \quad (3-1)$$

Gesamtschädigung eines Nutzers auf Referenzlänge (Nutzungsdauer):

$$D = X * d_i = 100 * d_i \quad (3-2)$$

Normierte Gesamtschädigung eines Nutzers auf Referenzlänge:

$$Q_R = \frac{D}{t_R} = \frac{X * d_i}{X * t_M} = \frac{d_i}{t_M} = Q_i \quad (3-3)$$

Erwartungswert „E“ der Nutzerpopulation:

$$E(Q_R) = \frac{\mu}{t_M} \quad (3-4)$$

Varianz „Var“ der Nutzerpopulation:

$$Var(Q_R) = \frac{\sigma^2}{t_M^2} \quad (3-5)$$

*Variante 2: „Aufsummieren zufällig gezogener Messungen aus dem Datenpool bis zur Referenzlänge“*

Die einzelnen Messungen der Messkampagne repräsentieren lediglich einen gewissen Anteil der auftretenden Belastungen im Nutzungsbetrieb. Es werden nun so lange Schädigungszahlen aus dem Datenpool gezogen bis die Referenzlänge erreicht ist. Die Ziehung ist unabhängig vom spezifischen Lastniveau der Schädigungswerte. Die Referenzlänge entspricht hier der Nutzungsdauer. In diesem besonderen Beispiel entsprechen der Extrapolationsfaktor  $X$  aus Fall 1 und der Summationsfaktor  $Z$  der gleichen Zahl, da alle Messungen die gleiche Länge haben. In Realität ist dies eigentlich nicht üblich.

Gesamtschädigung eines Nutzers auf Referenzlänge:

$$D = \sum_{i=1}^Z d_i = \sum_{i=1}^{100} d_i \quad (3-6)$$

Normierte Gesamtschädigung eines Nutzers auf Referenzlänge:

$$Q_R = \frac{1}{t_R} * \sum_{i=1}^Z d_i \quad (3-7)$$

Erwartungswert der Nutzerpopulation:

$$E(Q_R) = \frac{\mu}{t_M} \quad (3-8)$$

Varianz der Nutzerpopulation:

$$Var(Q_R) = \frac{\sigma^2}{Z * t_M^2} \quad (3-9)$$

Abbildung 3-6 stellt den Vergleich der Verteilungen der beiden Ansätze anschaulich dar. Die normierte Gesamtschädigung  $Q_R$  bezüglich der Referenzlänge  $t_R$  hat bei beiden Ansätzen denselben Erwartungswert  $\mu$ , wobei die Standardabweichung  $\sigma$  um den Faktor  $\sqrt{Z}$  variiert. Für hohe Quantile (z. B.: 90% Quantil) einer Verteilung ist dies von entscheidender Bedeutung. Bei näherer Betrachtung ist keiner der beiden Ansätze zufriedenstellend. Denn der erste Ansatz überschätzt das Belastungsniveau, da nicht davon auszugehen ist, dass ein Nutzer durchgehend die härteste Belastung aufbringt („Kein Fahrer fährt immer über die gleiche tiefe Bodenwelle“). Beim zweiten Ansatz nähert sich das Auslegungsquantil vor allem für große Referenzlängen dem Erwartungswert  $\mu$  an. Dies widerspricht jedoch der Erfahrung von Fahrzeugherstellern, dass bestimmte Nutzer durchweg höhere Belastung in das Fahrzeug einleiten als der Durchschnitt. Durch Kombination der beiden Ansätze ergibt sich jedoch ein wesentlich besseres Modell zur Beschreibung der Nutzungsvariabilität. Dabei wird jedem Nutzer eine bestimmte Anzahl von Messungen durch Summation zugeordnet. Im Allgemeinen wird der Aktionsradius eines Nutzers als Ausgangspunkt genutzt. Bei Traktoren wird in diesem Zusammenhang von einem Arbeitszyklus gesprochen. Im zweiten Schritt wird der Arbeitszyklus auf die Nutzungsdauer oder Referenzlänge extrapoliert.

Gesamtschädigung eines Nutzers innerhalb eines Arbeitszyklus:

$$D_{AZ} = \sum_{i=1}^Z d_i \quad (3-10)$$

Variabilität (Länge des Arbeitszyklus) :

$$V = Z * t_M \quad (3-11)$$

Normierte Gesamtschädigung des Nutzers auf Arbeitszyklus:

$$Q_{AZ} = \frac{D_{AZ}}{V} \quad (3-12)$$

Bestimmung des Extrapolationsfaktors:

$$X = \frac{t_R}{V} \quad (3-13)$$

Gesamtschädigung des Nutzers auf Referenzlänge (Nutzungsdauer):

$$D_R = D_{AZ} * X \quad (3-14)$$

Der kombinierte Ansatz aus Summation und Extrapolation hat den Vorteil, dass durch Variation der Zykluslänge zwischen beiden Extremen mit beliebiger Gewichtung interpoliert werden kann. Die Last für den Auslegungsnutzer wird weniger stark überschätzt und die Varianz innerhalb der Nutzerpopulation geht nicht mit zunehmender Referenzlänge gegen null. Der Parameter Variabilität beschreibt somit eine Zeitangabe und bestimmt den Grad der Durchmischung der gezogenen Schädigungswerte aus einer Faktorzone. Die Referenzlänge eines Arbeitszyklus definiert sich durch den Aktionsradius der Nutzer.

Abschließend erfolgt auf Basis der berechneten Gesamtschädigungen der virtuellen Nutzer die Identifikation eines bestimmten Referenz- oder Auslegungsnutzers mittels Quantilbetrachtung. Die ausgewählten Quantilwerte (z. B.: 90%, 95% oder 99% Nutzer) entsprechen einer bestimmten Abdeckungswahrscheinlichkeit der Belastungsverteilung. Die Auswahl des Referenzquantils ist abhängig von der individuellen Unternehmensphilosophie und von der Bauteilfunktion innerhalb der Fahrzeugstruktur. Tragende Strukturbauteile, welche beispielsweise eine Sicherheitsfunktion im Fahrzeug erfüllen, sind typischerweise durch hohe Quantile (99%-Quantil) abzusichern. Wie bereits erwähnt, ist die akkumulierte Gesamtschädigung eines Nutzers als Maß

für die Härte der Belastung während der Fahrzeuglebensdauer zu verstehen. Abbildung 3-7 zeigt modelhaft den Ablauf der Nutzungssimulation mittels U-Sim.

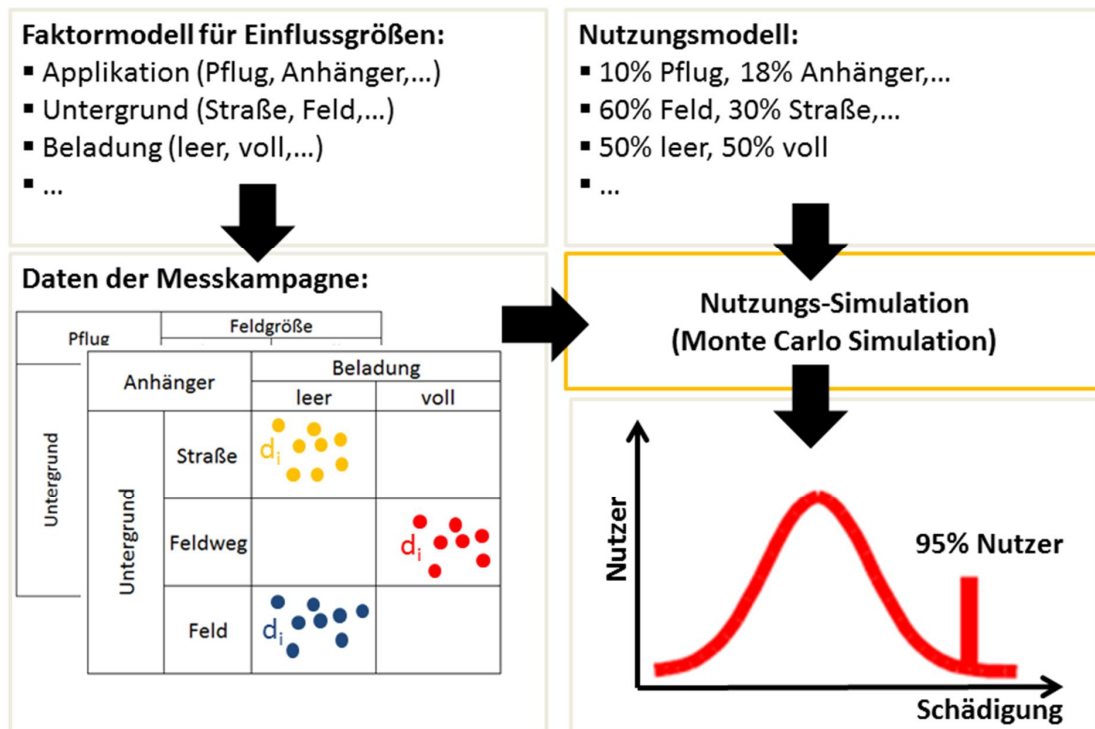


Abbildung 3-7: Beschriebenes Verfahren zur Berechnung der Belastungsverteilung einer Nutzerpopulation unter Berücksichtigung der Nutzungsvariabilität im Kundenbetrieb.

Die hinter dem 95% Nutzer oder Auslegungsnutzer steckende Kombination der Lastdaten dient als Grundlage für weitere Betriebsfestigkeitsuntersuchungen auf Bauteilebene und zur Ableitung repräsentativer Lastkollektive. An Bauteilen der Fahrzeugstruktur herrschen bedingt durch angreifende äußere Lasten innere Spannungszustände. Anhand der kritischsten Kombination der Lastfälle aus der Nutzungssimulation (z. B.: 95% Nutzer) besteht über die gemessenen Lasten der äußeren Messgrößen die Möglichkeit bauteilspezifische Spannungszustände zu berechnen. Über die berechneten BZF der Spannungszustände am Bauteil und mittels Rainflow-Zählung wird eine tragfähige Aussage zur Bauteilbeanspruchung im Nutzungsbetrieb ermöglicht und damit die Ableitung repräsentativer Lastkollektive. Dabei sind weitere Einflüsse auf die Bauteillebensdauer, wie mehraxiale Spannungszustände und Mittel-

lasteffekte angemessen zu berücksichtigen. Die berechneten Bauteilbeanspruchungen können beispielsweise als Eingangsdaten für numerische Betriebsfestigkeitssimulationen genutzt werden oder zur Erstellung geeigneter Prüfvorschriften. Abbildung 3-8 zeigt das Vorgehen zur Ableitung repräsentativer Lastkollektive auf Basis der Ergebnisse der Nutzungssimulation.

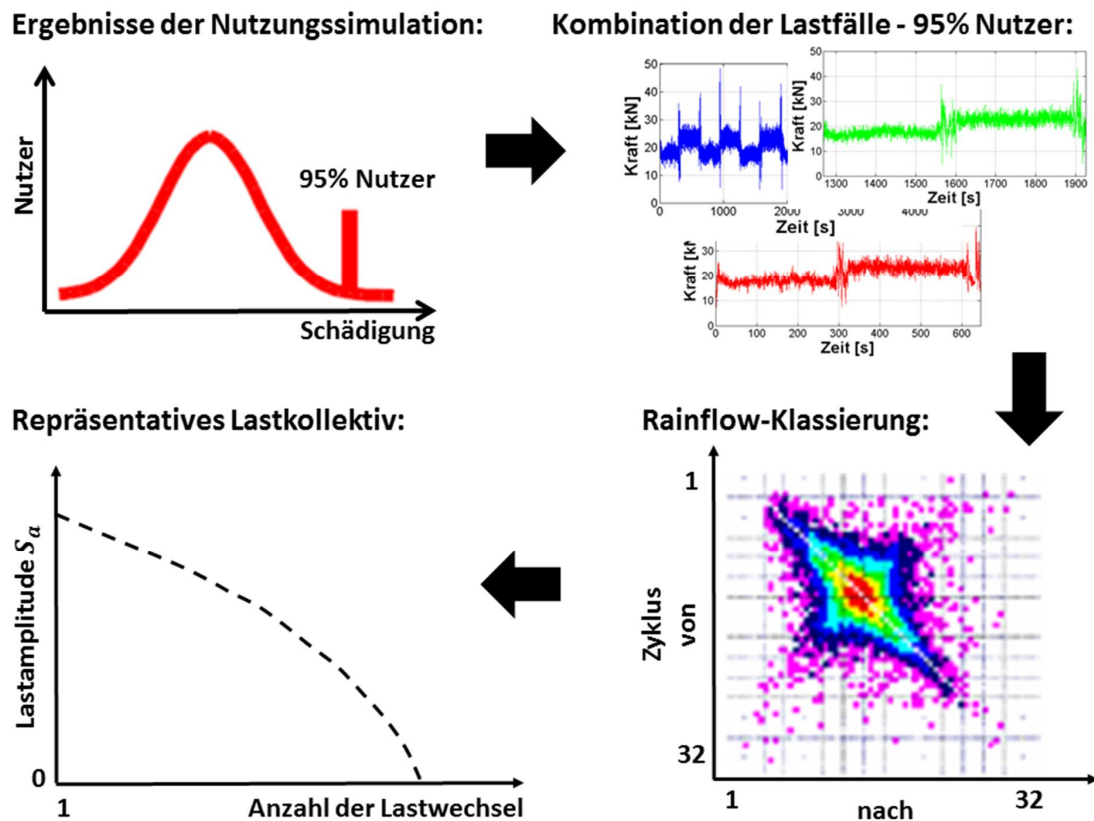


Abbildung 3-8: Ermittlung repräsentativer Lastkollektive anhand der Ergebnisse der Nutzungssimulation

Die Anpassung des Verfahrens an die traktorspezifische Nutzungsvariabilität gilt als zentrales Thema dieser Arbeit. Im Fokus steht die Ermittlung von repräsentativen Lastkollektiven für Strukturkomponenten. Die beschriebenen Zusammenhänge ergeben folgende Untersuchungsschwerpunkte:

- Welche Einflussfaktoren sind für ein traktorspezifisches Faktormodell von zentraler Bedeutung?
- Wie ist sicherzustellen, dass ausreichend Lastmessungen eines spezifischen Betriebszustandes vorhanden sind?

- Sind die wirkenden Fahrzeugbelastungen im Nutzungsbetrieb durch ein allgemeingültiges Faktormodell beschreibbar oder sind baugruppenspezifische Faktormodelle notwendig?

### 3.2. Definition der Einflussfaktoren

Die Definition von Einflussfaktoren ist ein zentraler Punkt zur Beschreibung des Faktormodells und zur Identifikation der zu untersuchenden Betriebszustände innerhalb der Messkampagne. Die erzeugten Fahrzeugbelastungen sind abhängig vom Einsatzspektrum und variieren anwendungsbedingt innerhalb einer Nutzerpopulation. Traktoren werden zur Bodenbearbeitung und zur Erzeugung von Futter- und Erntemitteln eingesetzt, sowie als Transport- und Trägerfahrzeug auf der Straße. Das Faktormodell hat die Aufgabe die schädigungsrelevanten Lastfälle einer Nutzerpopulation abzubilden, um die Berechnung repräsentativer Lastkollektive zu ermöglichen. Die Gestaltung des Faktormodells ist weiterhin abhängig vom Untersuchungsschwerpunkt. Im aktuellen Fall steht die Ermittlung von Lastkollektiven für Strukturkomponenten im Vordergrund. Abbildung 3-9 gibt einen Überblick der wirkenden Einflüsse im Anwendungsbetrieb.

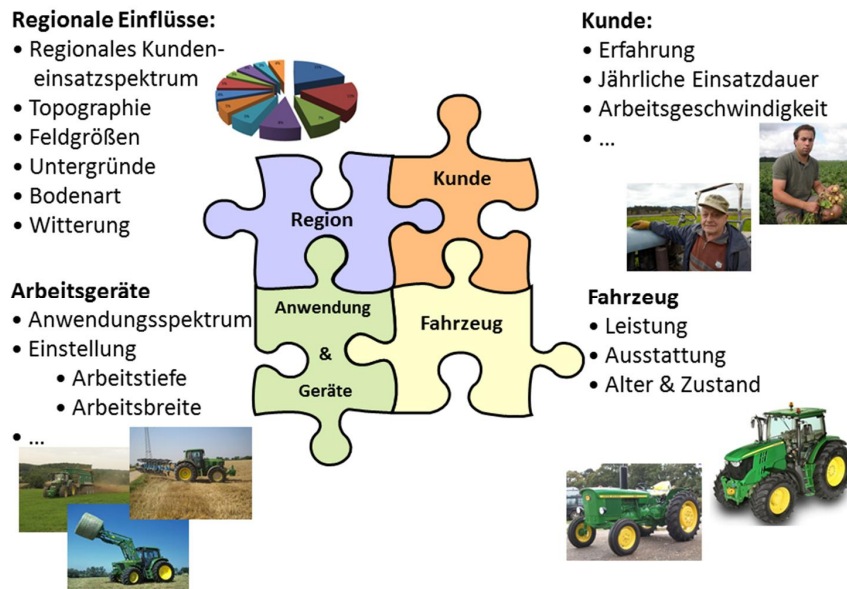


Abbildung 3-9: Mögliche Einflussfaktoren auf die Fahrzeugbelastungen im Nutzungsbetrieb

Eine große Herausforderung bei der Gestaltung des Faktormodells ist sicherlich, ein aussagekräftiges aber nicht zu detailliertes Modell zu erzeugen, um die Aufwände während der Bedienung der Zellen in einem zeitlich handhabbaren Rahmen zu halten. Bisherige Studien zum Thema Lastkollektive bei Ackerschleppern berücksichtigen hauptsächlich den Einfluss der eingesetzten Arbeitsgeräte. Weitere Einflüsse werden bei Berechnung der Lastkollektive nicht explizit berücksichtigt. Im aktuellen Fall beschränken sich die Untersuchungen auf ein spezifisches Traktormodell, daher bleiben fahrzeugspezifische Einflüsse (Leistung, Ausstattung, usw.) wie in Abbildung 3-9 dargestellt, unberücksichtigt. Die Vorauswahl der schädigungsrelevanten Einflussparameter erfolgte in Absprache mit dem Projektpartner John Deere und ist in Tabelle 3-1 dargestellt.

Tabelle 3-1: Vorauswahl schädigungsrelevanter Einflussfaktoren zur Gestaltung des Faktormodells

<b>Faktor</b>	<b>Anzahl Stufen</b>	<b>Beispiel</b>
Applikation	24	Grubber, Mähwerk,...
Untergrund	5	Straße, Feldweg,...
Feldgröße	3	klein, medium, ...
Beladung	3	leer, beladen,...
Topographie	3	Hanglage, Ebene,...
Fahrweise	3	aggressiv, ...

Mittels Tabelle 3-1 zeigt sich, dass die Berücksichtigung aller aufgelisteten Einflussfaktoren und deren Stufen schnell unbeherrschbar werden kann. Eine einfache Berechnung der Anzahl der Zellen des Faktormodells (3-15) macht die Problematik deutlich. Würden lediglich die ersten drei Faktoren berücksichtigt, ergibt sich ein Modell mit circa 375 Zellen.

$$x_{Zellen} = (x_{Applikation} * x_{Untergrund}) * x_{Feldgröße} = (24 * 5) * 3 = 375 \quad (3-15)$$

Jeder weitere Faktor vervielfacht die Anzahl der Zellen nochmals, so dass eine unendlich große Anzahl an Faktorzellen entstehen würde. Aufgrund der Vielzahl von Zellen

wäre es unmöglich alle vorherrschenden Zustände und Wechselwirkungen durch Messungen abzubilden. Die vorliegende Arbeit hat zum Ziel, ein praktikables Modell zur Beschreibung der schädigungsrelevanten Lastfälle im Nutzungsbetrieb zu erstellen. Die einzelnen Faktoren und deren notwendige Stufenanzahl werden anhand der aufgezeichneten Messdaten auf ihren schädigungsrelevanten Einfluss untersucht und werden abschließend in einem finalen Faktormodell zusammengefasst.

Schwerpunkt der Untersuchungen sind sicherlich die **Arbeitsverfahren** oder die eingesetzten Arbeitsgeräte innerhalb einer Nutzungspopulation. Grundsätzlich lassen sich die diversen Arbeitsverfahren in mehrere Kategorien aufteilen und werden durch eine Vielzahl von Arbeitsgeräten repräsentiert. Während bei Bodenbearbeitung hauptsächlich Zugbelastungen auf die Fahrzeugstruktur wirken, treten bei Transportfahrten mit ausgehobenem Anbaugerät hohe Vertikal- und Biegebelastungen auf. Verschiedene Koppelpunkte am Traktor dienen zum Anbau der Arbeitsgeräte (z. B.: Heck- und Frontkraftheber). Weiterhin sind Traktoren starken Achslastschwankungen durch angehängte Zusatzmassen (Arbeitsgeräte oder Frontlader) ausgesetzt. Untersuchungen zu den wirkenden Belastungen der einzelnen Arbeitsverfahren sind in früheren Arbeiten [32, 38, 40] ein zentrales Thema bei der Erstellung von Lastkollektiven. Die eingesetzten Arbeitsgeräte beim Traktor lassen sich in verschiedene Kategorien einteilen, wie nachfolgend aufgelistet und in Abbildung 3-10 dargestellt. Die dargestellten Arbeitsgeräte sind in unterschiedlichen Ausführungen verfügbar und besitzen teilweise speziell anpassbare Werkzeugkonfigurationen.

- Primäre Bodenbearbeitung
- Sekundäre Bodenbearbeitung
- Saat, Düngung & Bestandspflege
- Grünlandarbeiten & Fütterung
- Transport
- Frontladerarbeiten



**Primäre Bodenbearbeitung**



Pflug



Grubber



Tiefenlockerer



Scheibenegge

**Sekundäre Bodenbearbeitung**



Egge



Kreislegge



Scheibenegge



Saatbettkombination

**Saat, Düngung & Bestandspflege**



Säkombination



Güllefass



Feldspritze



Düngerstreuer

**Grünland & Fütterung**



Mähwerk



Wender/ Schwader



Ballenpresse



Ladewagen



Futtermischwagen

**Transport**



Anhängert-Transport



Geräte-Transport



Traktor-Transport

**Frontlader**



Erdarbeiten



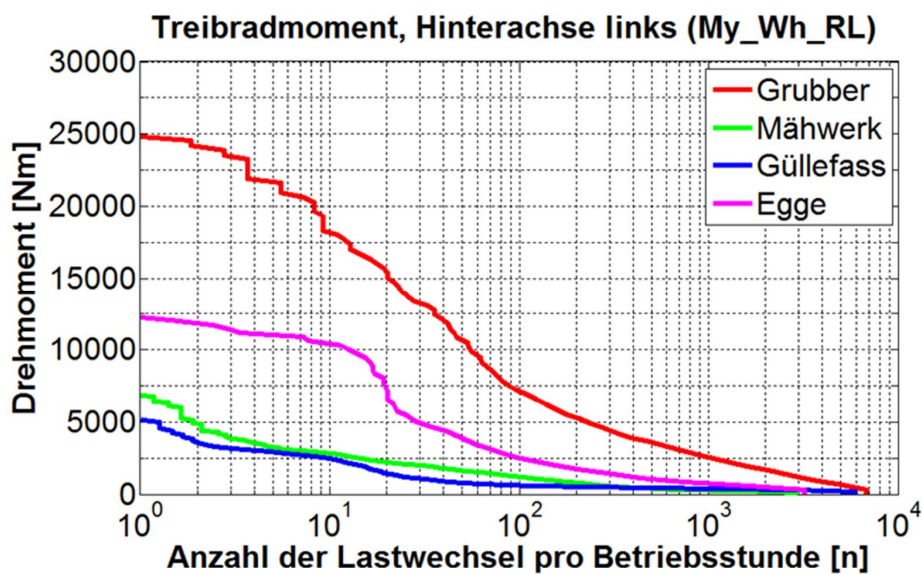
Material befördern



Be-/ Entladen

Abbildung 3-10: Einteilung der Arbeitsverfahren für Traktoren im Leistungsbereich von 150 PS

Derlei Einteilungen sind ebenfalls in früheren Literaturquellen nachweisbar [17, 20, 22]. Eigene Messungen zum Einfluss verschiedener Arbeitsfahren zur Belastungsverteilung belegen die Ergebnisse früherer Untersuchungen. Abbildung 3-11 zeigt beispielhaft den Einfluss verschiedener Arbeitsgeräte auf die wirkenden Drehmomente am linken Hinterrad. Aufgetragen ist das gemessene Amplitudenspektrum des Drehmoments über der Anzahl der Lastwechsel. Zur Vergleichbarkeit sind die dargestellten Messungen auf eine Betriebsstunde normiert. Es zeigt sich, dass die wirkenden Radrehmomente beim Grubbern deutlich höher liegen als beispielsweise beim Mähen von Gras oder beim Transport mit einem Güllefass. Der Vergleich zwischen Egge und Grubber zeigt weiterhin, dass zwischen primärer und sekundärer Bodenbearbeitung deutliche Lastunterschiede feststellbar sind.



Arbeitsverfahren	Arbeitsgerät	Arbeitsbreite	Füllvolumen
Primäre Bodenbearbeitung	Grubber	5 m	-
Düngung	Güllefass	-	10.000 l
Grünland	Mähwerk	4 m	-
Sekundäre Bodenbearbeitung	Egge	5 m	-

Abbildung 3-11: Wirkende Lastamplitude des Drehmoments am linken Hinterrad über der Anzahl der Lastwechsel pro Betriebsstunde bei unterschiedlichen Arbeitsverfahren

Zusätzlich zum Einfluss der Arbeitsgeräte führen wechselnde **Untergrundbedingungen** während der Feldarbeit und bei Transportvorgängen zu starken Belastungsschwankungen. Grundsätzlich sind Untergründe nach der Nachgiebigkeit und Oberflächenqualität (Unebenheiten, Schlaglöcher, Rauigkeit) einzuteilen. Die einfachste Form der Einteilung lautet Feld - Feldweg - Straße und findet bereits in einigen Literaturquellen Anwendung [20, 40]. Biller zeigt jedoch eine weitaus detailliertere Form der Einteilung und löst die Güte der Feldwege (Betonwege, Schlechtwege, Gras- & Erdwege) deutlich feiner auf [32]. Eigene Lastmessungen mit einer Egge bestätigen den Einfluss der Untergrundbedingungen. Abbildung 3-12 zeigt die Auswertung der wirkenden Raddrehmomente am linken Hinterrad mit einer Egge beim Feldeinsatz und beim Transport auf der Straße und dem Feldweg. Aufgetragen sind die gemessenen Drehmomentamplituden über der Anzahl der Lastwechsel pro Betriebsstunde für die verschiedenen Einsatzbedingungen. Bei der Feldarbeit dominieren hohe Drehmomente durch die Interaktion zwischen Boden und Arbeitsgerät. Beim Gerätetransport auf Straße und Feldweg sind die erzeugten Raddrehmomente niedriger. Bedingt durch Unebenheiten und Schlaglöcher ist auf Feldwegen ein höheres Amplitudenspektrum nachweisbar als bei der Straßenfahrt.

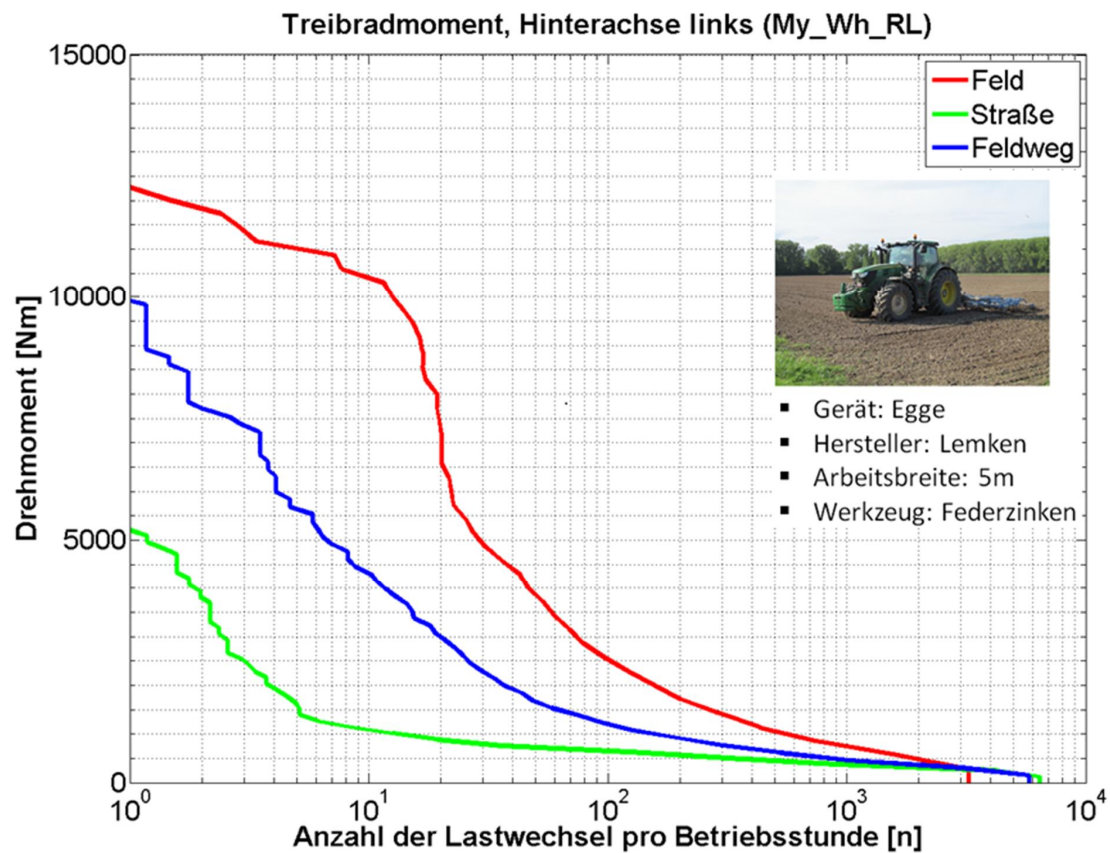


Abbildung 3-12: Gemessene Lastamplituden des Drehmoments am linken Hinterrad über der Anzahl der Lastwechsel pro Betriebsstunde bei verschiedenen Untergrundbedingungen

Im Zusammenhang mit Transportanwendungen spielt der **Beladungszustand** eine wichtige Rolle. Untersuchungen von Biller [32] diesbezüglich zeigen Belastungsschwankungen durch die wirkende Anhängelast. Eigene Messungen bestätigen diese Ergebnisse. Abbildung 3-13 zeigt die Auswertung der Lastamplituden des gemessenen Drehmoments am linken Hinterrad für verschiedene Beladungszustände beim Arbeitseinsatz mit einem Güllefass. Aufgetragen ist der Vergleich der gemessenen Drehmomentamplituden über der Anzahl der Lastwechsel pro Betriebsstunde beim

Arbeitseinsatz mit leerem und gefülltem Güllefass. Im beladenen Zustand sind die erzeugten Lastamplituden größer als bei leerem Güllefass, im Bereich hoher Drehmomente beträgt die Differenz der Lastamplitude bis zu 1,5.

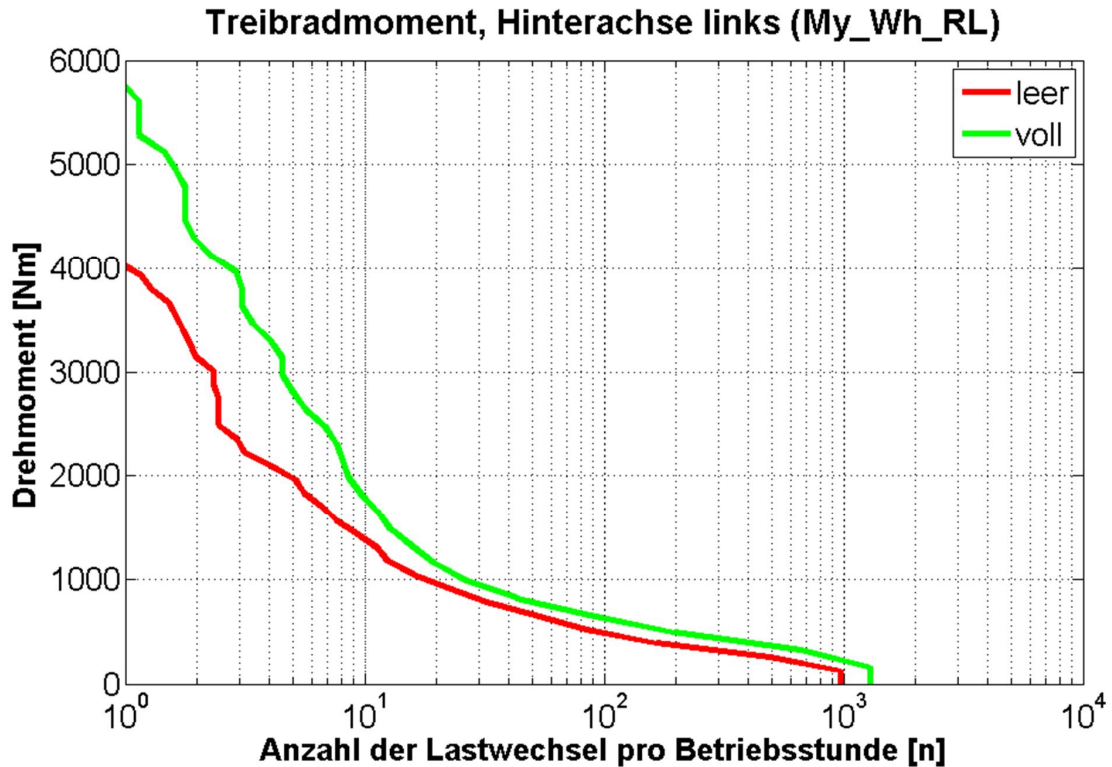


Abbildung 3-13: Wirkende Amplitude des Drehmoments am linken Hinterrad über der Anzahl der Lastwechsel pro Betriebsstunde bei variierenden Beladungszuständen

Weiterhin wirken sich **topographische Einflüsse** auf den Zugkraftbedarf eines Traktors aus. Bei Arbeiten in Hanglage ist nicht nur der spezifische Zugwiderstand zu überwinden, sondern die Normalkraftkomponente durch die Hangneigung. Wenner [21] beschreibt in seinen Untersuchungen diesen Zusammenhang und weist darauf hin, dass in topographisch anspruchsvollem Gelände Traktoren mit 15% bis 20% höherer Motorleistung eingesetzt werden. Weiterhin ist der Einfluss erhöhter Seitenlasten und zusätzlicher Biegemomente zu berücksichtigen.

$$F_{AH} + F_{AV} = F_W + F_H$$

$F_{AH}$  - Zugkraft Hinterachse (N)

$F_{AV}$  - Zugkraft Vorderachse (N)



$F_W$	- Zugkraftwiderstand	(N)
$F_H$	- Hangabtriebskraft	(N)

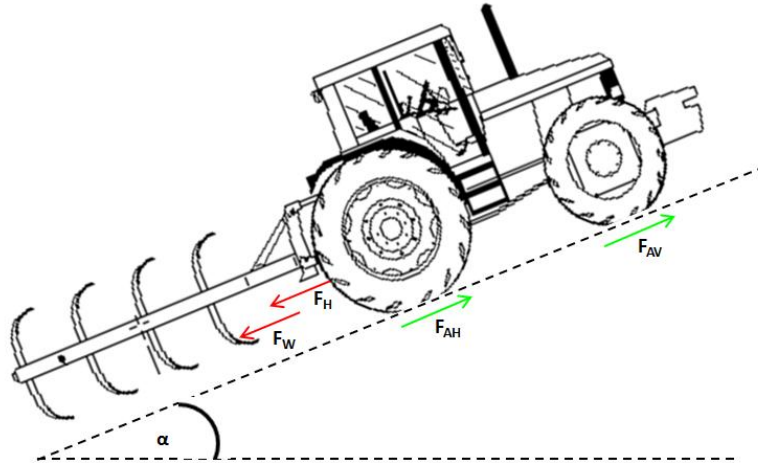


Abbildung 3-14: Einfluss des topographischen Profils während der Bodenbearbeitung

Bei der Bodenbearbeitung ist der Einfluss der **Feldgröße** nicht zu vernachlässigen, denn bei großen Feldern ist der zeitliche Anteil des eigentlichen Arbeitsprozesses im Vergleich zum Wendemanöver höher als bei kleinen Feldern. Wendemanöver bewirken durch das Ausheben des Arbeitsgeräts am Feldende hohe Vertikal- und Seitenbelastungen an Strukturkomponenten des Fahrzeugs. Abbildung 3-15 zeigt diesen Effekt anhand der aufgezeichneten Vertikalkraft der Hinterachse beim Grubbern. Grundlage der Untersuchung sind gemessene Lastdaten bei variierender Feldgröße. Die erzeugten Pseudo-Schädigungszahlen basieren auf BZF-Segmenten und sind auf eine Arbeitsstunde normiert. Ein Segment besteht jeweils aus zwei wechselnd aufeinander folgenden Arbeitsbahnen und Wenden eines Datensatzes, um die natürliche Arbeitsweise beim Grubbern widerzuspiegeln. Die ermittelten Schädigungswerte sind über die Feldlänge aufgetragen. Zur besseren Beurteilbarkeit sind die Schädigungswerte der einzelnen Segmente auf den Mittelwert aller Segmente bezogen. Die Schädigungszahlen bei kleinen Feldern liegen maximal um das 1,8-fache höher als die Schädigung gemittelt über alle Segmente. Bei Beurteilung des Lastunterschieds zwischen kleinen und großen Feldern ist maximal eine um den Faktor 3 höhere Schädigung nachweisbar.

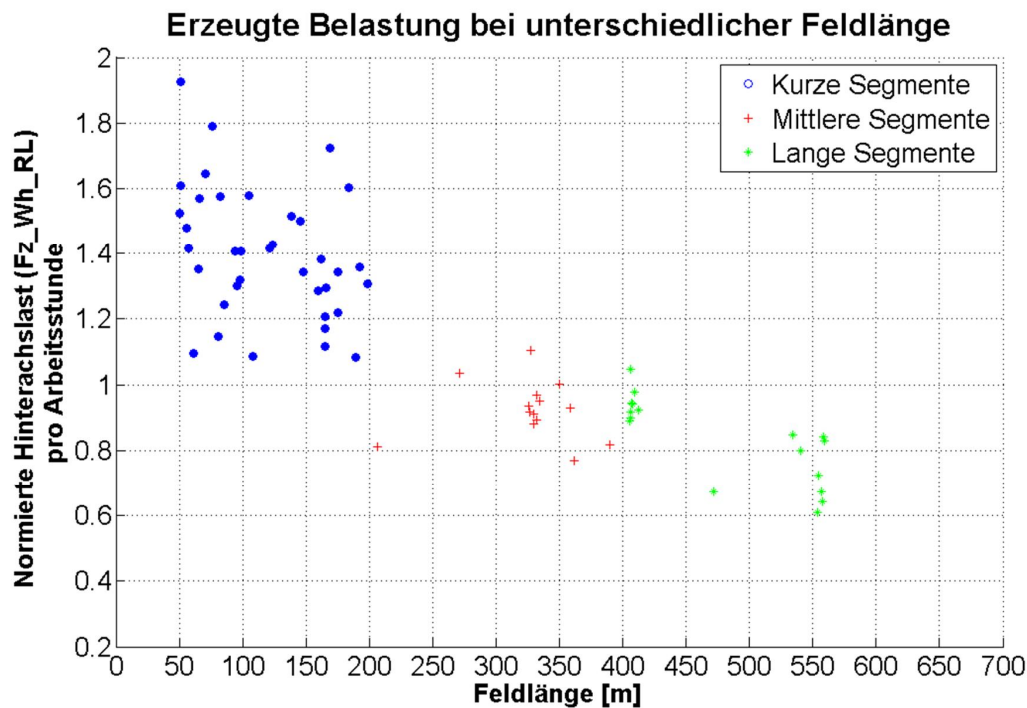


Abbildung 3-15: Zeitnormierte Pseudo-Schädigungszahlen der Vertikalkraft des linken Hinterrads (Fz\_Wh\_RL) beim Grubbern bei unterschiedlicher Feldlänge

Der Führer der Arbeitsmaschine kann das Belastungskollektiv durch seine **Fahrweise** und seinen Ausbildungsgrad maßgeblich beeinflussen. In der Literatur konnten diesbezüglich keine Studien gefunden werden. Ein Hauptproblem ist die Quantifizierbarkeit der Fahrweise, da es sich hierbei um subjektive Eindrücke handelt. Im Rahmen dieser Arbeit wird nicht explizit auf die Untersuchung der Fahrweise eingegangen. Durch Untersuchung eines breiten Einsatzspektrums im Nutzungsbetrieb werden Belastungsschwankungen durch die unterschiedliche Fahrweise des Fahrzeugführers teilweise qualitativ abgebildet.

Eine Hauptaufgabe der anstehenden Messkampagne ist die Verifikation der beschriebenen Einflussfaktoren und deren Einteilung in ein zielführendes Faktormodell. Folgende Punkte stehen dabei im Vordergrund:

- Sind alle Strukturkomponenten durch ein Faktor-Stufen-Modell beschreibbar oder ist es zielführend für bestimmte Baugruppen ein eigenständiges Faktormodell zu definieren?

- Wie viele Stufen innerhalb eines Faktors sind als sinnvoll anzusehen und liegen in diesem Umfang auch Daten zur Einsatzverteilung im Nutzungsbetrieb vor?
- Analyse und Abschätzung zum Detaillierungsgrad des Faktormodells?

### **3.3. Definition des Nutzungsmodells**

Die Definition des Nutzungsspektrums bedingt zunächst die Auswahl eines Versuchsfahrzeugs. Abhängig von Leistung und Ausstattung variieren das Nutzungsverhalten und die Arbeitsgeräte eines Fahrzeugs. In der vorliegenden Arbeit wurde ein John Deere Standardtraktor zur Aufzeichnung der Lastdaten eingesetzt. Es handelt sich um einen Premiumtraktor mit einer Motorleistung von 150 PS. Aufgrund der Leistungskennwerte wird das Fahrzeug in landwirtschaftlichen Betrieben mit einer Nutzfläche zwischen 50-150 ha eingesetzt. In Abbildung 3-16 zeigen Auswertungen des statistischen Bundesamts zur Bodennutzung in Deutschland, wie die vorhandenen Flächen abhängig von der Betriebsgröße genutzt werden. Die Bodennutzung der Landwirtschaftsbetriebe zwischen 50ha bis 200ha zeigt prozentual die größten Anteile als Acker- und Grünlandflächen. Die Zusammenhänge bestätigen somit, dass das Versuchsfahrzeug vornehmlich im Bereich von Vieh-, Misch- und Ackerbaubetrieben eingesetzt wird. Die für Abbildung 3-16 zugrunde liegende Datenerhebung ist im Anhang nochmals hinterlegt.



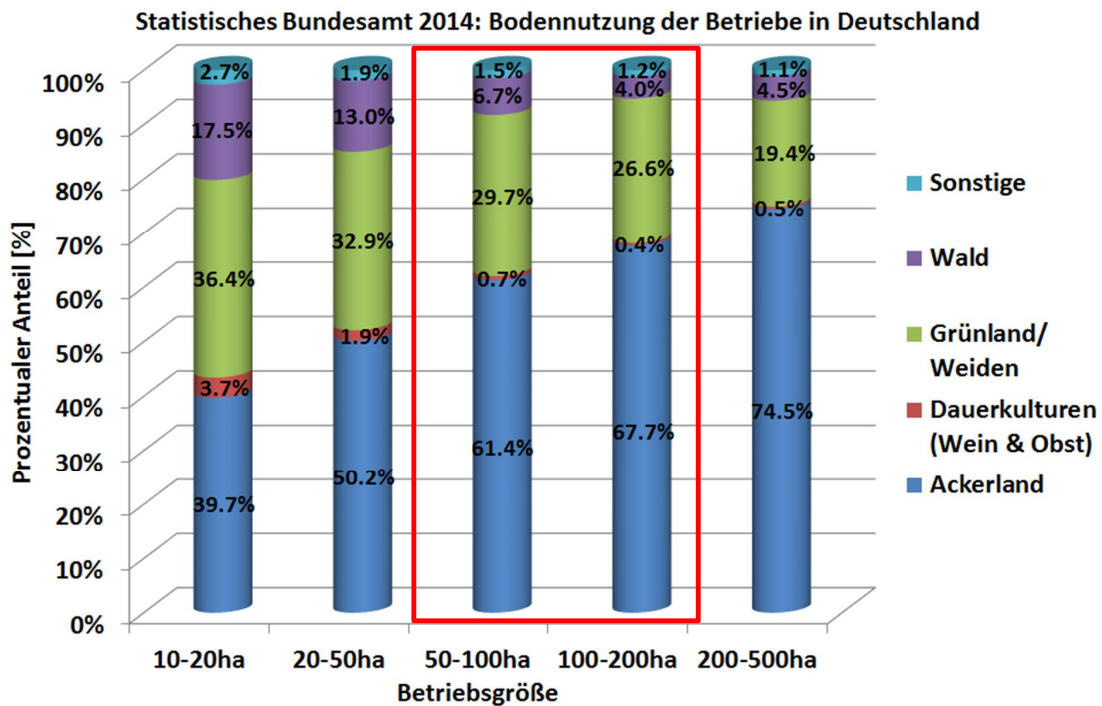


Abbildung 3-16: Erhebung des statistischen Bundesamt (DESTATIS) von 2014 zur Bodennutzung landwirtschaftlicher Betriebe in Deutschland [44]

Die Zielgruppe sind somit kleine Ackerbaubetriebe, Viehbetriebe (Futterbau- und Veredelung) und deren Mischformen. Schwerpunktmäßig werden die Fahrzeuge bei Ackerbaubetrieben zur Bodenbearbeitung, Ernte und für Transportarbeiten eingesetzt und weniger für Grünlandanwendungen. Weiterhin unterscheidet sich die saisonale Nutzung der Fahrzeuge im Vergleich zu den anderen genannten Betriebsformen. Während Viehbetriebe die Fahrzeuge meist ganzjährig im Einsatz haben, ist beim Ackerbau die Nutzung oftmals temporär stark konzentriert. Auch im Bereich von Lohnunternehmern findet die angesprochene Fahrzeugklasse Verwendung, jedoch zu einem geringen Prozentsatz. Die nachfolgenden Definitionen charakterisieren die einzelnen Betriebsformen.

**Marktfruchtbetrieb (Ackerbau):** Marktfruchtbetriebe erwirtschaften mehr als 50% des Betriebsumsatzes aus Marktfrüchten. Als Marktfrüchte zählen Getreide, Zuckerrüben, Gemüse, oder Ähnliches. Arbeitsmaschinen werden in diesem Segment hauptsächlich zur Bodenbearbeitung, zu Verteilerarbeiten und zum Gütertransport eingesetzt. Die Nutzung der Fahrzeuge ist oftmals stark saisonal konzentriert.

**Futterbau- und Veredelungsbetrieb (Viehbetrieb):** Diese Betriebe erwirtschaften den Großteil ihrer Erträge aus Futterbau und Viehhaltung. Hierzu zählen Mischformen aus Grünlandbearbeitung und Ackerbau zur Gewinnung von Futtermitteln für Milchvieh oder Schweine, sowie Verteiler- und Stallarbeiten. Die Fahrzeuge werden ganzjährig eingesetzt.

**Gemischtbetrieb:** Bei Gemischtbetrieben handelt es sich um Mischformen aus Marktfreuchtbetrieben und anderen Betriebsformen, deren individueller Deckungsbeitrag nicht mehr als 50% erbringt.

**Lohnunternehmer:** Hierzu zählen Unternehmer welche im Auftrag Dritter landwirtschaftliche und kommunale Arbeiten durchführen. Diese Unternehmer beschreiben ein breites Einsatzspektrum und eine hohe jährliche Nutzungsdauer.

Aus den oben beschriebenen Daten zur Betriebsgröße und -ausrichtung, den Ergebnissen der Literaturrecherche [17, 19] und aufgrund der Einschätzungen des Projektpartners wurde die Nutzungspopulation für das ausgewählte Fahrzeug aus folgenden Betriebsformen zusammengestellt:

- 10% Ackerbaubetriebe
- 35% Viehbetriebe (Futterbau & Veredelung)
- 55% Mischbetriebe

Die angegebene Verteilung wurde unter Berücksichtigung folgender Überlegungen zusammengestellt. Die Angaben diverser Literaturquellen zur Kundeneinsatzverteilung stammen hauptsächlich aus den 1980-1990 Jahren. Neuere statistisch abgesicherte Einsatzdaten aus öffentlichen Quellen waren nicht verfügbar, da die Traktorenhersteller diese Daten weitgehend vertraulich behandeln. Aufgrund des voranschreitenden Wandels der Landwirtschaft seitens der Betriebsstrukturen und der Traktorennutzung dienen die Erkenntnisse aus älteren Untersuchungen lediglich als Orientierungsgrundlage. Während Betriebe mit einer Nutzfläche von bis zu 100 ha zum Zeitpunkt früherer Untersuchungen [17] als Großbetriebe angesehen wurden und die Traktorennutzung in diesem Leistungsbereich weitgehend auf Ackerbau beschränkt war, sind diese Betriebe heutzutage als mittelgroße Betriebe anzusehen. Aufgrund der Schlagkraft heutiger Arbeitsgeräte und den vorherrschenden Betriebsstrukturen hat sich das Einsatzprofil dieser Nutzer entsprechend angepasst. Das Einsatzspektrum ist nicht mehr

weitgehend auf Ackerbau beschränkt, sondern es fallen vermehrt Anwendungen im Bereich Grünland und Transport an. Betriebsformen mit vornehmlich Wein- und Obstbau oder starkem Forsteinsatz wurden hier nicht berücksichtigt. Abbildung 3-17 gibt einen Überblick der typischen Arbeitsgeräte und deren Einsatzhäufigkeit entsprechend der identifizierten Betriebsformen.



Abbildung 3-17: Übersicht zum Einsatzverhalten von Traktoren im Leistungsbereich von 150 PS bei verschiedenen Betriebsformen

Die anteilige Zuordnung der Arbeitsverfahren erfolgt abhängig von der jeweiligen Betriebsform und ist in Tabelle 3-2 dargestellt. In Summe ergeben die prozentualen Anteile der einzelnen Betriebsformen 100% der Nutzerpopulation. Innerhalb jeder Betriebsform ergibt die prozentuale Verteilung der Arbeitsverfahren in Summe ebenfalls 100%. Die zeitlichen Anteile der Arbeitsverfahren variieren zwischen den verschiedenen Betriebsformen. Die dargestellte Einsatzverteilung ist für ein Auslegungsziel von 10.000 Betriebsstunden abgeleitet. Abhängig von der jeweiligen Fahrzeugklasse und der Unternehmensphilosophie ist das beschriebene Betriebsstundenziel anzupassen.

Die Auslegung auf 10.000 Betriebsstunden oder 10 Jahre Einsatzdauer, was einer jährlichen Einsatzdauer von 1.000 Betriebsstunden entspricht, gilt jedoch als grundlegende Annahme bei vielen Traktorenherstellern [40].

Tabelle 3-2: Verteilung der Arbeitsverfahren nach den ausgewählten Betriebsformen des Versuchsfahrzeugs

	Viehbetrieb	Ackerbaubetrieb	Mischbetrieb
Anteil an Nutzerpopulation	35%	10%	55%
Primäre Bodenbearbeitung	14%	30%	22%
Sekundäre Bodenbearbeitung	9%	19%	14%
Saat, Düngung & Bestandspflege	14%	26%	20%
Grünland & Fütterung	21%	0%	12%
Transport	24%	16%	20%
Frontlader	18%	9%	12%

Eine detaillierte Einleitung nach Arbeitsgeräten erfolgt im späteren Verlauf der Arbeit, da weitere Informationen zur Applikationsverteilung durch die Messkampagne mit in die Bewertung einfließen. Da sich die vorliegende Arbeit mit der Entwicklung und Adaptierung von Verfahren zur Erstellung repräsentativer Lastkollektive für Traktoren befasst, sind die beschriebenen Einsatzverteilungen gegebenenfalls herstellenspezifisch durch eigene Nutzungsmodelle anzupassen. Die ermittelten Verteilungen erheben nicht den Anspruch auf Allgemeingültigkeit.

Erste Untersuchungen zu den Auswirkungen verschiedener Untergründe auf das Belastungsspektrum haben gezeigt, dass die Verteilung der Untergründe in geeigneter Form zu berücksichtigen ist. Aktuelle Studien zur Beschaffenheit und Kategorisierung des Untergrunds sind für Deutschland nicht verfügbar. Jedoch gibt es bereits frühere Untersuchungen dazu. Biller [32] leitet in seinen Untersuchungen eine grundsätzliche Einteilung aus Erhebungen von über 1.000 Kundenbetrieben ab.

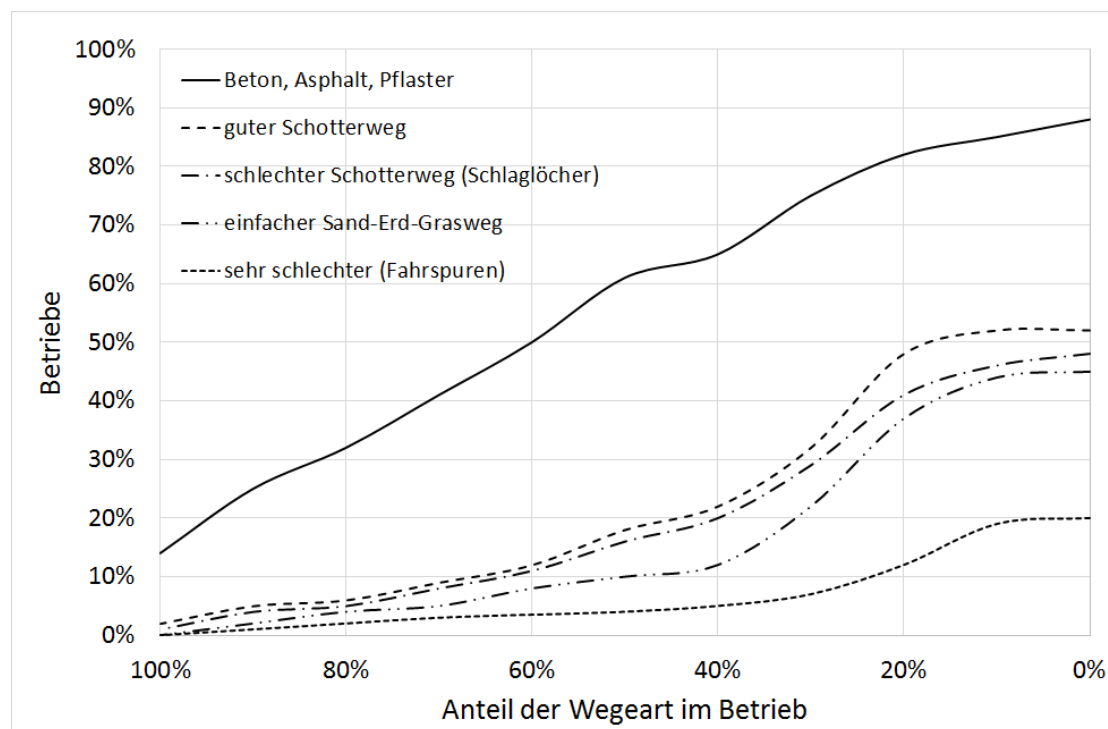


Abbildung 3-18: Kategorisierung und Verteilung der Wegearten nach Biller (nachgezeichnet) [32]

Abbildung 3-18 zeigt die durchschnittliche prozentuale Verteilung der Wegearten in den Betrieben. Die vorherrschenden Untergrundbedingungen sind in 5 Stufen eingeteilt und beschreiben verschiedene Kategorien wie Straße, Feldweg oder Schlechtweg. Eine detaillierte Einteilung nach dem Vorbild Billers ist im Rahmen dieser Messkampagne nicht umsetzbar, da die Anzahl der Messungen nicht ausreichend ist. Aus diesem Grund erfolgt eine Kategorisierung in die Stufen Feld - Feldweg - Straße. Die endgültige Verteilung wird im finalen Nutzungsmodell dargestellt. Dabei werden zusätzlich zu den Erkenntnissen von Biller [32] und Auernhammer [18], eigene Untersuchungen während der Messkampagne in die Verteilung eingearbeitet.

Untersuchungen zum Einfluss der Beladung, der Feldgröße oder Topographie werden im Rahmen dieser Messkampagne durchgeführt. Hierzu sind jedoch keinerlei Nutzungsdaten vorhanden. Ausgehend von der finalen Gestaltung des Faktormodells werden nicht verfügbare Nutzungsdaten aus den Erkenntnissen der Messkampagne abgeleitet.

### **3.4. Übertragbarkeit und Anwendungsgrenzen**

Das Faktormodell dient zur Ermittlung repräsentativer Lastkollektive für Strukturkomponenten. Inwieweit das Modell auf andere Untersuchungsschwerpunkte wie das Getriebe oder andere Komponenten des Antriebsstrangs übertragbar ist, wäre fallspezifisch zu überprüfen. Bei getriebeseitigen Lastkollektiven sind beispielsweise die wirkenden Belastungen an Zahnrädern und in den einzelnen Getriebestufen von Interesse. Diese sind jedoch abhängig vom Kupplungseinfluss und der Verharrungszeit in bestimmten Gangstufen. Diese Effekte werden durch ein Faktormodell, das auf äußere Strukturbelastungen ausgelegt ist nicht direkt berücksichtigt. Die Methodik zur Beschreibung der Nutzungsveränderlichkeit ist jedoch nicht nur auf die Betriebsfestigkeit beschränkt. Sinnvolle Anwendungsgebiete könnten beispielsweise die Verbrauchssimulation zur Evaluierung verschiedener Fahrstrategien oder die Untersuchung der Effizienz des Antriebsstrangs sein.

## 4 Fahrzeugmessungen

Zur Untersuchung der Fahrzeugbelastungen im Nutzungsbetrieb steht im Rahmen dieser Arbeit ein John Deere 6150R zur Verfügung. Ausgehend von den identifizierten Kundensegmenten und deren Fahrzeugnutzung erfolgt die Instrumentierung des Versuchsfahrzeugs und die Auswahl der notwendigen Einsatzbedingungen. Die Einsatzbedingungen der aufgezeichneten Lastmessungen werden ausführlich dokumentiert und es erfolgt eine Plausibilitätsprüfung der Messdaten.

### 4.1. Versuchsfahrzeug

Das ausgewählte Versuchsfahrzeug ist ein Standardtraktor der John Deere 6000er Baureihe mit einer Nennleistung von 150 PS. Der Traktor ist im mittleren Leistungssegment der 6000er Baureihe positioniert, die sich aktuell in einem Leistungsbereich von 90 bis 215 PS bewegt. Das Fahrzeug besitzt eine hochwertige Ausstattung, die dem Standard eines mitteleuropäischen Premiumkunden entspricht (Automatikgetriebe, Hydraulik mit Load-Sensing System, drei Zapfwelldrehzahlen, vier individuell steuerbare Hydraulikanschlüsse, Frontkraftheber inklusive Frontzapfwelle und einen Frontlader). Eine detaillierte Fahrzeugbeschreibung ist im Anhang einzusehen. Tabelle 4-1 zeigt die charakteristischen Leistungsmerkmale des Fahrzeugs.

Tabelle 4-1: Fahrzeugspezifikation des Versuchsträgers John Deere 6150R

Fahrzeugspezifikationen:	
Hersteller:	John Deere
Baureihe:	6000er Baureihe
Modell:	6150R
Nennleistung:	110 kW (150 PS)
Maximalleistung (IPM):	125 kW (170 PS)
Radstand:	2765 mm
Getriebe:	IVT (Infinitely Variable Transmission)
Maximale Fahrgeschwindigkeit:	50 km/h

Zulässiges Gesamtgewicht:	11300 kg
Maximale Vorderachslast	5400 kg
Maximale Hinterachslast:	8000 kg



Abbildung 4-1: John Deere 6150R

#### 4.2. Instrumentierung des Versuchsträgers

Im Kundenbetrieb erzeugte Eingangsbelastungen an der Fahrzeugstruktur sind durch geeignete Messgrößen abzubilden. Grundlegend ist dabei zu berücksichtigen, dass bei Traktoren nicht nur über die Räder Belastungen in die Fahrzeugstruktur eingeleitet werden, sondern ebenfalls durch Koppelpunkte wie Heck- und Frontkraftheber, Anhängervorrichtungen oder den Frontlader. Die Auswertung von Garantiedaten und Ersatzteilabgängen kann wichtige Hinweise auf eventuelle Betriebsfestigkeitsprobleme oder kritische Schadensmodi im Kundenbetrieb liefern, daher ist es empfehlenswert solche Erkenntnisse bei der Auswahl der Messgrößen zu berücksichtigen. Abbildung



4-2 zeigt ein vereinfachtes Traktormodell und dient zur Darstellung der notwendigen Messgrößen am Fahrzeug.

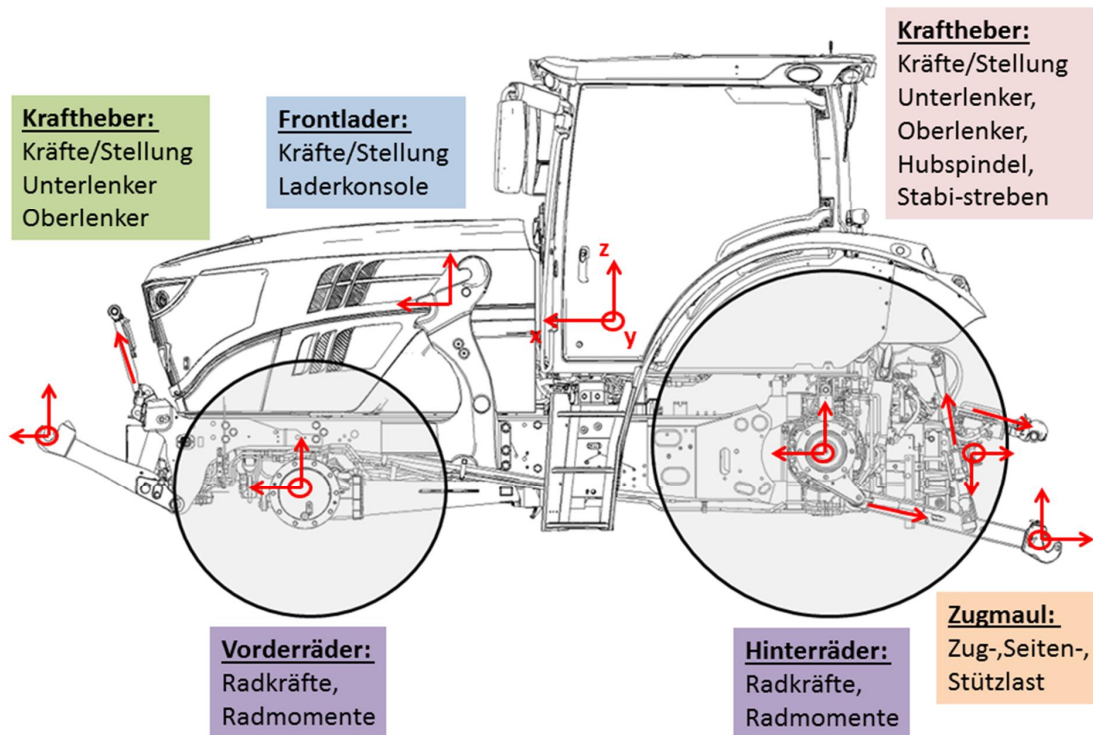


Abbildung 4-2: Ausgewählte Lasteinleitungspunkte zur Beschreibung der auftretenden Betriebsbelastungen am Messfahrzeug, einem John Deere 6150R.

Die Instrumentierung darf den Nutzer im Arbeitseinsatz nicht behindern und der Traktor muss universell einsetzbar sein. Zur Ausrüstung des Versuchsträgers dient vorhandene Messtechnik des Projektpartners John Deere. Die Aufzeichnung der Lastdaten erfolgt durch das Messsystem Somat eDAQ [45]. Das Feldmesssystem eignet sich zur Messung dynamischer Fahrzeugbelastungen bis zu einer Abtastrate von 10.000 Hz im praktischen Einsatz. Es ermöglicht die Aufzeichnung von analogen (Kräfte, Drücke, usw.) und digitalen Signalen (z. B.: CAN-Bus) mit bis zu 150 simultan aufgezeichneten Eingangsgrößen bei entsprechender Abtastrate. Zur Messung der dreidimensionalen Radkräfte und -momente dienen Radkraftaufnehmer, die entsprechend zwischen Rad- und Achsflansch montiert sind. Die Aufzeichnung der eingeleiteten Lasten am Heck-

kraftheber erfolgt durch mit Dehnungsmessstreifen (DMS) instrumentierte und kalibrierte Kraftheberkomponenten, wie Unterlenker, Hubspindel oder Oberlenker. Am Frontkraftheber eingeleitete Lasten werden durch dreidimensionale Kraftmesszellen an den Unterlenkern und einem mit DMS instrumentierten Oberlenker gemessen. Weiterhin erfolgen an beiden Krafthebern die Aufzeichnung der Zylinderwege zur Positionsbestimmung und die Aufzeichnung der wirkenden Zylinderdrücke. Eingeleitete Belastungen der Anhängervorrichtung im Heckbereich des Fahrzeugs werden über dreidimensionale Kraftmesszellen gemessen. Die Aufzeichnung wirkender Längs- und Vertikalkräfte am Frontlader erfolgt über mit Drucksensoren instrumentierte Hub- und Kippzylinder am Frontlader. Die Berechnung der wirkenden Kräfte erfolgt durch die Zylinderwirkfläche. Über Seilzugpotentiometer werden die korrespondierenden Zylinderwege aufgezeichnet. Mittels der geometrischen Beziehungen am Frontlader erfolgt die Transformation in Längs- und Vertikalkräfte. Weiterhin werden die wirkenden Drehmomente und Drehzahlen an Front- und Heckzapfwelle, sowie an der Motorausgangswelle aufgezeichnet. Zusätzlich werden zahlreiche CAN-Bus und GPS-Daten des Fahrzeugs gemessen. Die Instrumentierung hinsichtlich positiver Signalrichtung orientiert sich am ISO-Standard für Kraftfahrzeuge entsprechend des in Abbildung 4-2 dargestellten Koordinatensystems. Eine ausführliche und detaillierte Messgrößenliste ist im Anhang beigefügt.

### 4.3. Kundenbetriebe & Einsatzbedingungen

Eine derartige Messkampagne ist mit großem Aufwand verbunden und erfordert große Sorgfalt hinsichtlich der Betreuung des Versuchsträgers und der Dokumentation der Einsatzbedingungen. Aufgrund begrenzter Ressourcen sind derartige Messkampagnen im Kundenbetrieb nur stichpunktartig sinnvoll umsetzbar. Eine zentrale Aufgabe in diesem Zusammenhang ist die Auswahl geeigneter Kundenbetriebe für die Messkampagne, welche das angestrebte Einsatzspektrum hinreichend abdecken. Es sind nicht nur Anforderungen hinsichtlich des Applikationsspektrums zu berücksichtigen, sondern es gilt ebenfalls vorherrschende Umgebungsbedingungen einzubeziehen. Die folgende Kundenauswahl wurde diesbezüglich unter Berücksichtigung der in Kapitel 3.2 und 3.3 identifizierten Einfluss- und Nutzungsfaktoren zusammengestellt.

**Kunde A (Milchviehbetrieb/ Kreis Odenwald - Hessen):** Bei Kunde A handelt es sich um einen klassischen Milchviehbetrieb mit circa 150 Tieren. Der Familienbetrieb

liegt im vorderen Odenwald und beschäftigt zwei zusätzliche Angestellte. Neben der Milchviehhaltung bewirtschaftet der Kunde ebenfalls circa 80 ha Grünland- und Ackerfläche zur Futterproduktion. Das Einzugsgebiet des Kunden erstreckt sich über einen Umkreis von 30 km vom vorderen Odenwald bis zur Bergstraße. Das Geländeprofil der Anbauflächen wechselt zwischen topographisch sehr anspruchsvollen Bereichen mit erheblichen Steillagen (>15%) und ebenen Bereichen. Die vorherrschenden Bodenbedingungen sind variabel gelagert, es wechselt zwischen mittel-schweren und schweren Böden. Das Applikationsprofil des Kunden ist auf Ackerbau, Grünland und Hofarbeiten ausgerichtet. Die Verteilung der Schlaggrößen liegt zwischen einem und drei Hektar.

**Kunde B (Ackerbauer & Lohnunternehmer/ Kreis Donnersberg - Pfalz):** Kunde B ist schwerpunktmäßig auf den Ackerbau ausgerichtet. Angebaut werden Feldfrüchte, wie Getreide, Mais oder auch Zuckerrüben. Weiterhin werden vom Kunden Lohnarbeiten für Biogasanlagen und für benachbarte Landwirte durchgeführt. Kunde B bewirtschaftet dabei eine Ackerfläche von circa 150 ha. Der Betrieb liegt im Kreis Donnersberg in Rheinland-Pfalz. Das Einzugsgebiet des Kunden erstreckt sich über einen Radius von circa 50 km, was einen nicht unerheblichen Anteil von Transportarbeiten bedingt. Die Bodenbeschaffenheit bei der Feldarbeit wechselt zwischen leichten bis mittel-schweren Böden. Die Schlaggrößen des Kunden belaufen sich auf zwei bis sieben Hektar. Topographisch wechseln sich weitgehend ebene Flächen mit leichten Hanglagen ab. Der Betrieb beschäftigt zwei Angestellte.

**Kunde C (Gemischtbetrieb/ Bruchsal - Baden Württemberg):** Bei Kunde C handelt es sich um einen Gemischtbetrieb. Der Kunde betreibt einen Pferdehof mit über 100 Reitpferden. Die Hauptaufgaben sind die Erzeugung von Futtermitteln, was bedeutet dass das Fahrzeug hauptsächlich für Ackerbau- und Grünlandarbeiten eingesetzt wird. Weiterhin sind weitreichende Transport- und Frontladerarbeiten notwendig, da der anfallende Dung verarbeitet werden muss. Der Kunde bewirtschaftet eine landwirtschaftliche Nutzfläche von 60 ha und dabei hauptsächlich Acker- und Grünlandflächen. Die Bodenbeschaffenheit der Anbauflächen wechselt zwischen mittel-schweren und schweren Böden. Die Schlaggrößen liegen zwischen einem und vier Hektar. Topographisch sind ebene Anbauflächen und leichte Hanglagen vorherrschend.

**Kunde D (Ackerbauer/ Kraichgau - Baden Württemberg):** Kunde D ist ein klassischer Ackerbauer im Kraichgau. Der Kunde bewirtschaftet eine Ackerfläche von circa 120 ha und baut vornehmlich Feldfrüchte, wie Getreide und Mais an. Der Kunde betreibt weiterhin eine eigene Biogasanlage, die Abfuhr von Abfallprodukten der Biogasanlage ist dabei eine seiner Hauptaufgaben. Weitere Einsatzfälle sind Bodenbearbeitung, Saatbettbereitung, Sä- und Pflegearbeiten. Das Einzugsgebiet des Kunden ist auf einen Umkreis von circa 50 km begrenzt. Die Bodenbeschaffenheit der Anbauflächen variiert von leichten bis schweren Böden. Die Schlaggrößen liegen zwischen zwei und sechs Hektar.

**Kunde E (Acker- & Gemüsebaubetrieb/ Mannheim - Baden Württemberg):** Bei Kunde E handelt es sich um einen Acker- und Gemüsebauern aus dem Großraum Mannheim. Der Kunde bewirtschaftet circa 160 ha Anbaufläche, wobei zwei Drittel der Anbaufläche dem Gemüseanbau und ein Drittel dem Ackerbau zugerechnet werden. Die Hauptaufgaben des Fahrzeugs sind Bodenbearbeitung, Saatbettbereitung, Ernte und Abfuhr von Feldfrüchten und Gemüse. Das topographische Profil der Anbauflächen ist durchweg eben und es sind leichte sandige, sowie mittelschwere Böden vorherrschend. Die Schlaggrößen des Kunden liegen zwischen zwei bis sieben Hektar. Der Kunde beschäftigt drei festangestellte Mitarbeiter und während der Gemüseernte zahlreiche Saisonkräfte.

Das Ziel der Messkampagne ist es die ausgewählten Kundenbetriebe über den kompletten Jahreszyklus ihres Betriebs zu begleiten und deren charakteristische Arbeitsansätze aufzuzeichnen. Die Dauer der Messkampagne ist daher auf circa 1,5 Jahre angelegt, um auf Überschneidungen der verschiedenen Arbeiten der Kunden reagieren zu können. Daher war es wichtig die Kundenauswahl auf einen Einzugsgebiet von 200 km zu begrenzen, um den Versuchsträger entsprechend schnell umzusetzen. Die Messfahrten werden durch die Kunden selbst oder deren Fahrer durchgeführt.

#### **4.4. Messkampagne**

Zur Untersuchungen der wirkenden Fahrzeugbelastungen wurden zahlreiche Messfahrten bei den ausgewählten Kunden durchgeführt. Die vorherrschenden Einsatzbedingungen des Traktors, wie statische Achslasten oder Reifendruck, sowie die Einsatzbedingungen der einzelnen Messungen wurden ausführlich für die anschließende

Datenauswertung dokumentiert. Die Begleitung des Versuchsträgers durch Videosequenzen hilft im späteren Verlauf der Auswertung gezielt Rückschlüsse auf die Einsatzbedingungen zu ziehen. Tabelle 4-2 zeigt das Vorgehen bei der Dokumentation der einzelnen Messungen.

Tabelle 4-2: Protokollierung der Einsatzbedingungen während der Messkampagne

Spezifikation: Traktor	
Hersteller	John Deere
Typ	6150R
Seriennummer	--
Nominelle Motorleistung [kW]	110
Getriebe	AutoPower
Front Ballast [kg]	1150 kg (Front Hitch)
Radgewichte hinten [kg]	-
Radstand [mm]	2765
Federungssysteme	Vorne: TLS   Kabine: -

Reifen Informationen		
	Vorne	Hinten
Hersteller	Pirelli	Pirelli
Typ	TM 800	TM 800
Größe	600/65R28	710/70R38
Reifendruck [bar]	1.2	1.2
Spurweite [mm]	1890	1912
Speed Radius Index (SRI) [mm]	700	925

Statische Lasten [kg]*	Spezifikation: Anhänger		
	ohne Anhänger	mit leerem Anhänger	mit vollem Anhänger
Achslast vorne	5560	5500	4720
Achslast hinten	4170	4920	8480
Gesamtgewicht	9730	10420	13200
Verteilung Vorne / Hinten [%]	58 : 42	53 : 47	35 : 65
Anhänger, Achslast (beide Achsen)	XXX	9800	16820
---	XXX		
Stützlast	XXX	690	3470
Füllgewicht	XXX	XXX	9800
Gesamtgewicht Anhänger	XXX	10490	20290
Gesamtgewicht Traktor & Anhänger	XXX	20220	30020
Gewicht zu Leistung [kg/kW]	88	184	273

Spezifikation: Anhänger	
Typ	Miststreuer
Hersteller	Tebbe Maschinenfabrik
Model	HKS 180
Seriennummer	22464
Zul. Gesamtgewicht [kg]	20000
Max. Achslast (1 & 2) [kg]	18000
Max. Stützlast [kg]	2000
Baujahr	2001



**Bestimmung der Achslasten:**

Ohne Fahrzeugführer  
Füllstand Tank: 100%

Anhänger wurde an  
Kugelkupplung angehängt  
"obere Position" 80mm  
Kugelkupplung

Während der Messkampagne entstanden 245 Messungen zur Beschreibung der Fahrzeugbelastungen im Nutzungsbetrieb. Dabei wurden gemäß den ausgewählten Nutzergruppen zahlreiche Arbeitsgeräte untersucht, die den typischen Einsatzbedingungen im Kundenbetrieb entsprechen. Abbildung 4-3 stellt eine typische Auswahl der vorkommenden Einsätze während der Messkampagne dar.



Abbildung 4-3: Übersicht typischer Betriebszustände während der Messkampagne

#### 4.5. Validierung der Rohdaten

Zur Weiterverarbeitung der Messdaten ist eine sorgfältige Sichtung der Rohdaten notwendig. Die vorhandenen Datensätze werden unter Zuhilfenahme des Protokolls der Messkampagne und durch die Auswertung von Videosequenzen den spezifischen Einsatzszenarien zugeordnet. In einem weiteren Schritt folgt die Prüfung auf eventuelle Signalanomalien, wie Spikes, Signaldrift oder unzulässiger Offset-Werte. Eine Plausibilitätsprüfung der gemessenen Eingangsgrößen an bestimmten Lasteinleitungspunkten schließt die Validierung der Rohdaten ab. Beispielhaft hierfür ist die Überprüfung der abgegebenen Motorleistung. Durch die aufgezeichneten Treibradmomente und die vorhandenen Raddrehzahlen kann in Verbindung mit dem Wirkungsgrad des Antriebsstrangs  $\eta$  die abgegebene Motorleistung an der Kurbelwelle berechnet werden. Der Vergleich erfolgt mit der gemessenen Motorleistung, welche aus dem gemessenen Motormoment und der Motordrehzahl berechnet wird.

Berechnung der abgegebenen Motorleistung:

$$P_{Motor} = \eta_{Antriebsstrang} * P_{Treibrad.gesamt} \quad (4-1)$$



$$M_M * n_M = \eta * \left[ \begin{array}{l} (M_{Y\_Wh\_RL} * n_{Wh\_RL}) + (M_{y\_hH\_RR} * n_{Wh\_RR}) + \\ (M_{y\_Wh\_FL} * n_{Wh\_FL}) + (M_{y\_Wh\_FR} * n_{Wh\_FR}) \end{array} \right] \quad (4-2)$$

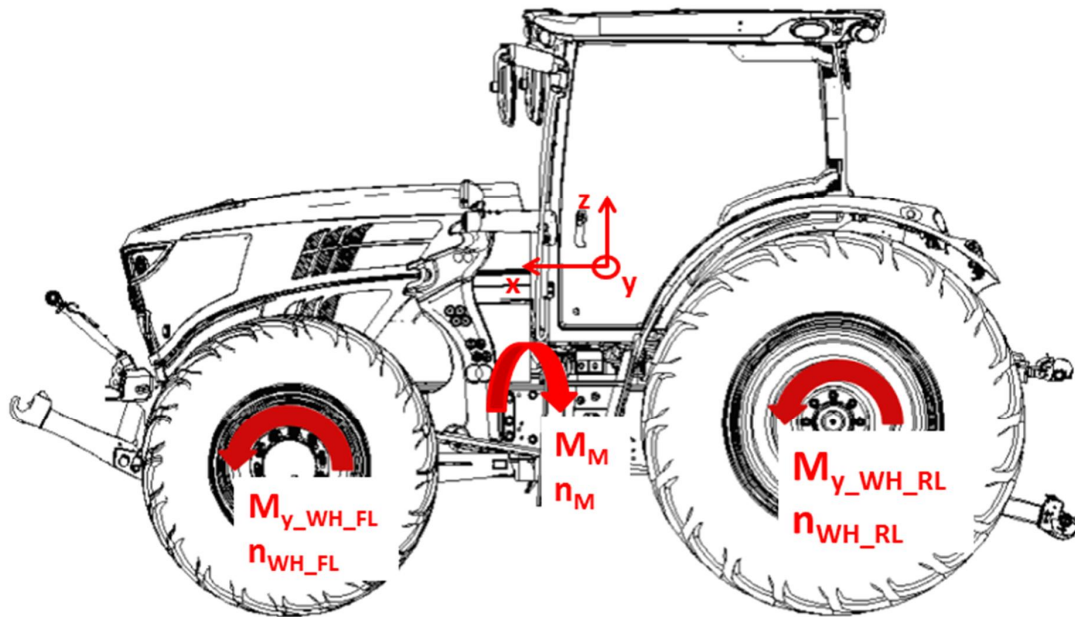


Abbildung 4-4: Bezug zwischen Motor- und Treibradleistung am Fahrzeug

Weiterhin besteht die Möglichkeit durch Wiegen des Fahrzeugs die gemessenen statischen Radaufstandskräfte, sowie die gemessenen Lasten am Kraftheber zu überprüfen. Mittels Wiegeplatten wird die aufstehende Masse eines einzelnen Rades bestimmt und in die Radaufstandskräfte umgerechnet. Die gemessenen Radlasten des leeren Versuchsfahrzeugs sind im Anhang dokumentiert.

$$F_{z\_WH,Wägung} = m_{WH,Wägung} * g = F_{z\_WH,Messung} \quad (4-3)$$

Bei Vergleich der gewogenen Radaufstandskräfte mit und ohne angehängtem Anbaugerät besteht die Möglichkeit die Masse des Anbaugeräts genau zu bestimmen. Ausgehend davon wird die am Kraftheber wirkende Vertikallast berechnet. Durch Berücksichtigung der geometrischen Beziehungen des Krafthebers und dessen aktueller Position besteht die Möglichkeit das Kräftegleichgewicht zu bestimmen und die jeweiligen gemessenen Komponentenkräfte zu verifizieren.

Gesamtmasse aus Radaufstands-Massen (mit/ohne Anbaugerät):

$$m_{Gesamt} = \sum m_{WH} \quad (4-4)$$

Bestimmung der Anbaugeräte-Masse:

$$m_{Anbaugerät} = m_{Gesamt,mit\ Anbau} - m_{Gesamt,ohne\ Anbau} \quad (4-5)$$

Berechnung der Gewichtskraft des Anbaugeräts:

$$F_{G_{Anbau}} = m_{Anbaugerät} \times g \quad (4-6)$$

Berechnung der gemessenen Vertikalkraft am Kraftheber:

$$F_{z_{Hitch}} = F_{x_{LoLnk\_RL}} \times \sin \gamma + F_{x_{LoLnk\_RR}} \times \sin \gamma + F_{LiLnk\_RL} \times \cos \beta \\ + F_{LiLnk\_RR} \times \cos \beta + F_{CenLnk} \times \sin \alpha \quad (4-7)$$

Vergleich von Gewichtskraft und gemessener Vertikalkraft am Kraftheber:

$$F_{G_{Anbau}} = F_{z_{Hitch}} \quad (4-8)$$

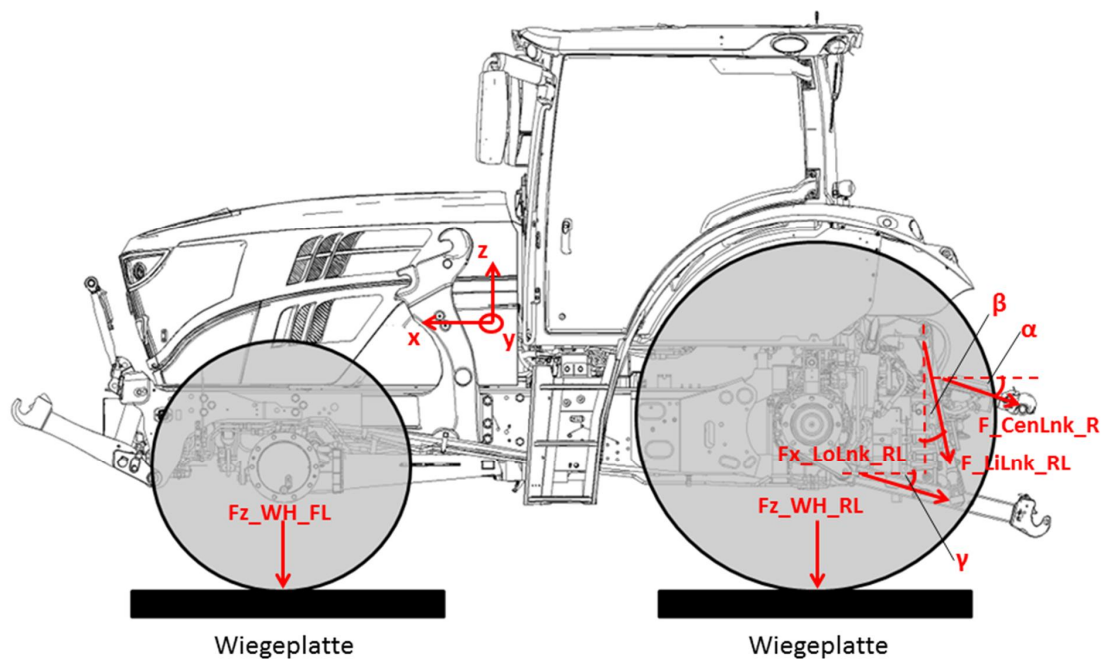


Abbildung 4-5: Statische Überprüfung der gemessenen Radaufstandskräfte am Fahrzeug durch Wägung



In einem finalen Schritt erfolgt die Berechnung weiterer Kenngrößen aus den Rohdaten, wie beispielsweise dem Torsionsmoment des Hauptrahmens. Abschließend werden die einzelnen Datensätze den spezifischen Einsatzszenarien zugeordnet, um eine zielgerichtete Datenauswertung und Nutzungssimulation zu ermöglichen.

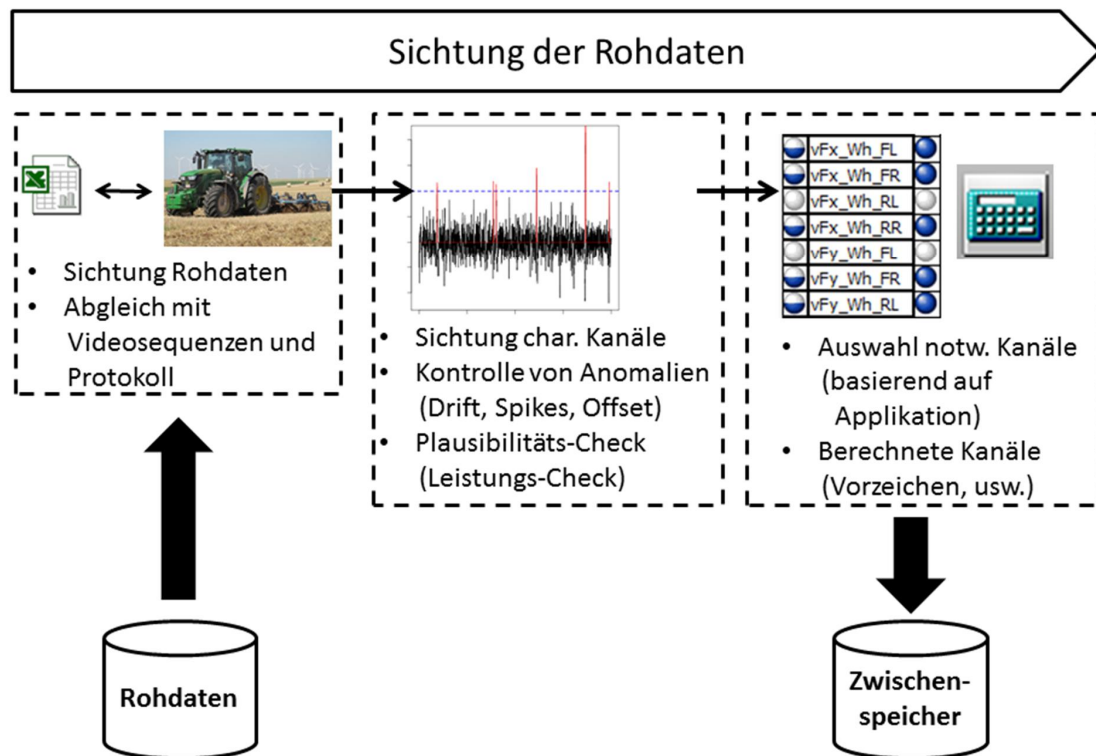


Abbildung 4-6: Vorgehensweise zur Sichtung und Verarbeitung der Rohdaten

## 5 Datenanalyse und Faktormodell

Die aufgezeichneten Lastdaten dienen zur Erstellung eines geeigneten Faktormodells zur Beschreibung der Betriebsbelastungen an einem Traktor. Wichtige Punkte der Datenanalyse sind die Verifikation der definierten Lastfälle und die Überprüfung der Datengrundlage der ausgewählten Lastfälle im Faktormodell.

### 5.1. Datenanalyse

Zur Identifikation der kritischsten Kombination der Lastfälle im Nutzungsbetrieb müssen die verfügbaren Messdaten für die einzelnen Messgrößen in Form von Pseudo-Schädigungszahlen vorliegen und den jeweiligen Lastfällen im Faktormodell zugewiesen werden. Im folgenden Abschnitt ist daher ein grundlegender Überblick zur Berechnung der Pseudo-Schädigungszahlen dargestellt. Im Fokus der Untersuchung stehen Beobachtungspunkte an der Fahrzeugstruktur, wie zum Beispiel gemessene Kräfte und Momente der Antriebsachsen, sowie eingeleitete Kräfte am hinteren Koppelpunkt oder am Heckkraftheber.

Die Messdauer der einzelnen Datensätze beträgt abhängig vom Kundeneinsatz zwischen 15 Minuten und 2,5 Stunden. Die ursprünglichen Datensätze enthalten oftmals mehrere Betriebszustände, wie die Bearbeitung eines gesamten Feldes inklusive An- und Abfahrt zum Feld. Im Faktormodell werden Feldarbeit und Gerätetransport jedoch getrennt betrachtet, was ein Aufteilen der ursprünglichen Datensätze entsprechend den jeweiligen Betriebszuständen notwendig macht. Weiterhin ist es nicht sinnvoll große Datensätze beispielsweise zur Bodenbearbeitung eines Feldes in einen einzelnen Schädigungswert umzurechnen. Die Überführung der BZF in eine Schädigungszahl würde die natürliche Streuung innerhalb der Messung nicht abbilden, diesbezüglich werden die BZF in kürzere Segmente zerteilt, um die nutzungsspezifische Streuung während der Feldarbeit abzubilden. Weiterhin wäre ein Verzicht auf das Zerteilen der BZF nachteilig für die Bedatung der Zellen des Faktormodells, da bestimmte Zellen nur unzureichend mit Schädigungswerten belegt wären. Entsprechend der verschiedenen Lastfälle werden der Anwendung angepasste Schnittkriterien eingesetzt. Ein wichtiger Punkt bei der Segmentierung der Ursprungsdaten ist, dass die einzelnen Abschnitte weiterhin das charakteristische Belastungsverhalten der Anwendung repräsentieren. Die einzelnen Segmente der BZF werden anschließend mittels Rainflow-

Zählung in den Häufigkeitsbereich überführt. Auf Basis der Ergebnisse erfolgt die Berechnung der Pseudo-Schädigungszahlen nach Gleichung (2-16). Als Wöhlerkoeffizient wird  $k = -5$  angesetzt, was für unlegierte Stähle einen plausiblen Wert darstellt [5].

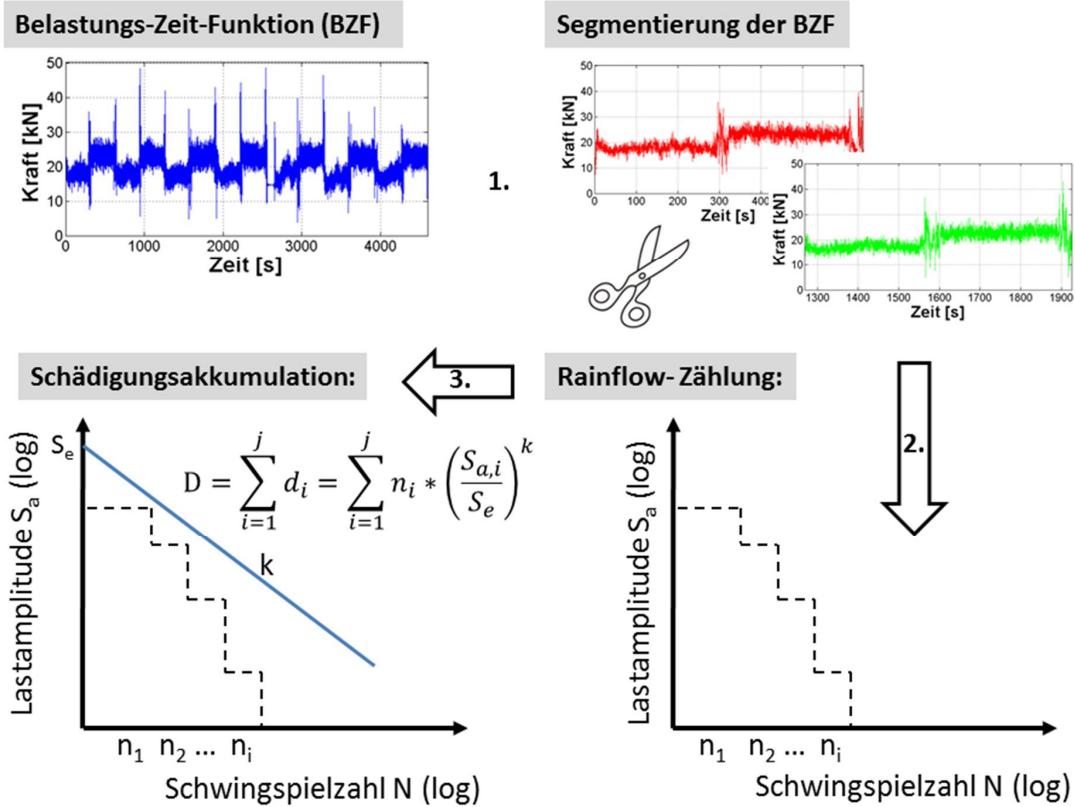


Abbildung 5-1: Zerlegung der BZF in Segmente und Erzeugung der Pseudo- Schädigungszahlen aus den Ergebnissen der Rainflow-Zählung

### 5.2. Schnittkriterien

Die Anwendung von Schnittkriterien ist ein wichtiger Schritt zur Erzeugung einer breiten Datenbasis innerhalb des Faktormodells. Durch sinnvolle Zerlegung wird ein einzelner Datensatz durch eine Vielzahl von Schädigungswerten repräsentiert, welche die Belastungsverteilung eines Lastfalls widerspiegelt. Bei der Zerlegung der Zeitreihendaten sind jedoch einige zentrale Grundsätze zu beachten. Zunächst müssen die erzeugten Segmente den charakteristischen Belastungsverlauf der Applikation abbilden. Dabei ist es nicht zielführend die Datensätze aller gemessenen Applikationen durch ein bestimmtes Schnittkriterium zu zerlegen. Anwendungsbedingt ist die Art der Seg-

mentierung beispielsweise den Gegebenheiten der Feldarbeit oder dem Transport anzupassen. Dabei folgt die Feldarbeit meist einem typischen Bearbeitungsmuster, bei dem ein ständiger Wechsel zwischen Arbeitsprozess und Wendemanövern am Feldrand stattfindet. Bei Transportarbeiten ist ein solch regelmäßiges Arbeitsmuster nicht feststellbar. Hier finden eher regellose Zustände, wie Beschleunigen, Bremsen oder konstante Fahrt abhängig von Verkehrslage, Straßenqualität und dem topographischen Profil statt. Für Feldeinsätze bietet sich daher ein arbeitsmusterbasiertes Schnittkriterium an, während für Transportarbeiten ein zustandsbasiertes Schnittkriterium oder eine Segmentierung auf Basis äquidistanter Zeitschritte sinnvoll erscheint. Die zur Datensegmentierung eingesetzten Schnittkriterien werden nachfolgend beschrieben.

### **5.2.1 Arbeitsmuster basiertes Schnittkriterium**

Während der Bodenbearbeitung zeigt sich ein ständiger Wechsel zwischen Arbeitsprozess und Wendemanöver. Die Abfolge der Zustände kann als Arbeitsmuster beschrieben werden. Der eigentliche Arbeitsprozess während der Bodenbearbeitung ist im Normalfall charakterisiert durch einen homogenen Belastungsverlauf mit hohen Zugbelastungen in Fahrzeuginnenrichtung. Dabei treten hohe Mittellasten und geringe Lastamplituden auf. In Ausnahmefällen können jedoch hohe Spitzenlasten festgestellt werden, wenn beispielsweise das Arbeitsgerät mit im Boden befindlichen Starrkörpern (z. B. Steine) in Kontakt kommt. Im Gegensatz dazu sind beim Wendemanöver hohe Lastamplituden feststellbar. Beim Wenden entstehen durch das Ausheben des Arbeitsgeräts am Feldrand große Vertikal- und Seitenbelastungen. Die Anwendung eines Schnittkriteriums auf Basis äquidistanter Zeitschritte ist daher nicht zielführend anzusehen, da feldspezifische Bahnlängen und die Anzahl der Wenden nicht kontrollierbar wären. Die jeweiligen Messgrößen würden abhängig von der Messgröße große Abweichungen bei der Berechnung der Schädigungswerte zeigen. Durch ein Schnittkriterium auf Basis des Arbeitsmusters ist die Gleichheit der Segmente, was Anzahl der Bahnen und Wenden betrifft, jederzeit gewährleistet. Somit arbeitet das Schnittkriterium unabhängig von der Feldgeometrie. Per Definition werden jedem Segment im Wechsel zwei aufeinander folgende Arbeitseinheiten und Wenden zugeordnet. Abbildung 5-2 beschreibt die Zusammenhänge anschaulich.

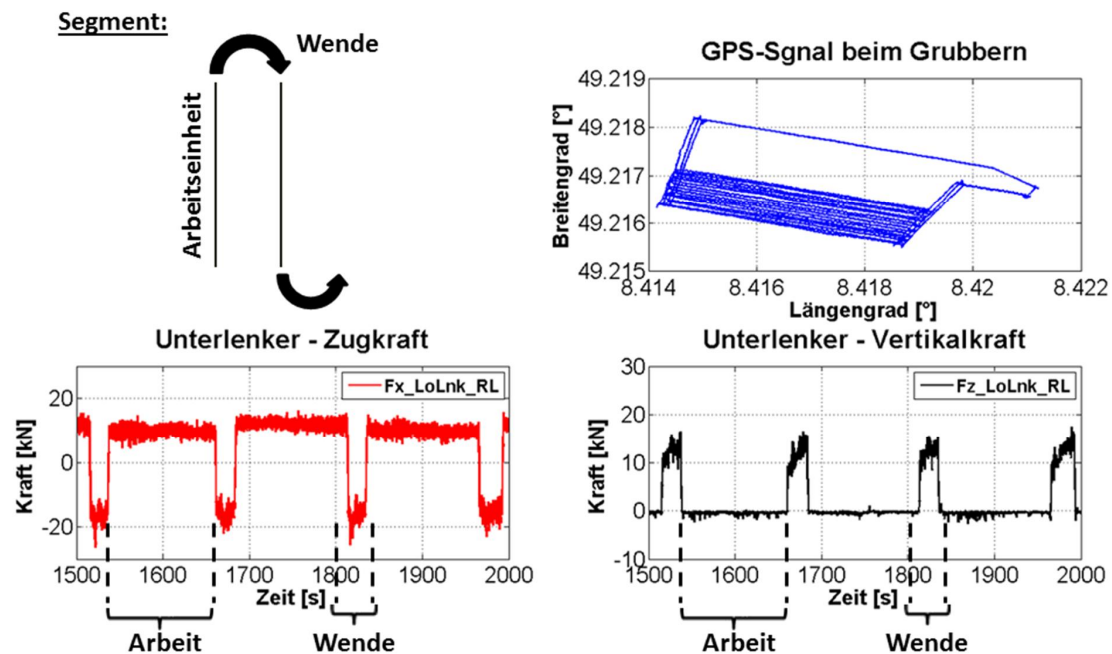


Abbildung 5-2: Darstellung des GPS-Signals und des Belastungsverlaufs von Längs- ( $F_{x\_LoLnk\_RL}$ ) und Vertikalkraft ( $F_{z\_LoLnk\_RL}$ ) am Unterlenker beim Grubbern in Bezug auf Arbeitsprozess und Wende

Typischerweise dient der Traktor bei der Feldbearbeitung als Zugmaschine mit einem am Heckkraftheber gekoppelten Arbeitsgerät. Abhängig vom Arbeitsverfahren kommen ebenfalls Gerätekombinationen mit am Front- und Heckkraftheber gekoppelten Arbeitsgeräten zum Einsatz. Zur Trennung von Arbeitsprozess und Wendemanöver wird das Positionssignal des Heckkrafthebers im CAN-Bus als Zielgröße verwendet. Beim Wendemanöver wird das Arbeitsgerät in dieser Fahrzeugklasse standardmäßig ausgehoben. Das Positionssignal des Krafthebers ist als Prozentwert verfügbar. Der Bereich zwischen 1-30 % Hubhöhe ist als Arbeitsbereich abgesenkter Arbeitsgeräte definiert, während bei einer Hubhöhe zwischen 70-100 % das Arbeitsgerät als ausgehoben gilt. Weiterhin sind sehr kurze Aushubsequenzen durch die aktive Zug-/ Lage- regelung am Kraftheber möglich. Damit diese kurzen Sequenzen nicht als Wende detektiert werden, kommt ein Zeithaltkriterium zum Einsatz. Durch den Einsatz des arbeitsmusterbasierten Schnitts werden Segmente erstellt, denen zwei aufeinander folgende Arbeitseinheiten und Wendungen zugeordnet sind, um den typischen Arbeitsablauf abzubilden. Abbildung 5-3 zeigt in der oberen Darstellung das Positionssignal des

Heckkrafthebers in Prozent über der Messdauer, welches bei der Feldbearbeitung zur Trennung von Arbeitseinheit und Wende verwendet wird. Die grünen Punkte zeigen jeweils die Schnittpunkte eines Segments. Im unteren Graph ist die Trennung von Wende und Arbeitseinheit nochmals farblich anhand des GPS-Signals gekennzeichnet.

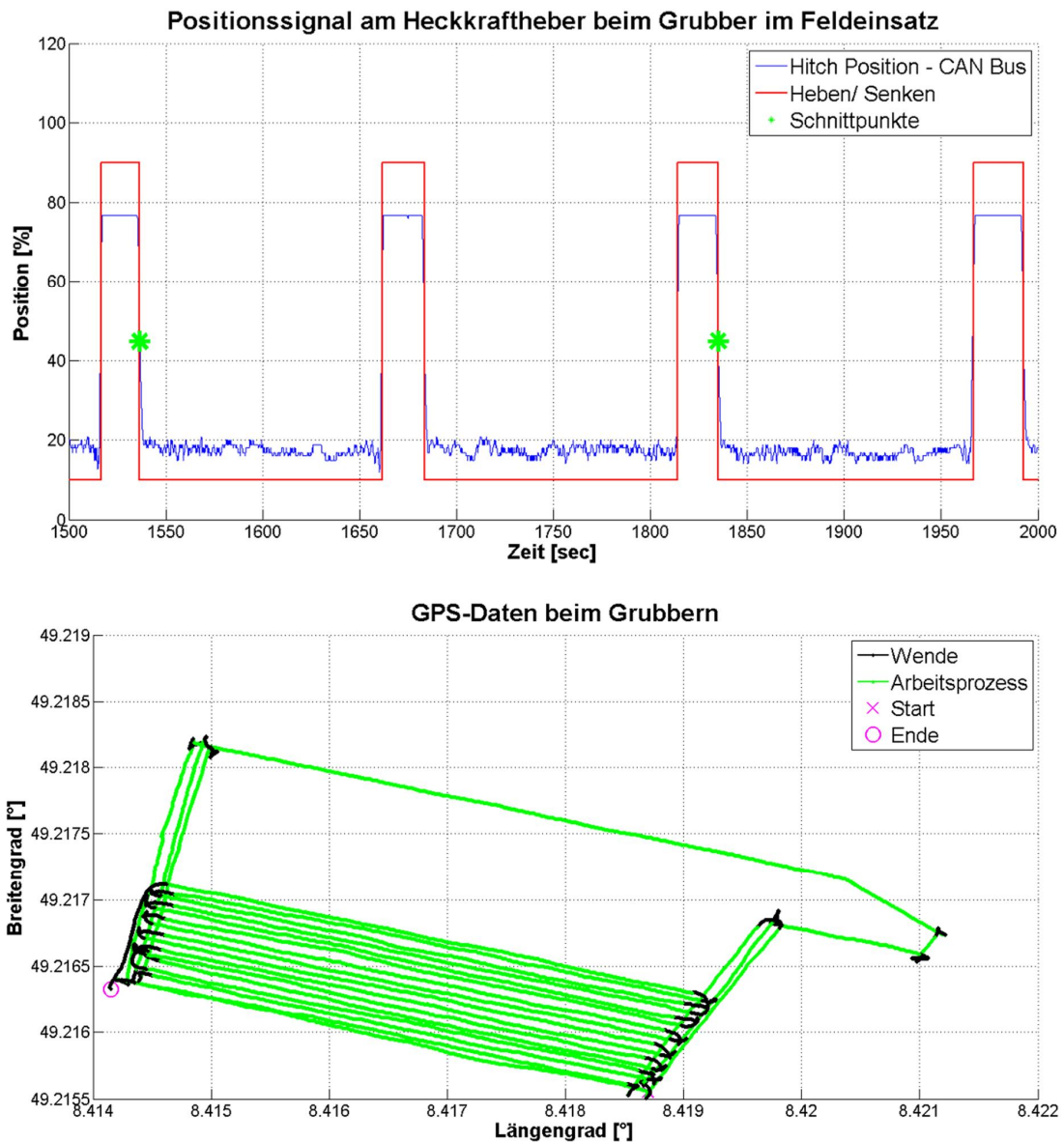


Abbildung 5-3: Beispielhafte Darstellung des Positionssignals des Heckkrafthebers zur Identifizierung von Arbeitsprozess und Wendungen, sowie das zugehörige GPS-Signal bei der Bodenbearbeitung mit einem Grubber

Abbildung 5-4 zeigt den Vergleich der ursprünglichen und der segmentierten Datensätze für das Grubbern am Beispiel der Längskraft am linken Hinterrad ( $F_{x\_Wh\_RL}$ ) in Form einer Verteilungsfunktion. Dargestellt ist die Wahrscheinlichkeit des Auftretens über der logarithmierten Schädigungssumme der einzelnen Segmente. Die berechneten Schädigungszahlen sind auf eine Arbeitsstunde normiert, um entsprechend Vergleichbarkeit zu den Ursprungsdaten sicher zu stellen. Die beiden Graphen entsprechen weitgehend einer Normalverteilung, da die Datenpunkte an einer Geraden angeordnet sind. Eine näherungsweise Normalverteilung ist erstrebenswert, da viele statistische Verfahren, wie beispielsweise die Varianzanalyse von einer logarithmischen Normalverteilung ausgehen. Diese Verfahren kommen im weiteren Verlauf der Arbeit zur Anwendung. Weiterhin kann anhand der Steigung der Graphen die Streuspanne der ursprünglichen und der segmentierten Daten bewertet werden. Die segmentierten Daten zeigen im Vergleich eine flachere Steigung, was bedeutet dass die Streuspanne durch die Segmentierung erweitert wird.

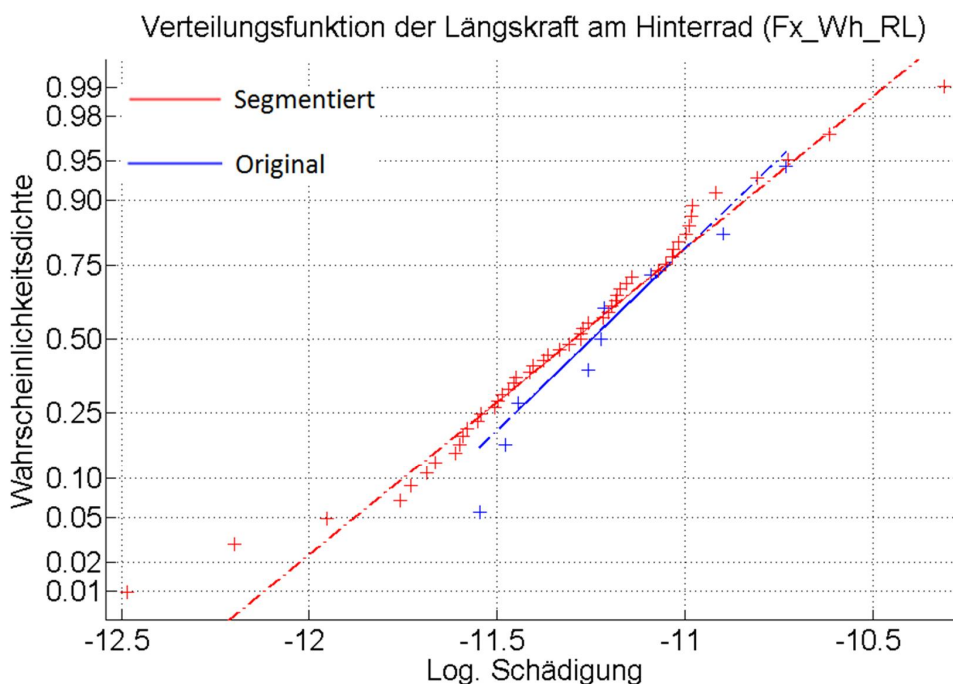


Abbildung 5-4: Vergleich der Schädigungszahlen der originalen Datensätze und der segmentierten Daten anhand des arbeitsmusterbasierten Schnittkriteriums. Aufgetragen ist Wahrscheinlichkeitsdichte über der logarithmierten Schädigungssumme (Logarithmus zur Basis 10).

Die arbeitsmusterbasierte Segmentierung ermöglicht somit eine sinnvolle Erweiterung der Datenbasis. Es besteht nun die Möglichkeit auf Basis einer breiten Datenlage die Nutzungssimulation durchzuführen, da jedes vorhandene Segment das charakteristische Belastungsprofil der Anwendung widerspiegelt. Der Segmentierungsansatz ist für die Erweiterung der Datenbasis von Feldapplikationen, wie dem Grubbern oder Pflügen sinnvoll einsetzbar. Es ist jedoch darauf zu achten, dass die gemessenen Lastdaten die natürliche Belastungsvariation im Nutzungsbetrieb widerspiegeln. Fehlende Einflüsse können nicht durch die Segmentierung ersetzt werden. Da das Arbeitsmuster während der Feldbearbeitung nicht bei allen Arbeitsgeräten über das Positionssignal am Heckkraftheber ermittelt werden kann, wurde ein weiteres Kriterium zur Segmentierung auf Basis des Lenkwinkels erarbeitet. Dieses Kriterium bestimmt ebenfalls den Arbeitsprozess und die Wenden und erzeugt Segmente mit jeweils zwei Bahnen und zwei Wendemanövern. Eine beispielhafte Anwendung dieses Kriteriums ist die Scheibenegge, diese wird standardmäßig am hinteren Koppelpunkt oder in den Unterlenkern des Heckkrafthebers angehängt. Diese Arbeitsgeräte werden am Feldende nicht ausgehoben, sondern lediglich die im Bodeneingriff befindlichen Werkzeuge am Gerät.

### **5.2.2 Zeitäquidistantes Schnittkriterium**

Eine Vielzahl von Anwendungen zeigt kein wiederkehrendes Arbeitsmuster. Transportarbeiten beispielsweise zeichnen sich zwar durch wiederkehrende Zustände, wie Beschleunigen, Bremsen oder Konstantfahrt aus, jedoch sind diese Zustände abhängig von äußeren Einflüssen stochastisch verteilt. Eine zustandsbasierte Segmentierung wäre nur im Falle ausreichender Informationen zu Verkehrsführung, Topographie und Straßenbeschaffenheit sinnvoll anwendbar. Da Informationen hierzu nicht vorliegen, erfolgt die Segmentierung auf Basis eines einfachen Kriteriums äquidistanter Zeitschritte. Bei Begutachtung der Messdauer der betreffenden Datensätze wurden Signallängen zwischen 3 und 75 Minuten festgestellt. Dabei zeigen auch kurze Abschnitte eine Anhäufung verschiedener Fahrzustände. Daher wird die Unterteilung großer Datensätze mit einer Mindestintervalllänge von 5 Minuten als sinnvoll erachtet. Durch die Segmentierung der ursprünglichen Datensätze wird eine große Anzahl von Schädigungszahlen generiert, welche die typische Streuung während des Nutzungsbetriebs beschreiben. Abbildung 5-5 zeigt beispielhaft die zeitäquidistante Segmentierung anhand einer Transportfahrt mit dem Ladewagen. Dargestellt ist die Segmentierung in



Bezug auf das wirkende Drehmoment des linken Hinterrades des Traktors, die Fahrgeschwindigkeit und die zurückgelegte Strecke anhand des GPS-Signals.

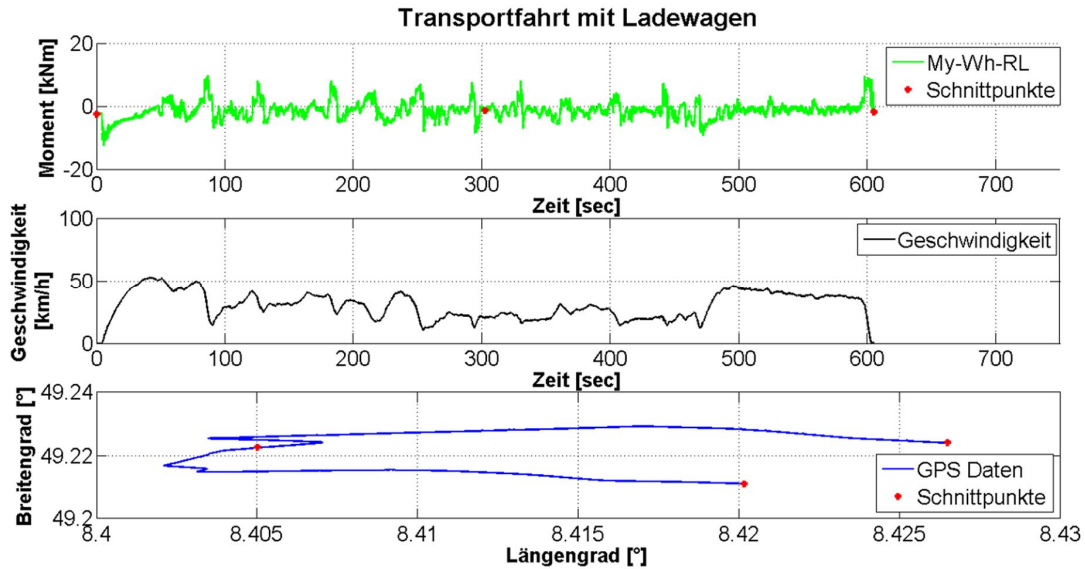


Abbildung 5-5: Zeitäquidistante Segmentierung einer Transportfahrt

### 5.3. Erforderliche Messdauer

Lastkollektive werden im Allgemeinen aus Lastmessungen gewonnen, deren Messdauer lediglich einem Bruchteil der Nutzungsdauer entspricht. Ein wichtiger Schritt zur Weiterverarbeitung der gemessenen Lastdaten ist die Überprüfung, inwieweit die Daten repräsentativ für den Nutzungsbetrieb sind. Es gibt verschiedene Ansätze [10, 11], jedoch keine einheitliche Vorgehensweise. Im Folgenden werden zwei Ansätze vorgestellt und auf die vorhandenen Messdaten angewendet.

#### ***Variante A: Bestimmung der erforderlichen Messdauer auf Basis der Kollektivform der gemessenen Lastdaten***

Die eingesetzte Vorgehensweise und die verwendeten Formeln entstammen der Literaturquelle „Zählverfahren und Lastannahme in der Betriebsfestigkeit“ [10]. Zunächst erfolgt die Berechnung charakteristischer Parameter der BZF. Die aufgezeichneten Messdaten werden dabei in Form einer Häufigkeitsverteilung betrachtet. Gängige Praxis ist die Anwendung der Rainflow-Zählung. Die Ergebnisse werden in Form eines Spannenpaardiagramms dargestellt und sind im einfachsten Fall durch die Parameter Kollektivhöchstwert  $\hat{S}_a$ , Kollektivumfang  $H_0$  und die Kollektivform  $\nu$  beschrieben.

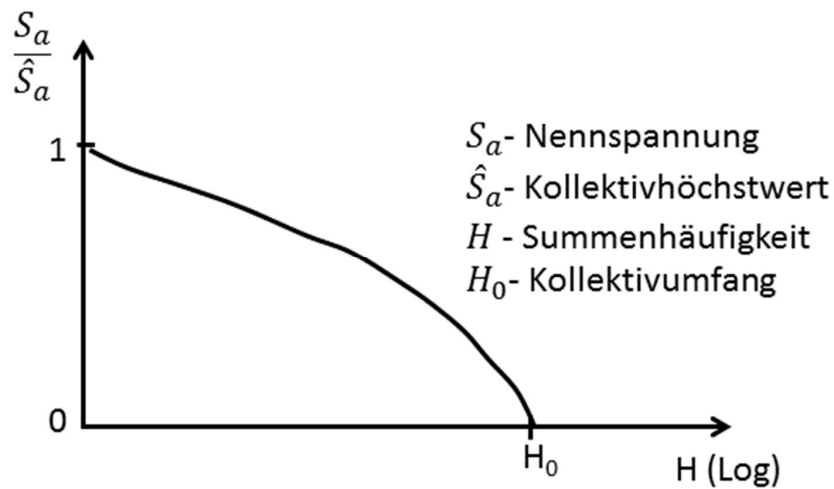


Abbildung 5-6: Normiertes Lastkollektiv bezogen auf den Kollektivhöchstwert über der Anzahl der Lastwechsel zur Beschreibung der Messdaten im Häufigkeitsbereich [10].

Weitere wichtige Angaben sind die Mittelspannung  $S_m$  oder das Spannungsverhältnis  $R$ . Der Kollektivhöchstwert und der Kollektivumfang sind aus der vorhandenen Häufigkeitsverteilung zu bestimmen, die Bestimmung des Formparameters erfordert jedoch zusätzlichen Aufwand. Bei Schwingungsvorgängen entstehende Belastungen können unter gewissen Voraussetzungen mit den Theorien von kontinuierlichen Zufallsprozessen beschrieben werden. Dabei wird die Kollektivform durch die Gleichung (5-1) beschrieben.  $H(x)$  beschreibt dabei die Anzahl der Überschreitungen des Horizonts  $x$ , wobei  $x$  hier der normierten Spannungsamplitude  $\frac{S_a}{\hat{S}_a}$  entspricht.

$$H(x) = H_0^{1-x^2} \quad (5-1)$$

Zur Beschreibung des veränderlichen Formparameters des Kollektivs wird der Exponent „2“ durch die veränderliche Variable  $v$  ersetzt.

$$H(x) = H_0^{1-x^v} \quad (5-2)$$

Im Normalfall entspricht die Messdauer nur einem Bruchteil der Nutzungsdauer, jedoch können wichtige Informationen aus der Häufigkeitsdarstellung des gemessenen Kollektivs abgeleitet werden. Die Extrapolation der gemessenen Kollektivform auf das Kollektiv der Nutzungsdauer ist dabei durch zwei weitere Parameter beschreibbar.

Zum einen durch den Extrapolationsfaktor  $e$ , welcher die Streckung des Kollektivs im Häufigkeitsbereich beschreibt.

$$e = \frac{H_N}{H_M} \quad (5-3)$$

Zum anderen kommen während der Nutzungsdauer Amplituden  $\hat{S}_{aN}$  vor, die die gemessene Höchstamplitude  $\hat{S}_{aM}$  übersteigen. In den meisten Fällen kann davon ausgegangen werden, dass sich die Kollektivform dabei nicht ändert. Somit ist der Erhöhungsfaktor des Kollektivs im Amplitudenbereich durch Gleichung (5-4) beschrieben.

$$E = \frac{\hat{S}_{aN}}{\hat{S}_{aM}} = \left( \frac{\log(e * H_M)}{\log H_M} \right)^{\frac{1}{v}} \quad (5-4)$$

Abbildung 5-7 zeigt die berechneten Lastkollektive für Mess- und Nutzungsdauer in einem Spannenpaardiagramm. Dargestellt ist die auf den Kollektivhöchstwert  $\hat{S}_{aN}$  normierte Lastamplitude über der Anzahl der Lastwechsel. Dabei beschreibt der Verlauf der gestrichelten Linien das gemessene Lastkollektiv und das auf die Nutzungsdauer parallel verschobene Lastkollektiv. Der durchgehende Linienvorlauf und der anschließende punkt-gestrichelte Linienvorlauf beschreiben das auf Basis der Gleichung (5-2), des Extrapolationsfaktors  $e$  und des Erhöhungsfaktors  $E$  aus den Messdaten berechnete Lastkollektiv für die Nutzungsdauer. Um nun eine qualifizierte Aussage darüber treffen zu können, inwieweit das gemessene Kollektiv repräsentativ für die Nutzungsdauer ist, gilt folgender Zusammenhang: Weicht die akkumulierte Gesamtschädigung des parallelverschobenen Messkollektivs nicht wesentlich von der akkumulierten Gesamtschädigung des berechneten Kollektivs der Nutzdauer ab, sind ausreichend Lastdaten erfasst worden. Als obere Schranke ist eine Abweichung in Schädigung von maximal 20% erstrebenswert, was bei einem Schädigungsexponent von  $k=5$  einer Lastabweichung von circa 4% entspricht. Viele Hersteller sichern ihre gemessenen Kollektive jedoch durch die Berücksichtigung von zusätzlichen Sonderereignissen ab, um einen gewissen Sicherheitsabstand zum Kundenkollektiv zu wahren.

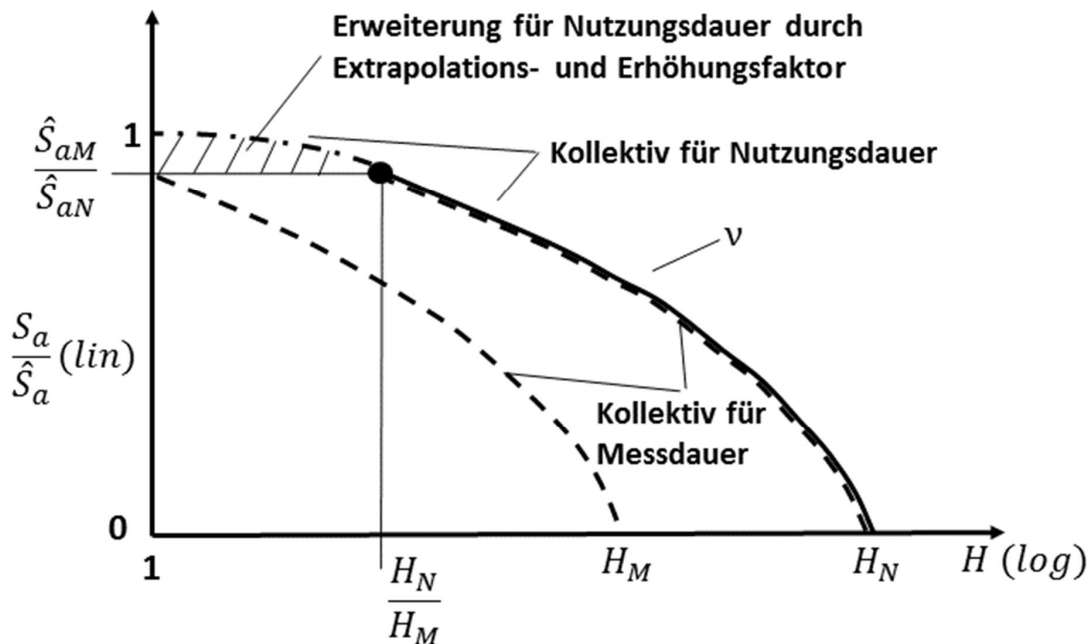


Abbildung 5-7: Modifizierte Darstellung nach [10]. Die Abbildung zeigt das auf Basis der Messdaten berechnete Lastkollektiv für die Mess- und die Nutzungsdauer. Aufgetragen ist die auf den Höchstwert der Nutzungsdauer normierte Lastamplitude über der Anzahl der Lastwechsel.

Das Verfahren wird beispielhaft zur Beurteilung der Datenlage beim Pflugbetrieb angewendet. Während der Messkampagne wurden neun Feldeinsätze beim Pflügen aufgezeichnet. Die einzelnen Datensätze stammen von vier verschiedenen Nutzern und haben Messdauern zwischen 15 Minuten und 1,5 Stunden. Summiert über alle Datensätze ergibt sich eine Gesamtmessdauer von 4,5 Stunden. Auswertungen zu vorliegenden Einsatzdaten ergeben eine überschlägige Nutzungsdauer im Pflugbetrieb von 800 h bezogen auf eine angenommene Traktorlebensdauer von 10.000 Betriebsstunden. Zunächst werden die vorhandenen BZF mittels Rainflow-Zählung in den Häufigkeitsbereich transformiert und auf den Kollektivhöchstwert normiert. Anschließend erfolgt die Bestimmung des Formparameters  $\nu$  mittels der oben angegebenen Gleichung (5-2). Die Parameter  $H_0$  und  $\nu$  werden dabei mittels einer Optimierungsrechnung auf Basis kleinster Fehlerquadrate bestmöglich an die gegebene Hüllkurve der Messdaten angepasst. Mit den Parametern  $H_0$  und  $\nu$  wird das berechnete Kollektiv der Nutzungsdauer bestimmt und mit dem auf die Nutzungsdauer extrapolierten Kollektiv

der Messdaten verglichen. Abbildung 5-8 zeigt die Ergebnisse der berechneten Lastkollektive im Spannenpaardiagramm. Aufgetragen ist die auf den Kollektivhöchstwert  $\hat{S}_{aN}$  normierte Lastamplitude der Längskraft am rechten Hinterrad (Fx\_Wh\_RR) über der Anzahl der Lastwechsel. Die dargestellten Lastkollektive sind auf die Nutzungsdauer des Fahrzeugs hochgerechnet.

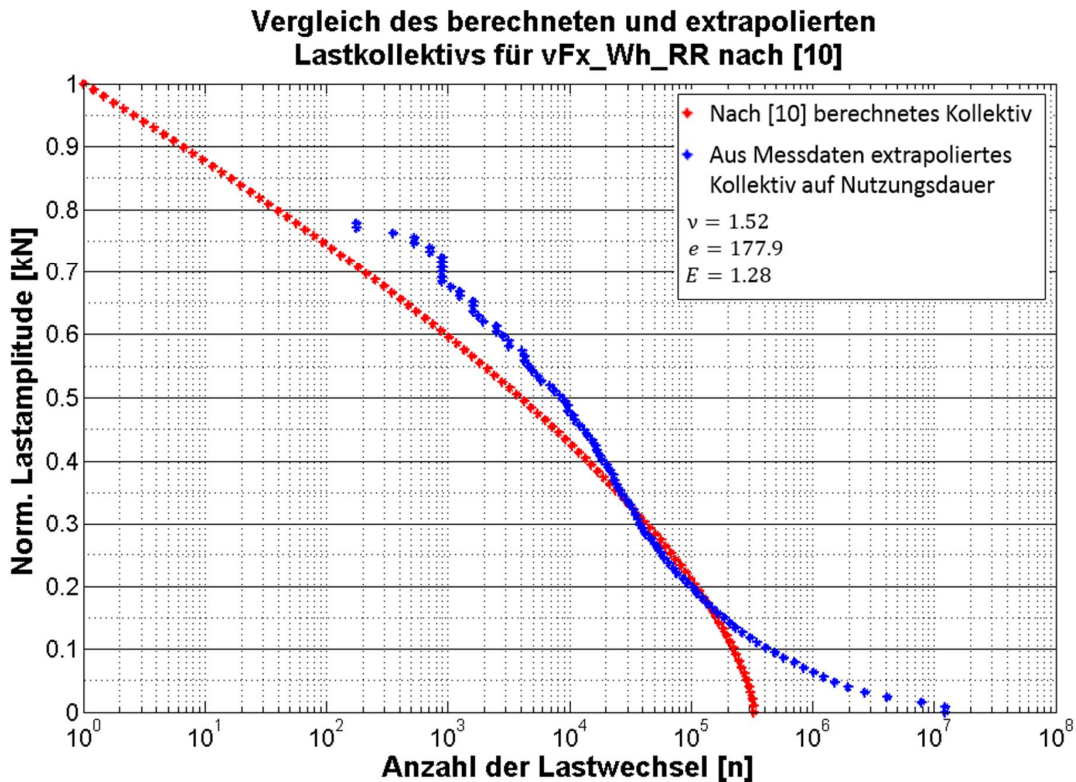


Abbildung 5-8: Dargestellt ist der Vergleich des auf Basis der Messdaten berechneten und extrapolierten Kollektivs nach der Vorgehensweise aus [10]. Aufgetragen ist die auf den Höchstwert normierte Lastamplitude der Längskraft am rechten Hinterrad (Fx\_Wh\_RR) über der Anzahl der Lastwechsel.

Die Lastkollektive zeigen Abweichungen zwischen der gemessenen und der berechneten Kollektivform. Bei näherer Betrachtung der Kollektivform der Messdaten ist ein S-förmiges Kollektiv feststellbar, was bedeutet dass die Kurve einen Wendepunkt besitzt. Da der Ansatz zur Berechnung der Kollektivform jedoch nur zwei Parameter zur Optimierung bereitstellt, ist eine genauere Interpolation nicht möglich. Durch Berechnung der Gesamtschädigung der Lastkollektive nach Gleichung (2-16) wird ein quantitativer Vergleich ermöglicht. Abhängig von der Kollektivform kann der Vergleich der

Gesamtschädigungen jedoch zu erheblichen Abweichungen führen. Im Bereich großer Amplituden verläuft das gemessene Kollektiv sehr flach, wohin gegen die aus Gleichung (5-2) interpolierte Kollektivform steil ansteigt. Abbildung 5-9 stellt den Vergleich der Gesamtschädigungen, der aus Gleichung (5-2) berechneten Lastkollektive  $D_{calc}$ , den Gesamtschädigungen der auf die Messdauer extrapolierten Lastkollektive  $D_{exp}$  gegenüber. Der Vergleich erfolgt für vier charakteristische Lasteinleitungspunkte, wie die Längs- ( $Fx\_Wh\_RR$ ) und Vertikalkraft ( $Fz\_Wh\_RR$ ) am Hinterrad, sowie die Längs- ( $Fx\_LoLnk\_RR$ ) und Vertikalkraft ( $Fz\_LoLnk\_RR$ ) am Unterlenker des Heckkrafthebers.

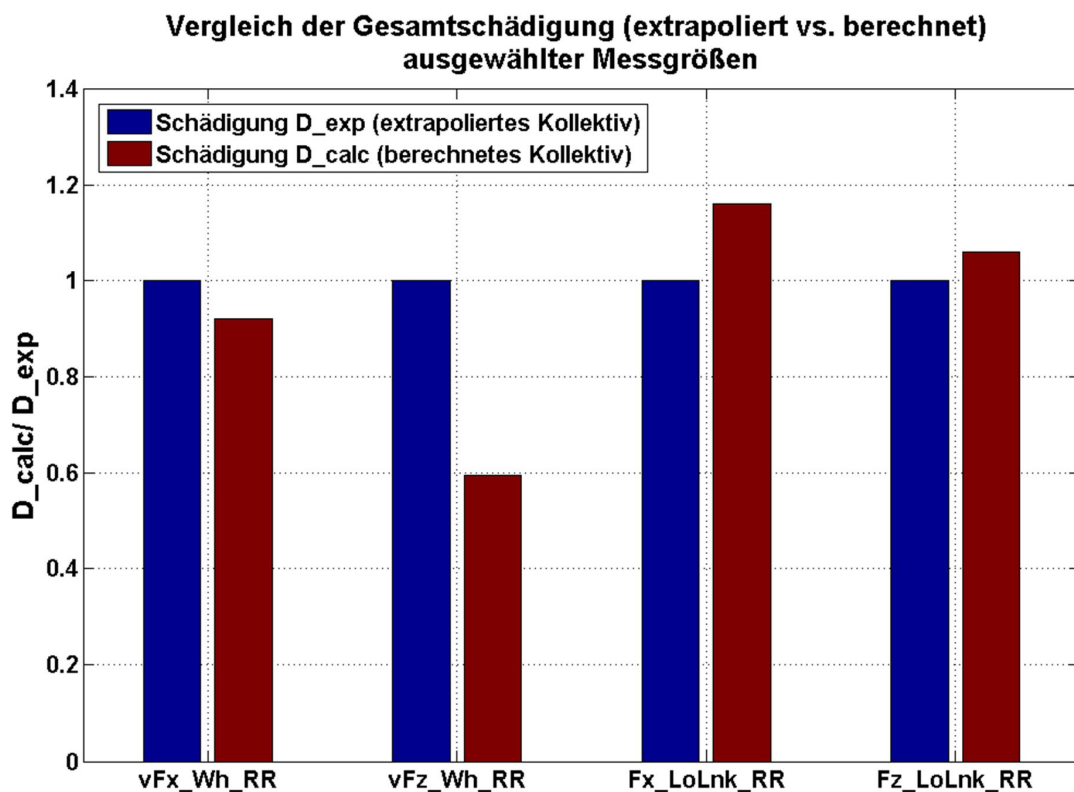


Abbildung 5-9: Vergleich der Gesamtschädigung von berechnetem Kollektiv  $D_{calc}$  und extrapoliertem Kollektiv  $D_{exp}$  für die ausgewählten Messgrößen. Aufgetragen ist der Vergleich für die Längs- ( $Fx\_Wh\_RR$ ) und Vertikalkraft ( $Fz\_Wh\_RR$ ) am Hinterrad und die Längs- ( $Fx\_LoLnk\_RR$ ) und Vertikalkraft ( $Fz\_LoLnk\_RR$ ) am Unterlenker des Heckkrafthebers.

Der Vergleich der jeweiligen Messgrößen zeigt, dass die Ergebnisse der Längskraft am Hinterrad sowie die der Längs- und Vertikalkraft am Unterlenker im definierten

Schrankenbereich liegen und somit auf eine ausreichende Messdauer hinweisen. Beim Vergleich der Gesamtschädigung für die Vertikalkraft am Hinterrad gilt diese Aussage jedoch nur bedingt, da die Schädigungssumme des berechneten Kollektivs um 40% niedriger ist. Ursächlich ist im Vergleich zu den übrigen Messgrößen das schlechte Interpolationsergebnis der Kollektivform. Die Ergebnisse zeigen, dass die Extrapolationsmethode nur bei entsprechender Kollektivform zielführend einsetzbar ist. Zusätzliche Messungen zur verbesserten Beschreibung der Kollektivform könnten die methodischen Schwachpunkte jedoch abmildern, was im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr möglich war. Aus diesem Grund wird ein zusätzlicher Ansatz auf Basis statistischer Kenngrößen vorgestellt.

**Variante B: Untersuchung der erforderlichen Messdauer auf Basis statistischer Kenngrößen**

Zur Beurteilung der vorhandenen Datenbasis eines spezifischen Zustands können ebenfalls statistische Kenngrößen, wie die Standardabweichung oder der Variationskoeffizient herangezogen werden. Hierzu wird zunächst der Erwartungswert  $\hat{x}$  einer Datenreihe nach Gleichung (5-5) berechnet. Dieser berechnet sich aus der Summe der Beobachtungspunkte  $x_i$  einer Datenreihe geteilt durch die Anzahl der Datenpunkte  $n$ .

Erwartungswert:

$$\hat{x} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n x_i \quad (5-5)$$

Standardabweichung:

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\hat{\sigma}^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \times \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x})^2} \quad (5-6)$$

Variationskoeffizient:

$$VarK = \frac{1}{\sqrt{n}} \times \frac{\hat{\sigma}}{\hat{x}} \quad (5-7)$$

Der Variationskoeffizient  $VarK$  ist ein relatives Streumaß und berechnet sich aus der Standardabweichung  $\hat{\sigma}$  und dem Erwartungswert  $\hat{x}$ . Der Variationskoeffizient gibt an,

wie gut der tatsächliche Erwartungswert geschätzt werden kann. Üblicherweise wird der Variationskoeffizient einer Datenreihe in Prozent angegeben. Die beschriebenen Kenngrößen werden zur Untersuchung der bereits vorher verwendeten Messgrößen im Pflugbetrieb eingesetzt. Auf Basis der Pseudo-Schädigungszahlen der einzelnen Datensätze beim Pflügen erfolgt die Berechnung des Variationskoeffizienten. Abbildung 5-10 zeigt die berechneten Variationskoeffizienten der Lastdaten beim Pflügen für die Längs- ( $F_{x\_Wh\_RR}$ ) und Vertikalkraft ( $F_{z\_Wh\_RR}$ ) am Hinterrad, sowie die Längs- ( $F_{x\_LoLnk\_RR}$ ) und Vertikalkraft ( $F_{z\_LoLnk\_RR}$ ) am Unterlenker des Heckkrafthebers.

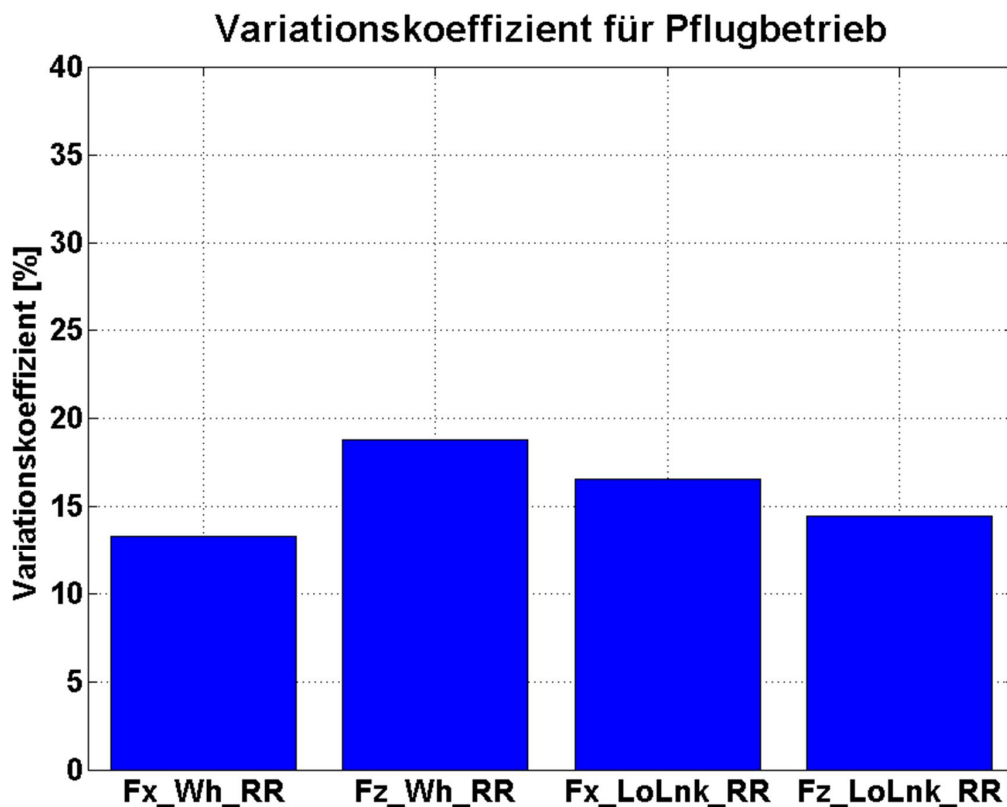


Abbildung 5-10: Berechneter Variationskoeffizient der gemessenen Datenreihen beim Pflügen für die Lasteinleitungspunkte Längs- ( $F_{x\_Wh\_RR}$ ) und Vertikalkraft ( $F_{z\_Wh\_RR}$ ) am Hinterrad und die Längs- ( $F_{x\_LoLnk\_RR}$ ) und Vertikalkraft ( $F_{z\_LoLnk\_RR}$ ) am Unterlenker des Heckkrafthebers.



Als obere Schranke für die repräsentative Bedatung eines Zustandes im Nutzungsbetrieb, gilt eine Abweichung des Variationskoeffizienten von 20%. Die Ergebnisse zeigen über alle Messgrößen ein geringes Streumaß unterhalb der angegebenen Schranke. Damit kann festgestellt werden, dass die untersuchten Lasteinleitungspunkte ausreichend bedatet sind. Weiterhin ist die aus der vorherigen Betrachtung der Kollektivform ermittelte große Abweichung der Vertikalkraft am Hinterrad nicht nachweisbar. Diese Erkenntnis legt nahe, dass die diskutierte methodenbasierte Interpolationsgüte der Kollektivform in diesem Fall ungenügend war.

#### **5.4. Verifikation der Einflussfaktoren**

Die Auswahl der zu berücksichtigenden Einflüsse im Faktormodell ist eine zentrale Fragestellung dieser Arbeit. Zur Bestimmung der statistisch signifikanten Einflüsse auf die Belastungsverteilung im Nutzungsbetrieb wird eine Varianzanalyse durchgeführt. Die Varianzanalyse (ANOVA) beschreibt datenanalytische und strukturprüfende statistische Verfahren, welche breit einsetzbare Anwendungen zulassen. Ihnen gemeinsam ist, dass sie Varianzen und Prüfgrößen berechnen, um Aufschlüsse über die hinter den Daten steckenden Gesetzmäßigkeiten zu erlangen. Die ANOVA kann ein- oder mehrstufig durchgeführt werden. Weiterhin sollte für die einzelnen Zustände eine hinreichend große Anzahl an Datenpunkten vorhanden sein. In Kapitel 3 wurden bereits die zentralen Einflussfaktoren zur Untersuchung der Betriebsbelastungen vorausgewählt.

- Arbeitsverfahren/ Arbeitsgerät
- Beschaffenheit des Untergrunds
- Topographie
- Beladung
- Feldgröße

Zusätzliche Einflüsse, wie die Fahrweise des Nutzers, werden aus Ressourcengründen während der Messkampagne nicht weiter untersucht. Zunächst erfolgt die Beurteilung der diversen Arbeitsverfahren in Bezug auf die gemessenen Betriebsbelastungen. Es soll untersucht werden, wie detailliert die unterschiedlichen Arbeitsgeräte im Faktormodell zu berücksichtigen sind oder ob belastungsäquivalente Arbeitsverfahren

gegebenenfalls zusammengefasst werden können. Aus Gründen der Interpretierbarkeit und aufgrund der großen Anzahl von Messgrößen am Fahrzeug erfolgt bei der Darstellung der Ergebnisse eine repräsentative Auswahl. Bei diversen Arbeitsgeräten dominieren Längs- und Vertikalbelastungen im Nutzungsbetrieb. Diesbezüglich werden Längs- und Vertikalkräfte an der Hinterachse ( $F_{x\_Wh\_RL}$ ,  $F_{x\_Wh\_RR}$ ,  $F_{z\_Wh\_RL}$ ,  $F_{z\_Wh\_RR}$ ), an den Unterlenkern ( $F_{x\_LoLnk\_RL}$ ,  $F_{x\_LoLnk\_RR}$ ) und den Hubstreben ( $F_{LiLnk\_RL}$ ,  $F_{LiLnk\_RR}$ ) des Heckkrafthebers ausgewertet. Grundlage der Auswertung sind die gemessenen Lastdaten als Pseudo-Schädigungszahlen der jeweiligen Arbeitsverfahren. Aus den logarithmierten Schädigungszahlen erfolgt mittels Varianzanalyse die Schätzung der Erwartungswerte der einzelnen Betriebszustände, die in einem weiteren Schritt auf den globalen Erwartungswert aller Betriebszustände einer Messgröße bezogen werden. Dabei werden die Einflüsse der einzelnen Arbeitsgeräte auf die Betriebsbelastungen sichtbar. In Abbildung 5-11 ist eine Auswahl repräsentativer Arbeitseinsätze bezogen auf die beschriebenen Messgrößen dargestellt. Aufgetragen sind die Effekte der Messgrößen für die untersuchten Belastungseinflüsse der Arbeitsgeräte über der Schädigung in logarithmierter Darstellung ( $\text{Log}_{10}$ ). Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die Daten auf den globalen Mittelwert der Datenreihe normiert. Liegt das Ergebnis einer Messgröße bei +1, so ist die auftretende Schädigung innerhalb dieser Applikation 10-fach höher zu bewerten, als der globale Erwartungswert aller Lastmessungen. Die Einflüsse der einzelnen Messgrößen sind in Form einer Balkendarstellung abgebildet. Die farblich differenzierten Balken zeigen die Wirkung der einzelnen Messgrößen innerhalb einer Anwendung. Die auf der gegenüberliegenden Seite aufgetragenen roten Balken zeigen die Höhe des geschätzten Standardfehlers. Der Standardfehler beschreibt wie vertrauenswürdig ein bestimmter Einfluss geschätzt wird. Die Ergebnisse zeigen, dass es eindeutige Effekte der Schädigungssumme der einzelnen Arbeitsgeräte gibt. Im Bereich der Vertikalkräfte am Heckkraftheber liegen die Schädigungswerte der Saatbettkombination beispielsweise um den Faktor 100 höher als bei der Kreiselegge. Abbildung 5-11 zeigt weiterhin, dass einige Arbeitsgeräte über alle Messgrößen Werte oberhalb der durchschnittlichen Belastung liefern, wie beispielsweise die Saatbettkombination. Bei Betrachtung der jeweiligen Messgrößen gab es jedoch keine eindeutige Übereinstimmung über mehrere Applikationen. Weiterhin gab es innerhalb der Applikationen teilweise starke Schwankungen der Schädigungszahlen. Beim Tiefenlockerer beispielsweise sind

große Schädigungen bei den Längskräften feststellbar. In vertikaler Richtung liegen die Schädigungen jedoch weitgehend unterhalb des globalen Erwartungswerts. Informationen aus der Messkampagne unterstützen diesen Effekt, da das Arbeitsgerät durch den tiefen Bodeneingriff den Traktoren hohe Zugleistungen abfordert, im Vergleich zu anderen Arbeitsgeräten aber ein geringes Eigengewicht hat.

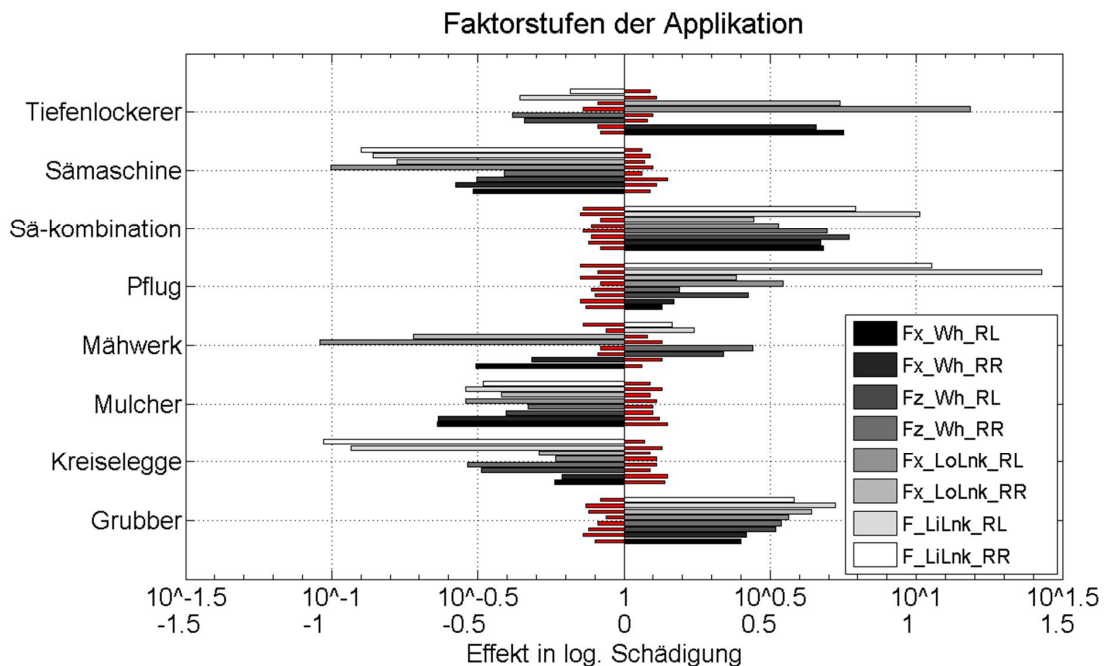


Abbildung 5-11: Untersuchung des Belastungseinflusses charakteristischer Arbeitsgeräte während der Feldarbeit anhand repräsentativer Lasteinleitungspunkte am Fahrzeug. Dargestellt sind die Effekte der jeweiligen Messgrößen in Bezug auf die logarithmierte Schädigungssumme ( $\log_{10}$ ). Die roten Balken zeigen den Betrag des Standardfehlers.

Es bleibt festzuhalten, dass eine Zusammenfassung einzelner Applikationen zu Gruppen wie Bodenbearbeitung (Pflug, Tiefenlockerer, Kreiselegge, usw.) oder Grünlandarbeiten (Mähwerk, Mulcher, usw.) nicht sinnvoll erscheint. Ein überschaubares Faktormodell ist zwar empfehlenswert, würde im vorliegenden Fall jedoch ein fehlerhaftes Gesamtbild ergeben. Daher ist die Applikationsauswahl im Faktormodell durch einzelne Zellen zu berücksichtigen, so dass die Arbeitsverfahren während der Nutzungssimulation entsprechend der Zeitanteile im Nutzungsmodell berücksichtigt werden.

Weiterhin soll untersucht werden, inwieweit verschiedene Untergrundeinflüsse im Faktormodell zu berücksichtigen sind. Beim überwiegenden Teil der untersuchten Arbeitsverfahren findet eine Unterteilung in einen Transportanteil zum Feld und der Arbeit auf dem Feld statt. Zu erwarten sind dabei signifikante Unterschiede in Längs- und Vertikalbelastung am Fahrzeug. Der Vergleich der wirkenden Hinterradmomente in Abbildung 3-12 lässt die Vermutung zu, dass eine Unterteilung von Arbeitseinsatz im Feld und Straßentransport sinnvoll erscheint. Während beim Gerätetransport hauptsächlich Vertikalanregungen auftreten, dominieren im Arbeitseinsatz auf dem Feld hohe Längskräfte und Raddrehmomente. Weiterhin gilt es abzuwägen inwieweit die Notwendigkeit besteht, den Anteil des Gerätetransports in die Klassen „Straße“ und „Feldweg“ zu unterteilen. Bei Feldwegen sind im Vergleich zur Straße oftmals deutlich mehr Unebenheiten, Versetzungen und Schlaglöcher vorhanden. Die Ergebnisse in Abbildung 5-12 zeigen eindeutige Unterscheidungsmerkmale der einzelnen Messgrößen in Bezug auf die vorherrschenden Untergründe. Bei Betrachtung der Schädigungswerte der vertikalen Messgrößen an Kraftheber und Hinterachse sind Differenzen bis zum Faktor 30 in Schädigung feststellbar, was dem zweifachen der Lastamplitude entspricht. Während beim Straßen- und Feldwegtransport die Längskräfte im Bereich des Mittelwerts liegen, liegen die Werte für die Vertikalanregung deutlich oberhalb des globalen Mittelwerts. Im Bereich der Feldarbeit sind die Effekte umgekehrt, hier sind hohe Zugbelastungen und weniger starke Vertikalanregungen signifikant nachweisbar. Transportfahrten, auf Feldwegen und Straßen korrelieren gut, aber beim Feldwegtransport werden höhere Vertikalanregungen erzielt. Ein Zusammenfassen dieser beiden Stufen ist nicht empfehlenswert, da nicht kontrollierbar ist, wie viele Anteile Feldweg- und Straßentransport für den jeweiligen Nutzer gezogen werden.

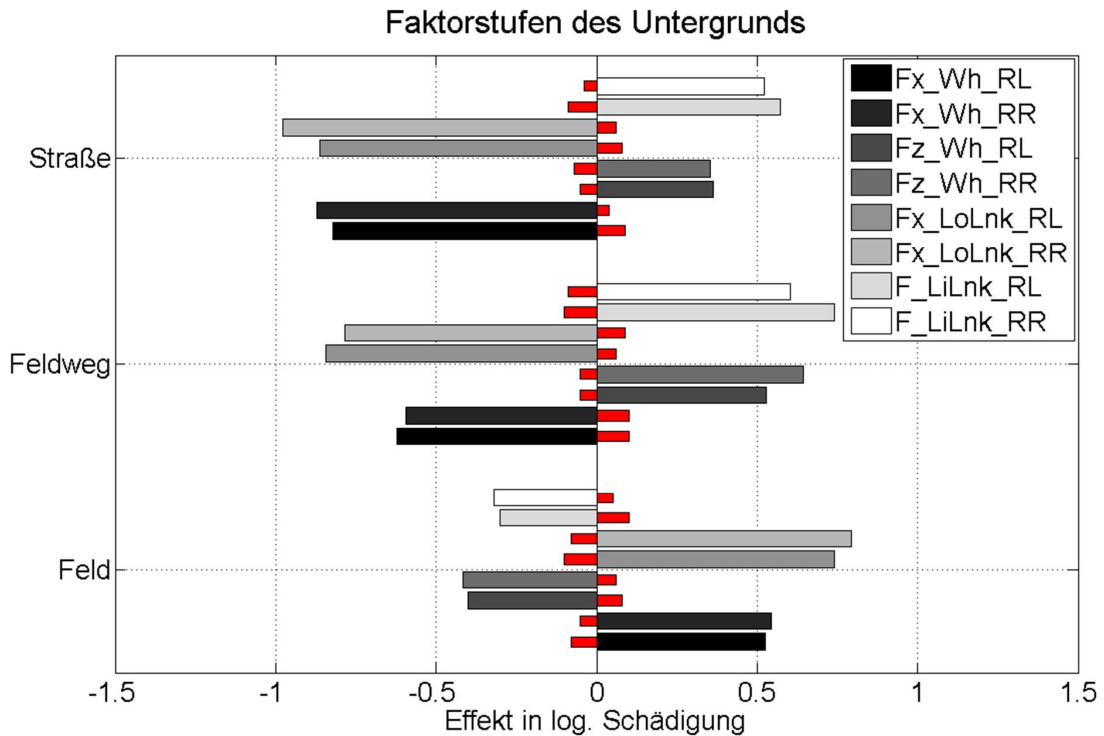


Abbildung 5-12: Untersuchung des Belastungseinflusses in Bezug auf die Feldarbeit und den Gerätetransport anhand einer Auswahl repräsentativer Lasteinleitungspunkte am Fahrzeug. Dargestellt sind die Effekte der jeweiligen Messgrößen in Bezug auf die logarithmierte Schädigungssumme ( $\text{Log}_{10}$ ). Die roten Balken zeigen den Betrag des Standardfehlers.

Bei Beurteilung des Einflusses der Topographie in Abbildung 5-13 sind keine eindeutigen Effekte nachweisbar. Die Schädigungszahlen der jeweiligen Messgrößen liegen im Bereich des globalen Mittelwerts. Aufgrund dessen wird die Unterteilung des Faktormodells hinsichtlich Topographie als nicht notwendig erachtet. Sicherlich wirken sich Hanglageneffekte auf den Zugkraftbedarf des Fahrzeugs aus. Da sich in Hanglagen der Zugkraftbedarf bei gleichem Arbeitsgerät erhöht, die verfügbare Zugleistung des Traktors jedoch identisch ist, sind keine größeren Zugkräfte zu erwarten. Der Hanglageneffekt wirkt sich lediglich auf die Arbeitsgeschwindigkeit aus. Dadurch benötigt der Nutzer mehr Zeit für die gleiche Flächenleistung, das Niveau der lokalen Schädigungen ist jedoch weitgehend unbeeinflusst. Die wirkenden Seitenkräfte an den Hinterrädern ( $F_{y\_Wh\_RL}$ ,  $F_{y\_Wh\_RR}$ ) und an den Unterlenkern ( $F_{y\_LoLnk\_RL}$ ,

Fy\_LoLnk\_RR) sowie den Stabilisierungsstreben (F\_SB\_RL, F\_SB\_RR) des Heckkrafthebers zeigen ebenfalls keine signifikanten Unterscheidungsmerkmale. Der Standardfehler liegt über alle Messgrößen in der Größenordnung der Mittelwertschätzung, was den Schluss zulässt, dass eine Unterscheidung nicht sinnvoll ist.

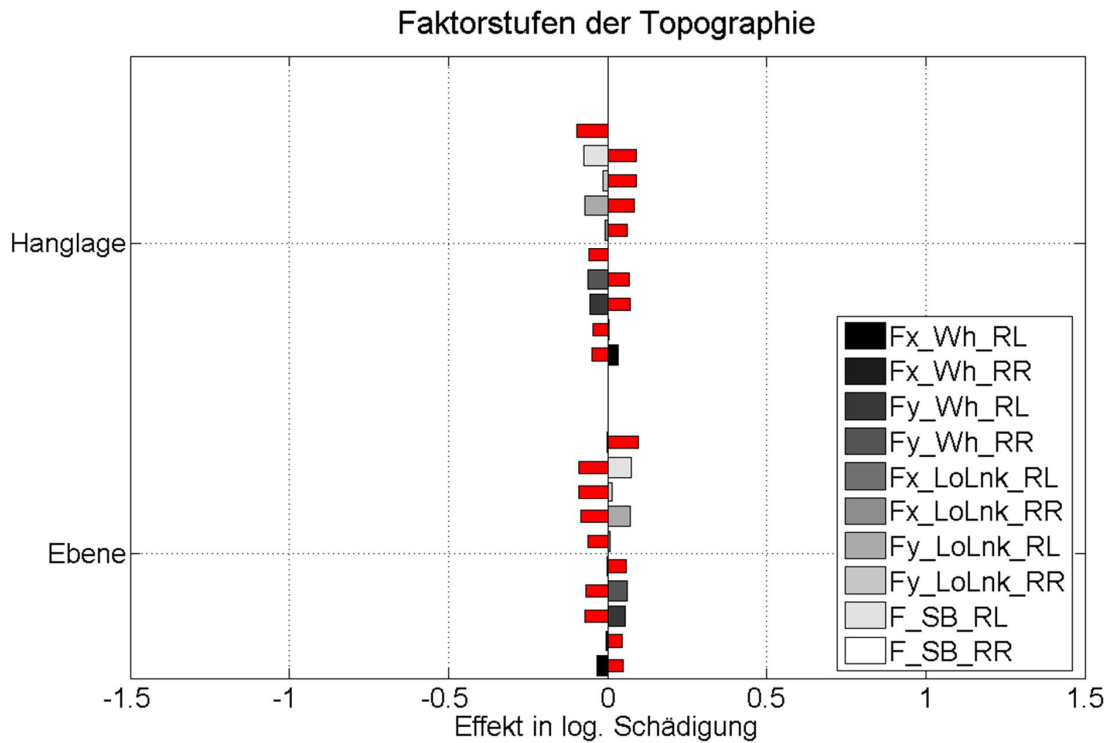


Abbildung 5-13: Untersuchung des Belastungseinflusses des Faktors Topographie anhand einer Auswahl repräsentativer Lasteinleitungspunkte am Fahrzeug. Dargestellt sind die Effekte der jeweiligen Messgrößen in Bezug auf die logarithmierte Schädigungssumme ( $\text{Log}_{10}$ ). Die roten Balken zeigen den Betrag des Standardfehlers.

Weitere Untersuchungen zum Faktormodell haben gezeigt, dass sich der Einfluss der Feldgröße bei der Bodenbearbeitung und der Beladungszustand bei Transportanwendungen auf die Fahrzeugbelastungen auswirken. Bei Transportanwendungen entstehen durch beladene Anhänger hohe Stütz- und Zuglasten am Fahrzeug. Dieser Effekt ist geeignet im Faktormodell zu berücksichtigen. Weiterhin ist bei Arbeitsgeräten zur Bodenbearbeitung feststellbar, dass Wendemanöver einen großen Einfluss auf die berechneten Schädigungszahlen am Fahrzeug haben. Dieser Effekt macht es notwendig die Feldgröße zu berücksichtigen. Hintergrund hierbei ist, dass bei kleinen Feldern

bezogen auf die Einsatzzeit eine erhöhte Anzahl von Wenden notwendig ist im Vergleich zu großen Feldern. Dieser Effekt hat einen Einfluss auf die Schädigungszahlen der Vertikalkräfte am Fahrzeug. Abbildung 5-14 macht dies nochmals deutlich.

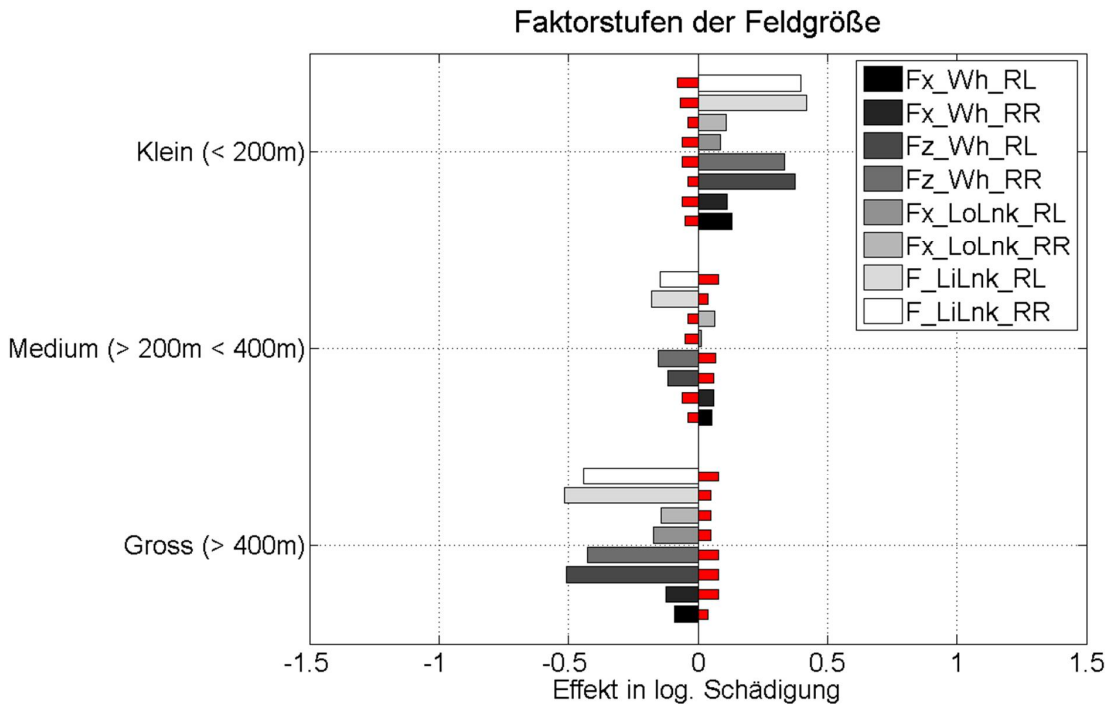


Abbildung 5-14: Untersuchung des Belastungseinflusses des Faktors Feldgröße anhand einer Auswahl repräsentativer Lasteinleitungspunkte am Fahrzeug. Dargestellt sind die Effekte der jeweiligen Messgrößen in Bezug auf die logarithmierte Schädigungssumme ( $\text{Log}_{10}$ ). Die roten Balken zeigen den Betrag des Standardfehlers.

### 5.5. Skalierung von Feldgrößen

Wie in Kapitel 5.4 beschrieben, zeigt die Feldgröße bei Applikationen zur Bodenbearbeitung Auswirkungen auf das Schädigungsniveau. An ausgewählten Lasteinleitungspunkten ist die zeitnormierte Schädigungssumme auf kleinen Feldern höher als bei großen Feldern. Entscheidend ist dabei das zeitliche Verhältnis von Arbeitsprozess und Wendemanöver. Beim Wenden treten hohe Lastamplituden durch das Ausheben und wieder Einsetzen des Anbaugeräts auf. Bei kleinen Feldern ist eine größere Anzahl an Wenden bezogen auf die Einsatzzeit durchzuführen, was die ermittelten Schädigungen pro Arbeitsstunde signifikant beeinflusst. Dieser Effekt ist im Faktormodell

zu berücksichtigen und mit einer ausreichenden Anzahl von Messwerten zu belegen. Aufgrund der begrenzten Ressourcen während einer Messkampagne ist dies für die Vielzahl der Bodenbearbeitungsgeräte mit großem Aufwand verbunden. Ein zielführender Ansatz zur Skalierung auf unterschiedliche Segmentlängen ist daher sinnvoll, um den Aufwand während der Messkampagne handhabbar zu gestalten. Aus den Erkenntnissen der arbeitsmusterbasierten Segmentierung besteht die Möglichkeit eine Skalierungsvorschrift abzuleiten, um ermittelte Schädigungszahlen einer definierten Segmentlänge auf längere oder kürzere Segmente umzurechnen. Mittels des Positionssignals des Heckkrafthebers und des GPS-Signals wird das Ausheben und wieder Einsetzen des Arbeitsgeräts eindeutig identifiziert und damit das Wendemanöver vom Arbeitsprozess getrennt. Innerhalb eines Segments können die Teilschädigungen der einzelnen Wenden  $D_{W_1}$  und  $D_{W_2}$  und der Bahnen  $D_{B_1}$  und  $D_{B_2}$  getrennt voneinander ausgewertet werden. Die Skalierung erfolgt dabei auf Basis der Teilschädigungen der Bahnabschnitte wie in Abbildung 5-15 dargestellt.

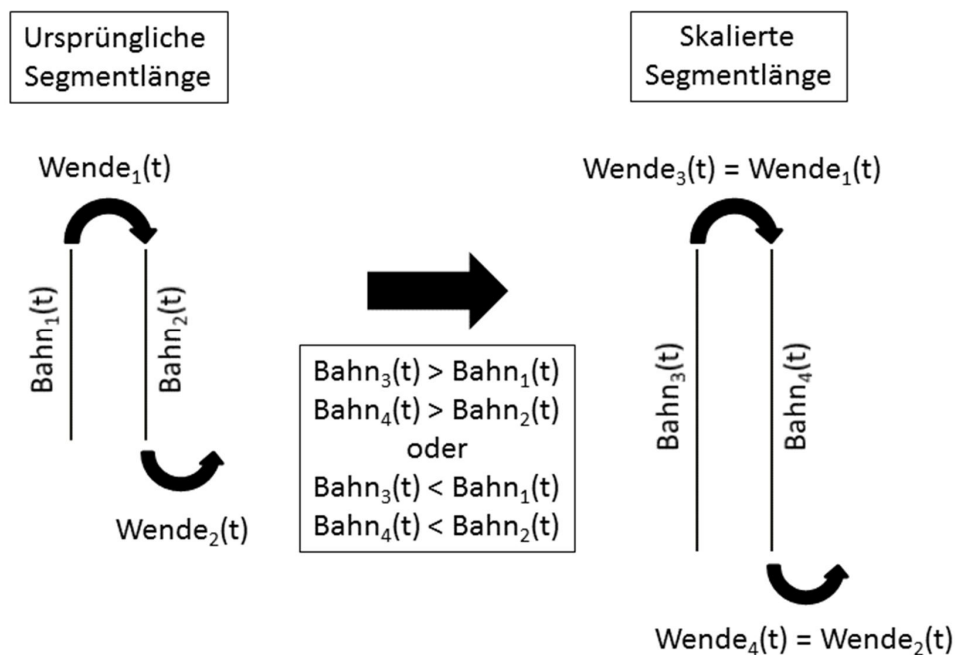


Abbildung 5-15: Grundidee der Skalierungsvorschrift auf Basis der Feldgröße zur Extraktion der Bahnabschnitte und Skalierung nur dieser Anteile

Die Skalierungsvorschrift beruht darauf, dass bei der Zerlegung der Feldmessungen jedes Segment aus zwei Bahnabschnitten und zwei Wendemanövern zusammengesetzt wird.



Bei Anwendung der Rainflow-Zählung auf das gesamte Segment ergibt sich jedoch ein anderes Zählergebnis, als würde die Rainflow-Zählung auf die einzelnen Abschnitte des Segments angewendet werden. Dies führt bei der Summation der Teilschädigungen zu Abweichungen bei der Gesamtschädigung. Grund hierfür ist die Segmentierung der Abschnitte und die Residuums-Behandlung bei der anschließenden Rainflow-Zählung. Abbildung 5-16 zeigt beispielhaft eine Segmentlänge der Längskraft am Unterlenker bestehend aus zwei Bahnabschnitten und zwei Wendungen und deren Zerlegung in Bahn und Wende.

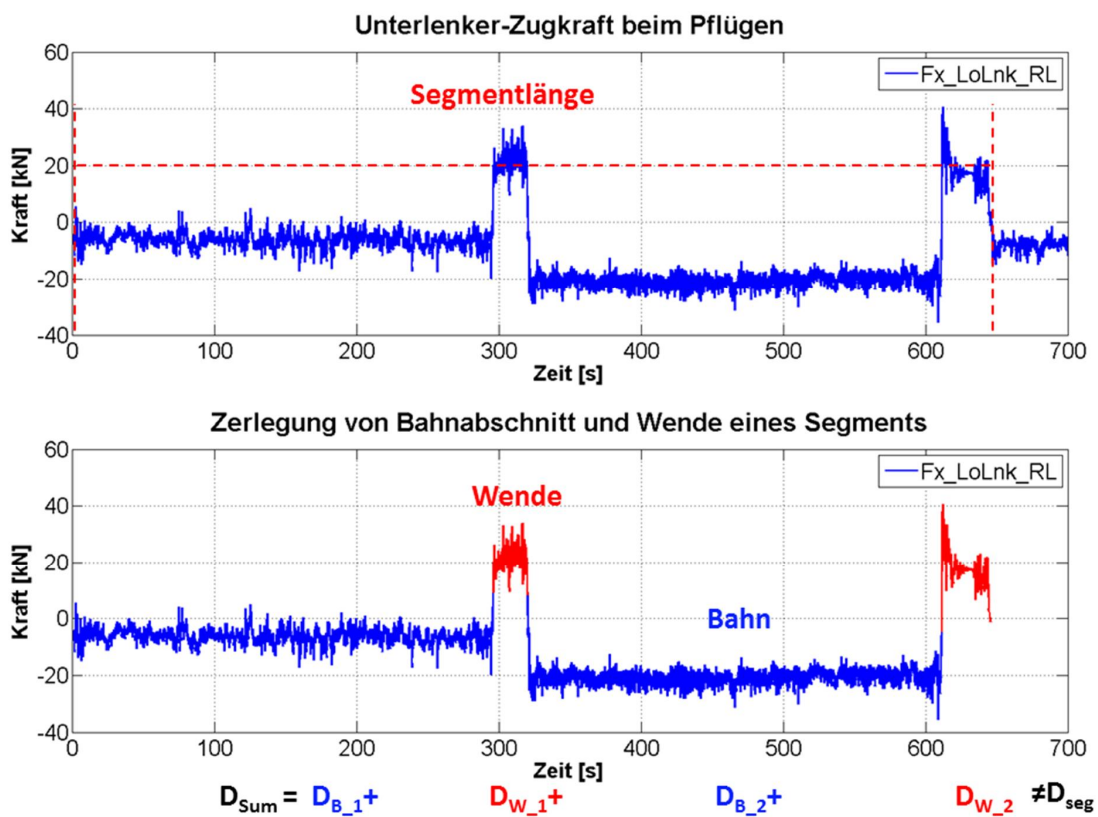


Abbildung 5-16: BZF der Längskraft am Unterlenker eines Segments und deren Zerlegung in Bahn und Wende bei Anwendung der Skalierungsvorschrift

Bedingt durch das Zerlegen der Segmente in Bahn und Wende bleiben am Anfang und am Ende der Abschnitte immer Spitzen stehen. Diese werden bei der Rainflow-Zählung als nicht geschlossene Hysteresen behandelt und daher im Residuum abgelegt. Wird das Residuum im Zählergebnis bei der anschließenden Schädigungsrechnung

der Teilabschnitte berücksichtigt, entspricht die Schädigungssumme der Teilabschnitte nicht mehr der Schädigungssumme des gesamten Segments. Die beschriebene Skalierungsvorschrift in Gleichung (5-8) soll diesen Effekt formal korrekt berücksichtigen.

$$D_{skal} = D_{Seg} + (SF - 1) * (D_{B_1} + D_{B_2}) \quad (5-8)$$

$$SF = \frac{l_{skal}}{l_{Bl}} \quad (5-9)$$

Zunächst wird die Schädigungszahl des ursprünglichen Segments  $D_{Seg}$  bestimmt. Durch Multiplikation der bahnbezogenen Schädigungszahlen ohne Residuum  $D_{B_1}$  und  $D_{B_2}$  mit dem Skalierungsfaktor  $SF$  wird der Schädigungsanteil aus der verlängerten oder der verkürzten Bahn berücksichtigt. Der Skalierungsfaktor bestimmt sich aus der Division der gewünschten Bahnlänge  $l_{skal}$  mit der ursprünglichen Bahnlänge  $l_{Bl}$  eines Segments. Die einzelnen Segmentlängen sind somit korrekt skalierbar. Weiterhin gilt die Skalierungsvorschrift nur bis zu einer sinnvollen unteren Schranke, denn bei Bahnlängen kürzer als 50 m wird die Schädigungssumme lediglich vom Wendemanöver dominiert. Abbildung 5-17 zeigt am Beispiel des Grubbers den Einsatz der Skalierungsvorschrift. Die blauen Punkte zeigen die berechneten Pseudo-Schädigungszahlen der vorhandenen Segmente aus der Messkampagne. Aufgetragen sind die zeitnormierten Pseudo-Schädigungszahlen der Vertikalkraft am linken Hinterrad. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden die erzeugten Schädigungszahlen auf den globalen Mittelwert aller Segmente der Datenreihe normiert, um Abweichungen in Schädigung über der Feldlänge eindeutig sichtbar zu machen. Aus den Lastdaten wurden durch die Anwendung des Schnittkriteriums 75 Segmente erzeugt. 38 Segmente entsprechen einer Feldlänge kleiner 200 m und sind damit als kleine Felder charakterisiert. 29 Segmente entsprechen einer mittleren Feldgröße (>200 m <500 m) und lediglich 8 Segmente großen Feldern (>500 m). In der Nutzungssimulation soll die Feldgröße jedoch geeignet durch eine ausgewogene Datenbasis von kleinen, mittleren und großen Feldern berücksichtigt werden. Die Skalierung wird nun eingesetzt, um für alle Feldgrößenbereiche eine ausgeglichene Datenlage zu schaffen. Dabei werden 120 zusätzliche Segmente erzeugt, 25 Segmente für kleine Felder, 35 Segmente für mittlere Felder und 60 Segmente für große Felder. Durch die Skalierungsvorschrift

werden aus den gemessenen Lastdaten der einzelnen Segmente zusätzliche Segmente in Form von Pseudo-Schädigungszahlen erzeugt, welche den gewünschten Feldlängen entsprechen. Die skalierten Schädigungszahlen sind in Abbildung 5-17 als rote Punkte dargestellt. Beim Vergleich der ermittelten Schädigungszahlen zeigt sich, dass die zeitnormierte Schädigung über die Feldlänge abnimmt. Die Schädigungssumme pro Arbeitsstunde zwischen kurzen Segmenten (<200 m) und langen Segmenten (>500 m) variiert abhängig von der Messgröße um den Faktor 4. Die Zusammenhänge zeigen, dass die Wendemanöver auf die vertikalen Lasten große Einflüsse haben. Da auf kleinen Feldern die Anzahl der Wendungen bezogen auf die Einsatzdauer größer ist, ist hier auch mit höheren Schädigungszahlen pro Arbeitsstunde zu rechnen. Die zusätzlich erzeugten Segmente durch den Skalierungsansatz tragen somit zur sinnvollen Erweiterung der Datenbasis bei.

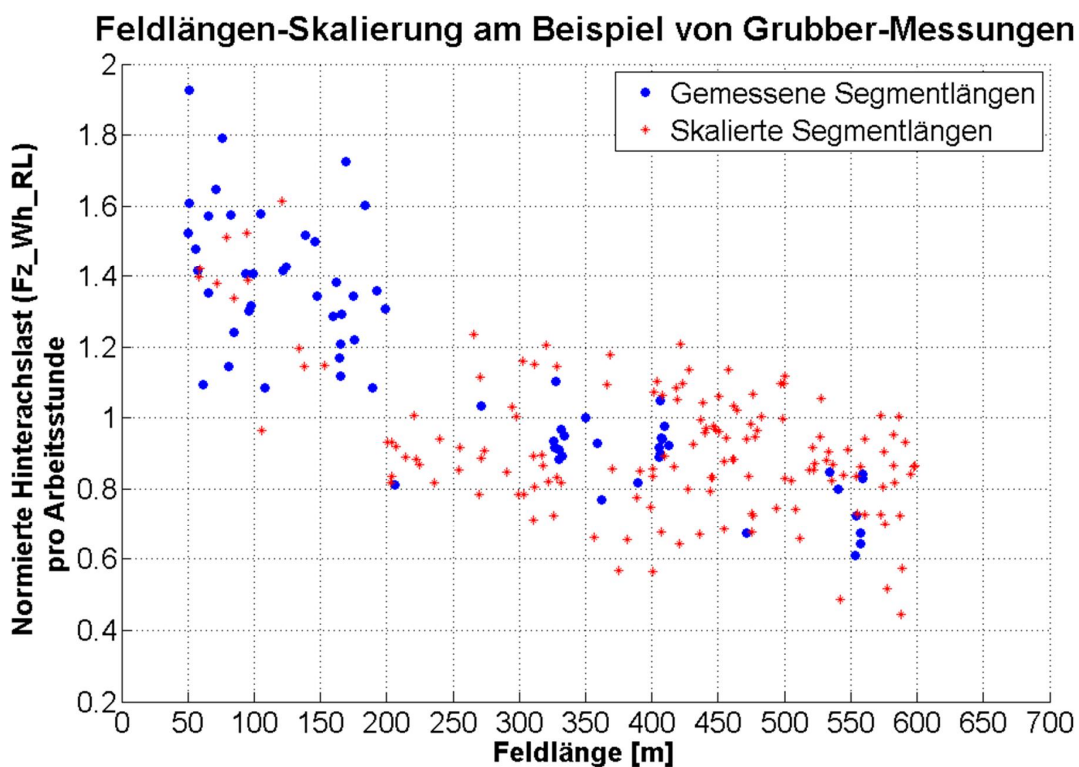


Abbildung 5-17: Anwendung der Skalierungsvorschrift zur Erzeugung zusätzlicher Pseudo-Schädigungszahlen der Vertikalkraft am linken Hinterrad (Fz\_Wh\_RL).

Mit der Skalierungsvorschrift besteht die Möglichkeit ein Ungleichgewicht bei der Bedatung der Zellen im Faktormodell auszugleichen und die nutzungsspezifische Streuung sicherzustellen.

### 5.6. Finales Faktor- und Nutzungsmodell

Die Ermittlung der kritischsten Kombination der Lastfälle erfolgt nach der in Kapitel 3.1 beschriebenen Methodik. Abhängig von der Anzahl der Einflussfaktoren, wird ein entsprechendes Faktor- und Nutzungsmodell erzeugt. Die Anzahl der zu bedatenden Faktorzellen bestimmt sich aus der Kombination der betrachteten Einflussfaktoren und deren Stufen. Bei zwei Faktoren mit jeweils drei Stufen ergibt dies ein Faktormodell mit neun Zellen ( $3^2 = 9$ ). Basierend auf den Ergebnissen aus Kapitel 5.4 werden folgende Einflüsse im finalen Faktormodell betrachtet:

- Applikation (Pflug, Güllefass, Frontlader, usw.)
- Untergrund (Feld, Feldweg, Straße)
- Feldgröße (Klein, Normal, Groß)
- Beladungszustand (Leer, Beladen)

Die einfache Kombination der Faktoren wäre jedoch nicht sinnvoll durchführbar, weil aufgrund der großen Anzahl an Stufen mehrere hundert Zellen erzeugt würden. Weiterhin beschreiben viele Faktorkombinationen keine sinnvollen Betriebszustände. Für Bodenbearbeitungsgeräte ist eine Differenzierung hinsichtlich Beladung beispielsweise nicht sinnvoll, für Transportanwendungen aber notwendig. Die Faktoren Untergrund, Feldgröße und Beladung werden zu kombinierten Faktorstufen zusammengefasst, welche die einzelnen Betriebszustände berücksichtigen. Das finale Faktormodell besteht somit aus einem zweidimensionalen Modell mit 24 Zeilen und 7 Spalten. Die Zeilen beschreiben dabei die jeweiligen Applikationen und die Spalten die kombinierten Zustände des Untergrunds, sowie der Beladung und der Feldgröße. Dies entspricht einem Faktormodell mit 168 Zellen. Da im kombinierten Faktormodell einzelne Zustände nicht sinnvoll zu bedaten sind, müssen diese Zellen durch Umverteilungsvorgaben korrigiert werden, um die Einsatzverteilung der einzelnen Faktoren korrekt abzubilden. Abbildung 5-18 zeigt das Vorgehen der Umverteilungsmodifikation für den Grubber. Beim Grubber ist die Segmentierung beim Transport hinsichtlich Beladung

unrealistisch, weswegen die Zellen für Beladungszustände jeweils für den Feldweg und die Straße zu einer Zelle zusammengefasst werden. Die Anteile im Faktor- und Nutzungsmodell für „Feldweg-beladen“ werden der Zelle „Feldweg-leer“ zugeordnet und die Anteile für „Straße-beladen“ werden der Zelle „Straße-leer“ zugeordnet, so dass die gewünschte Einsatzverteilung in Summe 100% ergibt. Leere oder nicht korrekt nutzbare Zellen werden somit vermieden. Bezugnehmend auf die vorhandenen Anwendungen werden die Umverteilungsvorschriften für alle notwendigen Faktorzellkombinationen definiert.

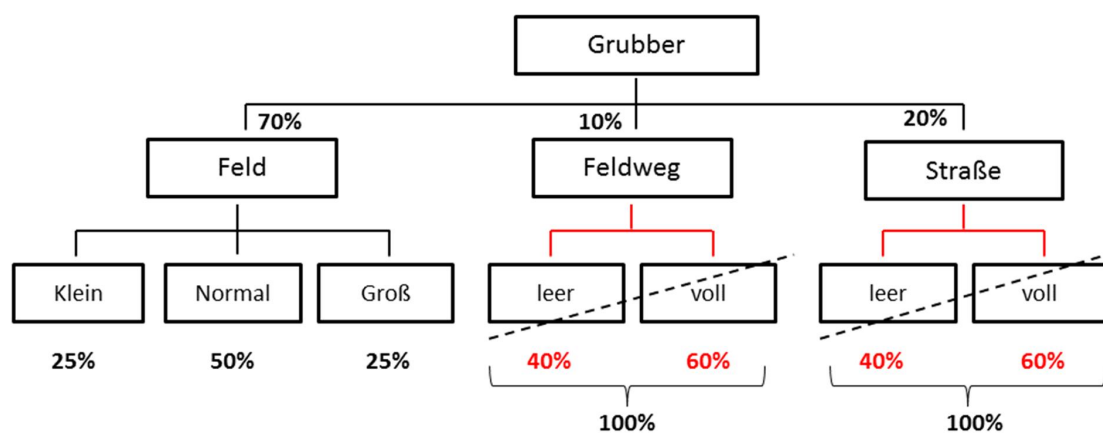


Abbildung 5-18: Beispielhafte Umverteilungsmodifikation für das Arbeitsgerät „Grubber“

Nach Einarbeitung aller notwendigen Umverteilungsmodifikationen für die einzelnen Applikationen besteht das finale Faktormodell aus 105 Zellen, welche durch die Lastdaten der jeweiligen Betriebszustände mit Pseudo-Schädigungszahlen bedatet werden. Tabelle 5-1 zeigt das finale Faktormodell und belegt, dass im Bereich von Traktoren die jeweiligen Applikationen sehr individuelle Abstufungen zeigen. Somit ist feststellbar, dass Traktoren durch den vielseitigen Verwendungszweck als Zugmaschine, einen im Vergleich zu reinen Straßenfahrzeugen erheblich gesteigerten Aufwand bei der Gestaltung des Faktormodells notwendig machen.

Tabelle 5-1: Finales Faktormodell des Versuchsfahrzeugs John Deere 6150R

Faktormodell	Feld			Feldweg		Straße	
	Klein	Medium	Groß	Leer	Beladen	Leer	Beladen
Tiefen- lockerer							
Grubber							
Pflug							
Scheiben- egge							
Egge							
Kreiselegge							
Saatbett- kombination							
Sämaschine							
Güllefass							
Miststreuer							
Feldspritze							
Dünger- streuer							
Mähwerk/ -kombi							
Wender							
Schwader							
Ballenpresse							
Ladewagen							
Mulcher							
Futtermisch- wagen							
Anhänger							

Leerer Traktor		
Frontlader- Erdarbeiten		
Frontlader- Material befördern		
Frontlader- Hofarbeiten/ Misten		

Auf Basis des finalen Faktormodells erfolgt die Bestimmung der korrespondierenden Einsatzzeiten des Nutzungsmodells. Die angegebenen Nutzungsdaten basieren auf Erkenntnissen der untersuchten Literaturquellen und auf Einsatzdaten der Kunden der Messkampagne. Da in Kapitel 3 lediglich die übergeordneten Arbeitsverfahren mit Einsatzdaten beschrieben sind, erfolgt zunächst die Zuteilung der während der Messkampagne eingesetzten Arbeitsgeräte. Aufgrund der Ausführung des Faktormodells gilt es zu beachten, dass die Transportanteile der einzelnen Arbeitsgeräte nicht gesondert unter dem Punkt Transport aufgeführt sind, sondern direkt mit den Einsatzzeiten der Arbeitsgeräte verrechnet wurden. Durch Einführung des Faktors Untergrund mit den Stufen Feld, Feldweg und Straße wird auf dieser Ebene die Differenzierung des jeweiligen Transportanteils berücksichtigt. Tabelle 5-2 zeigt die zusammengestellte Einsatzverteilung der Arbeitsgeräte für die verschiedenen Betriebsformen der Nutzerpopulation.

Tabelle 5-2: Kundeneinsatzverteilung auf Basis der eingesetzten Arbeitsgeräte

Arbeits- verfahren	Arbeitsgerät	Viehbetrieb	Ackerbau- betrieb	Mischbetrieb
Primäre Boden- bearbeitung	Tiefenlockerer	1,0 %	4,0 %	2,0 %
	Grubber	5,0 %	13 %	9,0 %
	Pflug	5,0 %	14 %	9,0 %
	Scheibenegge	3,0 %	8,0 %	4,0 %

Sekundäre Boden- bearbeitung	Egge	2,0 %	5,0 %	3,0 %
	Kreiselegge	3,0 %	5,0 %	3,0 %
	Saatbett- kombination	5,0 %	12,0 %	8,0 %
Saat, Düngung, Bestands- pflege	Sämaschine	3,0 %	12,0 %	7,0 %
	Güllefass	6,0 %	3,0 %	4,0 %
	Miststreuer	3,0 %	0,0 %	1,0 %
	Feldspritze	1,0 %	5,0 %	3,0 %
	Düngerstreuer	5,0 %	0,0 %	3,0 %
Grünland, Fütterung	Mähwerk/ -kombi	8,0 %	0,0 %	5,0 %
	Wender	3,5 %	0,0 %	2,0 %
	Schwader	4,5 %	0,0 %	3,0 %
	Ballenpresse	4,0 %	0,0 %	3,0 %
	Ladewagen	3,0 %	0,0 %	2,5 %
	Mulcher	1,0 %	0,0 %	0,5 %
	Futtermisch- wagen	8,0 %	0,0 %	5,0 %
Transport	Anhänger	3,0 %	8,0 %	6,0 %
	Leerer Traktor	3,0 %	2,0 %	3,0 %
Frontlader	Erdarbeiten	2,0 %	1,0 %	1,0 %
	Material befördern	6,0 %	5,0 %	4,0 %
	Hofarbeiten/ Misten	12 %	3,0 %	9,0 %



Auswertungen während der Messkampagne zur Differenzierung hinsichtlich Transport und Feldarbeit haben bei den Arbeitsverfahren „Primäre & Sekundäre Bodenbearbeitung“, „Saat, Düngung & Pflege“ sowie bei „Grünlandarbeiten“ folgende mittlere Verteilung ergeben. 70% der Arbeitszeit wird auf dem Feld verbracht, weitere 10% für den Feldwegtransport und 20% für den Straßentransport. Die genannte Verteilung trifft für die Arbeitsverfahren „Transport“ und „Frontlader“ jedoch nicht zu. Hier gelten gesonderte Einsatzanteile. Im Anhängerbetrieb wird der überwiegende Anteil der Einsatzzeiten auf der Straße und dem Feldweg zurückgelegt und weniger Zeit auf dem Feld selbst, wie beispielsweise bei der Getreideernte. Die exakte Verteilung ist in Tabelle 5-3 aufgeführt. Bei Frontladerarbeiten findet keinerlei Differenzierung der Zustände Untergrund, Beladung oder Feldgröße statt. Die Frontladerarbeiten sind lediglich in drei charakteristische Anwendungsbereiche eingeteilt, denen die ermittelten Einsatzzeiten direkt zugeordnet werden. Eine Differenzierung des Beladungszustands findet nur für Transportanwendungen statt. Die Verteilung liegt hier bei 60% für beladene und 40% für nicht beladene Anhänger. Der höhere Zeitanteil für beladene Transportzustände besteht aufgrund geringerer Fahrgeschwindigkeiten während des Transports selbst. Bei der Differenzierung der Feldgröße finden lediglich Bodenbearbeitungsgeräte Berücksichtigung. Statistisch repräsentative Erhebungen zur Feldgrößenverteilung der angestrebten Nutzergruppe sind nicht vorhanden. Aus diesem Grund wird die Feldgrößenverteilung der besuchten Kunden während der Messkampagne als Datengrundlage verwendet. Eine Unterteilung in drei Gruppen wird als sinnvoll erachtet, dabei werden Felder unterhalb einer Größe drei Hektar als kleine Felder kategorisiert, mittlere Felder haben im Schnitt eine Größe zwischen drei bis sieben Hektar und große Felder ab sieben Hektar. Die Verteilung der Feldgrößen lag im Mittel bei 25% für kleine Felder, 50% für mittelgroße Felder und 25% für große Felder. In Tabelle 5-3 sind die prozentualen Einsatzzeiten für das jeweilige Arbeitsgerät zusammengefasst.

Tabelle 5-3: Prozentuale Einsatzverteilung der Faktoren Untergrund, Beladung und Feldgröße

Nutzungsmodell	Untergrund			Beladung		Feldgröße		
	Feld	Feldweg	Straße	Leer	Beladen	Klein	Medium	Groß
Tiefenlockerer	70 %	10 %	20 %	-	-	25 %	50 %	25 %
Grubber	70 %	10 %	20 %	-	-	25 %	50 %	25 %
Pflug	70 %	10 %	20 %	-	-	25 %	50 %	25 %
Scheibenegge	70 %	10 %	20 %	-	-	25 %	50 %	25 %
Egge	70 %	10 %	20 %	-	-	25 %	50 %	25 %
Kreislegge	70 %	10 %	20 %	-	-	25 %	50 %	25 %
Saatbettkombination	70 %	10 %	20 %	-	-	25 %	50 %	25 %
Sämaschine	70 %	10 %	20 %	40 %	60 %	25 %	50 %	25 %
Güllefass	30 %	25 %	45 %	40 %	60 %	-	-	-
Miststreuer	30 %	25 %	45 %	40 %	60 %	-	-	-
Feldspritze	70 %	10 %	20 %	40 %	60 %	-	-	-
Düngerstreuer	70 %	10 %	20 %	40 %	60 %			
Mähwerk/-kombi	70 %	10 %	20 %	-	-	25 %	50 %	25 %
Wender	70 %	10 %	20 %	-	-	25 %	50 %	25 %
Schwader	70 %	10 %	20 %	-	-	25 %	50 %	25 %
Ballenpresse	70 %	10 %	20 %	-	-	-	-	-
Ladewagen	30 %	25 %	45 %	40 %	60 %	-	-	-

Mulcher	70 %	10 %	20 %	-	-	25 %	50 %	25 %
Futtermischwagen	-	-	-	-	-	-	-	-
Anhänger	-	40 %	60 %	40 %	60 %	-	-	-
Leerer Traktor	-	40 %	60 %	-	-	-	-	-
Frontlader Erdarbeiten	-	-	-	-	-	-	-	-
Frontlader Material befördern	-	-	-	-	-	-	-	-
Frontlader Hofarbeiten/ Misten	-	-	-	-	-	-	-	-

Die zusammengestellten Verteilungen erheben nicht den Anspruch statistisch repräsentativ für den Deutschland zu sein. Aus Mangel an statistisch abgesicherten Informationen wurden die angefügten Daten aus den Erkenntnissen der Messkampagne zusammengestellt.

## 6 Ergebnisse der Nutzungssimulation

Die Identifikation der belastungsintensivsten Kombination der Lastfälle einer Nutzerpopulation erfolgt mittels der Software U-Sim. Die Funktionsweise von U-Sim wurde bereits in Kapitel 3.1 ausführlich beschrieben. Auf Basis der erzeugten Pseudo-Schädigungszahlen der Lastmessungen und den ermittelten Einsatzdaten der Nutzerpopulation erfolgt die Bestimmung des repräsentativen Auslegungsnutzers (z. B.: 95% Nutzer). Die hinter dem Referenznutzer stehende Kombination der Lastfälle dient zur Ableitung von Lastkollektiven für ausgewählte Beobachtungspunkte an der Fahrzeugstruktur. Zunächst werden jedoch grundsätzliche Überlegungen zur Parametereinstellung von U-Sim vorgestellt, um die Vorgehensweise anhand des vorliegenden Szenarios zu erläutern.

### 6.1. Ermittlung des repräsentativen Nutzertyps

Zur Beschreibung der Nutzungsvariabilität sind folgende grundsätzliche Eingangsinformationen für U-Sim erforderlich:

- Beschreibung der charakteristischen Betriebszustände des Fahrzeugs innerhalb eines Faktormodells
- Bereitstellung von Lastdaten der ausgewählten Betriebszustände in Form von Schädigungszahlen für die jeweiligen Messgrößen
- Beschreibung der Einsatzverteilung (Mittelwert, Standardabweichung und Verteilungsform) innerhalb des Nutzungsmodells

Die Vorgehensweise zur Beschaffung und Identifikation dieser Informationen wurde in den vorherigen Kapiteln ausführlich beschrieben. Um die Nutzungssimulation mittels U-Sim durchzuführen, sind zunächst grundlegende Betrachtungen zur Parametereinstellung durchzuführen:

1. Definition und Festlegung der Parameter des Nutzungsmodells
2. Untersuchung inwieweit die Zellen des Faktormodells hinreichend bedatet sind (Mittelwert und Standardabweichung der Lastdaten)
3. Bestimmung der Anzahl der virtuellen Nutzer für belastbare Quantilerggebnisse
4. Einstellung des Parameters „Variabilität“ der einzelnen Betriebszustände

**Zu Punkt 1:** Die Identifikation der repräsentativen Abmischung der Lastdaten mittels U-Sim erfordert Informationen zum Einsatzverhalten der Nutzerpopulation, welche innerhalb des Nutzungsmodells zusammengefasst sind. Die Informationen des Nutzungsmodells sind in Form von Mittelwert und Standardabweichung, sowie der Verteilungsform der einzelnen Betriebszustände beschrieben. Die Beschaffung der geforderten Mittelwerte der einzelnen Betriebsformen des Nutzungsmodells wurde im vorherigen Kapitel ausführlich beschrieben. Informationen zur Streuung der Einsatzdaten innerhalb Deutschlands sind im vorliegenden Fall nicht vorhanden. In solchen Situationen sollte ein hoher Wert wie beispielsweise 50% gewählt werden, um Fehleinschätzungen durch eine konservative Annahme entgegenzuwirken. Dieser hohe Wert ist oftmals nicht erreichbar, da die Gewichte der Betriebszustände der jeweiligen Nutzer in Summe immer 100% ergeben müssen. Durch die Vorgabe eines hohen Werts wird lediglich sichergestellt, dass die maximal mögliche Streuung innerhalb der Nutzerpopulation erreicht wird. Als Verteilungsform wird eine abgeschnittene Normalverteilung der Einsatzdaten angenommen.

**Zu Punkt 2:** Im nächsten Schritt gilt es zu überprüfen, inwieweit die einzelnen Betriebszustände des Faktormodells mit Messwerten bedatet sind und wie sich die Verteilung der Schädigungswerte innerhalb der Zellen darstellt. Abhängig von den Ergebnissen gilt es festzulegen, ob die Einteilung des Faktormodells sinnvoll definiert ist und keine leeren Zellen vorliegen. Abbildung 6-1 zeigt das Vorgehen am Beispiel der Längskraft am rechten Hinterrad anhand einiger charakteristischer Betriebszustände. Aufgetragen sind die jeweiligen Lastfälle über der normierten Schädigungssumme. Die Schädigungswerte sind auf eine Arbeitsstunde normiert. Die blauen Punkte beschreiben die Pseudo-Schädigungszahlen der jeweiligen Segmente. Die grünen und schwarzen Grenzpunkte zeigen jeweils die 10% und 90% Quantile und die 1% und 99% Quantile. Es zeigt sich, dass alle Betriebszustände mit Messwerten belegt sind und die Streuungen innerhalb der Zellen entsprechend der Anwendung unterschiedlich groß ausfallen.

## Zellbelegung und Streubreite der Längskraft am rechten Hinterrad (Fx\_Wh\_RR)

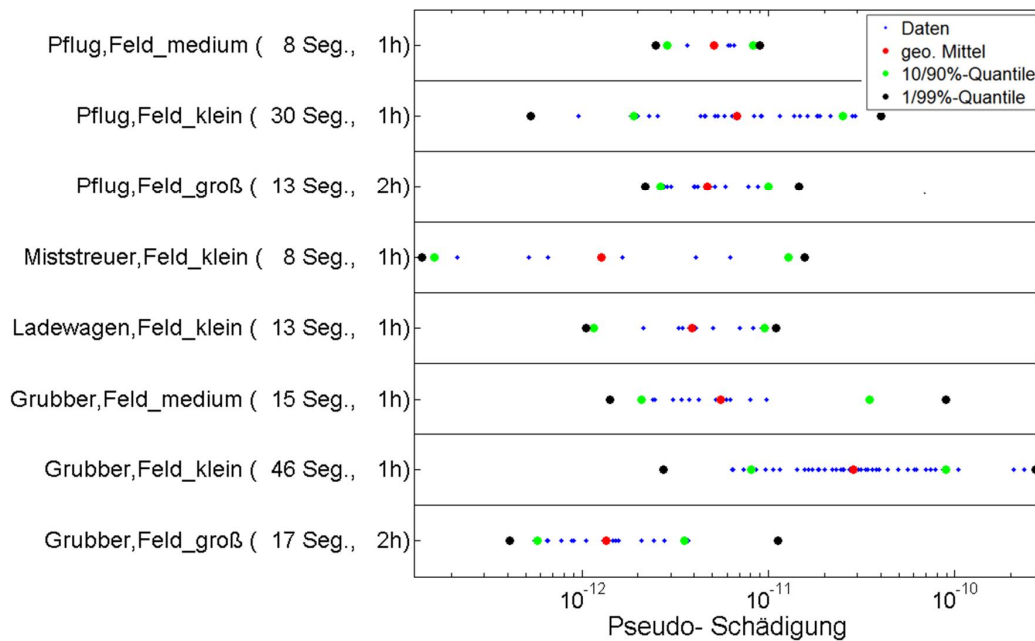


Abbildung 6-1: Zellbelegung und Streubreite der Schädigungszahlen der Längskraft am rechten Hinterrad (Fx\_Wh\_RR) für ausgewählte Lastfälle

**Zu Punkt 3:** U-Sim erzeugt mittels Monte-Carlo-Simulation eine festgelegte Anzahl von virtuellen Nutzern innerhalb einer Population, welche die vorgegebenen Randbedingungen des Nutzungsmodells repräsentieren. Den virtuellen Nutzern werden entsprechend der ermittelten individuellen Einsatzdauer Schädigungswerte der zugehörigen Betriebszustände zugeordnet. Die Anzahl der zu simulierenden Nutzer ist so zu wählen, dass belastbare Ergebnisse an den einzelnen Beobachtungspunkten eintreten. Wird lediglich eine geringe Anzahl virtueller Nutzer (<500 Nutzer) berechnet, können die Quantilergebnisse bei einer erneuten Nutzungssimulation Abweichungen zeigen, was nicht vertrauenswürdig wäre. Dieser Effekt ist vor allem bei hohen Quantilwerten feststellbar. Eine ausreichende Anzahl virtueller Nutzer ist erreicht, wenn das Quantil der einzelnen Beobachtungspunkte in einem Streubereich kleiner 5% liegt. Zur Definition der notwendigen Nutzeranzahl sollten Beobachtungspunkte ausgewählt werden, welche bei den gemessenen Lastdaten die höchsten Standardabweichungen aufweisen. Abbildung 6-2 gibt einen Überblick der Standardabweichung der Schädigungszahlen innerhalb ausgewählter Lastfälle. Um die Standardabwei-

chung der jeweiligen Zellen vergleichen zu können, wurden zunächst alle Schädigungszahlen innerhalb einer Zelle auf eine Betriebsstunde normiert und daraus die Standardabweichung berechnet. Exemplarisch ist die Analyse für die Längskraft ( $F_{x\_Wh\_RR}$ ) und Vertikalkraft ( $F_{z\_Wh\_RR}$ ) am Hinterrad dargestellt. Es ist erkennbar, dass die Längskraft für den Miststreuer die größte Standardabweichung darstellt. Dieser Effekt ist jedoch mit dem rückläufigen Zugkraftbedarf des sich leerenden Miststreuers während der Feldarbeit verbunden. Bei Bewertung der Standardabweichung beider Messgrößen über alle dargestellten Betriebszustände liegen die Abweichungen weitgehend auf einem gleichen Niveau.

Standardabweichung der Längs- und Vertikalkräfte am rechten Hinterrad

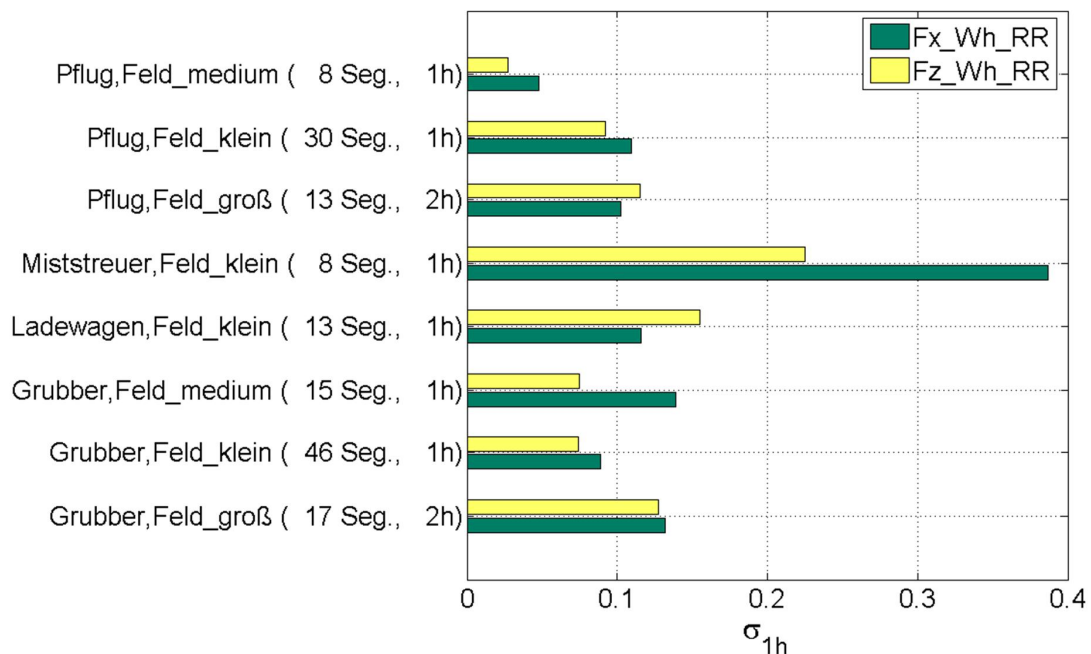


Abbildung 6-2: Standardabweichung der berechneten Pseudo-Schädigungszahlen der Längs- ( $F_{x\_Wh\_RR}$ ) und Vertikalkräfte ( $F_{z\_Wh\_RR}$ ) ausgewählter Betriebszustände des Faktormodells

Die Festlegung der Anzahl der virtuellen Nutzer erfolgt anhand der Längskraft, mit dem Ziel stabile Ergebnisse bei gleichzeitig hohen Quantilwerten (z. B.: 95% Quantil) zu erreichen. Abbildung 6-3 zeigt die Ergebnisse der Nutzungssimulation am Beispiel der Längskraft am Hinterrad. Aufgetragen ist die prozentuale Abweichung der Schädigungssumme des 95% Quantils der Nutzerpopulation bezogen auf die Anzahl der simulierten Nutzer. Das Verhalten des Graphen zeigt, dass mit steigender Anzahl der

simulierten Nutzer die Abweichungen des 95% Quantils kleiner werden. Ab einer Anzahl von 3000 virtuellen Nutzern liefert die Nutzungssimulation Quantilresultate mit Abweichungen kleiner als 5%, was die untere Grenze für stabile Werte darstellt. Da die Schädigungssumme eines virtuellen Nutzers nicht auf Basis der Zeitreihendaten, sondern auf Basis von Schädigungszahlen auf die angestrebte Lebensdauer hochgerechnet wird, ermöglicht das Verfahren Rechenzeiten von wenigen Minuten für mehrere tausend Nutzer. Es ist empfehlenswert eine große Anzahl virtueller Nutzer zu simulieren, um repräsentative Quantilresultate zu erreichen. Grundsätzlich sollten hohe Quantile (z. B.: 99% Nutzer) mit einer Mindestanzahl von 5.000 bis 10.000 virtuellen Nutzern abgesichert werden.

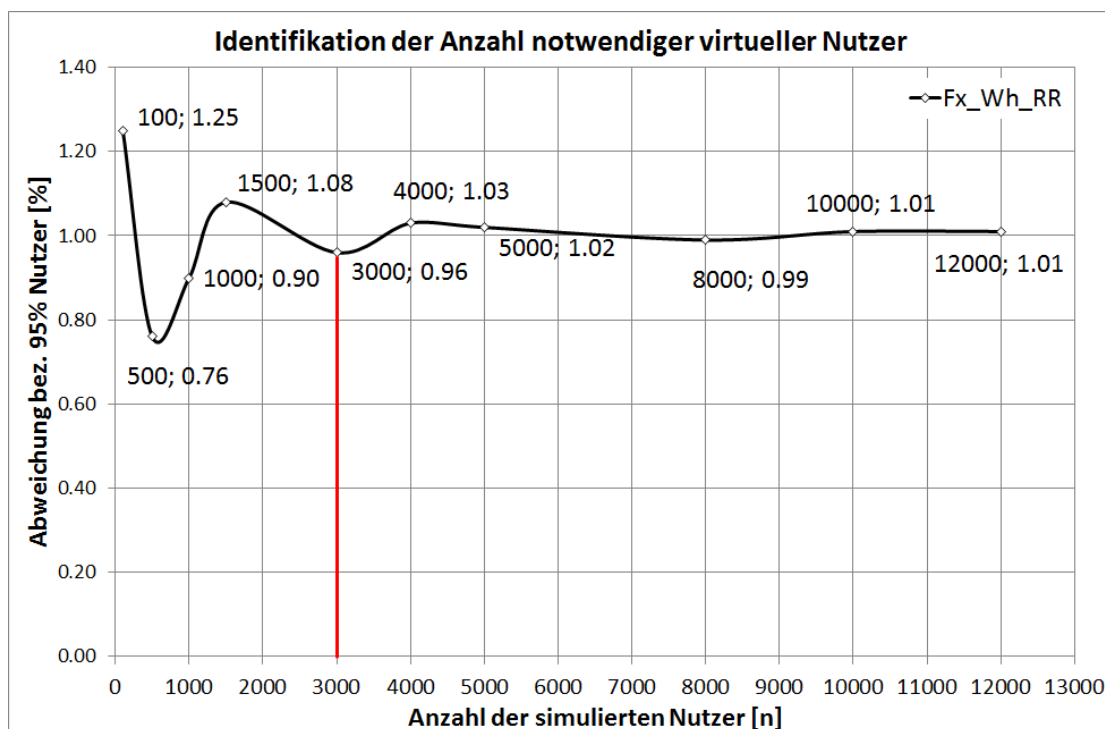


Abbildung 6-3: Bestimmung der notwendigen Anzahl virtueller Nutzer für stabile Ergebnisse des 95% Quantils einer Nutzerpopulation für die Längskraft am Hinterrad (Fx\_Wh\_RR)

**Zu Punkt 4:** Im letzten Schritt ist es notwendig den Parameter „Variabilität“ sinnvoll zu belegen. Die Funktionsweise des Parameters ist in Kapitel 3 ausführlich beschrieben. Der Parameter definiert den Grad der Durchmischung der gezogenen Schädigungs-



zahlen eines Betriebszustandes während der Nutzungssimulation. Im Grunde beschreibt die Variabilität wie häufig ein Nutzer eine spezifische Applikation innerhalb seines Arbeitszyklus wiederholt. Die sich daraus ergebenden Einsatzzeiten unterscheiden sich für die einzelnen Applikationen und sind für jede Applikation anzugeben. Im vorliegenden Fall stützt sich der Parameter auf Informationen der Messkampagne und den vorliegenden Segmentlängen der Daten im Faktormodell. Das Vorgehen zur Bestimmung der Variabilität wird am Beispiel der Feldarbeit erläutert. Die besuchten Kunden während der Messkampagne bewirtschaften unterschiedliche Schlaganzahlen und Schlaggrößen innerhalb ihres jährlichen Arbeitszyklus. Im jährlichen Mittel wurden Ackerflächen von circa 80 ha bearbeitet. Die Anzahl der Felder pro Kunde liegt im Mittel bei 15 Einheiten. Die Segmentlängen der Messdaten liegen im Mittel bei 8 Minuten, somit liegt die Variabilitätsvorgabe für die Feldarbeit bei 2 Arbeitsstunden (15 x 8 Minuten = 120 Minuten). Dadurch ist sichergestellt, dass im Mittel circa 15 Messwerte aus den Zellen gezogen werden. Abhängig von der Segmentlänge der gezogenen Schädigungszahlen können einem Nutzer auch mehr oder weniger als 15 Messwerte zugewiesen werden, was der Verteilung der Feldanzahl einer realen Nutzerpopulation entspricht.

Im Anschluss an die Definition der Parameter wird die Nutzungssimulation mittels U-Sim durchgeführt. Auf Basis der Eingangsdaten aus Faktor- und Nutzungsmodell erfolgt mittels Monte-Carlo-Simulation die Erzeugung einer festgelegten Anzahl von virtuellen Nutzern. Den virtuellen Nutzern werden entsprechend der ermittelten Einsatzdauer Schädigungswerte der zugehörigen Betriebszustände zugeordnet und zu einer Gesamtschädigung für den jeweiligen Nutzer aufsummiert. Abschließend erfolgt die Berechnung des gewünschten Referenzquantils. Hier wird die beschriebene Vorgehensweise auf die Nutzerpopulation des Versuchsfahrzeugs angewendet. Die Gesamtpopulation der Nutzer wird im Wesentlichen durch drei Betriebsformen repräsentiert. Es handelt sich um die Betriebsformen „Ackerbauer“, „Viehbetrieb“ und „Mischbetrieb“, die im weiteren Verlauf als Nutzersegmente bezeichnet werden und deren Einsatzverteilungen im vorherigen Kapitel beschrieben sind. Durch die Nutzungssimulation werden zunächst die einzelnen Nutzersegmente betrachtet, um die Belastungsintensität an den vorliegenden Messstellen des Fahrzeugs zu beurteilen. In einem weiteren Schritt sind alle Segmente anteilig in der Gesamtpopulation zusam-

mengefasst und werden ebenfalls mittels U-Sim bewertet. Die Auswertung der Quantile der einzelnen Segmente und der Gesamtpopulation erfolgt an charakteristischen Beobachtungspunkten der Fahrzeugstruktur. Abbildung 6-4 zeigt die Verteilung der ermittelten Schädigungssumme für 10.000 virtuelle Nutzer für die Vertikalkraft am Hinterrad beispielhaft für das Nutzersegment „Mischbetrieb“. Die Schädigungssumme der einzelnen Nutzer ist auf eine Arbeitsstunde normiert. Der obere Graph zeigt die Verteilungsdichte der simulierten Nutzer über der logarithmierten Schädigungssumme. Ausgehend von der Verteilung der Gesamtschädigungen innerhalb des Nutzersegments sind beispielhaft das 90%, 95% und 99% Quantil berechnet und in Form grüner Punkte auf der X-Achse gekennzeichnet. Der untere Graph zeigt den anteiligen prozentualen Einfluss der Arbeitsgeräte bezogen auf das jeweilige Schädigungsniveau. Es ist feststellbar, dass im Bereich hoher Gesamtschädigungen Arbeitsgeräte zur Bodenbearbeitung dominieren, was für Messstellen an der Hinterachse typisch ist. Abhängig von der Messstelle können ebenfalls andere Applikationen dominierend für die Schädigungssumme sein. Bei der Vorderachse beispielsweise haben Frontladerarbeiten großen Einfluss auf die Schädigungssumme. Abhängig von der Auslegungsphilosophie des Herstellers kann das gewünschte Referenzquantil ausgewählt werden. Alle Untersuchungen im Kapitels 6.1 orientieren sich weiterhin am 95% Quantil der jeweiligen Messgrößen.

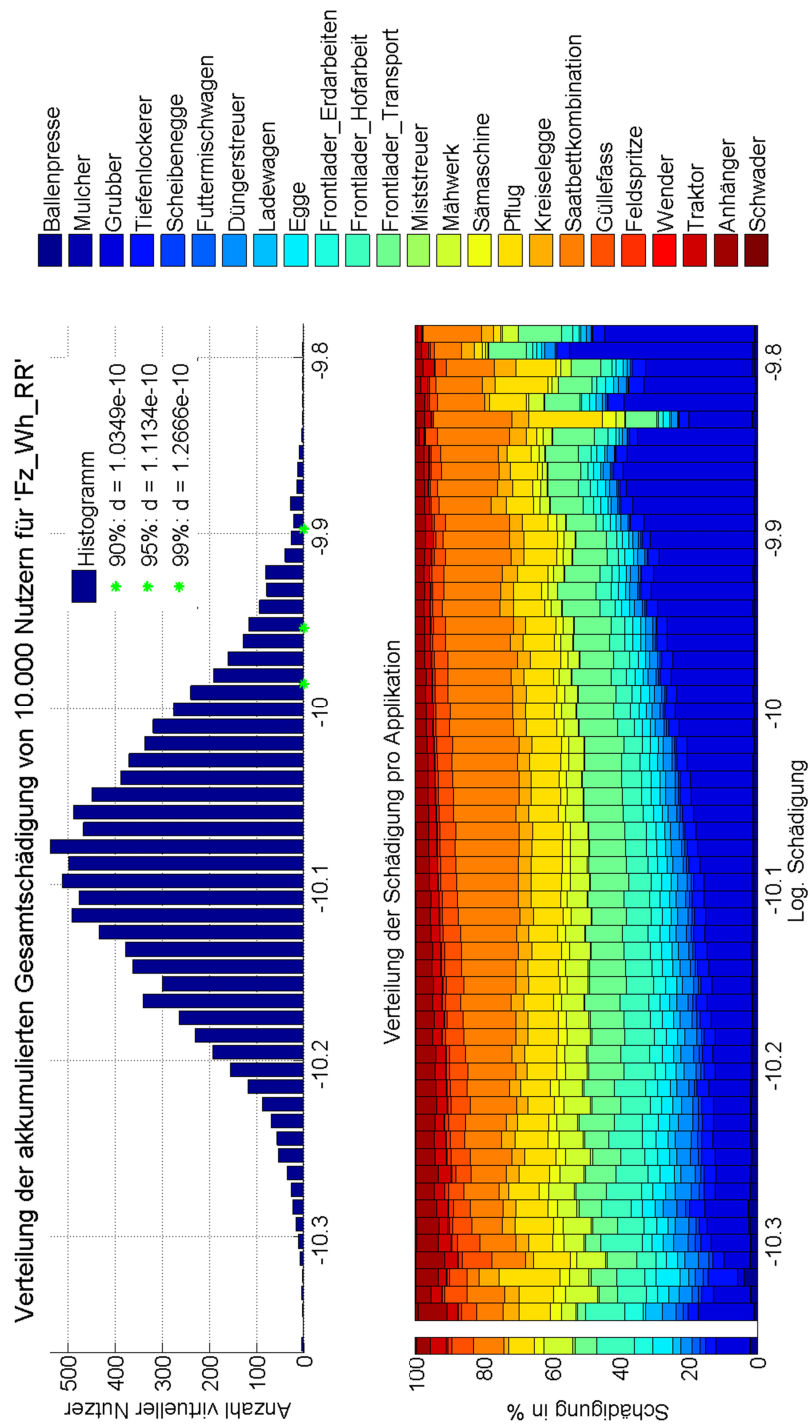


Abbildung 6-4: Nutzungssimulation mittels U-Sim für die Vertikalkraft am rechten Hinterrad (Fz\_Wh\_RR) des Segments „Mischbetrieb“

In der folgenden Abbildung 6-5 sind die Ergebnisse der Nutzungssimulation der einzelnen Segmente und der Gesamtpopulation in Form des 95% Quantils gegenübergestellt. Die Gesamtpopulation besteht dabei anteilig aus den drei beschriebenen Segmenten. Die Auswertung erfolgt an charakteristischen Lasteinleitungspunkten der Fahrzeugstruktur wie auf der X-Achse dargestellt. Zur besseren Vergleichbarkeit der Segmente untereinander wurde die Schädigungssumme des 95% Quantils der einzelnen Nutzersegmente auf die Schädigungssumme der Gesamtpopulation normiert.

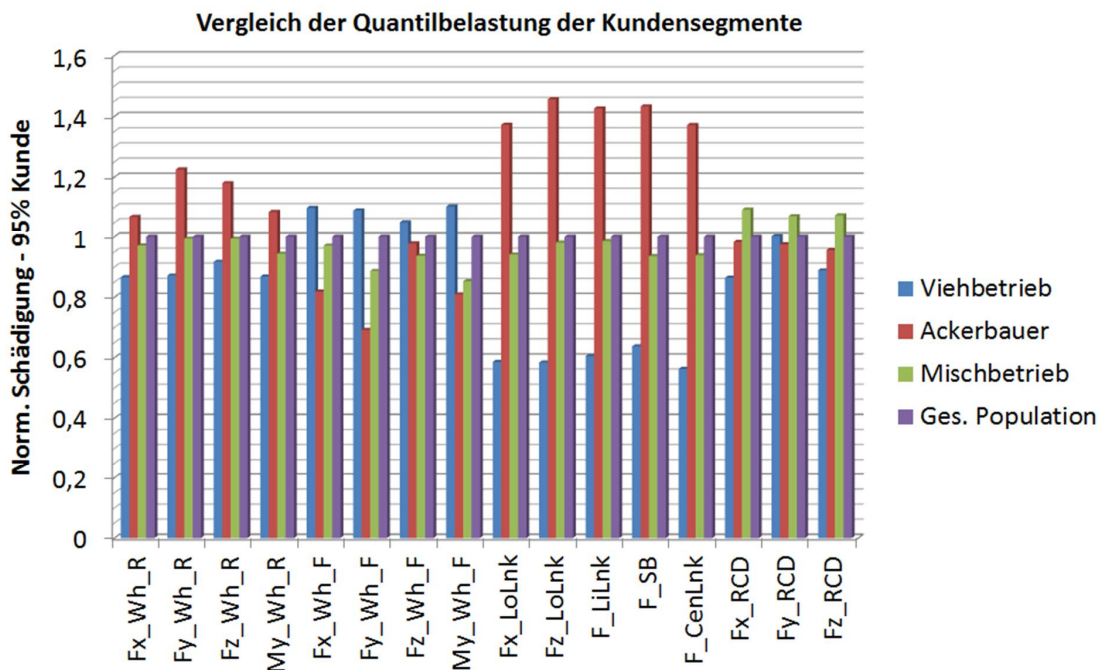


Abbildung 6-5: Vergleich der normierten 95% Quantile der Kundensegmente für charakteristische Beobachtungspunkte am Versuchsfahrzeug

Die dargestellten Ergebnisse sind für die wirkenden Radlasten an Vorder- und Hinterachse, sowie für Komponenten des Heckkrafthebers und den hinteren Koppelpunkt ausgewertet. An den Achsen werden jeweils die auftretenden Kräfte in Längs-, Quer- und Vertikalrichtung ( $F_{x,y,z\_Wh\_R,F}$ ) und das wirkende Raddrehmoment ( $My\_Wh\_R,F$ ) betrachtet. Am Kraftheber werden die eingeleiteten Längs- und Vertikalkräfte am Unterlenker ( $F_{x,z\_LoLnk}$ ) ausgewertet, sowie die Kräfte an Hubstreben ( $F\_LiLnk$ ), Stabilisierungsstreben ( $F\_SB$ ) und am Oberlenker ( $F\_CenLnk$ ). Weiterhin werden die eingeleiteten Längs-, Quer- und Vertikalkräfte der Anhängervorrichtung ( $F_{x,y,z\_RCD}$ ) betrachtet. Abhängig von den Messgrößen sind große Unterschiede in

der Schädigungssumme über die jeweiligen Segmente feststellbar. Bei Betrachtung der Kräfte am Hinterrad betragen die Unterschiede beim Schädigungsniveau zwischen Viehbetrieb und Ackerbauer beispielsweise bis zu 40% für die Quer- und die Vertikalkraft. Wird die Abweichung der Schädigungssumme dieser Messgrößen in Last ausgedrückt, entspricht dies einer Differenz der Lastamplitude von bis zu 7%. Das hohe Lastniveau der Ackerbauern ist dem hohen Anteil an Feldarbeit geschuldet, dabei werden häufig hohe Längs- und Vertikallasten an der Hinterachse erzeugt. Ein ähnliches Bild stellt sich bei Untersuchung des Heckkrafthebers dar, abhängig von der Messgröße beträgt die Abweichung zwischen den einzelnen Segmenten bis zu 80% in Schädigung. Im Vergleich zur Hinterachse verhält sich die Vorderachse jedoch divergent, denn hier werden die größten Gesamtschädigungen durch die Viehbetriebe erzeugt. Dies hängt vor allem mit dem hohen Anteil an Frontladerarbeiten zusammen, welche die Vorderachse stark belasten. Der Schädigungsunterschied beträgt abhängig von der Raumrichtung ebenfalls bis zu 40%. Die Belastungen der Anhängervorrichtung zeigen die geringsten Lastunterschiede, hier liegen die größten Schädigungssummen im Bereich der Mischbetriebe. Abhängig von der Bauteilfunktion im Fahrzeug, der angestrebten Ausfallrate und der Auslegungsphilosophie des Herstellers ist nun abzuwägen, ob sich die Auslegung an der größten Belastung einzelner Nutzersegmente oder an der Gesamtpopulation orientiert. Auslegungsgrundlagen für Bauteile der Fahrzeugstruktur sollten sich am kritischsten Lastniveau orientieren. Für Baugruppen, welche leicht ersetzbar sind und bei denen ein Ausfall keine besonderen Folgeschäden oder -kosten erzwingt, ist sicherlich nicht zwingend nach der kritischsten Belastung eines Nutzersegments auszulegen. Hier besteht die Möglichkeit sich am Lastniveau der Gesamtpopulation zu orientieren und die Mehrzahl der Kunden nicht durch Überdimensionierung finanziell zu belasten. Die Vorgehensweise erlaubt somit detaillierte Studien zur Belastungstreuung innerhalb einer Nutzerpopulation und die Veranschaulichung der Fahrzeugauslastung durch die verschiedenen Nutzersegmente. Das Verständnis der erzeugten Lasten im Nutzungsbetrieb schafft eine verbesserte Beurteilungsgrundlage der Bauteillebensdauer. Weiterhin ermöglicht das Verfahren die Beurteilung inwieweit Bauteile marktspezifisch einsetzbar sind, beziehungsweise ob durch Anpassung von Prüfprozeduren Kostenreduzierungspotentiale vorhanden sind.

Die Ergebnisse des 95% Quantils beschreiben somit die kritischste Kombination der Lastfälle für die einzelnen Messgrößen. Auf Basis der Kombination der Lastmessungen hinter dem 95% Quantil des ausgewählten Nutzersegments erfolgt die bauteilspezifische Ableitung von repräsentativen Lastkollektiven, da U-Sim die Abmischung der Lastmessungen für die simulierten Nutzer bereitstellt.

## 6.2. Ableitung von Lastkollektiven

Die Dimensionierung nach den Methoden der Betriebsfestigkeit orientiert sich an den ermittelten Lastkollektiven eines Fahrzeugs im Nutzungsbetrieb. Im vorliegenden Fall orientieren sich die abgeleiteten Lastkollektive an der höchsten Gesamtschädigung des 95% Quantils der jeweiligen Nutzersegmente. Für die Belastungen an der Hinterachse bedeutet dies, dass sich die Lastkollektive für die Längs- ( $F_{x\_Wh\_R}$ ), Quer- ( $F_{y\_Wh\_R}$ ) und Vertikalkraft ( $F_{z\_Wh\_R}$ ) auf das 95% Quantil der Betriebsform „Ackerbauer“ beziehen. Zur Kollektivbildung werden die ermittelten Lasten des linken und rechten Hinterrades zu einem Gesamtkollektiv verarbeitet. Abbildung 6-6 zeigt die normierte Lastamplitude über der Anzahl der Lastwechsel. Die aufgetragenen Kollektive sind auf die statische Radlast der Fahrzeughinterachse normiert und auf 10.000 Arbeitsstunden extrapoliert. Die größten Belastungen werden in vertikaler Richtung erzeugt, mit Belastungen bis zum 2,2-fachen der statischen Radlast. Die ermittelten Längskräfte liegen unterhalb der Vertikallasten, wobei Belastungen bis zum 1,8-fachen der statischen Radlast erreicht werden. Deutlich darunter liegen die Querkräfte, hier werden lediglich Kräfte bis zum 1,3-fachen der statischen Radlast erreicht.

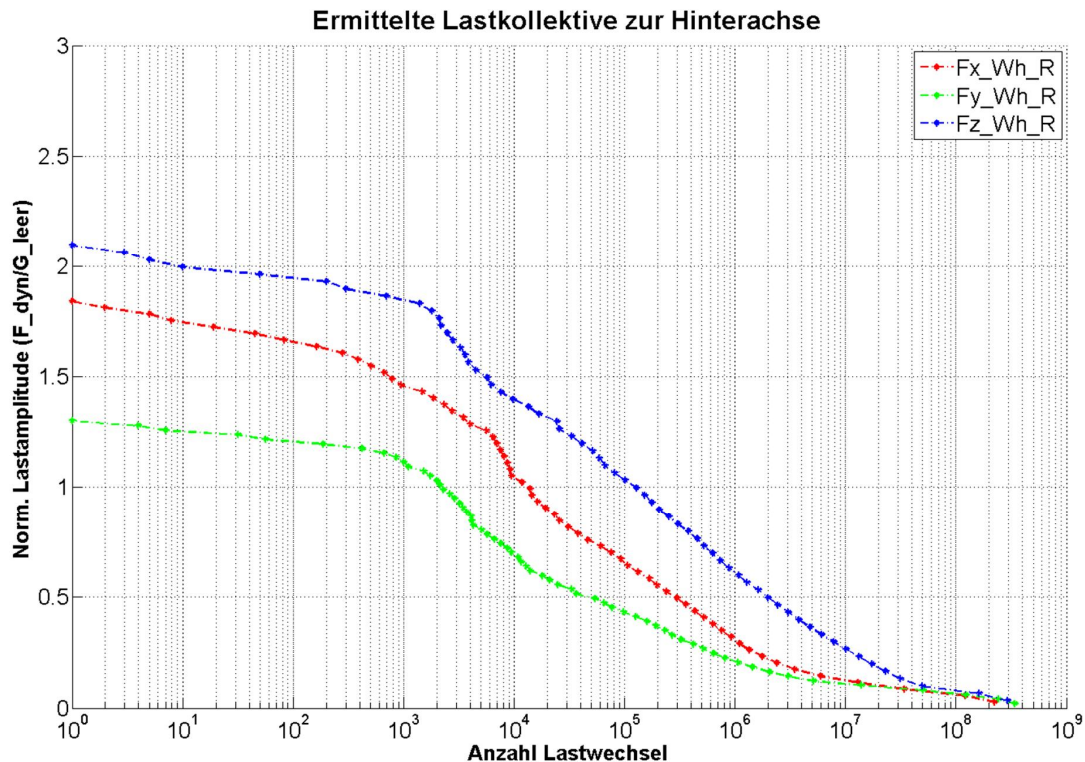


Abbildung 6-6: Gesamtlastkollektiv der Hinterachse für Längs-, Quer- und Vertikalkraft, Bezugsgröße: Radlast leer (23,6 kN), dargestellt für 10.000 h, erzeugt aus der Abmischung der Lastfälle des 95% Quantils des Segments „Ackerbauer“

Die ermittelten Lastkollektive der Vorderachse orientieren sich am 95% Quantil des Nutzersegments „Viehbetrieb“. Zur Kollektivbildung werden die gemittelten Lasten des linken und rechten Vorderrades zu einem Gesamtkollektiv verarbeitet. Die Radkräfte wurden im Koordinatensystem der Achsschenkel erfasst. Durch Lenkbewegungen verdreht sich das Koordinatensystem entsprechend räumlich. Durch die Korrektur des Lenkwinkels und unter Berücksichtigung der Achsgeometrie wurden die Kräfte auf das Fahrzeugkoordinatensystem transformiert. Abbildung 6-7 zeigt die normierte Lastamplitude über der Anzahl der Lastwechsel. Die Kollektive sind auf die statische Radlast der Vorderachse normiert und für 10.000 Arbeitsstunden dargestellt. Die höchsten Belastungen werden ebenfalls in vertikaler Richtung festgestellt. Maximal ergeben sich Belastungen bis zum 2,7-fachen der statischen Radlast. Die ermittelten Längskräfte liegen im gesamten Häufigkeitsbereich unterhalb der Vertikallasten, wobei

Belastungen bis zum 2,4-fachen der statischen Radlast erreicht werden. Deutlich geringer sind die Querkräfte anzusehen, hier werden lediglich Kräfte erreicht die maximal der statischen Radlast entsprechen.

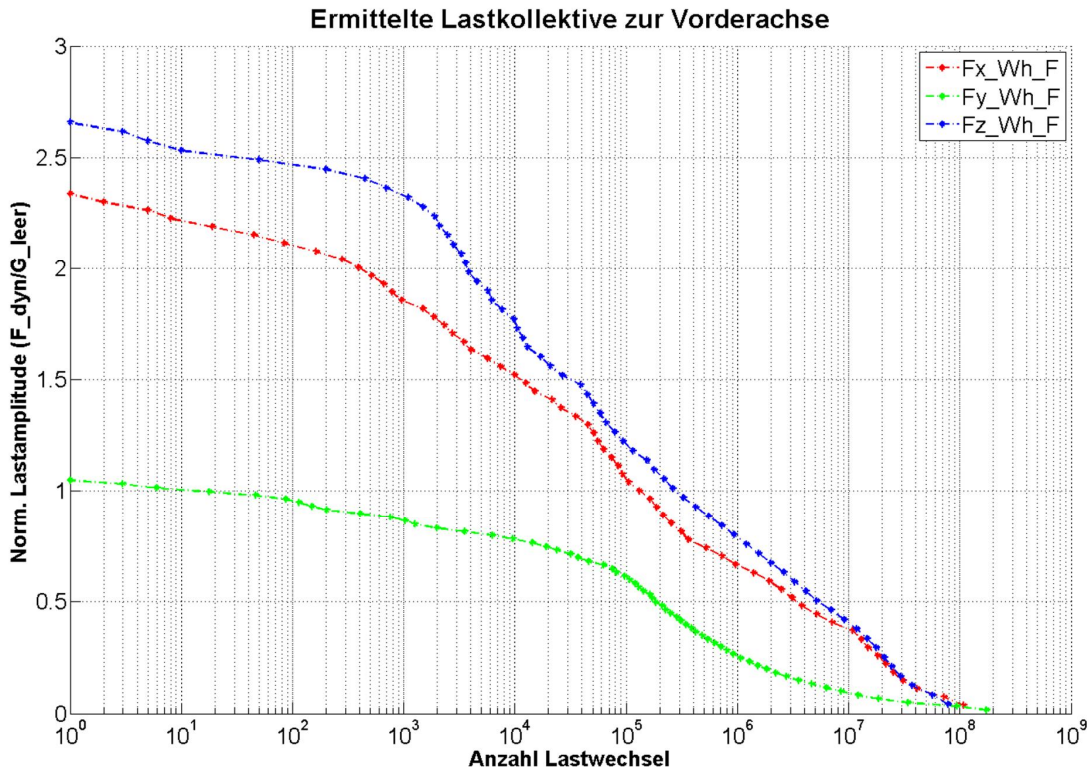


Abbildung 6-7: Gesamtlastkollektiv der Vorderachse für Längs-, Quer- und Vertikal- kraft, Bezugsgröße: Radlast leer (18,5 kN), dargestellt für 10.000 h, erzeugt aus der Abmischung der Lastfälle des 95% Quantil des Segments „Viehbetrieb“

Die ermittelten Lastkollektive der Komponenten des Heckkrafthebers orientieren sich am 95% Quantil des Nutzersegments „Ackerbauer“. Abbildung 6-8 zeigt die normierte Lastamplitude über der Anzahl der Lastwechsel. Die Kollektive sind auf die durchgehende Hubkraft des Heckkrafthebers normiert und für 10.000 Arbeitsstunden dargestellt. Die durchgehende Hubkraft entspricht der geringsten Kraft auf der Hubkurve des Krafthebers bei einem entsprechenden Schwerpunktabstand. Die größten Belastungen werden am Oberlenker ( $F_{CenLnk\_R}$ ) erzeugt. Maximal ergeben sich Belastungen bis zum 2,5-fachen der statischen Last. Die ermittelten Kräfte der übrigen Komponenten des Krafthebers liegen deutlich darunter. Dargestellt sind die Lastkollektive für die Längskraft am Unterlenker ( $F_{x\_LoLnk\_R}$ ), für die Hubstreben ( $F_{LiLnk\_R}$ ) und die



Stabilisierungsstreben (F\_SB\_R) am Kraftheber. Zur Kollektivbildung werden die gemittelten Lasten der linken und rechten Komponenten zu einem Gesamtkollektiv verarbeitet.

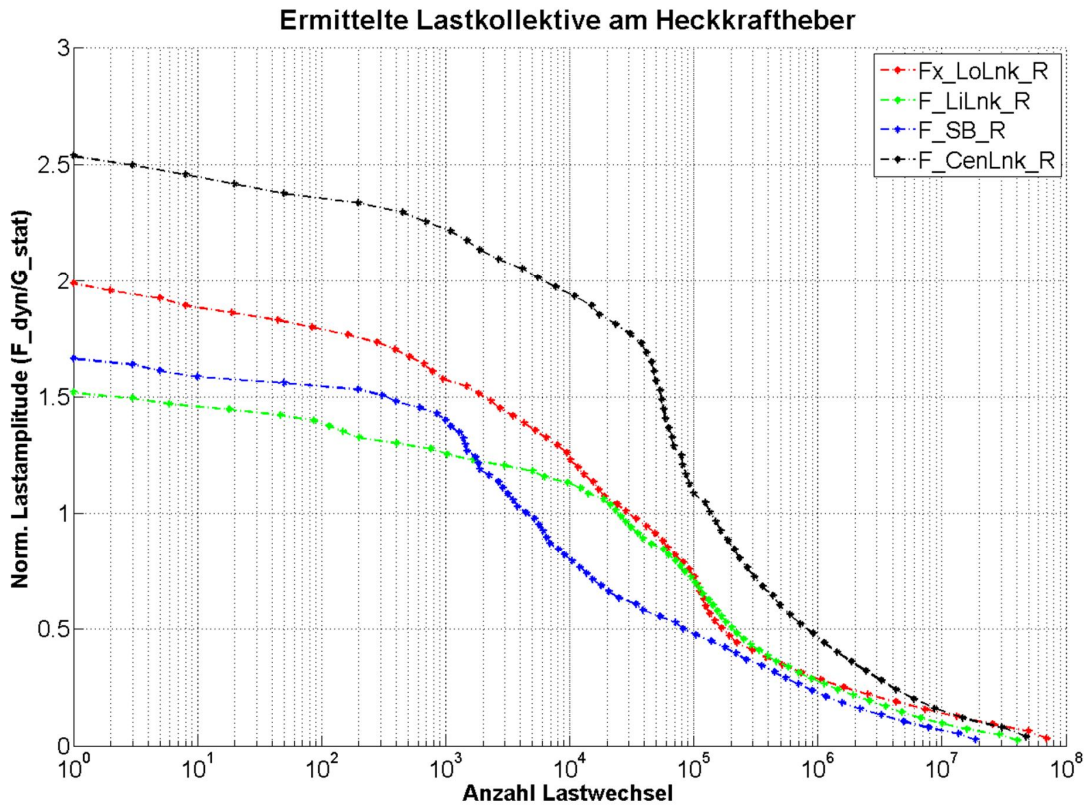


Abbildung 6-8: Gesamlastkollektiv für Komponenten des Heckkrafthebers, Bezugsgröße: durchgehende Hubkraft (47 kN), dargestellt für 10.000 h, erzeugt aus der Abmischung der Lastfälle des 95% Quantils des Segments „Ackerbauer“

### 6.3. Anwendungsbeispiel

Die Dimensionierung von Bauteilen mit Sicherheitsfunktion wie beispielsweise der Hinterachswelle erfordert die genaue Kenntnis der im Nutzungsbetrieb erzeugten Bauteilbelastungen. Die Ausfallsicherheit dieser Bauteile ist durch strenge Prüfprozeduren nachzuweisen, um schwerwiegende Unfälle zu vermeiden. Ein für die Welle besonders kritischer Lastfall stellt die Biegeumlaufbelastung im Bereich des äußeren Achswellenlagers dar. Die umlaufende Biegebelastung der Welle am äußeren Lager entsteht beispielsweise durch einwirkende Längs- und Vertikalkräfte während des Radumlaufs. In diesem Bereich wird die durch das Rad eingeleitete Last an der Welle abgestützt und

induziert abhängig vom Anwendungsfall hohe Biegebeanspruchungen. Entstehen in diesem Bereich der Welle Brüche während des Fahrbetriebs, kann dies zum Verlust des Rades führen und schwere Unfälle auslösen. Zur betriebsfesten Auslegung der Welle ist die Kenntnis der auftretenden Belastungen von entscheidender Bedeutung. Abbildung 6-9 veranschaulicht die Position der Welle und des äußeren Lagers im Zusammenbau der Hinterachse.

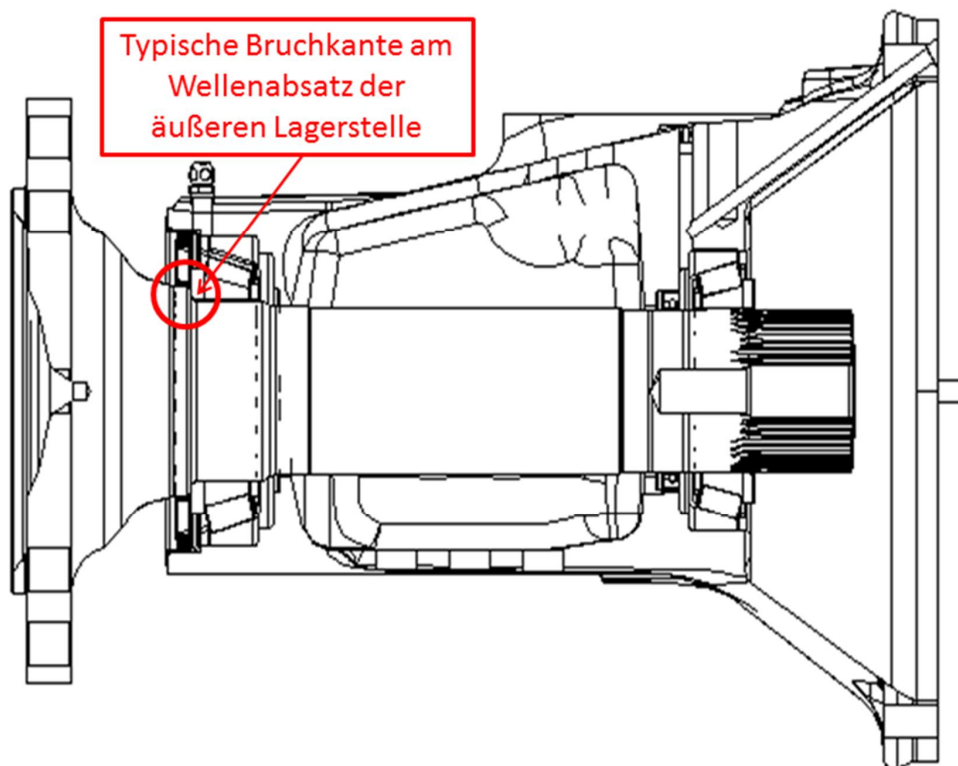


Abbildung 6-9: Schnittdarstellung der Welle und der Lagerung im Hinterachsgehäuse

Mit den gemessenen Eingangsbelastungen am Radflansch der Hinterachse erfolgt die Berechnung der wirkenden Biegebeanspruchungen im Bereich des Wellenabsatzes der äußeren Lagerung. Zur Berechnung des Biegemoments werden zunächst die gemessenen Eingangslasten am Achsflansch genutzt:

- Rotierende Längskraft am Radflansch ( $F_{rx_{Wh}}$ )
- Rotierende Vertikalkraft am Radflansch ( $F_{rz_{Wh}}$ )
- Rotierendes Moment um die Fahrzeuglängsachse am Radflansch ( $M_{rx_{Wh}}$ )

- Rotierendes Moment um die Fahrzeughochachse am Radflansch ( $M_{rz_{Wh}}$ )

Da die Welle ein rotierendes System ist, werden die Eingangsbelastungen durch den Radkraftaufnehmer ebenfalls im rotatorischen Koordinatensystem aufgezeichnet. Aus Gründen der Vereinfachung bleiben die gemessenen Querkräfte und Antriebsmomente unberücksichtigt. Aufgrund der Dimensionen der Achswelle sind die wirkenden Kräfte zur Fahrzeugquerachse im Vergleich zu Längs- und Vertikalkräften vernachlässigbar klein. Weiterhin sind nur die erzeugten Normalspannungen im Bereich des Wellenabsatzes von Interesse und die durch das Antriebsmoment erzeugten Schubspannungen bleiben unberücksichtigt. Da die gemessenen Eingangslasten auf einer ausführlichen Messkampagne basieren, ist davon auszugehen dass die auftretenden Biegebeanspruchungen über den Umfang der Welle nahezu gleich verteilt sind. Zur Überprüfung wird die Biegespannung jedoch für acht gleichmäßig verteilte Positionen am Umfang des Wellenabsatzes betrachtet. Bei sehr kurzen Messungen besteht durchaus die Gefahr, dass eine bestimmte Position am Radumfang höher belastet ist (z. B.: einmaliges Durchfahren eines Schlaglochs). Wird lediglich eine Position am Wellenumfang ausgewertet, könnte das zu Fehleinschätzungen der maximalen Beanspruchung führen.

### **Berechnungsvorschrift:**

Wirkendes Biegemoment bezogen auf den Umfang des Wellenabsatzes (Bezeichnungen siehe Abbildung 6-10) berechnet aus den gemessenen Kräften und Momenten des Radkraftaufnehmers im rotierenden Koordinatensystem:

$$M_B(\alpha) = (M_{rz_{Wh}} + h * F_{rx_{Wh}}) * \cos(\alpha) + (-M_{rx_{Wh}} + h * F_{rz_{Wh}}) * \sin(\alpha) \quad (6-1)$$

Hebelarm von Lastangriffspunkt zum äußeren Wellenlager:

$$h = a + b = 113 \text{ mm} + 122 \text{ mm} = 235 \text{ mm} \quad (6-2)$$

Die angegebenen Hebelverhältnisse entsprechen der größten Rad/ Reifen- Kombination für dieses Fahrzeug. Damit können die aufgezeichneten Lasten des zwischen Radnabe und Felge positionierten Radkraftaufnehmers direkt verwendet werden. Der Durchmesser der Welle am Lagersitz des Versuchsfahrzeugs beträgt 92 mm. Der Durchmesser  $d$  wird zur Berechnung des Widerstandsmoments am Lagersitz der Welle benötigt.

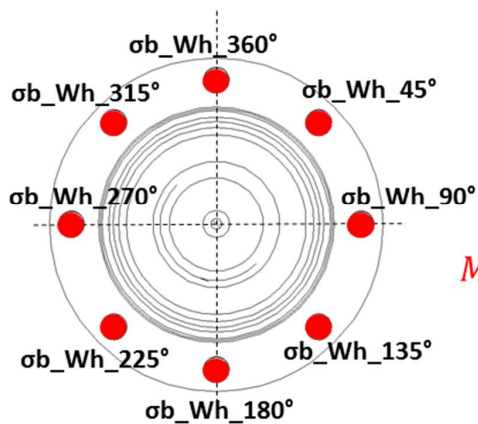
Widerstandsbiegemoment:

$$W_B = \frac{\pi d^3}{32} = \frac{\pi * (92 \text{ mm})^3}{32} = 76447,5 \text{ mm}^3 \quad (6-3)$$

Biegespannung:

$$\sigma_B(\alpha) = \frac{M_B(\alpha)}{W_B} \quad \left[ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right] \quad (6-4)$$

xz-Ebene:



yz-Ebene:

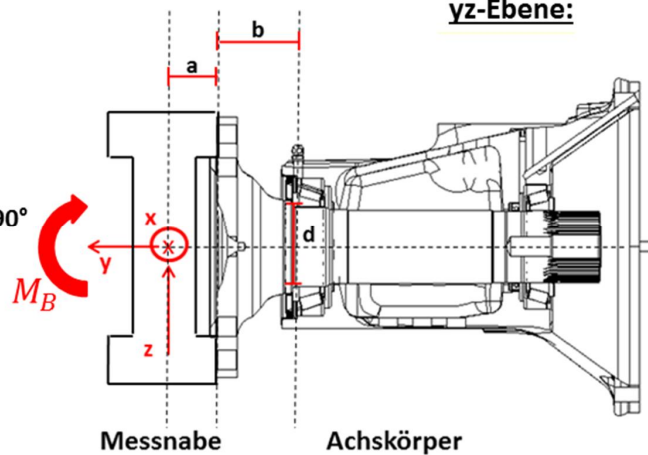


Abbildung 6-10: Ausgewählte Beobachtungspunkte am Umfang des Radflanschs zur Berechnung der erzeugten Biegebeanspruchung am Wellenabsatzes in Verbindung mit den gemessenen Eingangslasten am Radkraftaufnehmer

Mit jeder Radumdrehung wird ein Lastwechsel am Lagersitz des Wellenabsatzes erzeugt, abhängig von der jeweiligen Anwendung variieren die Belastungen stark. Besonders der Transport von Arbeitsgeräten am Heckkraftheber und schwere Zugarbeiten im Feld erzeugen hohe Biegebeanspruchungen. In Tabelle 6-1 ist eine Übersicht der berechneten Maximal- und Minimalwerte der Biegespannung über alle Punkte am Umfang der Welle dargestellt. Die Auswertung erfolgte für ausgewählte Lastfälle innerhalb der Messkampagne.

Tabelle 6-1: Vergleich der maximalen und minimalen Biegebeanspruchungen im Bereich des äußeren Lagersitzes der Welle bei charakteristischen Arbeitseinsätzen

<b>Arbeitsgerät</b>	<b>Einsatzbereich</b>	<b>Maximale Biegespannung [N/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>Minimale Biegespannung [N/mm<sup>2</sup>]</b>
Saatbett- kombination	Transport	306	-300,3
Tiefenlockerer	Feldarbeit	279,2	-295,1
Grubber	Feldarbeit	201	-216,5
Pflug	Feldarbeit	204,1	-211,4
Mähwerk	Wiese mähen	220,2	-212,1
Güllefass	Transport	190,1	-200,7
Frontlader	Misten	158,7	-242,4

Die aus den Zeitreihendaten am Radflansch berechneten BZF der Biegespannungen am Wellenabsatz werden mittels Rainflow-Klassierung in den Häufigkeitsbereich überführt. Die Ergebnisse der Rainflow-Zählung werden mittels Gleichung (2-16) in Pseudo-Schädigungszahlen überführt und als Eingangsdaten für die Nutzungssimulation im Programm U-Sim bereitgestellt. Die Berechnung der Pseudo-Schädigungszahlen erfolgt unter Berücksichtigung der Materialspezifikationen der Welle. Das Grundmaterial der Welle ist bohrlegierter Vergütungsstahl 15B37 nach ASTM A304-11 [46]. Die Streckgrenze des Grundmaterials liegt bei  $R_e = 790 \text{ N/mm}^2$ . Die Steigung der Bauteil-Wöhlerlinie im Zeitfestigkeitsbereich wird basierend auf Erfahrungen früherer Bauteiluntersuchungen des Projektpartners mit  $k = -7$  angenommen und die Grenze gegen statisches Versagen bei Biegebeanspruchung liegt bei  $S_e = 1250 \text{ N/mm}^2$ . Innerhalb der Nutzungssimulation wird eine definierte Anzahl virtueller Nutzer auf Basis des Nutzungsmodells aus Kapitel 5.6 berechnet. Die berechneten Gesamtschädigungen der einzelnen Nutzer beschreiben die Beanspruchungsverteilung der Nutzerpopulation und abhängig davon erfolgt die Bestimmung des Referenznutzers (99% Quantil).

Aufgrund der Sicherheitsfunktion der Welle ist eine hohe Ausfallsicherheit gefordert, somit werden alle Betriebsformen getrennt betrachtet. Da in keinem Segment Ausfälle zulässig sind, orientiert sich die Dimensionierung des Bauteils an der kritischsten Kombination der Lastfälle im Nutzungsbetrieb. Für die einzelnen Betriebsformen werden jeweils 10.000 Nutzer simuliert und der 99% Nutzer betrachtet. Abbildung 6-11 beschreibt den Vergleich der akkumulierten Gesamtschädigung des 95% und des 99% Quantils über der Auswahl der Beobachtungspunkte am Radumfang. Die jeweiligen Betriebsformen sind farblich differenziert für die aufgetragenen Messgrößen dargestellt.

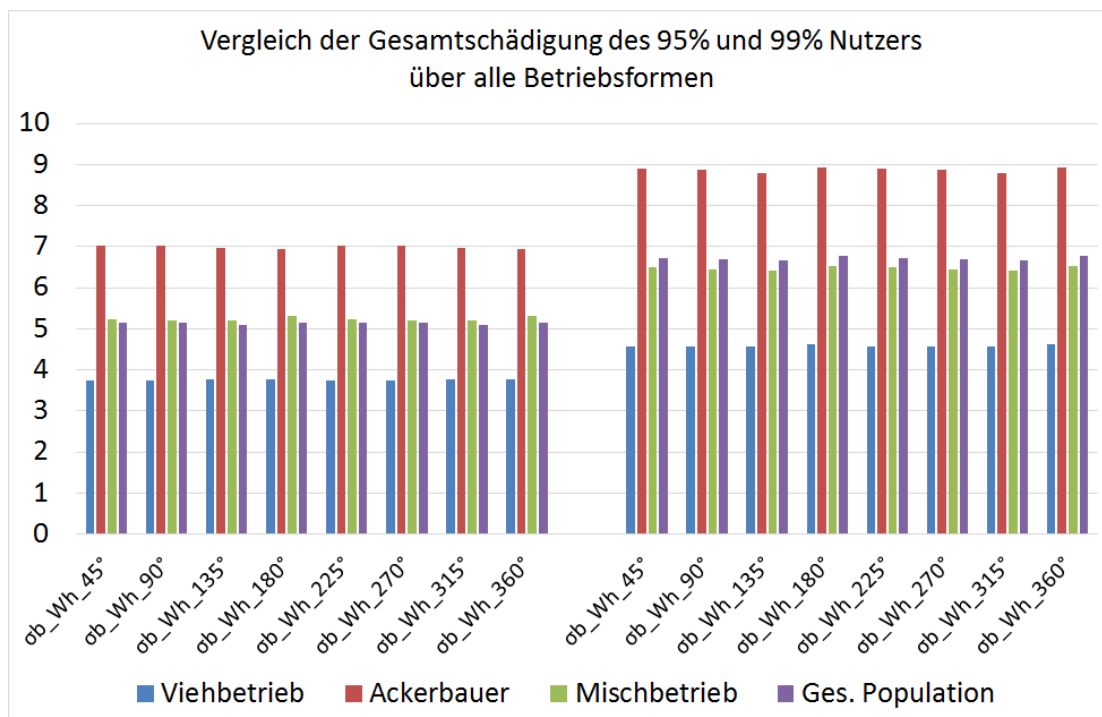


Abbildung 6-11: Vergleich der akkumulierten Gesamtschädigung des 95% und 99% Nutzers über alle Betriebsformen an den berechneten Beobachtungspunkten des Wellenabsatzes.

Der Vergleich zeigt zunächst, dass die akkumulierte Gesamtschädigung der einzelnen Beobachtungspunkte über den Umfang des Wellenabsatzes innerhalb einer Betriebsform auf dem gleichen Niveau liegt. Die Ermittlung der Prüfspezifikation ist damit unabhängig von der Auswahl des Beobachtungspunktes am Umfang der Welle. Die ermittelten Gesamtschädigungen des 99% Nutzers zeigen im Mittel 30% höhere Schädigungen im Vergleich zum 95% Nutzer innerhalb der einzelnen Betriebsformen.

Beim Vergleich der Gesamtschädigung des 99% Nutzers über die einzelnen Betriebsformen sind nochmals deutliche Unterschiede zu erkennen. Die höchsten Beanspruchungen werden durch die „Ackerbauern“ erzeugt. Die Gesamtschädigung der Ackerbauern entspricht dem 1,3-fachen der Mischbetriebe und ist doppelt so hoch wie bei den Viehbetrieben. In der Gesamtpopulation stellt die Gruppe der Ackerbauern mit 10% den geringsten Anteil dar, trotzdem sollte sich die Auslegung der sicherheitsrelevanten Bauteile an der kritischsten Beanspruchung im Nutzungsbetrieb orientieren. Aus diesem Grund erfolgen alle weiteren Betrachtungen auf Basis der Gesamtschädigung des 99% Quantils der Ackerbauern. Zusätzlich zur ermittelten Gesamtschädigung im Nutzungsbetrieb wird noch eine Sonderlast berücksichtigt. Der beschriebene Lastfall kombiniert die maximal mögliche Längs- und Vertikalkraft, welche gleichzeitig an der Hinterachse wirken. Dabei wird davon ausgegangen, dass die gesamte Fahrzeugmasse auf der Hinterachse lastet und zusätzlich die maximale Antriebsleistung wirksam wird. Im Grenzfall wird angenommen, dass diese Last alle 10 Arbeitsstunden einmal auftritt. Bei einem Auslegungsziel von 10.000 Betriebsstunden ergibt das 1.000 zusätzliche Lastwechsel, welche zur Gesamtschädigung des ausgewählten Referenzkunden addiert werden.

### **Berechnungsvorschrift:**

Maximale Vertikalkraft pro Hinterrad:

$$F_z = \frac{1}{2} * m_{Traktor} * g = \frac{1}{2} * 11.300 \text{ kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 55.426,5 \text{ N} \quad (6-5)$$

Maximal übertragbare Längskraft:

$$\mu = 0,8 \text{ (für Asphalt)} \quad (6-6)$$

$$F_x = \mu * F_z = 0,8 * 55.426,5 \text{ N} = 44.341,2 \text{ N} \quad (6-7)$$

Resultierendes Biegemoment:

$$\begin{aligned} M_{B\_Grenzfall} &= f_{dyn} * \sqrt{F_x^2 + F_z^2} * h \\ &= 1,5 * \sqrt{44.341,2^2 + 55.426,5^2} \text{ N} * 235 \text{ mm} \\ &= 25.020.645 \text{ Nmm} \end{aligned} \quad (6-8)$$

Resultierende Spannungsamplitude durch Biegung:

$$\sigma_{B\_Grenzfall} = \frac{M_{B\_Grenzfall}}{W_B} = \frac{25.020.645 \text{ Nmm}}{76.447,5 \text{ mm}^3} = 327,3 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (6-9)$$

Zusätzlich dazu, entsteht durch die wirkende Längskraft  $F_x$  am Reifen und den Hebelarm zum Achsflansch  $r_{Wh\_R}$  eine Torsionsspannung  $\tau$  an der Welle. Wie bereits erwähnt, bleiben die durch Torsionsbeanspruchung induzierten Schubspannungen an der Welle unberücksichtigt. Zur Vollständigkeit wird die Berechnung der Torsionsbeanspruchung angegeben, jedoch nicht für die weiteren Berechnungsschritte berücksichtigt.

Torsionswiderstandsmoment:

$$W_\tau = \frac{\pi d^3}{16} = \frac{\pi + (92 \text{ mm})^3}{16} = 152895,1 \text{ mm}^3 \quad (6-10)$$

Resultierendes Torsionsmoment:

$$\begin{aligned} M_{\tau\_Grenzfall} &= r_{Wh\_R} * F_x = 925 \text{ mm} * 44.341,2 \text{ N} * \\ &= 41.015.610 \text{ Nmm} \end{aligned} \quad (6-11)$$

Resultierende Spannungsamplitude durch Torsion:

$$\sigma_{\tau\_Grenzfall} = \frac{M_{\tau\_Grenzfall}}{W_B} = \frac{41.015.610 \text{ Nmm}}{152895,1 \text{ mm}^3} = 268,3 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (6-12)$$

Pseudo-Schädigungssumme aus Grenzlastbetrachtung:

$$D_{Grenzlast} = n_i * \left( \frac{\sigma_{B\_Grenzfall}}{S_e} \right)^k = 1000 * \left( \frac{327,3 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{1250 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} \right)^7 = 0,084 \quad (6-13)$$

### **Ableitung Testspezifikation:**

Gesamtschädigung des Referenznutzers inklusive Sonderlasten:

$$D = D_{99\% \text{ Nutzer}} + D_{Grenzlast} = 8,92 + 0,084 = 9,04 \quad (6-14)$$

Eine generelle Vorgehensweise zur Prüfung der Tragfähigkeit der Welle gegen Ermüdungsbruch ist in der DIN 743-4 [47] beschrieben. In der DIN 743-4 steht die Streuung des Beanspruchungskollektivs und der Bauteilfestigkeit jedoch nicht im Vordergrund. Aus diesem Grund wird die Prüfspezifikation nach der in Kapitel 2.1 beschriebenen Vorgehensweise des VDA [16] bestimmt. Abhängig von der Bauteilfestigkeit (Lage T



und Verteilungsform  $\beta$ ), der angestrebten Ausfallrate  $\gamma$  und dem Stichprobenumfang  $N$  erfolgt die Ermittlung der Prüfdauer nach den Gleichungen (2-22) bis (2-26). Da die Welle eine Sicherheitsfunktion im Fahrzeug erfüllt, wird eine Ausfallrate von maximal 100 ppm bezogen auf die Bauteilpopulation gefordert ( $\gamma = 0,01\%$ ). Die Bauteilfestigkeit wird durch eine Weibullverteilung mit dem Formparameter  $\beta = 3,5$  beschrieben. Diese Daten entsprechen Versuchsergebnissen früherer materialgleicher Bauteile. Die Ziel Lebensdauer ist mit einer Zuverlässigkeit von  $R = 99\%$  (Signifikanz  $\alpha = 1\%$ ) und einem Stichprobenumfang von fünf Bauteilen abzusichern. Die Bauteilprüfung gilt als positiv abgeschlossen, wenn alle fünf Bauteile die Prüfdauer erreichen (Success-Run). Abbildung 6-12 zeigt die Wahrscheinlichkeitsdichte der Beanspruchungs- und der Festigkeitsverteilung über der logarithmierten Schädigungssumme. Die rot gekennzeichnete Verteilung beschreibt die ermittelte Bauteilbeanspruchung bezogen auf die Fahrzeuglebensdauer für 10.000 virtuelle Nutzer des Segments „Ackerbauern“. Die rot eingezeichnete Linie beschreibt die Lage des Schädigungsniveaus des Auslegungsnutzers (99% Quantil). Die grüne Kurve beschreibt die notwendige Festigkeitsverteilung der Welle bezogen auf den gegebenen Formparameters  $\beta$  und zeigt die Lage der Auslegungsfestigkeit (1% Festigkeit) bezogen auf die angestrebte Ausfallrate  $\gamma$ . Je kleiner die geforderte Ausfallrate ist, desto weiter rechts muss der Lageparameter  $T$  der Festigkeitsverteilung liegen. Die Lage der berechneten Prüfdauer für einen Stichprobenumfang von fünf Bauteilen ist durch die schwarze Linie gezeigt.

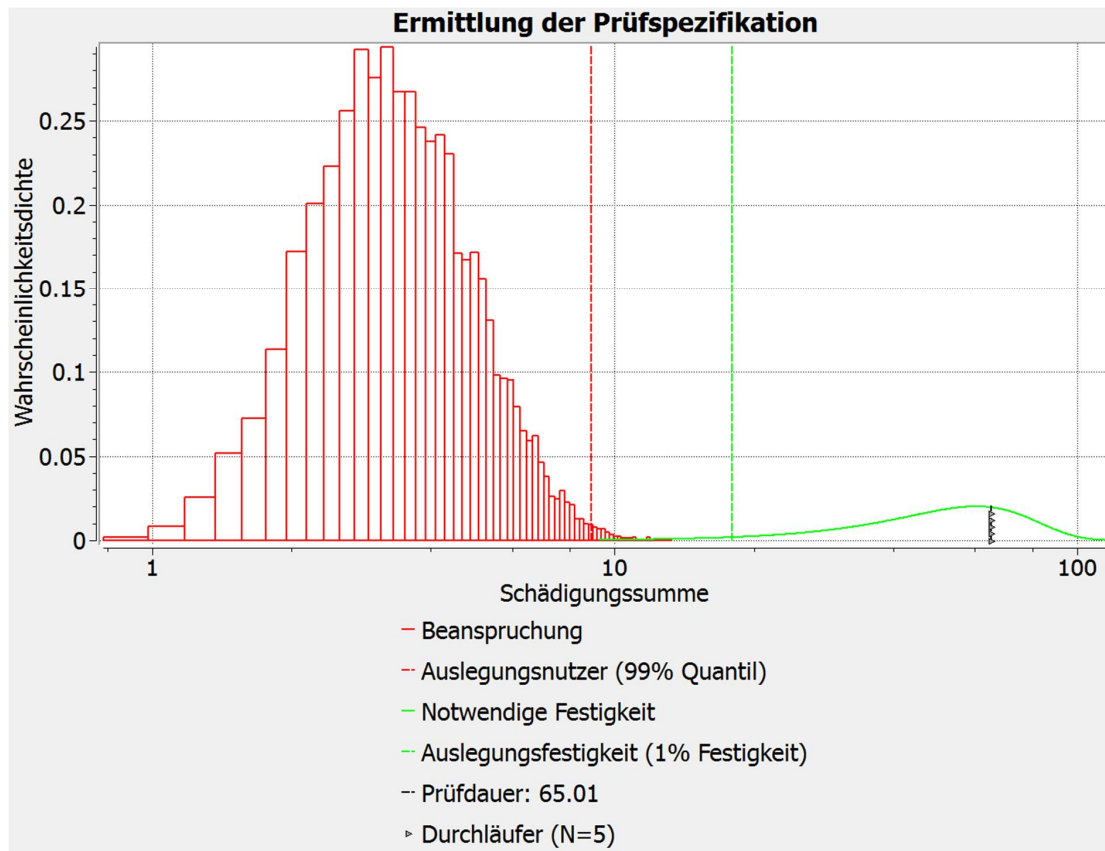


Abbildung 6-12: Ermittlung der Prüfspezifikation auf Basis von Bauteilbeanspruchung und –festigkeit in Bezug auf die gewünschte Ausfallrate

Wie in Abbildung 6-12 dargestellt, bestimmt sich die Schädigungssumme der Auslegungsfestigkeit zu  $q_0 = 17,91$ . Das Lebensdauererhältnis  $L_v$  und die Prüfdauer  $L$  berechnen sich nach den Gleichungen (2-23) und (2-26) aus Kapitel 2.1.

$$L_v \geq \sqrt[\beta]{\frac{\log \alpha}{\log R * N}} = \sqrt[3,5]{\frac{\log(0,01)}{(\log(0,99) * 5)}} = 3,63 \quad (6-15)$$

$$L = L_v * q_0 = 3,63 * 17,91 = 65,01 \quad (6-16)$$

Auf Basis der Schädigungssumme der Prüfdauer erfolgt die Ableitung der Prüflast, welche an einem entsprechenden Biegeumlaufprüfstand aufgebracht wird. Es gilt zu beachten, dass die gewählte Prüflast im linear elastischen Bereich des Bauteils liegt. Die notwendige Schädigungssumme der Prüfdauer ist dabei entweder durch eine hohe Last mit einer geringen Schwingenspielzahl zu erreichen oder durch eine geringe Last

mit großer Schwingspielzahl. Zur Prüfung wird ein Differenzialgehäuse samt Hinterachse am Prüffeld aufgespannt. Mittels einer Antriebseinheit am Differenzialgehäuse werden die Achswellen mit der entsprechenden Fahrgeschwindigkeit angetrieben. Abhängig von Maximalgeschwindigkeit und SRI der Hinterräder beträgt die maximal mögliche Raddrehzahl für das Versuchsfahrzeug 162 U/min. Die Lasteinleitung erfolgt am Radflansch der Achse über einen entsprechenden Hydraulikzylinder, welcher die Welle in horizontaler Richtung belastet. Durch Drehung der Hinterachse erfolgt die Einleitung des umlaufenden Biegemoments am Wellenabsatz der äußeren Lagerung. Bei einer angestrebten Ziellaufleistung von 1.000.000 Lastwechseln ist die Welle mit der in Gleichung (6-18) berechneten Kraft zu belasten.

Bestimmung der Spannungsamplitude  $S_T$  zur Bauteilprüfung:

$$\Delta S_T = \left( \frac{L}{N_T} \right)^{\left( \frac{1}{k} \right)} * S_e = \left( \frac{65,01}{1000000} \right)^{\left( \frac{1}{7} \right)} * 1250 \frac{N}{mm^2} = 315,3 \frac{N}{mm^2} \quad (6-17)$$

Mittels der berechneten Biegespannung erfolgt die Berechnung der einzuleitenden Kraft am Radflansch.

Prüflast am Lasteinleitungspunkt:

$$F_T = \frac{(S_T * W_B)}{h} = \frac{\left( 315,3 \frac{N}{mm^2} * 76.447,5 mm^3 \right)}{235 mm} = 102,5 kN \quad (6-18)$$

Übersteigt die Prüfspezifikation die Tragfähigkeit des Achswellenlagers im Dauerlauf, ist die einzuleitende Kraft abzusenken und die Ziellaufleistung entsprechend der Schädigungssumme zu verlängern. Abbildung 6-13 zeigt nochmals den beschriebenen Prüfaufbau.



Abbildung 6-13: Aufbau einer Biegeumlaufprüfung von Traktor-Hinterachswellen

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Aufgrund des ständig steigenden Zeit- und Kostendrucks bei der Entwicklung moderner Traktoren rücken Verfahren zur numerischen Betriebsfestigkeitssimulation weiter in den Vordergrund. Hauptziel dieser Verfahren ist die Reduzierung des Entwicklungs- und Kostenaufwands und die Bereitstellung eines optimalen Prototyps für den finalen Freigabeversuch. Um das im Bauteil vorhandene Potential möglichst bis zur Betriebsfestigkeitsgrenze auszuschöpfen, werden als Berechnungsgrundlage idealerweise repräsentative Lastkollektive eingesetzt. Die Ermittlung und korrekte Abmischung der Eingangsbelastungen ist jedoch oftmals mit großem Aufwand und einer gewissen Unsicherheit hinsichtlich der Abdeckungswahrscheinlichkeit der Nutzerpopulation verbunden.

Die vorliegende Arbeit liefert eine systematische Vorgehensweise zur Beschreibung der auftretenden Belastungen im Nutzungsbetrieb von Traktoren. Auf Basis des Berechnungsprogramms U-Sim erfolgt die Erarbeitung eines traktorspezifischen Faktor- und Nutzungsmodells zur Identifikation der meistschädigenden Kombination der Lastfälle. Als Ergebnis werden repräsentative Lastkollektive für ausgewählte Komponenten, wie Achsen oder Kraftheber, anhand der ermittelten Kombination der Lastfälle berechnet. Durch Lastmessungen an einem John Deere 6150R erfolgt die Qualifikation des Faktormodells und deren Bedatung. Innerhalb der Nutzungssimulation wird mittels Monte-Carlo-Simulation eine definierte Anzahl virtueller Nutzer erzeugt, welche der Einsatzverteilung des Nutzungsmodells entsprechen. Den einzelnen Nutzern werden auf Basis der ermittelten Einsatzdauer Pseudo-Schädigungszahlen der jeweiligen Lastfälle des Faktormodells zugeordnet und zu einer Gesamtschädigungszahl für die einzelnen Messgrößen aufsummiert. Die berechnete Gesamtschädigung eines virtuellen Nutzers ist dabei als Maß für die Härte der Belastung im Anwendungsbetrieb zu verstehen. Anhand der Belastungsverteilung über die Nutzerpopulation erfolgt die Bestimmung des Referenznutzers (z. B.: 95% Quantil) und dementsprechend die Identifikation der hinter dem Nutzer steckenden kritischsten Kombination der Lastfälle. Abschließend wird das Verfahren im Zusammenhang mit der Biegeumlaufbelastung an der Hinterachswelle eines Traktors eingesetzt. Mittels des Berechnungsprogramms U-Sim erfolgt die Ermittlung der kritischsten Kombination der Lastfälle einer Nutzerpopulation. Dabei wird aus den gemessenen äußeren Betriebslasten, die umlaufende

Biegebeanspruchung am Wellenabsatz des äußeren Lagersitzes ermittelt. In einem finalen Schritt erfolgt mittels Beurteilung der Beanspruchungs- und Festigkeitsverteilung der Welle die Ableitung einer geeigneten Prüfvorschrift.

Das entwickelte Verfahren kann somit in Verbindung mit folgenden Problemstellungen eingesetzt werden:

- Ermittlung von repräsentativen Lastkollektiven für die numerische Betriebsfestigkeitssimulation und den Freigabeversuch
- Durchführung von Sensitivitätsstudien in Bezug auf die zielgerichtete Dimensionierung von Bauteilen
- Möglichkeit zur marktspezifischen Auswertung des Belastungsspektrums durch angepasste Nutzungsmodelle (Identifizierung von Kostenreduzierungspotential oder von Bauteilverwendung in anderen Märkten)
- Die Aufzeichnung der angreifenden Betriebslasten ermöglicht weiterhin die Berechnung von internen Bauteilbeanspruchungen für weitere Komponenten des Fahrzeugs (Motor, Getriebe oder Antriebsstrang)

In einigen Punkten besteht sicherlich weiteres Untersuchungspotential. Die durchgeführte Messkampagne beinhaltet zum jetzigen Zeitpunkt keinerlei Grenzlastfälle. Die Ergänzung bestimmter Grenzlastfälle zur ermittelten Gesamtschädigung des Nutzungsbetriebs wäre daher herstelllerspezifisch sicher ein wichtiges Thema. Weiterhin waren die Lastmessungen auf ein Einzugsgebiet von 200 km um den Großraum Mannheim begrenzt, was sicherlich Fragen zulässt, inwieweit die gemessenen Lasten repräsentativ für Deutschland sind. Das beschriebene Faktormodell wurde für die Untersuchung von Strukturkomponenten qualifiziert, die Übertragung auf andere Komponenten, wie beispielsweise das Getriebe ist sicherlich möglich, aber im Detail zu überprüfen

## Glossar

**Ausfallrate:** Der Begriff „Ausfallrate“ stellt ein Maß für das bedingte Ausfallverhalten einer Betrachtungseinheit dar, die bis zum Zeitpunkt  $t$  überlebt hat. Damit ist die Ausfallrate  $\gamma$  der Quotient aus der Anzahl der Ausfälle zum Zeitpunkt  $t$ , bezogen auf den bis zum Zeitpunkt  $t$  überlebenden Anteil der Grundgesamtheit.

**Auslegungsfestigkeit oder Auslegungsbauteil:** Der Begriff „Auslegungsfestigkeit“ beschreibt ein entsprechendes Quantil der Festigkeitsverteilung eines Bauteils (z. B.: 1% Festigkeit). Abhängig von der Datenbasis handelt es sich hierbei um eine Schädigungssumme, Laufleistung in Kilometern oder eine Lastwechselzahl.

**Auslegungs- oder Referenznutzer:** Der Auslegungs- oder Referenznutzer beschreibt ein entsprechendes Quantil (z. B.: 95% Quantil) auf der Beanspruchungsverteilung. Der entsprechende Quantilwert beschreibt die Abdeckungswahrscheinlichkeit innerhalb einer Verteilung. Der 95% Nutzer deckt somit 95% der auftretenden Beanspruchungen im Nutzungsbetrieb ab. Üblicherweise beschreibt der Auslegungsnutzer die für die Bauteillebensdauer kritischste Kombination der Lastfälle im Nutzungsbetrieb. Abhängig von der Datenbasis handelt es sich hierbei um eine Schädigungssumme, Laufleistung in Kilometern oder eine Lastwechselzahl.

**Beanspruchung:** Als Beanspruchung wird in der Technik die Auswirkung einer äußeren Belastung auf das Innere eines Körper beziehungsweise Werkstoffs bezeichnet. Mechanische Beanspruchung ist durch die Ausbildung von mechanischen Spannungen gekennzeichnet.

**Belastung:** Eine Belastung erfolgt durch eine von außen auf das Bauteil wirkende „Last“. Dies kann beispielsweise eine Kraft oder ein Drehmoment sein.

**Bemessungsgrundlagen:** Bemessungsgrundlagen dienen zur Dimensionierung von Bauteilen während der Fahrzeugentwicklung. Entsprechend beschreiben Bemessungsgrundlagen Kräfte, Momente und weitere physikalische Größen zur Auslegung von Bauteilen innerhalb der Fahrzeugstruktur.

**Betriebslastkollektiv:** Der Begriff „Betriebslastkollektiv“ beschreibt alle während der Nutzungsdauer auftretenden Lastamplituden an einem Bauteil oder der Fahrzeugstruktur.

**Erwartungswert:** Der Begriff Erwartungswert kann interpretiert werden als der "Mittelwert über die gesamte Population". Mathematisch kann er als Schwerpunkt der Dichtefunktion angesehen werden.

**Jurojin:** Das Statistikprogramm JUROJIN des ITWM Fraunhofer wurde für die Planung und Auswertung von Betriebsfestigkeitsversuchen entwickelt. Methodik und Programmgestaltung orientieren sich an Projekten und praktischen Problemstellungen aus der PKW und Nutzfahrzeugindustrie.

**Nutzerpopulation:** Beschreibt die Gesamtheit aller auftretenden Nutzer die ein Fahrzeug zum Zweck ihrer Arbeit einsetzen. Die einzelnen Nutzer innerhalb einer Population sind weiter gruppierbar in Nutzersegmente oder Betriebsformen. Die Nutzer innerhalb eines Nutzersegments führen dabei verfahrensgleiche und wiederkehrende Arbeitseinsätze durch.

**Konfidenzintervall kurz „Konfidenz“:** Der Begriff „Konfidenzintervall“ auch Vertrauensbereich genannt beschreibt ein Intervall um einen Lageparameter in der Statistik. Das Konfidenzintervall ist der Bereich, der bei unendlicher Wiederholung eines Zufallsexperiments mit einer gewissen Häufigkeit (der Konfidenz) die wahre Lage des Parameters einschließt.

**Kritischste Kombination der Lastfälle:** Die kritischste Kombination der Lastfälle beschreibt die hinter dem Referenznutzer stehende Kombination der Datensätze, welche innerhalb der Nutzungssimulation dem Nutzer zugeordnet wurde. Aus der Kombination der Zeitreihendaten erfolgt die Ableitung von repräsentativen Lastkollektiven auf Bauteil- oder Strukturebene.

**Methodik:** Beschreibt ein planmäßiges Vorgehen in der Wissenschaftstheorie. Ganz allgemein beschreibt der Begriff „Methodik“ die Art der Vorgehensweise.

**Nutzersegment oder Betriebsform:** Der Begriff Nutzersegment oder Betriebsform beschreibt die Gesamtheit aller Nutzer, deren fahrzeugspezifische Arbeitseinsätze sich als verfahrensgleich und wiederkehrend charakterisieren lassen. Mehrere Nutzersegmente bilden eine Nutzerpopulation welche für das Einsatzspektrum eines Fahrzeugs charakteristisch sind.

**Nutzungsvariabilität:** Das Wort Nutzungsvariabilität besteht grundsätzlich aus den Wörtern „Nutzung“ und „Variabilität“. Dabei wird unter „Nutzung“ die Verwendung eines



Betriebsmittels (hier: Traktor) zur Erfüllung einer Arbeitsaufgabe verstanden. Im aktuellen Fall bezieht sich „Variabilität“ auf einen statistischen Hintergrund und beschreibt die Veränderlichkeit der Betriebszustände (Nutzung) eines Ackerschleppers bei individuellem Kundeneinsatz bezogen auf die Gesamtheit der vorliegenden Betriebszustände (Streuung).

**Prüfdauer:** Der Begriff Prüfdauer beschreibt einen bei einer Betriebsfestigkeitsprüfung eines Bauteils zu erreichenden Lashorizont. Abhängig von der Datenbasis handelt es sich hierbei um eine Schädigungssumme, Laufleistung in Kilometern oder eine Lastwechselzahl.

**Pseudo-Schädigung:** Die Pseudo-Schädigungsrechnung beschreibt eine Methode zum relativen Vergleich von Zeitreihendaten (Kräfte, Beschleunigungen, usw.) basierend auf einer einfachen Materialkennlinie (Wöhlerkurve, Palmgren-Miner-Rule, Basquin-Gleichung).

**Quantil:** Ein Quantil beschreibt das Lagemaß einer Verteilung und wird allgemein auch als Schwellwert bezeichnet. Die ausgewählten Quantilwerte (90%, 95% oder 99% Kunde) entsprechen somit der Abdeckungswahrscheinlichkeit eines Kollektivs.

**Standardabweichung:** Der Begriff „Standardabweichung“ ist ein Streuungsmaß in der Statistik, welches die Verteilung von Werten um den Mittelwert kennzeichnet. Sie ist die Quadratwurzel der Varianz.

**U-Sim:** Software Tool des ITWM Fraunhofer zur Beschreibung der Nutzungsvariabilität von Fahrzeugen im Kundenbetrieb. Dabei ermöglicht das Tool durch Erzeugung einer definierten Anzahl von Zufallskunden, welche sich an einem vorgegebenen Nutzungsmodell orientieren, die Untersuchung der Betriebsbelastungen im Kundenbetrieb. Mittels Quantilbetrachtung wird die Identifikation des jeweiligen Referenz- oder Auslegungskunden ermöglicht.

**Varianz:** Der Begriff „Varianz“ ist ein Streuungsmaß in der Statistik, welches die Verteilung von Werten um den Mittelwert kennzeichnet. Sie ist das Quadrat der Standardabweichung. Berechnet wird die Varianz, indem die Summe der quadrierten Abweichungen aller Messwerte vom arithmetischen Mittel durch die Anzahl der Messwerte dividiert wird.

**Verfahren:** Der Begriff „Verfahren“ beschreibt einen geregelten, in Verfahrensschritte zerlegbaren Vorgang. Die Verfahrensschritte sind dabei nachvollziehbar und wiederholbar, sprich ein planmäßiges Vorgehen zur Problemlösung.

**Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion:** Die „Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion“, oft kurz Wahrscheinlichkeitsdichte, ist in der Wahrscheinlichkeitstheorie ein Hilfsmittel zur Beschreibung einer stetigen Wahrscheinlichkeitsverteilung. Im aktuellen Fall kann die Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung als Maß dafür verstanden werden, wie wahrscheinlich es ist eine gewisse Lebensdauer oder Schädigungssumme zu beobachten.

**Weibullverteilung:** Die Weibullverteilung ist eine stetige Wahrscheinlichkeitsverteilung. Beschrieben wird die Weibullverteilung durch den Lageparameter  $\tau$  (Tau), was dem 63% Quantil der Verteilung entspricht und den Formparameter  $\beta$ , der als Maß für die Breite der Verteilung gilt. Weibullverteilungen mit einem Formparameter  $\beta > 1$  eignen sich vom theoretischen Standpunkt aus am besten um Ermüdungs- und Verschleißausfälle zu beschreiben, da sie eine steigende Ausfallrate aufweisen, d.h. die Bedrohung eines bevorstehenden Ausfalls steigt mit der Lebensdauer.

## Anhang

### Eingesetzte Arbeitsgeräte während der Messkampagne:

Arbeitsgerät	Gerätespezifikation	Arbeitsgerät
Bodenbearbeitung <i>Anbauposition: Heckkraft- heber</i>	Volldrehpflug Anzahl Pflugkörper: 4- oder 5-Schar Arbeitsbreite: variabel einstellbar Arbeitstiefe: 15 – 25cm	
Bodenbearbeitung <i>Anbauposition: Heckkraft- heber</i>	Grubber Modellabhängige Werk- zeugausführung: z. B.: Flügelschare Arbeitsbreite: 3 – 5m Arbeitstiefe: 15 – 25cm	
Bodenbearbeitung <i>Anbauposition: Heckkraft- heber</i>	Tiefenlockerer Modellabhängige Werk- zeugausführung: z. B.: Zinken Arbeitsbreite: 1.5 – 2m Arbeitstiefe: 30 – 70cm	

<p>Bodenbearbeitung</p> <p><i>Anbauposition: Heckkraftheber und Zapfwelle</i></p>	<p>Saatbettkombination</p> <p>Modellabhängige Werkzeugausführung: z. B.: Kreiselwerke</p> <p>Arbeitsbreite: 3 – 4m</p> <p>Arbeitstiefe: 15 – 25cm</p>	
<p>Bodenbearbeitung</p> <p><i>Anbauposition: Heckkraftheber</i></p>	<p>Scheibenegge</p> <p>Modellabhängige Werkzeugausführung: z. B.: Scheibengeometrie</p> <p>Arbeitsbreite: 3 – 5m</p> <p>Arbeitstiefe: 15 – 25cm</p>	
<p>Grünlandarbeiten</p> <p><i>Anbauposition: Heckkraftheber und Zapfwelle oder Frontkraftheber und Frontzapfwelle</i></p>	<p>Mulcher</p> <p>Arbeitsbreite: 3 – 5m</p> <p>Modellabhängig seitlich verschiebbar</p>	
<p>Grünlandarbeiten</p> <p><i>Anbauposition: Heckkraftheber und Zapfwelle</i></p>	<p>Mähwerk</p> <p>Ausführung: z. B.: Seitenmähwerk</p> <p>Arbeitsbreite: 1,8 – 2,5m</p>	

<p>Grünlandarbeiten</p> <p><i>Anbauposition: Hinterer Koppelpunkt (Zugmaul) und Zapfwelle</i></p>	<p>Ballenpresse</p> <p>Variable Ballengröße bis 1,8m Ballendurchmesser</p> <p>Arbeitsbreite: 1,5 – 2,2m</p>	
<p>Verteilerarbeiten</p> <p><i>Anbauposition: Heckkraftheber und Zapfwelle</i></p>	<p>Düngerstreuer</p> <p>Modellabhängig variables Fassungsvermögen: z. B.: 1800l</p>	
<p>Transport</p> <p><i>Anbauposition: Hinterer Koppelpunkt (Zugmaul oder Kugelkupplung)</i></p>	<p>Anhänger/ Streuer</p> <p>Ladekapazität abhängig von Anhängergröße bis zu 22 Tonnen</p>	
<p>Frontlader</p> <p><i>Anbauposition: Anbaulager am Hauptrahmen</i></p>	<p>Frontlader</p> <p>Möglichkeit diverser Anbauwerkzeuge:</p> <p>Erdschaufel</p> <p>Mistgabel, usw.</p>	

### Fahrzeugspezifikationen:

Hersteller:	John Deere
Baureihe:	6000er Serie
Modell:	6150R
Nennleistung:	110 kW (150 PS)

---

Nennleistung mit IPM:	125 KW (15 kW Boost nur verfügbar bei Transport & PTO Arbeiten)
Radstand:	2765 mm
Getriebe:	IVT (Automatik)
Maximale Fahrgeschwindigkeit:	50 km/h
Leistung Heckzapfwelle:	105 kW
Leistung Frontzapfwelle:	80 kW
Hubkapazität Heckkraftheber:	8100 kg (am Fanghaken)
Durchgehende Hubkraft (OECD):	4800 kg
Hubkapazität Frontkraftheber:	4000 kg
Durchgehende Hubkraft (OECD):	3300 kg
Hubkapazität Frontlader:	1886 kg (Modell HL 360 bei voller Hubhöhe)
Max. Durchfluss Hydraulik:	114 l/min
Zulässiges Gesamtgewicht:	11300 kg
Maximale Vorderachslast (1):	5400 kg (zulässig für Straße bis 50 km/h)
Maximale Vorderachslast (2):	7200 kg (zulässig für Frontladerarbeiten bis 10 km/h)
Maximale Hinterachslast:	8000 kg (zulässig für Straße bis 50 km/h)
Vorderachsfederung:	TLS (Hydropneumatische Federung)
Kabinenfederung:	starr
Bereifung vorne:	600/65 R28
Bereifung hinten:	710/70 R38

**Wichtige Parameter des Versuchsfahrzeugs:**

Statische Achslast/ Vorderachse [kN]:	36,9 kN
Statische Achslast/ Hinterachse [kN]:	47,2 kN
Statische Radlast/ Vorderachse/ links [kN]:	18,1 kN
Statische Radlast/ Vorderachse/ rechts [kN]:	18,8 kN
Statische Radlast/ Hinterachse/ links [kN]:	21,7kN
Statische Radlast/ Hinterachse/ rechts [kN]:	25.5 kN
Leergewicht/ Fahrzeug [kg]:	8573 kg
Hinterachse/ Reifen/ Radius [mm]:	925 mm

**Übersicht der Sensorik am Fahrzeug:**

<b>Beschreibung der Messgrößen</b>	<b>Verfügbare Messgrößen</b>	<b>Sensorik</b>	<b>Abtast-rate</b>
Radkräfte & Radmomente, Hinterrad, links, X,Y,Z- Richtung	Fx_Wh_RL, Fy_Wh_RL, Fz_Wh_RL, Mx_Wh_RL, My_Wh_RL, Mz_Wh_RL	Kraftmessräder	500 Hz
Radkräfte & Radmomente, Hinterrad, rechts, X,Y,Z- Richtung	Fx_Wh_RR, Fy_Wh_RR, Fz_Wh_RR, Mx_Wh_RR, My_Wh_RR, Mz_Wh_RR	Kraftmessräder	500 Hz
Radkräfte & Radmomente, Vorderrad, links, X,Y,Z- Richtung	Fx_Wh_FL, Fy_Wh_FL, Fz_Wh_FL, Mx_Wh_FL, My_Wh_FL, Mz_Wh_FL	Kraftmessräder	500 Hz
Radkräfte & Radmomente, Vorderrad, rechts, X,Y,Z- Richtung	Fx_Wh_FR, Fy_Wh_FR, Fz_Wh_FR, Mx_Wh_FR, My_Wh_FR, Mz_Wh_FR	Kraftmessräder	500 Hz

Kräfte, Heckkraftheber, Unterlenker, links, X,Y,Z-Richtung	Fx_LoLnk_RL, Fy_LoLnk_RL, Fz_LoLnk_RL	DMS instrumentierte Unterlenker	500 Hz
Kräfte, Heckkraftheber, Unterlenker, rechts, X,Y,Z-Richtung	Fx_LoLnk_RR, Fy_LoLnk_RR, Fz_LoLnk_RR	DMS instrumentierte Unterlenker	500 Hz
Kraft, Heckkraftheber, Hubspindel, links & rechts	F_LiLnk_RL, F_LiLnk_RR	DMS instrumentierte Hubspindel	500 Hz
Kraft, Heckkraftheber, Stabilisierungsstrebe, links & rechts	F_StabBar_RL, F_StabBar_RR	DMS instrumentierte Stabilisierungsstrebe	500 Hz
Kraft, Heckkraftheber, Oberlenker,	F_CenLnk_R	DMS instrumentierter Oberlenker	500 Hz
Druck, Heckkraftheber, Hubzylinder	p_LiCyl_R,	Drucksensor	500 Hz
Kräfte, Frontkraftheber, Unterlenker, links, X,Y,Z-Richtung	Fx_LoLnk_FL, Fy_LoLnk_FL, Fz_LoLnk_FL	3-dimensionale Kraftmesszellen	500 Hz
Kräfte, Frontkraftheber, Unterlenker, rechts, X,Y,Z-Richtung	Fx_LoLnk_FR, Fy_LoLnk_FR, Fz_LoLnk_FR	3-dimensionale Kraftmesszellen	500 Hz
Kraft, Frontkraftheber, Oberlenker,	F_CenLnk_F	DMS instrumentierter Oberlenker	500 Hz
Druck, Frontkraftheber, Hubzylinder	p_LiCyl_up, p_LiCyl_dn,	Drucksensor	500 Hz



Weg, Frontkraftheber, Hubzylinder	s_Hit_F	Seilzugpotentiometer	500 Hz
Weg, Heckkraftheber, Hubzylinder	s_Hit_R	CAN-Bus	50 Hz
Kräfte, Anhängerkuppung, Heck, X,Y,Z-Richtung	Fx_RCD, Fy_RCD, Fz_RCD	3-dimensionale Kraftmesszellen	
Drehmoment, Heckzapfwelle	M_PTO_R	Drehmomentmesswelle	500 Hz
Drehzahl, Heckzapfwelle	n_PTO_R	Drehzahlgeber	500 Hz
Drehmoment, Frontzapfwelle	M_PTO_F	Drehmomentmesswelle	500 Hz
Drehzahl, Frontzapfwelle	n_PTO_F	Drehzahlgeber	500 Hz
Druck, Frontlader, Hubzylinder,	p_LdrBm_up, p_LdrBm_dn	Drucksensor	500 Hz
Druck, Frontlader, Kippzylinder,	p_LdrTI_i, p_LdrTI_o	Drucksensor	500 Hz
Weg, Frontlader, Hubzylinder,	s_LdrBm	Seilzugpotentiometer	500 Hz
Weg, Frontlader, Kippzylinder,	s_LdrTI	Seilzugpotentiometer	500 Hz
Drehmoment, Motor	M_Eng	Drehmomentmesswelle	500 Hz
Drehzahl, Motor,	n_Eng	CAN-Bus	50 Hz
Prozentuale Auslastung, Motor,	Load_Eng	CAN-Bus	50 Hz

Geschwindigkeit, Fahrzeug,	v_WH	CAN Bus	50 Hz
Kraftstoffverbrauch,	Q_Fuel	CAN-Bus	50 Hz
Temperatur, Kühlmittel, Motor	T_Cool	CAN-Bus	50 Hz
Temperatur, Öl, Getriebe	T_Oil_Trm	CAN-Bus	50 Hz
GPS Daten, Fahrzeug	Lat, Long, Alt, Head	GPS-Modul,	10 Hz

### Datenerhebung zur Quelle [44]:

Auszug der Erhebung des Statistischen Bundesamts zur Bodennutzung landwirtschaftlicher Betriebe [44]. Titel: „Land- und Forstwirtschaft, Fischerei – Bodennutzung der Betriebe“, Autor: Statistisches Bundesamt, Fachserie 3 - Reihe 2.1.2, Erscheinungsjahr: 24. November 2013, Kontakt: [www.destatis.de/kontakt](http://www.destatis.de/kontakt)

0103 R Landwirtschaftliche Betriebe 2014 nach Betriebsfläche, ausgewählten Hauptnutzungs- und Kulturarten sowie Größenklassen der landwirtschaftlich genutzten Fläche (in 1 000)

Deutschland <sup>1)</sup>		und zwar						
Lfd. Nr.	Landwirtschaftlich genutzte Fläche von ... bis unter ... ha	Betriebsfläche insgesamt <sup>2)</sup>	Landwirtschaftlich genutzte Fläche					Waldfläche und Kurzumtriebsplantagen
			1	2	3	4	5	
		Anzahl Betriebe						
1	unter 5	26,3 A	22,6 A	6,6 A	13,4 A	7,7 B	5,5 B	
2	5 - 10	44,8 A	44,8 A	25,6 A	5,1 B	36,6 A	22,2 A	
3	10 - 20	59,3 A	59,3 A	42,7 A	5,1 B	49,6 A	33,4 A	
4	20 - 50	71,4 A	71,4 A	60,3 A	4,7 B	62,1 A	44,0 A	
5	50 - 100	49,6 A	49,6 A	46,4 A	2,5 B	44,0 A	28,7 A	
6	100 - 200	23,6 A	23,6 A	22,8 A	1,1 B	21,3 A	12,2 A	
7	200 - 500	8,1 A	8,1 A	7,8 A	0,4 B	7,1 A	4,0 A	
8	500 - 1 000	2,2 A	2,2 A	2,2 A	0,1 A	1,9 A	1,1 A	
9	1 000 und mehr	1,5 A	1,5 A	1,5 A	0,1 A	1,4 A	0,9 A	
10	Insgesamt	286,8 A	283,0 A	215,9 A	32,4 A	231,8 A	152,0 A	
		Fläche in ha						
11	unter 5	74,4 B	46,8 A	9,0 B	22,3 A	15,3 B	17,3 C	
12	5 - 10	464,8 B	326,3 A	126,2 B	24,5 B	175,3 A	122,4 C	
13	10 - 20	1 110,2 A	887,2 A	441,3 A	40,9 B	404,6 A	193,8 B	
14	20 - 50	2 807,6 A	2 388,3 A	1 409,2 A	54,3 B	924,4 A	365,2 C	
15	50 - 100	3 802,6 A	3 490,7 A	2 333,9 A	27,3 B	1 129,0 A	256,2 B	
16	100 - 200	3 372,1 A	3 196,5 A	2 284,5 A	15,1 B	896,7 A	135,9 B	
17	200 - 500	2 499,6 A	2 359,8 A	1 862,4 A	11,9 C	485,5 A	112,0 B	
18	500 - 1 000	1 649,2 A	1 566,0 A	1 313,9 A	5,0 A	247,1 A	60,0 B	
19	1 000 und mehr	2 552,5 A	2 463,4 A	2 088,9 A	1,6 A	372,8 A	40,3 A	
20	Insgesamt	18 333,0 A	16 724,8 A	11 869,2 A	202,9 A	4 650,7 A	1 303,3 B	

<sup>1)</sup> Einschließlich Berlin, Bremen und Hamburg.

<sup>2)</sup> Einschließlich Betriebe ohne landwirtschaftlich genutzte Fläche.

## Literaturverzeichnis

- [1] K. Dressler, M. Speckert und N. Ruf, „Simulation der Kundenbeanspruchung - Ein Ansatz basierend auf einem Faktormodell und Monte-Carlo-Methoden,“ FIESTA, München, 2011.
- [2] F. Küçükay, A. Janßen und H. Kollmer, „Kundennahe Fahrzeugmessungen,“ Nr. In: dSpace News 1/2008, dSpace GmbH. , Paderborn 2008.
- [3] J. P. Müller-Kose, Repräsentative Lastkollektive für Fahrzeuggetriebe, Braunschweig: Shaker Verlag, Schriftenreihe des Instituts für Fahrzeugtechnik TU Braunschweig, 2002.
- [4] A. Janßen, Repräsentative Lastkollektive für Fahrwerkkomponenten, Braunschweig: Shaker Verlag, Schriftenreihe des Instituts für Fahrzeugtechnik TU Braunschweig, 2007.
- [5] E. Haibach, Betriebsfestigkeit, Düsseldorf: VDI Verlag, 2006.
- [6] Forschungskuratorium Maschinenbau, „FKM-Richtlinie 284: Statischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile auf der Grundlage örtlicher Grenzdehnungen, Abschlussbericht,“ Forschungskuratorium Maschinenbau e.V., Frankfurt am Main, 2004.
- [7] W. Beitz und K.-H. Grote, Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau, Heidelberg: Springer Verlag, 1997.
- [8] D. V. M. Radaj, Ermüdungsfestigkeit, Heidelberg: 3. Auflage, Springer Verlag, 2007.
- [9] H. Gudehus und H. Zenner, Leitfaden für eine Betriebsfestigkeitsrechnung: Empfehlung zur Lebensdauerabschätzung von Maschinenbauteilen, 4. Aufl., korr. Nachdr. Aufl. Hrsg., Düsseldorf: Stahleisen- Verlag, 2000.
- [10] M. Köhler, S. Jenne, K. Pötter und H. Zenner, Zählverfahren und Lastannahme in der Betriebsfestigkeit, Heidelberg: Springer Verlag, 2012.

- 
- [11] P. Johannesson und M. Speckert, Guide to Load Analysis for Durability in Vehicle Engineering, Wiley, ISBN: 978-1-118-64831-5, 2013.
- [12] O. Buxbaum, Betriebsfestigkeit - Sichere und wirtschaftliche Bemessung schwingbruchgefährdeter Bauteile, Düsseldorf: Verlag Stahleisen, 1992.
- [13] O. H. Basquin, The Exponential Law of Endurance Test, ASTM Proceedings 10, 1910, pp. 625-630.
- [14] M. A. Miner, Cumulative Damage in Fatigue, J. Appl. Mech 12, H.3, 1942, pp. 159-164.
- [15] A. Esderts, Grundlagen der Betriebsfestigkeit, Fulda: FVA Seminar Betriebsfestigkeit, 2007.
- [16] VDA, Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie - Zuverlässigkeitssicherung bei Automobilherstellern und Lieferanten, Band 2, Teil 2 Hrsg., Frankfurt: Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA), 2004.
- [17] H. Auernhammer, „Einsatz und Leistung größerer Ackerschlepper - derzeitige Situation und Ausblick bei Auslastungsgrad und Gerätezuordnung,“ *Landtechnik von Morgen*, Nr. 22, pp. 45-58, 1983.
- [18] H. Auernhammer, „Einsatzdaten größerer Ackerschlepper - Ergebnisse einer Erhebung,“ *Landtechnik*, Bd. 38, Nr. 11, pp. 458-463, 1983.
- [19] H. Auernhammer, „Der Schlepper in der Landwirtschaft - gestern, heute, morgen,“ *Landtechnik*, Bd. 44, Nr. Sonderheft, pp. 363-365, 1989.
- [20] R. H. Biller, Einsatzzeiten von Ackerschleppern auf Großbetrieben, *Landtechnik* 36, Heft 1, 1981, pp. 19-21.
- [21] H. L. Wenner, „Einsatz und Leistung größerer Ackerschlepper - Derzeitige Situation und Ausblick,“ *Landtechnik von Morgen*, Nr. 22, pp. 28-45, 1983.
- [22] G. Olfe, Schlepperausstattung und Schlepperverwendung in der Landwirtschaft bei unterschiedlichen betrieblichen Verhältnissen, München: Dissertation, Technische Universität München, 1990.

- [23] M. Demmel, Analytische und modellhafte Ableitung der Anforderungen an Schlepperkonzepte für Pflege- und Verteilerarbeiten, Weihenstephan: Institut für Landtechnik, 1997.
- [24] E. G. McKibbin, „Torque Dynamometer for Tractor Drive Wheels,“ *Agricultural Engineering*, pp. 311-312, 1928.
- [25] L. Jacobi, „Gear loading practice in tractor design,“ *Agricultural Engineering*, Bd. 13, Nr. 3, pp. 57-60, 1932.
- [26] H. Gerlach, „Über die Kräfte in Zahnradgetrieben von Schleppern,“ *Grundlagen Landtechnik* 6, Nr. 7, pp. 107-110, 1956.
- [27] H. Gerlach, Messung der Triebwerksbelastungen eines Ackerschleppers, Braunschweig: Dissertation, Technische Hochschule Braunschweig, 1966.
- [28] H. H. Coenenberg, Zum Verhalten der Kupplung und ihren Einfluss auf die Schwingungsspitzenbeanspruchung im Fahrzeugbetrieb, speziell Schleppertriebwerk, Braunschweig: Dissertation, Technische Hochschule Braunschweig, 1962.
- [29] H. Kühlborn, „Aufnahme und Auswertung von Belastungsverläufen in Schleppertriebwerken,“ *Landtechnische Forschung* 19, Nr. 3-4, pp. 65-71, 1971.
- [30] H. Kühlborn, „Beanspruchung der Antriebswellen leistungsstarken Schlepper,“ *Landtechnik*, Bd. 28, Nr. 2, pp. 45-48, 1973.
- [31] R. H. Biller, „Zur Belastung der Schlepperzapfwelle bei unterschiedlichen Arbeitseinsätzen,“ *Landtechnik* 38, Nr. 11, pp. 470-473, 1983.
- [32] R. H. Biller, Ermittlung repräsentativer Lastkollektive für Antriebselemente eines auf einem Modellbetrieb eingesetzten 70-kW-Schlepper, Braunschweig: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, Fortschrittsbericht VDI, Reihe 14 Bd. 23, 1983.

- [33] H. H. Meiners, Der Einfluss der hydrodynamischen Kupplung auf die Belastungen in einem Ackerschlepper, Braunschweig: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, Fortschrittsbericht VDI, Reihe 14, Bd. 24, 1983.
- [34] H. Brandt, Rechnergestützte Gestaltung der Dauererprobung bei PKW-Automatikgetrieben, Bd. 190, VDI, Hrsg., München: Fortschrittsbericht VDI, Reihe 12, 1993.
- [35] B. Vahlensieck, Lastkollektive für ein leistungsgeregeltes stufenloses Traktor-Getriebe, VDI Berichte 1297, 1996, pp. 23-26.
- [36] B. Vahlensieck, Messung und Anwendung von Lastkollektiven für einen stufenlosen Kettenwandler-Traktorfahrantrieb, München: Dissertation Technische Universität München, Fortschrittsbericht VDI, Reihe 12, Bd. 385, 1999.
- [37] R. Späth, „Lastkollektive eines Traktorrumpfes I,“ *Landtechnik 53, Sonderheft*, pp. 196-198, 1998.
- [38] H. Mariutti, Lastkollektive für die Fahrantriebe von Traktoren mit Bandlaufwerken, München: Dissertation, Technische Universität München, Fortschrittsbericht VDI, Reihe 12, Bd. 530, 2003.
- [39] K. T. Renius, Last- und Fahrgeschwindigkeitskollektive als Dimensionierungsgrundlage für die Fahrantriebe von Ackerschleppern, Bd. 49, VDI Fortschrittsbericht, 1976.
- [40] R. Späth, Dynamische Kräfte an Standardtraktoren und ihre Wirkung auf den Rumpf, München: Dissertation, Technische Universität München, Fortschrittsbericht VDI, Reihe 14, Bd.115, 2004.
- [41] K. Dressler, M. Speckert und N. Ruf, „Ein neuer Ansatz zur Ermittlung von Erprobungslasten für sicherheitsrelevante Bauteile,“ Würzburg, 2009.
- [42] K. Dressler und M. Speckert, „Customer Loads Correlation in Truck Engineering,“ FISTA München, 2008.

- 
- [43] A. Streit, K. Dressler und M. Speckert, Anwendung statistischer Methoden zur Erstellung von Nutzungsprofilen für die Auslegung von Mobilbaggern, VDI-Berichte Nr.2065, VDI-Verlag, 2009, pp. 65-77.
- [44] S. Bundesamt, „Land- und Forstwirtschaft, Fischerei - Bodennutzung der Betriebe,“ Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, 2013.
- [45] H. GmbH, Somat eDAQ - User Manual, Darmstadt: SoMat P/N DOC 0004-01, 2009.
- [46] ASTM A304-11: Standard Specification for Carbon and Alloy Steel Bars Subject to End-Quench Hardenability Requirements, West Conshohocken, Pennsylvania, Vereinigte Staaten: ASTM International, 2011.
- [47] DIN 743-4: Tragfähigkeitsberechnung von Wellen und Achsen - Teil 4: Zeitfestigkeit, Dauerfestigkeit - Schädigungsäquivalente Spannungsamplitude, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2012.

## Lebenslauf

Name: Christian Eckstein

Geburtsdatum:

Geburtsort: Heppenheim

Staatsangehörigkeit: Deutsch

Familienstand:

Eltern:

Schulbildung 1991 – 1995: Grundschule

1995 – 2004: Gymnasium, Abschluss: Abitur

Studium 2004 – 2010: Studium des allgemeinen Maschinenbaus  
an der technischen Universität Darmstadt



---

## Dissertationen am MEGT, Lehrstuhl für Maschinenelemente und Getriebetechnik der TU Kaiserslautern

1. Gähje, Heino: Bewertung der Naßbagger und der sich anschließenden Transportkette im Schelfbereich unter Anwendung eines EDV-Modells. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 1981
2. Kahle, Ulrich: Das Micro-CAD-System ein Beitrag zur Einführung einer rechnerunterstützten Konstruktionsweise in kleinen und mittleren Unternehmen. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 1983
3. Kreutz, Sax: Simulation von Vergleichmässigungsprozessen auf stirnseitig abgebauten Massenschüttgutkreislerlagerplätzen mit Hilfe eines elektrischen Analogiemodells und eines gleichwertigen digitalen Modells. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 1983
4. Rende, Hikmet: Ein Beitrag zur Untersuchung der elastischen Nachgiebigkeiten der verspannten Teile von Schraubenverbindungen. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 1984
5. Sponagel, Stefan: Gummi-Metall-Bauteile. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 1987
6. Spaltowski, Ralf: Ein Beitrag zur Beurteilung der Trageigenschaften und des Reibungsverhaltens von nicht-newtonschen Flüssigkeiten in stationär und dynamisch bewegten Gleitlagerungen. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 1988
7. Britz, Stefan: Ein Beitrag zur Erfassung der Funktionsprinzipien dynamischer Wellendichtungen unter besonderer Berücksichtigung des Radialwellendichtrings. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 1988
8. Hennerici, Horst: Ein Beitrag zur Berechnung der Beanspruchungen und der nichtlinearen Rückstellkräfte und -momente von dünnen Kreisringblechen als Wirkglieder von Membrankupplungen. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 1988
9. Jiang, Fuqing: Ratterschwingungen bei selbsthemmenden Schneckengetrieben. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 1989
10. Endemann, Ulrich: Ein Beitrag zur theoretischen und experimentellen Untersuchung hydrodynamisch arbeitender Spiralrillen-Radialgleitlager. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 1989
11. Schlossarczyk, Jörg: Ein Beitrag zur Berechnung, Modellbildung und experimentellen Untersuchung drehelastischer Scheibenkupplungen unter Berücksichtigung des im Betrieb auftretenden Wellenversatzes. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 1990
12. Lutz, Thomas: Ein Beitrag zur Berechnung druckbelasteter Elastomerlager. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 1990

- 
13. Lehnertz, Hermann: Ein Beitrag zur Berechnung hydrodynamisch arbeitender Radialgleitlager bei stationärem Betrieb mit Hilfe von Kleinrechnern. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 1990
  14. Maier, Martin: Experimentelle Untersuchung und numerische Simulation des Crashverhaltens von Faserverbundwerkstoffen. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 1990
  15. Steiner, Matthias: Ein Beitrag zur theoretischen und experimentellen Erfassung der Funktionsmechanismen von axialen Gleitringdichtungen. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 1992
  16. Stopp, Ralf: Elastomere Werkstoffe für Formdichtungen. Ein Beitrag zur Dimensionierung von Dichtsystemen. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 1993
  17. Joo, Kwang-Taek: Beitrag zum Einfluß mechanischer Parameter auf das Spurverhalten von dreirädrigen fahrerlosen Transportfahrzeugen. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 1993
  18. Fritzsche, Ralf: Ein Beitrag zur Untersuchung des Verhaltens von Radialwellendichtringen aus Elastomer- und Polytetrafluoräthylen-Material bei speziellen Betriebsbedingungen. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 1994
  19. Becker, Matthias: Ein Beitrag zur Untersuchung der Temperaturentwicklung in einer drehelastischen Scheibenkupplung bei dynamischer Beanspruchung unter besonderer Berücksichtigung des im Betrieb auftretenden Winkelversatzes. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 1994
  20. Helfrich, Axel: Bestimmung der Kenngrößen von nicht-newtonschen Schmierstoffen für die Dimensionierung hydrodynamisch arbeitender Gleitlager. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 1995
  21. Mattheis, Fritz: Ein Beitrag zur theoretischen und experimentellen Untersuchung von Flachdichtungen am Beispiel von polymerbeschichteten Metallblechen. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 1995
  22. Koch, Jürgen: Das Gleitlager endlicher Breite eine Lösung der Reynoldsschen Differentialgleichung. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 1995
  23. Spieth, Gottfried: Mechanische und werkstofftechnische Untersuchung von Verbindungen mit Schrauben aus thermoplastischem Kunststoff. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 1995
  24. Kramm, Georg: Ein Beitrag zur Modellierung von nicht-newtonschen Schmierstoffen und deren Verwendung für hydrodynamisch arbeitende Gleitlager. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 1996
  25. Berg, Michael: Untersuchungen zum Schmierstoffdurchsatz und zur Reibungsleistung dynamisch belasteter Radialgleitlager. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 1996

- 
26. Mán, László: Ein Beitrag zur Vorhersage von Freßschäden an tribologischen Wirkstellen. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 1997
  27. Gast, Stefan: Zielfunktionen zur Optimierung der Laufeigenschaften räumlicher Mechanismen auf der Grundlage ebener Kontaktverlustkriterien. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 2000, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 1, Nr. 331
  28. Ruhl, Christian: Ein Beitrag zur Wirkungsweise von Radialwellendichtungen unter Berücksichtigung von rauheitsinduzierter Hydrodynamik und radialen Verlagerungen der Gegenlauffläche. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 2000, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 1, Nr. 339
  29. Huber, Matthias: Ein Beitrag zur Untersuchung hydrodynamisch arbeitender Radialgleitlager unter Berücksichtigung der Schmierölverdünnung mit Rapsölmethylester. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 2000, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 453
  30. Fuerst, Axel: Analytische Simulation von hydrodynamischen Gleitlagern in Wasserkraftanlagen. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 2000, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 1, Nr. 343
  31. Reif, Andreas: Entwicklung eines integrierten automatisiert schaltenden Getriebes zum Einsatz in Elektrostraßenfahrzeugen. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 2000, Fortschritt-Bericht VDI, Reihe 1, Nr. 477
  32. Lorreng, Dirk: Ein Beitrag zur Ermittlung und Beschreibung der Fließeigenschaften biologisch schnell abbaubarer Schmierstoffe. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 2001, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 3, Nr. 741
  33. Péteri, Szabolcs: Untersuchungen von Radialwellendichtringen unter Wellenschwingungen bei unterschiedlichen Temperaturen. Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, 2004, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 1, Nr. 379
  34. Hahn, Kersten: Dynamik-Simulation von Wälzlagerkäfigen. Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, 2005, Skaker Verlag, Reihe Konstruktionstechnik, ISBN 3-8322-3760-7
  35. Teutsch, Roman: Kontaktmodelle und Strategien zur Simulation von Wälzlagern und Wälzführungen. Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, 2005, Maschinenelemente und Getriebetechnik Berichte Bd. 01/2005, ISBN 3-936890-73-0
  36. Groß, Torsten: Ein Beitrag zur Entwicklung und Analyse serieller und paralleler Strukturen. Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, 2007, Maschinenelemente und Getriebetechnik Berichte Bd. 02/2007, ISBN 978-3-939432-46-3

- 
37. Thullen, Carlo: Entwicklung und Validierung einer Universalprüfeinrichtung zur Untersuchung von dynamisch belasteten Radialwellendichtungen. Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, 2008, Maschinenelemente und Getriebetechnik Berichte Bd. 03/2008, ISBN 978-3-939432-89-0
  38. Nicola, Andreas: Versuchsgestützte Dynamiksimulation hydraulisch gespannter Kettentriebe und Drehungleichförmigkeiten. Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, 2008, Maschinenelemente und Getriebetechnik Berichte Bd. 04/2008, ISBN 978-3-939432-90-6
  39. Aul, Eduard: Analyse von Relativbewegungen in Wälzlagersitzen. Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, 2008, Maschinenelemente und Getriebetechnik Berichte Bd. 05/2008, ISBN 978-3-939432-96-8
  40. Bach, Peter: Umsturzsicherheit von Doppeldeckeromnibussen. Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, 2008, Maschinenelemente und Getriebetechnik Berichte Bd. 06/2008, ISBN 978-3-939432-97-5
  41. Scheuermann, Miguel: Dynamiksimulation zur virtuellen Produktentwicklung von Rollenschienenführungen. Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, 2010, Maschinenelemente und Getriebetechnik Berichte Bd. 07/2010, ISBN 978-3-941438-49-1
  42. Wohlgemuth, Martin: Ein Beitrag zur Lebensdauererlängerung von feststoffgeschmierten Rillenkugellagern. Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, 2010, Maschinenelemente und Getriebetechnik Berichte Bd. 08/2010, ISBN 978-3-941438-64-4
  43. Leichner, Tim: Prognose der Dichtlippenfolgefähigkeit von RWDR bei dynamisch verlagter Welle. Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, 2012, Maschinenelemente und Getriebetechnik Berichte Bd. 09/2012, ISBN 978-3-941438-91
  44. Magyar, Balázs: Tribo-dynamische Untersuchungen von Zylinderschneckengetrieben. Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, 2012, Maschinenelemente und Getriebetechnik Berichte Bd. 10/2012, ISBN 978-3-943995-03-9
  45. Babbick, Till: Wandern von Wälzlageringern unter Punktlast. Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, 2012, Maschinenelemente und Getriebetechnik Berichte Bd. 11/2012, ISBN 978-3-943995-05-3
  46. Gastauer, Tobias: Reibungs- und Verschleißuntersuchungen von Elastomerwerkstoffen für Dichtungsanwendungen. Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, 2012, Maschinenelemente und Getriebetechnik Berichte Bd. 12/2013, ISBN 978-3-943995-16-9

- 
47. Gummer, Alexander: Analytische Untersuchung des Geometrieinflusses auf das Verschleißverhalten von Antriebsketten. Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, 2013, Maschinenelemente und Getriebetechnik Berichte Bd. 13/2013, ISBN 978-3-943995-23-7
  48. Aul, Viktor: Kontaktmodelle zur dynamischen Simulation vollrolliger Zylinderrollenlager. Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, 2014, Maschinenelemente und Getriebetechnik Berichte Bd. 14/2014, ISBN 978-3-943995-55-8
  49. Marquart, Matthias: Ein Beitrag zur Nutzung feststoffgeschmierter Wälzlager. Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, 2014, Maschinenelemente und Getriebetechnik Berichte Bd. 15/2014, ISBN 978-3-943995-52-7
  50. Buchmiller, Viktor: Wälzgelagerter Kurbeltrieb - Potenzial von Wälzlagern im Verbrennungsmotor. Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, 2015, Maschinenelemente und Getriebetechnik Berichte Bd. 16/2015, ISBN 978-3-943995-79-4
  51. Kaiser, Fabian: Ein Simulationsmodell zur Analyse des Schmierfilms von Stangendichtungen. Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, 2015, Maschinenelemente und Getriebetechnik Berichte Bd. 17/2015, ISBN 978-3-95974-010-4
  52. Bajer, Peter: Einflussgrößen auf das Schlupfverhalten von Wälzlagern in Generatorgetrieben. Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, 2016, Maschinenelemente und Getriebetechnik Berichte Bd. 18/2016, ISBN 978-3-95974-016-6
  53. Jennewein, Barbara: Integrierter Berechnungsansatz zur Prognose des dynamischen Betriebsverhaltens von Radialwellendichtringen. Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, 2016, Maschinenelemente und Getriebetechnik Berichte Bd. 19/2016, ISBN 978-3-95974-015-9
  54. Radnai, Benjamin: Wirkmechanismen bei spannungsbeaufschlagten Wälzlagern. Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, 2016, Maschinenelemente und Getriebetechnik Berichte Bd. 20/2016, ISBN 978-3-95974-029-6
  55. Frölich, Daniel: Strategien und Modelle zur Simulation des Betriebsverhaltens von Radial-Wellendichtringen. Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, 2016, Maschinenelemente und Getriebetechnik Berichte Bd. 21/2016, ISBN 978-3-95974-030-2
  56. Sappok, Daniel: Experimentelle und simulative Methoden zur Untersuchung der Verschleißvorgänge im Kettengelenk von Antriebs- und Steuerketten. Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, 2016, Maschinenelemente und Getriebetechnik Berichte Bd. 22/2016, ISBN 978-3-95974-033-3

57. Kiekbusch, Timo: Strategien zur dynamischen Simulation von Wälzlagern. Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, 2017, Maschinenelemente und Getriebetechnik Berichte Bd. 23/2017, ISBN 978-3-95974-043-2
58. Kaiser, Christian: Entwicklung einer Prüfmethode für Modelluntersuchungen an schmutzbeaufschlagten Radial-Wellendichtringen. Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, 2017, Maschinenelemente und Getriebetechnik Berichte Bd. 24/2017, ISBN 978-3-95974-052-4
59. Fingerle, Thorsten: Experimentelle und simulative Untersuchung des Schlupfverhaltens von Kegelrollenlagern, Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, 2017, Maschinenelemente und Getriebetechnik Berichte Bd. 25/2017, ISBN 978-3-95974-054-8
60. Eckstein, Christian: Ermittlung repräsentativer Lastkollektive zur Betriebsfestigkeit von Ackerschleppern. Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, 2017, Maschinenelemente und Getriebetechnik Berichte Bd. 26/2017, ISBN 978-3-95974-064-7