

Karlsruher Schriftenreihe  
Fahrzeugsystemtechnik

Andreas Huber

**Ermittlung von prozess-  
abhängigen Lastkollektiven  
eines hydrostatischen Fahr-  
antriebsstrangs am Beispiel  
eines Teleskopladlers**



Andreas Huber

**Ermittlung von prozessabhängigen Lastkollektiven eines hydrostatischen Fahrtriebsstrangs am Beispiel eines Teleskopladers**

**Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik  
Band 2**

Herausgeber

**FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik**

Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin

Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer

Prof. Dr.-Ing. Peter Gratzfeld

Prof. Dr.-Ing. Frank Henning

Das Institut für Fahrzeugsystemtechnik besteht aus den eigenständigen Lehrstühlen für Bahnsystemtechnik, Fahrzeugtechnik, Leichtbautechnologie und Mobile Arbeitsmaschinen

# **Ermittlung von prozessabhängigen Lastkollektiven eines hydrostatischen Fahrantriebsstrangs am Beispiel eines Teleskopladere**

von  
Andreas Huber

Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie  
Fakultät für Maschinenbau, 2010

## Impressum

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
KIT Scientific Publishing  
Straße am Forum 2  
D-76131 Karlsruhe  
www.ksp.kit.edu

KIT – Universität des Landes Baden-Württemberg und nationales  
Forschungszentrum in der Helmholtz-Gemeinschaft



Diese Veröffentlichung ist im Internet unter folgender Creative Commons-Lizenz  
publiziert: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/de/>

KIT Scientific Publishing 2010  
Print on Demand

ISSN 1869-6058  
ISBN 978-3-86644-564-2





## **Vorwort des Herausgebers**

Die Sensibilität für Betriebskosten und ein ständig steigender Wettbewerbsdruck fordern neue Fahrzeugkonzepte, die immer effizienter in Bezug auf den Ressourceneinsatz ausgelegt sind. Es werden daher Lösungen gefordert, die immer näher an die Belastungsgrenzen der Bauteile herangehen, und den Werkstoff best möglichst auszunutzen. Zur sicheren Auslegung der Fahrzeuge wird daher eine detaillierte Kenntnis der Belastung bzw. die Beanspruchung der Bauteile und der Beanspruchbarkeit der Werkstoffe benötigt. Aus den genannten Gründen muss an neuen Fahrzeugkonzepten geforscht werden, die sich an den Eigenschaften Energieeffizienz, Sicherheit, Benutzerfreundlichkeit sowie Kosten orientieren.

Hierzu will die Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik einen Beitrag leisten. Für die Fahrzeuggattungen Pkw, Nfz, Mobile Arbeitsmaschinen und Bahnfahrzeuge werden Forschungsarbeiten vorgestellt, die die Fahrzeugtechnik auf vier Ebenen beleuchten: das Fahrzeug als komplexes mechatronisches System, die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion, das Fahrzeug im Verkehr und Infrastruktur sowie das Fahrzeug in Gesellschaft und Umwelt.

Band 2 stellt die Ergebnisse von Lastkollektivmessungen an einem Teleskoplader vor. Hierzu wurden im hydrostatischen Antriebsstrang der Maschine telemetrische Drehmoment- und Drehzahlsensoren verbaut und Messungen auf verschiedenen landwirtschaftlichen Höfen durchgeführt. Die Messergebnisse wurden in Form von Lastkollektiven dargestellt und so die Belastungen im Antriebsstrang bestimmt. Die Tätigkeit „Laden“ hat mit 60 % den höchsten Zeitanteil innerhalb des Arbeitsspektrums und die Tätigkeit „Schieben“ weist die höchsten Belastungen im Antriebsstrang auf.

Erstmalig wurden Lastkollektive zur Auslegung eines Teleskopladers veröffentlicht, die als Bemessungskollektive zur Auslegung des Antriebsstrangs genutzt werden können.

Karlsruhe, im Juli 2010

Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer



# Ermittlung von prozessabhängigen Lastkollektiven eines hydrostatischen Fahrtriebsstrangs am Beispiel eines Teleskopladens

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Doktors der Ingenieurwissenschaften**

von der Fakultät für Maschinenbau

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

genehmigte

**Dissertation**

von

**Andreas Huber, M. Sc.**

aus Böhmenkirch

Tag der mündlichen Prüfung:

19. Juli 2010

Hauptreferent:

Professor Dr.-Ing. Marcus Geimer

Korreferent:

Professor Dr.-Ing. Stefan Böttinger



## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen (Mobima) des Instituts für Fahrzeugsystemtechnik (FAST) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing. Marcus Geimer, dem Leiter des Lehrstuhls für Mobile Arbeitsmaschinen, für die Ermöglichung der Promotion, die fachlichen Diskussionen und Anregungen sowie der Übernahme des Hauptreferats.

Herrn Professor Dr.-Ing. Stefan Böttinger, dem Leiter des Instituts für Agrartechnik der Universität Hohenheim, danke ich für die Übernahme des Korreferats und die Durchsicht meiner Arbeit.

Weiterhin danke ich Herrn Professor Dr.-Ing. Kai Furmans, dem Leiter des Instituts für Fördertechnik und Logistiksysteme des KIT, für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Der Rahmen für diese Arbeit bildete das Projekt "Lastkollektive Teleskoplader" der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA). Hierfür gilt der FVA Dank, besonders dem Arbeitskreis Berechnung und Simulation für die Unterstützung und die regelmäßigen Diskussionen. Bei der Firma Claas möchte ich mich für die Bereitstellung des Teleskopladers sowie der ständigen Unterstützung bedanken, die sich nicht nur auf die Versuchsdurchführung beschränkte.

Meinen Kollegen und Studenten danke ich für die sehr freundliche und angenehme Zusammenarbeit. Besonderer Dank gebührt Lars Völker, Christian Schwab, Thorsten Dreher, Roman Weidemann, Peter Dengler und Phillip Thiebes für die konstruktiven Ratschläge und die gute Arbeitsatmosphäre. Der Institutswerksatt möchte ich für die Unterstützung bei der Ausrüstung des Versuchsträgers danken.

Mein persönlicher Dank gilt meinen Eltern und Geschwistern, die mich auf meinem bisherigen Lebensweg stets gefördert und tatkräftig unterstützt haben. Gesa, Dir danke ich für die Durchsicht meiner Arbeit und die "nichttechnischen Ratschläge".

*Für meine Eltern*

## Kurzfassung

*Andreas Huber*

### Ermittlung von prozessabhängigen Lastkollektiven eines hydrostatischen Fahrtriebsstrangs am Beispiel eines Teleskopladere

Zu Beginn eines jeden Konstruktionsprozesses werden sichere Annahmen der Belastungen auf das Bauteil bzw. auf die Konstruktion, welche in dem vorgesehenen Nutzungszeitraum auftreten, benötigt. Diese Belastungen werden in so genannten Lastkollektiven dargestellt und dienen der Auslegung von Komponenten für den vorgegebenen Nutzungszeitraum.

Bei mobilen Arbeitsmaschinen stehen für die Auslegung von Fahrtriebsstrangkomponenten nur bedingt Lastkollektive zur Verfügung. Ein Grund dafür sind die hohen Kosten zur Erstellung von Lastkollektiven im Vergleich zu den geringen abgesetzten Stückzahlen bei einer hohen Maschinenvielfalt.

Innerhalb dieser Arbeit wurden Lastkollektive entwickelt, mit Hilfe derer die Betriebsfestigkeitsberechnung nach dem Nennspannungskonzept durchgeführt werden kann. Als Versuchsträger wurde ein Teleskoplader mit einem hydrostatischen Fahrtriebsstrang verwendet. Diese Lastkollektive wurden auf Basis von realen Belastungs-Zeit-Funktionen (BZF) in Abhängigkeit der Tätigkeit bzw. des Arbeitsprozesses erstellt. Die BZF wurden auf drei landwirtschaftlichen Testbetrieben im praktischen Einsatz aufgezeichnet.

Die Erstellung der prozessabhängigen Lastkollektive wurde mit der Rainflow-Klassierung und einer anschließenden Amplitudentransformation zu einem Amplitudenkollektiv bzw. einem Lastkollektiv durchgeführt. Durch eine zeitliche Gewichtung der einzelnen Lastkollektive können je nach Einsatzfokus Bemessungskollektive zur Auslegung von Antriebsstrangkomponenten eines Teleskopladere erstellt werden.

Die erstellten Bemessungskollektive für einen durchschnittlichen deutschen landwirtschaftlichen Betrieb haben eine gute Übereinstimmung zu den Testbetrieben gezeigt. Der Vergleich wurde mit schädigungsäquivalenten Einstufenersatzkollektiven, aufbauend auf der Regel *Miner elementar*, durchgeführt.

## Abstract

*Andreas Huber*

### Determination of process-oriented load spectra of a hydrostatic traction drive at the example of a telescopic loader

At the beginning of each design process, safe assumptions of loads on components or systems are required. Loads are represented in so-called load spectra. These load spectra are needed for a safe and robust design of components and systems. The load spectra must represent all loads which occur in the intended period of use.

Load spectra of traction drives for mobile machines are not always available or published. Reasons for this grievance are the expensive cost to generate load spectra compared to the few numbers of machines by high different applications.

In this research, load spectra to be used by a fatigue-life calculation were developed. The fatigue-life calculation is based on the nominal stress concept. A telescopic loader with a hydrostatic traction drive was used as a test vehicle. The load spectra were derived from real load-time histories depending on the work process. The load-time histories were collected at three agricultural farms.

These process-oriented load spectra were generated with the rainflow counting and an additional amplitude transformation. Through a weighting of the time quantity, process-oriented load spectra can be built to a load spectra for a fatigue-life calculation depending on the purposed application.

The built load spectrum for a fatigue-life calculation at a mean German agricultural farm shows a good according to the test farms. The comparison based on damage-equivalent load spectra calculated by the rule of *Miner elementar*.



## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	1
2	Stand der Wissenschaft und Technik .....	3
2.1	Betriebsfestigkeit .....	3
2.2	Lebensdauerberechnung .....	6
2.3	Beanspruchbarkeit .....	11
2.4	Beanspruchung .....	16
2.4.1	Klassierverfahren .....	19
2.4.2	Rainflow-Klassierung .....	21
2.4.3	Amplitudenkollektive .....	27
2.5	Schädigungsgleiches Rechteck-Ersatzkollektiv .....	30
2.6	Bisherige Lastkollektive mobiler Arbeitsmaschinen .....	33
2.7	Selbstfahrende Arbeitsmaschine: Teleskoplader .....	36
3	Eingesetzte Messtechnik und Versuchsablauf .....	39
3.1	Ausstattung des Teleskopladers mit Messtechnik .....	39
3.2	Versuchsablauf .....	43
4	Aufgabenspektrum eines Teleskopladers .....	45
4.1	Tätigkeiten .....	45
4.2	Zeitliche Anteile der einzelnen Tätigkeiten .....	48
4.3	Laden .....	51
4.3.1	Befüllen der Biogasanlage .....	51
4.3.2	Großballenladen .....	55

---

4.3.3	Analyse der Ladetätigkeiten.....	57
5	Lastkollektivauswertungen .....	61
5.1	Teilkollektive einzelner Tätigkeiten.....	72
5.2	Bemessungskollektiv .....	76
5.3	Schädigungsäquivalente Einstufenersatzkollektive.....	80
5.4	Beurteilung der erstellten Bemessungskollektive .....	82
5.5	Diskussion der Versuchsergebnisse .....	87
5.5.1	Beurteilung der Testbetriebe .....	88
5.5.2	Beurteilung der Komponenten .....	89
5.6	Ausblick.....	92
6	Zusammenfassung.....	95
7	Formelzeichen.....	97
8	Literatur.....	99
9	Anhang.....	105
9.1	Fragebogen zur Bestimmung des zeitlichen Einsatzprofils: .....	105
9.2	Beispieldarstellung der Klassenhäufigkeit .....	113

## 1 Einleitung

Die Anforderungen an mobile Arbeitsmaschinen werden zunehmend komplexer. Dabei wird ständig eine Erhöhung der Antriebs- und Arbeitsleistung gefordert, um die Maschinenproduktivität zu steigern. Zusätzlich müssen in Neuentwicklungen Verbesserungen bezüglich Wirkungsgrad, Verfügbarkeit, Ergonomie, Bedienbarkeit usw. erbracht werden, um dem Wettbewerbsdruck und den gesetzlichen Vorgaben stand zu halten.

In mobilen Arbeitmaschinen spielt der Antriebsstrang eine zentrale Rolle, über den, je nach Maschinenart, bis zu 100 % der installierten Leistung fließen können. Der Antriebsstrang von mobilen Arbeitsmaschinen wird individuell aufgrund der Maschinenart und des Einsatzgebietes ausgelegt. Bei mobilen Arbeitsmaschinen haben sich *mechanische*, *hydrodynamische* und *hydrostatische Getriebe* durchgesetzt und bewährt, welche auch miteinander kombiniert werden können. Während der Entwicklung muss die ausreichende Belastbarkeit der einzelnen Bauteile für eine hohe Verfügbarkeit der Arbeitsmaschine sichergestellt werden.

Zur sicheren und robusten Auslegung von Antriebsstrangkomponenten ist eine genaue Kenntnis der Belastungen, welche im Nutzungszeitraum auftreten, erforderlich. Diese genauen Kenntnisse der Belastungen werden oft als *Lastkollektive* bezeichnet und sind häufig bei Maschinen und Anlagen mit geringen Stückzahlauflagen nicht bzw. nur teilweise bekannt. Ohne diese Lastkollektive können die Antriebe nur nach theoretisch möglich auftretenden Lastannahmen mit Betriebsfaktoren und Erfahrungswerten aus ähnlichen Konstruktionen ausgelegt werden. Ungenaue Kenntnisse der Lastannahmen werden in der Regel mit zu hohen Sicherheitsfaktoren kompensiert, um das Risiko eines vorzeitigen Versagens, welche zu materiellen sowie immateriellen Schäden führen können, zu reduzieren.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, systematisch verlässliche und aussagekräftige Lastkollektive für hydrostatische Antriebsstrangkomponenten eines Teleskopladlers zu erstellen. Die Lastkollektive werden auf Basis von Belastungs-Zeit-Funktionen (BZF) –

welche im realen Einsatz aufgezeichnet wurden – mit etablierten Auswertemethoden erstellt. Durch die Differenzierung der jeweiligen Lastkollektive nach den Tätigkeiten besteht die Möglichkeit, *Bemessungskollektive* zur Auslegung der Antriebsstrangkomponenten für das gewünschte Einsatzprofil zu generieren.



**Abbildung 1:** Teleskoplader beim Laden von Großballen

Zur Aufzeichnung der BZF wurde ein im landwirtschaftlichen Bereich eingesetzter Teleskoplader der Firma Claas (**Abbildung 1**) verwendet. Dieser Teleskoplader verfügt über einen hydrostatischen Antrieb in Kombination mit einem mechanischen Verteilergetriebe und zwei Achsen.

Zur Messdatengenerierung wurde der Teleskoplader auf landwirtschaftlichen Betrieben unter realen Einsatzbedingungen mit erfahrenen Bedienern betrieben. Dies gewährleistete, dass die Messdaten realistisch und repräsentativ erstellt wurden.

Die folgende Arbeit behandelt die erforderlichen Grundlagen zur Erstellung von Lastkollektiven, die Ausrüstung des Versuchsträgers, den Versuchsablauf, Auswertungen zu den Tätigkeiten und der BZF, die Erstellung der jeweiligen Lastkollektive sowie des Bemessungskollektivs. Im Ausblick werden weiterführende Fragestellungen zu dieser Arbeit erläutert.

## 2 Stand der Wissenschaft und Technik

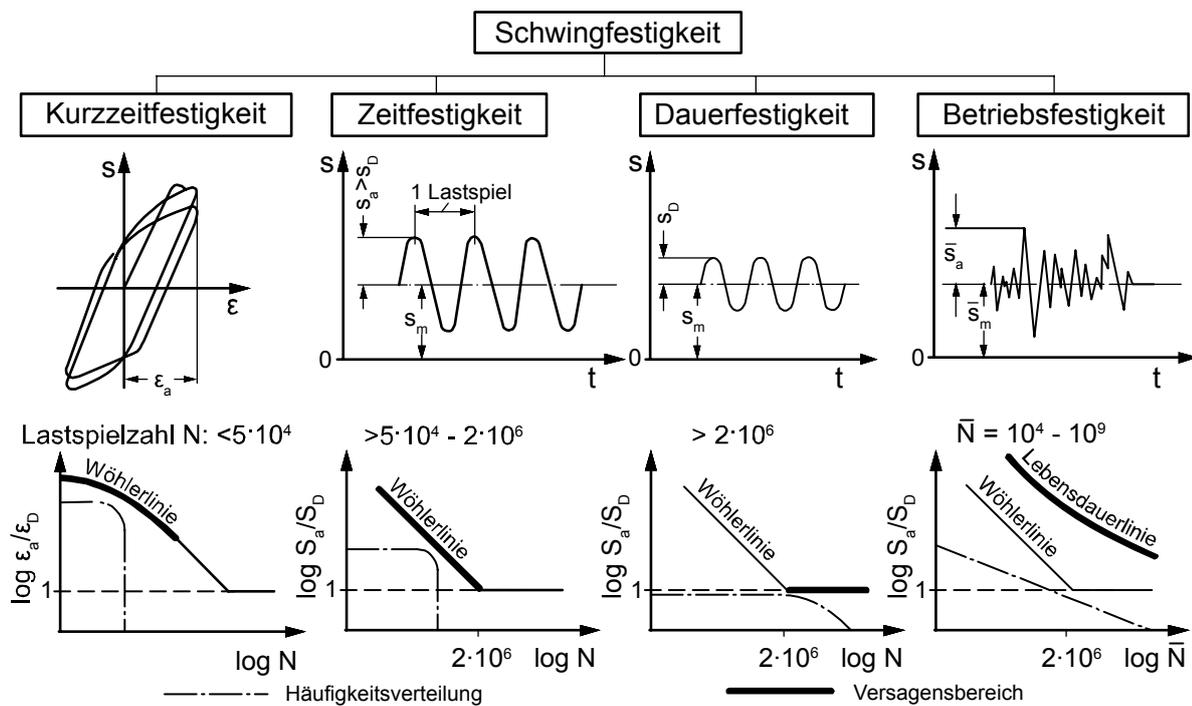
### 2.1 Betriebsfestigkeit

Die Konstruktion und Dimensionierung von Bauteilen, z. B. eines Fahrtriebsstranges, erfordert von dem Entwickler die genaue Kenntnis über die Belastungen und deren späteren Einsatzbedingungen. Durch die Konstruktion muss in erster Linie die gewünschte Funktion realisiert werden. Mit der darauf folgenden Dimensionierung werden die genauen Größen, meist an den kritischen Querschnittsflächen, festgelegt. Die Realisierung der Funktion mit der geeigneten Dimensionierung des Bauteils kann mehrere Iterationsschritte erfordern. Zudem muss das Fertigungsverfahren des Bauteils mit berücksichtigt werden, da diese einen Einfluss auf die Lebensdauer haben können, wie z. B. das verwendete Härteverfahren. ([Pah07], [Ehr07] oder [Gro07]) Bei sicherheitsrelevanten Bauteilen ist ein Festigkeitsnachweis teilweise gesetzlich vorgeschrieben und in den einschlägigen Regelwerken definiert. ([Hän03], [DIN18] oder [Hob97]) Der Festigkeitsnachweis kann aufgeteilt werden auf einen statischen Festigkeitsnachweis und einen Schwing- bzw. Betriebsfestigkeitsnachweis, welcher die dynamischen Lasten berücksichtigt. Beim statischen Festigkeitsnachweis wird auf Basis statischer Werkstoffkennwerte die Dimensionierung des Bauteils gegen plastisches Versagen oder Gewaltbruch infolge einzelner maximaler Belastungen (im statischen Sinn) überprüft. Eine Schädigung kann z. B. bei Anlagenteilen zusätzlich durch Transport oder Montage entstehen. Geringere Belastungen mit hoher Häufigkeit der Schwingspiele, welche im Betrieb auftreten, werden bei diesem statischen Festigkeitsnachweis nicht berücksichtigt und müssen mit Methoden der Schwingfestigkeit berücksichtigt werden.

In **Abbildung 2** wird die Schwingfestigkeit von Buxbaum wie folgt gegliedert: *Kurzzeit-, Zeit-, Dauer- und Betriebsfestigkeit*. In der oberen Hälfte der Abbildung ist für die Kurzzeitfestigkeit der Spannungs-Dehnungs-Verlauf und für die Zeit-, Dauer- und Betriebsfestigkeit die Belastungs-Zeit-Funktionen (BZF) dargestellt. Die zugehörigen Amplitudenkollektive und die Wöhlerlinien mit den relevanten Versagensbereichen

sind der unteren Hälfte zu entnehmen. Im Folgenden wird kurz auf die einzelnen Bereiche der Schwingfestigkeit eingegangen.

Die Kurzzeitfestigkeit (engl. Low-Cycle-Fatigue) überdeckt in etwa den Bereich bis  $5 \cdot 10^4$  Lastwechsel. Innerhalb dieses Bereichs kommt es im Werkstoff zu hohen plastischen Wechselverformungen. Die experimentelle Erfassung des Festigkeitsverhaltens wird mit Hilfe dehnungsgesteuerter Versuche an einachsig beanspruchten ungekerbten Flach- oder Rundstäben durchgeführt. Die Versuchsergebnisse werden als Wöhlerlinien der Dehnungsamplituden dargestellt, wobei üblicherweise zwischen den elastischen und plastischen Dehnungsanteilen unterschieden wird. [Bux92] Die Wöhlerlinie bzw. die Beanspruchbarkeit wird in Kapitel 2.3 näher erläutert.



**Abbildung 2:** Gliederung der Schwingfestigkeit [Bux92]

Lastwechsel von etwa  $5 \cdot 10^4$  bis  $2 \cdot 10^6$  mit Beanspruchungsamplituden oberhalb der Dauerfestigkeitsamplituden sind im Bereich der Zeitfestigkeit angesiedelt. Beim Wöhlerversuch wird die Anzahl der Lastwechsel in Abhängigkeit der Beanspruchung ermittelt, wobei die Amplituden konstant gehalten werden. Diese Abhängigkeit zwischen den Beanspruchungsamplituden und den Lastwechseln lässt sich in diesem

Bereich durch ein empirisches Spannungskriterium mit der **Gleichung 1** beschreiben. [Bux92] Die Punkte der Wertepaare  $S_{a,1}:N_1$  und  $S_{a,2}:N_2$  erzeugen im doppellogarithmischen Netz eine Gerade mit dem Neigungsexponenten  $k$ .

$$S_{a,1} = S_{a,2} \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^{-\frac{1}{k}} \quad (1)$$

Als Dauerfestigkeitsbereich wird der Bereich bezeichnet, in dem mehr als  $2 \cdot 10^6$  Lastwechsel (Grenzwahrszahl) bei einer konstanten Beanspruchungsamplitude ertragen werden. In einer Wöhlerlinie entspricht dies dem horizontalen Bereich ( $k = \infty$ ). Versuche haben gezeigt, dass diese pauschale Annahme nicht dem realen Werkstoffverhalten entspricht. Beanspruchungsamplituden, die geringer als die Dauerfestigkeitsgrenze sind, tragen ebenso zur Ermüdung des Werkstoffs und somit zur Schädigung des Bauteils bei. Eine dauerfeste Dimensionierung von Bauteilen sollte aus ökonomischen Gesichtspunkten und Aspekten des Leichtbaus nicht vorgenommen werden, außer es wird gezielt durch die Anwendung gefordert.

Die Ingenieursdisziplin Betriebsfestigkeit befasst sich ganz allgemein mit der wirtschaftlichen und sicheren Dimensionierung von durch Schwingbruch gefährdeten Bauteilen für eine angestrebte bzw. vorgegebene Nutzungszeit. Zum Beispiel wäre eine dauerfeste Dimensionierung von Flugzeugbauteilen undenkbar, da sich in diesem Fall das Flugzeugleergewicht erhöht und dies aus wirtschaftlicher Sicht für den Betreiber inakzeptabel wäre. Haibach beschreibt in [Hai06] die Betriebsfestigkeit wie folgt:

*"Die Problemstellung der Betriebsfestigkeit ergibt sich aus der technischen, wirtschaftlichen und haftungsrechtlichen Notwendigkeit, Schwingbruchschäden durch eine geeignete Gestaltung, Bemessung, Fertigung und Qualitätssicherung der Bauteile zu vermeiden. Schon im Zuge der Entwicklung muss unter Einsatz geeigneter Methoden, Verfahren und Werkzeuge auf ihr befriedigendes Betriebsfestigkeitsverhalten konsequent hingewirkt werden."*

Experimentelle Betriebsfestigkeitsversuche sind sehr zeit- und kostenintensiv, so dass diese in der Konzeptphase eines Bauteils – wenn möglich – auf ein Minimum reduziert werden müssen. Um den immer kürzer werdenden Entwicklungszeiträumen und dem Kostendruck gerecht zu werden, eignen sich daher vorhergehende Betriebsfestigkeitsberechnungen. [Gün95] Betriebsfestigkeitsberechnungen werden oft auch als Lebensdauerberechnung bezeichnet, obwohl eine exakte absolute Berechnung der Lebensdauer nicht möglich ist. Alle Bauteile unterliegen einer Streuung beim Ausfall- bzw. Überlebensverhalten, so dass diese nur über statistische Methoden bestimmt bzw. abgeschätzt werden können. Aus diesem Grund wird oft der Ausdruck der Lebensdauerabschätzung verwendet. [Nik08] In folgendem Kapitel wird auf die verschiedenen Konzepte der Lebensdauerberechnungen eingegangen.

## 2.2 Lebensdauerberechnung

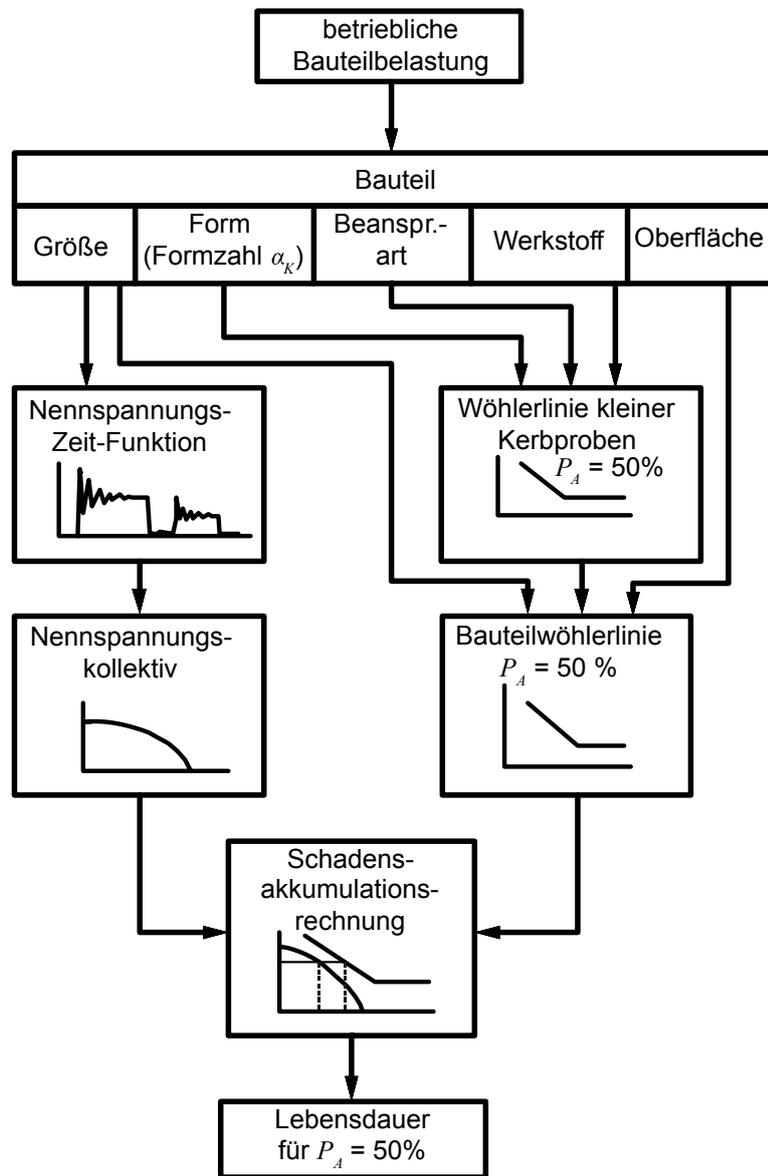
Für die Lebensdauerberechnung bzw. -abschätzung von ermüdungsgefährdeten Bauteilen stehen verschiedene Berechnungskonzepte zur Verfügung. Die drei gängigsten Berechnungskonzepte sind das *Nennspannungskonzept*, das *Örtliche Konzept* und das *Rissfortschrittskonzept*. Bei diesen drei genannten Konzepten liegt im Wesentlichen das Modell der Schadensakkumulation nach Miner zu Grunde. [Nik08]

Die lineare Schadensakkumulationshypothese wurde erstmals von Palmgren im Jahre 1924 für Kugellager vorgestellt. [Pal24] Später wurde dieser Ansatz, der nur zur Berechnung der Kugellagerlebensdauer diente, von Miner 1945 für die allgemeine Bauteilauslegung ausgedehnt. [Min45] Diese Hypothese besagt, dass bei jedem Schwingspiel eine Teilschädigung verursacht wird. Diese verursachten Teilschädigungen sind unabhängig von den bereits vorherigen Schwingspielen (siehe **Gleichung 2**). Die Teilschädigungen  $D_i$  werden zur einer Gesamtschädigung  $D$  aufsummiert. Bezogen auf die Belastungsstufe  $i$  gibt  $N_i$  die Anriss- oder Bruchschwingspielzahl und  $h_i$  die Schwingspielzahl des Kollektivs an. Bei einer Schädigungssumme  $D \geq 1$  ist theoretisch ein Versagen des Bauteils eingetreten.

$$D = \sum_{i=1}^n D_i = \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{N_i} \quad (2)$$

Beim Nennspannungskonzept wird die Beanspruchung des kritischen Bauteilquerschnitts pauschal durch die Nennspannungen beschrieben. Einflüsse, welche in Folge der Geometrie, Fertigung usw. entstehen, werden durch die Bauteilwöhlerlinie berücksichtigt. [Gud00] In **Abbildung 3** ist der Ablauf einer Lebensdauerberechnung nach dem Nennspannungskonzept dargestellt.

Als Eingangsgrößen müssen die betriebliche Bauteilbelastung und die Bauteileigenschaften wie Bauteilgröße, Formzahl, Beanspruchungsart, Werkstoff und Oberfläche zur Verfügung stehen. Mit diesen Eingangsinformationen kann eine Nennspannungs-Zeit-Funktion aus der Bauteilbelastung berechnet werden. Da in häufigen Fällen keine experimentell erstellte Bauteilwöhlerlinie vorliegt, kann diese mit Hilfe der oben genannten Bauteileigenschaften und einer Wöhlerlinie für kleine Kerbproben erstellt bzw. abgeschätzt werden. Das Nennspannungskollektiv wird der Bauteilwöhlerlinie in der Schadensakkumulationsrechnung gegenübergestellt. Die Teilschädigungen der einzelnen Laststufen werden berechnet und anschließend zur Gesamtschädigung aufsummiert. Wie bereits erwähnt, unterliegen Belastungskollektive und Wöhlerlinien einer Streuung in ihrem Auftreten bei gleichen Randbedingungen. Ordnet man dem Belastungskollektiv eine Wahrscheinlichkeit von 50 % und der Wöhlerlinie eine Ausfallwahrscheinlichkeit von ebenfalls 50 % zu, so erhält man für die errechnete Lebensdauer ebenfalls eine Ausfallwahrscheinlichkeit von 50 % für den berechneten Zeitraum. Die so erhaltene Lebensdauer kann anschließend auf eine geforderte Ausfallwahrscheinlichkeit umgerechnet werden. [Gud00]



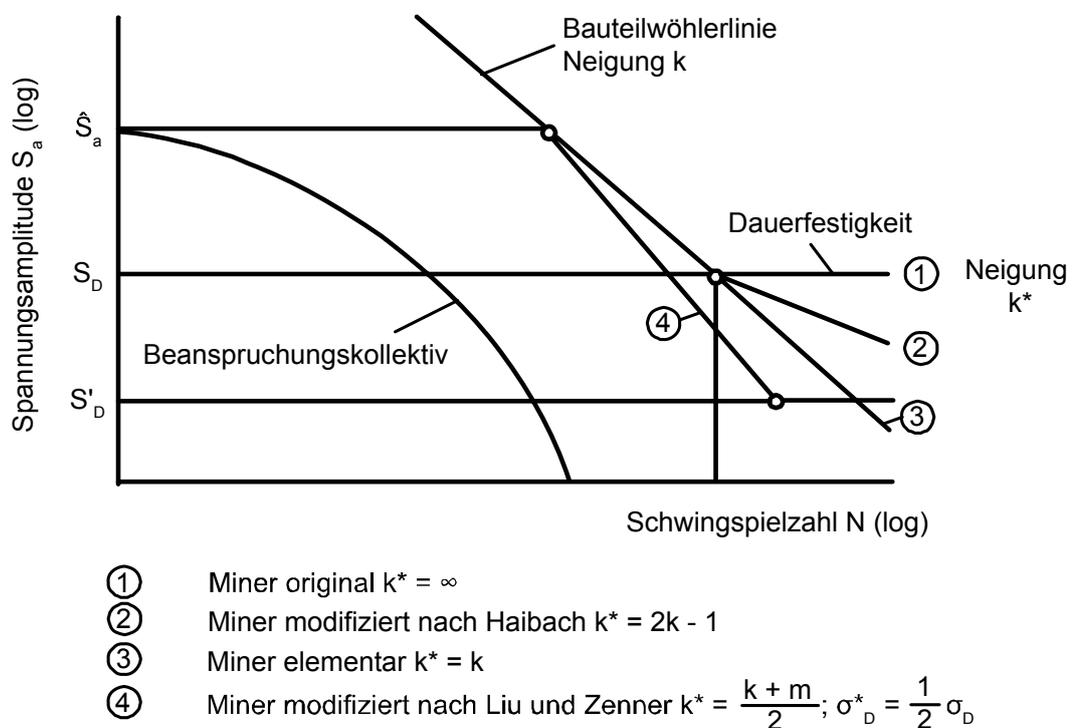
**Abbildung 3:** Berechnung der Lebensdauer für  $P_A = 50\%$  ( $P_A =$  Ausfallwahrscheinlichkeit) nach dem Nennspannungskonzept in einer auf dem Nennspannungskollektiv und der Wöhlerlinie kleiner Kerbproben basierenden Variante [Gud00]

Wie bereits in Kapitel 2.1 kurz vorgestellt, wurde bei Versuchen mit einer Belastungsamplitude unterhalb der Dauerfestigkeit und einer Schwingspielzahl  $> 2 \cdot 10^6$  ein Ermüden des Werkstoffs festgestellt. Durch verschiedene Varianten der linearen Schadensakkumulationsrechnung, basierend auf dem Nennspannungskonzept, kann dem zusätzlichen Ermüden des Werkstoffs im Dauerfestigkeitsbereich Rechnung getragen werden. Varianten der linearen Schadensakkumulationsrechnung sind: die

*Miner-Regel in der Originalform, die Miner-Regel in der elementaren Form, die Modifizierte Form der Miner-Regel nach Haibach und die Modifizierte Form der Miner-Regel nach Liu und Zenner.*

Darüber hinaus gibt es weitere modifizierte Varianten, welche in speziellen Sonderfällen zum Einsatz kommen können, aber hier nicht weiter verfolgt werden.

In **Abbildung 4** sind die vier Modifikationen der Miner-Regel dargestellt. Die Modifikationen der Miner-Regel unterscheiden sich bis auf die Modifikation von Liu und Zenner dadurch, dass der Verlauf der Wöhlerlinie im Bereich der Dauerfestigkeit mit verschiedenen Neigungen angepasst wird. Liu und Zenner passen die Neigung der Wöhlerlinie schon im Bereich der Zeitfestigkeit an und führen die Wöhlerlinie bis zur halben Dauerfestigkeitsamplitude mit einer Neigung  $k^* = \frac{k+m}{2}$  fort, wobei  $m$  die Neigung der so genannten Rissfortschrittswöhlerlinie ist. Auf die Rissfortschrittswöhlerlinie wird innerhalb dieser Arbeit nicht näher eingegangen und kann der Literatur wie z. B. [Gud00], [Hai06], [Bux92] usw. entnommen werden.



**Abbildung 4:** Modifikationen der Miner-Regel [Esd07]

Mit der *Relativen Miner-Regel* kann eine so genannte „Relative Lebensdauerabschätzung“ durchgeführt werden. Der Hintergrund dieses Vorgehens ist, dass die errechneten Lebensdauern erheblich von den tatsächlichen Lebensdauern abweichen. D. h., dass anstelle des Versagenskriterium  $D = 1$  einen Wert für  $D$  zu verwenden, der aus Versuchen mit einer ähnlichen BZF und ähnlichen Bauteilparametern ermittelt wurde. [Gud00] Zur Korrektur wird das Verhältnis aus der Lebensdauer des Versuches  $\hat{N}_{Versuch}$  zur Lebensdauer der Rechnung  $\hat{N}_{Rechnung}$  berechnet (siehe **Gleichung 3**).

$$D_{rel} = \frac{\hat{N}_{Versuch}}{\hat{N}_{Rechnung}} \quad (3)$$

In der Schadensakkumulationsrechnung wird anschließend mit der relativen Schadenssumme  $D_{rel}$  die „angepasste“ Lebensdauer ermittelt. Mit **Gleichung 4** wird der mathematische Zusammenhang für  $\hat{N}$  (Lebensdauer) dargestellt, wobei das Lastkollektiv mit dem Kollektivumfang  $H_0$  gegeben sein muss. [Nik08]

$$\hat{N} = H_0 \frac{D_{rel}}{\sum_{i=1}^k D_i} \quad (4)$$

In [Kot94] und [Kot97] ist eine Datensammlung von zusammengehörigen Ergebnissen von Einstufen- (Wöhler) und Randomversuchen für Maschinenbauteile erstellt worden. Aufbauend auf dieser Datensammlung wurden für charakteristische Werkstoffgruppen, Bauteile und Beanspruchungsarten die Schadenssummen von Einstufenversuchen und Randomversuchen für Maschinenbauteile erarbeitet und ausgewertet.

Die Betrachtung des örtlichen, an der versagenskritischen Stelle vorherrschenden Spannungs-Dehnungs-Zustandes bei der Betriebsfestigkeitsberechnung wird als Örtliches Konzept bezeichnet. Als Voraussetzung zur Anwendung dieses Konzeptes ist die Kenntnis über geschlossene elastisch-plastische Spannungs-Dehnungs-Hysteresen notwendig. Die Modellierung des zyklischen Werkstoffverhaltens des höchstbean-

spruchten Volumenelements kommt dem tatsächlichen Schädigungsmechanismus nahe. Dennoch ist die Streuspanne der Schadenssumme im Vergleich zum Nennspannungskonzept deutlich größer, was in erster Linie an der Übertragbarkeit vom Werkstoffelement zum Bauteil liegt. [Eul99] Das Örtliche Konzept eignet sich gut für die Anbindung an die Finite-Elemente-Berechnung. [Pöt00]

Das Rissfortschrittskonzept dient zur Überprüfung bei Annahme rissähnlicher Fehlstellen oder zur Untersuchung von Schadensfällen. Mit diesem Konzept sollen Fragestellungen der statischen Restfestigkeit oder der Restlebensdauer angerissener Bauteile beantwortet werden. Bei Anwendung dieses Konzeptes treten Probleme bei der Ermittlung geeigneter Spannungsintensitätswerte für komplexe Bauteilgeometrien und die Bestimmung der Werkstoffkonstanten bei einer inhomogenen Festigkeitsverteilung über den Bauteilquerschnitt auf. [Nik08]

Die bereits vorgestellten Konzepte zur Lebensdauerberechnung sind in dieser allgemeinen Form nur für einachsige Beanspruchungen gültig. Häufig treten in realen Bauteilen mehrachsige Beanspruchungen auf. Als Beispiel für eine mehrachsige Belastung kann ein Fahrzeugrad genannt werden. An diesem Rad greifen Längs-, Quer- und Vertikalkräfte an. Eine Absicherung der Lebensdauer von sicherheitsrelevanten Bauteilen bei mehrachsiger Beanspruchung erfolgt aus diesem Grund ausschließlich experimentell, was einen nicht zu verachtenden zeitlichen und finanziellen Aufwand nach sich zieht. [Gud00] Mehrachsige Belastungen werden innerhalb dieser Arbeit nicht weiter behandelt.

Innerhalb dieses Kapitels wurden die gängigsten Konzepte zur Lebensdauerberechnung kurz vorgestellt. Weitere Informationen zu den Konzepten sind der angegebenen Literatur zu entnehmen. Für die weitere Arbeit wird für die Belange der Lebensdauerberechnung nur noch das Nennspannungskonzept verwendet.

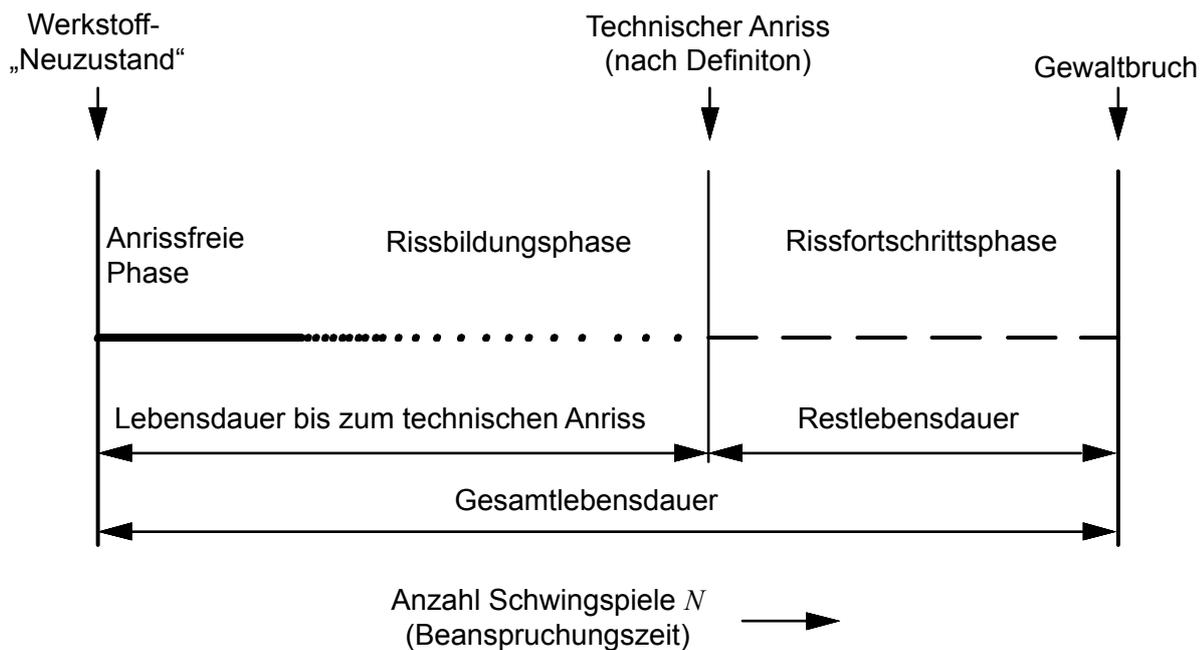
### **2.3 Beanspruchbarkeit**

Die Beanspruchbarkeit beschreibt den ausgewählten Werkstoff, inwieweit dieser unter konstanter Schwingbelastung beanspruchbar ist und wird in Form einer *Wöhlerlinie*

dargestellt. Wöhler (Preußischer Eisenbahningenieur) belegte durch systematisierte Schwingversuche, dass die Festigkeitswerte bei Wechselbeanspruchungen unter denen der statischen Festigkeit liegen. Der Wöhlerversuch ist in DIN 50100 als Dauerschwingversuch genormt. [DIN50] Alle in einem Werkstoff ablaufenden Schädigungsvorgänge bei einer Schwingbeanspruchung werden auch Ermüdung genannt.

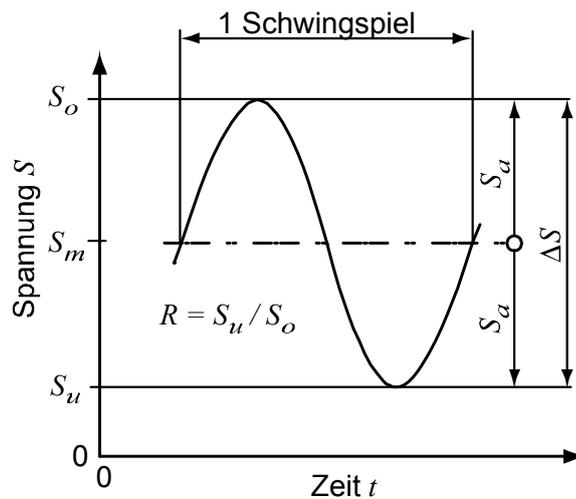
In **Abbildung 5** sind drei Phasen der Werkstoffermüdung dargestellt. Die einzelnen Anteile der Ermüdungsstadien bezogen auf die Gesamtlebensdauer sind abhängig vom Werkstoff, Werkstoffzustand, der Beanspruchung, der Bauteilgröße und der Bauteilgestalt. Die Definition für den technischen Anriss lautet wie folgt:

*„Als technischer Anriss gilt ein Riss, der mit den betrieblich anwendbaren, üblichen Inspektionsverfahren vor Ort entdeckbar ist.“*



**Abbildung 5:** Phasen der Werkstoffermüdung, Lebensdauerphasen [Gud00]

Für den oben genannten Wöhlerversuch, den Einstufenversuch, ist ein Schwingspiel mit konstanter Amplitude die Basis. Zur Kennzeichnung eines einzelnen Schwingspiels werden die Begriffe und Bezeichnungen nach DIN 50100 verwendet. In **Abbildung 6** ist die Kennzeichnung eines Schwingspiels dargestellt.



**Abbildung 6:** Kennzeichnung eines Schwingspiels [Hai06]

Die **Gleichungen 5** und **6** stellen die Beziehungen der einzelnen Parameter zueinander dar. Aus der Oberspannung  $S_o$  und der Unterspannung  $S_u$  kann die Mittelspannung  $S_m$  berechnet werden. Ebenfalls lässt sich die Spannungsamplitude  $S_a$  aus der Ober- und Unterspannung berechnen. Mit  $R$  ist das Spannungsverhältnis (**Gleichung 7**) definiert und kann ebenfalls aus der Ober- und Unterspannung ermittelt werden.

$$S_m = \frac{S_o + S_u}{2} \quad (5)$$

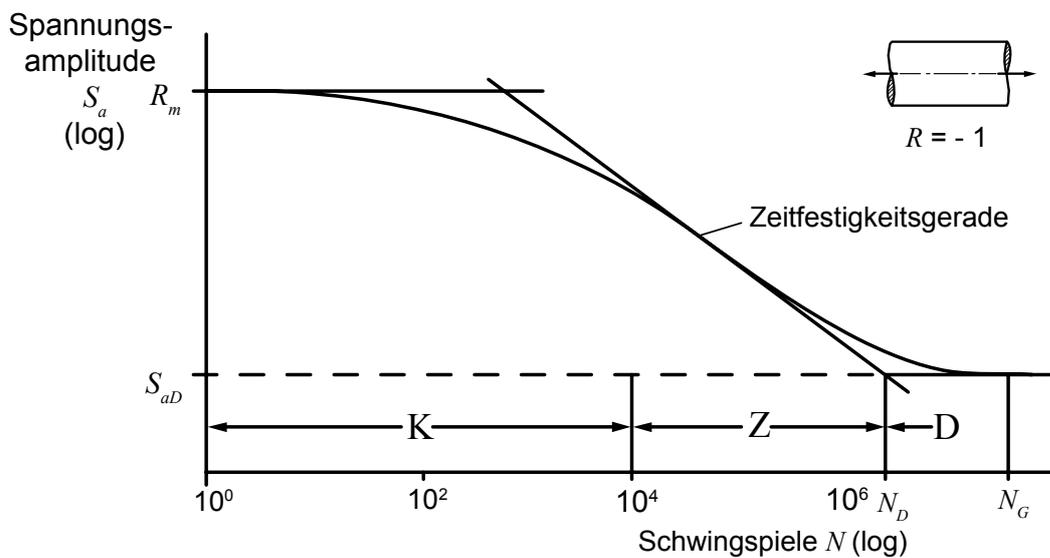
$$S_a = \frac{S_o - S_u}{2} \quad (6)$$

Das Spannungsverhältnis berechnet sich durch

$$R = \frac{S_u}{S_o} \quad (7)$$

In **Abbildung 7** ist die Wöhlerlinie schematisch dargestellt. Die Skalierung beider Achsen erfolgt üblicherweise logarithmisch. Die Abszisse wurde in die drei Bereiche die Kurzzeit- (K), Zeit- (Z), und Dauerfestigkeit (D) eingeteilt. Die Erläuterungen zu den einzelnen Bereichen kann dem Kapitel 2.1 entnommen werden. Die Versuchsergebnisse des Wöhlerversuchs beschreiben die Lage der Wöhlerlinie. Durch eine Reg-

ressionsrechnung wird die Wöhlerlinie üblicherweise mit einer Überlebens- bzw. Ausfallwahrscheinlichkeit  $P_A = 50\%$  ermittelt, da die Versuchsergebnisse einer Streuung unterliegen. Wenn es sich bei den Versuchsergebnissen um eine Normalverteilung handelt und die Streuung bekannt ist, kann die bekannte Überlebenswahrscheinlichkeit auf eine andere geforderte Überlebenswahrscheinlichkeit umgerechnet werden. [Mau99] Zur vollständigen Beschreibung der Wöhlerlinie muss die Ausfallwahrscheinlichkeit  $P_A$  mit angegeben werden.



**Abbildung 7:** Schematische Darstellung Wöhlerlinie [Mau99]

Je nach Verwendungszweck kann zwischen Werkstoff- und Bauteilwöhlerlinien unterschieden werden. Werkstoffwöhlerlinien werden überwiegend mit kleinen glatten Proben unter Laborbedingungen gewonnen. Für eine Lebensdauerberechnung eines Bauteils werden Bauteilwöhlerlinien benötigt. Für große Bauteile sind der experimentellen Ermittlung dieser Bauteilwöhlerlinien aufgrund prüftechnischer und wirtschaftlicher Aspekte Grenzen gesetzt. Ersatzweise können Wöhlerlinien von kleinen Kerbproben verwendet werden bzw. durch Verwendung der Parameter Bauteilgröße, Formzahl, Beanspruchungsart, Werkstoff und Oberfläche lassen sich diese zu Bauteilwöhlerlinien abschätzen. Beanspruchungsart und die Formzahl der Wöhlerlinien der Kerbproben müssen der Beanspruchungsart und der Formzahl des Bauteils entsprechen. [Gud00] Alternativ können Bauteilwöhlerlinien mit Hilfe statischer Werk-

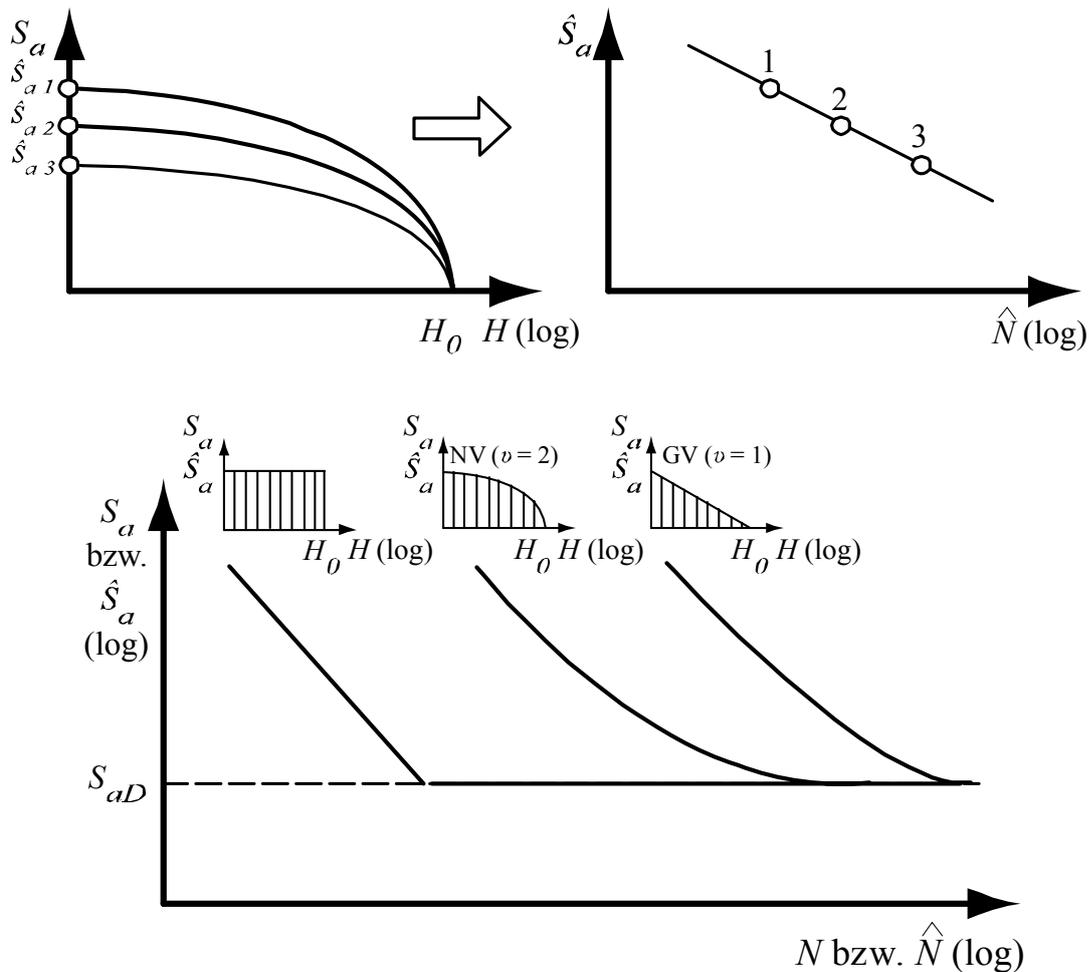
stoffkennwerte abgeschätzt werden. Hück stellte 1983 ein Verfahren vor, mit dem es möglich ist, so genannte *Synthetische Wöhlerlinien* zu erstellen. [Hüc83]

Heute stehen mehrere Verfahren zur Erstellung von synthetischen Wöhlerlinien zur Verfügung, welche hier in dieser Arbeit nur genannt werden:

- Synthetische Wöhlerlinie VDEh
- Synthetische Wöhlerlinie FKM
- Synthetische Wöhlerlinie Bergmann
- Synthetische Wöhlerlinie KNN (Künstlich Neuronale Netze)

Der Wöhlerversuch stellt so gesehen eine Sonderform der Beanspruchung dar, da in der Regel auf Grund der Betriebsbelastungen sich veränderliche Beanspruchungen einstellen. Diese veränderlichen Beanspruchungen werden in Form von Kollektiven dargestellt.

In der oberen Hälfte der **Abbildung 8** ist schematisch die Lebensdauerlinie (rechts), auch Gaßnerlinien genannt, in Abhängigkeit von Lastkollektiven mit unterschiedlichen Kollektivhöchstwerten dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich bei abnehmendem Kollektivhöchstwert die Lebensdauer verlängert. Da der Wöhlerversuch einer Sonderform des Betriebsfestigkeitsversuchs entspricht, ist dieselbe Darstellungsform möglich, d. h. die Beanspruchung wird über der Schwingspielzahl aufgetragen. In der unteren Hälfte ist dargestellt, wie die Lebensdauerlinien von der Kollektivform (siehe Kapitel 2.4) abhängt. Die linke Kollektivform, das Rechteckkollektiv, entspricht dem Wöhlerversuch. Die mittlere Kollektivform entspricht einer Normalverteilung und die rechte Kollektivform entspricht der Geradenverteilung einer BZF. Diese Grafiken sollen die Einflüsse auf die Lebensdauerlinie darstellen.



**Abbildung 8:** Schematische Darstellung der Lebensdauerlinie [Nik08].

Oben: Erstellung der Lebensdauerlinie in Abhängigkeit des Kollektivhöchstwert,

Unten: Vergleichsdarstellung der verschiedenen Kollektivformen auf die Lebensdauerlinie (NV ( $v=2$ ): Normalverteilung, GV ( $v=1$ ): Geradlinienverteilung)

In dem folgenden Kapitel werden die Grundlagen der Beanspruchung von Bauteilen, auf dem der Kern dieser Arbeit aufbaut, behandelt.

## 2.4 Beanspruchung

Für eine Lebensdauerberechnung benötigt man neben der Kenntnis der Belastbarkeit (Wöhlerlinie) die Information über die Belastung bzw. die Beanspruchung des Bauteils. Umgangssprachlich werden die Informationen über die Belastungen als Lastkollektiv bezeichnet. Eine Abschätzung der im Betrieb auftretenden Belastungen kann

durch Erfahrungswerte, durch Simulation oder durch Aufzeichnung der Belastungen von bereits existierenden Maschinen – mit entsprechender Auswertung – erfolgen. Innerhalb dieses Kapitels werden die Grundlagen zur Belastung bzw. Beanspruchung mit dem Fokus der Belastungsaufzeichnung und deren Auswertung vorgestellt. Dabei werden auch Verfahren zur Erstellung von Kollektiven für die weiteren Betriebsfestigkeitsberechnungen erläutert.

Der Begriff Beanspruchung wird oft als Oberbegriff verwendet und ist nicht einheitlich definiert. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit in Anlehnung an [Bux92] und [Nik08] folgende Begriffsdefinition formuliert und verwendet:

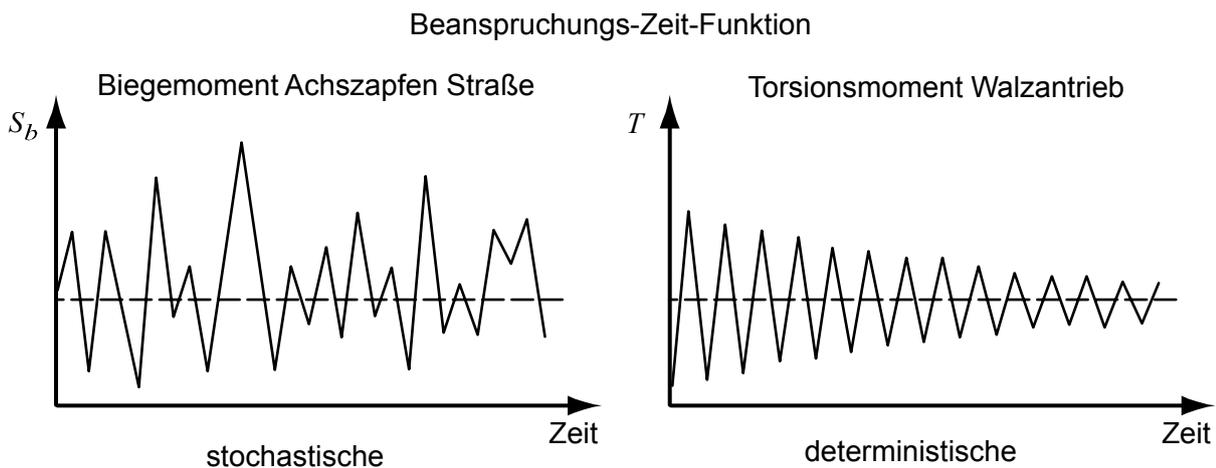
**Belastung:** *Eine Belastung erfolgt durch eine von außen auf das Bauteil wirkende „Last“. Dies kann eine Kraft oder ein Drehmoment sein. Innerhalb dieser Arbeit werden nur die äußeren Belastungen berücksichtigt.*

**Beanspruchung:** *Durch die oben genannte Belastung tritt im Bauteil eine Beanspruchung (Spannungen und Dehnungen) auf. Durch eine Kalibrierung lassen sich somit die Schnittkräfte bzw. -momente (Nennspannungen) bestimmen.*

**Spannungen** *Spannungen sind die örtlich auftretenden Spannungen.*

Aufgezeichnete zeitlich veränderliche Belastungen, so genannte Belastungs-Zeit-Funktionen (BZF), können in *Deterministische Belastungen* (bestimmbar) oder *Stochastische Belastungen* (zufallsbedingt) unterteilt werden. Deterministische Belastungen lassen sich mathematisch beschreiben, in dem Fourier-Reihen angenähert werden. Diese treten häufig bei Arbeitsprozessen wie Schmieden, Pressen, Walzen, Mahlen usw. auf. Die Möglichkeit einer weiteren Unterteilung der deterministischen Belastungen in kontinuierliche und diskontinuierliche Abläufe soll an dieser Stelle nur erwähnt werden. Stochastische Signale können mit Hilfe statistischer Methoden beschrieben werden. Typischerweise treten solche Belastungen bei Fahrzeugen, Flug-

zeugen oder Off-Shore-Anlagen auf. Die stochastischen Belastungen sind auf die z. B. unregelmäßigen Fahrbahnzustände (Schlechtweg), Böen oder Seegang zurückzuführen. Ein Vergleich zwischen den stochastischen und deterministischen BZF ist in **Abbildung 9** am Beispiel des Biegemoments eines Achszapfens bei Straßenfahrt (stochastisch) und des Torsionsmoments eines Walzantriebs (deterministisch) dargestellt.



**Abbildung 9:** Beispiele für stochastische und deterministische Belastungs-Zeit-Funktionen [Nik08]

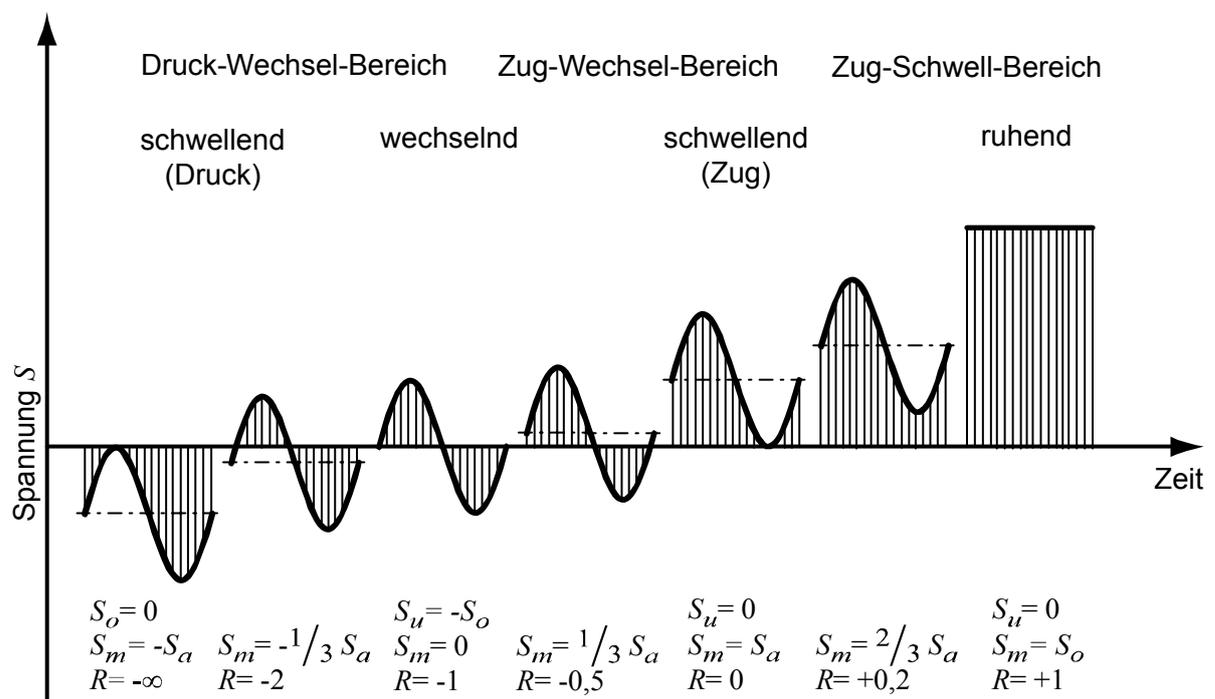
BZF werden durch Messungen an den gewünschten Bauteilen während des Einsatzes gewonnen. Messungen an realen Maschinen erstrecken sich aus Kostengründen nur über einen relativ kurzen Zeitraum, bezogen auf die gewünschte Nutzungsdauer. Sonderereignisse<sup>1</sup> wie Störungen, Fehlbedienung und Missbrauch, die zu einer Reduzierung der Lebensdauer führen, werden dabei nicht repräsentativ erfasst.

Die Beschreibung der Mittelspannungsänderung einer BZF kann mit dem Unregelmäßigkeitsfaktor  $I$  vorgenommen werden. Dieser ist definiert als Quotient aus der Anzahl der Nulldurchgänge  $H_0$  einer Lastfolge und der Anzahl an Umkehrpunkten  $H_u$ .

<sup>1</sup> Sonderereignisse sind Betriebszustände, die nicht zu einem normalen Betrieb gehören und mit einer relativ geringen Häufigkeit auftreten.

$$I = \frac{H_o}{H_u} \quad (8)$$

In **Abbildung 10** sind die möglichen Beanspruchungsfälle einer BZF und die zugehörigen Spannungsverhältnisse dargestellt. Das Spannungsverhältnis  $R$  berechnet sich nach Gleichung 7 aus der Oberspannung  $S_o$  und der Unterspannung  $S_u$ . Als weitere statistische Kennwerte sind der *Mittelwert*, der *Effektivwert*, der *Crest-Faktor* und die *Varianz* zu nennen. [Pöt00]



**Abbildung 10:** Beanspruchungsfälle und Spannungsverhältnisse [Hai06]

Für Lebensdauerberechnungen werden Kollektive, also Häufigkeitsverteilungen der Amplituden, benötigt. Aus diesem Grund werden die BZF klassiert. In den folgenden Abschnitten sollen die Klassierverfahren, auch Zählverfahren genannt, erläutert werden.

### 2.4.1 Klassierverfahren

Klassier- bzw. Zählverfahren werden dazu benötigt, um die gemessenen Belastungs-Zeit-Funktionen (BZF) für eine Betriebsfestigkeitsberechnung anwenden zu können.

Die Signalform, der Frequenzinhalt und die Reihenfolge des Auftretens der Ereignisse gehen dabei verloren. Bei einer Betriebsfestigkeitsberechnung interessieren in erster Linie die Größe der Beanspruchung, also die Amplitude, und deren Häufigkeit des Auftretens. [Wes88] Der Frequenzinhalt darf nicht vernachlässigt werden, wenn die Beanspruchbarkeit (Wöhlerlinie) nicht nur eine Funktion der Häufigkeit der auftretenden Beanspruchung ist, sondern auch die der Zeit, z. B. bei hohen Temperaturen oder in korrosivem Medium. [Nik08]

Durch die Anforderungen der Betriebsfestigkeit sind eine Reihe von Zählverfahren entwickelt worden. Gegenwärtig werden in der Praxis mehrere unterschiedliche Zählverfahren angewendet, vielfach auch parallel. Dies hat den Vorteil, dass die bestehende Datensammlung mit den aktuellen Ergebnissen verglichen werden kann. In dem FVA-Merkblatt 0/14 ([Wes88]) werden alle für die Betriebsfestigkeitsberechnung relevanten Zählverfahren vorgestellt und erläutert. Zudem wird ein Vergleich der einzelnen Verfahren vorgenommen und mit Beispielen dargestellt. [Wes88]

Bei den Zählverfahren kann zwischen ein- und zweiparametrischen Zählverfahren unterschieden werden. Einparametrische Zählverfahren werden häufig verwendet, um eine schnelle Aussage z. B. über die Häufigkeit einer Geschwindigkeit bei einer bestimmten Strecke zu erhalten. Für die Betriebsfestigkeitsberechnungen werden zweiparametrische Zählverfahren empfohlen, weil der Informationsgehalt höher ist. Aus den Ergebnissen zweiparametrischer Zählverfahren lassen sich Ergebnisse einparametrischer Zählverfahren ableiten. [Gud00] Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt in der Regel in einer Matrixform. In der DIN 45667 ([DIN45]) wurden die Zählverfahren genormt. Buxbaum beschreibt in ([Bux92, Seite 12]) seine Einschätzung zu dieser Norm wie folgt: *"Die vorgenannte Norm kann daher nur als unverbindliche Empfehlung dienen. Insbesondere sind die in der Norm vorgeschlagenen, neuen Bezeichnungen der Zählverfahren unglücklich gewählt..."*.

Bei der Anwendung aller Zählverfahren werden über den Messbereich gleich große Klassen gebildet. Die Klassenbreite kann aus der oberen und unteren physikalischen

Grenze sowie der Klassenanzahl berechnet werden. Somit lassen sich die physikalischen Größen den Klassen zuordnen.

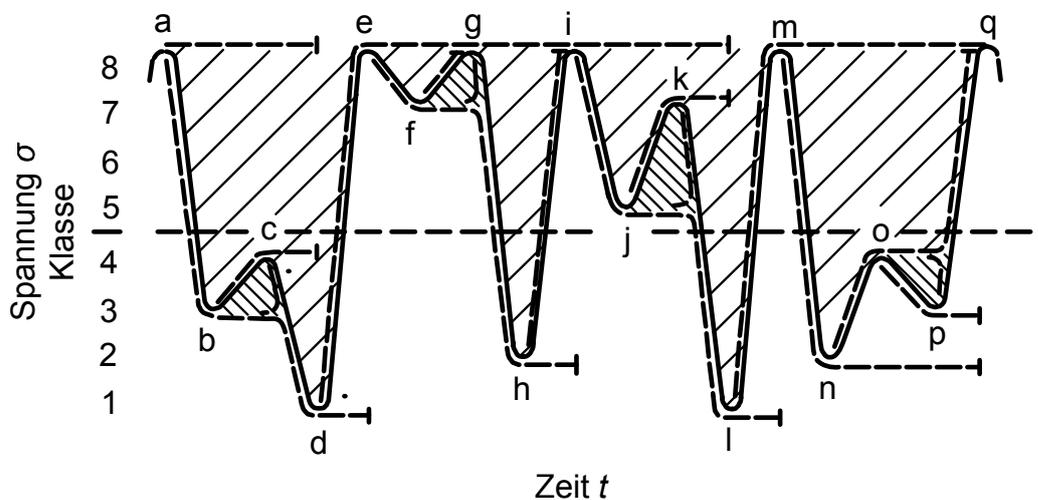
In den folgenden Abschnitten werden das in dieser Arbeit verwendete zweiparametrische Zählverfahren, die *Rainflow-Klassierung* und der Übergang zum *Amplitudenkollektiv*, der bekannten Darstellungsform von Lastkollektiven, erläutert.

### 2.4.2 Rainflow-Klassierung

Die Rainflow-Klassierung wurde 1968 von Matsuishi und Endo entwickelt und in einer japanischen Publikation vorgestellt. [Mat68] Der Name entstand aus der Vorstellung heraus, dass der „Regenfluss“ beim Regnen über die einzelnen Flanken des Schwingenspiels fließt und von einem „Dach“ zum nächsten tropft. 1972 berichtete Dowling über das Verfahren in einer englischen Veröffentlichung. [Dow72] Die Rainflow-Klassierung hat sich durch die werkstoffmechanische Begründung durchgesetzt, weil geschlossene Hysteresen erfasst werden und diese der Werkstoffschädigung (Ermüdung) am nächsten kommen. Bis heute ist kein Zählverfahren bekannt, welches die Werkstoffschädigung besser beschreibt.

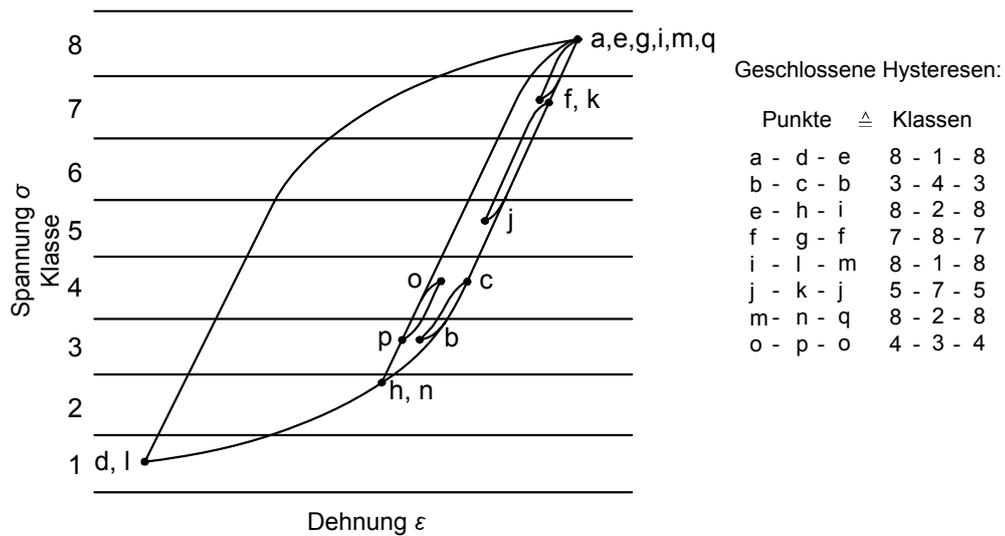
In der Literatur wurden eine Reihe von Algorithmen vorgestellt, die sich im Wesentlichen in der Berücksichtigung des Residuums – der Hystereseschleifen, die bei der Auswertung nicht geschlossen wurden – unterscheiden. Echte Vierpunkt-Algorithmen sind den Dreipunkt-Algorithmen vorzuziehen. Mit den Vierpunkt-Algorithmen können geschlossene Hysteresen erkannt werden. Das Ergebnis der Bereichspaar-Mittelwertzählung, welches 1969 von De Jonge ([deJ69]) entwickelt wurde, ist identisch mit dem der Rainflow-Klassierung. [Wes88] Das Ergebnis der Rainflow-Klassierung wird als Matrix, auch Rainflow-Matrix genannt, dargestellt. Aus der Rainflow-Matrix lassen sich Ergebnisse von einparametrischen Zählverfahren, wie der *Bereichspaarzählung*, der *Spitzenzählung* und der *Klassengrenzenüberschreitungszählung* ableiten. Zusätzlich kann der *Unregelmäßigkeitsfaktor* (siehe Gleichung 8) bestimmt werden. Das Zählverfahren ist nicht an das zyklisch elastisch-plastische Werkstoffverhalten gebunden und kann bei Zeitfunktionen für Kräfte, Mo-

mente, Nennspannungen usw. angewendet werden. [Gud00] In **Abbildung 11** wird die ursprüngliche Form des „Regenflusses“ schematisch dargestellt. Um diese zu zeigen, muss die BZF (Volllinie) um 90 Grad im Uhrzeigersinn gedreht werden. Der vorliegende Messbereich wurde in acht Klassen mit gleicher Klassenbreite aufgeteilt. Eine volle Hystereseschleife wird aus zwei Halbschleifen gebildet, bei denen die gleiche Schwingbreite sowie dasselbe Maximum (oder Minimum) vorliegt. Als Beispiel kann die eingeschlossene und schraffierte Fläche zwischen den Punkten a-d-e mit den Klassen 8-1-8 oder den Punkten b-c-b mit den Klassen 3-4-3 gesehen werden.



**Abbildung 11:** Belastungs-Zeit-Funktion zur Erläuterung der Rainflow-Klassierung [Wes88]

Eine bessere Darstellungsform dieser BZF aus Sicht der Werkstoffbeanspruchung ist mit **Abbildung 12** gegeben. In der Abbildung werden die Hystereseen schematisch wie in einem Spannungs-Dehnungs-Diagramm aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass alle Hystereseen von der Hysterese mit den Maximalwerten eingeschlossen werden. Zum Verständnis wurden die Punkte der einzelnen Schleifen und die zugehörigen Klassen auf der rechten Seite der Abbildung dargestellt.



**Abbildung 12:** Geschlossene Hysteresen für die Belastungs-Zeit-Funktion von Abbildung 11 [Wes88]. (Die Punkte f, j, b und o liegen auf den jeweiligen Hystereseästen. Sie sind hier nur zur Verdeutlichung der Zwischenschwingungen daneben gezeichnet.)

Wie bereits erwähnt, wird das Ergebnis der Klassierung in einer Matrix abgelegt. In **Abbildung 13** ist die Ergebnismatrix der vorhergehend beschriebenen BZF wiedergegeben.

	<i>k</i>							
	1	2	3	4	5	6	7	8
<i>i</i>	1							
	2							
	3							
	4							
	5							
	6							
	7							
	8							

**Abbildung 13:** Rainflow-Matrix für die Belastungs-Zeit-Funktion von Abbildung 11 [Wes88]. (Gezählt werden geschlossene Hystereseschleifen von *i* nach *k* und zurück gemäß Abbildung 12)

In dem schematisch vorgestellten Beispiel sind nur vollständige Schwingspiele dargestellt worden. Dieser Fall wird bei real gemessenen BZF nicht eintreten. Schwingspiele, die bei einer Zählung nicht geschlossen werden können, werden als Residuum

bezeichnet. Das größtmögliche Residuum für eine beliebig lange BZF beträgt maximal eine auf- und abklingende Folge von halben Schwingspielen. [Gud00]

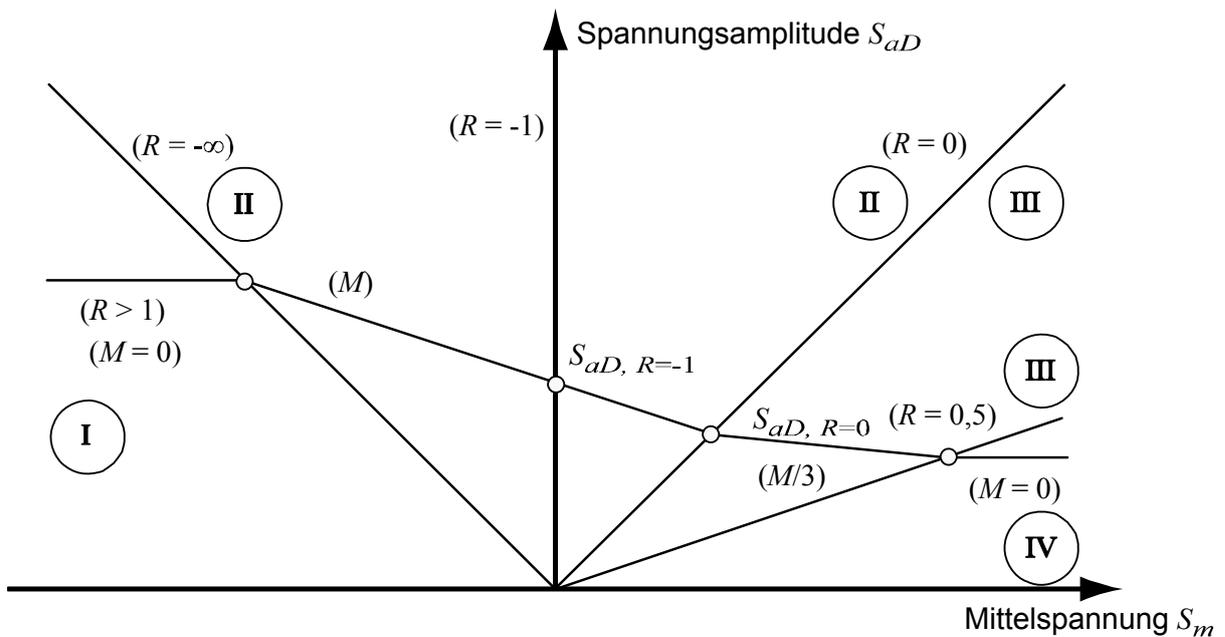
Bei der Auswertung von kurzen BZF kann es vorkommen, dass wichtige schädigungsrelevante Beanspruchungen im Residuum abgelegt werden, da das Schwingspiel nicht geschlossen wird. Aus diesem Grund soll bei einer Lebensdauerberechnung das Residuum in Form von halben Schwingspielen berücksichtigt werden.

Die Möglichkeit zur Extrapolation des Kollektivs von der Mess- auf die Nutzungsdauer stellt ein wichtiges Auswahlkriterium dar. In [Krü85] wird eine Möglichkeit zur Extrapolation von Rainflow-Matrizen vorgestellt, welche im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter erläutert und verfolgt wird. Innerhalb dieser Arbeit werden aus den Rainflow-Matrizen Amplitudenkollektive gebildet, welche durch eine zeitliche Anpassung extrapoliert werden.

Die Ergebnisse der Rainflow-Klassierung lassen sich nur mit einer weiteren Umrechnung für die Lebensdauerberechnung verwenden, d. h. diese müssen in ein Amplitudenkollektiv umgewandelt werden. Bei der Ableitung des Amplitudenkollektivs aus der Rainflow-Matrix, der so genannten Amplitudentransformation, werden die Informationen Spannungsamplitude und Mittelspannung berücksichtigt.

Die Mittelspannung kann einen erheblichen Einfluss auf das Schädigungsverhalten haben, welches werkstoffspezifisch ist. Im Vergleich zu mittelspannungsfreien Versuchen wird die Schwingfestigkeit bei Versuchen mit Druckmittelspannungen in der Regel zu höheren Lebensdauern und bei Versuchen mit Zugmittelspannungen zu niedrigeren Schwingspielzahlen verschoben. [Nik08] In dem Haigh-Diagramm (**Abbildung 14**) wird diese Gesetzmäßigkeit dargestellt. Die Abhängigkeit der Spannungsamplitude  $S_a$  von der Mittelspannung  $S_m$  ist werkstoffspezifisch und wird als Mittelspannungseinfluss bezeichnet. Der Mittelspannungseinfluss kann durch die Mittelspannungsempfindlichkeit  $M$  beschrieben und mit der **Gleichung 9** nach [Sch66] berücksichtigt werden. Die Mittelspannungsempfindlichkeit  $M$  beschreibt den Abfall der dauerhaft ertragbaren Spannungsamplitude zwischen der Wechselbean-

spruchung  $S_{aD;R=-1}$  und der Zug-Schwellbeanspruchung  $S_{aD;R=0}$  (siehe Abbildung 14). In dem Haigh-Diagramm ist die Spannungsamplitude  $S_{aD}$  über der Mittelspannung  $S_m$  aufgetragen. Zusätzlich sind Strahlen vom Ursprung eingetragen, welche dem Spannungsverhältnis  $R$  nach Abbildung 10 entsprechen.



**Abbildung 14:** Darstellung des Mittelspannungseinflusses im Haigh-Diagramm [Nik08]

$$M = \frac{S_{aD;R=-1} - S_{aD;R=0}}{S_{aD;R=0}} \quad (9)$$

In einer Rainflow-Matrix sind die Amplituden mit den unterschiedlichen Mittelspannungen bekannt. Durch die Amplitudentransformation werden alle Amplituden mit unterschiedlicher Mittelspannung auf Amplituden mit einer gemeinsamen Mittelspannung umgerechnet. Es wird eine Unterscheidung in vier Fälle vorgenommen, wie es in der FKM-Richtlinie ([Hän03]) definiert wurde, da der Mittelspannungseinfluss abhängig vom vorliegenden Spannungsverhältnis ist.

**Fall 1 ( $R > 1$ ):**

Druckschwellbereich ( $R = \infty$  ist eine reine Druckschwellbeanspruchung)

$$S_{aT} = S_a \cdot (1 - M) \quad (10)$$

**Fall 2 ( $-\infty \leq R \leq 0$ ):**

$R < -1$  ist Druckschwellbereich

$R = -1$  ist reine Wechselbeanspruchung

$R > -1$  ist Zugwechselbereich

$$S_{aT} = S_a \cdot \left( 1 + M \cdot \frac{S_m}{S_a} \right) \quad (11)$$

**Fall 3 ( $0 < R < 0,5$ ):**

Niedriger Zugschwellbereich ( $R = 0$  ist eine reine Zugschwellbeanspruchung)

$$S_{aT} = S_a \cdot \left( \frac{1 + \frac{M \cdot S_m}{3 \cdot S_a}}{1 + \frac{M}{3}} \right) \quad (12)$$

**Fall 4 ( $0,5 \leq R \leq 1$ ):**

Hoher Zugschwellbereich

$$S_{aT} = S_a \cdot \left( \frac{3 \cdot (1 + M)^2}{3 + M} \right) \quad (13)$$

Untersuchungen haben gezeigt, dass Kollektive mit transformierten Amplituden bei der Lebensdauerberechnung die geringste Streuspanne liefern. Aus diesem Grund

wird die Amplitudentransformation für die Ermittlung des Kollektivs aus der Rainflow-Matrix empfohlen. [Kot94]

### 2.4.3 Amplitudenkollektive

Die Amplitudenkollektive stellen im statistischen Sinn eine Häufigkeitsverteilung dar. Bei der Verwendung für die Betriebsfestigkeitsberechnung werden die Belastungen bzw. die Beanspruchungen über der Summenhäufigkeit aufgetragen. Für die lineare Schadensakkumulationshypothese nach Palmgren-Miner muss die Betriebsbeanspruchung in Form eines Amplitudenkollektivs aus den Klassierergebnissen berechnet werden.

Die Vorteile dieser Darstellungsform sind:

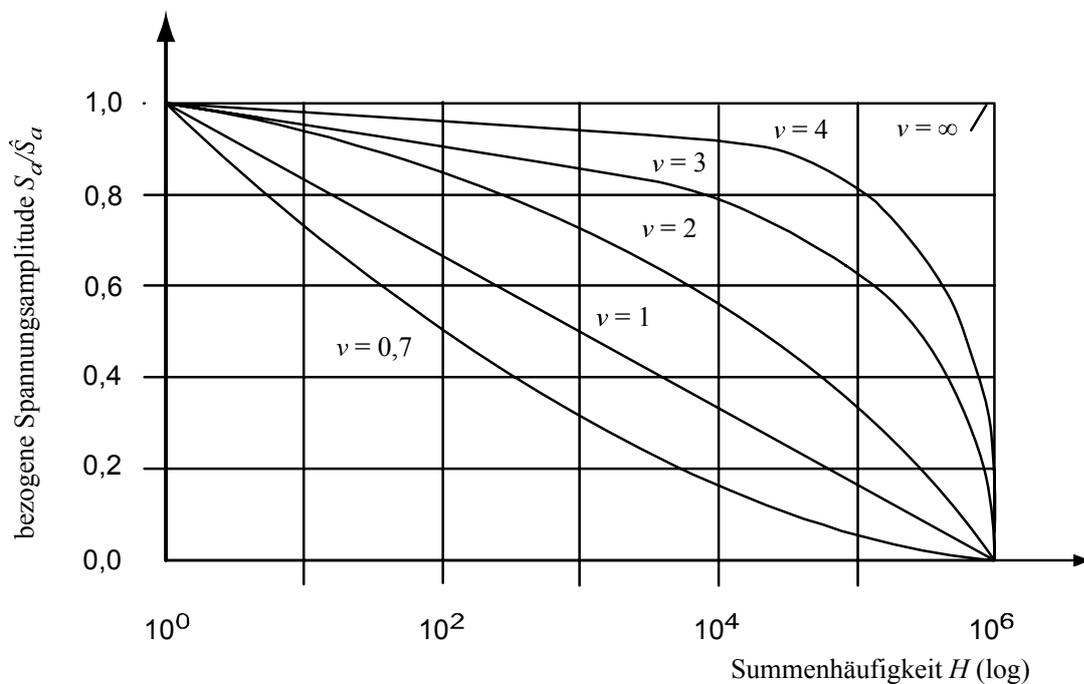
- 1.) Amplitudenkollektive lassen sich auf einfache Weise ermitteln;
- 2.) Amplitudenkollektive lassen sich verhältnismäßig leicht und zuverlässig extrapolieren. Dies stellt ein wichtiges Kriterium bei der Auswahl eines Auswerteverfahrens dar, da in der Regel nur ein Bruchteil der Nutzungszeit gemessen wird;
- 3.) Die durch Messung gewonnenen Amplitudenkollektive lassen sich oft an Einheitskollektive annähern. Dies erleichtert die Übertragung und Interpretation von Betriebsfestigkeitsversuchen von idealisierten Bauteilen für die Vordimensionierung. [Bux92]

Zu einer vollständigen Beschreibung eines Amplitudenkollektivs werden folgende Parameter benötigt:

- 1.) die Kollektivform;
- 2.) der Kollektivumfang;
- 3.) der Kollektivhöchstwert (Bemessungsbeanspruchung) und
- 4.) die Streuung des Kollektivs.

Zwei Amplitudenkollektive können miteinander verglichen werden, wenn diese auf die gleiche Referenzhäufigkeit, z. B. auf die zeitliche Dauer, und auf einen einheitlichen Beanspruchungsmaßstab bezogen wurden. Gassner, Griese und Haibach veröffentlichten erstmalig in [Gas64] so genannte Einheitskollektive. Diese lassen sich wie folgt mathematisch durch **Gleichung 14** beschreiben: [Pöt00]

$$H = H_0 \left( \frac{S_a}{\hat{S}_a} \right)^{\nu} \quad (14)$$



**Abbildung 15:** Einheitskollektiv nach [Pöt00]

In **Abbildung 15** sind Kollektivformen für unterschiedliche Formparameter  $\nu$  abgebildet. Je nach Betrag des Formparameters können verschiedene Einheitskollektive mit Gleichung 14 erstellt werden. Nachfolgend einige Erläuterungen zu den dargestellten Formparametern:

- $\nu = \infty$  Dies entspricht dem Einstufenversuch mit einer Schwingbeanspruchung mit konstanter Amplitude.
- $\nu = 2$  Das Amplitudenkollektiv entspricht dem so genannten stationären Gaußschen Zufallsprozess. Vorzugsweise tritt diese Kollektivform bei stationären Beanspruchungen auf, welche z. B. durch Straßenebenenheiten verursacht werden, wenn stationäre Betriebsbedingungen wie eine einheitliche Straßenbeschaffenheit, eine gleichbleibende Fahrgeschwindigkeit und eine konstante Beladung vorhanden sind.
- $\nu > 2$  Diese Kollektivformen sind typisch für den Kran- und Brückenbau bzw. werden dort verwendet.
- $\nu = 1$  Eine so genannte Geradlinienverteilung entspricht dem Exponenten  $\nu = 1$ . Dieses Amplitudenkollektiv erscheint im halblogarithmischen Netz als Gerade. Diese Geradlinienverteilung kann durch Überlagerung von mehreren Gauß'schen Zufallsprozessen entstehen. Dazu können Beanspruchungen z. B. infolge von Straßenebenenheiten während einer längeren Beobachtungszeit gezählt werden.
- $\nu \approx 0,7$  Diese Kollektivform ist als eine Überlagerung mehrerer Verteilungen von  $\nu = 2$  zu deuten. Diese kommen zustande, wenn die Messung instationäre Betriebsbedingungen erfasst, beispielsweise bei einer Messfahrt mit unterschiedlich beschaffenem Untergrund mit wechselnder Beladung und mit veränderter und angepasster Fahrgeschwindigkeit.

Die Form des Amplitudenkollektivs – oft auch als Völligkeit bezeichnet – beeinflusst stark die Lebensdauer eines Bauteils, siehe Abbildung 8. Die Kollektivform  $\nu = \infty$  (Einstufenversuch) stellt das härteste Kollektiv dar. Mit Abnahme der Völligkeit erhöht sich das Verhältnis der Lebensdauer bezogen auf den Einstufenversuch. Weitere

Informationen zum Einheitskollektiv mit ergänzenden Literaturhinweisen sind in [Bux92], [Hai06] und [Nik08] gegeben.

## 2.5 Schädigungsgleiches Rechteck-Ersatzkollektiv

Die aus der Rainflow-Klassierung abgeleiteten Amplitudenkollektive lassen sich mit Hilfe eines schädigungsgleichen Rechteck-Ersatzkollektiv miteinander vergleichen. Grundlage bildet die elementare Form der Miner-Regel, bei der die Dauerfestigkeitsgrenze unberücksichtigt bleibt. [Hai06] Zur Beurteilung der einzelnen Kollektive, wie im Folgenden vorgestellt, hat die Dauerfestigkeit des Werkstoffes keine Bedeutung. Als einziger Werkstoffkennwert wird der Wöhlerlinienexponent  $k$  benötigt, welcher aus Tabellen für den entsprechenden Werkstoff entnommen werden kann.

Die Schädigung für das Kollektiv ergibt sich durch

$$D(\text{Kollektiv}) = \frac{\left( \sum_i h_i \cdot S_{ai}^k \right)}{N_0 \cdot S_{a0}^k} \quad (15)$$

und für das Rechteck-Ersatzkollektiv nach

$$D(\text{Ersatz}) = \frac{H_E \cdot S_{aE}^k}{N_0 \cdot S_{a0}^k}. \quad (16)$$

Durch das Gleichsetzen und Kürzen von  $N_0 \cdot S_{a0}^k$  ergibt sich

$$H_E \cdot S_{aE}^k = \left( \sum_i h_i \cdot S_{ai}^k \right). \quad (17)$$

Daraus lassen sich vier Möglichkeiten entwickeln:

- a) Für den vorgegebenen Kollektivhöchstwert  $S_a$  wird eine schädigungsäquivalente Ersatz-Schwingspielzahl bestimmt:  $S_{aE} = \bar{S}_a$  ergibt

$$H_E = \left( \sum_i h_i \cdot S_{ai}^k \right) / \bar{S}_a^k . \quad (18)$$

- b) Für den vorgegebenen Kollektivumfang  $\sum_i h_i$  wird eine schädigungsäquivalente Ersatz-Belastungsamplitude bestimmt:  $H_E = \sum_i h_i$  ergibt

$$S_{aE} = \left[ \left( \sum_i h_i \cdot S_{ai}^k \right) / \left( \sum_i h_i \right) \right]^{(1/k)} . \quad (19)$$

- c) Für eine beliebig vorgegebene Belastungsamplitude  $S_{a1}$  wird eine schädigungsäquivalente Ersatz-Schwingspielzahl bestimmt:  $S_{aE} = S_{a1}$  ergibt

$$H_E = \left( \sum_i h_i \cdot S_{ai}^k \right) / S_{aE}^k . \quad (20)$$

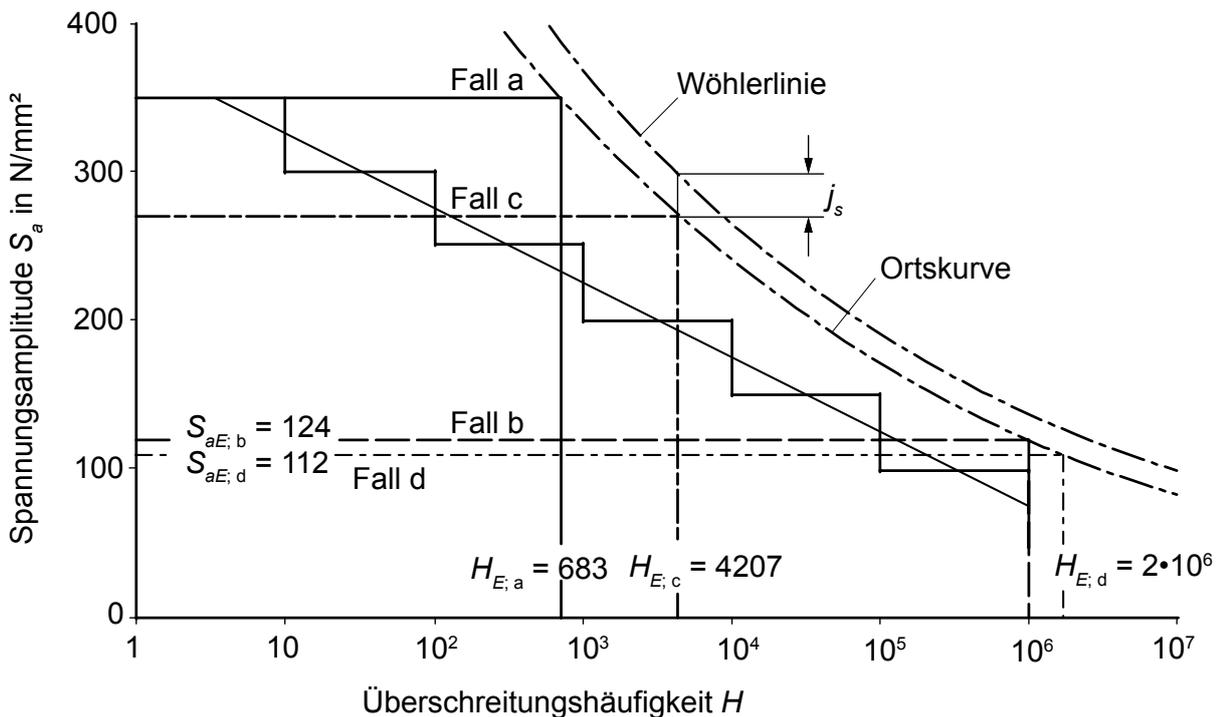
- d) Für eine beliebig vorgegebene Schwingspielzahl  $N_1$  wird eine schädigungsäquivalente Ersatz-Belastungsamplitude bestimmt:  $H_E = H_1$  ergibt

$$S_{aE} = \left[ \left( \sum_i h_i \cdot S_{ai}^k \right) / H_E \right]^{(1/k)} . \quad (21)$$

In **Abbildung 16** sind schädigungsgleiche Rechteck-Kollektive aus einem gegebenen Amplitudenkollektiv nach den vier Berechnungsmöglichkeiten dargestellt. Bei den so berechneten Rechteck-Kollektiven liegen die Eckpunkte auf der Ortskurve  $H_E = S_{aE}^k = \text{konstant}$ . In einem doppellogarithmisch aufgetragenen Diagramm wäre die Ortskurve (Belastung) eine Gerade, welche parallel zur Zeitfestigkeitslinie der Wöh-

lerlinie (Belastbarkeit) verlaufen würde. Mit den Werten nach Fall d) lässt sich beispielsweise die Frage beantworten, welche Sicherheitszahl  $j_S$  demnach gegenüber der Wöhlerlinie mit  $S_A = 125 \text{ N/mm}^2$  und  $N_A = 2 \cdot 10^6$  besteht.

$$j_S = \frac{S_A}{S_{aE}} \quad (22)$$



**Abbildung 16:** Schadensgleiche Rechteck-Kollektive eines Beispielamplitudenkollektivs für a), b), c) und d) nach [Hai06]

In [DIN39] wird ein Verfahren zur Berechnung eines äquivalenten Moments aus einem gegebenen Lastkollektiv vorgestellt. Die Berechnungsgrundlage entspricht formal der oben dargestellten Berechnung nach der Möglichkeit d) bzw. **Gleichung 21**. Zusätzlich wurde ein Abschneidekriterium eingefügt, um die geringen Lastanteile mit hohen Lastspielzahlen bei der Berechnung unberücksichtigt zu lassen. Als geringere Lasten werden bei diesem Abschneidekriterium Lasten unterhalb der Hälfte des Dauerfestigkeitswerts angenommen. Radev empfiehlt in [Rad05] die An-

wendung der DIN 3990, Teil 6, Methode III zur Bestimmung des Anwendungsfaktors aus einem repräsentativen Lastkollektiv. Die Unterdrückung der Lastanteile mit geringer Last wird innerhalb dieser Arbeit nicht angewendet, um so die Vergleichbarkeit der Kollektive untereinander zu gewährleisten.

## **2.6 Bisherige Lastkollektive mobiler Arbeitsmaschinen**

Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über durchgeführte Forschungsaktivitäten im Bereich der Lastkollektivvermittlung bzw. Lastannahmen bei mobilen Arbeitsmaschinen gegeben. Renius stellte in [Ren76] Last- und Fahrgeschwindigkeitskollektive zur Getriebeauslegung von Ackerschleppern vor. Innerhalb dieser Arbeit wird zwischen folgenden Kollektiven unterschieden: *Motorseitige Lastkollektive*, *Treibradseitige Lastkollektive* und *Fahrgeschwindigkeitskollektive*. Durch die Normierung werden die Gesamtkollektive verallgemeinerbar und dimensionslos beschrieben. Im Beitrag [Ren01] beschreibt Renius den Einzug der betriebsfesten Auslegung in der Traktorenindustrie. Renius forschte nicht nur auf dem Gebiet der Traktorengetriebe, sondern auch im Gebiet der hydrostatischen Antriebe und stellte im Beitrag [Ren03] ein Lastdruckkollektiv eines hydrostatischen Mähdrescherfahrantriebs vor, welches für die Auslegung dieser Fahrantriebe von Vorteil ist.

Miners untersuchte den Einfluss hydrodynamischer Kupplungen auf die Belastung eines Traktors. Er konnte eine Amplitudenreduzierung der Drehmomentschwankung bei den typischen landwirtschaftlichen Arbeiten Fräsen und Pressen sowie eine deutliche Reduzierung des Motordrehmomentes beim „Kupplung-schnappen-lassen“ feststellen. [Min83]

In der Dissertation von Vahlensieck ([Vah99]) werden Lastkollektive für einen stufenlosen Kettenwandler-Traktorantrieb vorgestellt. Die Lastkollektive für Bauteile eines Zugkettenwandlers wurden real mit dem *Münchner-Forschungstraktor* gemessen. Durch eingehende Untersuchung der Funktionsweise und des Betriebsverhaltens des Kettenwandlers wurden neue Methoden hergeleitet und erläutert. Dabei wurden sowohl die äußeren Lasten als auch die innere Dynamik berücksichtigt. Später berichtet

Vahlensieck in [Vah03] allgemein über die Anwendung der Betriebsfestigkeit mit dem Fokus auf mobile Arbeitsmaschinen. Innerhalb dieses Artikels merkt er an, dass wenige „echte“ Veröffentlichungen über Standardkollektive existieren, was für eine hohe Bedeutung der Lastkollektive und das damit verbundene wirtschaftliche Interesse einzelner Unternehmen bzw. einzelner Industriearbeitskreise spricht.

Kunze stellt in [Kun05] einen methodischen Weg zur Verbesserung der Lebensdauerabschätzung bei Baumaschinen vor. Innerhalb des dort vorgestellten BAUMAKO<sup>2</sup> werden in einem ersten Schritt die Anwendungen aufgeschlüsselt. Anschließend werden die jeweiligen Funktionen hin bis zum Einsatzprofil analysiert. Daraus leiteten sich die Datenerfassung und die Datenauswertung mit der Erstellung von Normlastkollektiven ab.

Eine weitere Vorstellung über auftretende Belastungen sowie die Einsatzzeiten bei Radladern gibt Pfab. [Pfa03] Mit diesen Lastkollektiven, aus denen die Eckpunkte zur Dimensionierung abgeleitet werden können, dienen zur Konzeption des gesamten Fahrtriebs.

Güner stellt in seiner Dissertation ([Gün95]) die Entwicklung kinematischer Berechnungsmodelle für hydraulisch angetriebene Baumaschinenausleger vor. Die experimentellen Untersuchungen zur Ermittlung der Betriebslasten richten sich dabei auf die strukturdynamischen Eigenschaften der Arbeitseinrichtungen (Ausleger und Anbauwerkzeug). Die Auswirkungen der vorgestellten Lastannahmen auf die Betriebsfestigkeit wurden qualitativ mit der Lebensdauerberechnung nach Eurocode 3<sup>3</sup> dargestellt.

Rupp führte Betriebslastenmessungen mit Hilfe von Messrädern an einem Mobilbagger durch. [Rup03] Die Messräder (Typ VELOS) ermöglichen die Aufnahme von multiaxialen Belastungen zwischen Rad und Achse. Die Aufzeichnung der Belastungen auf die Achse erfolgte beim Fahren und Arbeiten. Durch die Kenntnisse der mul-

---

<sup>2</sup> BAUMAKO: Kürzel für Baumaschinen-Normlastkollektiv, welches in diesem Beitrag beschrieben wird.

<sup>3</sup> Eurocode 3: Europäisch vereinheitlichte Bemessungsregeln im Bauwesen - Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten. [Eur3]

ti axialen Belastungen lässt sich das Potential von FEM-Berechnungsmodellen<sup>4</sup> optimieren. Zusätzlich wurden die Belastungs-Zeit-Funktionen (BZF) zur Anregung eines multiaxialen Prüfstandes verwendet, wobei eine Verifikation der Berechnungsmodelle vorgenommen wurde.

Das Ziel der Dissertation von Deiters war es, ein reproduzierbares Verfahren zur Erzeugung repräsentativer Zyklusdaten für Arbeitsaufgaben mobiler Arbeitsmaschinen zu generieren, um so einen Standard-Lastzyklus von gemessenen Belastungsdaten abzuleiten. [Dei09] Als Arbeitsaufgabe wurde der Y-Zyklus gewählt. Dieser Y-Zyklus stellt bei Radladern ein typisches und immer wiederkehrendes Arbeitsspiel dar. Als Basis für den Standardlastzyklus stand eine BZF von 150 Y-Zyklen zur Verfügung. Diese BZF wurde in einem ersten Schritt auf die einzelnen Zyklen separiert. Im Anschluss wurden die in einem Zyklus enthaltenen fünf Bewegungsabschnitte identifiziert.

Die fünf Bewegungsabschnitte nach [Dei09] sind wie folgt:

- 1.) Vorfahren zum Haufwerk,
- 2.) Beladen der Schaufel,
- 3.) Zurückfahren vom Haufwerk,
- 4.) Vorfahren zur Entladestelle und
- 5.) Zurückfahren in die Ausgangsposition.

Das Entladen der Schaufel wurde nicht separat betrachtet und liegt zwischen den oben genannten Bewegungsabschnitten vier und fünf. D. h. während dem Vorfahren zur Entladestelle und dem Zurückfahren in die Ausgangsposition wird die Schaufel entleert. Zur Erstellung eines Standardzyklus wurden eine Synchronisation und eine

---

<sup>4</sup> FEM: Abkürzung für die Finite-Elemente-Methode, welche bei der Auslegung und Optimierung von Bauteilstrukturen eingesetzt wird.

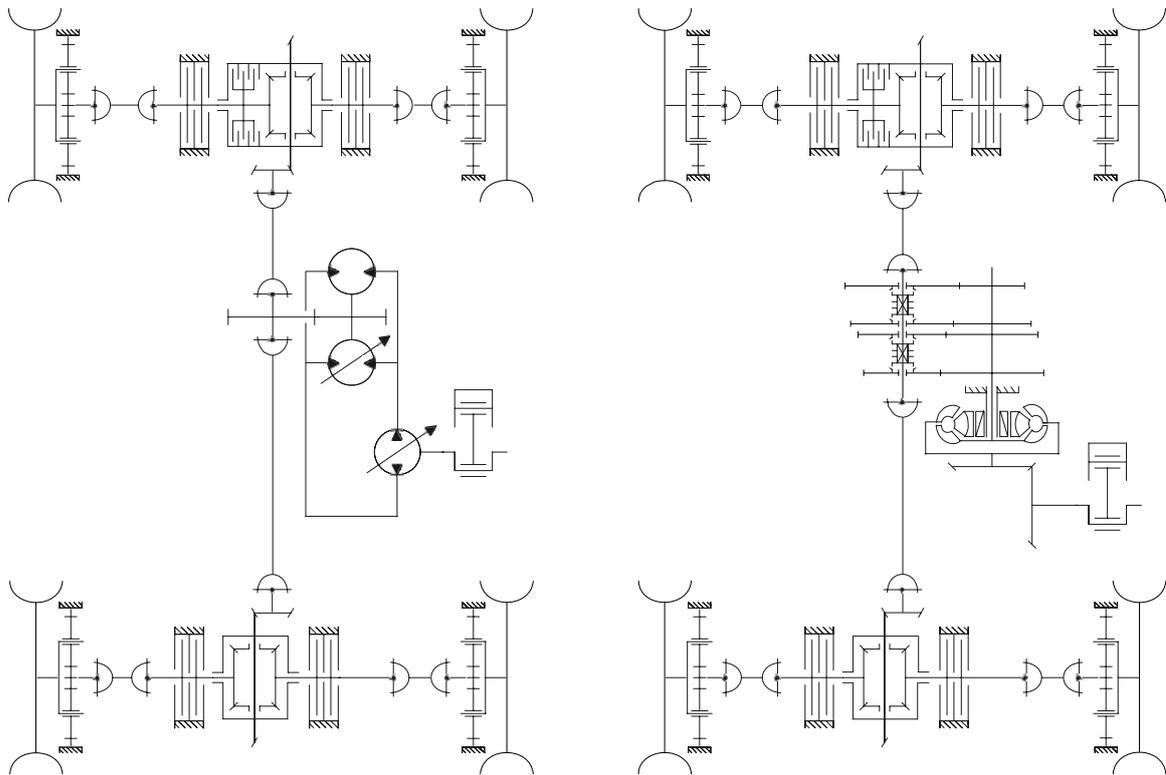
Skalierung der Zeitverläufe vorgenommen, bevor diese zu einem Standardzyklus zusammengeführt wurden. Der Vorteil des standardisierten Lastzyklus liegt in der Datenreduzierung. Diese schlägt sich beim Einsatz von Simulationstechnik in kürzeren Rechenzeiten, bei gleichzeitig belastbaren Ergebnissen nieder. Dieser standardisierte Lastzyklus eignet sich somit zur Untersuchung und Bewertung von z. B. verschiedenen Antriebsstrangkonzepthen während der Konzeptionsphase.

Die hier vorgestellten Arbeiten stellen nur einen Auszug der Forschungstätigkeiten dar, welche einen konkreten Bezug zu dieser Arbeit aufweisen. Die erwähnten Arbeiten sollen auch als Referenzen für weitere Recherchen dienen.

## **2.7 Selbstfahrende Arbeitsmaschine: Teleskoplader**

Teleskoplader erfuhren in den letzten 10 bis 15 Jahren in Europa innerhalb einzelner Branchen eine zunehmende Beliebtheit. In den Jahren 2006 bis 2008 konnte ein Wachstum des Absatzes in Deutschland von über 12 Prozent pro Jahr erreicht werden. Es konnten in 2008 ca. 2.600 Maschinen innerhalb Deutschlands abgesetzt werden. Die größten Stückzahlen der Maschinen nimmt die Landwirtschaft ab, gefolgt von Mietgesellschaften, Bauwirtschaft und Industrieunternehmen. Die erwartete Lebensdauer beträgt 10.000 Stunden.

Bei Teleskoplädern im Segment von 30 bis 40 kN Hubkraft mit einer Hubhöhe von ca. 7 bis 9 Metern kommen Dieselmotoren im Leistungsbereich von 74 bis 114 kW zum Einsatz. Turbolader mit Ladeluftkühlung werden bei Maschinen im oberen Leistungsbereich verbaut.



**Abbildung 17:** Übliche Fahrtriebe bei Teleskopladern.

Links: Hydrostatischer Fahrtrieb mit einem einstufigen Verteilergetriebe.

Rechts: Hydrodynamischer Fahrtrieb mit einem mehrstufigen Verteilergetriebe

Als Fahrtriebe sind sowohl hydrodynamische Wandler, als auch hydrostatische Fahrtriebe gängig (**Abbildung 17**). Teilweise haben Hersteller beide Arten der Drehzahl-/Drehmomentwandlung in Kombination mit Power- bzw. Autoshift-Getrieben im Programm, um den gewünschten Fahrgeschwindigkeitsbereich von 0 bis 40 km/h abzudecken. Die Anzahl der Fahrstufen variiert dabei von 2 bis 6 Gängen und ist davon abhängig, ob eine hydrostatische oder hydrodynamische Drehzahl-/Drehmomentwandlung verbaut ist.

Vorne und hinten werden Lenkachsen verbaut, welche die Lenkmodi Allradlenkung (gute Wendigkeit), Vorderachslenkung (bei hohen Geschwindigkeiten) und Hundegang (z. B. beim Einsatz in Fahrsilos) ermöglichen. Der Öltank bevorratet zwischen 87 und 131 Litern Hydrauliköl für das Betreiben des Fahrtriebs und der Arbeitshy-

raulik wie Hubwerk, weiterer Anbaugeräte oder Anhänger. Neben den Serienfunktionen sind weitere Ausstattungsmerkmale optional und auf Wunsch erhältlich, welche teilweise herstellerabhängig angeboten werden. Dabei können z. B. Funktionen wie Hubwerksdämpfung, weitere hydraulische Kreise für Anbaugeräte und Anhänger, sowie Druckluftbremse für Anhängerbetrieb oder Heckkraftheber bezogen werden. [Hub09]

Bei dem als Versuchsträger verwendeten Teleskoplader handelt es sich um einen Scorpion 7040 Varipower der Firma Claas. Dieser Teleskoplader besitzt eine Hubkraft  $F_H \approx 40$  kN bei einer maximalen Hubhöhe von ca. 7 Metern. Als Antriebsmotor ist ein 4 Zylinder Dieselmotor der Firma Deutz mit 100 kW Nennleistung verbaut. Der geschlossene hydrostatische Fahrtrieb besteht aus einer elektrisch-proportional verstellbaren Axialkolbenpumpe mit  $89 \text{ cm}^3$  Hubvolumen und einem Axialkolbenverstellmotor mit  $233 \text{ cm}^3$  Schluckvolumen sowie einem Axialkolbenkonstantmotor mit  $45 \text{ cm}^3$  Schluckvolumen. Beide Hydromotoren treiben gemeinsam die Eingangswelle des Verteilergetriebes an, welche die Leistung über eine Stirnradstufe an die beiden Gelenkwellen abgibt (siehe Abbildung 17, linke Seite). Als Achsen wurden vorne sowie hinten lenkbare Baumaschinenachsen verbaut, wobei die Lenkung der hinteren Achse bei Geschwindigkeiten über 20 km/h gesperrt wird.

### 3 Eingesetzte Messtechnik und Versuchsablauf

#### 3.1 Ausstattung des Teleskopladers mit Messtechnik

Zur Aufzeichnung der gewünschten Belastungs-Zeit-Funktion (BZF) musste ein Versuchsträger mit Messtechnik ausgerüstet werden. Sensorik zur Erfassung von Drehmomenten, Volumenströmen, Drücken usw. sowie ein Datenlogger sind in der Serienmaschine nicht vorhanden und wurden ergänzend installiert. Die Datenerfassung wurde durch ein „Stand alone“ Messdatenerfassungssystem (*Compact Rio*) der Firma National Instruments realisiert, welches startet, sobald die Zündung des Fahrzeuges angeschaltet wird. Beim Stopp des Dieselmotors werden die erfassten Daten auf einem USB-Datenträger automatisch archiviert. Die Abtastrate der Drehmomente, Drehzahlen und Volumenströme lag bei 1 kHz.

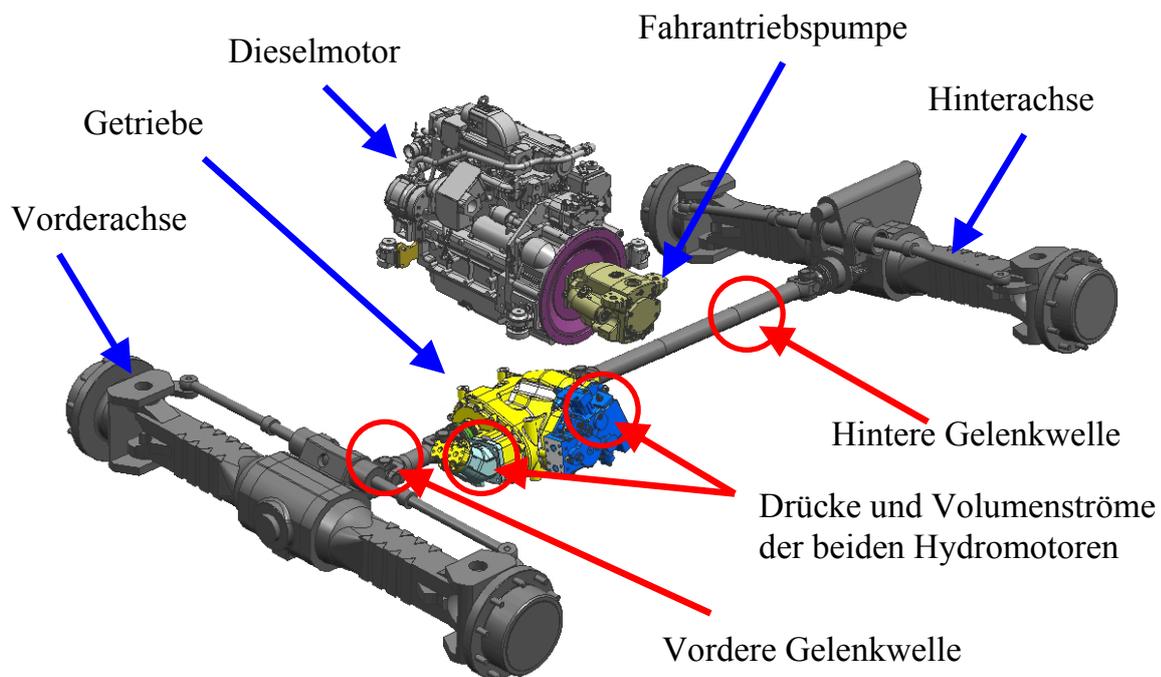
Zur Drehmomentenerfassung an den Gelenkwellen wurden Sensor-Telemetrie-Einheiten der Firma Manner Sensortelemetrie verbaut. Diese Einheiten ermöglichen eine kontaktlose Übertragung der Versorgungsenergie zur DMS-Applikation<sup>5</sup> sowie die Übertragung der ermittelten Messwerte von der DMS-Applikation zur Auswertungseinheit. An dieser Auswertungseinheit kann ein analoges Spannungssignal von  $\pm 10$  Volt abgegriffen werden, wobei ein rechtsdrehendes Moment ein positives Messsignal verursacht. Als schematisches Beispiel wird die vordere Gelenkwelle innerhalb dieser Abschnittes noch näher erläutert.

Der Pumpenvolumenstrom des hydrostatischen Fahrtriebs des Teleskopladers wird auf zwei Hydromotoren – einer mit einem konstanten und einer mit einem verstellbaren Schluckvolumen – aufgeteilt. Aus diesem Grund wurden zur Erfassung der Volumenströme zwei Volumenstromsensoren von der Firma VSE Volumentechik verbaut. Die Erfassung der hydrostatischen Drücke im Antriebsstrang wurde mit analogen Drucksensoren der Firma Hydac realisiert.

---

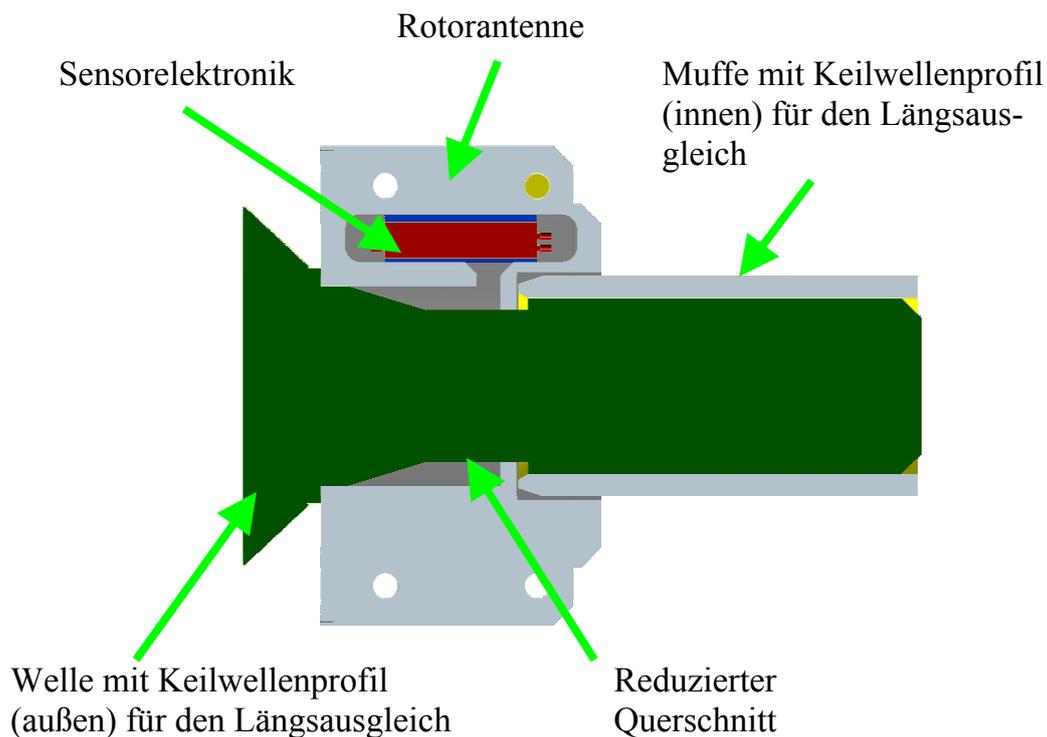
<sup>5</sup> DMS-Applikation: Messmethode zur Messung von Werkstoffdehnungen mit Hilfe von Dehnmessstreifen (DMS)

Die Messstellen und deren Position innerhalb des Antriebsstranges sind in **Abbildung 18** schematisch mit roten Kreisen und Pfeilen dargestellt. Bei der Ausrüstung des Versuchsträgers wurde berücksichtigt, dass bereits vorhandene Sensorik für die Messdatenerfassung verwendet werden konnte.



**Abbildung 18:** Antriebsstrang des Versuchsträgers

In **Abbildung 19** ist als Beispiel die modifizierte Gelenkwelle für die vordere Achse mit einem Schnitt durch ein einfaches 3D-Modell dargestellt. Die vordere Gelenkwelle hat konstruktionsbedingt eine Gesamtlänge von ca. 400 mm. Zur Applikation der DMS wurde an einer Stelle der Querschnitt reduziert, um gezielt an dieser Stelle Dehnungen der Gelenkwelle mit definierten Randbedingungen zu erzeugen. Die Abhängigkeit der Dehnung zum Drehmoment wurde durch eine definierte Kalibrierung, in Anlehnung an [DIN13] und [DKD5], ermittelt. An der Gelenkwelle musste zur Übertragung der Energie sowie des Messsignals eine so genannte Rotorantenne mit der Sensorelektronik angebaut werden. Die Statorantenne wurde am Fahrzeugrahmen befestigt, welche mit der Auswertungseinheit verbunden ist, an der das Messsignal abgenommen werden kann.



**Abbildung 19:** Schnittdarstellung der modifizierten vorderen Gelenkwelle

Um die Randbedingungen wie *Fahrer*, *Arbeitstätigkeit* (siehe Kapitel 4.1) und *Anbaugerät* zu erfassen, wurde ein Bedienelement für den Fahrer installiert. Über dieses Bedienelement kann der Fahrer die Einstellungen wie aktueller Fahrer, Anbaugerät und Arbeitstätigkeit mit Hilfe von Drehschaltern durchführen. Zusätzlich werden über Kontrollleuchten die manuellen Einstellungen und der Betriebszustand der Datenerfassung angezeigt, **Abbildung 20**. Weitere Informationen über die Einstellungen des Teleskopladars wie *Fahrtrichtung*, *Lenkmodi*, *Fahrstufe* usw. werden über die vorhandene Maschinensteuerung bzw. die Bedienelemente entnommen. Die Abtastung dieser Messkanäle wurde mit 1 Hz durchgeführt.

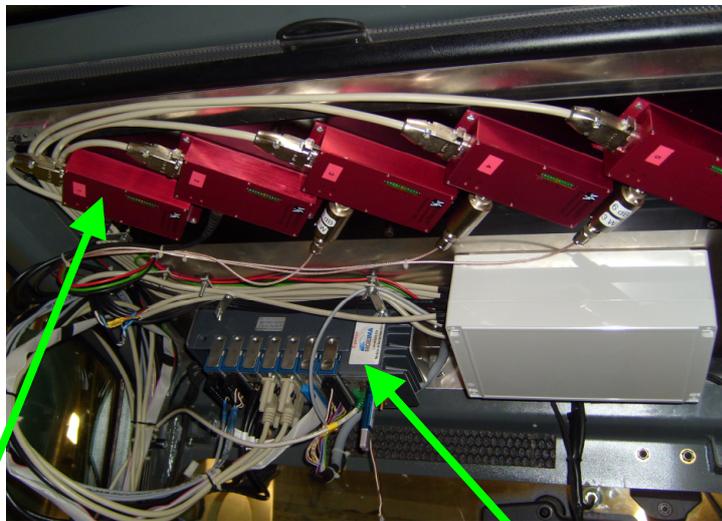
Die Auswertungseinheiten der Sensor-Telemetrie-Einheiten, der Datenlogger sowie die Verteilung der elektrischen Leistung und Sensorsignale sind unter dem Dach der Fahrerkabine angebracht, **Abbildung 21**. Die Messtechnik wurde so in einer geschützten Umgebung verbaut. Zur Verbindung der Sensoren mit dem Datenlogger wurden geschirmte Kabel verwendet, um elektro-magnetische Störungen von der Umwelt zu vermeiden.



Kontrollleuchte zu den Einstellungen des Fahrers

Bedienelement für den Fahrer zur Einstellung des Fahrers, des Anbaugeräts und der Arbeitstätigkeit

**Abbildung 20:** Cockpit aus Sicht des Fahrers



Auswertungseinheiten

Datenlogger

**Abbildung 21:** Datenlogger und Auswertungseinheiten der Sensor-Telemetrie-Einheiten montiert unter dem Dach der Fahrerkabine

### **3.2 Versuchsablauf**

Bei der Auswahl der Testbetriebe wurden mehrere technische und nichttechnische Voraussetzungen berücksichtigt. Technische Voraussetzungen sind z. B. das Vorhandensein von ergänzenden Anbaugeräten, eine hohe Auslastung des Teleskopladers, ein vielseitiges Einsatzspektrum, ein Rechnerarbeitsplatz zur Archivierung der Messdaten usw.. Zusätzlich mussten die nichttechnischen Voraussetzungen wie die Bereitschaft zum Einsatz einer Versuchsmaschine, die regelmäßige Archivierung der Messdaten, die Zuverlässigkeit und das Vorhandensein geeigneter Bediener sowie die Dokumentation der Fahrten usw. erfüllt werden, was eine größere Herausforderung für die Auswahl der Testbetriebe darstellt. Nach diesen Kriterien und dem höchstmöglichen Nutzen bezogen auf den Aufwand wurden die folgenden Testbetriebe ausgewählt:

#### **Testbetrieb 1:**

Die Messdatenerfassung mit dem Teleskoplader unter realen Einsatzbedingungen begann auf einem landwirtschaftlichen Betrieb im Raum Karlsruhe. Auf diesem Betrieb wurden vorzugsweise Heu- bzw. Strohballen sowie Mist (organischer Dung) umgesetzt. Ein weiterer Schwerpunkt des Aufgabenbereichs lag bei Servicetätigkeiten auf der Obstbauplantage sowie an landwirtschaftlichen Gebäuden der Hofstelle, bei dem die Vorteile des Hubwerks zu Einsatz kamen. Das Tätigkeitsspektrum des Teleskopladers wurde auf diesem Betrieb voll ausgenutzt.

#### **Testbetrieb 2:**

Zur Erweiterung des Einsatzspektrums wurde der Teleskoplader auf einem weiteren landwirtschaftlichen Betrieb mit einer Biogasanlage im Raum Bad Saulgau eingesetzt. Dieser Betrieb ist im Besitz eines baugleichen Teleskopladers, so dass die vorhandenen Anbaugeräte verwendet werden konnten. Die Aufgaben auf diesem Betrieb erstreckten sich vom Umsetzen von Großballen,

über Transportarbeiten mit einem Anhänger und der Bestückung der Biogasanlage bis hinzu Fütterungsarbeiten des Viehbetriebes sowie Servicearbeiten.

### **Testbetrieb 3**

Der dritte landwirtschaftliche Betrieb, auf den der Teleskopklader in Betrieb genommen wurde, war ein Großbetrieb in Thüringen. Dieser Großbetrieb ist im Besitz von vier Teleskopladern, so dass eine relativ hohe Auslastung des Versuchsfahrzeuges gewährleistet war. Die Aufgaben erstreckten sich ebenfalls vom Umsetzen von Großballen, Beladen von LKW's mit landwirtschaftlichen Erzeugnissen, Wegebauarbeiten bis zu Fütterungsarbeiten des Viehbetriebes.

Für die unterschiedlichen Tätigkeiten wurden die Anbaugeräte dem Bedarf entsprechend gewechselt. Die Mitarbeiter der Betriebe bzw. Fahrer des Teleskopladers wurden bei der Übergabe in die Bedienung der Messtechnik eingewiesen. Zusätzlich wurden die Fahrer angehalten, das Versuchsfahrzeug praxisnah einzusetzen und den Einsatz stichwortartig zu dokumentieren.

Alle Messdaten wurden in einem weiteren Schritt manuell gesichtet und auf Störungen der Messtechnik überprüft. Die folgenden Auswertungen wurde mit den Softwaretools LabVIEW und DIAdem (beide von National Instruments) über eine vorhandene Schnittstelle automatisiert durchgeführt.

Die Klassierung der typischen Arbeitstätigkeiten ist notwendig, um in Zukunft ein Einsatzprofil eines Teleskopladers unter verschiedenen Anwendungen bestimmen zu können. In Kombination mit den ermittelten Belastungen während dieser Tätigkeiten lassen sich „Tätigkeitsspezifische Lastkollektive“, so genannte Teilkollektive, erstellen.

## 4 Aufgabenspektrum eines Teleskopladers

### 4.1 Tätigkeiten

Im Bereich der mobilen Arbeitsmaschinen kann zwischen Maschinen unterschieden werden, die zur Bearbeitung einer konkreten Aufgabe bzw. eines Arbeitsprozesses oder als Träger- bzw. Zugmaschine für universelle Einsätze konzipiert sind. Eine genaue allgemeingültige Gliederung bzw. Differenzierung dieser Maschinen ist nicht bekannt. Träger- und Zugfahrzeuge können für eine Vielzahl von unterschiedlichen Tätigkeiten mit den entsprechenden Anbaugeräten sehr allgemein eingesetzt werden. Ein bekanntes Beispiel ist der Traktor. Häufig wird er als Zugfahrzeug und / oder als Antriebsmaschine für Anbaugeräte wie Pflug, Egge, Grubber, Mähwerke usw. verwendet. Mit Anbaugeräten wie einem Frontlader können Traktoren auch Ladeaufgaben verrichten. Dies ermöglicht dem Betreiber einen erhöhten Auslastungsgrad des Fahrzeugs.

Mobile Arbeitsmaschinen, die zur Verrichtung einer speziellen Tätigkeit entwickelt sind, werden auch Selbstfahrer genannt. Als Beispiele können Mähdrescher, Häcksler, Kaltfräsen (Asphaltfräsen), Straßenwalzen usw. genannt werden. Teleskoplader können zu den Selbstfahrern gezählt werden, obwohl durch die Vielzahl an verfügbaren Anbaugeräten bzw. -möglichkeiten, wie ein 3-Punkt Hubwerk am Heck, weitere Tätigkeiten verrichtet werden können. Die primäre Aufgabe des Teleskopladers stellt das „Bewegen von Gütern mit dem Hubwerk“ dar. Die typischerweise eingesetzten Anbaugeräte sind diverse Schaufeln, Palettengabel und Ballengabel. Durch weitere Anbaugeräte wie Kehrmaschinen, Lasthaken, Astscheren, Schneepflug sowie Arbeitsbühnen wird die Einsatzmöglichkeit und somit der Nutzen für den Betreiber erhöht.

Die im praktischen Einsatz durchzuführenden Aufgaben eines Teleskopladers können in sieben Kategorien, den so genannten Arbeitstätigkeiten, eingeteilt werden (in Anlehnung an [Rüt06]). In **Tabelle 1** sind die sieben definierten Arbeitstätigkeiten mit einer kurzen Erläuterung zusammengefasst. Die kurzen Erläuterungen zeigen, dass eine genaue Beschreibung bzw. eine eindeutige Abgrenzung der einzelnen Arbeitstä-

tigkeiten schwierig ist und nur „weich“ vorgenommen werden kann. Eine Möglichkeit zur Abgrenzung kann vorgenommen werden, wenn der Fahr- bzw. Arbeitszyklus mit einbezogen wird. Im Folgenden soll auf die Unterschiede der einzelnen Arbeitstätigkeiten näher eingegangen werden.

<b>Arbeitstätigkeit</b>	<b>Kurze Erläuterung der Tätigkeit / Beispiel</b>
Laden	Be- und Entladen von anderen Fahrzeugen oder Anlagen
Stapeln	Genaueres Fahren wird gefordert, z. B. Stapeln von Ballen in der Bergehalle
Schieben	Fahrtrieb und Hubwerk erfordern volle Antriebsleistung
Umsetzen	Umsetzen der Güter (z. B. Kartoffeln) von A nach B (keine Lade- oder Stapelarbeit)
Transport / Überfahrten auf öffentlichen Straßen (Feld / Hof)	Überfahrt z. B. von der Hofstelle zu einer Feldscheune
Hydraulische Funktionen	Hydraulische Anbaugeräte, bei denen ein permanenter Hydraulikkreislauf zum Anbaugerät benötigt wird
Servicearbeiten / undefinierte Tätigkeiten	Tätigkeiten, die nicht in die anderen Kategorien passen

**Tabelle 1:** Definition der Arbeitstätigkeiten

Das *Laden* nimmt den höchsten Stellenwert innerhalb aller Arbeitstätigkeiten ein. Das Be- und Entladen von Fahrzeugen und Anlagen ist eindeutig beschreibbar. Als Bei-

spiel kann das Beladen eines LKW's mit Getreide oder Kartoffeln bzw. das Befüllen einer Biogasanlage mit Biomasse gesehen werden.

Das *Stapeln* beschreibt die Tätigkeit, in der das Anfahren zur Aufnahme und Abgabe eine erhöhte Genauigkeit bei der Positionierung erfordert. Beispiele sind das Sammeln von Ballen zu einem Stapel oder das Stapeln von so genannten Bigbags.

Beim *Schieben* wird die „volle“ Dieselmotorleistung im Fahrantrieb und im Hubwerk benötigt. Das Abschieben von Humus für den Wegebau ist eine typische Beispielanwendung.

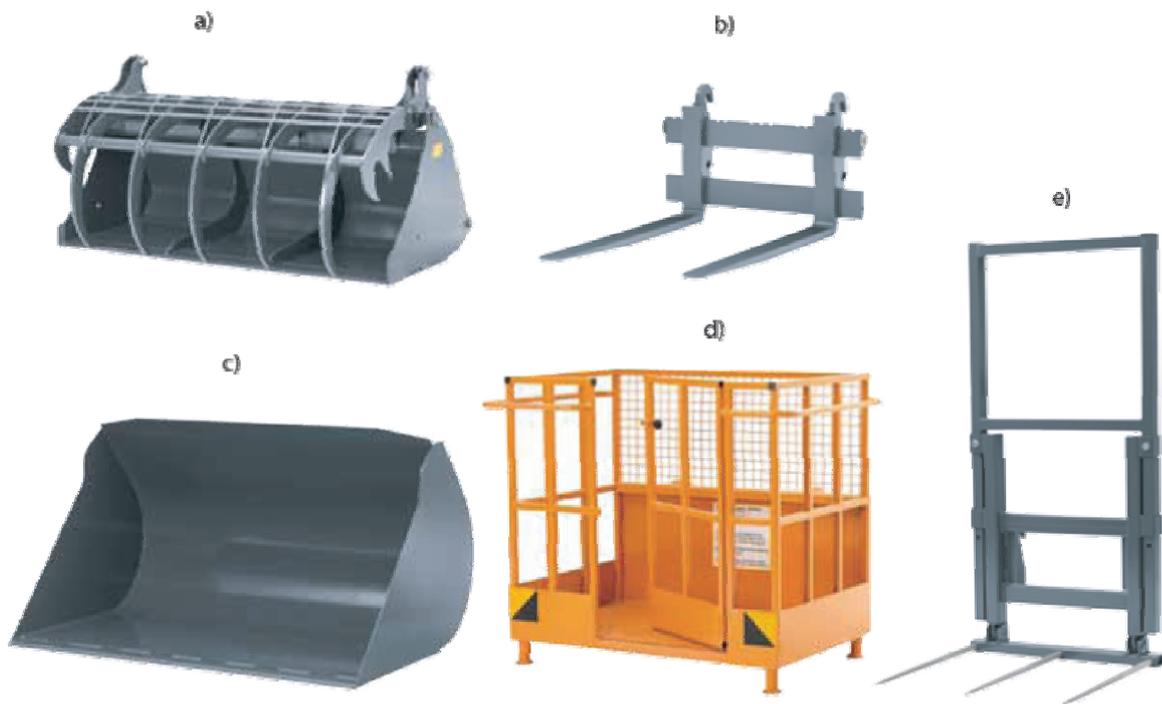
Das *Umsetzen* erfordert keine genaue Positionierung beim Fahrzyklus. Als Beispiel kann das Umsetzen von Getreide von der Entladestelle des Transportfahrzeuges zur Lagerstelle auf das Haufwerk gesehen werden.

Die Arbeitstätigkeiten *Transport / Überfahrt* auf öffentlichen Strassen, *Hydraulische Funktionen* und *Servicearbeiten / undefinierte Tätigkeiten* gehen eindeutig aus der kurzen Erläuterung hervor, so dass keine weiteren Beispielanwendungen genannt werden müssen. Im Folgenden sind diese definierten Arbeitstätigkeiten die Basis für die Auswertungen der gemessenen Belastungs-Zeit-Funktionen.

Zur Durchführung der einzelnen Tätigkeiten stehen diverse Anbauwerkzeuge zur Verfügung. In **Abbildung 22** sind fünf relevante Anbauwerkzeuge dargestellt. Bei den Schaufeln (vgl. **Abbildung 22 a**) und **c**) stehen dem Anwender eine Vielzahl an Varianten wie z. B. Erdschaufel, Standardschaufel usw. für den jeweiligen spezifischen Einsatz zur Verfügung, welche hier nicht alle berücksichtigt werden konnten. Zusätzlich werden weitere spezielle Anbauwerkzeuge wie Schneeschild, Kehrbesen, Lasthaken usw. auf dem Markt angeboten.

Die Verwendung der Anbaugeräte ist ebenfalls von den oben genannten Tätigkeiten abhängig. Die Schaufeln werden üblicherweise zum Umsatz von Schüttgütern wie Getreide, Kartoffeln, gehäckseltem Mais, Erde, Sand, Kies usw. verwendet. Die möglichen Tätigkeiten wären Laden, Schieben und Umsetzen. Teilweise werden Schaufeln mit Niederhaltern ausgerüstet (Greiferschaufeln), um z. B. die Entnahmen von

Silage zu gewährleisten. Die Palettengabel wird für palettierte Güter oder so genannte Bigbags bei den Tätigkeiten Laden, Stapeln, Umsetzen oder Servicearbeiten verwendet. Zum Laden, Stapeln und Umsetzen von Großballen, sowohl Quaderballen als auch Rundballen, wird eine Großballengabel verwendet. Die Arbeitsbühne eignet sich nur für Servicearbeiten für das sichere Anheben von Personen für Arbeiten in den möglichen Hubhöhen des Teleskopladlers.



**Abbildung 22:** Gängige Anbauwerkzeuge eines Teleskopladlers, a) Greiferschaufel, b) Palettengabel, c) Leichtgutschaufel, d) Arbeitsbühne, e) Großballengabel

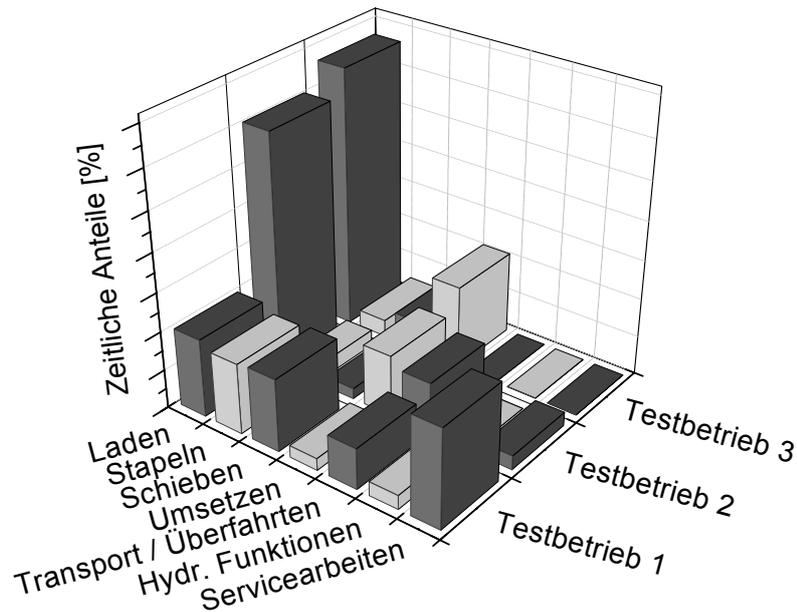
## 4.2 Zeitliche Anteile der einzelnen Tätigkeiten

Die Verwendung eines Teleskopladlers ist im Allgemeinen abhängig von der betrieblichen Voraussetzung, wie Betriebsart, verfahrenstechnischen und räumlichen Parametern sowie von dem Betreiber bzw. dem Fahrer. Die zeitlichen Anteile der jeweiligen Tätigkeiten können daher stark – im Vergleich der Betriebe untereinander – variieren. Während der Messdatenaufzeichnung wurden parallel die ausgeführten Tätigkeiten auf dem Versuchsträger aufgezeichnet. Die Einstellung erfolgte durch den Fahrer bei Antritt der Tätigkeit (siehe Kapitel 3).

In **Abbildung 23** werden die zeitlichen Anteile der jeweiligen Tätigkeiten der drei Testbetriebe dargestellt. Dabei sind die unterschiedlichen zeitlichen Verteilungen der jeweiligen Tätigkeiten und die der Testbetriebe zu erkennen. Beim Testbetrieb 1 besitzen die Tätigkeiten Laden, Stapeln, Schieben und Servicearbeiten annähernd gleiche Zeitanteile. Der höhere Zeitanteil beim Stapeln bzw. Servicearbeiten im Vergleich zu den weiteren Testbetrieben resultiert daraus, dass beim Testbetrieb 1 in einem hohen Maße Großballen für die Tierversorgung bewegt bzw. der Teleskoplader für die Pflege der Obstbauplantage verwendet wurde. Wie in Kapitel 5.3 vorgestellt wird, hat dies aus Sicht der Belastung keine signifikante Auswirkung. Somit wird durch diese unterschiedliche zeitliche Verteilung das Lastkollektiv bzw. das Bemessungskollektiv nicht maßgeblich beeinflusst.

Beim zweiten und dritten Testbetrieb dominiert die Tätigkeit Laden gegenüber allen anderen Tätigkeiten. Als weiterer Schwerpunkt wurde bei beiden Betrieben das Umsetzen identifiziert. Mit dieser Grafik ist die Streuung der zeitlichen Anteile der Tätigkeiten im Vergleich zu den Testbetrieben gut zu erkennen. Somit werden die oben genannten Einflussparameter bestätigt.

Ergänzend zu den Messaufzeichnungen wurden weitere elf Betriebe, welche einen Teleskoplader im Einsatz haben, mit Hilfe eines Fragebogens interviewt. Die Befragung der weiteren Betriebe hatte das Ziel, ein umfassenderes Bild über das Einsatzspektrum eines typisch verwendeten Teleskopladers zu gewinnen. Die Auswahl der Betriebe wurde aus einem Kundenpool in Kooperation mit einem Hersteller vorgenommen. Dabei wurde darauf geachtet, dass diese einen repräsentativen Charakter für deutsche landwirtschaftliche Betriebe aufweisen. Beim Ausfüllen des Fragebogens wurde der Betriebsleiter professionell unterstützt. Der Fragebogen ist im Anhang aufgeführt.

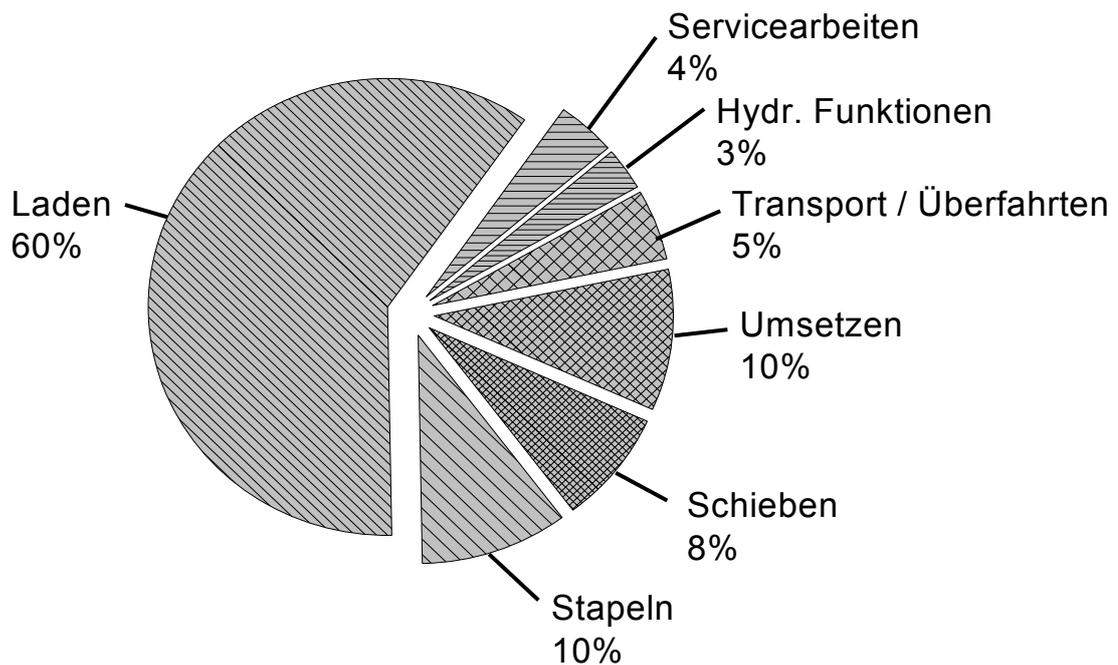


**Abbildung 23:** Zeitanteile der Tätigkeiten differenziert nach den drei Testbetrieben

Auf Basis der aufgezeichneten Zeitanteile der einzelnen Tätigkeiten auf den Testbetrieben sowie den Ergebnissen der Fragebögen wurden die zeitlichen Anteile der einzelnen Tätigkeiten für einen Durchschnittsbetrieb in Deutschland abgeschätzt.

Aufgrund der geringen Anzahl an ausgefüllten Fragebögen ist eine Aussage im statistischen Sinn nicht möglich. Aus diesem Grund wird auf eine Angabe der statistischen Kennwerte wie Standardabweichung usw. verzichtet.

Die hier vorgenommene Abschätzung, **Abbildung 24**, wurde im Vergleich zu den Tätigkeiten von Rüter weiter verfeinert, wobei eine Abweichung von den Werten für Westeuropa vorhanden ist. [Rüt06]



**Abbildung 24:** Zeitliche Verteilung der Tätigkeiten abgeschätzt für einen durchschnittlichen deutschen landwirtschaftlichen Betrieb

### 4.3 Laden

Die Auswertung der zeitlichen Anteile der Tätigkeiten hat ergeben, dass das Laden einen sehr hohen Anteil im Vergleich zu den restlichen Tätigkeiten aufweist. Bei dem abgeschätzten zeitlichen Einsatzprofil wurde dem Laden 60 % der gesamten zeitlichen Aufteilung zugewiesen.

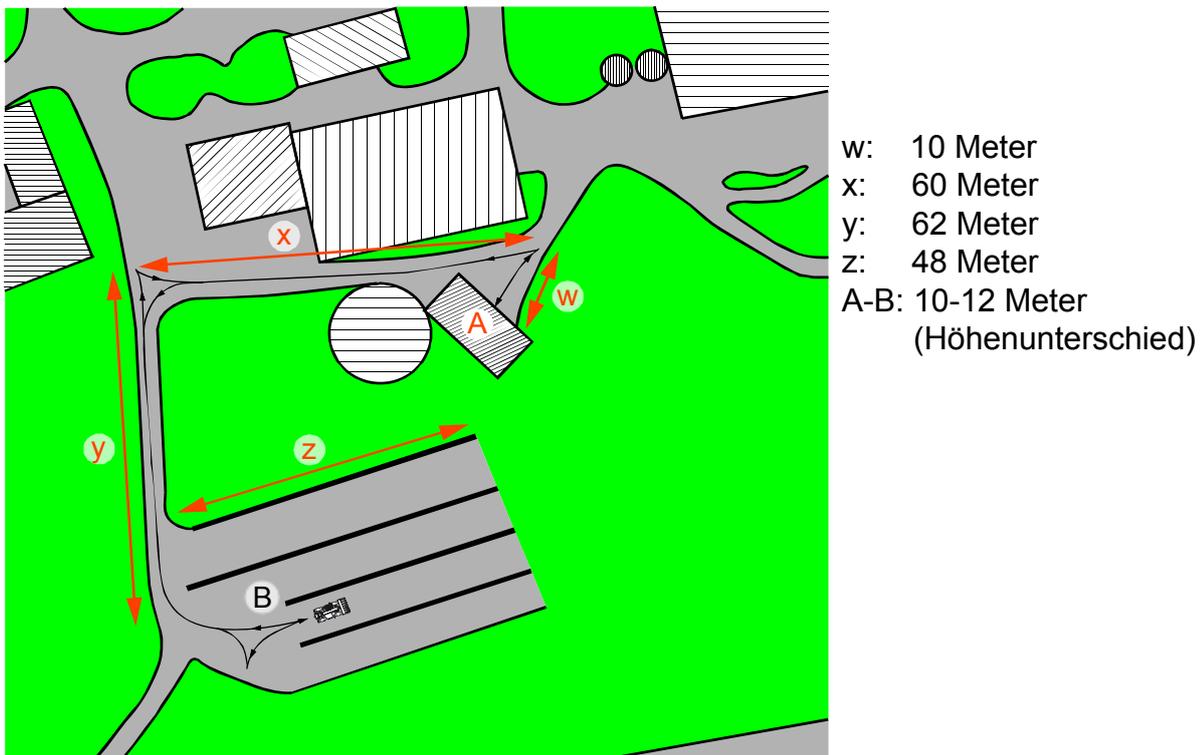
Im Folgenden wird zum besseren Verständnis exemplarisch auf zwei typische Ladetätigkeiten, dem Befüllen einer Biogasanlage und dem Großballenladen, eingegangen und miteinander verglichen.

#### 4.3.1 Befüllen der Biogasanlage

Teleskoplader werden häufig auf landwirtschaftlichen Betrieben mit einer angegliederten Biogasanlage eingesetzt, da so eine Grundaustattung der Arbeitsmaschine gewährleistet werden kann. Innerhalb dieser Arbeit werden Biogasbetriebe als solche Betriebe verstanden, welche eine landwirtschaftliche Biogasanlage betreiben. Als Substrat – auch Biomasse genannt – werden tierische und pflanzliche Abfallstoffe

sowie eigens angebaute Energiepflanzen wie Mais, Getreide usw. zur Vergärung in einen Fermenter eingespeist. In Kombination mit einem Blockheizkraftwerk (BHKW) wird aus dem produzierten Biogas elektrische und thermische Energie erzeugt. Biogasanlagen müssen in regelmäßigen Abständen (z. B. 2 bis 3-mal pro Tag bei diesem Testbetrieb) mit Biomasse versorgt werden. Diese Biomasse ist meist in benachbarten Flachsilos – umgangssprachlich Fahrsilo genannt – konserviert eingelagert.

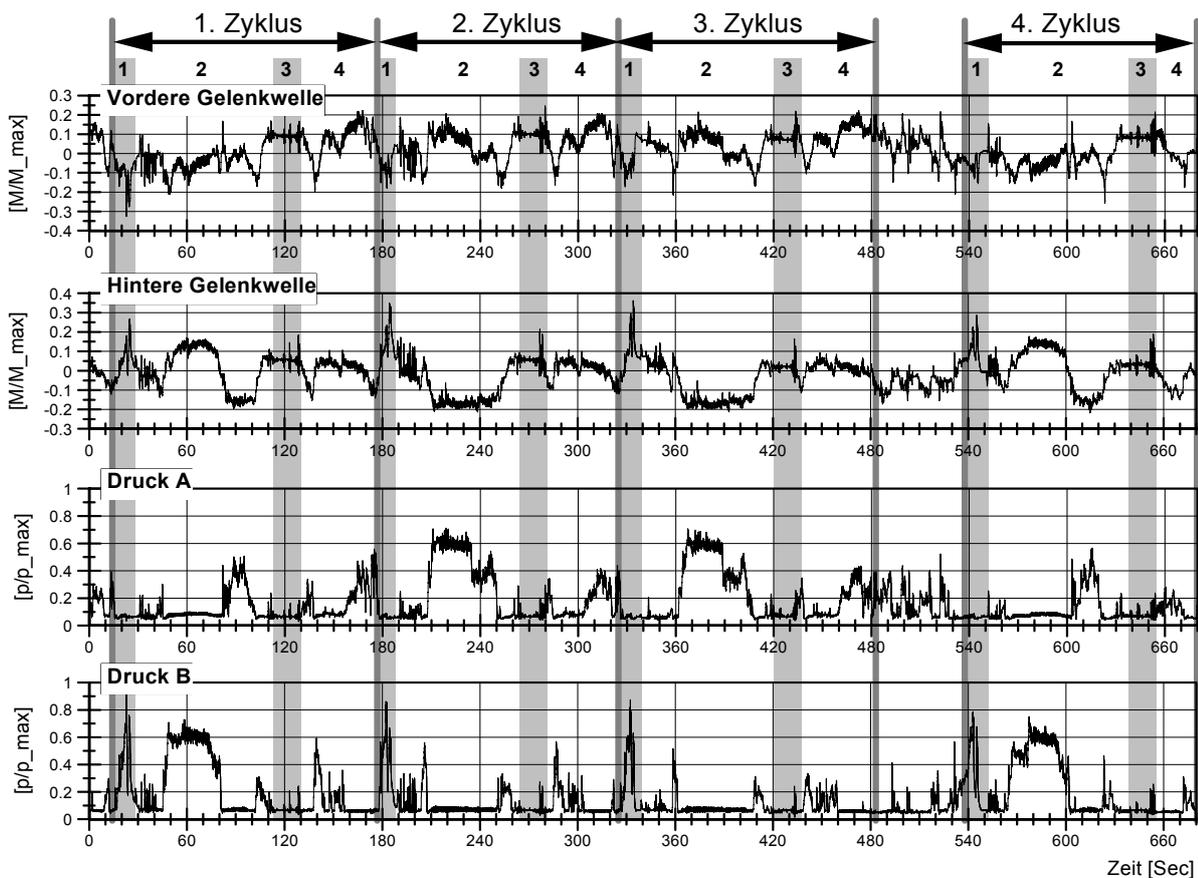
In **Abbildung 25** ist die räumliche Lage des betrachteten Testbetriebs dargestellt. An Position A wird die Biomasse an die Biogasanlage durch einfaches Abkippen in einen Vorratsbunker übergeben. Die Biomasse wird nach der Ernte an Position B konserviert und gelagert. Die Länge eines Weges vom Silo bis zur Biogasanlage beträgt 140 bis 180 Meter mit einem abgeschätzten Höhenunterschied von ca. 10 bis 12 Metern, wobei das Silo unterhalb der Biogasanlage liegt.



**Abbildung 25:** Örtliche Gegebenheiten des Testbetriebs 2 mit Biogasanlage

Wie bereits erwähnt, wird die Versorgung der Biogasanlage mit Biomasse häufig mit einem Teleskoplader vorgenommen. Teilweise kommen auch Radlader zum Einsatz. Dabei wird die Biomasse mit dem Teleskoplader mit angebauter Greiferschaufel aus dem Silo entnommen und auf direktem Weg der Biogasanlage zugeführt. Anschließend folgt die Rückfahrt zum Silo. Ein Umladevorgang der Biomasse auf ein Transportfahrzeug findet in der Regel nicht statt.

In **Abbildung 26** sind die Belastungs-Zeit-Funktionen (BZF) beider Gelenkwellen sowie der beiden Drücke des hydrostatischen Fahrtriebs auszugsweise von einem Befüllvorgang dargestellt. Bei den dargestellten vier Zyklen wurden die einzelnen Abschnitte durch graue und weiße Balken mit den Nummern 1 bis 4 hervorgehoben. Einen Bezug zur Untergliederung des Fahrzyklus sowie eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Abschnitte erfolgt zu einem späteren Zeitpunkt in Kapitel 4.3.3 durch die Tabelle 2. Die Fahrtrichtung wurde vom Fahrer frei nach Situation gewählt. In diesem Fall wurden beim 1. und 4. Zyklus der Streckenabschnitt y vorwärts bergauf, anschließend x rückwärts und Streckenabschnitt w zur Entladestelle vorwärts gefahren. Beim 2. und 3. Zyklus wurde die komplette Fahrt vom Silo zur Biogasanlage rückwärts gefahren. Der Fahrer bevorzugt beim Streckenabschnitt x die Rückwärtsfahrt aufgrund der Übersichtlichkeit bei stark gefüllter Greiferschaufel. Die Rückfahrt zum Silo wurde immer vorwärts durchgeführt. Beim 4. Zyklus wurde bei der Rückfahrt nicht mehr bis direkt zur Biomasse gefahren, um diese erneut aufzunehmen, weil zu diesem Zeitpunkt eine erneute Befüllung der Anlage nicht mehr möglich war. Bei der BZF, Abbildung 26, ist erkennbar, dass die Zyklen 1 und 4 bzw. die Zyklen 2 und 3 ähnliche Verläufe aufweisen. An den beiden Druckverläufen ist das zyklische Belastungsmuster immer zu Beginn eines Zyklus bei der Aufnahme der Biomasse zu erkennen. Bei Vorwärtsfahrt mit Beschleunigung wird Druck B zur Hochdruckseite des hydrostatischen Fahrtriebs. Bei Rückwärtsfahrt wechselt bei einem geschlossenen hydrostatischen Fahrtrieb die Hoch- und Niederdruckseite. Dementsprechend wird Druck A zur Hochdruckseite. Die durchschnittliche Dauer beträgt 2 Minuten und 28 Sekunden pro Zyklus.



**Abbildung 26:** Belastungs-Zeit-Funktionen beim Befüllen der Biogasanlage auf dem Testbetrieb 2

Im praktischen Fall treten immer Drehzahldifferenzen zwischen den beiden Achsen aufgrund von Kurvenfahrten, ungleicher Achsbelastung, ungleichen Profiltiefen usw. auf. Bei diesem Antriebsstrang können diese Drehzahldifferenzen aufgrund der starren Verbindung zwischen der vorderen und hinteren Achse nicht ausgeglichen werden. Somit muss die Drehzahldifferenz über den Schlupf des Rad-Boden-Kontakts ausgeglichen werden, was somit ein aufgeprägtes Drehmoment an den Gelenkwellen zur Ursache hat. Diese Drehmomentverspannungen lassen sich an den unterschiedlichen Verläufen der BZF der beiden Gelenkwellen bei Vor- bzw. Rückwärtsfahrt erkennen. Deutlich kommen diese Drehmomentverspannungen im dritten Abschnitt (Entladen) bei jedem der vier Zyklen zum Ausdruck, bei dem beide Gelenkwellen das gleiche Vorzeichen einnehmen. Gemäß der in Kapitel 3.1 vorgestellten Sensortechnik wird für den Vortrieb des Fahrzeugs in einer Fahrtrichtung ein positives und negatives Drehmoment an den Gelenkwellen benötigt. Die Höhe der Verspannung variiert je

nach Fahrmanöver, Untergrund, Beladung usw. und kann nicht pauschal beurteilt werden. Zwischen dem 3. und 4. Zyklus wurde im Silo die Biomasse von den Seiten „zusammengeräumt“, was bei dieser Betrachtung keinem Zyklus entspricht, aber dennoch üblich ist. Im Folgenden wird die Ladetätigkeit Großballenladen näher vorgestellt.

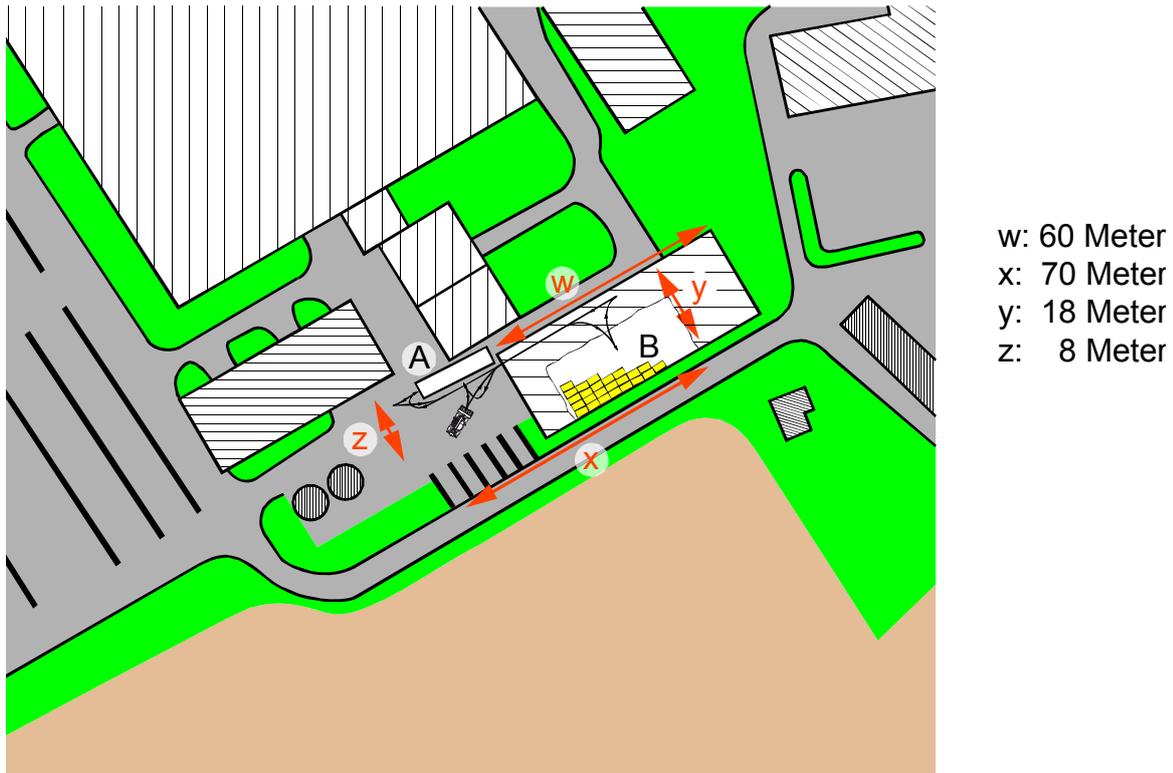
### 4.3.2 Großballenladen

Das Be- und Entladen von Großballen, Rund- und Quaderballen, stellt ebenfalls eine Kerntätigkeit eines Teleskopladers dar. Großballen werden in der Regel aus Heu, Stroh und Grassilage gepresst. Heu und Grassilage werden für die Tierfütterung und Stroh als Einstreu oder zur industriellen Weiterverarbeitung verwendet. Das Gewicht variiert ganz allgemein zwischen 350 kg bei Strohrundballen und 900 kg bei Grassilagequaderballen pro Ballen. Als Anbauwerkzeug wird typischerweise eine Ballengabel oder eine Ballenzange verwendet. (siehe Abbildung 1)

Für das Laden von Großballen sind zwei praktische Szenarien üblich: das Ballenladen auf dem Feld und auf dem landwirtschaftlichen Betrieb. Während der Erntephase wird der Teleskoplader zum Beladen eines Transportfahrzeuges auf das Feld überführt. Auf dem Feld werden die flächig verteilten Großballen einzeln aufgenommen und auf das Transportfahrzeug verladen. Die Entfernung zwischen dem Liegeplatz des Ballens und der Beladeposition auf das Transportfahrzeug ist unter anderem abhängig von den Fahrern, der Flexibilität sowie der Geländetauglichkeit des Transportfahrzeuges und kann daher stark variieren. In der Regel werden kurze Distanzen angestrebt, um so die Ladezeit zu verkürzen und die Produktivität zu steigern. Auf dem landwirtschaftlichen Betrieb kann sowohl das Beladen als auch das Entladen von Transportfahrzeugen stattfinden. Im Folgenden wird der Entladevorgang näher vorgestellt.

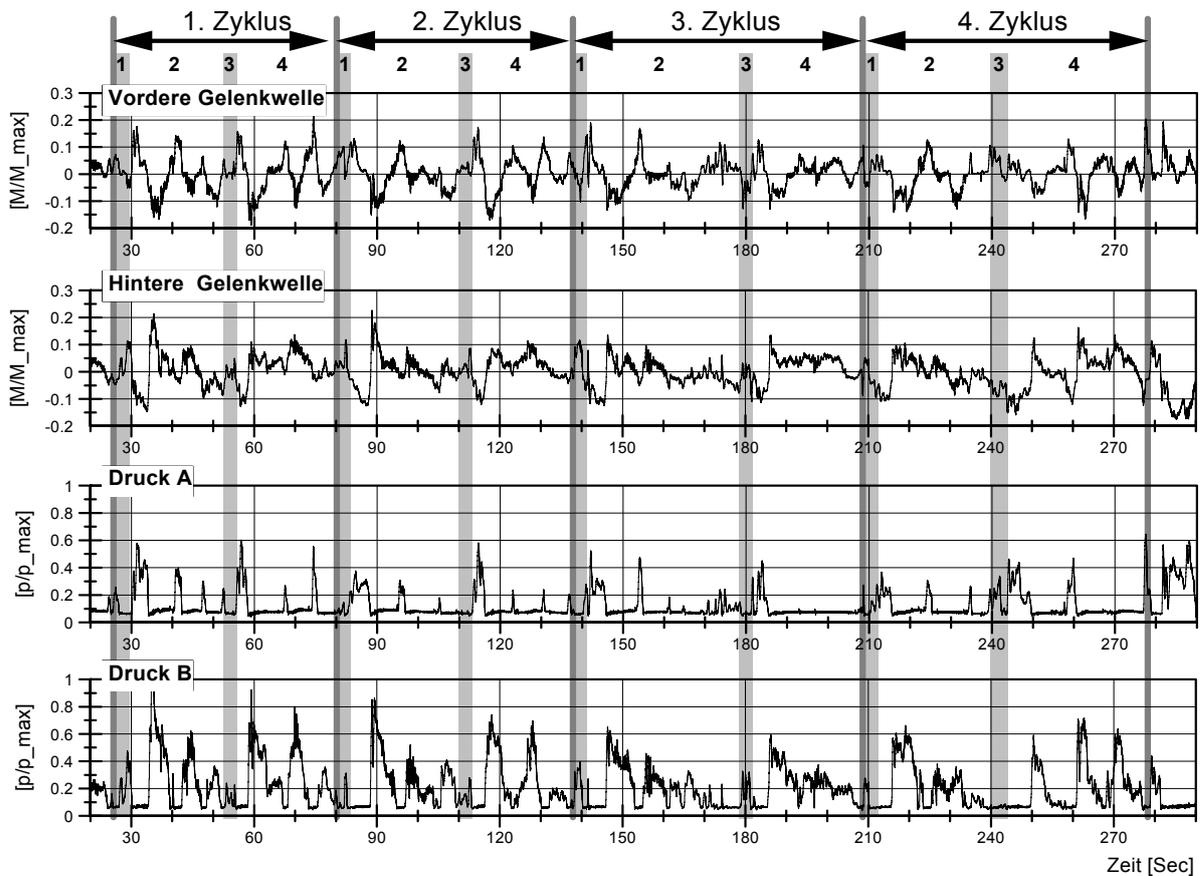
In **Abbildung 27** ist die Draufsicht der örtlichen Gegebenheiten des Testbetriebs 3 dargestellt. Mit Position A wird der Standort des Transportfahrzeuges bezeichnet, an dem die Großballen aufgenommen werden. Das Ballenlager befindet sich in Position B innerhalb der Lagerhalle. In Abhängigkeit der Ballenlage auf dem Transport-

fahrzeug (längs oder quer) ergeben sich zwei Wegvarianten. Bei der Variante 1 werden die Großballen vom Heck und bei der Variante 2 seitlich vom Transportfahrzeug abgeladen. Die Distanz entspricht bei der Variante 1 ca. 106 Meter und bei der Variante 2 96 Meter. Zwischen Position A und Position B ist kein Höhenunterschied vorhanden.



**Abbildung 27:** Örtliche Gegebenheiten der Ladestelle auf dem Testbetrieb 3

**Abbildung 28** stellt die BZF der beiden Gelenkwellen sowie die Drücke des hydrostatischen Fahrtriebs beim Großballenladen dar. Die BZF kann in vier Abladezyklen unterteilt werden. Der Fahrer entschied bei allen Zyklen, die Streckenanteile mit den langen Distanzen vorwärts zu fahren, so dass keine Unterschiede in der Abfolge vorhanden sind. Die durchschnittliche Zykluszeit beträgt beim Großballenladen 1 Minute und 3 Sekunden. Wie bei der Tätigkeit Biogasanlage befüllen näher erläutert, treten auch hier beim Großballenladen Drehzahldifferenzen der Achsen auf.



**Abbildung 28:** Belastungs-Zeit-Funktionen beim Großballenladen auf dem Testbetrieb 3

### 4.3.3 Analyse der Ladetätigkeiten

In diesem Kapitel werden die in den vorherigen Kapiteln vorgestellten Ladetätigkeiten miteinander verglichen, die Gemeinsamkeiten herausgestellt und aus Sicht der Belastungs-Zeit-Funktionen (BZF) bewertet. Beide Ladetätigkeiten lassen sich allgemein in sechs Abschnitte pro Zyklus unterteilen. In **Tabelle 2** sind diese Abschnitte der Reihenfolge nach dargestellt, wobei der Beginn mit dem Befüllen der Schaufel bzw. der Aufnahme des Großballens beginnt. Die letzte Spalte entspricht der Abschnittsnummer in Bezug auf die BZF der Abbildung 26 und der Abbildung 28. Das Rücksetzen des Teleskopladers und die Überfahrt werden aus Gründen der Übersichtlichkeit zusammengefasst.

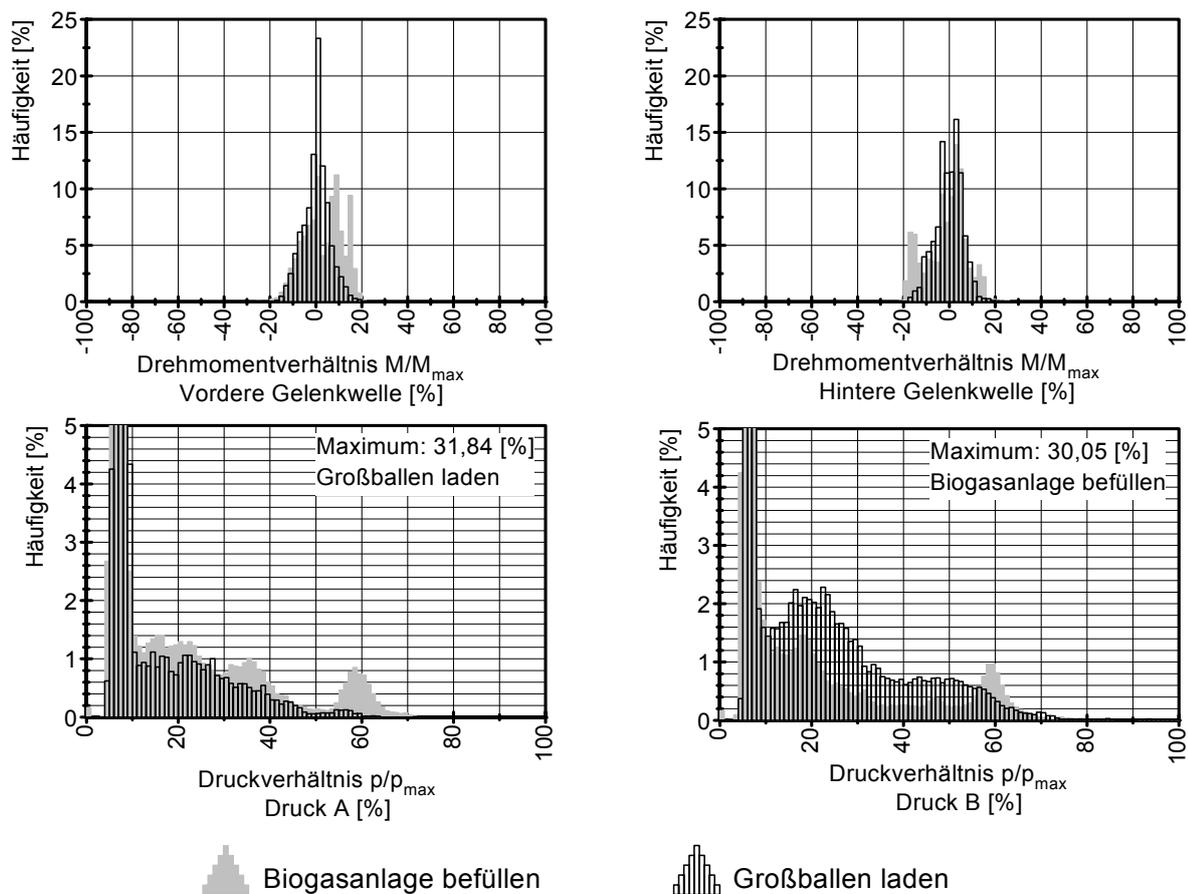
<b>Biogasanlage befüllen</b>	<b>Großballen laden</b>	<b>Abschnitt der BZF</b>
1. Befüllen der Schaufel	1. Aufnahme des Großballens	1
2. Rücksetzen mit voller Schaufel	2. Rücksetzen mit Großballen	2
3. Überfahrt zur Entladestelle (Biogasanlage)	3. Überfahrt zur Entladestelle (Lagerhalle)	
4. Entladen	4. Entladen	3
5. Rücksetzen	5. Rücksetzen	4
6. Überfahrt zur Ladestelle (Silo)	6. Überfahrt zur Ladestelle (Transportfahrzeug)	

**Tabelle 2:** Untergliederung eines Fahrzyklus

Bei beiden BZF ist ein wiederkehrendes Muster zwischen den einzelnen Zyklen zu erkennen. Die Ausprägung der einzelnen Abschnitte im Hinblick auf die Belastungshöhe sowie der zeitlichen Dauer ist unterschiedlich stark. Zum Vergleich der beiden Ladetätigkeiten wurden von den einzelnen BZF Histogramme erstellt. Die Klasseneinteilung erfolgte mit 100 Klassen über dem maximal möglichen Belastungsbereich, wobei die Klassenmitten mit der maximalen möglichen Belastung normiert wurden. Die maximal mögliche Belastung (Druck bzw. Drehmoment) wurde durch den maximal zulässigen Druck des hydrostatischen Fahrantriebs sowie den verbauten hydraulischen und mechanischen Komponenten bei einer verlustfreien Annahme festgelegt. Die Häufigkeiten wurden relativ dargestellt, so dass ein Vergleich der beiden Ladetätigkeiten gewährleistet ist.

In **Abbildung 29** sind die Häufigkeiten der einzelnen Betriebspunkte: der beiden Gelenkwellen sowie der beiden Drücke in Form eines Histogramms aufgetragen. Innerhalb eines Diagramms sind beide Ladetätigkeiten gegenübergestellt. Bei der vorderen Gelenkwelle ist beim Großballenladen eine gleichmäßige Verteilung um die Nulllage zu erkennen, welche sich bis auf  $\pm 20\%$  der maximalen Belastung erstreckt. Beim Befüllen der Biogasanlage ist diese gleichmäßige Verteilung nicht zu erkennen. Bei der hinteren Gelenkwelle ist beim Großballenladen eine ähnliche Charakteristik der Verteilung wie bei der vorderen Gelenkwelle gegeben. Auffallend ist, dass die beiden Klassen direkt um die Nulllage eine geringere Häufigkeit aufweisen als die Nachbarklassen. Als Grund wird die bereits erwähnte Verspannung der Gelenkwellen vermutet. Dies kann mit dieser Auswertung nicht eindeutig belegt werden. Zum Nachweis werden in Kapitel 5.6 mögliche Maßnahmen beschrieben. Beim Befüllen der Biogasanlage ist eine heterogene Verteilung der Häufigkeit zu erkennen.

Bei beiden Drücken wurden die komplette BZF ohne Unterscheidung zwischen Hoch- und Niederdruck analysiert. Somit stellt sich eine relativ hohe Häufigkeit im Bereich bis  $10\%$  des maximalen Drucks ein. Aus Gründen der Darstellbarkeit wurde das Diagramm bis auf  $5\%$  Häufigkeit skaliert. Beim Vergleich der beiden Drücke A und B beim Befüllen der Biogasanlage weisen beide Verteilungen eine ähnliche Charakteristik auf. Die Bergfahrt bei dieser Tätigkeit, welche hohe Drücke im Fahrantrieb zu Folge hat, wurde sowohl als Vor- als auch als Rückwärtsfahrt durchgeführt. Die Häufung bei ca.  $60\%$  resultiert aus der Druckregelung des hydrostatischen Fahrantriebs bei dem der verstellbare Motor in Richtung maximalen Schluckvolumens verstellt wird. Beim Großballenladen stellt sich eine Häufigkeit im Bereich von  $15$  bis  $20\%$  beim Druck B ein. Dieser Druck wird für das Fahren bei Geradeausfahrt auf der Ebene benötigt. Im Vergleich zum Druck A sind die Anteile des Hochdrucks (Drücke  $> 10\%$ ) höher, da überwiegend vorwärts gefahren wird.



**Abbildung 29:** Relative Häufigkeit der Belastung beider Ladetätigkeiten

Im Vergleich der beiden Ladetätigkeiten stellen sich unterschiedliche Häufigkeiten des jeweiligen Belastungsniveaus ein. Diese resultieren aus den unterschiedlichen Distanzen und den daraus entstehenden Vorzugsfahrtrichtungen sowie den örtlichen Gegebenheiten, Fahrern, Untergrundbedingungen usw..

Eine verallgemeinerbare Häufigkeitsverteilung der Belastung ist aus dieser Betrachtung nicht ableitbar. Aus Sicht der Betriebsfestigkeit kann diese Analyse eine Hilfestellung sein, um die unterschiedlichen BZF aus einer anderen Sichtweise miteinander zu vergleichen. Eine direkte Aussagekraft in Bezug auf die Schädigung eines Bauteils ist durch die unterschiedlichen Verteilungen nicht gegeben, weil diese nur die Häufigkeit der einzelnen aufgetretenen Betriebspunkte, eingeteilt in Klassen, repräsentieren.

## 5 Lastkollektivauswertungen

Auf Basis der aufgezeichneten Belastungs-Zeit-Funktionen (BZF) lässt sich eine Vielzahl von Auswertungen durchführen. Innerhalb dieser Arbeit werden Lastkollektive vorgestellt, welche die Grundlage für Betriebsfestigkeitsberechnungen bilden, sowie für den experimentellen Betriebsfestigkeitsversuch zur Validierung von Bauteilen verwendet werden können. Die Lastkollektive werden aus den aufgezeichneten BZF im Offline-Verfahren nach den in Kapitel 2.4 vorgestellten Methoden erstellt. Lastkollektive beschreiben in erster Linie die Höhe der einzelnen Beanspruchung – angegeben in Klassen – und deren aufgetretene Häufigkeit innerhalb eines Betrachtungszeitraumes. Zur Klassierung der BZF wurde die zweiparametrische Rainflow-Klassierung verwendet. Aus den Ergebnissen der Rainflow-Klassierung werden durch einen weiteren Rechengang die so genannten Amplitudenkollektive abgeleitet.

Bei der Aufzeichnung der BZF wurde darauf geachtet, dass die BZF separat nach den einzelnen Tätigkeiten (siehe Kapitel 4.1) ausgewertet werden können. Somit kann für jede Tätigkeit das spezifische Lastkollektiv erstellt und mit den weiteren Lastkollektiven der einzelnen Tätigkeiten – bei einer gleichen Bezugszeit – verglichen werden.

Die Auswertung der BZF kann in drei Schritte untergliedert werden:

1. Durchführen der Rainflow-Klassierung für die festgelegten Tätigkeiten der jeweiligen Messstellen
2. Ableiten der Amplitudenkollektive aus den Rainflow-Matrizen.
3. Anpassen der Amplitudenkollektive auf eine Bezugszeit, um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten.

In **Abbildung 30** sind die Ergebnisse der Rainflow-Klassierungen der Drehmomente der vorderen Gelenkwelle der einzelnen Testbetriebe kumuliert dargestellt. Bei diesen Auswertungen wurde für die einzelnen Testbetriebe keine Unterscheidung der einzelnen Tätigkeiten vorgenommen. Eine zeitliche Anpassung wurde nicht durchgeführt.

Die zeitliche Messdauer des Testbetriebs 1 bzw. Testbetriebs 3 entspricht  $1/2$  bzw.  $2/3$  des Testbetriebs 2.

Das Drehmoment wurde über den Messbereich mit 100 Klassen klassiert und auf die maximal mögliche Belastung normiert. Die Anzahl der Zählwerte einzelner Klassen wird logarithmisch über den Farbverlauf dargestellt. Der Aufbau ist bei allen Darstellungen identisch. Dies ermöglicht auch einen Vergleich der Ausprägung der einzelnen Kollektive der verschiedenen Betriebe.

Die Ausprägungen der Häufigkeiten der einzelnen Klassen sind trotz unterschiedlicher Bezugszeiten auf allen Testbetrieben tendenziell identisch. Bei den Testbetrieben 2 und 3 ist die Verspannung des Antriebsstranges auf der Diagonalen (von links unten nach rechts oben) im negativen Bereich gut zu erkennen. Auf dieser Diagonale sind Schwingspiele mit Mittellasten und geringen Amplituden abgebildet. In Richtung der anderen Diagonale (90 Grad versetzt) werden Schwingspiele mit hohen Amplituden und somit die stärker schädigungsrelevanten Belastungen dargestellt. Beim Testbetrieb 3 ist die Verteilung der stark schädigungsrelevanten Schwingspiele im Vergleich zu den anderen Testbetrieben am stärksten ausgeprägt. Ebenfalls befindet sich ein Großteil dieser Häufigkeit im negativen Vorzeichenbereich. Der Testbetrieb 1 stellt bei dieser und den folgenden Betrachtungen aufgrund des Tätigkeitsspektrums und der Betriebsstruktur einen Sonderfall dar. (vgl. Kapitel 5.5.1)

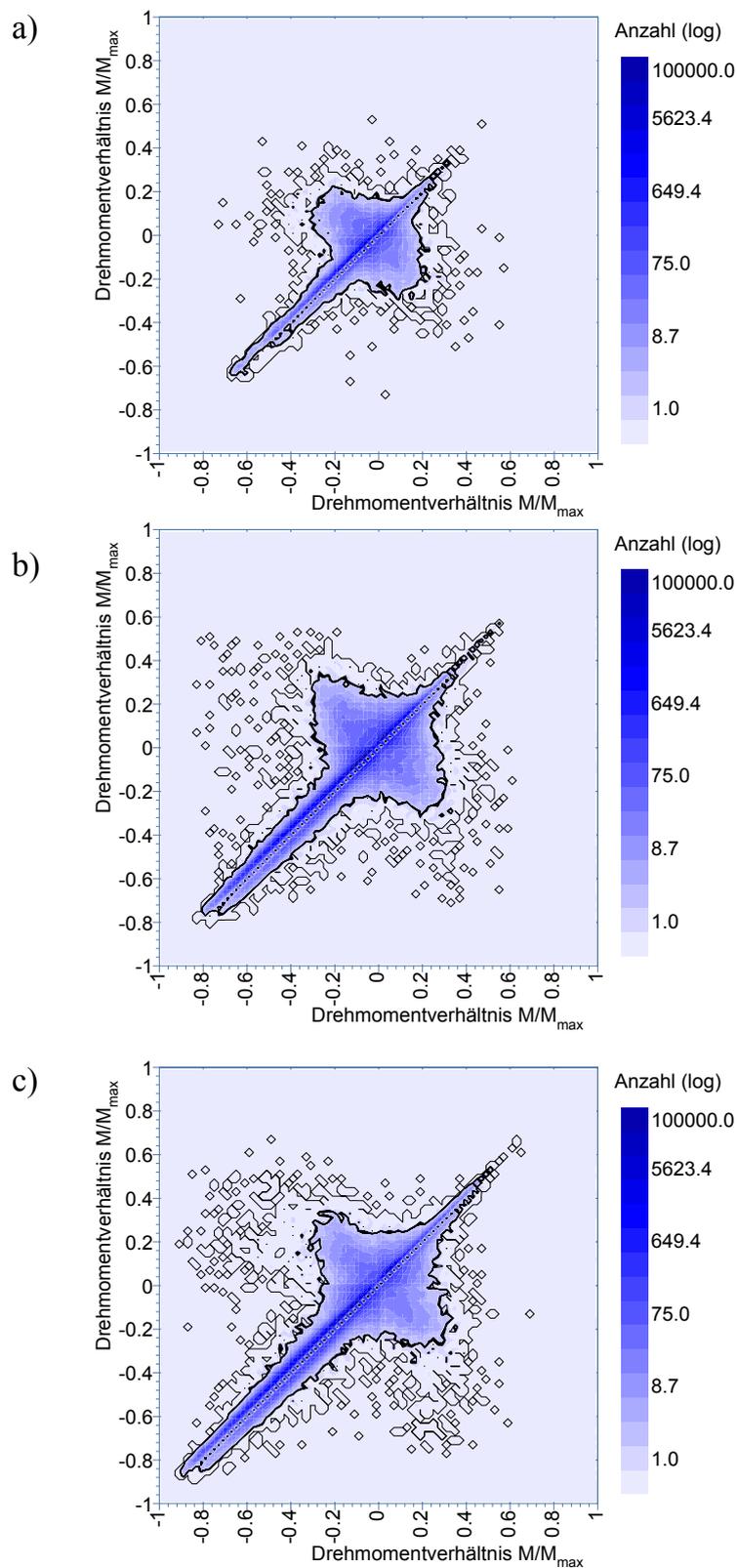
Die Ergebnisse der Rainflow-Klassierung der hinteren Gelenkwelle aller Testbetriebe sind in **Abbildung 31** dargestellt. Im Gegensatz zu der vorderen Gelenkwelle sind die Häufigkeiten der Belastungen im positiven Bereich angesiedelt. Dies ist auf die Vorzeichenkonvention bei der Messdatenerfassung und den höheren Anteilen der Vorwärtsfahrt zurückzuführen. Im Vergleich zur vorderen Gelenkwelle ist keine gespiegelte Verteilung der Schwingspiele zu erkennen. Ein Grund dafür kann die Entlastung der hinteren Achse beim Anheben bzw. Transport einer Last sein, wobei sich das übertragbare Drehmoment reduziert. Als weiteren Grund kann der typische Einsatz des Fahrzeuges genannt werden, bei dem die hohen Belastungen bei der durchschnittlichen Rückwärtsfahrt im Vergleich z. B. zum Schieben nicht auftreten.

Das Bild der Belastungshäufigkeiten ist beim Testbetrieb 1 ebenfalls nicht so stark ausgeprägt. Trotz des geringeren Betrachtungszeitraumes deutet dies auf eine geringere Beanspruchung der hinteren Gelenkwelle gegenüber der vorderen Gelenkwelle hin.

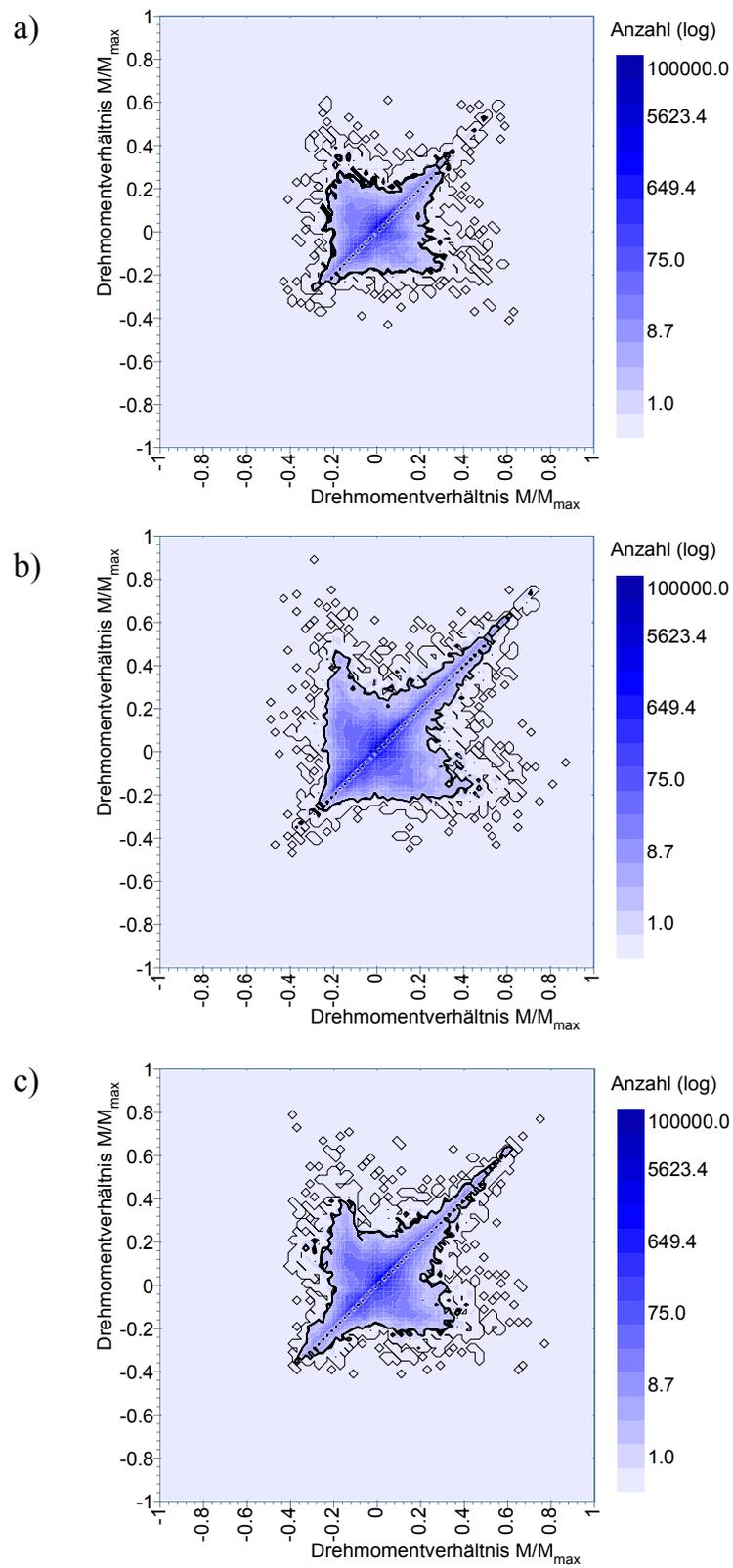
Bei den folgenden Auswertungen wurde keine Unterscheidung von Hoch- und Niederdruck des hydrostatischen Fahrtriebs vorgenommen. Der ständige Wechsel von Hoch- auf Niederdruck stellt ebenso ein nicht zu vernachlässigendes Schwingspiel dar. Die Rainflow-Klassierung erfolgte über den Messbereich von 0 bis Maximaldruck mit 100 Klassen.

Das Ergebnis der Auswertung des hydrostatischen Drucks A zeigt **Abbildung 32**. Die Charakteristik weicht von den bereits vorgestellten Ergebnissen der Gelenkwellen ab. Auf der Diagonalen werden ebenfalls die Drücke mit geringen Druckamplituden und einem zugehörigen Mitteldruck abgebildet. Am linken sowie am unteren Rand der Diagramme ist eine hohe Häufigkeit zu erkennen. Diese resultieren aus dem dynamischen Druckwechsel von Nieder- auf Hochdruck bei einem geschlossenen hydrostatischen Fahrtrieb. Diese Druckwechsel werden durch Umschaltvorgänge der Fahrrichtungen (Reversieren) sowie durch den Wechsel von Zug auf Schub beim normalen Fahrbetrieb verursacht. Diese Druckwechsel finden bei unterschiedlichen Hochdrücken statt und enden bzw. starten immer auf Niederdruckniveau. In der linken unteren Ecke kommen die Druckschwankungen der Niederdruckseite zum Ausdruck.

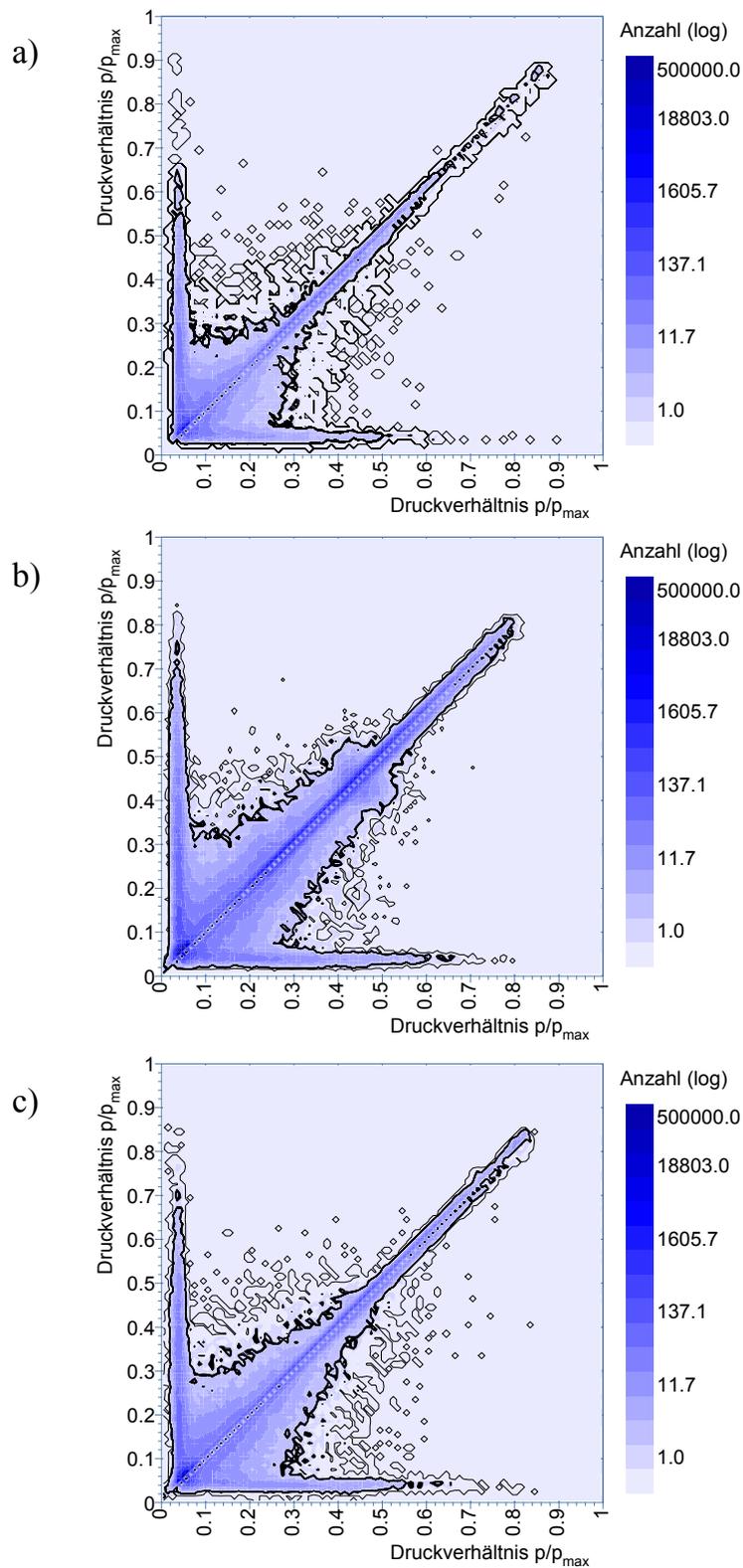
In **Abbildung 33** sind die Rainflow-Matrizen des Drucks B aller Testbetriebe dargestellt. Der Druck B nimmt die Hochdruckseite beim Beschleunigen vorwärts, Schieben usw. ein. Im Vergleich zu Druck A ist eine deutlich höhere Häufigkeit um die Diagonale im Bereich von 0,2 bis 0,7 % zu erkennen.



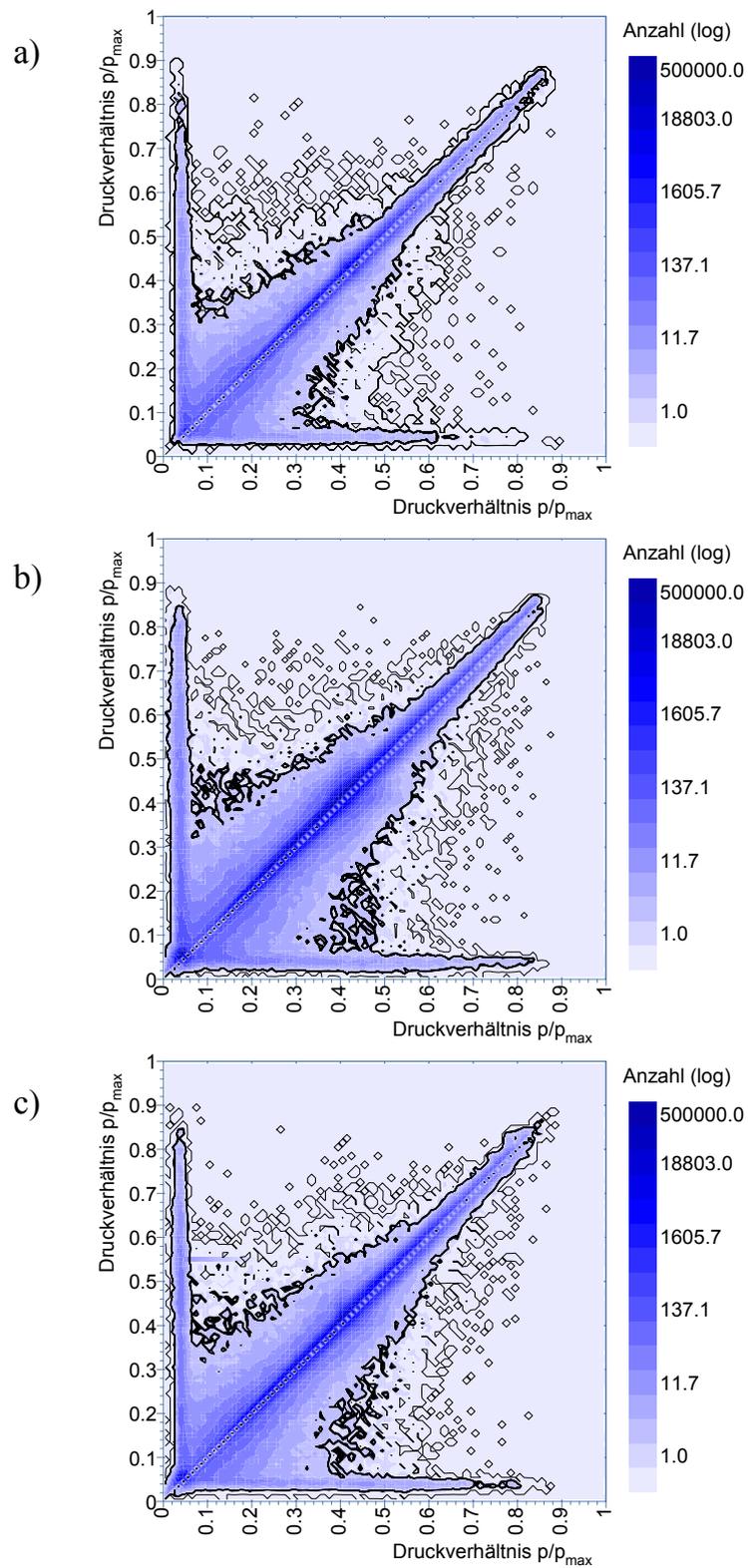
**Abbildung 30:** Rainflow-Matrix vordere Gelenkwelle  
a) Testbetrieb 1, b) Testbetrieb 2, c) Testbetrieb 3



**Abbildung 31:** Rainflow-Matrix hintere Gelenkwelle  
a) Testbetrieb 1, b) Testbetrieb 2, c) Testbetrieb 3



**Abbildung 32:** Rainflow-Matrix Druck A  
a) Testbetrieb 1, b) Testbetrieb 2, c) Testbetrieb 3

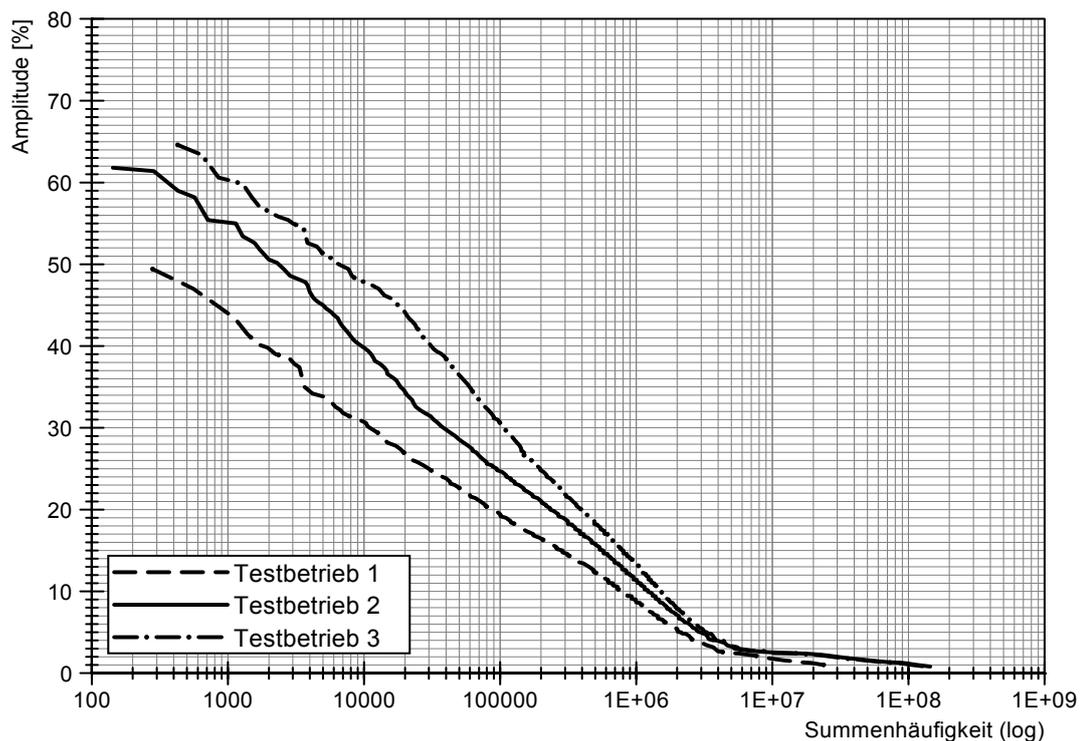


**Abbildung 33: Rainflow-Matrix Druck B**  
a) Testbetrieb 1, b) Testbetrieb 2, c) Testbetrieb 3

Zudem ist die Streuung einzelner Zählwerte und somit der Belastungen im betrachteten Bereich höher. Bei den Testbetrieben 2 und 3 ist eine Ähnlichkeit des Musters beim Druck A bzw. Druck B erkennbar.

Ausgehend von diesen Rainflow-Matrizen können Amplitudenkollektive nach dem vorgestellten Verfahren (siehe Kapitel 2.4.2) abgeleitet werden. Bei der Berechnung aller Amplitudenkollektive wurde eine Mittelspannungsempfindlichkeit von  $M = 0,2$  angenommen. Dies entspricht der oberen Grenze für einen unlegierten Stahl wie z. B. einem 1.1730 (CK 45). [Hai06] Dieser unlegierte Stahl kann zur Herstellung von Gelenkwellen verwendet werden. Um einen Vergleich der einzelnen Amplitudenkollektive vornehmen zu können, wurde jedes Amplitudenkollektiv auf eine Bezugszeit, welche der geforderten Maschinenlebensdauer entspricht, extrapoliert. Eine Extrapolation in Lastrichtung (Ordinatenachse) wurde nicht vorgenommen. Somit werden die real aufgezeichneten Kollektivhöchstwerte nicht verändert.

In **Abbildung 34** sind die Amplitudenkollektive der einzelnen Testbetriebe von der vorderen Gelenkwelle dargestellt. In diesem Diagramm wurde nur die Summenhäufigkeit der Schwingspiele logarithmiert skaliert, um die Amplituden der einzelnen Testbetriebe besser darstellen zu können. Die unterschiedlichen Amplitudenkollektive werden durch die bereits erläuterten Parameter – Art des landwirtschaftlichen Betriebes, verfahrenstechnische und räumliche Bedingungen sowie Fahrer – beeinflusst. Im Bereich bis 3 % der Amplitude werden Schwingspiele mit einer hohen Häufigkeit abgebildet. Diese Schwingspiele mit dieser geringen Amplitude bzw. Belastung – im Frequenzbereich von ca. 30 bis 60 Hz – wirken sich auf die Lebensdauerberechnung (nach Miner elementar) vernachlässigbar klein aus. In der Regel liegen diese geringen Amplituden im Dauerfestigkeitsbereich. Der Testbetrieb 3 stellt dabei das höchstbeanspruchte Kollektiv dar. Die unterschiedlichen Streuungen der Ergebnisse der Rainflow-Klassierungen werden in dieser Darstellung verständlicher dargestellt. Der Kollektivhöchstwert schwankt zwischen den Testbetrieben von 49 bis 65 %. Bei einer Schwingspielzahl von  $2 \cdot 10^6$  liegen die Amplituden im Bereich von 5 bis 8 %.



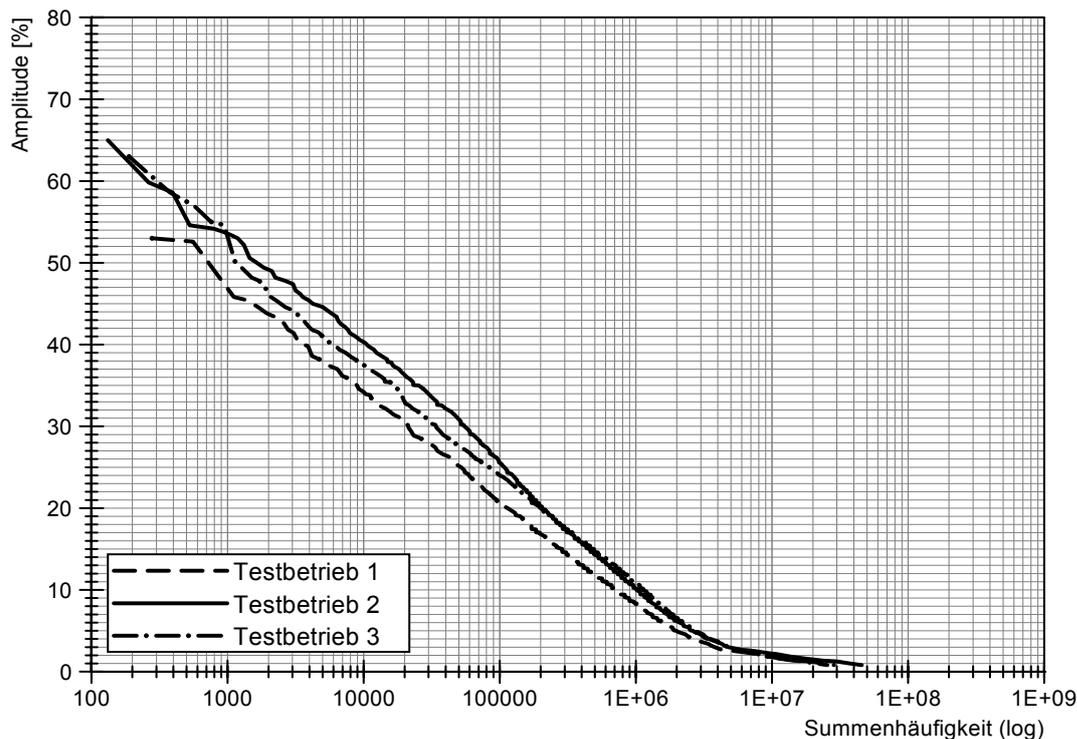
**Abbildung 34:** Amplitudenkollektive der Testbetriebe; vordere Gelenkwelle

Eine Darstellung der Klassenhäufigkeit der vorderen Gelenkwelle des Testbetriebs 2 ist im Anhang (Kapitel 9.2) beigefügt.

Die Amplitudenkollektive der hinteren Gelenkwelle aller Testbetriebe sind in **Abbildung 35** dargestellt. Der Bereich unter 3 % der Amplituden ist analog zur vorderen Gelenkwelle zu sehen. Im Vergleich zur vorderen Gelenkwelle besitzen diese Kollektive untereinander keine so großen Abweichungen in Belastungsrichtung. Die Kollektivhöchstwerte liegen bei der hinteren Gelenkwelle im Bereich von 53 bis 65 %. Bei  $2 \cdot 10^6$  Schwingspielen liegen die Amplituden im Bereich zwischen 5 und 7 %.

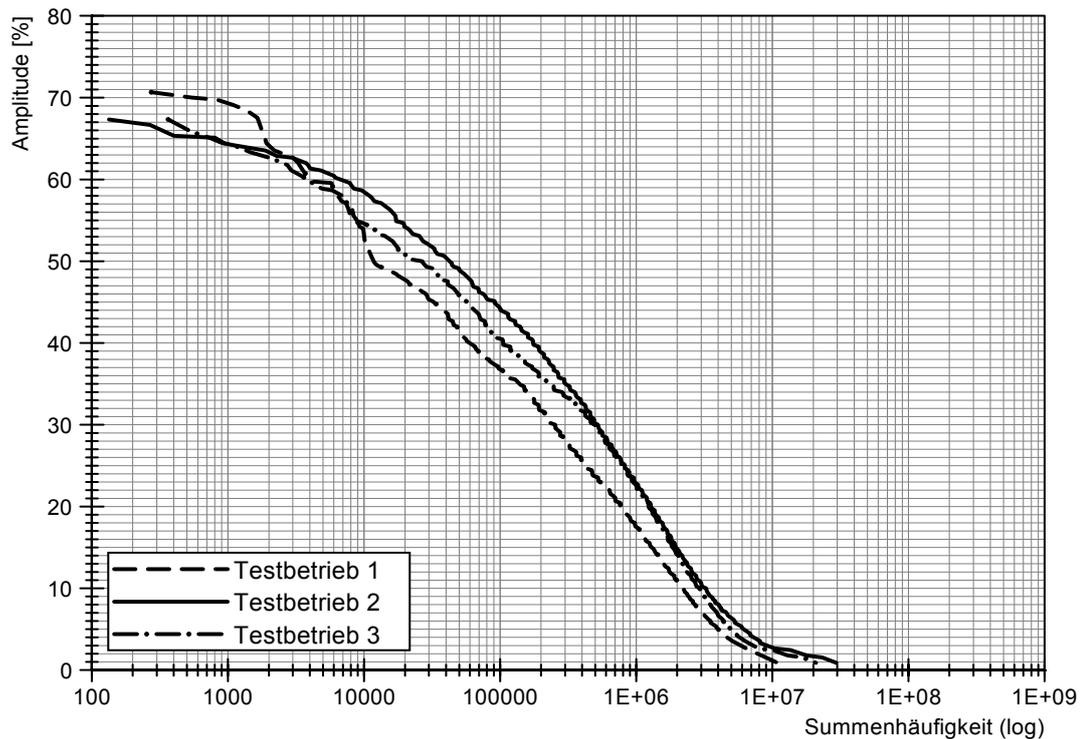
Dieser gleichmäßigere Verlauf wird bisher wie folgt begründet: Durch die Aufnahme einer Last wird die hintere Achse des Teleskopladers entlastet. Durch diese Entlastung verlieren die hinteren Räder Traktion am Boden, wobei eine Übertragung von hohen Kräften an dieser Achse nicht mehr möglich ist. Es stellt sich dabei über die Testbetriebe eine gleichmäßigere Belastung der hinteren Achse ein. Bei dieser Betrachtung ist zu erwähnen, dass bei der Entlastung der Räder der Radhalbmesser zunimmt und somit ein höheres Drehmoment bei gleicher Haftreibung am Antrieb entsteht. Inwie-

fern diese Wechselwirkungen in Verbindung mit der Verspannung der vorderen und hinteren Achse das Belastungskollektiv der hinteren Gelenkwelle beeinflussen, konnte mit diesen Messaufzeichnungen nicht geklärt werden. Diese Untersuchungen müssten auf einem Prüfstand mit reproduzierbaren Bedingungen durchgeführt werden.



**Abbildung 35:** Amplitudenkollektive der Testbetriebe; hintere Gelenkwelle

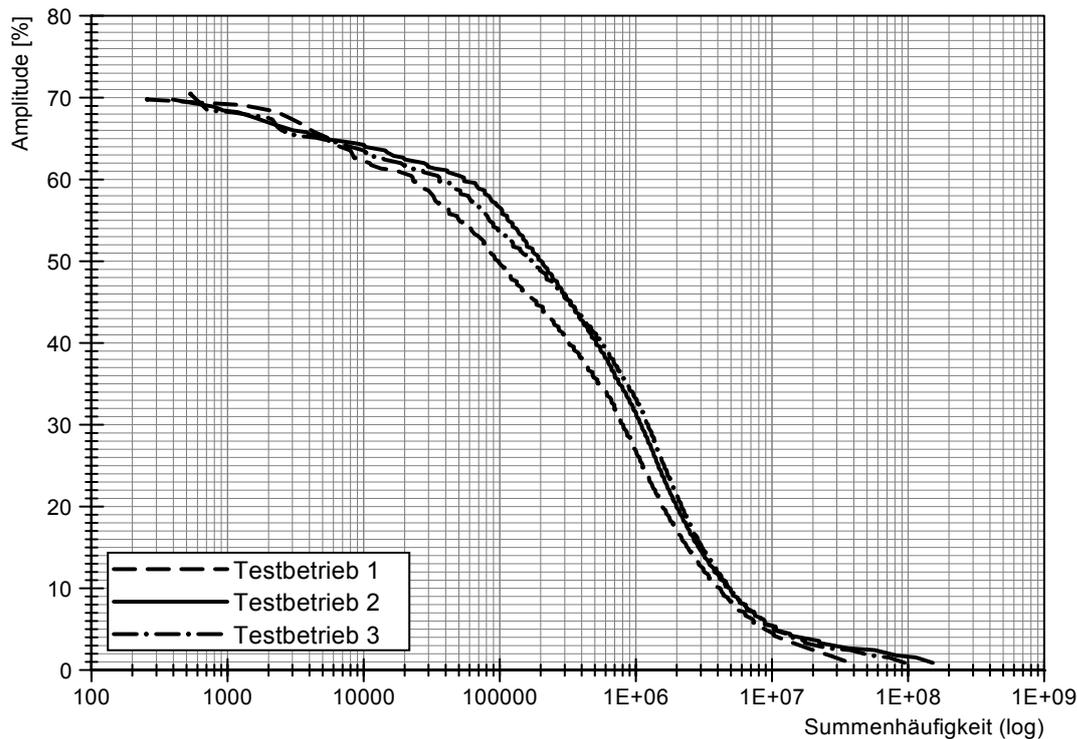
Die abgeleiteten Amplituden des Drucks A sind in **Abbildung 36** dargestellt. Die Testbetriebe 2 und 3 weisen wiederum einen ähnlichen Verlauf auf. Auffallend bei dieser Auswertung ist, dass der maximale Kollektivhöchstwert beim Testbetrieb 1 zu verzeichnen ist. Diese maximalen Kollektivhöchstwerte konnten bei der Auswertung nicht mehr dem genauen Einsatzfall zugeordnet werden. Mögliche Szenarien für diesen hohen Druck wäre: der maximal mögliche Leistungsbedarf für eine Rückwärtsfahrt, z. B. bei weichem Untergrund in einer Feldmiete oder ein Schubetrieb in Vorwärtsfahrt bei maximaler Geschwindigkeit bergab, bei dem sich der Fahrtrieb am Dieselmotor abstützt. Im mittleren Bereich überwiegen – wie bei allen anderen Kollektiven – die Testbetriebe 2 und 3.



**Abbildung 36:** Amplitudenkollektive der Testbetriebe; Druck A

Wie bereits erwähnt, stellt der Druck B die Hochdruckseite beim Beschleunigen vorwärts und Schieben dar. In **Abbildung 37** ist das Amplitudenkollektiv des Drucks B dargestellt. Die Kollektivhöchstwerte sowie der obere Bereich der Kollektive aller drei Testbetriebe sind annähernd identisch. Im mittleren Bereich der Kollektive sind größere Unterschiede erkennbar. Im Vergleich zum Druck A kann dieses Kollektiv als völliger bezeichnet werden, was eine größere Schädigung der Bauteile zur Folge hat.

Die vorgestellten Kollektive stellen deutlich die Unterschiede der einzelnen Testbetriebe dar. Bei dieser Betrachtung hatte der Testbetrieb 1 das Kollektiv, welches bei einer Lebensdauerberechnung die geringste Schädigung aufweist. Die Testbetriebe 2 und 3 wurden als gleichwertig identifiziert.



**Abbildung 37:** Amplitudenkollektive der Testbetriebe; Druck B

Im folgenden Kapitel werden diese Kollektive der Testbetriebe mit dem erstellten Bemessungskollektiv verglichen und mit Hilfe eines schädigungsäquivalenten Einstufenkollektivs bewertet.

### 5.1 Teilkollektive einzelner Tätigkeiten

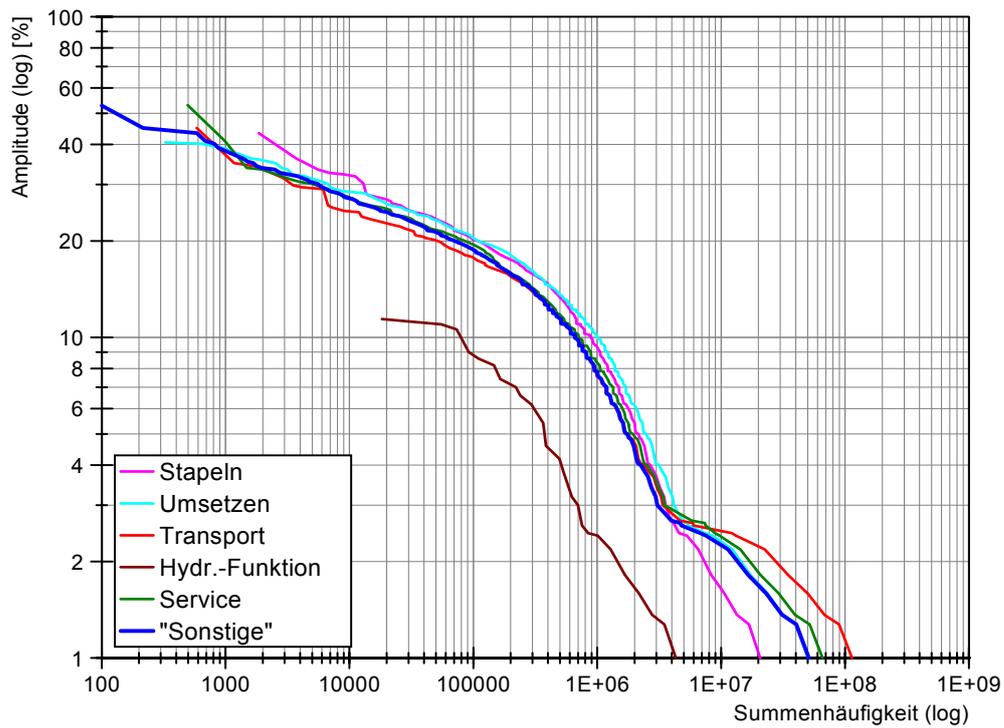
Für die Erstellung eines Bemessungskollektivs wurden die Teilkollektive der Tätigkeiten Stapeln, Umsetzen, Transport, Hydraulische Funktionen und Service zu einem durchschnittlichen Kollektiv "Sonstige" zusammengefasst. Bei diesen Teilkollektiven wurden die Tätigkeiten unabhängig von den Testbetrieben ausgewertet.

Zwischen den einzelnen Kollektiven wurde für das Zusammenfassen keine Gewichtung vorgenommen. Die Teilkollektive dieser Tätigkeiten besitzen in Bezug auf die Schädigungsrelevanz einen ähnlichen Verlauf mit geringer Belastung. Der Gesamtanteil der oben genannten Tätigkeiten besitzt nach der abgeschätzten zeitlichen Aufteilung 30 % (siehe Abbildung 24). Die Tätigkeiten Laden und Schieben werden für

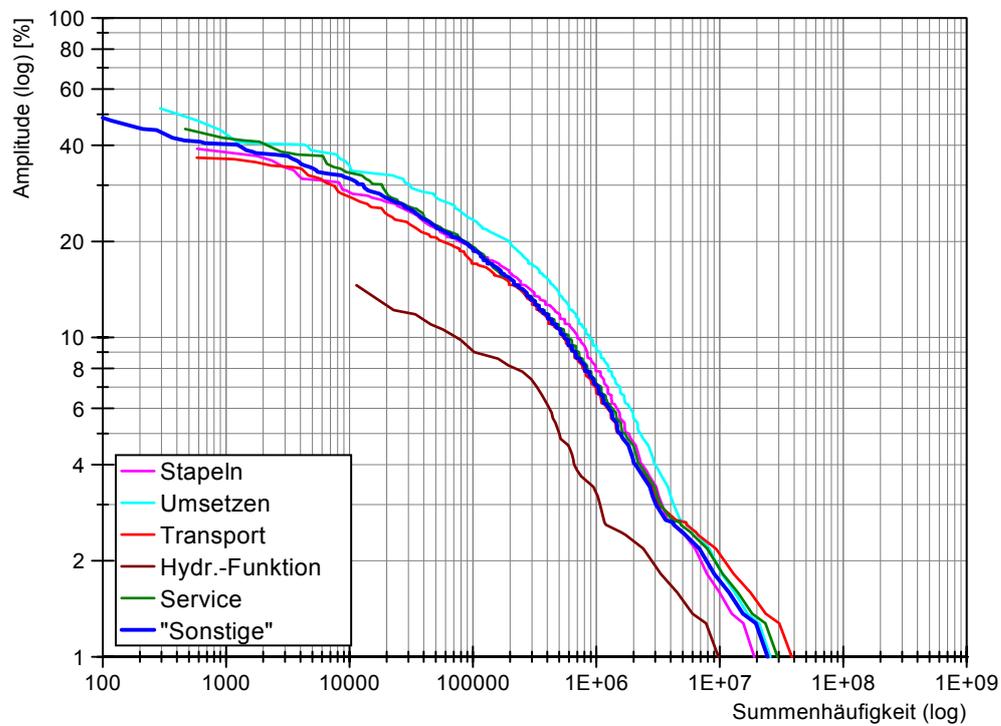
diese Zusammenfassung nicht berücksichtigt und werden beim Erstellen des Bemessungskollektivs separat betrachtet.

Das zusammengefasste Kollektiv "Sonstige" wird in **Abbildung 38** und **Abbildung 39** für die vordere und hintere Gelenkwelle bzw. in **Abbildung 40** und **Abbildung 41** für den Druck A und B dargestellt. Die Tätigkeit Hydraulische Funktion stellt die Tätigkeit mit der geringsten Belastung bei allen betrachteten Komponenten bzw. Messstellen dar. Bei einem durchschnittlich geschätzten Zeitanteil von ca. 3 % fällt dieser gegenüber dem Gesamtkollektiv nur geringfügig ins Gewicht. Zudem wurde diese Tätigkeit nur vom Testbetrieb 1 ausgeführt. Bei den Testbetrieben 2 und 3 wurden keine hydraulischen Anbaugeräte mit höherem Leistungsbedarf betrieben. Die Charakteristik, wie die Völligkeit und Umfang der weiteren vier Tätigkeiten, ist ähnlich und wird aus diesem Grund zusammengefasst.

Das zusammengefasste und gemittelte Kollektiv "Sonstige" wird für die weitere Erstellung des Bemessungskollektivs herangezogen. Dies hat den Vorteil, dass durch die Reduktion die weitere Betrachtung vereinfacht wird.



**Abbildung 38:** Vergleich der Tätigkeiten, Amplitudenkollektive der vorderen Gelenkwelle



**Abbildung 39:** Vergleich der Tätigkeiten, Amplitudenkollektive der hinteren Gelenkwelle

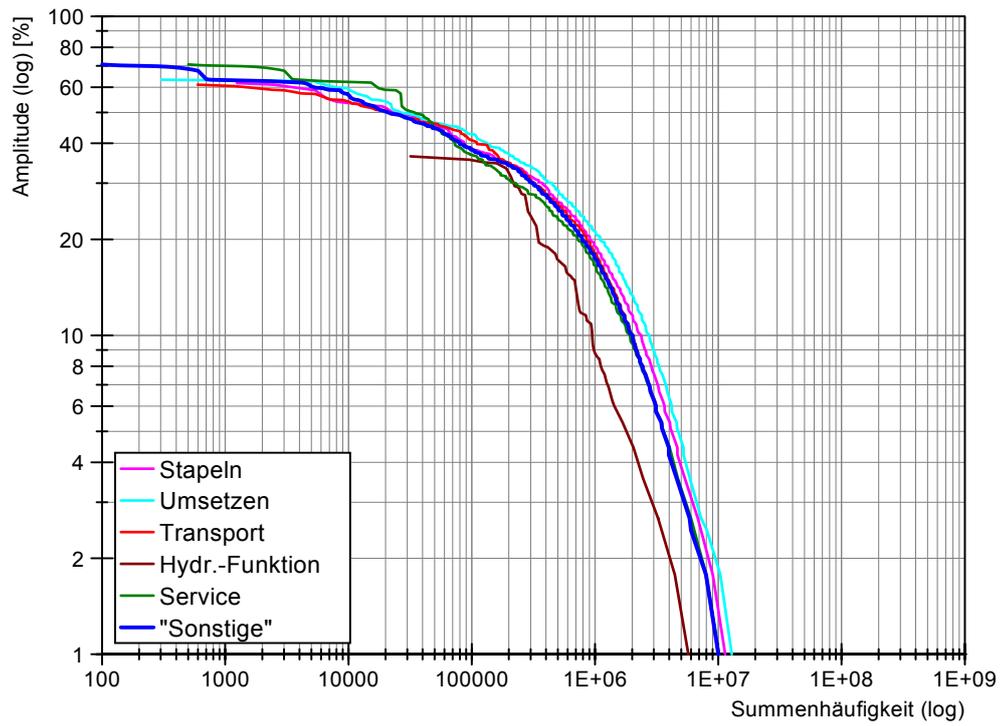


Abbildung 40: Vergleich der Tätigkeiten, Amplitudenkollektive des Drucks A

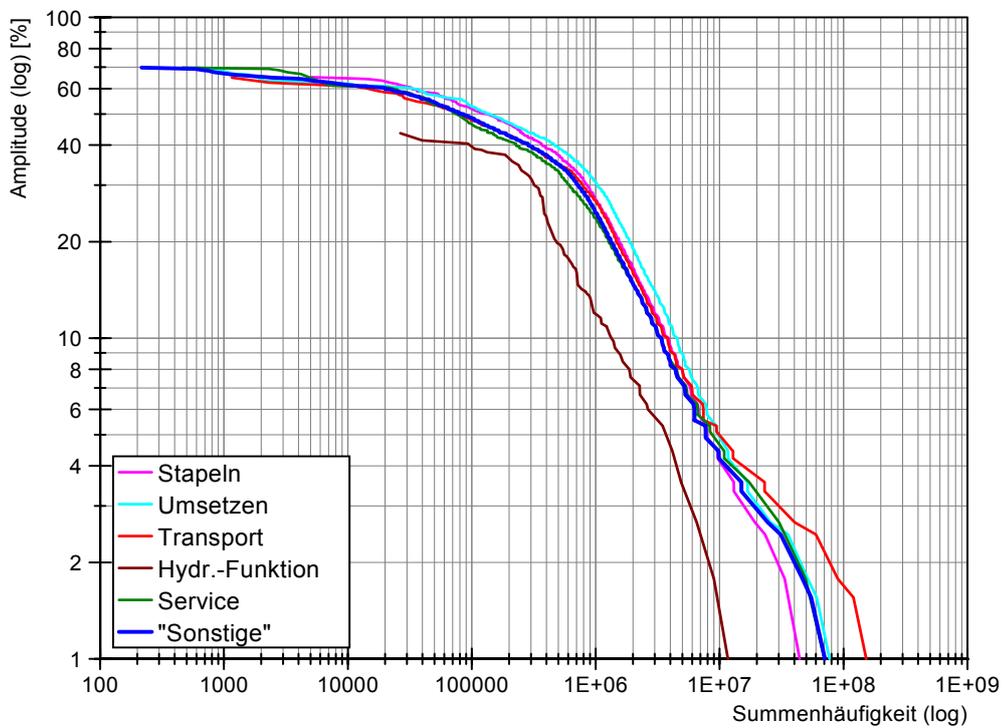


Abbildung 41: Vergleich der Tätigkeiten, Amplitudenkollektive des Drucks B

## 5.2 Bemessungskollektiv

Das Bemessungskollektiv stellt ein Kollektiv dar, welches für die Auslegung und Berechnung herangezogen werden kann. Dieses Bemessungskollektiv ist eine Zusammensetzung aus unterschiedlichen Teilkollektiven, in diesem Fall aus den Tätigkeiten, welches nach den zeitlichen Anteilen gewichtet wurde. Es besteht somit die Möglichkeit, Bemessungskollektive für spezielle Kundeneinsätze bzw. gezielt für ein Tätigkeitsprofil zu erstellen.

Auf Basis der ermittelten Teilkollektive und der zeitlichen Anteile der Fahrzeugverwendung wurden die folgenden Bemessungskollektive für einen durchschnittlichen deutschen landwirtschaftlichen Betrieb erstellt. Die zeitlichen Anteile für die Teilkollektive setzen sich wie folgt zusammen: Laden 60 %, "Sonstige" 30 % und Schieben 10 %.

Das Laden dominiert mit einem zeitlichen Anteil von 60 % gegenüber allen anderen Tätigkeiten. Aus Sicht der Belastung stellt das Schieben das höchstbelastende Teilkollektiv dar und wird deshalb separat beim Erstellen des Bemessungskollektivs für einen Durchschnittsbetrieb berücksichtigt. Das bereits zusammengefasste Teilkollektiv "Sonstige" stellt mit 30 % Zeitanteil das aus Sicht der Belastung schwächste Kollektiv dar.

In **Abbildung 42** sind die Teilkollektive sowie das Bemessungskollektiv für die vordere Gelenkwelle dargestellt. Deutlich sind die Unterschiede der Belastungshöhe – welche durchaus das Doppelte betragen können – zwischen den Teilkollektiven Schieben und "Sonstige" zu erkennen. Das Teilkollektiv Laden liegt dabei im Mittelfeld.

Das Bemessungskollektiv lehnt sich stark an das Teilkollektiv Laden an. Den Einfluss des Teilkollektivs Schieben auf das Bemessungskollektiv ist im Bereich der hohen Belastungen zu erkennen, in dem sich dieses von dem Teilkollektiv Laden abhebt. Dieser Effekt ist ebenfalls im unteren Bereich der Belastung zu erkennen, in dem sich das Bemessungskollektiv in Richtung des Teilkollektivs "Sonstige" nähert. Auffallend

ist die hohe Anzahl an Schwingspielen im unteren Bereich der Belastung bei der Tätigkeit Schieben.

**Abbildung 43** stellt das Bemessungskollektiv der hinteren Gelenkwelle dar. Beim Vergleich mit der vorderen Gelenkwelle sind die Belastungen bei gleicher Schwingspielanzahl geringer. Der Unterschied zwischen den betrachteten Tätigkeiten ist annähernd gleich zu setzen mit der der vorderen Gelenkwelle.

Das Bemessungskollektiv für den Druck A ist in **Abbildung 44** dargestellt. Die Verläufe der einzelnen Teilkollektive zueinander sowie der Verlauf des Bemessungskollektivs sind von der Charakteristik ähnlich dem der beiden Gelenkwellen. Die Unterschiede in Belastungsrichtung zwischen den Teilkollektiven Schieben und "Sonstige" sind nicht so stark ausgeprägt wie bei den Gelenkwellen. Dieses Bemessungskollektiv weist eine geringere Beanspruchung gegenüber dem Bemessungskollektiv vom Druck B (**Abbildung 45**) auf.

Beim Druck B ist auffällig, dass die Unterschiede in Belastungsrichtung geringer als bei den Gelenkwellen und auch beim Druck A sind. Das Teilkollektiv Laden weist im oberen Bereich der Belastungen höhere Belastungen als das Teilkollektiv Schieben aus. Bei ca. 30 % der Belastungshöhe wechselt das Teilkollektiv Schieben zum höher belastenden Kollektiv.

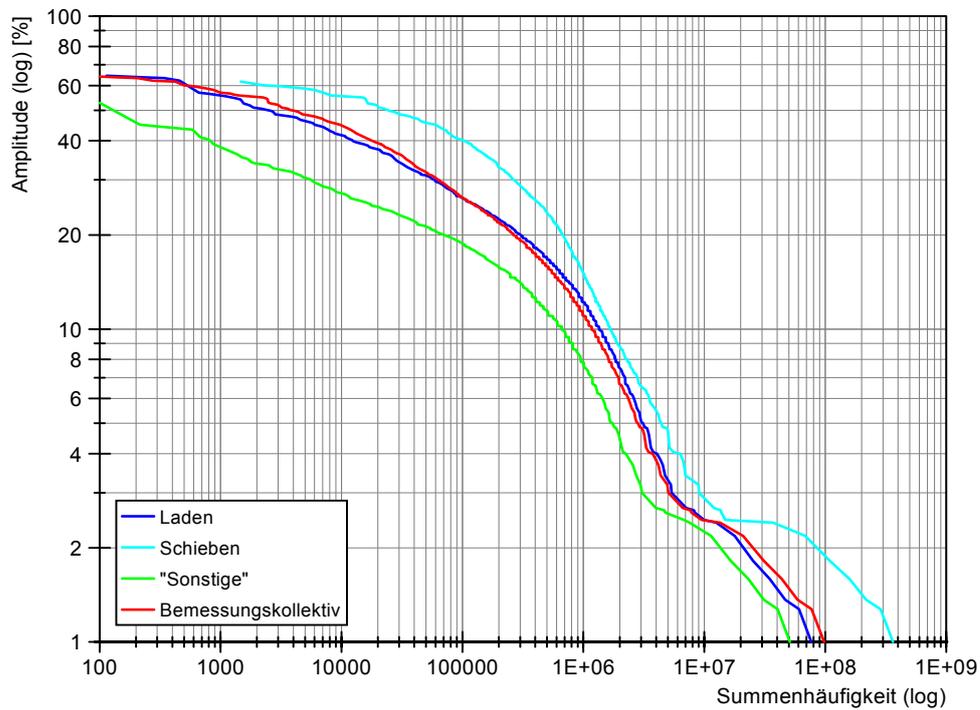


Abbildung 42: Abgeschätztes Bemessungskollektiv der vorderen Gelenkwelle

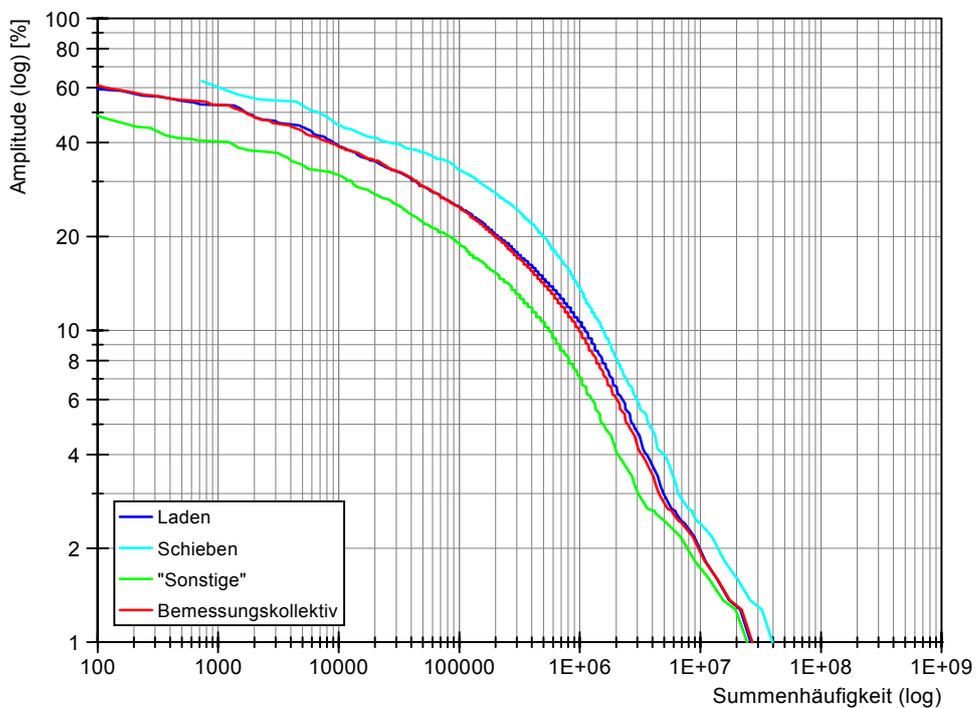


Abbildung 43: Abgeschätztes Bemessungskollektiv der hinteren Gelenkwelle

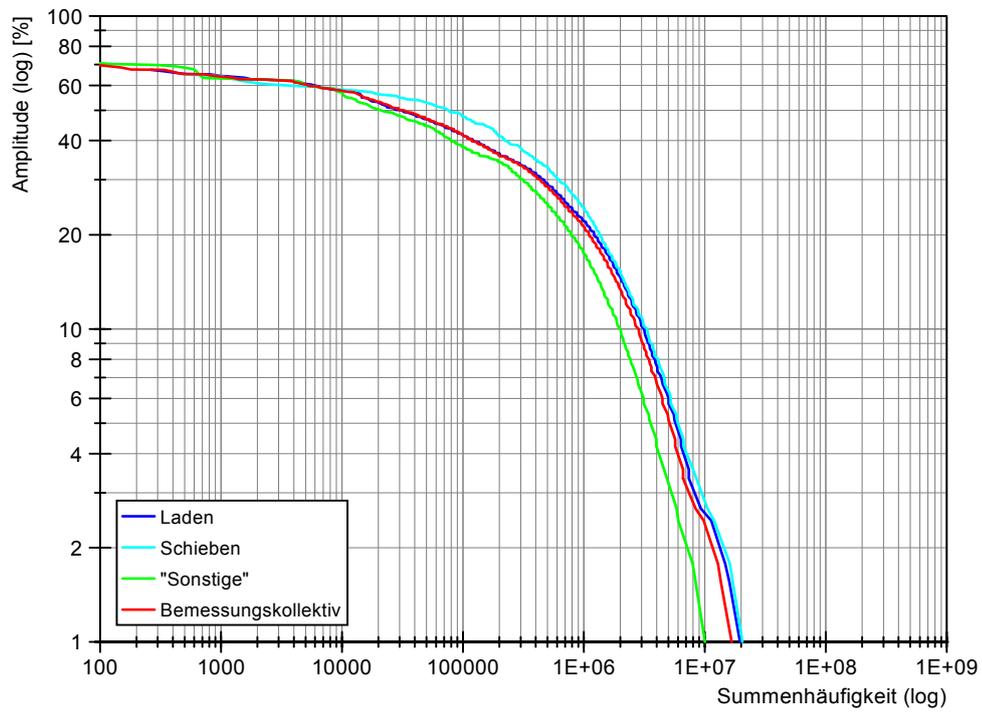


Abbildung 44: Abgeschätztes Bemessungskollektiv des Drucks A

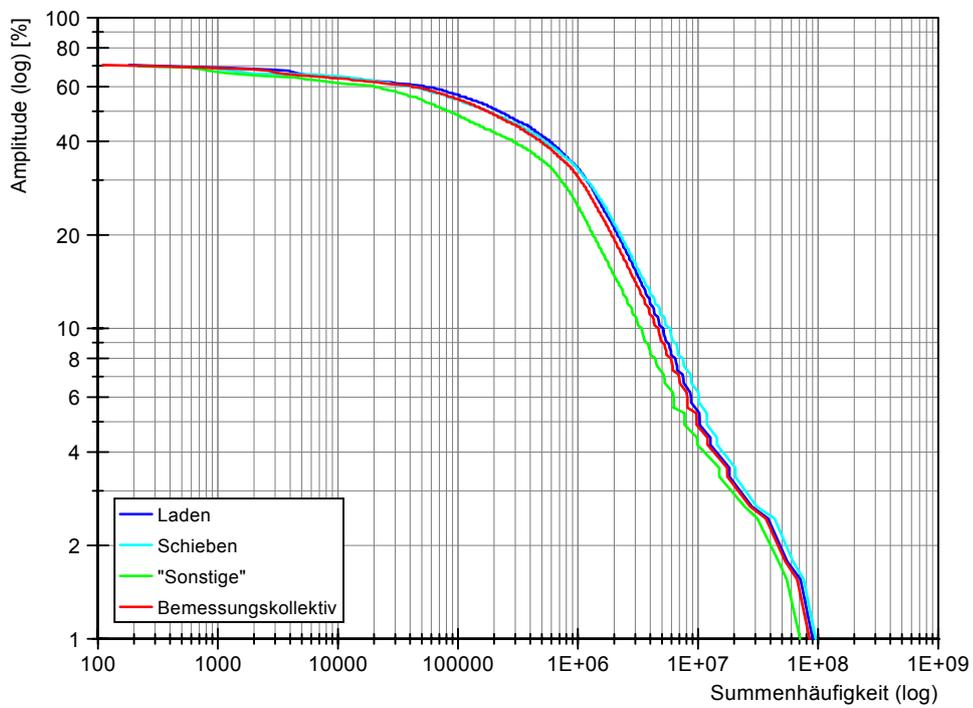


Abbildung 45: Abgeschätztes Bemessungskollektiv des Drucks B

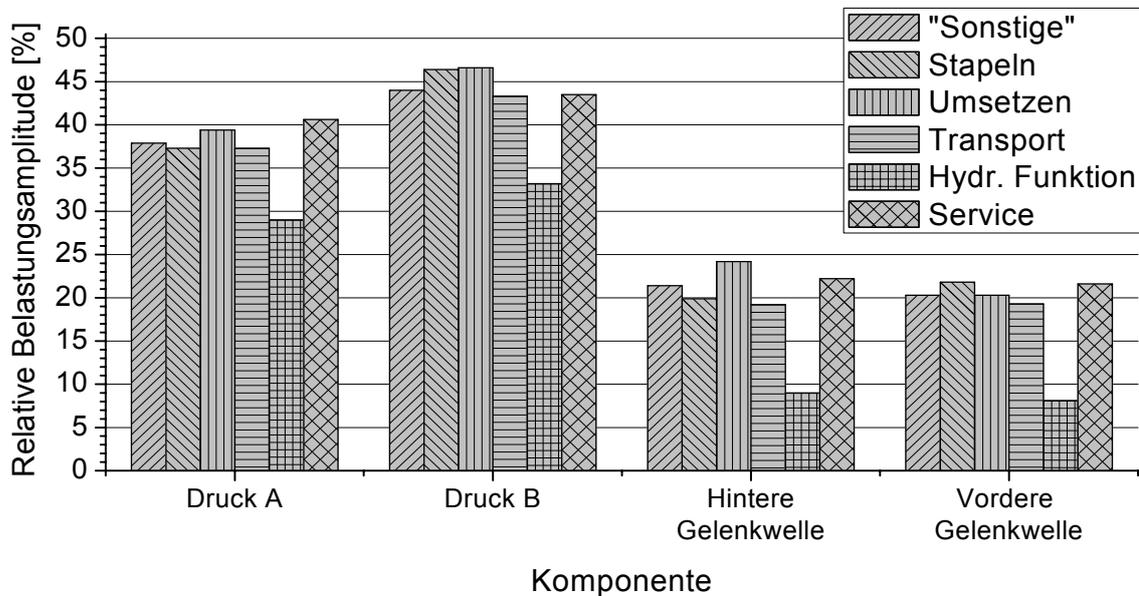
### 5.3 Schädigungsäquivalente Einstufenersatzkollektive

Mit Hilfe der schädigungsäquivalenten Einstufenersatzkollektive lassen sich die Amplitudenkollektive vergleichen. Die Grundlagen zur Erstellung von schädigungsäquivalenten Einstufenersatzkollektiven wurden in Kapitel 2.5 erläutert. Für die Berechnung der schädigungsäquivalenten Ersatzbelastungsamplitude bei einer vorgegebenen Schwingspielzahl (Fall d) wurden ein Wöhlerlinienexponent von  $k = 8$  – typisch für Torsionsbeanspruchungen – und eine Ersatzschwingspielzahl von  $H_E = 10^6$  angenommen.

**Abbildung 46** stellt die Abweichungen beim Zusammenfassen der Tätigkeiten Stapeln, Umsetzen, Transport, Hydraulische Funktion und Service zum Teilkollektiv "Sonstige" dar. Die einzelnen Ersatzbelastungsamplituden wurden auf den maximalen Auslegungswert normiert. Der maximale Auslegungswert wurde durch den maximal zulässigen Druck des Fahrtriebs sowie den hydraulischen und mechanischen verwendeten Komponenten ohne Berücksichtigung von Verlusten festgelegt. Innerhalb der Grafik ist der linke Balken bei jeder Gruppe das zusammengefasste Teilkollektiv "Sonstige", welches für die weitere Erstellung des Bemessungskollektivs verwendet wurde. Die Differenzen zwischen höchster und niedrigster Ersatzbelastungsamplitude betragen bei Druck A 11,6 %, bei Druck B 13,4 %, bei der hinteren Gelenkwelle 15,2 % und bei der vorderen Gelenkwelle 13,7 % bezogen auf den Auslegungswert. Dabei sind nur die Tätigkeiten berücksichtigt, welche zum Teilkollektiv "Sonstige" zusammengefasst wurden.

Die Tätigkeit Hydraulische Funktion stellt – wie bereits in Kapitel 5.1 beschrieben – die geringste Belastung für den Antriebsstrang dar. Dabei ist ein deutlicher Unterschied zu den restlichen Tätigkeiten zu erkennen. Beim Vergleich der Tätigkeiten untereinander und zu den betrachteten Gruppen fällt auf, dass die vordere Gelenkwelle im Gegensatz zu der hinteren Gelenkwelle, Druck A und B bei der Tätigkeit

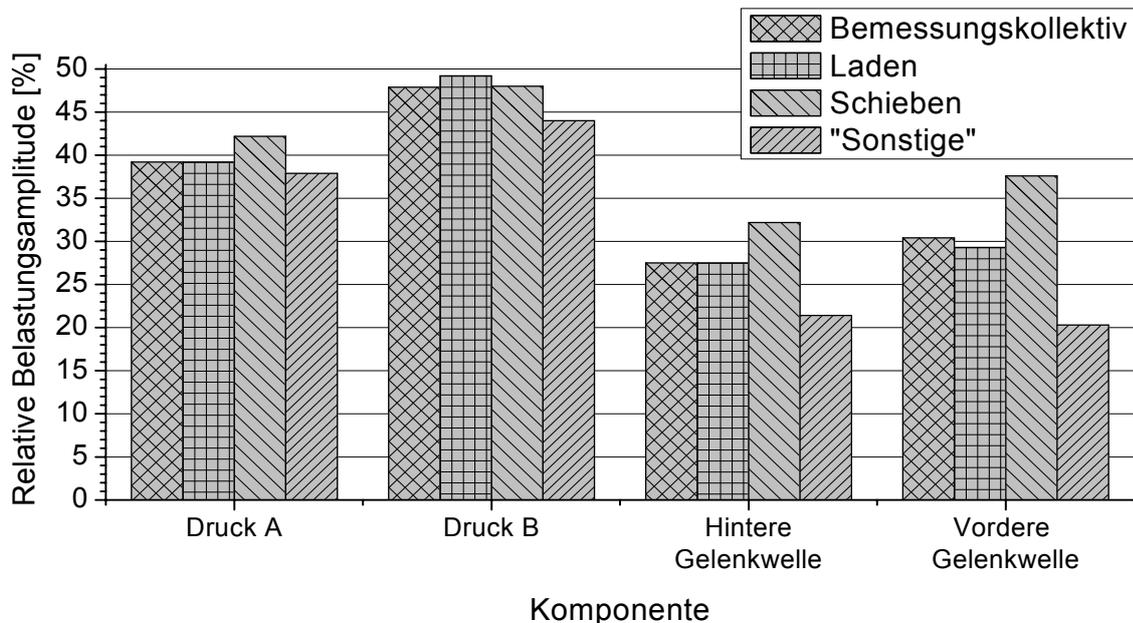
Stapeln eine höhere Belastungsamplitude ausweist als beim Umsetzen. Allgemein auffallend ist die relativ hohe Belastung bei der Tätigkeit Service gegenüber den anderen Tätigkeiten. Die genaue Ursache für die hohe Belastung bei dieser Tätigkeit kann aus den Messdaten und den Protokollen der Fahrer nicht mehr ermittelt werden.



**Abbildung 46:** Vergleich der relativen schädigungsäquivalenten Ersatzbelastungsamplituden, zusammengefasstes Teilkollektiv "Sonstige" mit den Tätigkeiten Stapeln, Umsetzen, Transport, Hydr. Funktion und Service

In **Abbildung 47** sind die schädigungsäquivalenten Ersatzbelastungsamplituden der Tätigkeiten Laden, Schieben und die zusammengefasste Tätigkeiten "Sonstige" sowie des Bemessungskollektivs dargestellt. Beim Druck A und der hinteren Gelenkwelle ist die Belastung zwischen dem Bemessungskollektiv und der Tätigkeit Laden annähernd identisch. Somit ist bei diesen Komponenten die Belastung der Tätigkeit Schieben und "Sonstige" mit den jeweiligen Gewichtungen ausgeglichen. Die Tätigkeit Schieben weist die höchste Ersatzbelastungsamplitude im Vergleich zu den weiteren Tätigkeiten auf. Ausnahme ist der Druck B, bei dem das Laden die höchste Belastung einnimmt. Die Ersatzbelastungsamplituden liegen beim Druck A im Bereich von 37,9 bis 42,2 %, beim Druck B im Bereich von 44,0 bis 49,2 %, bei der hinteren Gelenkwelle

im Bereich von 21,4 bis 32,2 % und bei der vorderen Gelenkwelle im Bereich von 20,3 bis 37,6 %. Beim Bemessungskollektiv wurden bei der vorgestellten Gewichtung beim Druck A 39,2 %, beim Druck B 47,9 %, bei der hinteren Gelenkwelle 27,5 % und bei der vorderen Gelenkwelle 30,4 % als Ersatzbelastungsamplituden ermittelt.



**Abbildung 47:** Vergleich der relativen schädigungsäquivalenten Ersatzbelastungsamplituden, Bemessungskollektiv mit den kumulierten Kollektiven der Teilkollektive

#### 5.4 Beurteilung der erstellten Bemessungskollektive

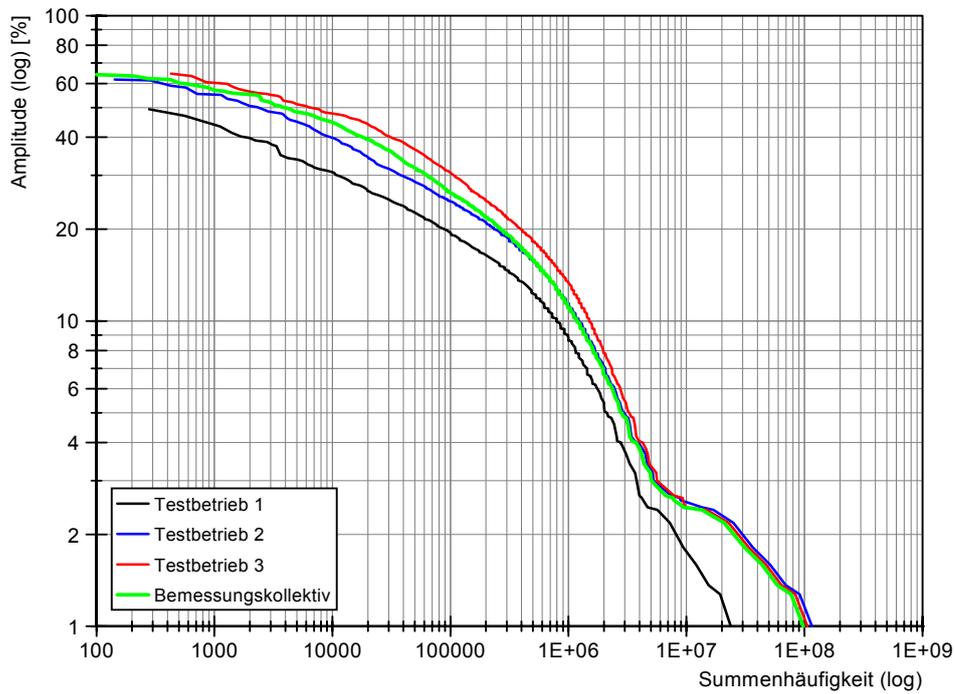
Im folgenden Kapitel sollen für die einzelnen Komponenten die abgeschätzten und erstellten Bemessungskollektive mit den kumulierten Kollektiven der einzelnen Testbetriebe verglichen werden. Somit soll die Verwendbarkeit der abgeschätzten Bemessungskollektive sichergestellt werden und zur Verifizierung dienen. Das erstellte Bemessungskollektiv stellt einen Durchschnittsbetrieb dar, welches für die Auslegung von Antriebsstrangkomponenten verwendet werden kann. Die Analyse und Beurteilung der einzelnen Testbetriebe wurde bereits zu Beginn von Kapitel 5 durchgeführt. Wie bereits vorgestellt, kann dieses Bemessungskollektiv für individuelle Einsatzprofile erstellt werden.

Es wird die Annahme getroffen, dass es sich hierbei um ein "50 % Kollektiv" (siehe Kapitel 2.2) handelt. Wie in Kapitel 5.5 beschrieben unterliegt dieselbe Tätigkeit einer Streuung. Die Auswertung der schädigungsäquivalenten Ersatzbelastungsamplituden der kumulierten Kollektive der Testbetriebe hat ergeben, dass die Streuung eine Standardabweichung bei den beiden Drücken von 2 %, bei der vorderen Gelenkwelle von 5 % und bei der hinteren Gelenkwelle ebenfalls 2 % – jeweils bezogen auf den Auslegungswert – ergeben hat.

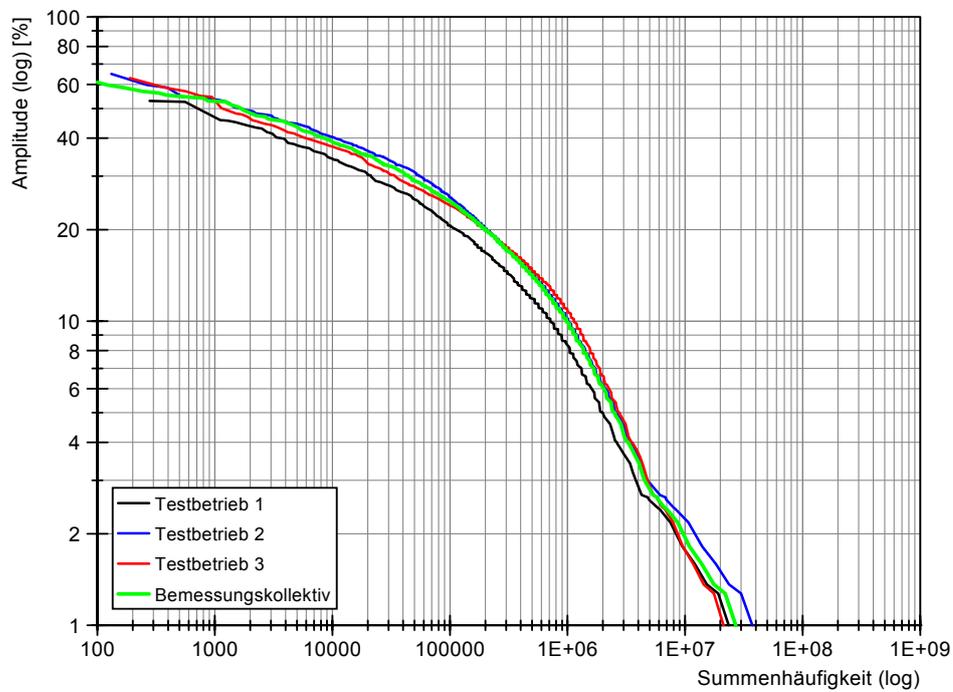
In **Abbildung 48** ist das Bemessungskollektiv im Vergleich zu den kumulierten Kollektiven der Testbetriebe dargestellt. Das Bemessungskollektiv liegt bei den höheren Belastungen zwischen dem zweiten und dem dritten Testbetrieb. Bei den geringeren Belastungen gleichen sich Testbetrieb 1 und Testbetrieb 3 aus, so dass sich das Bemessungskollektiv an das Kollektiv des Testbetriebs 2 anschmiegt. Daran ist ebenfalls der Einfluss der Streuung zu erkennen.

Bei der hinteren Gelenkwelle liegt das Bemessungskollektiv ebenfalls im Mittel zwischen dem zweiten und dritten Testbetrieb, **Abbildung 49**, wobei es zwischen Testbetrieb 2 und Testbetrieb 3 zu einer Überschneidung kommt.

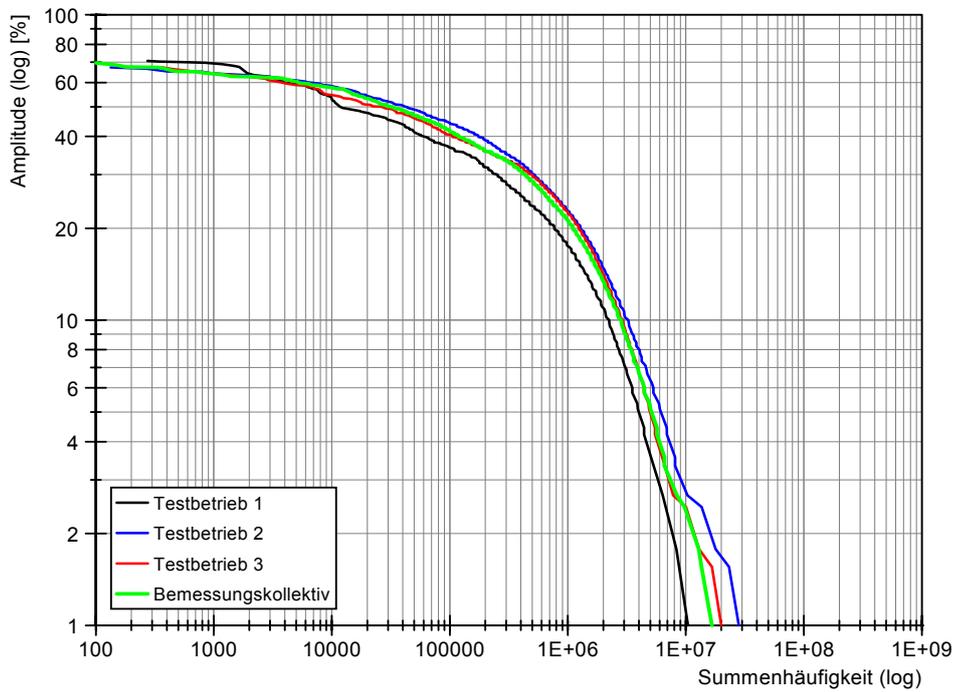
Das Bemessungskollektiv der Drücke A und B sind im Vergleich zu den Testbetrieben in **Abbildung 50** und **Abbildung 51** dargestellt. Die Unterschiede zwischen dem Testbetrieb 2 und Testbetrieb 3 kann bei beiden Drücken als gering bezeichnet werden.



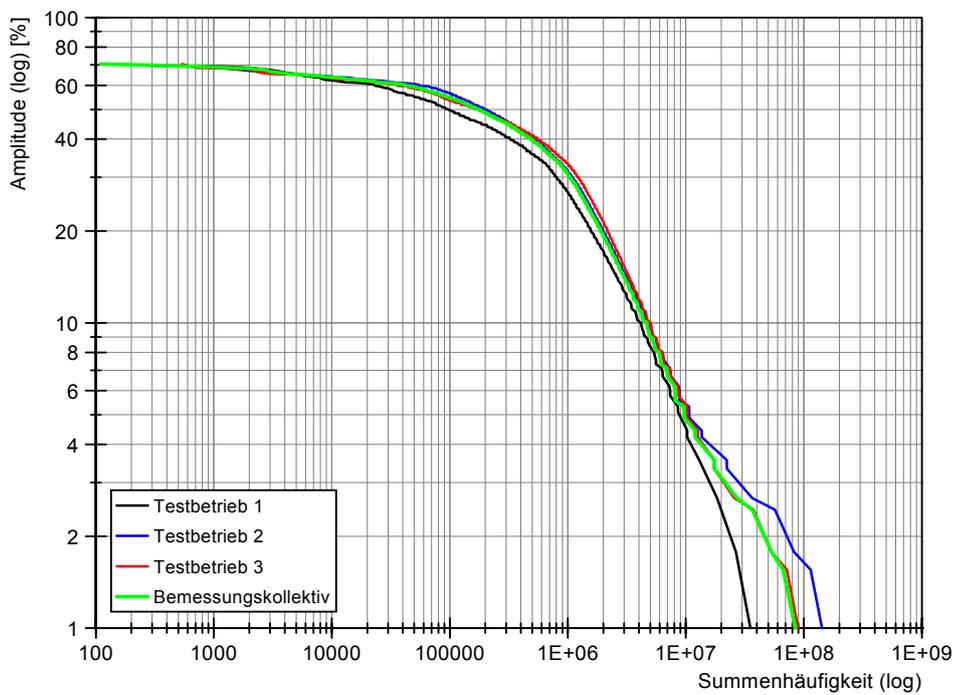
**Abbildung 48:** Vergleich des Bemessungskollektivs mit den Testbetrieben bei der vorderen Gelenkwelle



**Abbildung 49:** Vergleich des Bemessungskollektivs mit den Testbetrieben bei der hinteren Gelenkwelle



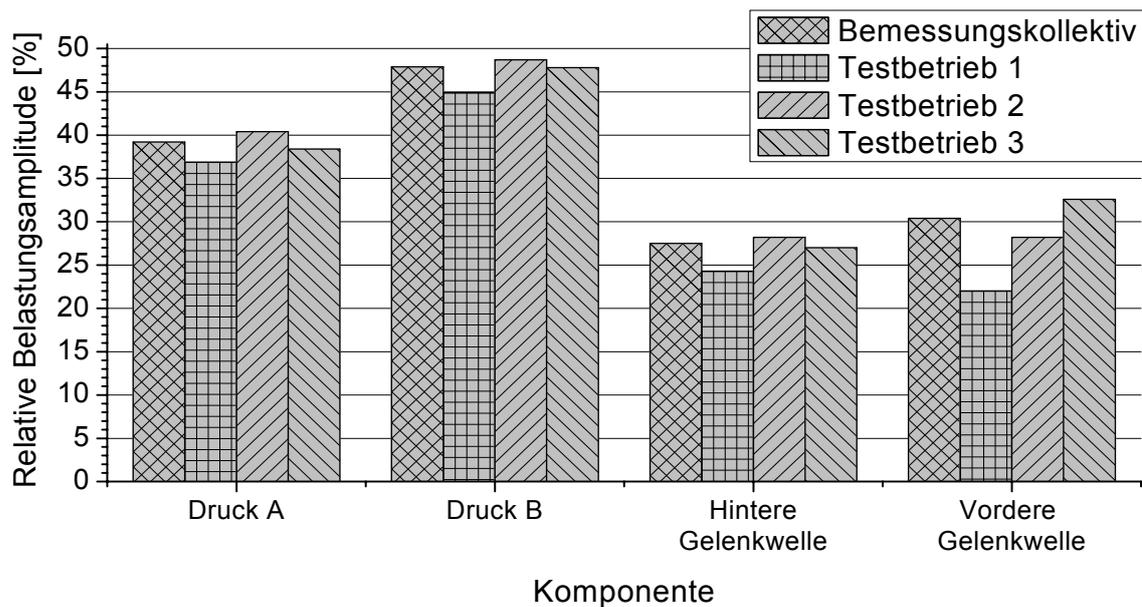
**Abbildung 50:** Vergleich des Bemessungskollektivs mit den Testbetrieben beim Druck A



**Abbildung 51:** Vergleich des Bemessungskollektivs mit den Testbetrieben beim Druck B

Die schädigungsäquivalenten Einstufenersatzkollektive des Bemessungskollektivs und der Testbetriebe sind in **Abbildung 52** dargestellt. Beim Druck A wurde ein Bereich der Einstufenersatzbelastung zwischen den Testbetrieben von 36,9 und 40,4 % ermittelt. Die Bereiche der weiteren Komponenten liegen beim Druck B zwischen 44,9 und 48,7 %, bei der hinteren Gelenkwelle zwischen 24,3 und 28,2 % und bei der vorderen Gelenkwelle zwischen 22,0 und 32,6 %. Die Ersatzbelastungsamplituden des gewichteten Bemessungskollektivs liegen beim Druck A bei 39,2 %, beim Druck B bei 47,9 %, bei der hinteren Gelenkwelle bei 27,5 % und bei der vorderen Gelenkwelle bei 30,4 % bezogen auf den Auslegungswert. Somit stellt sich eine maximale Abweichung zwischen den Testbetrieben und dem Bemessungskollektiv beim Druck A von 2,3 %, beim Druck B von 2,9 %, bei der hinteren Gelenkwelle von 3,2 % und bei der vorderen Gelenkwelle von 8,4 % ein.

Bei diesem Vergleich muss angemerkt werden, dass der Testbetrieb 1 diese maximalen Abweichungen bei den Drücken und Gelenkwellen verursacht. Beim Vergleich des zweiten und dritten Testbetriebs mit dem Bemessungskollektiv liegen die maximalen Abweichungen der einzelnen Komponenten unterhalb von 2,2 % bezogen auf den Auslegungswert. Diese beiden Testbetriebe können auf Basis der Ergebnisse der Auswertung sowie dem allgemeinen Einschätzen während der Versuchslaufzeit als durchschnittlich repräsentativ bezeichnet werden. Aus Sicht von repräsentativen Belastungen ist der Testbetrieb 1 gegenüber den beiden anderen Testbetrieben als kritisch zu betrachten.



**Abbildung 52:** Vergleich der relativen schädigungsäquivalenten Einstufenersatzkollektive, Bemessungskollektiv mit den kumulierten Kollektiven der Testbetriebe

## 5.5 Diskussion der Versuchsergebnisse

Innerhalb dieses Kapitels sollen die Ergebnisse der Versuchsauswertungen in Bezug auf die Verwendung bei der betriebsfesten Auslegung diskutiert werden. Wie in Kapitel 2.4 bereits erläutert, ist für die betriebsfeste Auslegung nach dem Nennspannungskonzept nur die Höhe und die Anzahl der Belastungen relevant, welche innerhalb eines Kollektivs gesammelt werden.

Bei den vorgestellten Auswertungen konnte keine Aussage bezüglich des Fahrereinflusses auf das Lastkollektiv gemacht werden, da bei allen Fahrern unterschiedliche Bedingungen, wie z. B. Witterungseinflüsse, unterschiedliche Distanzen aufgrund des Füllungsgrads des Fahrsilos usw., vorhanden waren. Während der Messdatenerfassung auf den Testbetrieben gab es keine identische und vergleichbare Tätigkeit, die von zwei unterschiedlichen Fahrern über einen längeren Zeitraum durchgeführt wurden, bis auf das Befüllen der Biogasanlage. Beim Befüllen der Biogasanlage – einem täglich mehrmals wiederholenden Arbeitsspiel – konnte der Fahrereinfluss auf die Belastung bzw. auf das Lastkollektiv aus den oben genannten Gründen nicht nachge-

wiesen werden. Es wird vermutet, dass die Steuerung bzw. Regelung des hydrostatischen Fahrtriebs diesen Einfluss weitestgehend reduziert. Diese Vermutung muss durch weitere Versuche evtl. ergänzend durch die Simulationstechnik belegt werden.

Deiters stellte in [Dei09] die Ergebnisse eines Versuchs mit einem Y-Referenzzyklus bei gleichen Versuchsbedingungen und demselben Fahrer vor. Die analysierte Streuung im Bezug auf die Zugkraft bei diesen 150 Zyklen wird als nicht unerheblich betrachtet, obwohl die „gleichen“ Bedingungen vorhanden waren.

Diese Diskussion wird in die zwei folgenden Abschnitte gegliedert: Erstens die Beurteilung der Erkenntnisse aus den Auswertungen der Testbetriebe und zweitens die Beurteilung der Belastungen für die jeweiligen Komponenten, unterteilt nach den Tätigkeiten. Bei der Auswertung der Belastungs-Zeit-Funktionen (BZF) der beiden hydrostatischen Drücke A und B sowie der beiden Gelenkwellen, welche zwischen dem Getriebe und den Achsen verbaut sind, wurden die in den folgenden Abschnitten beschriebenen Erkenntnisse ermittelt.

### **5.5.1 Beurteilung der Testbetriebe**

Beim Vergleich der Testbetriebe stellt der Testbetrieb 1, mit dem zugehörigen Einsatz- und Tätigkeitsprofil, die geringste Belastung für den Fahrtriebsstrang dar. Die Betriebsstruktur und die Tätigkeiten tendieren zu leichteren Hoftätigkeiten, bei denen nur die Vorzüge eines wendigen Laders mit einer hohen Hubhöhe zum Einsatz kommen. Bei der Auswahl der Testbetriebe waren die tatsächlichen Belastungen auf den Fahrtriebsstrang unbekannt. Trotzdem ist der Testbetrieb aufgrund der vielfältigen Tätigkeiten im Vergleich mit den beiden anderen Testbetrieben interessant. Der Testbetrieb 1 kann somit als Ausreißer bei diesem Vergleich mit den anderen Testbetrieben gesehen werden. Zur Auslegung von Antriebsstrangkomponenten empfiehlt es sich nicht, die Lastkollektive dieses Testbetriebs heranzuziehen. Da die Annahme dieser Belastungen bzw. das Belastungskollektiv im Vergleich zu einem Durchschnittsbetrieb zu schwach ausfallen würde, wären die Komponenten einem vorzeitigen Versagen ausgesetzt.

Die Testbetriebe 2 und 3 verursachen annähernd gleiche Belastungen auf den Fahrantriebsstrang. Die Betriebsstruktur und das Einsatzprofil sind typisch für die Anwendung eines Teleskopladers. Ein hoher Auslastungsgrad der Maschine wird durch die vorhandenen Anbaugeräte gefördert.

Die Kollektivformen, die Belastungshöhen und die Kollektivumfänge können als gleichwertig angesehen werden, obwohl im Detail Differenzen vorhanden sind, die sich bei der Betriebsfestigkeitsbetrachtung weitestgehend ausgleichen. Bemerkenswert ist die Übereinstimmung trotz unterschiedlicher Tätigkeiten. Der Unterschied bei den schädigungsäquivalenten Einstufenersatzamplituden der beiden Testbetriebe schwankt bei den betrachteten Komponenten im Bereich von 0,9 % beim Druck B bis 4,3 % bei der vorderen Gelenkwelle bezogen auf den Auslegungswert. Dies stellt eine gute Übereinstimmung der beiden Testbetriebe dar. Diese beiden Testbetriebe können in Bezug auf die Belastungen auf den Fahrantriebsstrang als repräsentativ bezeichnet werden. Hierfür spricht z. B., dass der Teleskoplader auf dem Testbetrieb 3 bis zu 80 % der Einsatzzeit von einem erfahrenen Fahrer bedient wurde. Durch professionelle Fahrer kann die Arbeitsmaschine optimal an der Leistungsgrenze eingesetzt werden.

Zur Verifikation der erstellten Bemessungskollektive wurden die Lastkollektive der Testbetriebe als Referenz verwendet. Das Bemessungskollektiv zeigte beim Vergleich der schädigungsäquivalenten Einstufenersatzkollektive mit dem zweiten und dritten Testbetrieb eine maximale Abweichung von 2,2 %. Diese Abweichung erscheint durchaus als vertretbar.

### **5.5.2 Beurteilung der Komponenten**

#### **Drücke:**

Bei dem untersuchten geschlossenen hydrostatischen Getriebe nimmt der Druck A bei beschleunigter Vorwärtsfahrt die Niederdruckseite ein. Dementsprechend wird der Druck A bei einer Vorwärtsfahrt im Schubbetrieb und beim beschleunigten Rückwärtsfahren zur Hochdruckseite. Die Zeitanteile der Fahrtrichtung belaufen sich für vorwärts auf ca. 60 % und rückwärts auf ca. 40 %. Bei einer genauen Betrachtung der

zeitlichen Hoch- und Niederdruckanteile können geringe Abweichungen (geschätzt  $\pm 5\%$ ) angenommen werden.

Der Druck A weist eine geringere Belastung als der Druck B auf. Der Verlauf der Amplitudenkollektive ist beim Vergleich der verschiedenen Tätigkeiten homogen, (siehe Abbildung 40). Die Belastungshöhe ist entsprechend von der Tätigkeit abhängig.

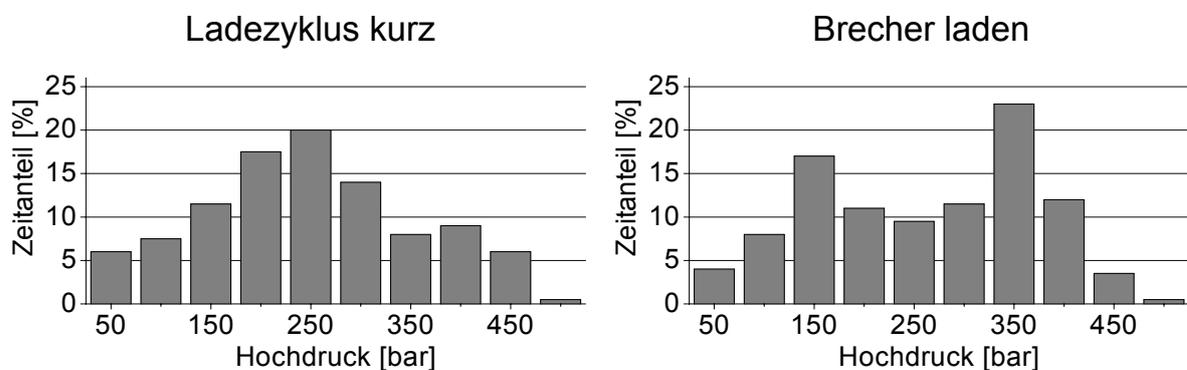
Für die praktische Auslegung von hydrostatischen Komponenten, wie Pumpen und Motoren, wird ein symmetrischer Aufbau der Komponenten angestrebt. Die Nieder- bzw. Hochdruckseite ist bei der Konstruktion der Komponenten unter Umständen nicht bekannt und ergibt sich aus den nachfolgenden Getriebeeinheiten bzw. dem Antriebsstrangkonzzept. Aus wirtschaftlicher Sicht wird es nur in Ausnahmefällen sinnvoll sein eine Differenzierung zwischen den Drücken A und B vorzunehmen. Aus diesem Grund sollte für die Auslegung der hydrostatischen Komponenten das stärker schädigende Bemessungskollektiv des Drucks B verwendet werden.

Die höhere Schädigung wird dadurch verursacht, dass der Teleskoplader bei der Aufnahme von Schüttgütern in das Haufwerk einstecken muss, um die angebaute Schaufel zu befüllen. Dabei steigt der Druck auf der Hochdruckseite. Der Druck wird im praktischen Einsatz in der Regel dadurch begrenzt, dass der Rad-Boden-Kontakt auf den maximalen Schlupf übergeht oder die Leistungsgrenze des Dieselmotors erreicht wird. Bei allen Testbetrieben wurde die Druckbegrenzung des hydrostatischen Antriebs nicht erreicht. Durch das vorliegende Antriebsstrangkonzzept wird bei einem relativ geringen Druckniveau mit den relativ hohen Schluckvolumen der beiden Hydromotoren das benötigte Drehmoment bereitgestellt.

Pfab stellte in [Pfa03] Lastkollektive eines Radladers mit 183 kW Dieselmotorleistung und 22 t Einsatzgewicht vor. Das dort betrachtete Getriebe beinhaltet drei Fahrstufen, welche unter Last mit Lamellenkupplungen geschaltet werden können, und zwei Verstellmotoren mit einem Schluckvolumen von jeweils  $160\text{ cm}^3$ . Die jeweilige Fahrstufe wird durch einen Mikrokontroller in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit

gesteuert. Je nach Fahrstufe tragen beide oder jeweils nur ein Verstellmotor zur Leistungübertragung bei.

Beim Vergleich der beiden Antriebsstrangkonzeppte ist ersichtlich, dass der Radlader eine höhere installierte Dieselmotorleistung bei geringeren Schluckvolumina der hydrostatischen Verstellmotoren besitzt. Die Fördervolumina der beiden Pumpen sind vergleichbar. Die Leistung für den Fahrtrieb kann aus diesem Grund nur durch ein höheres Druckniveau realisiert werden. Aus diesem Grund lassen sich die dort vorgestellten Lastkollektive nur bedingt mit den hier vorgestellten Auswertungen vergleichen, da die Antriebsstränge vom Grundkonzept unterschiedlich sind.



**Abbildung 53:** Häufigkeiten des Hochdrucks eines Radladers bei den Einsätzen Ladezyklus kurz und Brecher laden [Pfa03]

In **Abbildung 53** sind die Häufigkeiten der Betriebspunkte des oben genannten Radladers für die zwei Einsätze *Ladezyklus kurz* und *Brecher laden* dargestellt. [Pfa03] Die Charakteristiken der Häufigkeiten der Betriebspunkte beider Antriebsstrangkonzeppte weisen beim Vergleich mit **Abbildung 29** Unterschiede auf. Bei diesem Vergleich muss angemerkt werden, dass die Tätigkeiten eine Ähnlichkeit besitzen, aber nicht exakt identisch sind. Die Histogramme der **Abbildung 29** beinhalten zusätzlich die hohen Häufigkeiten der Niederdruckanteile (Druck < 50 bar). Aus dieser Betrachtung ist zu vermuten, dass die Auslegung der einzelnen Getriebestufen (wie Übersetzungen und Spreizung) bezogen auf das Einsatzgewicht und die verwendeten hydrostatischen Komponenten mit der elektronischen Steuerung einen wesentlichen Einfluss auf das Lastkollektiv hat.

**Gelenkwellen:**

Die hier vorgestellten Lastkollektive der Gelenkwellen eignen sich für Auslegungen der Querschnitte und Ausgleichsverzahnungen in Längsrichtung sowie für Getriebewellen. Die hintere Gelenkwelle weist eine etwas geringere Belastung auf als die vordere Gelenkwelle. Dies hängt vermutlich mit der Entlastung der hinteren Achse bei der Lastaufnahme zusammen. Durch diese Entlastung reduziert sich das übertragbare Drehmoment an den Antriebsrädern. Die Vorderachse hat dementsprechend eine höhere Belastung (im Sinne einer höheren vertikalen Kraft) und kann somit auch mehr Drehmoment bzw. Zugkraft übertragen, was zu einer höheren Gelenkwellenbelastung führt. Der Verlauf des Amplitudenkollektivs der hinteren Gelenkwelle ist mit dem der vorderen Gelenkwelle im Bereich der höheren Belastungen ( $> 55\%$ , siehe Abbildung 42 und Abbildung 43) zu vergleichen.

Auffallend ist der Unterschied im Bereich der geringeren Belastungen ( $< 55\%$ ). Die vordere Gelenkwelle weist dort eine erheblich höhere Klassen- bzw. Summenhäufigkeit auf als die hintere Gelenkwelle. Die Ursachen und Gründe konnten innerhalb dieses Versuchsablaufes und der Auswertung nicht geklärt werden. Vermutungen gehen dahin, dass die Anregung durch die Reifen mit Ackerprofil bei Beladung in Kurvenfahrt verursacht wird. Neben dieser Vermutung besteht noch die Möglichkeit, dass der Antriebsstrang ein "schwingfähiges System" bildet und mit den Anregungsfrequenzen während des normalen Fahrbetriebs die Eigenfrequenz des Antriebsstrangs durchläuft. Ein derartiges Durchfahren der Resonanz ist im Fahrbetrieb durch einen Fahrer nicht zu identifizieren.

**5.6 Ausblick**

Bei den bisher vorgestellten Untersuchungen wurden weitere offene Fragestellungen aufgedeckt, welche diese Arbeit nicht beantworten konnte. Innerhalb dieses Ausblicks sollen die wichtigsten offenen Fragestellungen zusammengefasst werden, um auf diesen wissenschaftlichen Erkenntnissen aufbauen zu können.

Durch die praxisnahe Messdatenerfassung auf den Testbetrieben stellen sich keine stationären Betriebszustände bei den einzelnen Komponenten des Fahrtriebsstranges ein, da der Bediener immer auf die aktuelle Fahrsituation reagiert. Eine Untersuchung einzelner Effekte, wie der Einfluss der Lenkung bzw. die Zuladung auf die Verspannung der Gelenkwellen oder der Einfluss der hydrostatischen Regelung auf die mechanischen Komponenten, ist dabei sehr schwierig bis unmöglich. Zusätzlich sind dieselben Arbeitszyklen mit großen Streuungen behaftet. Aus diesem Grund sollte der Fahrtriebsstrang auf einem Prüfstand mit reproduzierbaren Lastprofilen vermessen werden.

Die Lenkung hat einen Einfluss auf die Verspannung der beiden Achsen. Dieser Einfluss konnte innerhalb dieser Arbeit nicht bewertet werden. Bei nicht starr verbundenen Gelenkwellen entstehen bei einer Kurvenfahrt Drehzahldifferenzen durch die unterschiedlich zurückgelegten Wege der Achsen bzw. Räder. Dieser Effekt beeinflusst das Belastungsverhalten des gesamten Fahrtriebsstrangs und sollte in Abhängigkeit von verschiedenen Wenderadien, der Zuladung und unterschiedlicher Haftreibungen beim Rad-Boden-Kontakt (z. B. Asphalt und sandigem losen Untergrund) ermittelt werden. Mit dieser Erkenntnis könnte z. B. die Notwendigkeit einer Allradabschaltung bewertet werden, um die effektive Schädigung der mechanischen Komponenten zu reduzieren bzw. das Verschleißverhalten der Antriebsräder zu verbessern.

Eine weitere offene Fragestellung ist, inwieweit z. B. durch die Reduzierung der Querschnitte unter Gesichtspunkten der Betriebsfestigkeit die Schwinganfälligkeit des Antriebsstrangs beeinflusst wird. Es sollte vermieden werden, dass die Eigenfrequenz im Bereich der Anregungsfrequenzen liegt. Dadurch wird einer "Selbsterstörung" vorgebeugt. Derzeit ist keine Methode bekannt, welche beide Aspekte gemeinsam berücksichtigt, um eine optimale Komponentenauslegung durchzuführen.

Die in dieser Arbeit erstellten Lastkollektive sind nur für das vorliegende hydrostatische Antriebsstrangkonzept gültig. Der Einfluss der Steuerung bzw. Regelung des hydrostatischen Fahrtriebs, vor allem der Druckregelung zur Leistungsanpassung, konnte nicht identifiziert werden. Aus diesem Grund sind Untersuchungen mit Varia-

tion der Leistungsregelung notwendig, um die Wechselwirkung auf das Lastkollektiv festzustellen. Diese Untersuchung kann in einem ersten Schritt durchaus virtuell, also mit Hilfe der Simulationstechnik, erfolgen. Zusätzlich ist es möglich, weitere Antriebsstrangkonzeppte, z. B. ein Mehrmotorenkonzept mit einem 3-stufigen Getriebe, in Bezug auf die mechanischen Komponenten zu vergleichen.

Wie bereits erwähnt, sind die Lastkollektive für diesen Antriebsstrang bei dieser Baugröße sowie bei der installierten Dieselmotorleistung gültig. Eine Übertragung der Lastkollektive auf eine kleinere oder eine größere Maschine (Skalierung) mit Bezug auf Maschinenkennwerte konnte nicht durchgeführt werden. Als Abhilfe muss eine gültige Methode erstellt werden. In einem weiteren Schritt muss die Übertragbarkeit der Lastkollektive in Abhängigkeit von Maschinenkennwerten untersucht und mit einer weiteren Versuchsmaschine nachgewiesen werden.

## 6 Zusammenfassung

Zur Auslegung von Antriebsstrangkomponenten ist die Kenntnis der im Betrieb auftretenden Belastungen wichtig, um diese Komponenten in Bezug auf Robustheit und Sicherheit für den festgelegten Nutzungszeitraum zu dimensionieren. Diese im Betrieb auftretenden Belastungen werden in der Regel in so genannte Lastkollektive zusammengefasst. Lastkollektive beinhalten z. B. die Amplitude eines Schwingspiels eingeteilt in Klassen und deren aufgetretenen Häufigkeiten. Bedauerlicherweise sind nicht für alle Antriebsstränge diese Lastkollektive bekannt, insbesondere bei mobilen Arbeitsmaschinen aufgrund der geringen Stückzahlen. Die Zielsetzung dieser Arbeit war, Lastkollektive für Komponenten eines hydrostatischen Fahrtriebsstrangs am Beispiel eines Teleskopladern zu erstellen.

Das gesamte Tätigkeitsspektrum des Teleskopladern wurde für eine genauere Differenzierung der Belastungen in sieben Kategorien eingeteilt, welche während des Einsatzes auf den Testbetrieben mit aufgezeichnet wurden. Zur Erstellung eines durchschnittlichen zeitlichen Einsatzprofils eines Teleskopladern wurde eine Befragung mit Hilfe eines Fragebogens auf weiteren landwirtschaftlichen Betrieben durchgeführt und bei der Abschätzung berücksichtigt. Die Abschätzung der zeitlichen Anteile der Tätigkeiten ergab für einen durchschnittlichen deutschen landwirtschaftlichen Betrieb eine Aufteilung von 60 % für das Laden, jeweils 10 % für das Schieben und Umsetzen, 8 % für das Stapeln, 5 % für den Transport/Überfahrten und 4 % für die Service-tätigkeiten. Die Tätigkeit Hydraulische Funktion nimmt mit 3 % einen geringen Stellenwert ein und wird sehr individuell auf den Betrieben genutzt.

Die Erstellung eines Lastkollektivs erfordert die gemessene Belastungs-Zeit-Funktion (BZF) der Komponente im realen Betriebseinsatz. Zur Generierung der BZF wurde ein Versuchsträger mit geeigneter Messtechnik ausgerüstet und auf drei landwirtschaftlichen Betrieben im praktischen Einsatz gefahren. Die dabei aufgezeichneten BZF wurden im Anschluss im Offline-Verfahren mit bekannten Methoden, wie z. B. der Rainflow-Klassierung, in Abhängigkeit der jeweiligen Tätigkeit klassiert. Durch

eine anschließende Amplitudentransformation wurden die Lastkollektive der jeweiligen Tätigkeit erstellt. Durch die Anpassung der Lastkollektive auf eine gleiche Referenzzeit, welche einer angenommenen Lebensdauer entspricht, können diese in Bezug auf Belastungshöhe und deren aufgetretenen Häufigkeiten verglichen werden. Die Auswertung der schädigungsäquivalenten Einstufenersatzkollektive ergab, dass die Tätigkeit Schieben die höchsten Belastungen für den Fahrtriebsstrang verursacht, gefolgt von Laden. Die weiteren Tätigkeiten wurden zusammengefasst und verursachen die geringste Schädigung.

Ausgehend von der zeitlichen Aufteilung der Tätigkeiten und den dafür auftretenden Belastungen wurden für einen durchschnittlichen landwirtschaftlichen Betrieb sogenannte Bemessungskollektive erstellt. Diese Bemessungskollektive können direkt für eine Betriebsfestigkeitsberechnung nach dem Nennspannungskonzept angewendet werden. Die Verifikation dieses Bemessungskollektivs gegenüber dem zweiten und dritten Testbetrieb ergab eine Abweichung von maximal 2,2 %, bezogen auf den Auslegungswert, beim Vergleich der schädigungsäquivalenten Einstufenersatzkollektive. Der Testbetrieb 1 stellte einen Ausnahmefall in Bezug auf das Tätigkeitsspektrum und der Betriebsstruktur dar. Die Belastungen lagen hier im Allgemeinen unterhalb der Belastungen der beiden anderen Testbetriebe.

Die Auswertungen haben ergeben, dass das hier vorgestellte Vorgehen angewendet werden kann, um "einsatzspezifische Lastkollektive" abzuschätzen. Aus den gewonnenen Lastkollektiven, differenziert nach den Tätigkeiten, lassen sich beliebige Bemessungskollektive zur Anwendung bei der Betriebsfestigkeitsberechnung erstellen. Im Ausblick wurden die aufgeworfenen und offenen Fragestellungen erläutert, um auf diesen Erkenntnissen aufbauen zu können.

## 7 Formelzeichen

Formelzeichen:	Einheit	Bedeutung des Formelzeichens
$D$	[-]	Schädigungssumme
$D_i$	[-]	Schädigungssumme der Stufe $i$
$D_{rel}$	[-]	relative Schädigungssumme
$\varepsilon$	[-]	Dehnung
$\varepsilon_a$	[-]	Dehnungsamplitude
$F_H$	[kN]	Hubkraft
$H$	[-]	Summenhäufigkeit
$H_E$	[-]	schädigungsäquivalente Ersatz-Schwingspielzahl
$h_i$	[-]	Klassenhäufigkeit
$H_u$	[-]	Anzahl der Umkehrpunkte einer Lastfolge
$H_0$	[-]	Kollektivumfang;
	[-]	Nulldurchgänge einer Lastfolge
$I$	[-]	Unregelmäßigkeitsfaktor
$k$	[-]	Wöhlerlinienexponent
$m$	[-]	Neigung der Rissfortschrittswöhlerlinie
$M$	[-]	Mittelspannungsempfindlichkeit;
	[Nm]	Drehmoment
$M_{max}$	[Nm]	maximales Drehmoment
$N$	[-]	(Bruch-) Schwingspielzahl (Lastspielzahl)
$\hat{N}$	[-]	Lebensdauer
$N_D$	[-]	Grenzschwingspielzahl am Abknickpunkt der Wöhlerlinie
$N_G$	[-]	Grenzlastspielzahl
$N_i$	[-]	Lebensdauer der Stufe $i$
$P_A$	[-]	Ausfallwahrscheinlichkeit
$p$	[bar]	Druck
$p_{max}$	[bar]	maximaler Druck
$R$	[-]	Spannungsverhältnis

---

$R_m$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Zugfestigkeit
$S_a$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Spannungsamplitude
$\hat{S}_a$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Kollektivhöchstwert
$\bar{S}_a$	[N/mm <sup>2</sup> ]	kennzeichnete Nennspannung (Höchstwert) des Amplitudenkollektivs
$S_{aE}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	schädigungsäquivalente Ersatz-Belastungsamplitude
$S_{a,i}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Spannungsamplitude der Stufe $i$
$S_{aT}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Transformierte Spannungsamplitude
$S_D$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Dauerfestigkeitswert, d. h. Spannungsamplitude am Abknickpunkt der Wöhlerlinie bei $N_D$
$S_m$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Mittelspannung
$\bar{S}_m$	[N/mm <sup>2</sup> ]	kennzeichnende Mittelspannung (für den Höchstwert) des Spannungs- oder Amplitudenkollektivs
$S_o$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Oberspannung
$S_u$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Unterspannung
$t$	[sec]	Zeit
$\nu$	[-]	Formparameter (Einheitskollektiv)

## 8 Literatur

- Bux92 Buxbaum, O.: *Betriebsfestigkeit: sichere und wirtschaftliche Bemessung schwingbruchgefährdeter Bauteile*. 2., erw. Aufl., Düsseldorf, Stahlisen-Verlag, 1992.
- deJ69 de Jonge, J.: *NLR Report TR 69063 U*. AGARD-Meeting, 1969.
- Dei09 Deiters, H. P.: *Standardisierung von Lastzyklen zur Beurteilung der Effizienz mobiler Arbeitsmaschinen*. Dissertation TU Braunschweig, Aachen Shaker-Verlag, 2009.
- DKD5 DKD-5: *Anleitung zum Erstellen eines DKD-Kalibrierscheines*. Braunschweig, Deutscher Kalibrierdienst bei der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, 2005.
- DIN13 DIN-1319-4: *Grundlagen der Messtechnik - Teil 4: Auswertung von Messungen, Messunsicherheit*. Berlin, Beuth-Verlag, 1999.
- DIN18 DIN-18800: *Stahlbauten - Teil 1: Bemessung und Konstruktion*. Berlin, Beuth-Verlag, 2008.
- DIN39 DIN-3990-6: *Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern - Teil 6: Betriebsfestigkeitsrechnung*. Berlin, Beuth-Verlag, 1994.
- DIN45 DIN-45667: *Klassierverfahren für das Erfassen regelloser Schwingungen*. Berlin, Beuth-Verlag, 1969.
- DIN50 DIN-50100: *Werkstoffprüfung Dauerschwingversuch, Begriffe, Zeichen, Durchführung, Auswertung*. Berlin, Beuth-Verlag, 1978.

- Dow72 Dowling, N.: *Fatigue Failure Predictions for Complicated Stress-Strain Histories*. Journal of Materials 7 (1), S. 71-87. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1972.
- Ehr07 Ehrlenspiel, K.: *Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. 3. aktualisierte Aufl., München, Hanser-Verlag, 2007.
- Esd07 Esderts, A.: *Grundlagen der Betriebsfestigkeit*. FVA-Seminar Betriebsfestigkeit, Fulda, 11./12. Dezember 2007.
- Eul99 Eulitz, K.-G.; Kotte, L.: *Datensammlung Betriebsfestigkeit*. Frankfurt, VDMA, 1999.
- Eur3 Eurocode 3 - Chapter 9: *Design of Steel Structures*. Commission of the Communities, Edited Draft Issue 3, April 1990.  
(auch EKS-Publikation 43, Schweizerische Zentralstelle für Stahlbau, Zürich, 1987)
- Gas64 Gassner, E.; Griese, F. W.; Haibach, E.: *Ertragbare Spannungen und Lebensdauer einer Schweißverbindung aus Stahl St 37 bei verschiedenen Formen des Beanspruchungskollektivs*. Archiv für das Eisenhüttenwesen 35 (3), S. 255-267, Düsseldorf, Stahleisen-Verlag, 1964.
- Gün95 Güner, E.: *Betriebsfeste Bemessung von Baumaschinen: Ermittlung von Betriebslasten*. Dissertation, Technische Universität Berlin, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1995.
- Gro07 Grote, K.-H.: *Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau*. 22. neu bearb. und erw. Aufl., Berlin, Springer-Verlag, 2007.

- Gud00 Gudehus, H.; Zenner H.: *Leitfaden für eine Betriebsfestigkeitsrechnung: Empfehlung zur Lebensdauerabschätzung von Maschinenbauteilen*. 4. Aufl., korr. Nachdr. Aufl., Düsseldorf, Stahleisen-Verlag, 2000.
- Hai06 Haibach, E.: *Betriebsfestigkeit: Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung*. 3. korr. und erg. Aufl. Berlin, Springer-Verlag, 2006.
- Hüc83 Hück, M.; Thrainer, L.; Schütz, W.: *Berechnung von Wöhlerlinien für Bauteile aus Stahl, Stahlguss und Grauguss - Synthetische Wöhlerlinien*. 3. überarb. Aufl. Bericht ABF 11, Düsseldorf, Verein Deutscher Eisenhüttenleute, 1983.
- Hän03 Hänel, B.: *Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile aus Stahl, Eisenguss- und Aluminiumwerkstoffen*. 5. überarb. Aufl. FKM-Richtlinie, Frankfurt/Main, VDMA-Verlag, 2003.
- Hob97 Hobbacher, A.: *Empfehlungen zur Schwingfestigkeit geschweißter Verbindungen und Bauteile*. IIW-Dokument XIII-1539-96/XV-845-96, IIW-Berichte, Düsseldorf, DVS-Verlag, 1997.
- Hub09 Huber, A.; Schwab, C.; Geimer, M.: *Ein Fahrzeug rund um den Hof*. Mobile Maschinen 3, S. 12-14, Mainz, Vereinigte Fachverlage, 2009.
- Kot94 Kotte, L.; Zenner, H.; Eulitz, K.-G.; Döcke, H.; Esderts, A.: *Forschungsvorhaben Nr. 152, Lebensdauervorhersage I: Verbesserung der Lebensdauerabschätzung durch systematische Aufarbeitung und Auswertung vorliegender Versuchsreihen*. FKM Nr. 189, Frankfurt/Main, 1994.

- Kot97 Kotte, L.; Zenner, H.; Eulitz, K.-G.; Döcke, H.; Liu, J.:  
*Forschungsvorhaben Nr. 192, Lebensdauervorhersage II: Verbesserung der Lebensdauerabschätzung durch systematische Aufarbeitung, Speicherung und Auswertung vorliegender Versuchsreihen.* FKM Nr. 227, Frankfurt/Main, 1997.
- Krü85 Krüger, W.; Petersen, J.: *Rekonstruktion von stochastischen Beanspruchungszeitverläufen aus extrapolierten Rainflow-Matrizen.* VDI-Berichte 552, S. 319-331, 1985.
- Kun05 Kunze, G.: *Methode zur Bestimmung von Normlastkollektiven für Bau- und Fördermaschinen.*  
[http://www.baumaschine.de/Portal/Aktuell\\_0501/Wissenschaft/lastkollektive/lastkollektive.pdf](http://www.baumaschine.de/Portal/Aktuell_0501/Wissenschaft/lastkollektive/lastkollektive.pdf), 2005. Abgerufen: 24.04.2010.
- Mat68 Matsuishi, M.; Endo, T.: *Fatigue of Metals Subjected to Varying Stress.* (in Japanisch), Japan Society of Mechanical Engineers, Fukuoka / Japan, 1968.
- Mau99 Mauch, H.; Zenner, H.: *Forschungsvorhaben Nr. 304 I: Statische Methoden zur Beurteilung von Bauteillebensdauer und Zuverlässigkeit und ihre beispielhafte Anwendung auf Zahnräder.* FVA-Heft Nr. 591, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V., Frankfurt, 1999.
- Min45 Miner, M. A.: *Cumulative Damage in Fatigue.* Journal of Applied Mechanics 12 (3), S. 159-164, 1945.
- Min83 Miners, H. H.: *Der Einfluss der hydrodynamischen Kupplung auf die Belastung in einem Ackerschlepper.* Fortschritt-Berichte VDI-Z 14, S. 1083, Düsseldorf, VDI-Verlag, 1983.

- Nik08      Nikkel, K.: *Geführte Lebensdauerberechnung für Komponenten der Antriebstechnik in Form eines digitalen Leitfadens*. FVA-Heft Nr. 866, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V., Frankfurt, 2008.
- Pah07      Pahl, G.: *Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden und Anwendung*. 7. Aufl., Berlin, Springer-Verlag, 2007.
- Pal24      Palmgren, A.: *Die Lebensdauer von Kugellagern*. Zeitschrift des VDI 68 (14), S. 339-341, 1924
- Pfa03      Pfab, H.; Schröder, K.: *Hydrostatisches Antriebs- und Steuerungssystem für Radlader*. VDI-Bericht Nr. 1793, Düsseldorf, VDI-Verlag, 2003.
- Pöt00      Pötter, K.: *Lebensdauerabschätzung ein- und mehrachsiger schwingend beanspruchter Bauteile*. Dissertation, Technische Universität Clausthal-Zellerfeld, 2000.
- Rad05      Radev, T.: *Methode zur Ermittlung des Anwendungsfaktors  $K_A$  für Zahnräder*. FVA-Heft Nr. 751, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V., Frankfurt, 2005.
- Ren76      Renius, K. T.: *Last- und Fahrgeschwindigkeitskollektive als Dimensionierungsgrundlagen für die Fahrgetriebe von Ackerschleppern*. Fortschrittberichte der VDI-Zeitschriften: Reihe 1 Nr. 49, Düsseldorf, VDI-Verlag, 1976.
- Ren01      Renius, K. T.: *Betriebsfestigkeit von Traktorgetrieben*. Landtechnik 56 (6), S. 390-391, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL), Darmstadt, 2001.
- Ren03      Renius, K. T. *Hydrostatische Fahrtriebe für mobile Arbeitsmaschinen*. VDI-Bericht Nr. 1793, Düsseldorf, VDI-Verlag, 2003.

- Rüt06 Rüter, M.: *SCORPION - moderner Teleskoplader mit einem innovativen Fahrtrieb*. 4. Kolloquium Mobilhydraulik, Instituts für Landmaschinen und Fluidtechnik (ILF) TU Braunschweig, Freundes und Förderkreis des Instituts für Landmaschinen und Fluidtechnik e.V., Braunschweig, 2006.
- Rup03 Rupp, A.; Grünbeck W.: *Betriebslastenmessung an Baufahrzeugen*. VDI-Bericht Nr. 1793, Düsseldorf, VDI-Verlag, 2003.
- Sch66 Schütz, W.: *Über eine Beziehung zwischen der Lebensdauer bei konstanter und bei veränderlicher Beanspruchungsamplitude und ihre Anwendbarkeit auf die Bemessung von Flugzeugbauteilen*. Bericht Nr. FB-69, Laboratorium für Betriebsfestigkeit, Darmstadt, 1966.
- Vah99 Vahlensieck, B.: *Messung und Anwendung von Lastkollektiven für einen stufenlosen Kettenwandler-Traktorfahrtrieb*. Dissertation, TU-München, 1999.
- Vah03 Vahlensieck, B.: *Anwendung der Betriebsfestigkeit*. VDI-Bericht Nr. 1793, Düsseldorf, VDI-Verlag, 2003.
- Wes88 Westermann-Friedrich, A.; Zenner, H.: *FVA-Merkblatt 0/14: Zählverfahren zur Bildung von Kollektiven aus Zeitfunktionen, Vergleich der verschiedenen Verfahren und Beispiele*. Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V., Frankfurt, 1988.

## 9 Anhang

### 9.1 Fragebogen zur Bestimmung des zeitlichen Einsatzprofils:

#### Kontaktdaten:

Forschungsstelle: Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen, Prof. Geimer  
Universität Karlsruhe (TH)

Sachbearbeiter: Andreas Huber

Tel.-Nr.: 0721/608-xxx

Fax-Nr.: 0721/608-xxx

Email: xxx@ima.uni-karlsruhe.de

Datum: \_\_\_\_\_

Betriebsname:

\_\_\_\_\_

Betriebsadresse:

\_\_\_\_\_

Straße:

\_\_\_\_\_

PLZ, Ort:

\_\_\_\_\_

Bearbeiter:

Vorname:

\_\_\_\_\_

Nachname:

\_\_\_\_\_

Tel.-Nr.:

\_\_\_\_\_

Email-Adresse:

\_\_\_\_\_

---

---

**1. Betriebsform:** Die entsprechenden Definitionen sind unten aufgeführt. Optional kann der Biogasbetrieb und der Lohnunternehmer zu einer weiteren Betriebsform hinzugefügt werden, ansonsten ist nur eine Betriebsform gültig

	<b>JA</b>	<b>NEIN</b>	<b>keine Auskunft</b>
Marktfruchtbetrieb:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Futterbaubetrieb:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Veredelungsbetrieb:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Dauerkulturbetrieb:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Gemischtbetrieb:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Biogasbetrieb:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Lohnunternehmer:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Andere Betriebsform:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Erläuterungen:			

**Marktfruchtbetrieb:** Marktfruchtbetriebe müssen mehr als 50 % aus Marktfrüchten - Getreide, Zuckerrüben erwirtschaften.

**Futterbaubetrieb:** Futterbaubetriebe: Hier kommt mehr als 50 % aus dem Futterbau, etwa für Milchviehhaltung und Rindermast.

**Veredelungsbetrieb:** Veredelungsbetriebe erwirtschaften mehr als 50 % aus der Veredlung, etwa durch Schweinemast oder Geflügelhaltung.

**Dauerkulturbetrieb:** Dauerkulturbetriebe: Hier entstammt mehr als die Hälfte aus Dauerkulturen - Obst, Wein, Hopfen.

**Gemischtbetrieb:** Gemischtbetriebe: Bei ihnen dürfen weder die Marktfrüchte noch die anderen genannten Betriebsformen mehr als 50 % des Standard-Deckungsbeitrags erbringen.

**Biogasbetrieb:** Biogasbetriebe bei denen aus organischer Masse elektrische bzw. thermische Energie erzeugt wird.

**Lohnunternehmer:** Unternehmen welcher Arbeiten anderer landwirtschaftlicher Betriebe im Auftrag erledigt.

Quelle: <http://www.bauernhof.net/lexikon/kpl.htm>

**2. Betriebsgröße:**

Ackerbau:

Futter, Marktfrucht [ha]: \_\_\_\_\_

Energiepflanzen [ha]: \_\_\_\_\_

Grünland:

Futter [ha]: \_\_\_\_\_

Energiepflanzen [ha]: \_\_\_\_\_

Sonderkulturen:

Futter, Marktfrucht [ha]: \_\_\_\_\_

Energiepflanzen [ha]: \_\_\_\_\_

Rinder:

Festmist [Stk]: \_\_\_\_\_

Flüssigmist [Stk]: \_\_\_\_\_

Schweine:

Festmist [Stk]: \_\_\_\_\_

Flüssigmist [Stk]: \_\_\_\_\_

Geflügel:

Festmist [Stk]: \_\_\_\_\_

Flüssigmist [Stk]: \_\_\_\_\_

Sonstiger Viehbestand:

Festmist [Stk]: \_\_\_\_\_

Flüssigmist [Stk]: \_\_\_\_\_

Erläuterungen: \_\_\_\_\_

Durchschnittliche Hof/Feld Entfernung [km] \_\_\_\_\_

**3. Betriebsausstattung:**

Traktoren:

Ohne Frontlader [Anzahl/jährliche Betriebsstunden]: \_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_

Mit Frontlader [Anzahl/jährliche Betriebsstunden]: \_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_

Radlader [Anzahl/jährliche Betriebsstunden]: \_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_

**4. Mitarbeiter** (nur Fahrer von landwirtschaftlichen Fahrzeugen):

Festangestellte [Anzahl]: \_\_\_\_\_

Teilzeitangestellte [Anzahl]: \_\_\_\_\_

Aushilfen [Anzahl]: \_\_\_\_\_

**5. Anbauwerkzeug:**

	Vorhanden	nicht Vorhanden
1 Standardschaufel:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2 Palettengabel:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3 Ballengabel:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4 Korb:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5 Erdschaufel:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6 Greiferschaufel/-gabel:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7 hydr. Vorsatzgerät:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8 Arbeitsplattform:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9 Schild:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10 sonstige Anbauwerkzeuge:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Erläuterungen: \_\_\_\_\_

**6. Tätigkeiten:**

In den folgenden Fragen sind die typischen Tätigkeiten definiert. Für diese definierten Tätigkeiten stehen verschiedene Anbauwerkzeuge zur Verfügung. Dabei soll zu den einzelnen Tätigkeiten das eingesetzte Anbauwerkzeug und der entsprechende Zeitanteil (reale Zeitstunden) abgeschätzt und eingetragen werden. Aufgrund der unterschiedlichen Tätigkeiten zwischen dem Sommer und dem Winterhalbjahr sollte dies auch separat ausgewiesen werden, da dann eine bessere Zuordnung zu den Versuchsergebnissen hergestellt werden kann. Wichtig bei dieser Abfrage ist, dass die Zeitanteile in Zeitstunden ausgewiesen werden. Die Nummer der zur Verfügung stehenden Anbauwerkzeuge entnehmen Sie bitte aus der vorherigen Frage (5. Anbauwerkzeuge).

**Sommerhalbjahr:** Anfang April – Ende September

**Winterhalbjahr:** Anfang Oktober – Ende März

**Vorschlag zur Bearbeitung:**

Lesen Sie sich die folgenden Fragen durch und beobachten Sie die Tätigkeiten, die Sie mit Ihrem Teleskopklader erledigen über einen Zeitraum von ca. einer Woche. Anschließend lassen sich die Tätigkeiten mit den Zeitanteilen besser abschätzen. Lassen Sie sich bei Ihrer Abschätzung genügend Zeit. Zur Orientierung ist ein Musterbeispiel am Ende des Fragebogens angehängt.

**6.1 Laden**

Be- und Entladen von anderen Fahrzeugen oder Anlagen.

rieselfähige Erntegüter/Futter/Handelsgüter

palletierte Güter (inkl. Bigbags)

Stroh/Heuballen

Rüben/Kartoffeln

Kalk/Erdreich/Kompost

Dung

Silageentnahme

Sonstiges

Erläuterungen

	Anbauwerkzeug (Nr. siehe Pkt. 5)	Zeitanteil Sommerhalbjahr [Zeitstunden]	Zeitanteil Winterhalbjahr [Zeitstunden]
rieselfähige Erntegüter/Futter/Handelsgüter	—	—	—
palletierte Güter (inkl. Bigbags)	—	—	—
Stroh/Heuballen	—	—	—
Rüben/Kartoffeln	—	—	—
Kalk/Erdreich/Kompost	—	—	—
Dung	—	—	—
Silageentnahme	—	—	—
Sonstiges	—	—	—
Erläuterungen	—	—	—

**6.2 Stapeln**

Genaueres Fahren wird erfordert, z.B. Stapeln von Ballen in der Bergehalle.

palletierte Güter (inkl. Big-Bag)

Stroh/Heuballen

Sonstiges

Erläuterungen

palletierte Güter (inkl. Big-Bag)	—	—	—
Stroh/Heuballen	—	—	—
Sonstiges	—	—	—
Erläuterungen	—	—	—

1 Standardschaufel; 2 Palettengabel; 3 Ballengabel; 4 Korb; 5 Erdschaufel;  
 6 Greiferschaufel/-gabel; 7 hydr. Vorsatzgerät; 8 Arbeitsplattform; 9 Schild;  
 10 sonstige Anbauwerkzeuge

### 6.3 Schieben

Fahrantrieb und Hubwerk erfordern volle Motorenleistung.

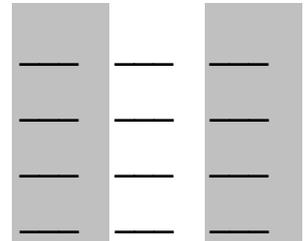
Kalk/Erdreich/Kompost

Dung (Entmistung)

Silobefüllung/-verdichtung

Sonstiges

Erläuterungen



### 6.4 Umsetzen

Umsetzen der Güter (z.B. Kartoffeln) von A nach B. (keine Lade- oder Stapelarbeit)

rieselfähige Erntegüter/Futter/Handelsgüter

palletierte Güter (inkl. Bigbags)

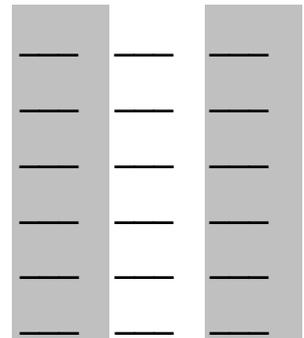
Rüben/Kartoffeln

Kalk/Erdreich/Kompost

Dung

Sonstiges

Erläuterungen



### 6.5 Transport/Überfahrten auf öffentlichen Straßen (Feld/Hof)

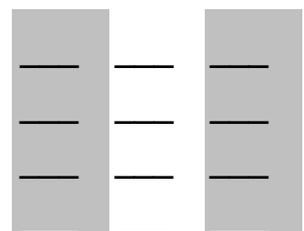
Solo

Anhänger leer

Anhänger beladen

Sonstiges

Erläuterungen



1 Standardschaufel; 2 Palettengabel; 3 Ballengabel; 4 Korb; 5 Erdschaufel;  
6 Greiferschaufel/-gabel; 7 hydr. Vorsatzgerät; 8 Arbeitsplattform; 9 Schild;  
10 sonstige Anbauwerkzeuge

## 6.6 Hydraulische Funktionen

Hydraulische Anbauwerkzeuge, bei denen ein konstanter Hydraulikkreislauf benötigt wird.

Heckenschnitt	_____	_____	_____
Betonmischer	_____	_____	_____
Kehrbesen	_____	_____	_____
Ballenauflösen	_____	_____	_____
Futtermischen	_____	_____	_____
Futterverteilung	_____	_____	_____
Sonstiges	_____	_____	_____
Erläuterungen	_____	_____	_____

## 6.7 Servicearbeiten/undefinierte Tätigkeiten

Tätigkeiten, die nicht in die anderen Kategorien passen.

Flächen-/Straßenreinigung	_____	_____	_____
Gebäudewartung	_____	_____	_____
Landschaftspflege	_____	_____	_____
Baumpflege	_____	_____	_____
Sonstige Arbeiten	_____	_____	_____
Erläuterungen	_____	_____	_____
Summe [Arbeitsanteile]		_____	_____

## 7. Abschluss

Falls Sie noch Fragen oder ergänzende Informationen zu dieser Umfrage haben, können Sie mich jederzeit telefonisch oder per Email erreichen. Natürlich können Sie auch Notizen oder Ergänzungen vornehmen, wenn die vordefinierten Kategorien für Ihren Betrieb nicht passend sind.

\_\_\_\_\_

Name

\_\_\_\_\_

Ort/Datum

**1** Standardschaufel; **2** Palettengabel; **3** Ballengabel; **4** Korb; **5** Erdschaufel;  
**6** Greiferschaufel/-gabel; **7** hydr. Vorsatzgerät; **8** Arbeitsplattform; **9** Schild;  
**10** sonstige Anbauwerkzeuge

## 9.2 Beispieldarstellung der Klassenhäufigkeit

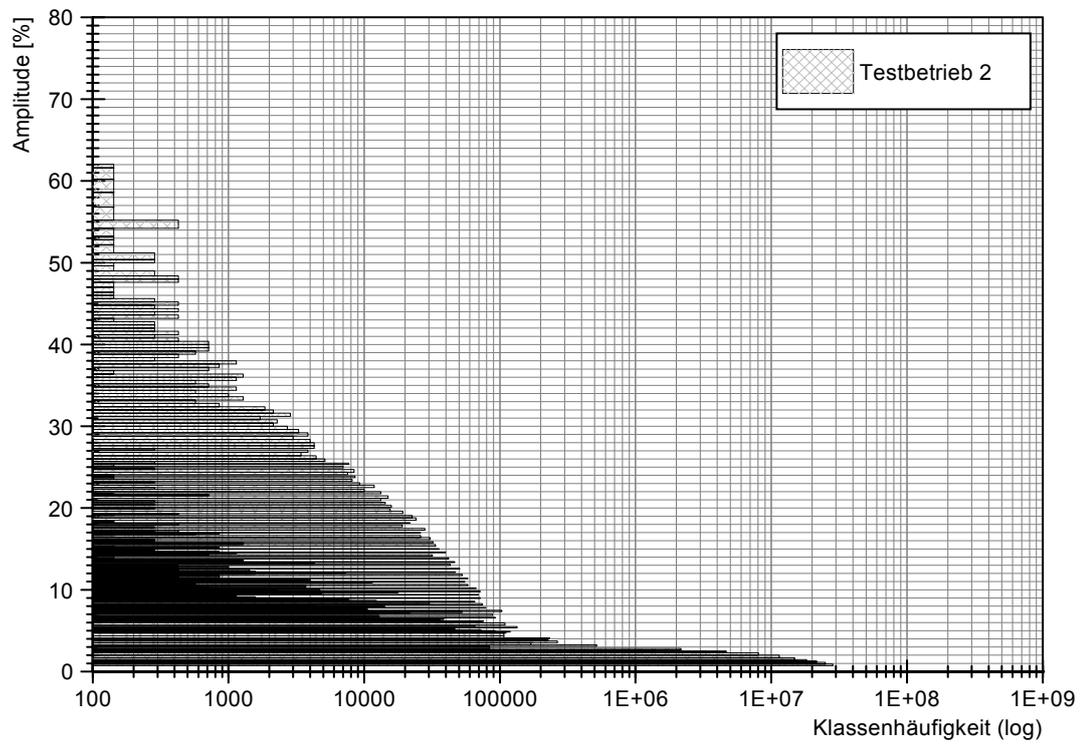


Abbildung 54: Klassenhäufigkeit der vorderen Gelenkwelle des Testbetriebs 2



# **Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)**

---

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

**Die Bände sind unter [www.ksp.kit.edu](http://www.ksp.kit.edu) als PDF frei verfügbar oder als Druckausgabe bestellbar.**

- Band 1**      Urs Wiesel  
**Hybrides Lenksystem zur Kraftstoffeinsprung im schweren Nutzfahrzeug.**  
2010  
ISBN 978-3-86644-456-0
- Band 2**      Andreas Huber  
**Ermittlung von prozessabhängigen Lastkollektiven eines hydrostatischen Fahrtriebsstrangs am Beispiel eines Teleskopladens.**  
2010  
ISBN 978-3-86644-564-2

Innerhalb dieser Arbeit wurden Lastkollektive entwickelt, mit Hilfe derer die Betriebsfestigkeitsberechnung nach dem Nennspannungskonzept durchgeführt werden kann. Als Versuchsträger wurde ein Teleskoplader mit einem hydrostatischen Fahrtriebsstrang verwendet. Diese Lastkollektive wurden auf Basis von realen Belastungs-Zeit-Funktionen (BZF) in Abhängigkeit der Tätigkeit bzw. des Arbeitsprozesses erstellt. Die BZF wurden auf drei landwirtschaftlichen Testbetrieben im praktischen Einsatz aufgezeichnet.

Die erstellten Bemessungskollektive für einen durchschnittlichen deutschen landwirtschaftlichen Betrieb haben eine gute Übereinstimmung zu den Testbetrieben gezeigt. Der Vergleich wurde mit schädigungsäquivalenten Einstufenersatzkollektiven, aufbauend auf der Regel *Miner elementar*, durchgeführt.