

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Institut für Maschinen- und Fahrzeugtechnik - Lehrstuhl für Maschinenelemente

**Zur ganzheitlichen betriebsfesten Auslegung und Prüfung
von Getriebezahnrädern**

Michael Hein

Vollständiger Abdruck der von der
Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München
zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp

Prüfer der Dissertation: 1. Prof. Dr.-Ing. Karsten Stahl
2. Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Karl-Theodor Renius (i.R.)

Die Dissertation wurde am 26.02.2018 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 22.08.2018 angenommen.

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Maschinenelemente, Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau (FZG) der Technischen Universität München. Sie basiert maßgeblich auf den Inhalten der Forschungsvorhaben FVA 554 II „Systemlebensdauerprüfung II“ sowie FVA 722 I „RIKOR Lastkollektiv“ der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V. (FVA). Das Vorhaben FVA 554 II wurde gefördert aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie über die industrielle Gemeinschaftsforschung (IGF) durch die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF).

Bedanken möchte ich mich bei allen, die zum Gelingen dieser Dissertation beigetragen haben. Insbesondere danke ich:

Meinem Doktorvater und Ordinarius der FZG, Herrn Prof. Dr.-Ing. Karsten Stahl, für das entgegengebrachte Vertrauen, die fortwährende Förderung, die Betreuung der Arbeit sowie für die Möglichkeit über die Promotion hinausgehende Tätigkeiten und Verantwortung an der Forschungsstelle zu übernehmen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Karl Theodor Renius (i.R.) für die Übernahme des Koreferats sowie die zahlreichen anregenden Diskussionen rund um das Thema der Betriebsfestigkeit von Zahnradgetrieben.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes sowie die angenehme Prüfungsatmosphäre.

Meinem langjährigen Abteilungsleiter und jetzigem Kollegen, Herrn Dr.-Ing. Thomas Tobie, für die stete fachliche Betreuung, das entgegengebrachte Vertrauen sowie die ausgezeichnete Arbeitsatmosphäre, welche mich nicht nur fachlich und beruflich, sondern auch persönlich stark geprägt hat.

Herrn Dr.-Ing. Josef Mayer für sein entgegengebrachtes Vertrauen in der kurzen Zeit als mein Abteilungsleiter.

Herrn Dr.-Ing. Daniel Kadach für die stete fachliche und persönliche Förderung, begonnen mit der Betreuung meiner Diplomarbeit bis hin zu seiner Rolle als Teamleiter.

Den Herren Dr.-Ing. Peter Oster und Dr.-Ing. Klaus Michaelis für viele fachliche Diskussionen, welche mich immer wieder gefordert aber letztendlich auch gefördert haben.

Allen Abteilungsleitern der FZG sowie den Mitarbeitern aus Verwaltung, Sekretariat, Werkstatt, Prüffeld, Labor und E-Labor für die stets gute und angenehme Zusammenarbeit und Unterstützung, welche maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat. Namentlich zu nennen sind hier die guten Seelen der FZG Kornelia Güth, Andrea Baur und Heidrun Wolf sowie die Herren Markus Pflügler, Franz Hofmann und Marco Breidinger.

Meinen Kolleginnen und Kollegen an der FZG für das äußerst angenehme Arbeitsklima, welches mich immer gerne in die Arbeit kommen ließ, sowie für die zahlreichen anregenden fachlichen Diskussionen und die vielen gemeinsamen Aktivitäten auch außerhalb der FZG sowie die vielen neu entstandenen Freundschaften. Besonderer Dank gilt hier Frau Nadine Sagraloff sowie den Herren Andreas Dobler, Dr.-Ing Maximilian Strebel, Dr.-Ing. Thomas

Lohner, Patrick Fischer, Karl Jakob Winkler, Christopher Illenberger, Marco Mileti, Martin Ebner, Daniel Fuchs, Dr.-Ing. Florian Dobler sowie Thanak Utakapan.

Allen Studenten, welche als studentische bzw. wissenschaftliche Hilfskräfte sowie im Rahmen von Studienarbeiten zum Gelingen der Arbeit beigetragen und mir viele unliebsame Aufgaben abgenommen haben. Insbesondere zu nennen ist an dieser Stelle Herr Michael Geitner, welcher durch seinen überragenden Einsatz und seine fachliche Kompetenz sehr zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen hat. Besonders freue ich mich auch über die daraus entstandene innige Freundschaft und dass auch er seinen Weg an die FZG gefunden hat. Durch seine große Hilfsbereitschaft und sein freundliches Wesen trägt er sehr zu einer angenehmen Atmosphäre am Lehrstuhl bei. Des Weiteren zu nennen sind an dieser Stelle Frau Daniela Macari sowie die Herren Sebastian Fruth und Christopher Warnecke, welche mich zum Teil über Jahre hinweg äußerst tatkräftig und mit sehr viel persönlichem Einsatz unermüdlich unterstützt haben.

Meinen Eltern, Ursula und Dieter, für die bedingungslose Unterstützung über all die Jahre und den Rückhalt auch in schweren Zeiten. Ohne dies wäre der weite Weg hierhin sowie ein Gelingen dieser Arbeit nicht möglich gewesen.

Meinem Sohn Moritz für das Lächeln, dass er mir auch in noch so schweren Zeiten ins Gesicht zaubert.



München, im November 2018

Kurzfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein ganzheitlicher Ansatz zur betriebsfesten Auslegung und Prüfung von Zahnradgetrieben vorgestellt. Im Vordergrund stehen hierbei Betrachtungen bezüglich der Schadensarten Zahnfußbruch und Grübchen, welche bei Leistungsgetrieben häufig die maßgeblichen Ausfallmechanismen darstellen. Die theoretischen Betrachtungen zu betriebsfester Auslegung, zur Durchführung von verkürzten Lebensdauerversuchen sowie zur Ermittlung von Verzahnungskorrekturen bei Lastkollektivbelastung werden um experimentelle Untersuchungen an Standardverspannungsprüfständen zur Ermittlung der Restlebensdauer von vorgeschädigten Komponenten sowie zur Ermittlung von Schadenssummen in Lastkollektivversuchen ergänzt.

Basierend auf all diesen Einzelschritten wird ein ganzheitliches Modell zur betriebsfesten Auslegung und Prüfung von Zahnradgetrieben abgeleitet und diskutiert. Dieses erweiterte Betriebsfestigkeitsmodell liefert einen wertvollen Beitrag zur gesamtheitlichen Analyse von Getriebesystemen im Entwicklungsprozess. Durch korrekte Anwendung der gezeigten Methoden und Berechnungsmodelle kann eine deutliche Zunahme der Leistungsdichte von Zahnradgetrieben, eine merkbare Reduktion der Time-to-market sowie eine erhebliche Steigerung der Zuverlässigkeit erzielt werden.

Abstract

In the scope of this work, a holistic approach for fatigue life design and testing of gearboxes under random load conditions is presented. The failure mechanisms pitting and tooth root breakage were considered particularly as they are typically the main damage mechanisms for power gearboxes. Theoretical approaches for fatigue life design, for performing shortened lifetime tests as well as for calculating tooth flank modifications for load spectra are supplemented by experimental investigations on FZG back-to-back test rigs regarding the evaluation of the remaining lifetime of pre-damaged components as well as for determining damage sums for load spectra test runs.

Based on all these individual steps, a holistic model for fatigue life design and testing of gearboxes is derived and discussed. This extended fatigue life model provides a valuable contribution for the holistic analysis of gearbox-systems within the development process. By applying the shown methods and calculation models properly, a significant increase of the power-to-weight ratio of gearboxes as well as a considerable reduction of the time-to-market and additionally a substantial improvement of the reliability can be achieved.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	III
Kurzfassung	V
Inhaltsverzeichnis	VII
Nomenklatur	XI
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation	1
1.2 Zielsetzung und Lösungsweg	2
2 Stand des Wissens	5
2.1 Allgemeine Grundlagen der Betriebsfestigkeit	5
2.1.1 Definition und Ermittlung von Belastung und Beanspruchung	7
2.1.2 Charakterisierung der Beanspruchbarkeit von Maschinenelementen	9
2.1.3 Überblick über gängige lineare Schadensakkumulationshypothesen.....	11
2.2 Statistische Methoden der Versuchsplanung und –auswertung.....	12
2.2.1 Grundlagen der Statistik	13
2.2.2 Zuverlässigkeitstestplanung	13
2.2.3 Methoden zur Berücksichtigung von Vorwissen	14
2.3 Schadensarten an Zahnrädern – Definition, Tragfähigkeitsberechnung und statistisches Ausfallverhalten	15
2.3.1 Grübchen	16
2.3.2 Zahnfußbruch	17
2.3.3 Zahnflankenbruch	19
2.3.4 Graufleckigkeit	21
2.3.5 Langsamlauf-Verschleiß	22
2.3.6 Fressen	23
2.3.7 Statistisches Ausfallverhalten bei Lastkollektivbeanspruchung	23
2.4 Methoden der Lebensdauerberechnung bei Zahnradgetrieben	23
2.4.1 Auslegung von Zahnradgetrieben unter Lastkollektivbelastung	24
2.4.2 Erweiterte lokale Schadensakkumulation nach FVA 554	31
2.4.3 Zuverlässigkeitsbetrachtungen bei der Auslegung von Zahnradgetrieben	32
2.4.4 Berechnung von Wälzlagern.....	34
2.5 Untersuchungen zum Einfluss einer Lastkollektivbelastung auf die Lebensdauer von Zahnradgetrieben	34
2.5.1 Geraffte Lebensdauer- und Systemlebensdauerprüfung von Zahnradgetrieben.	34
2.5.2 Experimentelle Untersuchungen zum Betriebsfestigkeitsverhalten von Zahnrädern	35
2.5.3 Restlebensdauer von vorgeschädigten Komponenten	37

3 Grundgedanken zur Erweiterung der Lebensdauerberechnung von Zahnradgetrieben	39
3.1 Betrachtete Schadensmechanismen.....	39
3.2 Erweiterte Ermittlung der Beanspruchbarkeit von Zahnradgetrieben.....	40
3.2.1 Experimentelle Ermittlung von Festigkeitskennfunktionen	40
3.2.2 Zuverlässigkeitsbetrachtung bei der Tragfähigkeitsberechnung.....	47
3.3 Schadensakkumulation	50
3.3.1 Globale Betrachtung	50
3.3.2 Lokale Betrachtung.....	51
3.3.3 Gesichtspunkte einer ganzheitlichen Optimierung	59
3.4 Berechnung von Zuverlässigkeitskennwerten bei Lastkollektivbelastung	60
4 Experimentelle Untersuchungen zur Lebensdauer von Zahnradgetrieben.....	63
4.1 Versuchseinrichtung, Prüfkörper und Versuchsprogramm.....	64
4.1.1 FZG-Standardverspannungsprüfstand mit statischer Verspanneinheit	64
4.1.2 FZG-Lastkollektivprüfstand mit dynamischer Lastaufbringung	65
4.1.3 Prüfverzahnung	66
4.1.4 Dokumentation der Prüfverzahnungen	67
4.1.5 Betriebsbedingungen und Versuchsprogramm	67
4.2 Versuchsergebnisse - Tragfähigkeit.....	70
4.2.1 Referenzversuche: Ermittlung der Grübchentrugfähigkeit.....	70
4.2.2 Lastkollektivversuche.....	71
5 Erweitertes Vorgehensmodell zur Durchführung von verkürzten Lebensdauerversuchen	77
5.1 Ableitung von gerafften Prüfkollektiven	77
5.1.1 Omission.....	78
5.1.2 Raffung	78
5.2 Durchführung verkürzter Lebensdauerversuche	79
5.2.1 Statistische Auswertung von verkürzten Versuchen.....	79
5.2.2 Ermittlung der Restlebensdauer von vorgeschädigten Komponenten am Beispiel von Grübchenschäden an Zahnrädern	97
5.3 Allgemeines Vorgehensmodell zur Planung und Durchführung von Lebensdauerversuchen mit reduzierter Laufzeit	104
6 Auslegung von Verzahnungskorrekturen bei Lastkollektivbelastung.....	107
6.1 Berechnungsstudie zu optimalen Korrekturen	108
6.2 Methodik zur Korrekturauslegung bei Lastkollektivbeanspruchung	110
6.3 Anwendbarkeit der ermittelten Korrektur für weitere Schadensarten.....	116
6.4 Validierung der Methodik zur Ermittlung von optimierten Verzahnungskorrekturen bei Lastkollektivbelastung	117
6.5 Implementierung in RIKOR	118

7 Ganzheitlicher Ansatz zur betriebsfesten Auslegung und Prüfung von Zahnradgetrieben	121
7.1 Zusammenfassende Beschreibung des Vorgehensmodells	121
7.2 Erweiterte betriebsfeste Auslegung von Zahnradgetrieben.....	122
7.2.1 Grundlegende Auslegung der Verzahnungsmakrogeometrie.....	122
7.2.2 Auslegung der Verzahnungsmikrogeometrie.....	124
7.3 Prüfung von Zahnradgetrieben.....	124
7.3.1 Geraffte Lebensdauerprüfung von Zahnradgetrieben	124
7.3.2 Auswertung verkürzter Lebensdaueruntersuchungen	124
7.4 Beispiel: Potentiale durch betriebsfeste Auslegung	124
8 Diskussion und Bewertung des erweiterten Betriebsfestigkeitsmodells.....	127
9 Zusammenfassung und Ausblick.....	129
9.1 Zusammenfassung.....	129
9.2 Ausblick	131
10 Literatur.....	133
10.1 Normen und Richtlinien	133
10.2 Zeitschriftenaufsätze, Bücher, Dissertationen, Studienarbeiten.....	135
10.3 Betreute und für diese Arbeit relevante Studienarbeiten.....	149
10.4 Sonstige Dokumente	151
A Anhang.....	153
A.1 Normfähiger Ansatz zur Zuverlässigkeitsbetrachtung in der Stirnradtragfähigkeitsberechnung nach ISO 6336 entsprechend [96].....	153
A.2 Dokumentation der Prüfverzahnungen.....	159
A.3 Verwendete Lastkollektive.....	166
A.4 Berechnete Schadenssummen der Lastkollektivversuche	168
A.5 Statistisches Ausfallverhalten von Zahnrädern bezüglich Grübchenschäden.....	169
A.6 Statistisches Ausfallverhalten von Zahnrädern bezüglich Zahnfußbruch.....	170
A.7 Zur Restlebensdauer von vorgeschädigten Komponenten – Detaillierte Auswertung der zerstörenden Analysen	171
A.8 Zur Restlebensdauer von vorgeschädigten Komponenten - Detaillierte Auswertung der zerstörungsfreien Analysen.....	182
A.9 Berechnungsstudie zu optimalen Zahnflankenkorrekturen	195
A.10 Validierung der Methodik zur Ermittlung von optimierten Verzahnungskorrekturen bei Lastkollektivbelastung	197
Dissertationen der FZG.....	199

Nomenklatur

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Benennung
A_{FF}	-	Werkstoffanstrengung
A_V	-	Wissensfaktor
C_a	μm	Betrag der Kopfrücknahme
CHD_{550}	mm	Einsatzhärtungstiefe bei 550 HV
D	-	Schadenssumme
D_{zul}	-	Zulässige Schadenssumme
E_{ht}	mm	Einsatzhärtungstiefe
$F(t)$	-	Ausfallwahrscheinlichkeit
F_t	N	Umfangskraft am Teilkreis
K_A	-	Anwendungsfaktor
$K_{B\beta}$	-	Breitenfaktor (Fressen)
$K_{F\beta}$	-	Breitenfaktor (Zahnfußbruch)
$K_{H\beta}$	-	Breitenfaktor (Grübchen)
K_v	-	Dynamikfaktor
L_{Rest}	- (%)	Restlebensdauer
L_V	-	Lebensdauerverhältnis
N	-	Lastspielzahl zulässige Lastspielzahl
N_D	-	Knicklastspielzahl
P_A	- (%)	Ausfallwahrscheinlichkeit
Q_{Korr}	-	Gütwert
$R(t)$	-	Zuverlässigkeit
R_a	μm	Arithmetischer Mittenrauwert
RF	-	Raffungsfaktor
S_F	-	Sicherheit gegen Zahnfußbruch
S_H	-	Sicherheit gegen Grübchenschäden
S_λ	-	Sicherheit gegen Graufleckigkeit
T	- Nm	Charakteristische Lebensdauer Drehmoment
T_{eq}	Nm	Äquivalentes Drehmoment
W	μm	Verschleißbetrag
Y_{NT}	-	Lebensdauerfaktor (Zahnfußbruch)
Y_Z	-	Zuverlässigkeitsfaktor (Zahnfußbruch)
Z_Z	-	Zuverlässigkeitsfaktor (Grübchen)
b	- mm	Weibull Formparameter Zahnbreite
b_H	mm	Halbe Hertzsche Abplattungsbreite

d	- versch. mm	Teil- / Einzelschädigung Stufensprung Teilkreisdurchmesser
d_a	mm	Kopfkreisdurchmesser
$f(t)$	-	Dichtefunktion
f_{xFD}	-	Umrechnungsfaktor von $P_A = 50\%$ auf $P_A = x\%$ im Dauerfestigkeitsgebiet für Zahnfußbruchschäden
f_{xHD}	-	Umrechnungsfaktor von $P_A = 50\%$ auf $P_A = x\%$ im Dauerfestigkeitsgebiet für Grübchenschäden
f_{1FD}	-	Umrechnungsfaktor von $P_A = 50\%$ auf $P_A = 1\%$ im Dauerfestigkeitsgebiet für Zahnfußbruchschäden
f_{1FN}	-	Umrechnungsfaktor von $P_A = 50\%$ auf $P_A = 1\%$ im Zeitfestigkeitsgebiet für Zahnfußbruchschäden
f_{1HD}	-	Umrechnungsfaktor von $P_A = 50\%$ auf $P_A = 1\%$ im Dauerfestigkeitsgebiet für Grübchenschäden
f_{1HN}	-	Umrechnungsfaktor von $P_A = 50\%$ auf $P_A = 1\%$ im Zeitfestigkeitsgebiet für Grübchenschäden
f_{im}	μm	Auskolkungstiefe
h_{a0}	-	Werkzeugkopfhöhenfaktor
h_{f0}	-	Werkzeugfußhöhenfaktor
h_i	-	Lastspiele auf Laststufe i
h_{min}	μm	Minimale Schmierfilmdicke
k	-	Wöhlerliniensteigung
m_n	mm	Normalmodul
m_t	mm	Stirnmodul
n	- - 1/min	Versuchsumfang Anzahl Drehzahl
p_C	N/mm^2	Hertzsche Pressung am Wälzpunkt C
p_H	N/mm^2	Hertzsche Pressung
pr_0	mm	Protuberanzbetrag
q	mm	Bearbeitungszugabe
s	-	Standardabweichung
t	versch. -	Lebensdauer / geforderte Lebensdauer Integrationsvariable
t_0	-	Ausfallfreie Zeit (Weibullverteilung)
t_P	versch.	Prüfdauer (im verkürzten Versuch)
x	- -	Profilverschiebungsfaktor Anzahl der Ausfälle
x_i	-	Messgröße (3MA)
x_{Korr}	μm	Korrekturbetrag
y	mm	Werkstofftiefe
z	-	Zähnezahl
α_n	°	Normaleingriffswinkel
α_{pr0}	°	Protuberanzwinkel
α_{wt}	°	Betriebseingriffswinkel

β	°	Schrägungswinkel
ε_α	-	Profilüberdeckung
ε_β	-	Sprungüberdeckung
ϑ	°C	Temperatur
ϑ_E	°C	Einspritztemperatur
ϑ_{fl}	°C	Blitztemperatur
$\lambda(t)$	-	Ausfallrate
$\lambda_{GF,min}$	-	Minimale spezifische Schmierfilmdicke im Eingriffsgebiet
λ_{GFP}	-	Zulässige spezifische Schmierfilmdicke
μ	versch.	Mittelwert
ρ_{a0}	-	Werkzeugkopfabrundungsfaktor
σ	N/mm ²	Beanspruchung
σ_D	N/mm ²	Dauerfestigkeit
σ_F	N/mm ²	Auftretende Zahnfußspannung
σ_{FG}	N/mm ²	Zahnfuß-Grenzfestigkeit
σ_{Flim}	N/mm ²	Dauerfestigkeitswert (Zahnfußbruch)
$\sigma_{FP,Z}$	N/mm ²	Zulässige Zahnfußspannung für xx % Ausfallwahrscheinlichkeit
σ_H	N/mm ²	Auftretende Flankenpressung
σ_{H0}	N/mm ²	Nominelle Flankenpressung
σ_{HG}	N/mm ²	Grübchen-Grenzfestigkeit
σ_{Hlim}	N/mm ²	Dauerfestigkeitswert (Grübchen)
$\sigma_{HP,Z}$	N/mm ²	Zulässige Flankenpressung für xx % Ausfallwahrscheinlichkeit
σ_{stat}	N/mm ²	Statische Festigkeit
τ	-	Integrationsvariable
τ_{eff}	N/mm ²	Effektive Schubspannung
τ_{per}	N/mm ²	Werkstofffestigkeit (Flankenbruch)
ϕ	-	Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung

Indizes

1	Ritzel
2	Rad
A	Ausfall
D	Dauerfestigkeit
F	Zahnfußbruch
FF	Flankenbruch
<i>gering</i>	Lastkollektivversuche bei geringer Durchmischung
<i>global</i>	Globale Betrachtung
H	Grübchen
<i>hoch</i>	Lastkollektivversuche bei hoher Durchmischung
i	Laststufe
j	Punkt im Eingriffsveld

<i>K</i>	Werte bei Lastkollektivbelastung
<i>L</i>	Wert für das Lastkollektiv / bei Prüfung durch Lastkollektiv
<i>log</i>	Werte der logarithmischen Normalverteilung
<i>lokal</i>	lokale Betrachtung
<i>max</i>	Maximalwert
\varnothing	Durchschnittswert
<i>P</i>	Werte im verkürzten Versuch
<i>rel</i>	Relative Betrachtung
<i>xx %</i>	Wert für xx % Ausfallwahrscheinlichkeit
<i>zul</i>	Zulässiger Wert

Abkürzungen

<i>3MA</i>	Mikromagnetische Multiparameter- Mikrostruktur- und Spannungs-Analyse
<i>A</i>	Eingriffsbeginn
<i>AGMA</i>	American Gear Manufacturers Association
<i>B</i>	Innerer Einzeleingriffspunkt
<i>C</i>	Wälzpunkt
<i>CHD</i>	Case hardening depth
<i>D</i>	Äußerer Einzeleingriffspunkt
<i>DIN</i>	Deutsches Institut für Normung
<i>E</i>	Eingriffsende
<i>Eht</i>	Einsatzhärtungstiefe
<i>FIB</i>	Focused Ion Beam
<i>FVA</i>	Forschungsvereinigung Antriebstechnik
<i>FZG</i>	Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau
<i>HV</i>	Härte nach Vickers
<i>ISO</i>	International Organization for Standardization
<i>LS</i>	Lastspiel
<i>LW</i>	Lastwechsel
<i>SAH</i>	Schadensakkumulationshypothese
<i>SNMS</i>	Sekundär-Neutralteilchen-Massenspektrometrie
<i>TSV</i>	Treppenstufenverfahren

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Die Antriebstechnik in all ihren Facetten – seien es große Industriegetriebe mit langen Laufzeiten oder zeitfest ausgelegte PKW-Antriebe mit vergleichsweise kurzen Lebensdauern – ist getrieben von einem stetigen Streben nach erhöhter Zuverlässigkeit und zunehmender Leistungsdichte bei zugleich möglichst geringen Kosten. Der Wunsch nach leistungsfähigeren Getrieben bei gleichbleibendem oder sogar reduziertem Gewicht bzw. Bauraumbedarf und gleichzeitig reduzierten Entwicklungs- und Herstellkosten führt zu neuen Herausforderungen in der Getriebeentwicklung. Zusätzlich sollten die Produktentwicklungszyklen immer kürzer werden, um den sich stetig weiterentwickelnden Anforderungen der Politik und der sozialen Verantwortung in der schnelllebigen modernen Welt gerecht zu werden. War vor Jahren noch die alleinige Entwicklung einer Windkraftanlage ein bedeutender Schritt auf dem Weg hin zur Energieversorgung durch erneuerbare Energien, so müssen heutzutage beinahe im Jahresrhythmus neue Leistungsklassen erschlossen werden, welche früher noch kaum absehbar waren.

Betrachtet man die technischen Anforderungen, welche diese Entwicklung für den Bereich der Leistungsgetriebe mit sich bringt, so lassen sich hierzu zwei Kernaussagen definieren. Zum einen müssen die Methoden, welche den Auslegungsprozess von Getrieben bestimmen, dahingehend verfeinert werden, dass eine gleichbleibend oder sogar verbesserte zuverlässige Auslegung auch bei höherer Leistungsdichte möglich ist. Zum anderen müssen Prüfverfahren für die so entworfenen Getriebe ausgearbeitet werden, welche eine effiziente Überprüfung der Zuverlässigkeit der Bauteile ermöglichen.

Zur Auslegung von Getrieben existiert bereits eine enorme Bandbreite an Werkzeugen, angefangen bei Normberechnungsvorschriften bis hin zu firmeneigenen Berechnungstools. Diese Auslegungswerkzeuge ermöglichen in der Regel eine sehr gute Dimensionierung hinsichtlich einer konkreten Schadensart bei einer einstufigen Belastung. Die Belastung von Zahnradgetrieben ist jedoch in den wenigsten Fällen auf eine reine Einstufenlast zurückzuführen. Vor allem in Zeiten zunehmender Digitalisierung sind die auftretenden Belastungen immer besser bekannt und lassen sich zu einer charakteristischen Lastkollektivbelastung für den jeweiligen Anwendungsfall zusammenfassen. Zur Erreichung hoher Leistungsdichten ist daher eine betriebsfeste Auslegung auf die geforderte Lebensdauer, d.h. eine exakte Gegenüberstellung der auftretenden Beanspruchungen und Beanspruchbarkeiten auch bei variabler Last für die geforderte Lebensdauer, unumgänglich. Um den Werkstoff insgesamt möglichst gut auszunutzen, sollten auch die berechneten Lebensdauern für verschiedene Schadensarten möglichst nah beieinanderliegen. Dieses Prinzip wird z.B. bei Traktorgetrieben seit längerem angewandt (siehe Kapitel 2). "Neue" Schadensarten, für welche noch keine umfassenden Berechnungsvorschriften existieren, wie etwa Zahnflankenbruch, können hierbei zu großen Herausforderungen führen. Insgesamt fehlt somit bisher eine verfeinerte ganzheitliche Berechnungsmethodik zur betriebsfesten Auslegung und Erprobung von Zahnradgetrieben bei Lastkollektivbelastung.

Auch das systematische und zielgerichtete Prüfen von Zahnradgetrieben ist mit großem Aufwand und Unwägbarkeiten verbunden. Nur in den seltensten Fällen können reale Lastkollektive mit einer nennenswerten Anzahl an Getrieben in ihrer ganzen Länge auf dem Prüfstand abgebildet werden. Üblicherweise müssen auf Grund von ökonomischen Gesichtspunkten

deutliche Abstriche bei Prüfzeit oder Anzahl an Prüflingen gemacht werden. Hinzu kommen noch viele Effekte, welche auch im Auslegungsprozess nicht detailliert berücksichtigt werden können, wie etwa der Reihenfolgeeinfluss der Lastaufbringung oder der Einfluss von Vorschädigungen auf die Lebensdauer. Gerade bei Getrieben mit geforderten langen Laufzeiten, wie etwa im Bereich der Windenergieanlagen (WEA), Kraftwerkstechnik oder Bahn, ist somit eine deutliche Raffung erforderlich. Um von Versuchsergebnissen bei reduzierter Laufzeit und reduziertem Probenumfang trotzdem auf das reale Ausfallverhalten und die erwartete Lebensdauer eines Getriebes schließen zu können, sind daher vielfältige Methoden nötig.

1.2 Zielsetzung und Lösungsweg

Diese Arbeit setzt sich zum Ziel, einen verfeinerten ganzheitlichen Ansatz zur betriebsfesten Auslegung und Prüfung von Zahnradgetrieben zu entwerfen. Dabei sollen verschiedene Schadensformen, welche insbesondere auf eine Werkstoffermüdung zurückzuführen sind, und unterschiedliche Anwendungsgebiete Berücksichtigung finden. Die Methodik wird im Rahmen der Arbeit für ausgewählte Schadensarten und Beispiele an Leistungsgetrieben gezeigt, lässt sich jedoch prinzipiell auch auf andere Schadensformen und Maschinenelemente übertragen, welche bei zyklischer Belastung ein Ermüdungsverhalten aufweisen.

Die komplexen Zusammenhänge der Betriebsfestigkeitsrechnung sollen kompakt dargestellt werden, um auch eine praktische Anwendung der gezeigten Methodik zu ermöglichen. Vor allem in den späteren Kapiteln wird eine Art Leitfaden gegeben, um Zahnradgetriebe betriebsfest auszulegen und eine effiziente Prüfung zu planen. Aufgrund des beschränkten Umfangs können die vielen einzelnen Themengebiete, welche im Rahmen der Betriebsfestigkeit berücksichtigt werden müssen, nur mit begrenztem Detaillierungsgrad wiedergegeben werden. Wo immer möglich, wird versucht, die Zusammenhänge kompakt, aber verständlich darzustellen und auf weiterführende Literatur zu verweisen.

Die Inhalte dieser Arbeit beruhen maßgeblich auf den Inhalten der vom Autor bearbeiteten Forschungsvorhaben FVA 554 II "Systemlebensdauerprüfung II" [111, 112] und FVA 722 I "RIKOR Lastkollektiv" [106], ergänzt um eigene Überlegungen und Erkenntnisse aus studentischen Arbeiten. Beide Forschungsvorhaben wurden im Rahmen der industriellen Gemeinschaftsforschung der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA) durchgeführt und zum Teil durch die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) mit öffentlichen Fördermitteln unterstützt.

Der hier gezeigte Ansatz zur betriebsfesten Auslegung und Prüfung von Zahnradgetrieben beruht auf der Erweiterung von bereits vorhandenen Methoden aus der Literatur, weitergehenden theoretischen Modellen und exemplarischen experimentellen Untersuchungen zur Schadensart Grübchen an FZG-Zahnradverspannungsprüfständen. Im Einzelnen werden die folgenden Themen als eigenständige Kapitel der Arbeit detailliert behandelt:

- **Stand des Wissens**

Zunächst wird der aktuelle Stand des Wissens zu Zahnradschäden und der betriebsfesten Auslegung von Zahnradgetrieben dargestellt. Bereits vorhandene experimentelle Untersuchungen werden bewertet und weitergehende Untersuchungen zum Einfluss einer Lastkollektivbelastung auf die Lebensdauer von Zahnradgetrieben gezeigt.

- **Grundgedanken zur Erweiterung der Lebensdauerberechnung von Zahnradgetrieben bei Lastkollektivbelastung**

Im Rahmen dieses Kapitels werden die bisherigen Erkenntnisse zur betriebsfesten Auslegung von Zahnradgetrieben zusammengefasst und um neuere Erkenntnisse erweitert. Maßgebend ist hier der Vergleich von verschiedenen Schadensmechanismen im Rahmen der Lebensdauerberechnung, insbesondere durch die Verwendung von sogenannten Bauteilwöhlerlinien. Die bisherige Betrachtung hinsichtlich der Schadensmechanismen Grübchen und Zahnfußbruch wird um die Schadensart Zahnflankenbruch ergänzt, welche als relativ "junger" Schaden bisher noch keine Berücksichtigung fand.

- **Experimentelle Untersuchungen zur Lebensdauer von Zahnradgetrieben bei Einstufen- und Lastkollektivbelastung**

Durch experimentelle Untersuchungen an FZG Zahnradverspannungsprüfständen konnten zahlreiche zusätzliche Erkenntnisse zum Schädigungs- und Ausfallverhalten bei Einstufen- und Lastkollektivbelastung gewonnen werden. Im Vordergrund der hier dokumentierten Versuche standen Grübchenschäden. Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen dienen als weitere Anhaltspunkte, um Empfehlungen zur betriebsfesten Auslegung und Prüfung abzuleiten sowie der Abschätzung der Restlebensdauer von vorgeschädigten Komponenten. Die hier dokumentierten Versuchsreihen sind essentieller Bestandteil des Forschungsvorhabens FVA 554 II "Systemlebensdauerprüfung II" [111].

- **Erweitertes Vorgehensmodell zur Durchführung von verkürzten Lebensdauerversuchen**

Basierend auf den Ergebnissen der vorherigen Schritte wird ein erweitertes Vorgehensmodell zur Durchführung von verkürzten Lebensdauerversuchen abgeleitet. Dieses beruht auf früheren Forschungsergebnissen, der statistischen Auswertung von verkürzten Versuchen und einer Methodik zur Ermittlung der Restlebensdauer von vorgeschädigten Komponenten, welche durch die umfangreiche Auswertung von Versuchsdaten und Messungen gewonnen wurde. Das dokumentierte Vorgehensmodell ist eines der Hauptergebnisse des Forschungsvorhabens FVA 554 II "Systemlebensdauerprüfung II" [111].

- **Auslegung von Verzahnungskorrekturen bei Lastkollektivbelastung**

Nicht nur die Verzahnungshauptgeometrie sollte hinsichtlich einer auftretenden Lastkollektivbelastung ausgelegt werden, sondern auch die Feingeometrie. Dieses Kapitel widmet sich daher der Auslegung von Zahnflankenkorrekturen bei Lastkollektivbelastung. Die Methodik greift dabei auf Mittel der betriebsfesten Auslegung, wie etwa der lokalen Schadensakkumulation, zurück. Sie wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens FVA 722 I "RIKOR Lastkollektiv" [106] entwickelt und validiert.

- **Leitfaden zur betriebsfesten Auslegung und Prüfung von Zahnradgetrieben**

Die Erkenntnisse der einzelnen Kapitel werden mit dem Ziel eines möglichst ganzheitlichen Ansatzes zusammengefasst. Dieser Ansatz soll als Leitfaden für die praktische Anwendung zur betriebsfesten Auslegung und Prüfung von Zahnradgetrieben verstanden werden. Ausgehend von der Auslegung der Grob- und Feingeometrie werden Methoden zur gerafften Lebensdauerprüfung gezeigt. Diese sollen eine effiziente Prüfung bei verkürzter Laufzeit und reduziertem Prüflingsumfang ermöglichen. Zusätzlich wird hier auch ein kur-

zer Abriss zur Ermittlung von Wöhlerlinien hinsichtlich verschiedener Zahnradschäden gegeben. Dazu wird ein effizientes Mittel zur Auswertung von Wöhlerversuchen gezeigt und um eine erweiterte Zuverlässigkeitsbetrachtung zur Umrechnung auf verschiedene Ausfallwahrscheinlichkeiten ergänzt. Die zusammenfassende Beschreibung des ganzheitlichen Vorgehensmodells wird mit einem einfachen Beispiel zur Verdeutlichung der Potentiale einer betriebsfesten Auslegung abgeschlossen.

- **Diskussion und Bewertung des erweiterten Betriebsfestigkeitsmodells**

Abschließend wird das entwickelte ganzheitliche Modell zur betriebsfesten Auslegung und Prüfung von Zahnradgetrieben kritisch diskutiert und bewertet. Offene Punkte und weitergehende Fragestellungen werden aufgezeigt und der weitere Forschungsbedarf geklärt.

2 Stand des Wissens

2.1 Allgemeine Grundlagen der Betriebsfestigkeit

Die Betriebsfestigkeit (engl.: "fatigue life analysis" / "random load fatigue analysis" [197]) beschreibt die Bemessung von Bauteilen derart, dass sie gegebenen äußeren Belastungen für eine vorgegebene Zeit oder auf Dauer ohne Schaden widerstehen [103]. Ziel einer betriebsfesten Auslegung ist eine bestmögliche Ausnutzung des zur Verfügung stehenden Werkstoffs. Die Betriebsfestigkeit findet in der Regel nur bei einer ausgeprägten Schwingbeanspruchung Anwendung, welche bei entsprechender Höhe der Belastung in einem Schwingbruch, also einem Schaden, welcher erst nach mehreren Lastzyklen auftritt, resultiert. Andere Schäden als Ermüdungsschäden können mit einer betriebsfesten Auslegung nicht abgedeckt werden. Im ingenieurwissenschaftlichen Sprachgebrauch wird heutzutage oft zwischen einer betriebs- bzw. zeitfesten und einer dauerfesten Auslegung unterschieden (engl.: "finite / infinite life design"). Eine betriebs- bzw. zeitfeste Auslegung bezeichnet dabei die Auslegung auf eine vorgegebene Lebensdauer; bei einer dauerfesten Auslegung sollte im Betrieb unabhängig von der Laufzeit kein Schaden eintreten. Die klassische Definition der Betriebsfestigkeitsrechnung umfasst sowohl die zeitfeste als auch die dauerfeste Auslegung bei wechselnder oder schwelender Last. Die Auslegung von Zahnradgetrieben folgt somit immer den Regeln der klassischen Betriebsfestigkeitsrechnung, da die Belastung der Zahnflanke eines Einzelzahnes bei drehenden Wellen stets schwellend und die Zahnfußbelastung schwellend oder wechselnd ist und somit jede Wellenumdrehung mindestens ein Lastspiel darstellt, auch wenn das eingebrachte Drehmoment konstant ist. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Begriff der Betriebsfestigkeit jedoch nur für Berechnungen mit dem Ziel einer endlichen Lebensdauer verwendet und somit vom Begriff der dauerfesten Auslegung abgegrenzt.

Die Belastung eines Zahnradgetriebes kann in Ausnahmefällen einstufig sein, ist im Regelfall jedoch zeitlich variabel und lässt sich oft durch ein wie auch immer geartetes Lastkollektiv beschreiben. Je genauer die Belastung bekannt ist, desto exakter kann auch eine betriebsfeste Auslegung erfolgen.

Die Belastbarkeit eines schwingbeanspruchten Bauteils wird häufig durch eine Wöhlerlinie (engl.: "S-N curve") beschrieben. Diese stellt die ertragbare Lastspielzahl für eine gegebene Überlebenswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Beanspruchung dar und ist bei Zahnradgetrieben das maßgebende Element zur Charakterisierung der Beanspruchbarkeit hinsichtlich verschiedener Schadensarten. Die Verwendung anderer Festigkeitskennfunktionen kann bei komplexeren Beanspruchungsformen, als der üblicherweise bei Zahnradern auftretenden rein schwellenden Belastung, hilfreich sein. Die Gaßnersche Lebensdauerlinie [103] liegt im Wöhlerdiagramm immer rechts der Wöhlerlinie und beschreibt die Beanspruchbarkeit hinsichtlich einer gegebenen Lastkollektivform. Diese Art der Festigkeitskennfunktion findet jedoch bei Zahnradgetrieben kaum Anwendung. Oftmals wird auch eine Schadenslinie [188, 200] angegeben, welche im Wöhlerdiagramm immer links der Wöhlerlinie liegt und den Zeitpunkt des ersten Anrisses beschreibt. Die Bestimmbarkeit dieser Linie ist stark von der betrachteten Schadensart und der Prüfmethodik abhängig.

Bild 2.1 zeigt ein Lastkollektiv in Summendarstellung und eine Wöhlerlinie eingetragen in ein Koordinatensystem mit der Lastspielzahl als Abszisse und der Belastung bzw. Belastbarkeit

als Ordinate. Diese Darstellung ist häufig anzutreffen, erlaubt sie doch eine grafische Gegenüberstellung von Belastung / Beanspruchung und Belastbarkeit / Beanspruchbarkeit. Die Darstellung erfolgt üblicherweise im doppelt-logarithmischen Maßstab.

Um eine Aussage hinsichtlich der Bauteillebensdauer zu erhalten, ist bei bekanntem Lastkollektiv (welches auch einstufig sein kann) und bekannter Wöhlerlinie die Verknüpfung der beiden durch eine Schadensakkumulationshypothese (SAH) erforderlich. Hierbei kann grundsätzlich zwischen linearen SAH (z.B. [103, 175, 187, 252, 254]) und nichtlinearen SAH (z.B. [68, 93, 94, 174, 255]) unterschieden werden. Bei Anwendung von linearen SAH wird davon ausgegangen, dass jedes Schwingenspiel auf einem gegebenen Lasthorizont zur gleichen Schädigung führt. Bei nichtlinearen SAH spielt darüber hinaus die Reihenfolge der Lastaufbringung eine entscheidende Rolle. Oftmals werden hierunter auch komplexe bruchmechanische Ansätze verstanden. Da nichtlineare SAH für Zahnradgetriebe bisher keine Rolle spielen, werden diese im Weiteren nicht näher betrachtet.

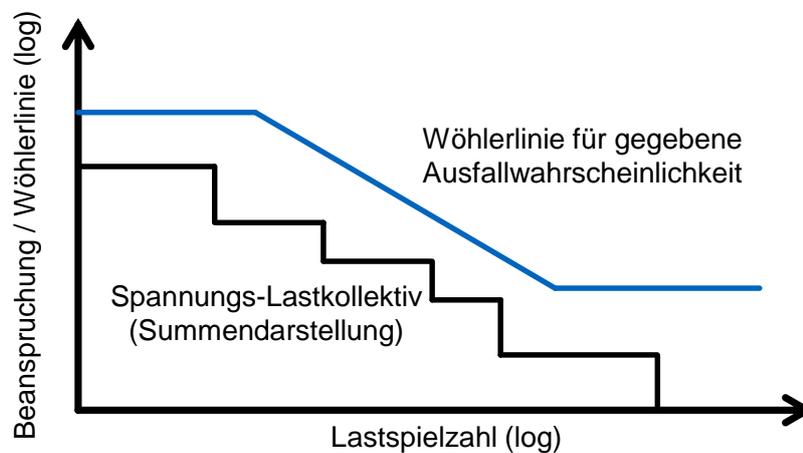


Bild 2.1: Lastkollektiv und Wöhlerlinie (schematisch)

Das Gebiet der Betriebsfestigkeit manifestiert sich in den vielfältigsten Anwendungsfällen im Maschinenbau und ist vor allem bei "modernen" Auslegungen mit dem Ziel einer hohen Leistungsdichte von größter Relevanz. Da diese Arbeit die Betrachtung von Zahnradgetrieben in den Vordergrund stellt, orientieren sich auch die nachfolgenden Ausführungen daran. Im Wesentlichen werden daher diejenigen Grundlagen der Betriebsfestigkeit, welche sich auch auf Zahnradgetriebe übertragen lassen, vorgestellt. Insbesondere bedeutet dies eine Fokussierung auf:

- Lastkollektive, welche zu großen Teilen durch das Drehmoment beeinflusst werden, da dies für viele Schadensarten die maßgebliche Belastung ist;
- Rein schwelende Belastungen (diese ermöglichen eine sehr einfache Lastkollektivklassierung);
- Stahlwerkstoffe mit ausgeprägter Dauerfestigkeit (Werkstoffe ohne ausgeprägte Dauerfestigkeit, wie etwa Aluminium oder faserverstärkte Kunststoffe werden aktuell nur in Nischenanwendungen eingesetzt);
- Lineare Schadensakkumulationshypothesen.

Ein fundierter und kompletter Überblick über die theoretischen Grundlagen der Betriebsfestigkeit (vor allem von Strukturbauteilen) und dem Verständnis davon wird beispielsweise von Haibach [103], Gaßner [95] oder Berger [56] gegeben. Wichtige Begriffe werden z.B. von

Sonsino [224] definiert. In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Bestandteile einer Betriebsfestigkeitsrechnung – Belastung / Beanspruchung, Beanspruchbarkeit sowie Schadensakkumulation – näher definiert, um für die folgenden Kapitel ein einheitliches Verständnis der Begrifflichkeiten im Rahmen dieser Arbeit zu schaffen.

2.1.1 Definition und Ermittlung von Belastung und Beanspruchung

Zunächst einmal ist die begriffliche Unterscheidung von äußerer Belastung und Beanspruchung zu klären. Der Begriff der äußeren Belastung beschreibt die von außen einwirkenden Kräfte, Momente, Drehzahlen etc. wohingegen der Begriff der Beanspruchung z.B. innere Spannungen, Dehnungen, etc. meint. Im Fall einer einfachen Zahnradstufe wird die äußere Belastung durch das Drehmoment und die Drehzahl beschrieben. Daraus resultierende Beanspruchungskennwerte können beispielsweise die Hertzsche Pressung auf der Zahnflanke p_H , die auftretende Flankenpressung σ_H nach ISO 6336-2 [35], die Schmierfilmdicke h_{\min} nach Dowson und Higginson [75], die auftretende Zahnfußspannung σ_F nach ISO 6336-3 [36] oder etwa die Blitztemperatur auf der Zahnflanke ϑ_H nach ISO/TR 13989-1 [40] bzw. ISO/TS 6336-20 [1] sein. Im Rahmen dieser Arbeit wird stellenweise zusätzlich der Begriff der Belastung verwendet, welcher hier als Oberbegriff für äußerer Belastung und Beanspruchung verstanden werden soll.

Im Hinblick auf die Tragfähigkeitsberechnung für eine Schadensart wird häufig die maßgebliche Beanspruchung (z.B. auftretende Flankenpressung σ_H für Grübchenschäden) der Beanspruchbarkeit gegenübergestellt, da diese u.U. durch verschiedene äußere Belastungsarten hervorgerufen werden kann. Sollen nun jedoch verschiedene Schadensarten miteinander verglichen werden, so ist es sinnvoll, die äußere Belastung als maßgebliches Kriterium heranzuziehen. Dieses Vorgehen wurde bereits früh von Renius [191, 192, 193] für verschiedene Maschinenelemente in Traktorgetrieben mit großem Erfolg eingesetzt und wird später noch detailliert beschrieben.

Die äußere Belastung von Fahrzeuggetrieben ist in der Regel zeitlich variabel und kann großen Streuungen unterliegen [47]. Maßgebliche äußere Belastungen sind beispielsweise das Drehmoment, die Drehzahl, Temperaturen oder äußere Kräfte (Quer- oder Axialkräfte). Da für die meisten Ermüdungsschäden das Drehmoment die bedeutendste Einflussgröße ist, wird dies nachfolgend stellvertretend für alle äußeren Belastungen betrachtet. Das Eingangsdrehmoment kann in der Regel als Drehmoment-Zeit-Funktion angegeben werden (siehe **Bild 2.2**).

Bauartbedingt kommen bei einfachen Zahnradgetrieben alle Zähne nacheinander in den Eingriff. Die Belastung eines Einzelzahns ist somit zunächst eine rein schwelende Belastung. Der Maximalwert dieser Belastung wird definiert durch das in diesem Moment am Getriebeeingang anliegende Drehmoment (**Bild 2.2**). Entgegen der gezeigten schematischen Darstellung kann davon ausgegangen werden, dass die Dauer für eine Umdrehung im Vergleich zur Dauer einer Drehmomentschwankung sehr klein ist [182]. Zur einfacheren Handhabung wird daher davon ausgegangen, dass für eine Umdrehung an allen Zähnen die gleiche Zahnnormalkraft anliegt. In Planetengetrieben, bei Zwischenrädern oder anderen Sonderlösungen, kann es auch zu mehreren Eingriffen pro Umdrehung oder einer wechselnden Belastung im Zahnfuß kommen. Dies sollte für den speziellen Anwendungsfall stets sorgsam untersucht werden.

Das am Getriebeeingang anliegende Drehmoment ist in den seltensten Fällen konstant. In der Regel ist es zeitlich veränderlich und in vielen Anwendungsfällen auch äußerst dynamisch. Um diesen Einfluss im Rahmen der Betriebsfestigkeitsrechnung erfassen zu können, ist es

notwendig, den Drehmoment-Zeit Verlauf in ein Lastkollektiv zu überführen, welches die Häufigkeit der Belastung für verschiedene Belastungsklassen angibt. Hierzu gibt es verschiedenste Klassierverfahren, welche beispielsweise von Bertsche [57], Haibach [103], in DIN 45667 [20] oder in der FVA Richtlinie FVA 131 IV [84] beschrieben werden.

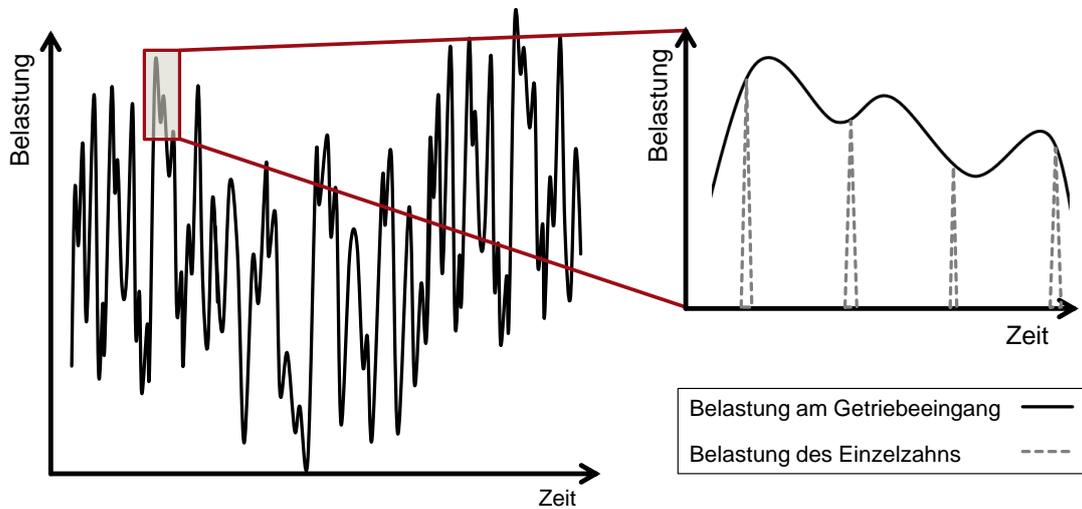


Bild 2.2: Gesamtbelastung und Belastung eines Einzelzahns (schematisch)

Klassierverfahren werden in einparametrische und zweiparametrische Verfahren eingeteilt. Die einparametrischen Verfahren erfassen lediglich die (maximale) Amplitude der Belastung für ein Lastspiel, wohingegen die zweiparametrischen Verfahren auch den Mittelwert bzw. Minimum und Maximum der Belastung während eines Lastspiels erfassen können. Aufgrund der rein schwelenden Belastung des Einzelzahns ist für die Klassierung von Drehmoment-Zeit Verläufen zur Betriebsfestigkeitsrechnung an Zahnradgetrieben die Verwendung von einparametrischen Verfahren ausreichend, wenn die Drehzahlen nur wenig schwanken – ansonsten wird eine drehzahlsynchrone Abfrage empfohlen [192]. Zweiparametrische Verfahren, wie die Rainflowklassierung [154] sind für Zahnräder ungeeignet, weil bei der Anwendung der Verlauf der Einzelzahnbelastung verwendet werden müsste und nicht der zeitliche Verlauf des äußeren Drehmoments. In DIN 3990-6 [19] bzw. ISO 6336-6 [38] wird die Einteilung des Drehmoments in 64 Klassen empfohlen. Die Klassenbreite kann konstant oder variabel gewählt werden. Liegen viele Lastspiele in einem relativ kleinen Bereich der tatsächlichen Drehmomentspanne, so empfiehlt es sich, eine variable Klassenbreite mit kleineren Klassen in Bereichen mit vielen Lastspielen zu wählen. In diesem Fall darf das Klassenkollektiv jedoch nicht mehr als Dichtefunktion verwendet werden. Das in DIN 3990-6 [19] bzw. ISO 6336-6 [38] beschriebene Verfahren zur Klassierung entspricht dem Klassengrenzenüberschreitungsverfahren.

Lastkollektive zur Betriebsfestigkeitsrechnung von Zahnradgetrieben werden in der Regel im halblogarithmischen oder doppellogarithmischen Maßstab dargestellt. Die Einzelhäufigkeitsdarstellung (siehe **Bild 2.3**) entspricht der Visualisierung des tabellarischen Lastkollektivs, da für jede Klasse nur die tatsächlich auftretenden Lastspiele gezeigt werden. Meist wird jedoch die Summenhäufigkeitsdarstellung (siehe **Bild 2.3**) zur Visualisierung verwendet, welche für jede Klasse die Summe der Lastspiele für diese und betragsmäßig höhere Klassen zeigt. Bei genügend kleiner Klassenbreite ergibt sich visuell ein nahezu stetiger Verlauf.

Die Verwendung eines für den jeweiligen Anwendungsfall aussagekräftigen Lastkollektivs ist essentiell, um vernünftige Ergebnisse im Rahmen der Betriebsfestigkeitsrechnung zu erzielen.

Belastung-Zeit Verläufe können durch Messung, Simulation oder Abschätzung gewonnen werden [71, 130, 149]. Für manche Anwendungsfälle (z.B. Fahrzeuggetriebe, Landmaschinen) gibt es auch weitgehend standardisierte Lastkollektive (siehe z.B. [56, 67, 73, 98, 117, 137, 145, 153, 162, 195, 196, 234, 236]), welche zur Abschätzung verwendet werden können. Vor allem der Anteil der höchsten Lasten im Lastkollektiv beeinflusst maßgeblich die Ergebnisse und sollte daher auf Grund von Erfahrung und möglichst realitätsnah gewählt werden.

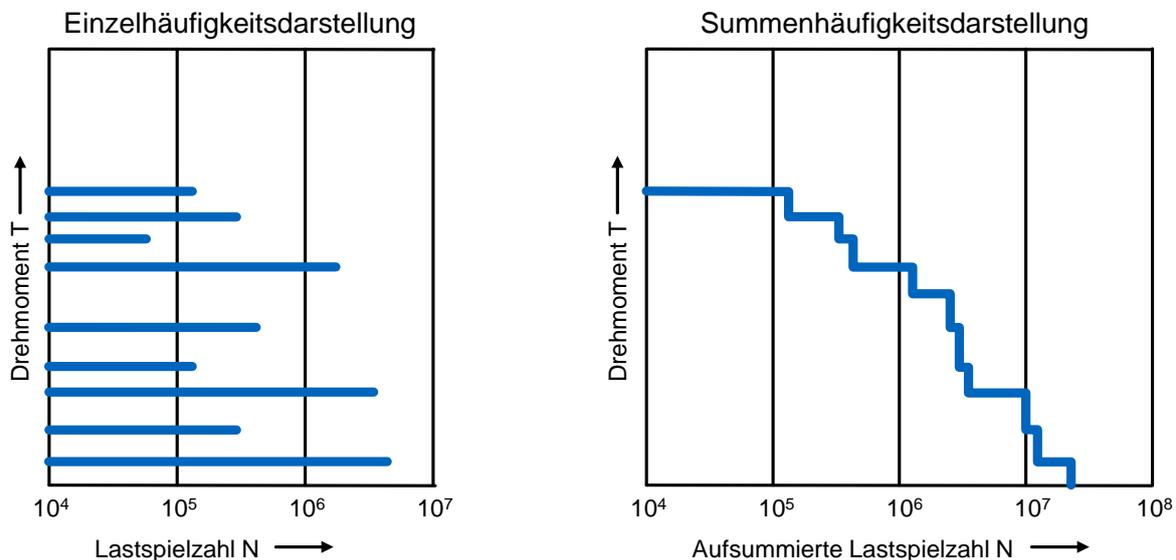


Bild 2.3: Lastkollektiv in Einzel- und Summenhäufigkeitsdarstellung

Soll eine Betriebsfestigkeitsrechnung für einzelne Schadensmechanismen durchgeführt werden, so muss in der Regel das Drehmomentkollektiv in ein Beanspruchungskollektiv überführt werden. Bei der Berechnung der Beanspruchungen, z.B. der auftretenden Flankenpressung σ_H , kann es u.U. notwendig sein, lastabhängige Faktoren zu bestimmen. Beispielsweise kann sich die Lastverteilung über der Zahnflanke, welche durch den Breitenfaktor $K_{H\beta}$ nach ISO 6336-1 [34] erfasst wird, ändern. Um dies zu berücksichtigen ist es daher angebracht, den Breitenfaktor für jede Lastklasse neu zu bestimmen.

2.1.2 Charakterisierung der Beanspruchbarkeit von Maschinenelementen

Die Beanspruchbarkeit von Maschinenelementen und insbesondere von Zahnradgetrieben wird im Rahmen der Betriebsfestigkeitsrechnung durch eine Festigkeits-, Belastbarkeits- oder Beanspruchbarkeitskennfunktion angegeben [199]. Die Wöhlerlinie ist der bekannteste Vertreter dieser Kennfunktionen.

Die Wöhlerlinie wird im Allgemeinen durch zyklische Versuche bei konstantem Lasthorizont gewonnen. Die Ermittlung einer Wöhlerlinie hinsichtlich der klassischen Zahnradschäden Grübchen und Zahnfußbruch kann beispielsweise durch Laufversuche im FZG-Standardverspannungsprüfstand [23] oder im Pulsator (Erklärung z.B. nach FZG/Schurer [216]) erfolgen. Hierbei werden auf unterschiedlichen Lastniveaus jeweils mehrere Versuche durchgeführt und anschließend statistisch ausgewertet (siehe z.B. [226] für Hinweise zur Auswertung). Wöhlerlinien, v.a. für typische Maschinenelemente der Antriebstechnik, werden heutzutage üblicherweise im doppellogarithmischen Maßstab dargestellt. Nach DIN 50100:1979 [21] ist jedoch auch eine Darstellung im halblogarithmischen Maßstab zulässig, wie dies auch ursprünglich von Wöhler so vorgesehen war [103]. Die neue Auflage der DIN 50100 [22] von 2016 schreibt

hingegen eine doppeltlogarithmische Darstellung vor, damit die Wöhlerlinie eine Gerade bildet, und entspricht somit dem aktuellen Stand der Technik.

Die Wöhlerlinie lässt sich klassischerweise in mehrere Bereiche einteilen. Die Definition der Übergangslastspielzahlen zwischen den einzelnen Abschnitten ist stark abhängig von der betrachteten Komponente, vom betrachteten Schadensmechanismus und vom verwendeten Werkstoff. Haibach [103] definiert die Bereiche der Wöhlerlinie gemäß **Bild 2.4** folgendermaßen:

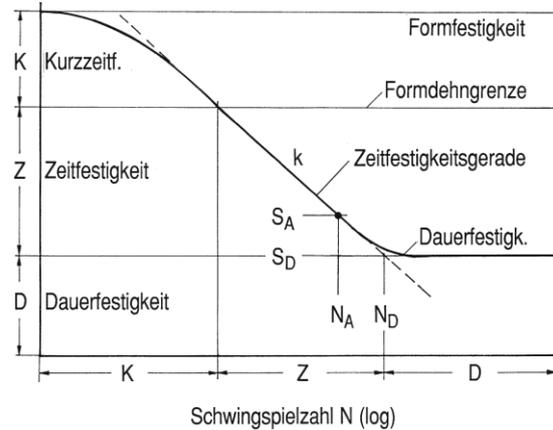


Bild 2.4: Bereiche der Wöhlerlinie nach Haibach [103]

- **Formfestigkeit bzw. statische Festigkeit:** Belastungen oberhalb der statischen Festigkeit führen theoretisch bereits nach einem Lastspiel zum Ausfall.
- **Kurzzeitfestigkeit:** Die Kurzzeitfestigkeit ist charakterisiert durch den Übergang von der statischen Festigkeit zur Zeitfestigkeit. Eine Annäherung durch eine Gerade ist oftmals nicht möglich.
- **Zeitfestigkeit:** Belastungen im Zeitfestigkeitsgebiet führen nach einer gewissen Anzahl von Lastspielen zum Ausfall
- **Dauerfestigkeit:** Einstufige Belastungen unterhalb der Dauerfestigkeit können auf Dauer ertragen werden.

Allgemein gesprochen, beschreibt die Wöhlerlinie die Belastbarkeit, also die ertragbare Lastspielzahl bis zum Schadenseintritt, bei zyklischer Belastung mit konstantem Lasthorizont. Eine typische Wöhlerlinie für Stahlwerkstoffe wird charakterisiert durch den Wert der statischen Festigkeit σ_{stat} und der Dauerfestigkeit σ_D sowie durch die Wöhlerliniensteigung k im Zeitfestigkeitsgebiet und die Knicklastspielzahl N_D , welche den Übergangspunkt zum Dauerfestigkeitsgebiet beschreibt. **Bild 2.5** zeigt schematisch eine auf eine innere Bauteilspannung bezogene Wöhlerlinie. Wöhlerlinien können sowohl auf Beanspruchungen (z.B. Spannungen) als auch auf Belastungen (z.B. Drehmomente) bezogen dargestellt werden.

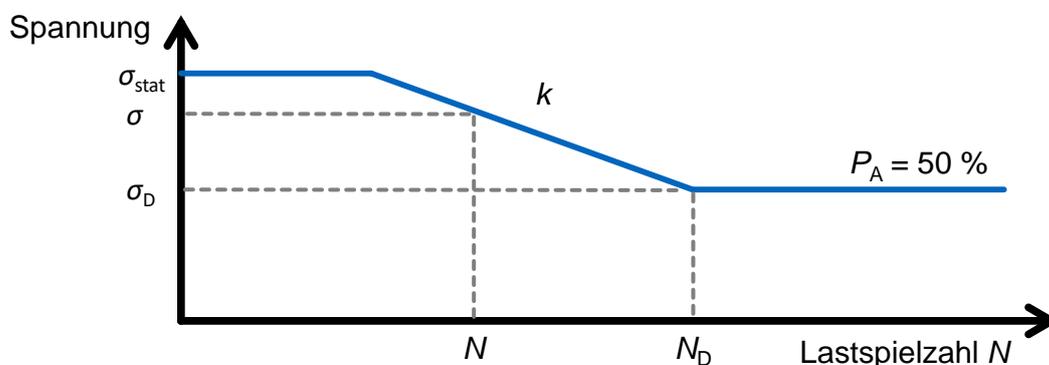


Bild 2.5: Wöhlerlinie und Kenngrößen (auf Spannung bezogen)

Da die Wöhlerlinie durch die statistische Auswertung von Versuchsdaten gewonnen wird, besitzt diese auch nur für eine bestimmte Ausfallwahrscheinlichkeit P_A (typische Werte: 1 %, 10 %, 50 %) Gültigkeit. Sie ist jedoch mit geeigneten Methoden (siehe z.B. [127, 128, 135, 171, 226]) auch für andere Ausfallwahrscheinlichkeiten darstellbar. Mathematisch lässt sich der Zeitfestigkeitsast einer Wöhlerlinie, welche im doppeltlogarithmischen Maßstab als Gerade erscheint, folgendermaßen beschreiben (auf Spannungen bezogen):

$$N = N_D \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma_D} \right)^{-k} \quad (2.1)$$

N	-	Ertragbare Lastspielzahl bezogen auf σ	σ	N/mm ² Beliebige Spannung
N_b	-	Knicklastspielzahl	σ_D	N/mm ² Dauerfestigkeitswert
k	-	Wöhlerliniensteigung		

Um die Belastbarkeit bei zyklischer Belastung mit veränderlichen Lasthorizonten, also bei einer typischen Lastkollektivbelastung, bestimmen zu können, ist es erforderlich die Informationen aus Lastkollektiv und Wöhlerlinie durch eine geeignete Schadensakkumulationshypothese zu verbinden.

2.1.3 Überblick über gängige lineare Schadensakkumulationshypothesen

Bei Annahme von linearen Schadensakkumulationshypothesen geht man davon aus, dass jedes Lastspiel auf einem Lasthorizont gleich schädigend ist, egal ob es zu Beginn der Laufzeit oder gegen Ende auftritt. Die Grundlagen der hier verwendeten linearen Schadensakkumulation gehen auf Palmgren [187] und Miner [175] zurück. Die Theorie geht davon aus, dass jede Lastspielzahl n zu einer gewissen Schädigung d des Bauteils führt. Für ein Lastkollektiv mit mehreren Laststufen i lässt sich somit eine Gesamtschädigung D berechnen, welche die Summe der Einzelschädigungen für jede Laststufe d_i darstellt. Die Einzelschädigung d_i für eine Laststufe wird ausgedrückt als Verhältnis zwischen auftretender Lastspielzahl h_i (aus dem Lastkollektiv) und ertragbarer Lastspielzahl N_i aus der Festigkeitskennfunktion. Die Berechnung der Gesamtschadenssumme D lässt sich somit folgendermaßen beschreiben:

$$D = \sum_i d_i = \sum_i \frac{h_i}{N_i} \quad (2.2)$$

D	-	Gesamtschadenssumme	d_i	-	Einzelschädigung auf Laststufe i
N_i	-	Zulässige Lastspielzahl für Laststufe i	h_i	-	Auftretende Lastspiele auf Laststufe i
i	-	Beliebige Laststufe des Lastkollektivs			

Die Verknüpfung von Festigkeitskennfunktion und Lastkollektiv wird Schadensakkumulation genannt. Obige Gleichung gilt für alle hierin näher betrachteten Schadensakkumulationshypothesen (SAH). Unterschiede ergeben sich lediglich bei der Definition der Festigkeitskennfunktion, welche die zulässige Lastspielzahl N_i definiert. Im einfachsten Fall wird als Festigkeitskennfunktion die Wöhlerlinie bestehend aus statischer Festigkeit, Zeitfestigkeitsast und Dauerfestigkeit verwendet. Diese SAH wird Miner original genannt [224]. Da bekannt ist, dass Lasten oberhalb der Dauerfestigkeit ebendiese senken können [58, 218], kann ggf. der Zeitfestigkeitsast verlängert werden, um auch die Berücksichtigung von Lasten unterhalb der Dau-

erfestigkeit zu ermöglichen. Die SAH Miner elementar [224] wird beispielsweise für die Wälzlagerberechnung nach ISO 281 [33] verwendet. Bei Anwendung dieser wird von einem verlängerten Zeitfestigkeitsast mit gleichbleibender Steigung ausgegangen. Die SAH nach Miner-Haibach [103] findet häufig im Bereich der Zahnradgetriebe Anwendung und ist durch einen verlängerten Zeitfestigkeitsast mit einer reduzierten Steigung von $(2k-1)$ ab dem Niveau der Dauerfestigkeit gekennzeichnet. **Bild 2.6** zeigt eine grafische Darstellung der bisher genannten SAH in Relation zu einem gegebenen Beanspruchungskollektiv.

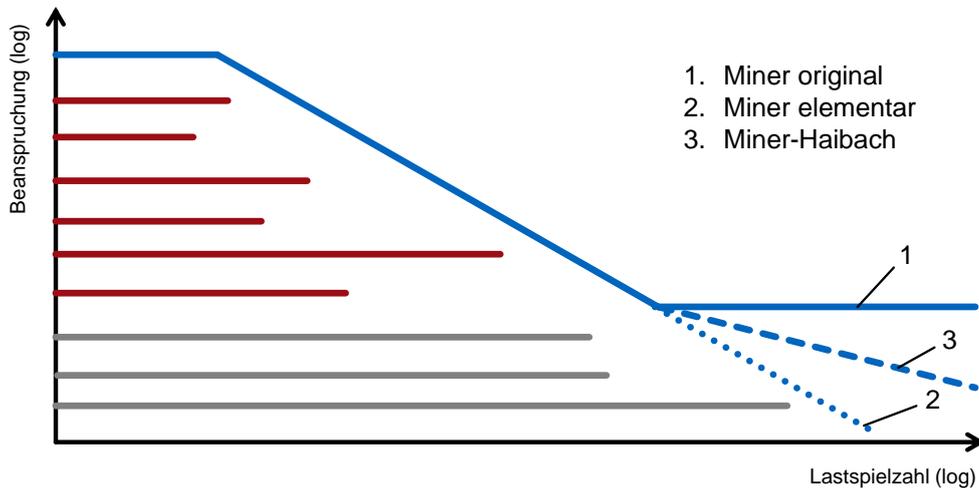


Bild 2.6: Übersicht über gängige Schadensakkumulationshypothesen

Neben den einfach linearen SAH, welche eine auf der Wöhlerlinie basierende Festigkeitskennfunktion verwenden, gibt es auch noch weitere lineare SAH, welche das konkrete Rissgeschehen betrachten. Typische Vertreter sind beispielsweise die SAH nach Liu-Zenner [252], Corten und Dolan [68, 242, 255] oder Singh [222, 223]. Da diese SAH zur Berechnung von Zahnradgetrieben bisher jedoch wenig Anwendung finden, wird im Folgenden nicht näher darauf eingegangen.

Der berechnete Wert der Gesamtschädigung ermöglicht eine Abschätzung der erreichbaren Lebensdauer. Eine Gesamtschädigung von $D = 1$ bedeutet jedoch noch nicht zwingend einen Schadenseintritt. Um einen Schaden für eine gegebene Ausfallwahrscheinlichkeit ausschließen zu können, muss sichergestellt werden, dass $D < D_{zul}$ gilt („relative“ Anwendung einer SAH). Die zulässige Gesamtschädigung wird in der Regel empirisch ermittelt und ist abhängig von der betrachteten Schadensart sowie vom betrachteten Werkstoff. Schadensspezifische Werte für D_{zul} und Informationen zu gängigen SAH für typische Zahnradschäden werden später genannt.

2.2 Statistische Methoden der Versuchsplanung und –auswertung

Neben der Lebensdauerberechnung im Getriebeauslegungsprozess spielen auch Versuchsreihen eine große Rolle zur Bestätigung der Betriebsfestigkeit von Maschinen- und insbesondere Getriebebauteilen. Im Idealfall wird eine ausreichend große Stückzahl von Serienbauteilen unter realer Belastung geprüft. Dieses Vorgehen ist jedoch in den seltensten Fällen ökonomisch sinnvoll durchführbar. Nachfolgend werden unterschiedliche Methoden der statistischen Versuchsauswertung vorgestellt und ihre Eignung für die Anwendung auf Problemstellungen der Antriebstechnik aufgezeigt. Insbesondere werden dabei solche Methoden untersucht, welche eine statistische Auswertung von verkürzten Lebensdauerprüfungen erlauben.

2.2.1 Grundlagen der Statistik

Einen Überblick über die Grundlagen der angewandten Statistik aus Ingenieurssicht bilden beispielsweise die Werke von Wilrich et al. [115], Weber [243] und Sachs [203]. Sie beschreiben die Grundlagen zu Häufigkeitsverteilungen, Verteilungsfunktionen, Vertrauensbereichen, Dichtefunktionen, Regressionsanalysen und weiteren statistischen Methoden. Bertsche [57] und Mauch [171] beschreiben die Anwendung der statistischen Grundlagen im Speziellen auf Elemente der Antriebstechnik. Dabei genügt es im Allgemeinen, die (logarithmische) Normalverteilung sowie die Weibullverteilung zu betrachten, da die überwiegende Mehrheit der Maschinenbauteile diesen Gesetzmäßigkeiten bezüglich ihres Ausfallverhaltens folgt.

Im Folgenden werden einige der grundlegenden Größen der Statistik sowie ihre Formelzeichen kurz erläutert [57]. Die nachfolgenden Abschnitte bauen unter anderem auf diesen Grundlagen auf und zeigen deren Anwendung auf Problemstellungen der Antriebstechnik.

- $R(t)$ Zuverlässigkeit / Überlebenswahrscheinlichkeit
Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein Bauteil zum Zeitpunkt t noch nicht ausgefallen ist;
- $F(t) = 1-R(t)$ Ausfallwahrscheinlichkeit
Wahrscheinlichkeit, dass ein Bauteil zum Zeitpunkt t bereits ausgefallen ist;
- $f(t)$ Dichtefunktion
Wahrscheinlichkeit, dass ein Bauteil zum Zeitpunkt t ausfällt;
- P_A Vertrauenswahrscheinlichkeit
Wahrscheinlichkeit, dass die Zuverlässigkeit $R(t)$ zum Zeitpunkt t einen bestimmten Wert erreicht;
- $\lambda(t)$ Ausfallrate
Wahrscheinlichkeit, dass ein intaktes Bauteil zum Zeitpunkt t ausfällt.

2.2.2 Zuverlässigkeitstestplanung

Bertsche [57] beschreibt umfassend Möglichkeiten der Zuverlässigkeitstestplanung, d.h. die Planung von Lebensdauertests unter statistischen Gesichtspunkten. Beispielsweise kann mit Hilfe dieser Methoden die erforderliche Prüflosgröße n oder die geforderte Prüfdauer t unter Vorgabe einer zu erreichenden (Mindest-)Zuverlässigkeit und der entsprechenden Vertrauenswahrscheinlichkeit bestimmt werden. Dabei werden nicht nur vollständige Tests (jedes Bauteil der Stichprobe wird einem vollständigen Lebensdauertest unterzogen) betrachtet, sondern auch zensierte Testreihen bei verkürzten Prüfzeiten. Die Prüfzeitverkürzung wird mit Hilfe des Lebensdauerverhältnisses L_V folgendermaßen ausgedrückt:

$$L_V = \frac{\text{Prüfdauer}}{\text{geforderte Lebensdauer}} = \frac{t_p}{t} \quad (2.3)$$

L_V	-	Lebensdauerverhältnis	t_p	-	Prüfdauer
t	-	Geforderte Lebensdauer			

Für weibullverteilte Ausfallzeiten ergibt sich nach Bertsche [57] folgender Zusammenhang zwischen Mindestzuverlässigkeit $R(t)$, Vertrauenswahrscheinlichkeit P_A , Lebensdauerverhältnis L_V , Weibullparameter b und Stichprobenumfang n .

$$R(t) = (1 - P_A)^{\frac{1}{(L_V)^b \cdot n}} \quad (2.4)$$

$R(t)$ -	Mindestzuverlässigkeit zur Zeit t	P_A -	Vertrauenswahrscheinlichkeit
L_V -	Lebensdauer Verhältnis	b -	Weibullparameter
n -	Stichprobenumfang		

Wird die Prüfzeit t_P verkürzt, so wird bei konstanter Mindestzuverlässigkeit und Vertrauenswahrscheinlichkeit ein größerer Stichprobenumfang benötigt.

Eine konkrete Anwendung dieser fundamentalen Zusammenhänge auf Lebensdauertests an Zahnrädern und Wälzlagern unter Lastkollektivbeanspruchung wurde bisher nicht durchgeführt. Diese Methoden bieten jedoch hohes Potential zur statistischen Bewertung von verkürzten Lebensdauerprüfungen.

2.2.3 Methoden zur Berücksichtigung von Vorwissen

Die Möglichkeit zur Berücksichtigung von Erfahrungswissen aus früheren Versuchen oder ähnlichen Produkten im Serieneinsatz spielt bei der statistischen Auswertung von Lebensdauertests eine entscheidende Rolle. Ein Überblick über Methoden zur Berücksichtigung von Vorwissen findet sich beispielsweise bei Bertsche [57, 167], Krolo [152] oder Hitziger [121]. Grundlage all dieser Verfahren ist der Satz von Bayes [53] (dargestellt in **Bild 2.7**). Damit kann eine a-posteriori-Verteilungsdichte basierend auf einer a-priori-Verteilungsdichte (Vorkenntnisse aus früheren Versuchen oder ähnlichen Produkten im Serieneinsatz) und der statistischen Auswertung aktueller Versuche gewonnen werden.

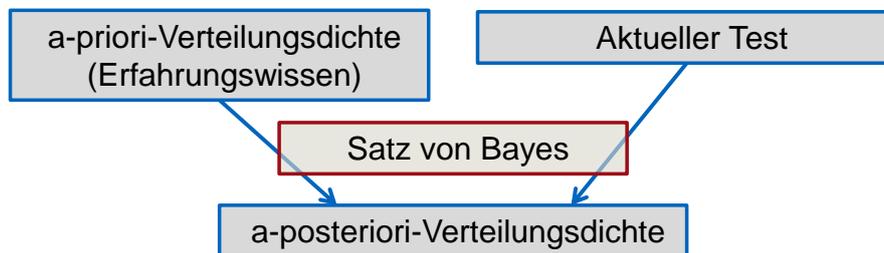


Bild 2.7: Satz von Bayes

Kleyner et al. [147] beschreiben ein Verfahren zur Berücksichtigung von Vorwissen basierend auf dem Satz von Bayes. Die a-priori und a-posteriori-Verteilungsdichten werden dabei durch Beta-Verteilungen angenähert. Mit Hilfe eines „knowledge factor“ wird die Ähnlichkeit des neuen Produktes zum Bauteil mit bekanntem Ausfallverhalten beschrieben. Ist der „knowledge factor“ eins, so zeigt das neue Produkt dasselbe Ausfallverhalten wie das Bekannte. Auf zusätzliche Versuche könnte in diesem Fall verzichtet werden.

Einen ähnlichen Ansatz zur Berücksichtigung von Vorwissen bei der Zuverlässigkeitstestplanung stellt Krolo [152] vor. Frühere Erkenntnisse werden dabei mit einem Transformationsfaktor „gewichtet“, um deren Relevanz für die aktuelle Problemstellung anzugeben. Problematisch ist dabei eine zuverlässige Ermittlung des Transformationsfaktors. Hitziger [121] stellt dazu verschiedene qualitative und quantitative Methoden vor.

2.3 Schadensarten an Zahnrädern – Definition, Tragfähigkeitsberechnung und statistisches Ausfallverhalten

Nachfolgend werden zunächst die wichtigsten Schadensarten an Zahnrädern gezeigt sowie die Grundlagen der jeweiligen Tragfähigkeitsberechnung und das statistische Ausfallverhalten erläutert. Letzteres ist vor allem im Hinblick auf die Bestimmung von Zuverlässigkeitskennwerten von Bedeutung.

Nach Niemann/Winter [182] können folgende Schadensarten bei Überbeanspruchung an Zahnrädern auftreten:

- Grübchen;
- Zahnfußbruch;
- Grauflecken;
- Verschleiß;
- Fressen.

FZG/Witzig [251] beschreibt darüber hinaus die Schadensart Flankenbruch, welche vorrangig bei oberflächengehärteten Zahnrädern auftritt und durch eine Rissentstehung unterhalb der Zahnflanke in größeren Werkstofftiefen charakterisiert ist. Speziell an Schrägverzahnungen kann darüber hinaus nach Matt [168] auch die Schadensart Zahnstirnkantenbruch auftreten. Diese ist durch eine oberflächennahe Rissentstehung im Bereich der hinterschnittenen Zahnstirnfläche nahe der aktiven Zahnflanke charakterisiert.

Die Schadensarten lassen sich generell nach Art Ihrer Entstehung einteilen. Grübchen, Zahnfußbruch, Zahnflankenbruch und Zahnstirnkantenbruch sind typische Ermüdungsschäden mit ausgeprägtem Rissgeschehen (Rissentstehung – Risswachstum – (Rest-)Gewaltbruch), welche typischerweise erst nach einer bestimmten Anzahl von Lastspielzahlen auftreten. Fressen ist ein Spontanschaden, welcher bereits nach einem Lastspiel bei kritischen Betriebsbedingungen auftreten kann. Die Entstehungsmechanismen für Graufleckigkeit ähneln denen von Grübchen. Trotzdem wird auch dieser Mechanismus ähnlich wie die Schadensart Verschleiß als kontinuierlich fortschreitender Mechanismus betrachtet und nicht als klassischer Ermüdungsschaden, da die messbaren Ausprägungen auf der Zahnflanke in Form einer Profilformabweichung kontinuierlich wachsen.

Da ausschließlich Ermüdungsschäden einer Betriebsfestigkeitsrechnung zugänglich sind, wird der Fokus der nachfolgenden Beschreibungen auf diese gelegt. Die genannten Schadensmechanismen, deren übliche Berechnungsmethoden zur Ermittlung der Tragfähigkeit, deren statistisches Ausfallverhalten sowie die Möglichkeiten zur Betriebsfestigkeitsrechnung werden nach Stand des Wissens – ohne Anspruch auf Vollständigkeit – beschrieben.

2.3.1 Grübchen

Schadensmechanismus und Einflussgrößen

Nach FZG/Rettig [198] sind Grübchen Materialausbrüche aus der Zahnflanke und treten als Ermüdungsschaden im oberflächennahen Bereich auf [59, 60]. Es wird angenommen, dass diese vorrangig im Bereich negativen spezifischen Gleitens an der Fußflanke entstehen [182]. Zunächst bilden sich Anrisse an der Oberfläche aus, welche in den Werkstoff hineinwachsen und Zungen erzeugen. Diese brechen aufgrund der spezifischen Gleitverhältnisse aus und zeigen das typische muschelförmige Schadensbild für



Grübchen, wie in **Bild 2.8** dargestellt. Voraussetzung dafür ist ein fortgeschrittenes Risswachstum in den Werkstoff hinein (siehe FZG/Käser [138] und FZG/Knauer [148]). Abhängig von Festigkeit und Spannung unterhalb der Oberfläche können Risse in seltenen Fällen auch im Inneren des Werkstoffs entstehen [158]. Neben der äußeren Belastung wird die Grübchenbildung maßgeblich von der Oberflächentopologie, der Reibungszahl sowie dem Schmier- und Werkstoff beeinflusst [148]. FZG/Tobie [233] beschreibt des Weiteren die wirtschaftliche und technologische Bedeutung der Einsatzhärtung auf die Grübchentragfähigkeit sowie deren Abhängigkeit von der optimalen Einsatzhärtungstiefe. Wie beispielsweise die Versuche von FZG/Haslinger [105] zeigen, treten Grübchen bei einsatzgehärteten Verzahnungen üblicherweise nur an einzelnen Zähnen auf, bei vergüteten Verzahnungen hingegen verteilt über alle Zähne.

Bild 2.8: Typischer Grübchenschaden an einer Schrägverzahnung

Eine linear oder progressiv fortschreitende Grübchenbildung ist in der Regel nicht zulässig und kann zu Zahnbrüchen aufgrund einer Zunahme der dynamischen Zahnzusatzkräfte [92] führen. Einlaufgrübchen oder eine degressive Grübchenbildung können bei Industriegetrieben akzeptabel sein, wenn diese zu einer besseren Pressungsverteilung führen (vor allem bei Vergütungsstählen), sind jedoch bei hohen Anforderungen an die Ausfallsicherheit (Luft- und Raumfahrt) zu vermeiden [182].

Berechnungsmethoden

Die Tragfähigkeitsberechnung bezüglich Grübchen ist basierend auf umfangreichen Versuchen und Forschungsprojekten in DIN 3990-2 [15] sowie ISO 6336-2 [35] genormt. Die Berechnung nach ISO 6336-2 [35] berücksichtigt im Gegensatz zur Berechnung nach DIN 3990-2 [15] auch neuere Erkenntnisse, z.B. bezüglich des Einflusses des Schrägungswinkels β auf die Grübchentragfähigkeit, und ist daher vorzuziehen. Maßgebende Berechnungsgröße ist dabei immer die Hertzsche Pressung im Wälzkontakt p_c . Es wird eine belastungs- bzw. drehmomentabhängige auftretende Flankenpressung σ_H ermittelt, welche geometrische Einflüsse, Verformungen und dynamische Effekte berücksichtigt. Diese wird mit der zulässigen werkstoff- und schmierstoffabhängigen Grübchen-Grenzfestigkeit σ_{HG} zur Ermittlung der Sicherheit gegen Grübchenschäden S_H verglichen. Schadenskriterium bei einsatzgehärteten Werkstoffen für die Bestimmung der Grenzfestigkeit nach ISO 6336-5 [37] ist eine Grübchenfläche von 4% im Bereich einer aktiven Zahnflanke.

$$S_H = \frac{\sigma_{HG}}{\sigma_H} \quad (2.5)$$

S_H	-	Sicherheit gegen Grübchenschäden	σ_{HG}	N/mm ²	Grübchen-Grenzfestigkeit
σ_H	N/mm ²	Auftretende Flankenpressung			

Des Weiteren ist die Berechnung der Grübchentragfähigkeit auch entsprechend der amerikanischen Norm AGMA 2001-D04 [4] oder z.B. gemäß dem erweiterten Berechnungsverfahren nach FZG/Stahl [225] möglich, welches eine dreidimensionale Pressungsverteilung über der Zahnflanke berücksichtigt und daraus eine schadensäquivalente Pressung ableitet.

Statistisches Ausfallverhalten

Das statistische Ausfallverhalten bezüglich der Schadensarten Zahnfußbruch und Grübchen wurde ausführlich von FZG/Stahl im Vorhaben IGF 11154 / FVA 304 [226] untersucht. Dabei wurde eine große Zahl von Tragfähigkeitsversuchen an einsatzgehärteten Zahnrädern ausgewertet, um allgemeingültige Werte zu Verteilungsfunktionen und Streuungsparametern zu erhalten.

Bezüglich der Schadensart Grübchen an einsatzgehärteten Stirnrädern lässt sich gemäß [226] das Ausfallverhalten bezogen auf die Lastspielzahlen, also im Bereich der Zeitfestigkeit, selbst bei sehr geringen Ausfallwahrscheinlichkeiten gut mit einer zweiparametrischen Weibullverteilung beschreiben. Der Formparameter wird zu $b = 3,2$ ermittelt, die charakteristische Lebensdauer T in Abhängigkeit vom arithmetischen Mittelwert der Lastspielzahlen $N_{50\%}$ zu $T = 1,1 \cdot N_{50\%}$. Zur Beschreibung der Verteilung der Dauerfestigkeitswerte eignet sich nach FZG/Stahl [226] die Gaußsche Normalverteilung mit einer Standardabweichung von $s = 3,5\%$ bezogen auf normierte Festigkeitswerte.

Bertsche [57] gibt für die Verteilung der Ausfalllastspielzahlen im Zeitfestigkeitsgebiet bei Grübchenschäden die Eignung einer dreiparametrischen Weibullverteilung mit einem Formparameter von $b = 1,1 \dots 1,5$ an. Richtwerte für die ausfallfreie Zeit t_0 nennt er nicht. Die ermittelten Formparameter b basieren auf der Auswertung einer beschränkten Anzahl an Versuchen (Bertsche [57] nennt einen Versuchsumfang von $n = 5 \dots 20$). Da diese Werte nie in experimentellen Untersuchungen an der FZG bestätigt werden konnten, werden im Folgenden die von FZG/Stahl [226] ermittelten Werte und Verteilungsfunktionen verwendet.

2.3.2 Zahnfußbruch

Schadensmechanismus und Einflussgrößen

Maßgebend für den Schadensmechanismus Zahnfußbruch ist die mechanische Biegebeanspruchung eines Zahnes resultierend aus hohen Umfangskräften mit entsprechend großem Hebelarm. Diese werden durch äußere Belastung des Getriebes in Form des zu übertragenden Drehmomentes sowie etwaiger lokaler Effekte (Dynamik/ungleichmäßiges Breiten tragen) erzeugt. Dementsprechend unterscheidet man nach Niemann/Winter [182] zwischen Gewaltbruch und Ermüdungsbruch. Ein Gewaltbruch

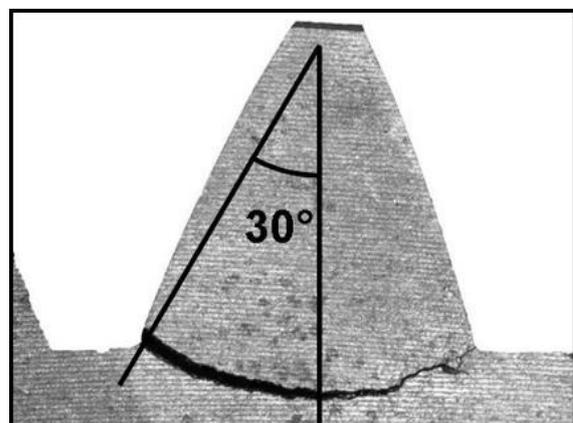


Bild 2.9: Typischer Zahnfußbruchschaden [182]

wird durch extreme Überlasten wie beispielsweise Blockierungen verursacht; ein Dauer- beziehungsweise Ermüdungsbruch aufgrund der wiederkehrenden Belastung des Zahnes bei jedem Lastspiel im Zeitfestigkeitsgebiet. Durch geeignete Konstruktion lassen sich Gewaltbrüche zuverlässig vermeiden. Dies ermöglicht die Berechnung einer Sicherheit gegen Zahnfußbruch und die Angabe einer Wöhlerlinie mit statischer Festigkeit, Zeit- und Dauerfestigkeit. Ein Zahnfußbruch ist in jedem Fall zu vermeiden, da dieser fast ausnahmslos zum Totalausfall des Getriebes führt.

Nach Niemann/Winter [182] geht für außenverzahnte Stirnräder ein Dauerbruch im Allgemeinen von der Berührung mit der 30° Tangente an der Zugseite des Zahnes aus (siehe **Bild 2.9**). Diese Zugspannung wird als maßgebende Berechnungsgröße hinsichtlich der Zahnfußtragfähigkeit betrachtet. Durch große Moduln, positive Profilverschiebungen, große Fußausrundungsradien [182] sowie vorgeschmiedete oder sogar fertig geschmiedete Rohlinge [194] lässt sich beispielsweise die Zahnfußtragfähigkeit steigern.

FZG/Döbereiner [74] untersucht die Tragfähigkeit von Hochverzahnungen ($\varepsilon_\alpha \geq 2$) hinsichtlich Zahnfußbruch und bestätigt diesen eine höhere Zahnfußtragfähigkeit als Normalverzahnungen. Optimale Einsatzhärtungstiefen zur Steigerung der Zahnfußtragfähigkeit liegen nach FZG/Tobie [233] im Bereich von $Eht = 0,1 \cdot m_n \dots 0,2 \cdot m_n$.

Berechnungsmethoden

Die Ermittlung der Zahnfußtragfähigkeit ist in DIN 3990–3 [16] sowie ISO 6336–3 [36] genormt und wird üblicherweise zur Auslegung hinsichtlich Zahnfußbruchschäden verwendet. Analog zur Berechnung der Grübchentrugfähigkeit ist auch hier das ISO-Vorgehensmodell vorzuziehen, da dieses in einer aktuelleren Fassung vorliegt und gut mit FEM Berechnungen übereinstimmt [139].

Die maßgebliche Berechnungsgröße zur Zahnfußtragfähigkeit ist die maximale Zugspannung im Zahnfuß. Diese maximale Zahnfußspannung σ_F wird ausgehend von der übertragenen Umfangskraft F_t und dem zu Grunde liegenden Biegehebelarm ermittelt. Der Kraftangriffspunkt wird beispielsweise in den äußeren Einzeleingriffspunkt oder an den Zahnkopf gelegt. Dies ist abhängig von der innerhalb des Berechnungsverfahrens gewählten Methode (A bis C mit absteigendem Detaillierungsgrad).

Als Bewertungskriterium für die Zahnfußbeanspruchung wird ein rechnerischer Sicherheitsfaktor S_F ermittelt. Die dazu erforderliche Zahnfuß-Grenzfestigkeit σ_{FG} wird unter Berücksichtigung des Werkstoffs, der Wärmebehandlung, der Abmessungen, der Kerbempfindlichkeit und weiteren Einflussfaktoren berechnet. Der Quotient aus Zahnfuß-Grenzfestigkeit σ_{FG} und maximaler auftretender Zahnfußspannung σ_F ergibt den rechnerischen Sicherheitsfaktor S_F . Dieser sollte ausreichend hoch gewählt werden, um einen Zahnfußbruch und somit einen resultierenden Ausfall des Getriebes in jedem Fall ausschließen zu können.

$$S_F = \frac{\sigma_{FG}}{\sigma_F} \quad (2.6)$$

S_F	Sicherheit gegen Zahnfußbruch	σ_{FG}	N/mm ² Zahnfuß-Grenzfestigkeit
σ_F	N/mm ² Auftretende Zahnfußspannung		

Neben den Berechnungsvorschriften nach DIN und ISO zur Zahnfußtragfähigkeit ist ein dazu ähnliches Verfahren in der amerikanischen Norm AGMA 2001-D04 [4] enthalten. Schinagl

zeigt darüber hinaus ein höherwertiges Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Zahnfußtragfähigkeit im Forschungsvorhaben IGF 11965N / FVA 257 II [209], welches die tatsächlichen Eingriffsverhältnisse sowie die Aufteilung der Gesamtkraft auf die im Eingriff befindlichen Zähne berücksichtigt. Dieses Modell liefert gerade für Hochverzahnungen und große Schrägungswinkel sehr gute Berechnungsergebnisse. Wie auch das höherwertige Verfahren zur Berechnung der Grübchentrugfähigkeit nach FZG/Stahl [225], ist dieses Verfahren im Rechenprogramm RIKOR [181] implementiert.

Statistisches Ausfallverhalten

Das statistische Ausfallverhalten bezüglich der Schadensarten Zahnfußbruch und Grübchen wurde ausführlich im Vorhaben IGF 11154 / FVA 304 [226] untersucht. Dabei wurde eine große Zahl von Tragfähigkeitsversuchen an einsatzgehärteten Zahnrädern ausgewertet, um allgemeingültige Werte zu Verteilungsfunktionen und Streuungsparametern zu erhalten.

Die Auswertung von zahlreichen Pulsatorversuchen zur Zahnfußtragfähigkeit ergab dabei als Verteilungsfunktion der Dauerfestigkeiten analog zu Grübchenschäden eine Gaußsche Normalverteilung. Die Standardabweichung ist abhängig von Werkstoff, Einsatzhärtungstiefe, Modul und der Strahlbehandlung im Zahnfuß. Für gestrahlte Zahnräder ergeben sich Werte von $s = 3,3\% \dots 3,4\%$, für ungestrahlte Zahnräder $s = 6,0\% \dots 6,2\%$. Im Zeitfestigkeitsbereich zeigt sich, dass die Lastspielzahlen einer logarithmischen Normalverteilung folgen. Die Standardabweichung ist lastabhängig und wird in [226] in Abhängigkeit vom Lebensdauerfaktor Y_{NT} angegeben. Die Werte liegen im Bereich von $s_{log} = 0,05 \dots 0,13$.

Bertsche [57] nennt für die Verteilung der Ausfalllastspielzahlen im Zeitfestigkeitsgebiet für Zahnfußbruchschäden die Eignung einer dreiparametrischen Weibullverteilung mit einem Formparameter von $b = 1,2 \dots 2,2$. Richtwerte für die ausfallfreie Zeit t_0 nennt er nicht. Die ermittelten Formparameter b basieren jedoch wie auch die Werte für Grübchenschäden nach Bertsche auf der Auswertung von einer beschränkten Anzahl an Versuchen (Bertsche [57] nennt einen Versuchsumfang von $n = 5 \dots 20$). Da diese Werte nie in experimentellen Untersuchungen an der FZG bestätigt werden konnten, werden im Folgenden auch für die Schadensart Zahnfußbruch die von FZG/Stahl [226] ermittelten Werte und Verteilungsfunktionen verwendet.

2.3.3 Zahnflankenbruch

Schadensmechanismus und Einflussgrößen

Zahnflankenbruch (siehe **Bild 2.10**) ist ein insbesondere bei größerer Baugröße auftretender Ermüdungsschaden an oberflächengehärteten Zahnrädern mit Rissausgang in größeren Werkstofftiefen unterhalb der aktiven Zahnflanke. Die Bruchfläche zeigt meist für Schwingbrüche typische Rastlinien. Der Ort des Rissausgangs liegt oft an einer Fehlstelle oder einem nichtmetallischen Einschluss im kritischen Übergangsbereich zwischen Randschicht und Kern. Der Primärriss wächst in der Regel in einem Winkel von

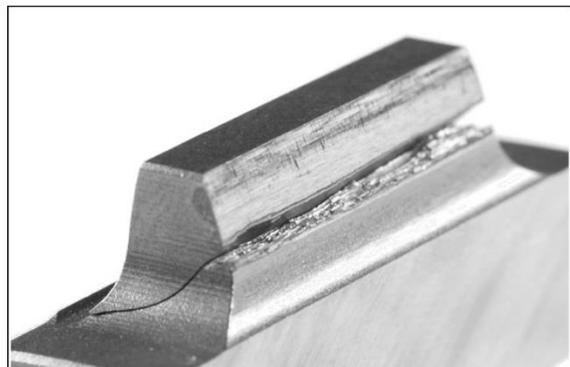


Bild 2.10: Flankenbruch [250]

ca. $40^\circ - 50^\circ$ sowohl in Richtung Zahnflanke als auch in Richtung des Kerns. Die Entstehung von Sekundär- oder gar Tertiärrissen ist möglich. Der Schaden ist sowohl von einsatzgehärteten als auch nitrierten Verzahnungen bekannt und kann an Stirnrädern sowie Kegelrädern

auftreten [49, 251]. Schäden können bereits bei geringen Lastspielzahlen auftreten und führen im Regelfall zum kompletten Ausfall des Getriebes. Die Schäden treten plötzlich auf, ohne frühzeitig erkennbare Schadensmerkmale an der Flankenoberfläche (z.B. Grübchen oder Graufleckigkeit). Flankenbrüche können auch bei ausreichender Zahnfuß- und Grübchensicherheit entsprechend der Berechnung nach DIN 3990 [15, 16] und ISO 6336 [35, 36] auftreten.

Bauer [49, 50, 51, 52] beschreibt erstmals 1995 systematisch dokumentierte Flankenbruchschäden. Auch in einigen früheren Forschungsvorhaben wurde ein systematisches, unerwartetes Auftreten von Flankenbrüchen an Prüfrädern mit ungünstiger Wärmebehandlung beobachtet (FZG/Thomas [232] und FZG/Tobie [233]). MackAldener [163, 164, 165] beschreibt umfassend die Schadensart Tooth Interior Fatigue Fracture (TIFF), welche bezüglich des Schadensgeschehens sehr eng mit Flankenbruch verwandt ist, jedoch vornehmlich an wechselseitig belasteten Zahnrädern, wie etwa Planetenrädern, auftritt. Erste systematische experimentelle Untersuchungen der Schadensart Zahnflankenbruch sind von FZG/Annast [46], FZG/Bruckmeier [62] und FZG/Witzig [250] dokumentiert.

Berechnungsmethoden

Erste Berechnungsmethoden hinsichtlich Zahnflankenbruch wurden bereits früh von FZG/Oster [186] basierend auf der Schubspannungsintensitätshypothese (SIH) und den Arbeiten von Novoshilov [221, 253], Simbürger [221] und Zenner [253] entwickelt. Diese Modellvorstellung basiert auf der lokalen Gegenüberstellung von Beanspruchung und Beanspruchbarkeit für jedes Volumenelement im Werkstoff. Die Modellvorstellung von FZG/Oster [186] wurde von FZG/Hertter [116] weiterentwickelt und maßgeblich um eine werkstoff-physikalische Betrachtung der lokalen Beanspruchbarkeit ergänzt. Die Berechnungsmethodik nach FZG/Oster [186] und FZG/Hertter [116] wird auch FZG-Modell zum Zahnflankenbruch genannt und gehört zu den so genannten höherwertigen Berechnungsverfahren. Wie auch für die Berechnungsansätze von Weber [244, 245, 246], Ghribi/Octue [99, 100], Al [43, 44, 45] und Meis [172] sind für das FZG-Modell zum Zahnflankenbruch vielfältige Eingabegrößen zur Abschätzung einer Flankenbruchgefährdung notwendig.

FZG/Witzig [250, 251] hat ausgehend vom höherwertigen FZG-Modell einen praxisorientierten, vereinfachten Ansatz zur Abschätzung einer Flankenbruchgefährdung für einsatzgehärtete Stirnräder abgeleitet, welcher beispielsweise in [109, 113] näher beschrieben und auch im Rahmen dieser Arbeit verwendet wird. Maßgebende Berechnungsgröße ist die maximale Werkstoffanstrengung $A_{FF,max}$ auf der Zahnflanke, welche durch zulässige und effektive Schubspannung für ein betrachtetes Volumenelement definiert wird:

$$A_{FF} = \frac{\tau_{per}}{\tau_{eff}} \quad (2.7)$$

A_{FF}	-	Werkstoffanstrengung	τ_{per}	N/mm ²	Werkstofffestigkeit
τ_{eff}	N/mm ²	Effektive Schubspannung			

Im Rahmen aktueller Normarbeit innerhalb des ISO-Gremiums TC60/SC2/WG6 existieren Bestrebungen, den praxisnahen Berechnungsansatz nach FZG/Witzig [250] in eine ISO Technical Specification ISO/TS 6336-4 [39] zu überführen.

Statistisches Ausfallverhalten und Betriebsfestigkeitsrechnung

FZG/Witzig [251] zeigt, dass es sich bei der Schadensart Flankenbruch um einen Ermüdungsschaden von Werkstoffbereichen deutlich unterhalb der Flankenoberfläche mit Wöhlerverhalten handelt. Die Anstrengungsgrenze 0,8 gilt dabei für den Dauerfestigkeitsbereich; liegt die berechnete Werkstoffanstrengung unter 0,8, so treten kaum Flankenbrüche auf. Für größere Werkstoffanstrengungen wurden geringere ertragbare Lastspielzahlen nachgewiesen. Die Steigung des Zeitfestigkeitsastes sollte nach FZG/Witzig [251] noch in weiteren Untersuchungen verifiziert werden. Aussagen zur Ausfallwahrscheinlichkeit lassen sich auf Grund der vergleichsweise geringen Anzahl an Versuchsergebnissen nicht machen.

Konkrete Untersuchungen zur Schadensart Flankenbruch unter Lastkollektivbeanspruchung wurden bisher nicht durchgeführt, dementsprechend sind auch keine Empfehlungen zur Anwendung einer Schadensakkumulationshypothese bekannt. Unter Kenntnis von Wöhlerlinien ist jedoch die Anwendung der SAH Miner-elementar denkbar. Hierdurch wird eine konservative Berechnung sichergestellt.

Da die Anzahl systematischer experimenteller Untersuchungen zur Schadensart Flankenbruch bisher sehr gering ist, konnten noch keine Aussagen zum statistischen Ausfallverhalten getroffen werden.

2.3.4 Graufleckigkeit

Schadensmechanismus und Einflussgrößen

Graufleckigkeit ist nach Niemann/Winter [182] und Linke [158] ein schmierstoffbedingter Ermüdungsschaden, welcher an oberflächengehärteten Zahnrädern bereits bei geringen Belastungen im Bereich negativen spezifischen Gleitens unterhalb des Wälzkreises auftreten kann. Viele eng beieinander liegende kleine Ausbrüche auf der Zahnflanke führen zu einem grauen Aussehen. Grauflecken können zu Profilformabweichungen der Zahnflanke führen und damit zu einem geänderten dynamischen Verhalten. Von den kleinen Poren können oft auch großflächige Ausbrüche in Form eines Grübchenschadens ausgehen [83].

FZG/Schönnerbeck [211, 212] nimmt an, dass die Oberfläche zunächst durch Verschleiß beim Einlauf der Zahnräder vorgeschädigt wird. Ausgehend von der geschädigten Oberfläche bilden sich unter ungünstigen Schmierbedingungen Anrisse aus, welche zu kleinen Ausbrüchen (Poren) mit geringer Tiefe führen. Haupteinflussfaktoren sind die Härte des Werkstoffes, die rechnerische Schmierfilmdicke, die Rauheit der Zahnflanke sowie der verwendete Schmierstoff und dessen Additivierung.

Berechnungsmethoden

FZG/Schönnerbeck [212] stellt einen Ansatz zur Abschätzung der Auskolkungstiefe aufgrund von Graufleckigkeit vor. Dieser basiert auf einer mehrparametrischen linearen Regression von Versuchsergebnissen aus durchgeführten Graufleckentests und einer energetischen Betrachtung des Abwälzvorgangs. Eine Berechnung ist nur notwendig, wenn eine geringe relative Schmierfilmdicke (bezogen auf die Flankenrauheit R_a) vorliegt. Ist die Schmierfilmdicke ausreichend groß, kann eine Gefährdung hinsichtlich Graufleckigkeit ausgeschlossen werden.

Des Weiteren beschreibt FZG/Schrade [213] einen Ansatz zur Berechnung der Profilformabweichungen durch Auskolkungen für graufleckengefährdete Getriebe. Damit kann die örtliche Auskolkungstiefe f_{im} für beliebige graufleckengefährdete Punkte auf der Zahnflanke berechnet

werden. Das Berechnungsverfahren nach FZG/Schrade [213] ist kompakt im FVA – Arbeitsblatt 259/2 [159] zusammengefasst.

Die Arbeiten von FZG/Emmert, FZG/Schönenbeck und FZG/Schrade [81, 212, 213] bilden die Basis für das Berechnungsverfahren zur Graufleckentragfähigkeit gemäß dem ISO Technical Report 15144-1 [41], welcher zukünftig als ISO/TS 6336-22 veröffentlicht wird. Das Berechnungsverfahren nach ISO/TR 15144-1 [41] berechnet eine Sicherheit gegen Graufleckigkeit durch Gegenüberstellung einer minimalen spezifischen Schmierfilmdicke im Eingriffsgebiet $\lambda_{GF,min}$ und einer zulässigen spezifischen Schmierfilmdicke λ_{GFP} .

$$S_{\lambda} = \frac{\lambda_{GF,min}}{\lambda_{GFP}} \quad (2.8)$$

S_{λ}	-	Sicherheit gegen Graufleckigkeit	$\lambda_{GF,min}$	-	Minimale spezifische Schmierfilmdicke im Eingriffsgebiet
λ_{GFP}	-	Zulässige spezifische Schmierfilmdicke			

Die zulässige spezifische Schmierfilmdicke λ_{GFP} kann beispielsweise mit Hilfe des Standard-FZG-Graufleckentests nach FVA 54/7 [82] ermittelt werden (siehe FZG/Sagraloff [204]). Lohmann [160, 161] zeigt darüber hinaus einen komplexen Ansatz zur Erfassung von Graufleckigkeit an Zahnrädern.

Weiterhin existieren noch höherwertige Verfahren zur Berechnung und Vorhersage von Graufleckigkeit beispielsweise nach Weibring [247] oder Li [155, 156, 157]. Diese benötigen in der Regel jedoch eine sehr große Anzahl an Eingabeparametern und sind daher nur bedingt für die Auslegungsrechnung geeignet.

Statistisches Ausfallverhalten und Betriebsfestigkeitsrechnung

Gibt man eine zulässige Auskolkungstiefe $f_{m,zul}$ an, beispielsweise basierend auf der maximal zulässigen Profilformabweichung der Zahnflanke im Hinblick auf die geforderte Genauigkeitsklasse (siehe FZG/Schrade [213]), so ist die Angabe einer Wöhlerlinie möglich. Die Dauerfestigkeit kann dabei beispielsweise mit dem Kriterium $S_{\lambda} = 1,0$ festgelegt werden, wenn von einer SAH entsprechend Miner-original ausgegangen wird. Untersuchungen von FZG/Ziegler [256] zeigen jedoch, dass die SAH nach Miner-elementar ohne Berücksichtigung einer Dauerfestigkeit zutreffender ist und damit auf der sicheren Seite gerechnet wird.

Alternativ zur Schadensakkumulation mit Hilfe von Teilschädigungen d_i können auch vereinfachend die Auskolkungstiefen $f_{m,i}$ auf den jeweiligen Lastniveaus addiert werden [256]. Ein Schaden tritt dann nicht bei Erreichen der zulässigen Schadenssumme D ein, sondern bei Erreichen der zulässigen Auskolkungstiefe $f_{m,zul}$.

Eine statistische Auswertung des Ausfallverhaltens bezüglich Graufleckigkeit ist bisher nicht erfolgt. Jedoch ist eine Berücksichtigung dieser Schadensart bei verkürzten Lebensdauerprüfungen dennoch möglich, da die Auskolkungstiefe kontinuierlich fortschreitet. Es sind folglich auch bei geringeren Laufzeiten bereits Auskolkungen messbar.

2.3.5 Langsamlauf-Verschleiß

Verschleiß tritt nach [182] vorrangig bei geringen EHD-Spaltdicken, d.h. bei geringen Umfangsgeschwindigkeiten, auf und zeigt sich anfangs durch Materialabtrag in den Flankenbe-

reichen mit hohen Gleitanteilen unter- und oberhalb des Wälzkreises. Die entstehenden Auskolkungen nehmen mit steigender Laufzeit kontinuierlich zu und können im weiteren Verlauf auch zu einem Materialabtrag im Bereich des Wälzpunktes führen. Ähnlich wie bei Graufleckigkeit ist auch bei Verschleißschäden nach FZG/Plewe [189] eine deutliche Abhängigkeit vom verwendeten Schmierstoff, den gepaarten Werkstoffen sowie der Oberflächenhärte erkennbar. Zur Charakterisierung von Verschleißschäden existieren nach [182] unterschiedliche Grenzkriterien. Zum einen kann die maximal zulässige Profilformabweichung aufgrund der Auskolkungstiefe herangezogen werden oder etwa die erforderliche Resthärteschicht.

Da Verschleiß ein kontinuierlich fortschreitender Schadensmechanismus ist, wird dieser nicht zu den klassischen Ermüdungsschäden gezählt. Verschleiß ist darüber hinaus auch keiner klassischen Betriebsfestigkeitsrechnung für Ermüdungsschäden zugänglich, wenngleich jedoch in der praktischen Anwendung eine Abschätzung der verbleibenden Laufzeit bis zum Erreichen eines Schadenskriteriums durch Extrapolation der Auskolkungstiefe möglich ist.

2.3.6 Fressen

Fressen ist ein typischer Spontanschaden an Zahnrädern, welcher bei kritischen Betriebsbedingungen eintritt. Dabei kommt es zum kurzzeitigen Verschweißen der Zahnflankenoberflächen beider Partner vor allem in Flankenbereichen mit hohen Gleitgeschwindigkeiten. Durch das anschließende Lösen dieser Verbindungen kommt es zum Materialübertrag von einem Partner auf den anderen und folglich zu den typischen Fressriefen auf der Zahnflanke. Fressen tritt in der Regel bereits kurz nach Überschreiten der kritischen Betriebsbedingungen ein und ist daher keiner Betriebsfestigkeitsrechnung zugänglich. Im Auslegungsprozess sollte eine ausreichende Fresstragfähigkeit für die kritischste Kombination aus Drehmoment, Drehzahl und Öltemperatur gemäß einer Berechnung nach ISO/TS 6336-20 [1] oder ISO/TS 6336-21 [2] vorgehalten werden.

2.3.7 Statistisches Ausfallverhalten bei Lastkollektivbeanspruchung

Das gezeigte statistische Ausfallverhalten der Schadensarten Grübchen und Zahnfußbruch findet üblicherweise nur bei Betrachtung von Einstufenversuchen Anwendung. Bei der für die Betriebsfestigkeitsrechnung typischen Lastkollektivbeanspruchung treten häufig sowohl Lasten im Zeitfestigkeitsbereich als auch unterhalb der Dauerfestigkeit auf. Die Grundzüge zur Ermittlung der akkumulierten Schadenssumme D sowie der zulässigen Schadenssumme D_{zul} wurden bereits dargestellt. Das statistische Ausfallverhalten bei Lastkollektivbeanspruchung ist bisher nur unzureichend experimentell abgesichert. Hinweise hierzu finden sich in Abschnitt 2.5.2.

2.4 Methoden der Lebensdauerberechnung bei Zahnradgetrieben

In Anlehnung an die bereits erläuterten Grundlagen der Betriebsfestigkeit wird im Folgenden der Stand der Technik der Lebensdauerberechnung von Zahnradgetrieben unter Lastkollektivbelastung beschrieben. Obwohl das Thema auch bei industriellen Anwendern von höchster Relevanz ist, gibt es bisher nur wenige umfangreiche Untersuchungen an Zahnrädern und aussagekräftige Publikationen. Da diese wenigen Publikationen bisher noch keine allumfassende und zuverlässige betriebsfeste Auslegung von Zahnradgetrieben erlauben, besteht oftmals nach wie vor die Notwendigkeit firmeninterner experimenteller Untersuchungen zur finalen Freigabe der Bauteile.

Während beispielsweise die Ermittlung des Spannungszustands an und unter der Zahnflanke für verschiedene Werkstoffe [45, 166, 205, 245, 246] Gegenstand aktueller Forschung ist und oftmals bereits simulativ erfasst werden kann, gehen die geltenden Grundlagen der betriebsfesten Auslegung von Zahnradgetrieben großteils auf Veröffentlichungen aus dem vergangenen Jahrhundert zurück. Dies mag darin begründet sein, dass die Ableitung allgemeingültiger Ansätze mitunter umfangreiche und damit teure experimentelle Untersuchungen erfordert.

2.4.1 Auslegung von Zahnradgetrieben unter Lastkollektivbelastung

Bei der Auslegung von Zahnradgetrieben unter Lastkollektivbelastung können generell zwei Vorgehensweisen unterschieden werden, welche im Folgenden getrennt voneinander betrachtet werden:

- Optimierte anwendungsspezifische Auslegung
- Absicherung nach ISO 6336 bzw. alternativer Normen

Eine optimierte anwendungsspezifische Auslegung erfolgt häufig zum Beispiel für Fahrzeuggetriebe aller Art (PKW, Nutzfahrzeuge, Landmaschinen, ...), da hier die Maximierung des Leistungsgewichts eine entscheidende Rolle spielt und somit mehrere Schadensarten gleichzeitig betrachtet werden. Diese Art der Auslegung erfordert umfassendes Wissen zu auftretender Belastung (Lastkollektiv, Drehmoment-Zeit-Verläufe) und Beanspruchbarkeit ((Bauteil-)Wöhlerlinien) sowie zum Schadensverhalten (z.B. verwendete Schadensakkumulationshypothese und zulässige Schadenssummen) des verwendeten Werkstoffs. Diese Methode stellt insgesamt die aufwändigere Methode dar und wird häufig noch durch strenge Vorgaben bezüglich der Durchführung von finalen Freigabetests unter praxisnaher Belastung an realen Getrieben ergänzt. Dieser ganzheitliche Ansatz zur Auslegung von Zahnradgetrieben unter Lastkollektivbelastung wird erstmals von Renius [192, 193] 1976 vorgestellt und erfolgreich angewandt [191]. Die Grundlagen finden nach wie vor auch für die Auslegung von modernen Getrieben Anwendung und bilden somit die Basis des aktuellen Stands der Technik auf dem Gebiet der exakten Auslegung von Zahnradgetrieben unter Lastkollektivbelastung.

Die genormte Auslegung für Getriebe unter Lastkollektivbelastung nach ISO 6336 oder anderen Normen (z.B. AGMA 2001 [3, 4]) wird oftmals für Industriegetriebe oder Windenergieanlagen gefordert, welche gewisse Zertifizierungsmaßnahmen durchlaufen sollen. Auch bietet sie sich an, wenn wenig Erfahrungswissen vorhanden ist und ohnehin nur eine Abschätzung des Betriebsfestigkeitsverhaltens erfolgen soll. Durch die Verwendung von "standardisierten" Wöhlerlinien für die Schadensarten Grübchen und Zahnfußbruch und vereinfachten Lastannahmen beispielsweise über Anwendungsfaktoren kann ein Sicherheitsfaktor für beide Schadensarten ermittelt werden. In Abschnitt 2.4.1.2 wird die Auslegung nach ISO 6336 detailliert beschrieben.

2.4.1.1 Optimierte anwendungsspezifische Auslegung

Die erweiterte anwendungsspezifische Auslegung von Zahnradgetrieben lässt sich allgemein in drei Schritte gliedern:

- Lastkollektivermittlung
- Ermittlung bzw. Festlegung der verwendeten Festigkeitskennfunktion
- Wahl einer geeigneten SAH sowie der zulässigen Schadenssummen

Die einzelnen Schritte des Auslegungsprozesses werden im Folgenden detailliert beschrieben. Im Allgemeinen ist für eine optimierte anwendungsspezifische Auslegung von Zahnradgetrieben unter Lastkollektivbelastung ein großes Erfahrungswissen erforderlich, welches durch umfangreiche Versuchsreihen oder langjährige Erfahrung mit Getrieben ähnlicher Bauart gewonnen werden kann. Der nachfolgend näher beschriebene Ansatz wird aktuell vor allem für Fahrzeuggetriebe verwendet, da diese meist betriebsfest ausgelegt werden und das Leistungsgewicht (und damit eine bestmögliche Werkstoffausnutzung) mitunter vorrangiges Auslegungskriterium ist. Hierdurch wird der deutlich erhöhte Aufwand für diese Art der Auslegung gerechtfertigt.

Der Ansatz der optimierten anwendungsspezifischen Auslegung in seiner ganzheitlichen Form wurde erstmals von Renius für Traktorgetriebe eingesetzt und ist in dieser Form auch heute noch vergleichbar mit anderen aktuellen Vorgehensweisen. Basierend auf zahlreichen Vorarbeiten zur Gewinnung von quasi-standardisierten Lastkollektiven für Ackerschlepper [66, 67, 98, 101, 137, 162, 190, 196, 197] führt Renius Betriebsfestigkeitsrechnungen für mehrere Schadensarten durch [191, 192, 193]. Die benötigten Wöhlerlinien zur Betriebsfestigkeitsrechnung werden aus umfangreichen Versuchsreihen bauteilspezifisch gewonnen und einem "standardisierten" Lastkollektiv, welches so auch heute noch Gültigkeit besitzt, gegenübergestellt. Die Gültigkeit dieser Vorgehensweise wurde später auch von Buck [63] bestätigt.

Lastkollektivermittlung

Anwendungsspezifische Lastkollektive können prinzipiell durch Messung oder Simulation gewonnen werden. In der Regel wird hierbei die äußere Belastung, also das Drehmoment am Getriebeeingang in Form eines Drehmoment-Zeit-Verlaufs ermittelt. Die Ermittlung von Beanspruchungs-Zeit-Verläufen (z.B. Zahnfußspannungsmessungen nach FZG/Schaller [206]) ist sehr aufwändig und meist auch nicht zielführend, da hiervon keine allgemeinen Auslegungslastkollektive abgeleitet werden können. Um eine möglichst gute Werkstoffausnutzung der Getriebeelemente zu erreichen, ist ein aussagekräftiges Lastkollektiv von größter Bedeutung. Die zur Auslegung verwendeten Lastkollektive unterliegen meist großen Streuungen, welche beispielsweise auf unterschiedliches Kundennutzungsverhalten (z.B. PKW-Getriebe [108, 234]), unterschiedliche äußere Bedingungen (z.B. Windkraftanlagen [71, 130]) oder einen beabsichtigten Baukastencharakter zurückzuführen sind. Auf Grund der üblichen, großen Streuungen sollten Lastkollektive immer in Zusammenhang mit einer Art Auftretenswahrscheinlichkeit verwendet werden. Für PKW-Getriebe wird zum Beispiel häufig der 99 % Kunde [108, 179] für die Auslegung verwendet. Die durch das 99 % - Kollektiv hervorgerufene Schädigung wird dabei lediglich von einem Prozent der Kunden noch übertroffen. Besonders herausfordernd ist dabei jedoch, dass sich die 99 % - Kollektive für unterschiedliche Gänge und Schadensarten unterscheiden können [179]. Für manche Anwendungsgebiete, wie etwas stationäre Industriegetriebe, Rennsportanwendungen, Schiffsgetriebe oder auch Prüfstandsversuche, lassen sich Lastkollektive auch mit recht geringen Streuungen angeben.

Foulard [87, 88, 89, 201] zeigt in mehreren Publikationen eine Methode zur Online-Ermittlung eines Lastkollektivs im Fahrbetrieb und einer darauf basierenden Schädigungsrechnung für PKW-Getriebe. Ziel dieser Methode ist es, frühzeitig Schäden vorherzusagen und bedarfsgerecht Wartungen durchzuführen. Die Methode erläutert sehr exakt die Ermittlung der realen Belastungen, wobei die Belastbarkeit jedoch nur grob abgeschätzt wird. Solange diese nicht ebenso exakt ermittelt wird, sind die getroffenen Aussagen mit großen Unsicherheiten behaftet.

Für manche Anwendungen existieren "standardisierte" Lastkollektive, welche zum Teil auf gewisse Konstruktionsgrößen normiert sind. Renius zeigt dies aufbauend auf früheren Arbeiten beispielhaft für Traktorgetriebe [67, 98, 137, 196]. Ähnliche Methoden existieren auch für PKW-Getriebe [73, 145, 153], finden jedoch auf Grund einer größeren Zahl an Einflussfaktoren seltener Anwendung.

Ermittlung bzw. Festlegung der verwendeten Festigkeitskennfunktion

Die Ermittlung einer Festigkeitskennfunktion wird üblicherweise spezifisch für einzelne Schadensarten in Wöhlerversuchen an einzelnen Komponenten durchgeführt. Für die betriebsfestigkeitsrelevanten Zahnradschäden Grübchen bzw. Zahnfußbruch existieren hierzu quasi-standardisierte Vorgehensweisen z.B. nach FVA Merkblatt 0/5 [86, 126] bzw. der FVA Richtlinie 563/I [169] zur Ermittlung von werkstoffspezifischen Wöhlerlinien an Referenz-Prüfrädern. Die Wöhlerlinie wird dabei durch die Kenngrößen Dauerfestigkeitswert, Knicklastspielzahl, Wöhlerliniensteigung und evtl. statische Festigkeit bestimmt. Wichtig ist hierbei, dass gerade für Betriebsfestigkeitsuntersuchungen das Zeitfestigkeitsgebiet ausreichend gut abgesichert ist, da vor allem die Wöhlerliniensteigung stark von einzelnen Werkstoffparametern abhängen kann [185]. Wie auch bei der Lastkollektivermittlung unterliegen die ermittelten Wöhlerlinien Streuungen abhängig von Werkstoffcharge, Wärmebehandlung etc. Durch die Vorgabe enger Toleranzen und die Überprüfung dieser im Rahmen der Qualitätssicherung können die Streuungen minimiert werden. Dies ist jedoch mit zusätzlichen Kosten verbunden. Basierend auf einer üblichen Anzahl von Versuchspunkten ist in der Regel eine Ermittlung von Wöhlerlinien für 50 % Ausfallwahrscheinlichkeit zuverlässig möglich [176, 178]. Die Umrechnung auf andere Ausfallwahrscheinlichkeiten (üblicherweise 1 bis 10 %) ist z.B. mit Hilfe der Werte aus FVA 304 [226] oder anderen Umrechnungsfaktoren [127, 182] möglich.

Für einen konkreten Anwendungsfall in Form eines bereits konstruierten Getriebes ist darüber hinaus auch die Ermittlung einer "Schadens-Wöhlerlinie" auf einem Systemprüfstand denkbar. Hierbei wird nicht nach Schadensart unterschieden, sondern eine rein drehmomentabhängige Wöhlerlinie für das gesamte Getriebe ermittelt. Bei unterschiedlichen Lasthorizonten können dabei verschiedenen Schadensarten auftreten.

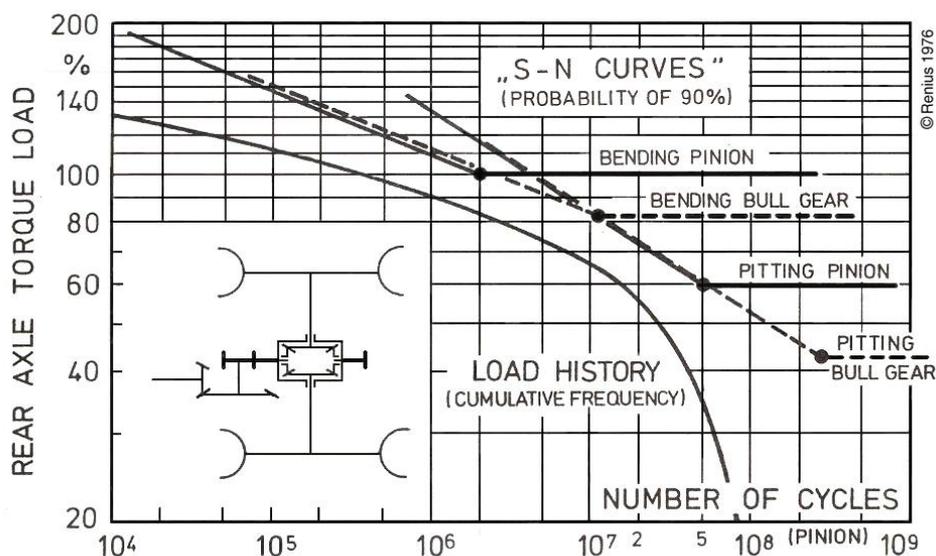


Bild 2.11: Gegenüberstellung von Lastkollektiv und optimierten Bauteilwöhlerlinien, Originaldiagramm von Renius [193]

Die die Beanspruchbarkeit beschreibende Kenngröße bei Komponentenversuchen ist die auftretende Spannung im Bauteil, nicht das von außen angreifende Drehmoment, da dieses spezifisch für die Prüfverzahnungsgeometrie ist. Durch die spannungsbezogene Betrachtung lässt sich die Gegenüberstellung von Wöhlerlinie und Lastkollektiv nur für eine Schadensart darstellen. Durch die Berechnungsansätze nach ISO 6336 [34, 35, 36] können die zulässigen Spannungen jedoch in Drehmomente überführt werden. Dies ermöglicht eine einheitliche Betrachtung mehrerer Schadensarten in einem Schaubild. Diese Art der Darstellung wurde erstmals von Renius [193] verwendet und die sich ergebenden Festigkeitskennfunktionen als Bauteilwöhlerlinien bezeichnet. **Bild 2.11** zeigt das Grundprinzip der Optimierung eines Zahnradpaares nach vorgegebenem Lastkollektiv mit Hilfe der Bauteilwöhlerlinien für die Schadensarten "Fußbruch Ritzel", "Fußbruch Rad", "Grübchen Ritzel" sowie "Grübchen Rad" für jeweils 90 % Überlebenswahrscheinlichkeit. Wie zu erkennen ist, ermöglicht es diese Art der Darstellung auch, eine Aussage über die jeweils dominierende Schadensart bei einem gegebenen Drehmoment zu treffen. Weiterhin erlaubt dieses Prinzip eine besonders elegante Verifikation der theoretischen Optimierung durch zeitgeraffte Laborversuche [191]. FZG/Ziegler [256, 257] greift diese Methode z.B. zur Raffung von Lastkollektiven unter Beibehaltung des maßgeblichen Schadensmechanismus auf.

Wahl einer geeigneten SAH sowie der zulässigen Schadenssummen

Sind auftretendes Lastkollektiv und Festigkeitskennfunktion bekannt, so müssen diese zur Ermittlung einer Schadenssumme mit Hilfe einer geeigneten Schadensakkumulationshypothese verknüpft werden. Die Wahl der SAH sollte nach betriebsinternem Erfahrungswissen erfolgen, da für unterschiedliche Anwendungsgebiete verschiedene SAH sinnvoll sein können. Enthält das Auslegungslastkollektiv nur wenige Lasten im Bereich der Zeitfestigkeit, so kann die Wahl der SAH Miner original zutreffend sein. Sind jedoch viele Lasten im Bereich der Zeitfestigkeit vorhanden, so sollte eine SAH gewählt werden, welche diesen Umstand berücksichtigt. Häufig findet hier die SAH Miner-Haibach [103] Anwendung, welche auch in zahlreichen Forschungsvorhaben [78, 208, 227, 229] zum Thema Betriebsfestigkeit an Zahnradgetrieben bestätigt wurde.

Sollen im Auslegungsprozess absolute Laufzeiten bis zum Ausfall ermittelt werden, so ist die Festlegung einer zulässigen Schadenssumme D_{zul} erforderlich. Übersteigt die berechnete Schadenssumme D diese, so ist mit einem Ausfall zu rechnen. Eine zulässige Schadenssumme kann beispielsweise nach betriebsinterner Erfahrung oder abhängig von der Schadensart und der Kollektivform entsprechend den Erkenntnissen von FZG/Schaller [208], FZG/Eberspächer [78], FZG/Stahl [227] und FZG/Suchandt [229] ermittelt werden.

Fazit

Die erweiterte anwendungsspezifische Auslegung von Zahnradgetrieben unter Lastkollektivbelastung erfordert umfangreiches Wissen über auftretende Belastungen und die Belastbarkeit der einzelnen Getriebeelemente. Sowohl Belastung als auch Belastbarkeit unterliegen gewissen Streuungen, welche berücksichtigt werden müssen.

Bild 2.12 stellt diesen Zusammenhang vereinfacht grafisch dar. Belastung sowie Belastbarkeit sind darin bezogen auf das Drehmoment in Form einer gaußschen Verteilungsfunktion dargestellt, um den Einfluss der Streuungen zu verdeutlichen. Das Integral unter der jeweiligen Kurve ergibt sich immer zu eins.

Die Ausfallwahrscheinlichkeit lässt sich anschaulich in diesem Diagramm als Flächeninhalt des Überschneidungsbereichs der beiden Kurven darstellen und ist somit immer kleiner oder gleich eins bzw. 100 %. Die Ermittlung der Ausfallwahrscheinlichkeit auf diesem Weg ist jedoch mathematisch komplex [97, 103] und erfordert die genaue Kenntnis der Verteilungsfunktionen von Belastung und Belastbarkeit vor allem in den Randbereichen. In der Regel wird daher der bereits oben skizzierte Weg eingeschlagen und ein Wert zur Definition von Belastung (Stichwort "99 % - Kunde") und Belastbarkeit (Wöhlerlinie für xx % Ausfallwahrscheinlichkeit) verwendet.

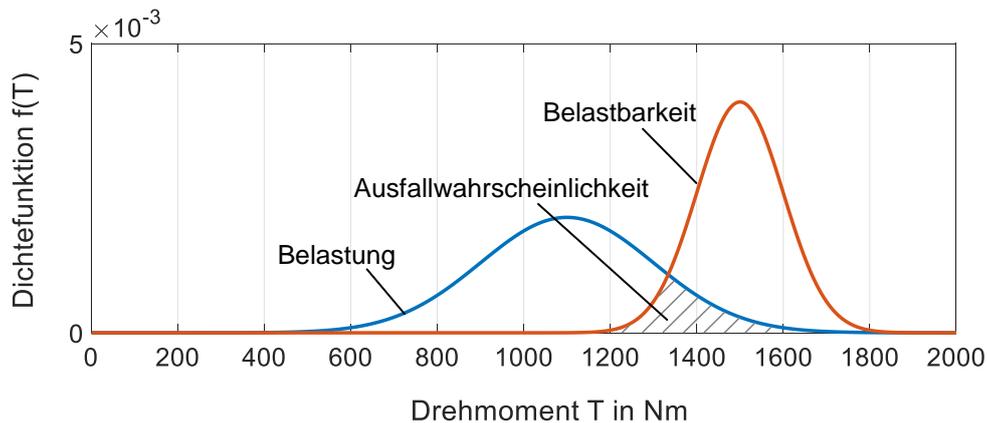


Bild 2.12: Vergleich von Belastung und Belastbarkeit

Das von Renius entwickelte Konzept der Bauteilwöhlerlinien ermöglicht den anschaulichen und rechnerischen Vergleich unterschiedlicher Schadensarten bezogen auf ein drehmomentbasiertes Auslegungslastkollektiv und erfasst somit erstmals den Systemgedanken bei der betriebsfesten Auslegung von Zahnradgetrieben.

2.4.1.2 Auslegung nach ISO 6336

Die Normenreihe ISO 6336 [34, 35, 36, 37, 38] stellt den aktuellen Stand der Technik hinsichtlich genormter Tragfähigkeitsberechnungen an Zahnradgetrieben dar und basiert maßgeblich auf der deutschen Normenreihe DIN 3990 [14, 15, 16, 17, 18, 19]. Der Grundgedanke der Norm sieht die Berechnung eines Sicherheitswertes als Verhältnis von Beanspruchbarkeit zu Beanspruchung vor und ist somit zunächst einmal nur für die Betrachtung von einstufigen Belastungen geeignet. Mit Teil 6 der ISO 6336 [38] ist jedoch auch eine Methodik zur Ermittlung eines Sicherheitsfaktors bei einem gegebenen Lastkollektiv verfügbar. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, Lastkollektive bei einer "Standard"-Berechnung nach Teil 2 für Grübchen [35] bzw. Teil 3 für Zahnfußbruch [36] in Form eines Anwendungsfaktors K_A zu berücksichtigen. Beide Methoden werden im Folgenden getrennt voneinander kurz vorgestellt.

Die Festigkeitskennfunktion wird für beide Berechnungsmöglichkeiten basierend auf den Annahmen in ISO 6336-2 und ISO 6336-3 mittels der Werkstoffkennwerte σ_{Hlim} und σ_{Flim} bestimmt. Dieses Vorgehen entspricht dabei Methode B; gemäß Methode A ist auch die Verwendung von experimentell ermittelten Festigkeitskennfunktionen möglich. Die "Norm-Wöhlerlinien" für die Schadensarten Grübchen und Zahnfußbruch an einsatzgehärteten Verzahnungen sind in **Bild 2.13** dargestellt. Auch für die Schadensart Grübchen wird eine statische Festigkeit angegeben, obwohl für wenige Lastspiele kein Ausfall durch Grübchenschäden zu erwarten ist. Die

angegebene statische Grenze kann daher eher als Übergangsbereich zur plastischen Verformung interpretiert werden. Die Wöhlerliniensteigungen k für beide Schadensarten nach ISO 6336 ergeben sich zu:

- Grübchen: $k = 13,22$;
- Zahnfußbruch: $k = 8,74$.

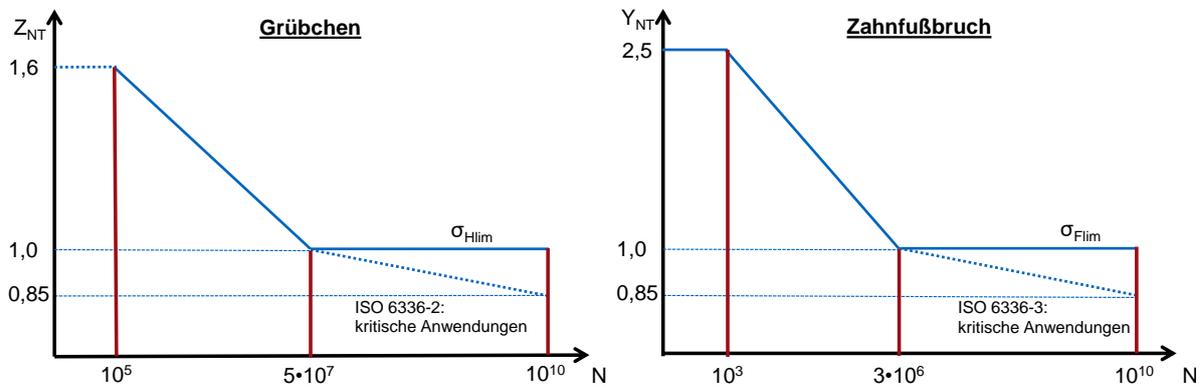


Bild 2.13: Norm-Wöhlerlinien gemäß ISO 6336 für Zahnräder aus Einsatzstahl

Berechnung mit Hilfe des Anwendungsfaktors K_A

Eine Berechnung von Sicherheitswerten entsprechend ISO 6336-2/3 [35, 36] mit Hilfe von Anwendungsfaktoren stellt vor allem für Industriegetriebe unter Lastkollektivbelastung den Stand der Technik dar. Die zur Berechnung verwendete, aus dem Nenndrehmoment T_N abgeleitete Umfangskraft F_t wird durch Multiplikation mit dem Anwendungsfaktor K_A angepasst, um die Lastkollektivbelastung korrekt abzubilden. K_A ist dabei zwar in der Regel größer als 1,0, kann jedoch auch Werte kleiner 1,0 annehmen, wenn K_A als Betriebsfaktor interpretiert wird und die Nennbelastung entsprechend gewählt wird. Der Anwendungsfaktor K_A kann auf zwei Arten interpretiert werden [102]:

- K_A als Stoß- bzw. Überlastfaktor:

Wird der Anwendungsfaktor als Stoß- bzw. Überlastfaktor interpretiert, so ist K_A als Verhältnis von maximal auftretender Last, z.B. durch äußere Lasten oder periodisch wirkende innere Kräfte (Verbrennungsmotor), zu Nominallast zu sehen. Richtwerte hierzu sind in Annex B der ISO 6336-6 [38] zu finden. K_A als Stoß- bzw. Überlastfaktor ist stets größer als 1,0. Diese Betrachtung sollte nach Meinung des Autors vor allem für dauerhafteste Auslegungen herangezogen werden.

- K_A als Betriebsfaktor:

Wird K_A als Betriebsfaktor betrachtet, so soll dieser die Lastkollektivbelastung in Form einer schädigungsäquivalenten Einstufenbelastung der Höhe $F_t \cdot K_A$ abbilden. K_A wird hierbei für jede Schadensart einzeln nach ISO 6336-6 [38], Annex A, ausgehend von einem Auslegungslastkollektiv ermittelt. Dieses Vorgehen beruht auf dem von Niemann/Winter [182] beschriebenen Vorgehen zur Ermittlung eines schädigungsäquivalenten Drehmoment T_{eq} für ein vorgegebenes Lastkollektiv. Die Anwendungsnormen DIN 3990-11 [10], 3990-21 [11], 3990-31 [12] sowie 3990-41 [13] enthalten Anhaltswerte für K_{AH} (Grübchen) sowie K_{AF} (Zahnfußbruch) für Industriegetriebe, Turbogee-

triebe, Schiffsgetriebe sowie Fahrzeuggetriebe. Weiterhin erlaubt die Norm als Methode A auch die Verwendung von Anwendungsfaktoren, welche auf anderen Wegen ermittelt wurden [69, 70].

Die Verwendung des Anwendungsfaktors K_A in Verbindung mit der gut abgesicherten Berechnungsmethode nach ISO 6336 stellt für viele Anwender ein hilfreiches Werkzeug dar. Beachtet werden muss dabei jedoch stets, dass bei Getrieben unter Lastkollektivbelastung ein komplexes Problem auf einen einfachen Faktor reduziert wird. Weiterhin ist diese Betrachtung nur für eine Schadensart gültig. Eine ganzheitliche Betrachtung des Systems "Getriebe" vor dem Hintergrund einer bestmöglichen Werkstoffausnutzung (z.B. mit Hilfe von Bauteilwöhlerlinien nach Renius [192, 193]) kann somit nicht erfolgen. Auch wird in der industriellen Praxis zur Berechnung hinsichtlich Grübchen sowie Zahnfußbruch meist derselbe Anwendungsfaktor K_A verwendet. Die notwendige Unterscheidung in K_{AH} sowie K_{AF} erfolgt häufig nicht.

Berechnung nach ISO 6336-6

ISO 6336-6 [38] bzw. DIN 3990-6 [19] beschreiben die Betriebsfestigkeitsrechnung für Stirnräder hinsichtlich der Schadensmechanismen Grübchen und Zahnfußbruch. Zusammengefasst lässt sich die Berechnungsmethode auf die Anwendung der linearen SAH nach Palmgren [187] und Miner [175] mit einer zulässigen Schadenssumme $D_{zul} = 1,0$ reduzieren. Inwiefern ein abfallender Dauerfestigkeitsast berücksichtigt werden soll, lässt die Norm weitestgehend offen. Wichtig für die praktische Anwendung ist, dass für die Berechnung der Teilschädigungen d_i für jede Laststufe die lastabhängigen Faktoren, wie etwa $K_{H\beta}$ oder K_v neu bestimmt werden müssen.

Ergänzend zur Ermittlung einer Schadenssumme wird die Berechnung eines Sicherheitswerts beschrieben. Die Berechnung hierzu läuft iterativ ab. In jedem Berechnungsschritt wird das Lastkollektiv mit einem Sicherheitswert multipliziert, so lange bis die ermittelte Schadenssumme im Bereich $0,99 < D < 1,0$ liegt.

Bei Wahl einer experimentell ermittelten Festigkeitskennfunktion entspricht das genormte Vorgehen prinzipiell der bereits beschriebenen erweiterten anwendungsspezifischen Auslegung. Lediglich die Festlegung auf eine zulässige Schadenssumme $D_{zul} = 1,0$ ist kritisch zu sehen. Der aktuell in der Entstehung befindliche Entwurf einer überarbeiteten Fassung der ISO 6336-6 wird an dieser Stelle jedoch die Einbringung von weiterem Erfahrungswissen zulassen. Unsicherheit birgt darüber hinaus auch die Ermittlung eines Sicherheitsfaktors nach ISO 6336-6 [38] auf Grund der abweichenden Herangehensweise im Vergleich zu den Teilen 2 und 3. Nach ISO 6336-6 [38] ermittelte Sicherheitsfaktoren können mit deutlich unterschiedlichen Ausfallwahrscheinlichkeiten verknüpft sein.

FZG/Mulzer und FZG/Otto [180] implementieren die Betriebsfestigkeitsrechnung nach ISO 6336-6 [38] in das FVA-Programm STplus [91] für die Schadensarten Zahnfußbruch und Grübchen. Als SAH wird dabei die modifizierte Methode nach Miner-Haibach [103] mit abfallendem Wöhlerlinienast auch im Bereich der Dauerfestigkeit gewählt; liegen sichere Erkenntnisse zum Ausfallverhalten vor, ist jedoch auch die Anwendung einer anderen SAH möglich. Die zulässige Schadenssumme D_{zul} ist abhängig von der Schadensart und der Kollektivform und wird entsprechend den Erkenntnissen von FZG/Schaller [208], FZG/Eberspächer [78], FZG/Stahl [227] und FZG/Suchandt [229] ermittelt.

Nikkel, Hinkelmann und Müller [120, 177, 184] entwickelten die Software „LDA+“ zur Lebensdauerabschätzung von verschiedenen Maschinenbauteilen, welche in die FVA-Workbench®

integriert ist. Damit können Lastkollektive auf verschiedene Arten klassiert werden und unter Angabe der Wöhlerlinie die Lebensdauern für beliebige Bauteile berechnet werden. Eine spezielle Anwendung auf die Gegebenheiten an Verzahnungen und Wälzlagern ist jedoch nicht implementiert.

2.4.2 Erweiterte lokale Schadensakkumulation nach FVA 554

Das Forschungsvorhaben IGF 15432 / FVA 554 I „Systemlebensdauerprüfung“ [256] setzte sich die Entwicklung einer Methode zur Raffung von Lastkollektiven und die dafür notwendige Erweiterung der Betriebsfestigkeitsrechnung für typische Schadensmechanismen an Antriebssystemen zum Ziel. Hierzu wurde die bestehende Betriebsfestigkeitsrechnung um die lokale Betrachtung der Schadensarten Grübchen, Zahnfußbruch, Graufleckigkeit sowie Verschleiß im gesamten Eingriffsgebiet erweitert. Die Notwendigkeit dieser lokalen Betrachtung ergibt sich aus der sich ändernden Lastverteilung über der Zahnflanke bei verschiedenen Lasten. Mit den von FZG/Ziegler [257] gezeigten Rechenmodellen ist es möglich, diesen Einfluss auch bei Lastkollektivbeanspruchung rechnerisch zu erfassen und damit ein Prüflastkollektiv zu entwerfen, welches den gleichen Schadensmechanismus wie das originale Betriebslastkollektiv erzielt.

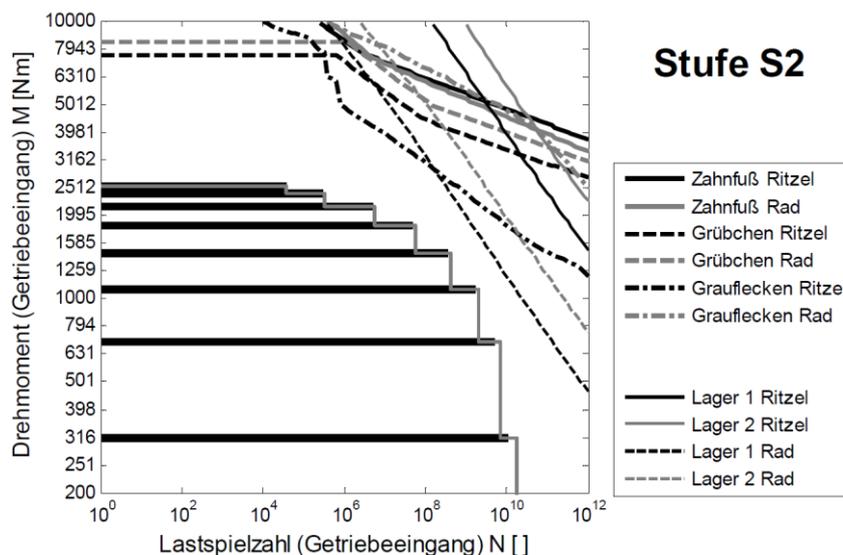


Bild 2.14: Bauteilwöhlerlinien nach FZG/Ziegler [257]

Die lokale Betrachtung der Schadensarten Grübchen und Zahnfußbruch basiert dabei maßgeblich auf den Berechnungsvorschriften nach ISO 6336-2 [35] und 6336-3 [36] und erfolgt lokal aufgelöst über der Zahnbreite für einzeln definierte Scheibchen. Die K-Faktoren werden, wie bereits vorgeschlagen, lastabhängig berechnet. Die graufleckenbedingte Auskolkungstiefe auf der Flanke wird basierend auf dem lokalen Ansatz von [213] betrachtet und um einen Ansatz zur Berücksichtigung von Lastkollektiven erweitert. Das lokale Modell zur Verschleißtragfähigkeit beruht auf den Ansätzen von FZG/Michaelis/Brinck [173] sowie FZG/Schudy [215]. Der lokalen Berechnung des Verschleißbetrags steht jedoch die globale Überprüfung der Verschleißgefährdung nach FZG/Plewe [189] voran. Schäden an Wälzlagern werden auf Basis des Wissensstandes berücksichtigt. Die Ermüdung wird dabei nach den unterschiedlichen Methoden der DIN ISO 281 [30] berechnet, für Verschleiß an Wälzlagern wird IGF 11712/ FVA 327 [237] als Basis verwendet. Zur grafischen Veranschaulichung werden auch von Ziegler [257] Bauteilwöhlerlinien in Anlehnung an Renius [192] verwendet (siehe **Bild 2.14**).

Die entwickelte lokale Berechnungsmethodik wird an Hand von experimentellen Untersuchungen auf FZG-Verspannungsprüfständen validiert. In der Regel korrelieren der aufgetretene Schaden sowie der Schadensort auf der Zahnflanke gut mit der Vorhersage nach den Berechnungsansätzen.

Basierend auf diesem lokalen Berechnungsmodell entwickelte FZG/Ziegler [257] eine verfeinerte Methodik zur Raffung von Lastkollektiven [191]. Hierbei wird zunächst der maßgebliche Schadensmechanismus im realen Betrieb basierend auf dem vorgegebenen Lastkollektiv ermittelt. Durch Omission und Lastanhebung wird iterativ ein Prüflastkollektiv bestimmt, welches zum selben Schadensmechanismus, jedoch bei deutlich verkürzter Prüflaufzeit führt. Die Berechnung ist in einem Programmsystem auf Basis von MATLAB unter Verwendung der FVA-Programme RIKOR [181] und STplus [91] umgesetzt. FZG/Ziegler [257] beschreibt mehrere Teilmethoden zur Lastkollektivraffung, wie **Bild 2.15** zeigt. Allen gemein ist die Beibehaltung des maßgeblichen Schadensmechanismus. Absteigend von Methode A nach E gehen dabei immer mehr Informationen verloren, was jedoch zu einer weiteren Verkürzung der Prüflaufzeit führt.

Methode	Beschreibung	Raffung	Schadensmechanismus	Kollektivform (ohne Omission)	Schadensort	Schädigungssumme	Maximale lokale Schädigungssumme	Überlebenswahrscheinlichkeit	Lasthorizonte
A	Gleiche Belastung	Omission	+	+	+	O	+	O	O
B	Gleiche Überlebenswahrscheinlichkeit	Omission + Anhebung	+	+	+			+	
C	Gleiche lokale Schädigungssumme	Omission + Anhebung	+	+	+		+		
D	Gleiche Schädigungssumme	Omission + Anhebung	+	+		+			
E	Einstufenbelastung	Omission + Anhebung	+			+			

Bild 2.15: Raffungsmethoden nach FZG/Ziegler [257]

Insgesamt bildet das Vorhaben IGF 15432 / FVA 554 I [256] eine grundlegende Basis für die Erkenntnisse dieser Arbeit.

2.4.3 Zuverlässigkeitsbetrachtungen bei der Auslegung von Zahnradgetrieben

Im modernen Maschinenbau spielt die zuverlässigkeitsbasierte Auslegung eine immer größere Rolle. Anders als die sicherheitsbasierte Auslegung, welche immer an eine feste Ausfallwahrscheinlichkeit geknüpft ist, ermöglicht eine zuverlässigkeitsbasierte Auslegung eine individuelle Anpassung an spezifische Vorgaben und die Berücksichtigung von besonderen Effekten, z.B. großer Werkstoffstreuungen.

Die sicherheitsbasierte Auslegung von Maschinenelementen auf Basis von Normberechnungsverfahren ist immer mit einer festen Ausfallwahrscheinlichkeit verknüpft. Für die Zahnradberechnung nach ISO 6336 [34, 35, 36, 37, 38] oder AGMA 2001/2101 [3, 4] ist dies eine Ausfallwahrscheinlichkeit von $P_A = 1\%$ bezogen auf die Last; für die Wälzlagerberechnung nach DIN ISO 281 [30] sind dies $P_A = 10\%$ bezogen auf die Laufzeit und für die Berechnung

von Wellen nach DIN 743 [24, 25, 26, 27, 85, 202] $P_A = 1 \%$ bzw. nach der FKM-Richtlinie [32, 144] $P_A = 2,5 \%$, jeweils bezogen auf die Last.

Während die Berechnung nach AGMA 2001/2101 [3, 4] über einen Zuverlässigkeitsfaktor Y_Z die Anpassung der Ausfallwahrscheinlichkeit ermöglicht, so ist dies für ISO 6336 [34, 35, 36, 37, 38] bisher nicht vorgesehen, so lange die Festigkeitskennwerte nach Teil 5 gewählt werden. Die Werte für Y_Z sind jedoch aus relativ wenigen Versuchen der US Navy abgeleitet und entsprechen nicht dem Stand der Technik durch Versuchserfahrung an der FZG beziehungsweise entsprechend den Ergebnissen von FVA 304 [226]. Des Weiteren ist die Anwendbarkeit der Faktoren für Berechnungen im Zeitfestigkeitsgebiet kritisch zu hinterfragen, wie beispielsweise die grundlegenden Untersuchungen von Beermann [55] zeigen. Auch für die Berechnung der Wellen- und Wälzlagertragfähigkeit stehen entsprechende Umrechnungsfaktoren zur Verfügung.

Eine große Herausforderung in der praktischen Anwendung ist die Bestimmung einer Systemzuverlässigkeit für ganze Getriebesysteme. Eine einheitliche, validierte Vorgehensweise hierzu fehlt bisher noch vollkommen. Die bisherigen Modelle basieren auf der Anwendung der Booleschen Systemtheorie [42, 97] für eine Reihenschaltung. Hierbei wird angenommen, dass jeder Schaden zum Ausfall des Gesamtsystems führt. Die Einzelzuverlässigkeiten $R_i(t)$ für jede betrachtete Schadensart und jedes betrachtete Element des Getriebes werden dabei miteinander multipliziert und ergeben so die Systemzuverlässigkeit des Getriebes $R_{\text{Getriebe}}(t)$:

$$R_{\text{Getriebe}}(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (2.9)$$

$R_{\text{Getriebe}}(t)$ - Systemzuverlässigkeit	$R_i(t)$ - Einzelzuverlässigkeit
i - Laufvariable	n - Gesamtanzahl betrachteter Elemente

Diese Vorgehensweise ist so beispielsweise aktuell im Programmsystem KISSsoft [55, 143, 144] basierend auf einem aktuellen Entwurf [5] zur Überarbeitung der AGMA 6006 [6] umgesetzt. Da jedoch bereits die zuverlässige Ermittlung von Einzelzuverlässigkeiten für verschiedene Maschinenelemente sowie Schadensarten eine große Herausforderung darstellt, ist auch die darauf basierende Ermittlung einer Gesamtzuverlässigkeit mit großen Unsicherheiten behaftet. Häufig fehlt schlichtweg das benötigte Wissen über die zu Grunde liegenden Verteilungsfunktionen sowie deren Form- und Lageparameter. Viele der beschriebenen Ansätze basieren lediglich auf der Auswertung von wenigen Versuchsreihen oder auf Literaturangaben (z.B. nach Bertsche [57]), welche zwar gute Richtwerte liefern, jedoch nicht zur Berechnung einer Systemzuverlässigkeit von Getrieben geeignet sind. Folglich unterliegen die ermittelten Systemzuverlässigkeiten sehr großen Streuungen.

Nach Meinung des Autors ist die Anwendung der Booleschen Theorie zur Bestimmung einer Systemzuverlässigkeit nur für vergleichende Betrachtungen ähnlicher Getriebe möglich. Ein Vergleich der Absolutwerte ist nicht möglich, da diese sehr stark vom Detaillierungsgrad und der Anzahl an betrachteten Schadensmechanismen beeinflusst werden. Werden beispielsweise im Rahmen einer detaillierten Betrachtung Grübchen-, Zahnfußbruch-, Verschleiß- und Flankenbruchschäden an den Verzahnungen sowie Schäden an Dichtungen [146], Wellen und Wälzlagern betrachtet, in einer überschlägigen Betrachtung dagegen nur Grübchen- und Zahnfußbruchschäden an der Verzahnung, so ergibt sich für die überschlägige Betrachtung

zwangsweise eine (mitunter deutlich) höhere errechnete Gesamtzuverlässigkeit. Darüber hinaus werden häufig Betrachtungen im Zeit- und Dauerfestigkeitsgebiet miteinander vermischt.

FZG/Weitl [248] beschreibt einen ersten, erweiterten Ansatz zur Berechnung einer Systemzuverlässigkeit für Wälzlager und Zahnräder. Seine Grundgedanken beruhen zwar auf der Booleschen Theorie, jedoch unterscheidet er explizit zwischen einer Last- und Lebensdauersicherheit und definiert einen einheitlichen Kennwert zur Charakterisierung einer Systemtragfähigkeit bei Lastkollektivbeanspruchung.

2.4.4 Berechnung von Wälzlagern

Die Lebensdauerberechnung für Wälzlager ist in DIN ISO 281 [30] genormt. Bei einer Lastkollektivbelastung wird dabei gemäß Niemann et al. [183] eine äquivalente Einstufenbelastung ermittelt. Dies entspricht weitestgehend einer linearen Schadensakkumulation. Bei der klassischen Lebensdauerberechnung nach DIN ISO 281 [30] wird gegen eine kontinuierlich fallende Wöhlerlinie (Steigung ist abhängig von der Lagerart) gerechnet; eine Berücksichtigung der Dauerfestigkeit erfolgt nicht. Die Ergebnisse eines statischen Festigkeitsnachweises nach DIN ISO 76 [31] sollten bei hohen Belastungen zusätzlich berücksichtigt werden. In der aktuellen Version der DIN ISO 281 [30] ist darüber hinaus eine erweiterte Methode zur Lebensdauerberechnung enthalten, welche eine Ermüdungsgrenzbelastung (entspricht einer Dauerfestigkeitsgrenze) berücksichtigt. Mit diesem Berechnungsverfahren ist es auch möglich, unendliche Lebensdauern zu erhalten, also eine dauerfeste Lebensdauerberechnung durchzuführen.

2.5 Untersuchungen zum Einfluss einer Lastkollektivbelastung auf die Lebensdauer von Zahnradgetrieben

Wurden bisher vor allem Berechnungsverfahren und theoretische Ansätze zur Lebensdauer- und Zuverlässigkeitsberechnung von Zahnradgetrieben unter Lastkollektivbelastung vorgestellt, so werden in den folgenden Unterkapiteln vorrangig experimentell ermittelte Forschungsergebnisse gezeigt. Viele dabei auftretende Effekte können bisher nur rein deskriptiv beschrieben werden. Eine rechnerische Erfassung ist auf Grund des noch fehlenden ganzheitlichen physikalischen Verständnisses der beobachteten Ergebnisse oftmals nicht möglich.

2.5.1 Geraffte Lebensdauer- und Systemlebensdauerprüfung von Zahnradgetrieben

Vor allem für Getriebe mit langen Laufzeiten (z.B. Windkraft oder Bahn) ist aus Zeit- und Kostengründen eine geraffte Prüfung notwendig, um auf sinnvollem Weg die Betriebssicherheit der Anlagen gewährleisten zu können. FZG/Ziegler [257] unterscheidet prinzipiell vier verschiedene Raffungsmethoden:

- Omission;
- Erhöhung der Belastungsgeschwindigkeit;
- Verschärfung von Betriebsbedingungen;
- Verkürzung mit Extrapolation.

Als Omission wird das Weglassen von Stillstandzeiten und Niedriglasten mit geringem Schädigungsanteil bezeichnet. Je nach Lastkollektiv kann bereits durch Anwendung der Omission eine beträchtliche Reduktion der Prüflaufzeit erfolgen. FZG/Eberspächer [77, 78] gibt "verzichtbare Schädigungsanteile" in Abhängigkeit der geschätzten Standardabweichung sowie

der Anzahl an Einzelversuchen für Grübchenschäden an. FZG/Höhn et al. [122, 123] empfehlen für Zahnfußfestigkeitsversuche, die Lastspiele aller Lasten unter 50 % der Zahnfußdauerfestigkeit wegzulassen.

Eine Erhöhung der Belastungsgeschwindigkeit bedeutet bei Getrieben in der Regel eine Erhöhung der Drehzahl, um in gleicher Zeit mehr Lastspiele zu erhalten. Die erzielbare Raffung ist hierbei meist gering und mit der Gefahr verbunden, dynamische Effekte durch das Erreichen oder Überschreiten von Resonanzfrequenzen hervorzurufen. Um die Vergleichbarkeit mit der realen Anwendung sicherzustellen, ist es wichtig, dass auch im verkürzten Versuch die maximal im realen Betrieb erreichbare Drehzahl nicht überschritten wird.

Eine Verschärfung von Betriebsbedingungen bedeutet für Getriebesysteme in aller Regel eine Erhöhung des Drehmoments am Getriebeeingang, jedoch ist auch eine Erhöhung der Öl- bzw. Zahnmassentemperatur oder Drehzahl denkbar, um beispielsweise Spontanschäden, wie etwa Fressen, zu erzeugen. Ismail et al. [134] stellen beispielsweise solch ein Verfahren in einfacher Art und Weise dar. Durch die oft beobachtete Fokussierung auf einen spannungsbasierten Ansatz und somit auf eine Schadensart führt die Verschärfung von Betriebsbedingungen vielfach dazu, dass im verkürzten Versuch eine andere Schadensart auftritt als im Feldeinsatz. Bei der Verschärfung der Betriebsbedingungen ist daher zwingend darauf zu achten, den maßgeblichen Schadensmechanismus beizubehalten. Die bereits vorgestellte Methodik von FZG/Ziegler [257] berücksichtigt dies basierend auf den von Renius [192] eingeführten Bauteilwöhlerlinien. FZG/Hein et al. [108, 114] zeigen ein weiteres Beispiel dieser Vorgehensweise an Hand des Antriebsstrangs eines PKWs.

Eine Verkürzung der Prüflaufzeit durch Extrapolation geht davon aus, dass Versuche nicht bis zum Erreichen eines Schadens durchgeführt werden, sondern nach einer bestimmten, verkürzten Laufzeit abgebrochen werden. Durch die Ermittlung der Restlebensdauer der vorgeschädigten Komponenten und Extrapolation kann somit auf die Laufzeit des Getriebes im realen Betrieb geschlossen werden. Insbesondere für Schäden mit kontinuierlich wachsenden Schadensmerkmalen, wie etwa Verschleiß oder Graufleckigkeit, ist eine Ermittlung der tatsächlichen Lebensdauer in verkürzten Versuchen möglich.

Mattetti et al. [170] beschreiben eine Verkürzung der Prüfzeit für Strukturbauteile an Traktoren durch Verwendung anderer Prüfstandstechnik, mit welcher die Aufbringung mehrachsiger Belastungen möglich ist. Jakob [90] beschreibt generell eine Methodik zur Auswahl von Raffungsmodellen für verschiedene Schadensmechanismen und Anwendungsfälle.

Insgesamt existieren bereits vielfältige Methoden und Modelle zur gerafften Lebensdauerprüfung. Grundlage für alle Methoden sind detaillierte Kenntnisse zur Betriebsfestigkeitsrechnung und zum Ausfallverhalten der betrachteten Komponenten. Generell geht bei der Durchführung von gerafften Lebensdaueruntersuchungen immer ein Teil der Informationen verloren, wie es auch von Zwirlein und Schlicht [258] bestätigt wird.

2.5.2 Experimentelle Untersuchungen zum Betriebsfestigkeitsverhalten von Zahnrädern

Die FVA Forschungsvorhaben FVA 125 [78, 207, 208] und FVA 188 [227, 229] beschreiben zahlreiche experimentelle Betriebsfestigkeitsuntersuchungen an Zahnrädern in Lauf- und Pulsatorversuchen zur Zahnflanken- (FVA 125) sowie Zahnfußtragfähigkeit (FVA 188). Beide Vorhabensreihen wurden vollständig an der FZG bearbeitet. Die Arbeiten von FZG/Eberspächer [78], FZG/Schaller [207, 208, 249], FZG/Stahl [122, 123, 227] und FZG/Suchandt [122,

123, 229] belegen für die Schadensarten Grübchen und Zahnfußbruch, dass die Schadenssumme, welche zu einem Ausfall führt, mitunter deutlich schwankt. Diese ist unter anderem von der Kollektivform, der Reihenfolge der Lastaufbringung, der Anzahl der Belastungswechsel (Zufallslasten) und dem Vorkommen von Hochlasten abhängig. Die zulässigen Schadenssummen können für viele Fälle als logarithmisch normalverteilt betrachtet werden; die Schadenssumme 1,0 bildet dabei jedoch nicht zwingend den Mittelwert für 50 % Ausfallwahrscheinlichkeit. Die Standardabweichungen sind von Schadensart und Kollektivparametern (Form, Reihenfolge, Zufallslasten, Hochlasten) abhängig, einheitliche Werte können nicht genannt werden. Umfassende Untersuchungen hierzu stehen noch aus. Weitere derart umfangreiche experimentelle Versuchsreihen zur Betriebsfestigkeit von Zahnradgetrieben sind dem Autor weder aus der deutschsprachigen noch internationalen Literatur bekannt. Allerdings liegen positive Praxiserfahrungen zu dem in [191] beschriebenen Traktorgetriebe mit einer Stückzahl von ca. 150.000 vor [194]. Die Hauptergebnisse der Vorhaben 125/II+III sowie 188/I+II lassen sich wie folgt zusammenfassen:

FVA 125/II [208] "Grübchen"

- Kein Einfluss von Lasten unterhalb der Dauerfestigkeit;
- (Einstufen-)Dauerfestigkeit als Beanspruchungsgrenze;
- Lebensdauersteigerungen durch Einlaufeffekte bei niedrigen Umfangsgeschwindigkeiten (Oberflächeneinfluss);
- Hochlasten können zu Fressschäden führen;
- Drehmoment-Öltemperaturkollektive:
zweiparametrische lineare Schadensakkumulation;
- Berechnung nach Palmgren-Miner (Miner original) eher auf der unsicheren Seite (mittlere Schadenssumme: $D = 0,85$);
- Berechnung nach Haibach eher auf der sicheren Seite.

FVA 125/III [78] "Grübchen"

- Erreichte Schädigungssummen im Bereich $D = 0,5 \dots 2,0$;
- Minerregel auch bei Lastkollektivformen mit mehreren gleichschädigenden Lastniveaus anwendbar;
- Reihenfolgeeinfluss ist vorhanden (Blockprogramm vs. Zufallslast, fallendes vs. steigendes Lastkollektiv), wirkt sich jedoch ausschließlich in Richtung höherer Schadenssummen ($> 1,0$) aus;
- Thermische Trägheit ist zu beachten;
- Teilweise positive Effekte aus Einlauf durch Niedriglasten;
- Dauerfestigkeit kann durch Hochlasten absinken; Wahl der SAH Miner-Haibach oder Miner elementar (Miner-Haibach kann zu unsicher sein);
- Effekt der Reihenfolge der Lastaufbringung vermindert sich mit zunehmender zeitlicher Durchmischung des Lastkollektivs.

FVA 188/I [229] "Zahnfußbruch"

- SAH „Miner original“ liefert hinsichtlich der Streubreite zufriedenstellende Ergebnisse im Vergleich zu anderen SAH für die Schadensart Zahnfußbruch (Schadenssumme im Mittel ca. $D = 1$);
- Kein Einfluss der Lastreihenfolge;

- Lasten unterhalb 50% der ursprünglichen Dauerfestigkeit haben keinen Einfluss auf die Bauteilschädigung;
- Dauerfestigkeit sinkt erst bei Vorschädigung im Bereich der Anrisslinie ab;
- Auslegungsrechnung mit $D_{zul} = 0,5$ (relative Miner-Regel).

FVA 188/II [227] "Zahnfußbruch"

- SAH „Miner original“ und „Miner-Haibach“ liefern hinsichtlich der erreichten Streubreiten akzeptable Ergebnisse für die Schadensart Zahnfußbruch;
- Zufallsfolgenversuche erreichen deutlich geringere Lebensdauern als Blockprogrammversuche;
- Teilfolgenlänge hat Einfluss auf die Lebensdauer;
- Sonderereignisse und bei Lastrichtungsumkehr aufgebrachte Sonderereignisse mindern die Lebensdauer deutlich;
- Zahnradgeometrie hat Einfluss auf die Lebensdauer;
- Empfehlung, die SAH „Miner-Haibach“ mit einer reduzierten Schadenssumme $D_{zul} = 0,1 \dots 0,2$ (abhängig von der zu Grunde liegenden Wöhlerlinie) zu verwenden.

FZG/Schwiebacher [218] untersucht im FVA Forschungsvorhaben 374/I zusätzlich die Auswirkung von Sonderereignissen auf die Zahnfußtragfähigkeit. Er untersucht dabei einsatzgehärtete und nitrierte Zahnräder. Insgesamt zeigen seine Untersuchungen, dass ein Abfall der Dauerfestigkeit bei Sonderereignissen im Zeitfestigkeitsgebiet nur berücksichtigt werden muss, wenn die Belastung durch das Sonderereignis die Anrisslinie überschreitet. Überschreitet das Sonderereignis die Anrisslinie, ist selbst die Berechnung der Lebensdauer nach der SAH Miner-Haibach zu unsicher. Darüber hinaus stellt er einen negativen Einfluss einer Lastrichtungsumkehr auf die Zahnfußtragfähigkeit fest.

FZG/Elstorpff [80] führt Betriebsfestigkeitsuntersuchungen mit Lastanteilen im hohen Zeitfestigkeitsgebiet durch und erhält hinsichtlich Grübchen ertragbare Schadenssummen mit Mittelwerten $> 1,0$ fast unabhängig von der verwendeten SAH (auf Grund der hohen Anteile der Lasten im Zeitfestigkeitsgebiet). Darüber hinaus wird festgestellt, dass die nach DIN berechneten Wöhlerlinien im Zeitfestigkeitsgebiet deutlich flacher verlaufen als die experimentell ermittelten.

2.5.3 Restlebensdauer von vorgeschädigten Komponenten

Im Rahmen der Untersuchungen zur Restlebensdauer von vorgeschädigten Komponenten wird nachfolgend vor allem auf Ermüdungsschäden analog zu den Zahnradschäden Grübchen und Zahnfußbruch eingegangen. Kontinuierlich fortschreitende Mechanismen wie Verschleiß oder Graufleckigkeit werden nicht näher betrachtet. Um die Restlebensdauer von vorgeschädigten Komponenten hinsichtlich Ermüdungsschäden beurteilen zu können, ist es in der Regel unumgänglich, durch umfangreiche Analysen die Werkstoffeigenschaften zu analysieren. Charakteristisch für klassische Ermüdungsschäden ist, dass der Schaden bis zum ersten Anriss oder noch länger visuell nicht sichtbar ist. Mit Hilfe von Condition Monitoring [47, 92] ist es z.B. hinsichtlich Zahnfußbruch möglich, den ersten Anriss durch äußere Schwingungsüberwachung zu detektieren. Bei Grübchenschäden ist dies bisher erst dann möglich, wenn bereits ein Grübchen an der Oberfläche zu erkennen ist.

FZG/Elstorpff [80] führt Grübchenversuche an Zahnrädern durch und dokumentiert die Veränderung der Zahnflankenform sowie der Eigenspannungen im Betrieb. Hinsichtlich der Flankenformänderung bestätigt er vorrangig die Berechnungsgleichung von FZG/Schönenbeck [210] zur Graufleckenbildung. Die durchgeführten Eigenspannungsmessungen zeigen eine deutliche Veränderung der Eigenspannungen sowohl an der Oberfläche als auch in der Werkstofftiefe. Eine Korrelation zwischen Grübchenschädigung und Eigenspannungstiefenverlauf konnte Elstorpff jedoch nicht ableiten.

FZG/Ziegler [257] führte stichprobenartige, qualitative Untersuchungen zur Veränderung des Gefügestands sowie des Eigenspannungs- und Restaustenitgehalts mit zunehmender Grübchenschädigung durch. Eindeutige Tendenzen sowie quantitative Werte lassen sich jedoch nicht ableiten.

Voskamp [238] untersucht Gefügeänderungen an Innenringen von Rillenkugellagern aus 100Cr6. Zu Beginn der Laufzeit beschreibt er zunächst Aufhärtungen und die Zunahme von Eigenspannungen sowie anschließend eine stabile Phase ohne wesentliche Änderungen der Gefügeeigenschaften. Im Bereich der Ermüdung bei $> 100 \cdot 10^6$ Lastspielen wird bei hohen Beanspruchungen ein Härteabbau und eine Veränderung des Eigenspannungszustands beschrieben. In Schliiffbildern zeigen sich diese Änderungen in Form von DEA (dark etching areas) und WEA (white etching areas). Insgesamt ist mit Hilfe der Untersuchungen von Voskamp eine Ermittlung der Restlebensdauer von Wälzlagerinnenringen möglich. Bader [48] bestätigt die Erkenntnisse von Voskamp [238] an nitrierten Rollen.

Inacker und FZG/Radev [131, 132, 133] untersuchen die Ausbildung von Triboschutzschichten an Wälzkontakten abhängig von der Additivierung und Schmierstofftemperatur über der Laufzeit. FZG/Koller [150] und FZG/Schwienbacher [124, 219] untersuchen u.a. verschiedene Randzoneneigenschaften von Zahnflanken. Hierzu wenden sie verschiedene zerstörende und zerstörungsfreie Analysemethoden an. Darüber hinaus wird bestätigt, dass die Randzoneneigenschaften eine maßgebende Bedeutung für die Flankentragfähigkeit der untersuchten Verzahnung haben.

Starke, Walther und Eifler [228], sowie Sun, Yang und Guo [230] zeigen, dass durch Messung des elektrischen Widerstandes an verschiedenen Werkstoffen der Schädigungszustand bestimmt werden kann. Die Änderung des spezifischen elektrischen Widerstandes wird dabei mit zunehmender Schädigung korreliert. Eine Anwendbarkeit dieser Methoden zur Vorhersage der Restlebensdauer von Zahnrädern wurde bisher nicht überprüft.

Umfassende und systematische Untersuchungen zum Einfluss von Belastungen im Betrieb auf die Gefügeeigenschaften von Verzahnungen und Rückschlüsse auf die Restlebensdauer von Zahnflanken wurden bisher allerdings nicht durchgeführt.

3 Grundgedanken zur Erweiterung der Lebensdauerberechnung von Zahnradgetrieben

Im Folgenden werden einige Grundgedanken zur Erweiterung der Lebensdauerberechnung von Zahnradgetrieben bei Lastkollektivbelastung gezeigt. Im Speziellen wird hierbei auf Methoden zur Lebensdauerberechnung sowie zur Bestimmung der Beanspruchbarkeit / Belastbarkeit eingegangen. Die Belastung in Form eines konkreten Drehmoment-Lastkollektivs am Getriebeeingang wird dabei als gegeben angenommen. Streuungen der Belastung werden nur am Rande diskutiert, wenngleich diese großen Einfluss auf die erzielten Berechnungsergebnisse haben können.

3.1 Betrachtete Schadensmechanismen

Erfolgt eine Auslegung auf eine definierte Lebensdauer, so werden in der Regel nur Ermüdungsschäden betrachtet, bei welchen jedes Lastspiel im Zeitfestigkeitsgebiet eine schädigende Wirkung zeigt. Klassische Ermüdungsschäden an Zahnradern sind Grübchen, Zahnfußbruch und Zahnflankenbruch. Auch Graufleckigkeit und Verschleiß können im Rahmen einer Betriebsfestigkeitsrechnung in vergleichbarer Weise zu Ermüdungsschäden betrachtet werden, da auch hierbei die Schädigung mit zunehmender Laufzeit steigt. Fressen ist ein typischer Spontanschaden und tritt auf, wenn kritische Betriebsbedingungen erreicht sind. Im Rahmen der Zahnradauslegung müssen also die kritischsten Betriebsbedingungen (Kombination aus Schmierstoff, Öltemperatur, Flankenpressung und Drehzahl) identifiziert werden und für diese eine Berechnung der Fresstragfähigkeit durchgeführt werden.

Hauptaugenmerk der Lebensdauerberechnung von Zahnradgetrieben liegt auf den klassischen Ermüdungsschäden Grübchen, Zahnfußbruch und Zahnflankenbruch. Für alle drei Schadensarten ist der tatsächliche Ermüdungszustand des eingebauten Bauteils durch übliche Methoden nicht messbar und vor allem auch visuell nicht erkennbar. Durch aufwändige Messtechnik ist hinsichtlich Zahnfußbruch der Anriss [218] und hinsichtlich Grübchenschäden ein beginnender Ausbruch auf der Zahnflanke [92] im laufenden Betrieb detektierbar. Da in der Regel sowohl der Anriss des Zahnfußes als auch ein beginnender Ausbruch auf der Zahnflanke erst kurz vor Auftreten des tatsächlichen Schadenskriteriums erkennbar sind, kann auch auf diesem Wege keine zuverlässige Aussage zur Restlebensdauer getroffen werden. Für die Schadensart Zahnflankenbruch mit Rissausgang unterhalb der Oberfläche ist eine Detektion des Anrisses im laufenden Betrieb bisher noch nicht dokumentiert. Mittels Ultraschallprüfung können zwar deutlich ausgeprägte Risse im Stillstand erkannt werden, eine frühzeitige Detektion von Anrissen ist bisher jedoch nicht möglich. Wie später in dieser Arbeit noch gezeigt, kann der Schädigungsgrad hinsichtlich Grübchen zwar durch umfangreiche Werkstoffuntersuchungen abgeschätzt werden, für die praktische Anwendung ist dieses Verfahren bisher jedoch noch zu aufwändig und auch zu unsicher.

Bei Verschleiß und Graufleckigkeit ist der Schadensfortschritt direkt messbar und visuell im Rahmen von regelmäßigen Inspektionen feststellbar. Zudem führen beide Phänomene üblicherweise nicht zum Komplettausfall eines Getriebes und sind für manche Anwendungsbereiche sogar tolerierbar. Durch die kontinuierlich fortschreitende Ausprägung der Auskolkungstiefe mit der Laufzeit bei kritischen Bedingungen lässt sich zudem im laufenden Betrieb die Restlaufzeit ermitteln, wenn eine kritische Auskolkungstiefe vorgegeben wird. Im Hinblick auf die Betriebssicherheit des Getriebes sind Verschleiß und Graufleckigkeit somit gutmütiger als klassische Ermüdungsschäden einzuschätzen.

Insgesamt ist es somit erforderlich, eine zuverlässige Methodik zur Lebensdauerberechnung von Getriebesystemen unter Lastkollektivbelastung hinsichtlich der Schadensarten Grübchen, Zahnfußbruch und Zahnflankenbruch zu entwerfen. Für Grübchen und Zahnfußbruch existieren hierzu bereits umfangreiche, z.T. auch genormte, Berechnungsverfahren. Hinsichtlich Zahnflankenbruch gibt es zwar Ansätze zur Abschätzung des Flankenbruchrisikos bei Einstufenbelastung; eine Lastkollektivbelastung kann bisher jedoch nicht zuverlässig erfasst werden. Dies liegt auch in einer mangelnden Anzahl an experimentellen Versuchsergebnissen begründet. Im Folgenden werden daher ergänzend zu den Ausführungen im Stand des Wissens (Kapitel 2) die vorhandenen Berechnungsansätze erweitert und Empfehlungen zur betriebsfesten Auslegung gegeben.

3.2 Erweiterte Ermittlung der Beanspruchbarkeit von Zahnradgetrieben

Die praktische Beanspruchung von Getrieben sollte aus wirtschaftlichen Gründen nicht wesentlich unter der Beanspruchbarkeit liegen. Für Betriebsfestigkeitsrechnungen wird diese meist durch eine Festigkeitskennfunktion in Form einer Wöhlerlinie vorgegeben.

Während oftmals ein großer Aufwand in eine exakte Spannungsberechnung oder die Gewinnung von aussagekräftigen Lastkollektiven investiert wird, wird die exakte Ermittlung einer Festigkeitskennfunktion vielfach vernachlässigt, da diese mit hohem Aufwand verbunden und die Übertragbarkeit auf andere Anwendungsfälle oftmals nur ungenügend ist. Daten zu Wöhlerlinien können entweder aus Literaturangaben (z.B. ISO 6336-5 [37]) gewonnen werden oder durch experimentelle Untersuchungen ermittelt werden. Die Kennwerte sind dabei meist abhängig von Schadensart, Werkstoff, Wärmebehandlungszustand sowie weiteren Bearbeitungsschritten, wie z.B. Festigkeitsstrahlen oder Gleitschleifen. Die experimentelle Ermittlung der Wöhlerlinie an Bauteilen, die hinsichtlich Werkstoff, Wärmebehandlungs- und Fertigungszustand den späteren Bauteilen entsprechen, ist dabei stets der Verwendung von Literaturangaben vorzuziehen und dementsprechend in ISO 6336-5 [37] als Methode A spezifiziert. Neben dem Verlauf der Wöhlerlinie spielt auch die dazugehörige Ausfallwahrscheinlichkeit eine große Rolle. Im Folgenden wird daher zunächst die experimentelle Ermittlung von Festigkeitskennfunktionen näher beschrieben und anschließend eine erweiterte Zuverlässigkeitsbetrachtung durchgeführt.

3.2.1 Experimentelle Ermittlung von Festigkeitskennfunktionen

Die experimentelle Ermittlung von Festigkeitskennfunktionen hinsichtlich der Ermüdungsschäden an Zahnradern wird üblicherweise im Rahmen von Laufversuchen auf speziellen Prüfständen durchgeführt. Aufgrund des rein mechanischen Charakters von Zahnfußbruchschäden werden diese Versuche aus Effizienzgründen häufig auch auf Pulsatoren ausgeführt. Die folgenden Ausführungen zur Ermittlung der Zeit- und Dauerfestigkeit gelten unabhängig von der exakten Art der Versuchsdurchführung. Betrachtet werden daher übliche Versuchsdaten bestehend aus mehreren Versuchspunkten auf unterschiedlichen Beanspruchungshorizonten. Jeder Versuchspunkt ist definiert durch Beanspruchung, erreichte Lastspielzahl und Informationen zum Ausfallverhalten. Die erforderliche Umrechnung der äußeren, messbaren Kräfte oder Drehmomente in die resultierenden Spannungen unter Berücksichtigung der zugehörigen Faktoren wird vorausgesetzt. Die Auswertung der Versuchsdaten erfolgt getrennt in Zeit- und Dauerfestigkeitsgebiet. Vor allem für Betriebsfestigkeitsberechnungen mit vielen Lastspielen im Zeitfestigkeitsgebiet ergibt sich eine große Notwendigkeit, das Zeitfestigkeitsgebiet exakt

zu bestimmen, da dies einen großen Einfluss auf die berechneten Schadenssummen hat. Literaturangaben liefern hier häufig nur unzureichende Informationen.

3.2.1.1 Ermittlung der Dauerfestigkeit

Der Dauerfestigkeitswert hinsichtlich verschiedener Schadensmechanismen ist ein wichtiger Parameter zur Charakterisierung und Vergleichbarkeit von Stählen bezüglich ihrer Eignung zur Verwendung in Getrieben. Für die praktische Anwendung in der Betriebsfestigkeitsrechnung mit Lastanteilen im Zeitfestigkeitsgebiet spielt der exakte Dauerfestigkeitswert meist nur eine untergeordnete Rolle, da zumeist gegen eine Wöhlerlinie mit abfallendem "Dauerfestigkeits"ast (z.B. SAH Miner-Haibach) gerechnet wird. Vielfach erfolgt von unerfahrenen Anwendern der Trugschluss, dass ein Getriebe nach Erreichen einer schadensabhängigen, vorgegebenen Grenzlastspielzahl, dauerhaft ausgelegt sein müsste. Treten jedoch Lasten im Bereich der Zeitfestigkeit wiederholt auf, so kann es selbst nach sehr langen Laufzeiten ($> 1 \cdot 10^9$ Lastspiele) noch zum Ausfall durch klassische Ermüdungsschäden kommen. Dies steht nicht im Widerspruch zur Theorie einer Grenzlastspielzahl bei Einstufenbelastungen.

Die Ermittlung des Dauerfestigkeitswertes erfolgt in experimentellen Untersuchungen auf unterschiedlichen Lastniveaus. Der Abstand zweier Lastniveaus wird dabei Stufensprung d genannt. Die oberste Grenze bildet dabei meist ein Niveau, auf welchem nur Ausfälle auftreten, welches zeitgleich auch das unterste Niveau der Zeitfestigkeit ist. Das unterste (auswertbare) Niveau ist das höchste Lastniveau, auf welchem nur Durchläufer auftreten. Als Durchläufer wird dabei ein Einstufenversuch bezeichnet, welcher eine geforderte Mindestlastspielzahl / Grenzlastspielzahl (für Zahnfußbruch i.d.R. 3...6 Mio Lastspiele, für Grübchen 50 ... 100 Mio. Lastspiele, für Zahnflankenbruch bisher nicht definiert) ohne Schaden erreicht. Diese Definition ergibt sich aus der Erfordernis einer möglichst wirtschaftlichen Versuchsdurchführung. Sowohl für Zahnfußbruch als auch Grübchenschäden sind einzelne Einstufenversuche dokumentiert, welche auch weit nach diesen festgelegten Grenzen ausgefallen sind. Wo die tatsächliche Dauerfestigkeitsgrenze liegt ist u.a. von Werkstoff, Wärme- und Oberflächenbehandlung abhängig. Für übliche Getriebestähle haben sich die oben genannten Zahlen bewährt. Um eine zuverlässige Abschätzung des Mittelwertes zu erreichen, ist ergänzend zu den oben geforderten reinen Ausfall- und Durchläuferniveaus mindestens ein Mischniveau erforderlich, auf welchem sowohl Ausfälle als auch Durchläufer auftreten [64, 214]. Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich auf die Ermittlung des Dauerfestigkeitswertes für 50 % Ausfallwahrscheinlichkeit für normalverteilte Schadensarten.

Die Versuchsdurchführung kann dabei auf zwei Arten erfolgen. Wird das Horizontenverfahren angewendet, so wird auf definierten Lastniveaus eine vorgegebene Anzahl an Versuchen durchgeführt, unabhängig von den Ergebnissen der anderen Lastniveaus. Beispielsweise werden 25 Versuche auf fünf Lasthorizonten mit jeweils fünf Versuchspunkten aufgeteilt (siehe **Bild 3.1**). Diese Versuche eignen sich im Allgemeinen zur Auswertung mit dem Probitverfahren [171, 176] oder dem modifiziertem Probitverfahren [127]. Hierbei wird jedem Lasthorizont eine Ausfallwahrscheinlichkeit zugewiesen und diese in einem Gaußnetz mit der Beanspruchung auf der Abszisse eingetragen (siehe **Bild 3.1**, rechts). Beim modifizierten Probitverfahren wird dem Lasthorizont, auf welchem nur Ausfälle auftreten, die Ausfallwahrscheinlichkeit 99 % und dem Lasthorizont, auf welchem nur Durchläufer auftreten, die Ausfallwahrscheinlichkeit 2 % zugewiesen. Der Wert für 50 % Ausfallwahrscheinlichkeit wird anschließend durch eine Ausgleichsgerade bestimmt.

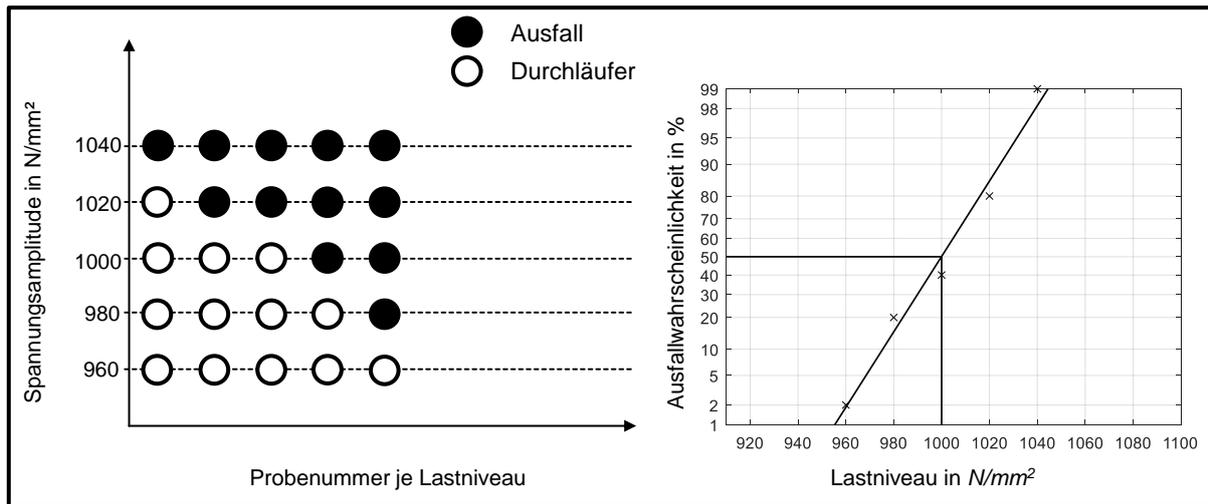


Bild 3.1: Horizontenverfahren zur Ermittlung der Dauerfestigkeit (nach [239], modifiziert)

Alternativ dazu können die Versuche auch entsprechend dem Treppenstufenverfahren durchgeführt werden (siehe **Bild 3.2**). Hierbei wird das nächste Lastniveau abhängig vom Versuchsergebnis des vorhergehenden Lastniveaus gewählt. Tritt ein Ausfall auf, so wird der nächste Versuch auf dem nächstkleineren Lastniveau durchgeführt; tritt ein Durchläufer auf, so wird für den nächsten Versuch der nächsthöhere Lasthorizont gewählt. Üblicherweise werden solche Versuche nach dem Verfahren von Hück [129] ausgewertet.

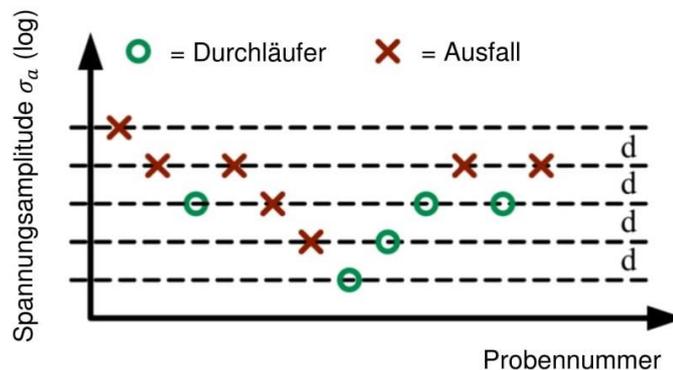


Bild 3.2: Treppenstufenverfahren [239]

Die FVA Richtlinie 563 I [169] empfiehlt zur Auswertung von kleinen Stichprobenumfängen $n < 10$ die Verwendung des modifizierten Probitverfahrens [127] und für größere Versuchsumfänge die Anwendung des Treppenstufenverfahrens nach Hück [129]. Sowohl das Probit- als auch das Treppenstufenverfahren weisen jedoch Vor- und Nachteile auf. Diese sind in **Tabelle 3.1** zusammengefasst.

Insgesamt führt also das Treppenstufenverfahren vor allem durch seine starren Vorgaben bezüglich der Versuchsdurchführung in der praktischen Anwendung zu Problemen und das Probitverfahren durch Einschränkungen bei der Auswertung von Versuchsreihen mit wenigen Versuchspunkten, da z.B. gut belegte Ausfall- oder Durchläuferebenen auch nicht anders gewichtet werden als solche mit jeweils nur zwei Versuchspunkten. Im Rahmen zweier vom Autor betreuter Studienarbeiten [96, 239] wurde daher ein erweitertes Verfahren zur Auswertung von normalverteilten Dauerfestigkeitsversuchen entwickelt. Basis dafür bildet das modifizierte Probitverfahren [127].

	Vorteile	Nachteile
Probitverfahren	<ul style="list-style-type: none"> • Versuchsdurchführung flexibel • Stufensprung variabel • Verwendung aller Versuchspunkte 	<ul style="list-style-type: none"> • (Durchläuferniveau notwendig) • (Reines Ausfallniveau notwendig) • Versuchspunkte auf Durchläufer- und Ausfallniveau werden nur unzureichend berücksichtigt
Treppenstufenverfahren	<ul style="list-style-type: none"> • Keine unnötigen Versuchspunkte auf Durchläufer- und Ausfalllastniveau • Erhöhung des Versuchsumfangs durch fiktiven Versuchspunkt 	<ul style="list-style-type: none"> • Durchläuferniveau notwendig • Reines Ausfallniveau notwendig • Konstanter Stufensprung erforderlich • Komplexe Versuchsdurchführung

Tabelle 3.1: Vor- und Nachteile unterschiedlicher Auswertemethoden für die Dauerfestigkeit

Erweitertes modifiziertes Probitverfahren

Wie auch die weiteren Verfahren zur Auswertung von Dauerfestigkeitsversuchen, geht das erweiterte modifizierte Probitverfahren von einer Normalverteilung der Versuchsdaten aus. Die Versuchsdurchführung kann als Treppenstufe oder im Horizontenverfahren erfolgen. Auswertbar sind – wie auch mit allen anderen auf dem Probitverfahren beruhenden Methoden – beide Varianten. Die Auswertung erfolgt zwischen einem reinen Durchläufer- und einem reinen Ausfallniveau. Des Weiteren sollte mindestens ein Mischniveau vorliegen. Denkbar ist jedoch auch die Auswertung zwischen mehreren Mischniveaus, sofern diese ausreichend belegt sind. Wie auch beim modifizierten Probitverfahren [127] wird dem Lasthorizont, auf welchem nur Ausfälle auftreten, die Ausfallwahrscheinlichkeit 99 % und dem Lasthorizont, auf welchem nur Durchläufer auftreten, die Ausfallwahrscheinlichkeit 2 % zugewiesen. Der Stufensprung kann variabel gewählt werden, sollte im Idealfall jedoch konstant sein.

Ähnlich dem modifizierten Treppenstufenverfahren nach Hück [129] wird davon ausgegangen, dass Durchläufer auch auf niedrigeren Laststufen durchgelaufen wären und Ausfälle auch auf höheren Lasthorizonten ausgefallen wären. Dementsprechend werden die jeweiligen Versuchspunkte auf niedrigere beziehungsweise höhere Lastniveaus dupliziert (siehe **Bild 3.3**). Der Stichprobenumfang wird somit künstlich erhöht. Während beim Beispiel in **Bild 3.3** mit dem modifizierten Probitverfahren [127] nur 25 Versuchspunkte ausgewertet werden, so werden mit dem hier vorgestellten erweiterten modifizierten Probitverfahren 34 Versuchspunkte ausgewertet.

Jedem Lasthorizont wird entsprechend folgender Gleichung eine Ausfallwahrscheinlichkeit zugewiesen und diese in ein Gaußnetz eingetragen (**Bild 3.3**, rechts). Hieraus lassen sich wie beim modifizierten Probitverfahren der Dauerfestigkeitswert für 50 % Ausfallwahrscheinlichkeit sowie prinzipiell die Standardabweichung ableiten.

$$P_A = \frac{n_{i,A}}{n_i} \tag{3.1}$$

P_A	-	Ausfallwahrscheinlichkeit	$n_{i,A}$	-	Anzahl Ausfälle auf Lastniveau i
n_i	-	Gesamtanzahl Versuche auf Lastniveau i			

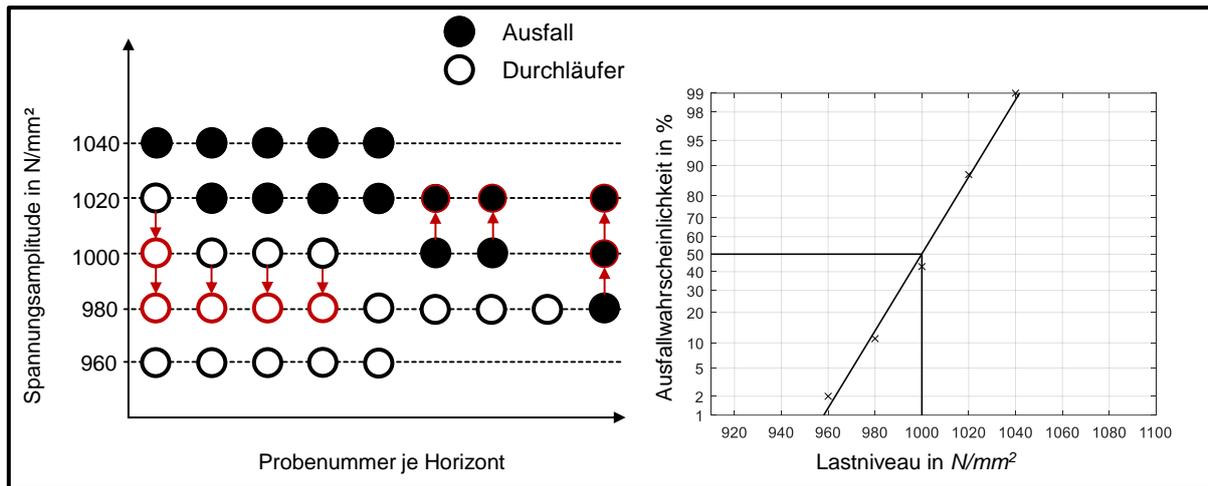


Bild 3.3: Auswertung erweitertes modifiziertes Probitverfahren (nach [239], modifiziert)

Verifikation des erweiterten modifizierten Probitverfahrens

Um die Anwendbarkeit des vorgestellten Auswerteverfahrens im Vergleich zu den bisher etablierten Auswerteverfahren zu überprüfen, wurde eine Vergleichsstudie durchgeführt. Hierzu wurden mit Hilfe einer Monte-Carlo-Simulation zufällige Versuchsdaten zu einer vorgegebenen Verteilung des Dauerfestigkeitswertes simuliert. Folgende Annahmen wurden hierzu getroffen:

- Mittelwert: $\mu = 1000$, Standardabweichung $s = 30$
- Stichprobenumfang: $n = 6, 12, 18, 24, 36, 48, 60$
- Lasthorizonte gleichverteilt um den Mittelwert zwischen 950 und 1050
- Konstanter Stufensprung: $d = 20 \dots 50$ (abhängig vom Stichprobenumfang)
- Anzahl Lastniveaus: $i = 3 \dots 6$

Für jeden Stichprobenumfang wurden die Fälle "Treppenstufe fallend", also eine von oben beginnende Treppenstufe, "Treppenstufe steigend", also eine von unten beginnende Treppenstufe, sowie "Horizontenverfahren", also eine Versuchsdurchführung auf einer vorgegebenen Anzahl von Laststufen mit jeweils gleicher Anzahl an Versuchspunkten, unterschieden. Für jeden Fall wurden 20 gültige Versuchsreihen simuliert; pro Stichprobenumfang also 60 Versuchsreihen. Die folgenden vier Auswertemethoden wurden betrachtet:

- Treppenstufenverfahren nach Hück [129]
- Probitverfahren [171, 176]
- Modifiziertes Probitverfahren [127]
- Erweitertes modifiziertes Probitverfahren (diese Arbeit, [96, 239])

Die Treppenstufenversuche wurden mit allen vier Auswertemethoden ausgewertet, die Versuche nach dem Horizontenverfahren nur mit den drei Probitverfahren. Naturgemäß sind manche Versuchsreihen nicht auswertbar und wurden daher im Folgenden nicht weiter berücksichtigt. Der oben genannte Stichprobenumfang gibt die Größe der simulierten Stichprobe an, nicht die Anzahl der auswertbaren Versuchspunkte für das jeweils betrachtete Auswerteverfahren. Die simulierten Treppenstufenversuche können naturgemäß durch das Treppenstufenverfahren nach Hück vollständig ausgewertet werden. Das Probitverfahren sowie das modifizierte Probitverfahren können streng genommen nur bei Vorliegen eines reinen Durchläufer- und Ausfallniveaus angewendet werden. Das Formelwerk erlaubt jedoch prinzipiell auch

die Anwendbarkeit in davon abweichenden Fällen. Die Ergebnisse sind dabei jedoch stets im Einzelfall zu prüfen. Im Rahmen der hier durchgeführten Studie war die Anwendbarkeit vor allem bei kleinen Stichprobenumfängen beschränkt, da die Auswertung unplausible Werte lieferte, wenn keine vernünftigen Mischniveaus oder mehrere reine Durchläufer oder Ausfallniveaus vorliegen. Die Anzahl der tatsächlich auswertbaren Versuchspunkte liegt somit kleiner oder gleich dem Stichprobenumfang. Die beschriebene Auswertung der Versuchsreihen mit dem modifizierten erweiterten Probitverfahren führt dazu, dass stets alle real vorliegenden Versuchspunkte sowie ggf. noch zusätzliche virtuelle Versuchspunkte auswertbar sind. Vor allem bei großen Stichprobenumfängen führt dies dazu, dass sich die Anzahl auswertbarer Versuchspunkte fast verdreifachen lässt.

Bild 3.4 zeigt die Auswertung der ermittelten Mittelwerte (50 % Ausfallwahrscheinlichkeit) in Abhängigkeit des Stichprobenumfangs für die drei verschiedenen Fälle sowie für die Treppenstufen gesamt. Man erkennt für alle Auswerteverfahren zunächst noch eine recht große Streuung, welche dann jedoch mit zunehmendem Stichprobenumfang schnell abnimmt. Insgesamt liegen die ermittelten Mittelwerte im Bereich des vorgegebenen Mittelwerts $\mu \pm 20$. Bereits ab einem Stichprobenumfang von ca. $n = 20$ ist die Abweichung kleiner 10 und nimmt mit steigendem Stichprobenumfang weiter ab. Die ermittelten Mittelwerte bei einer fallenden Treppenstufe liegen tendenziell über dem tatsächlichen Mittelwert und bei einer steigenden Treppenstufe darunter. Es soll hier nicht unerwähnt bleiben, dass die hier gezeigte gute Übereinstimmung der ermittelten Mittelwerte mit dem vorgegebenen Wert auch in der Wahl des Stufensprungs sowie der Laststufen begründet liegen kann. Insgesamt decken sich die Ergebnisse jedoch gut mit den Erkenntnissen von Müller [176].

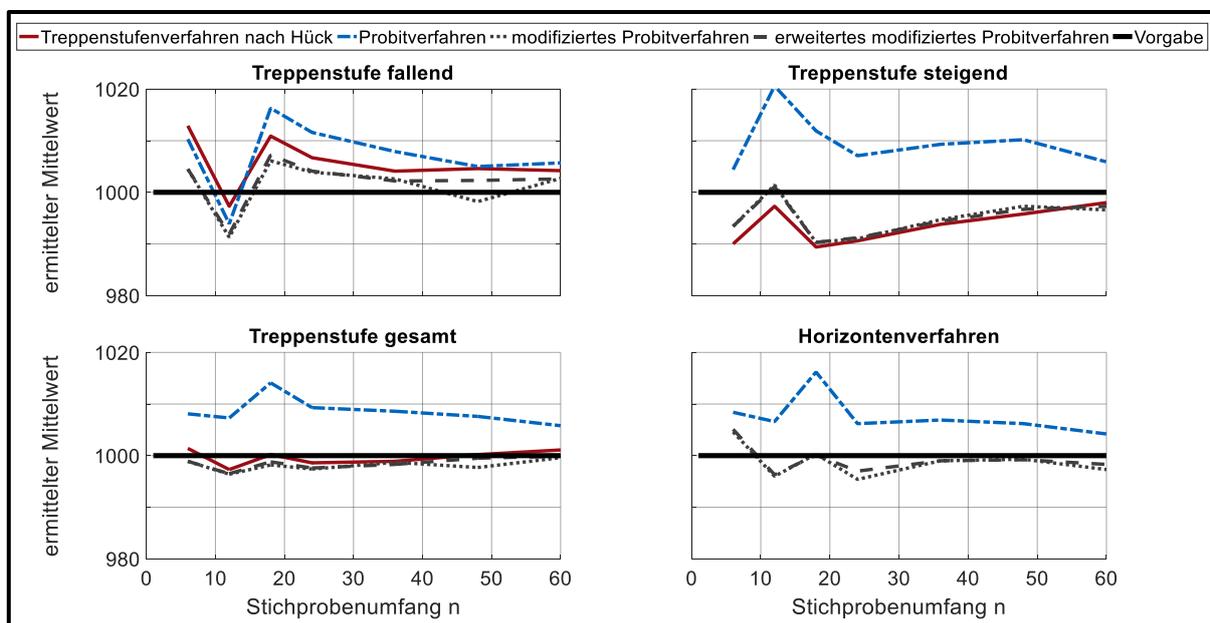


Bild 3.4: Auswertung der ermittelten Mittelwerte

Neben dem ermittelten Absolutwert wird vor allem die Streuung (Standardabweichung) der ermittelten Werte für 50 % Ausfallwahrscheinlichkeit zur Charakterisierung der Güte eines Auswerteverfahrens für Dauerfestigkeitswerte verwendet. **Bild 3.5** zeigt diese für die untersuchten Fälle. Man erkennt, dass die Streuung mit zunehmender Stichprobenanzahl abnimmt

und langsam konvergiert. Für nahezu alle betrachteten Fälle zeigt das klassische Probitverfahren die schlechteste Korrelation mit der Vorgabe und das Treppenstufenverfahren nach Hück [129] sowie das erweiterte modifizierte Probitverfahren die geringste Streuung.

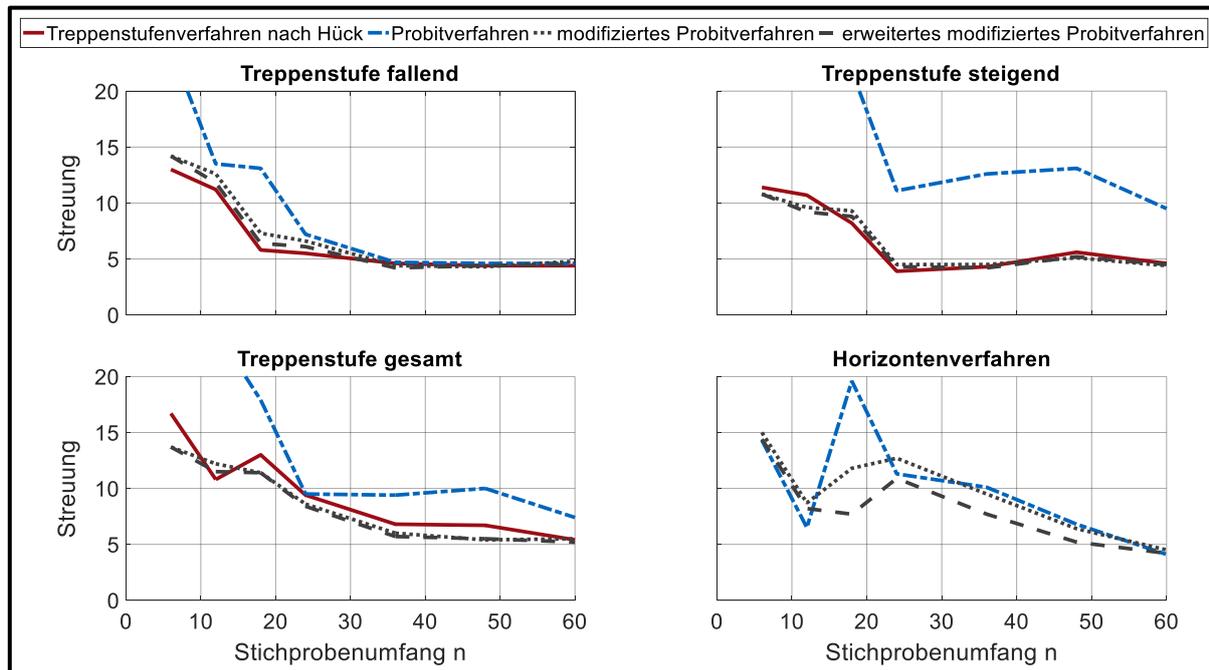


Bild 3.5: Auswertung der Streuung der ermittelten Mittelwerte

Insgesamt belegt die durchgeführte Studie die gute Anwendbarkeit des neu entwickelten erweiterten modifizierten Probitverfahrens zur Auswertung von Dauerfestigkeitsversuchen. Die erreichten Streuungen liegen auf oder unter den Werten bisher etablierter Verfahren. Die maßgeblichen Vorteile gegenüber den bisher verwendeten Verfahren zeigen sich vor allem, wenn nur unvollständige Versuchsreihen mit sehr wenigen Versuchspunkten, ungleichen Stufen sprüngen oder großen Streuungen vorliegen. Diese konnten bisher nur mit deutlichem Informationsverlust oder gar nicht ausgewertet werden. Die oben gezeigten Beispielrechnungen basieren auf simulierten Versuchspunkten, welche von allen betrachteten Verfahren gleichermaßen ausgewertet können. Eine zuverlässige Ermittlung des Dauerfestigkeitswertes ist bereits ab ca. 6...10 Versuchspunkten mit Hilfe des vorgestellten neuen Auswerteverfahrens möglich. Ergänzende Untersuchungen von Wagner [239] zeigen jedoch, dass für eine zuverlässige Abschätzung der Standardabweichung deutlich größere Versuchsumfänge notwendig sind (jedoch auch für bisher etablierte Verfahren). Da das neu entwickelte erweiterte modifizierte Probitverfahren gegenüber den bisher etablierten Verfahren keine Nachteile aufweist, wird empfohlen, dieses zur standardisierten Auswertung zukünftiger Tragfähigkeitsversuche zu verwenden.

3.2.1.2 Ermittlung der Zeitfestigkeit

Die Ermittlung des Zeitfestigkeitsastes einer Wöhlerlinie erfolgt klassischerweise im Horizontenverfahren. Auf definierten Lasthorizonten oberhalb der Dauerfestigkeit werden Versuche durchgeführt. Pro Lasthorizont sollte die gleiche Anzahl an Versuchspunkten vorliegen, um eine zuverlässige Auswertung zu ermöglichen. Die Auswertung erfolgt zunächst für jeden Lasthorizont getrennt. Abhängig von der jeweiligen Verteilungsfunktion wird jedem Versuchs-

punkt eine Ausfallwahrscheinlichkeit zugewiesen und mit Hilfe des dazugehörigen Wahrscheinlichkeitsnetzes der Wert für 50 % Ausfallwahrscheinlichkeit bestimmt. Zur Bestimmung des Zeitfestigkeitsastes wird anschließend im doppeltlogarithmischen Maßstab durch die ermittelten Punkte für 50 % Ausfallwahrscheinlichkeit auf jedem Lastniveau eine Gerade mittels der Methode der kleinsten Fehlerquadrate gelegt. Weitere Ausführungen zur Auswertung von Versuchen im Zeitfestigkeitsgebiet sind in [169, 171, 226] zu finden.

3.2.2 Zuverlässigkeitsbetrachtung bei der Tragfähigkeitsberechnung

Im vorangegangenen Abschnitt wurde die experimentelle Ermittlung von Wöhlerlinien für 50 % Ausfallwahrscheinlichkeit beschrieben. Für die praktische Anwendung sind jedoch in der Regel Wöhlerlinien mit deutlich geringerer Ausfallwahrscheinlichkeit, z.B. 1 %, relevant. Daher ist eine Umrechnung der ermittelten Werte erforderlich. Die Umrechnungsfaktoren können entweder im Rahmen der konkreten experimentellen Untersuchungen bestimmt werden, sofern der Versuchsumfang ($n > 50$) ausreichend groß ist, oder entsprechend dem Stand des Wissens gewählt werden. Dieser wird maßgebend durch die von FZG/Stahl [226] beschriebenen Werte definiert. Da diese Untersuchungen bereits länger zurückliegen, wurden die Werte im Rahmen einer vom Autor betreuten Masterarbeit [96] überprüft. Die Ergebnisse hierzu sind in Abschnitt 3.2.2.1 beschrieben.

Darauf basierend wird in Abschnitt 3.2.2.2 ein normfähiger Ansatz zur Zuverlässigkeitsbetrachtung in der Stirnradtragfähigkeitsberechnung vorgestellt, mit welchem normkonforme Sicherheiten auch für andere Ausfallwahrscheinlichkeiten als 1 % angegeben werden können.

3.2.2.1 Erweiterte statistische Auswertung vorhandener Versuchsergebnisse

Basierend auf den Untersuchungen von FZG/Stahl [226] analysiert FZG/Geitner [96, 107] in seiner vom Autor betreuten Masterarbeit neuere am Lehrstuhl vorliegende Versuchsreihen zur Zahnfuß- und Grübchentrugfähigkeit einsatzgehärteter Zahnräder hinsichtlich ihres statistischen Ausfallverhaltens. Insgesamt werden ca. 600 Versuche zur Grübchen- und ca. 2100 Versuche zur Zahnfußtragfähigkeit – und somit ein zu FVA 304 [226] vergleichbarer Umfang – ausgewertet. Die Auswertung erfolgt analog zum von FZG/Stahl [226] dokumentierten Vorgehen. Durch Normierung der Versuchspunkte können diese gemeinsam mittels des erweiterten Probitverfahren ("Probit") sowie des Treppenstufenverfahren ("TSV") ausgewertet und anschließend die zu Grunde liegenden statistischen Verteilungsfunktionen mit ihren Streu- und Lageparametern auf Basis eines sehr großen Stichprobenumfangs ermittelt werden. **Bild 3.6** zeigt Auszüge dieser Auswertung für die Grübchen-Dauerfestigkeit sowie die Zahnfuß-Dauerfestigkeit gestrahlter Zahnräder. In dieser Darstellung ist die Auswertung für verschiedene Einflussfaktoren, wie etwa der Einhärtetiefe, der Baugröße oder dem Nickelgehalt, angegeben. Aus den Diagrammen können die Umrechnungsfaktoren von einer 50 % Ausfallwahrscheinlichkeit auf andere Ausfallwahrscheinlichkeiten mit Hilfe des Umrechnungsfaktors f_{xHD} bzw. f_{xFD} abgelesen werden. Die Umrechnungsfaktoren auf 1 % Ausfallwahrscheinlichkeit liegen im Bereich von 0,91 ... 0,95; auf 10 % Ausfallwahrscheinlichkeit im Bereich 0,95 ... 0,98.

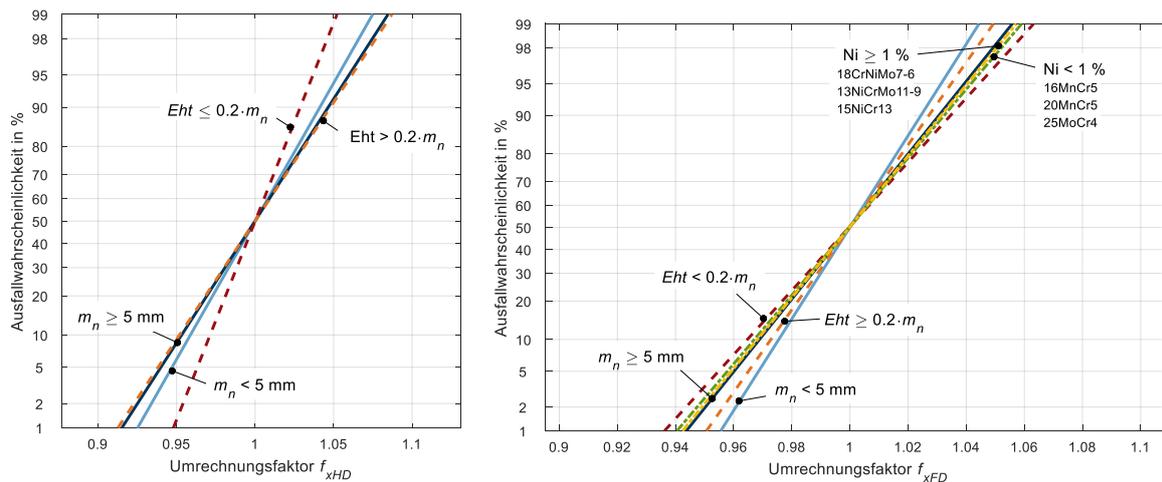


Bild 3.6: Umrechnungsfaktoren f_{xHD} für Grübchen-Dauerfestigkeit (links) und f_{xFD} für Zahnfuß-Dauerfestigkeit gestrahlter Zahnräder (rechts) für verschiedene Einflussfaktoren [96]

Tabelle 3.2 zeigt zusammenfassend die Kernaussagen der gesamten Auswertung im Dauerfestigkeitsgebiet. Gezeigt ist die Auswertung nach Geitner [96] sowie nach FVA 304 [226] sowie eine gemeinsame Auswertung aller Daten. Insgesamt lassen sich die bekannten Werte und Verteilungsfunktionen bestätigen. Die Dauerfestigkeit ist demnach sowohl für Zahnfuß- als auch Grübchentragsfähigkeit gut durch eine Gauß'sche Normalverteilung beschreibbar. Die Standardabweichung liegt für Grübchenversuche bei $s = 3,2 \dots 3,5 \%$; für Zahnfußbruchversuche bei $s = 2,5 \dots 6,0 \%$. Die entsprechenden Umrechnungsfaktoren f_{1HD} bzw. f_{1FD} von 50 % Ausfallwahrscheinlichkeit auf 1 % Ausfallwahrscheinlichkeit sind in **Tabelle 3.2** angegeben.

	Geitner Probit	Geitner TSV	FVA 304	gemeinsam Probit	gemeinsam TSV
Grübchen ¹	$s = 3,2 \%$ ($f_{1HD} = 0,92$)	$s = 3,3 \%$ ($f_{1HD} = 0,92$)	$s = 3,5 \%$ ($f_{1HD} = 0,92$)	$s = 3,5 \%$ ($f_{1HD} = 0,92$)	$s = 3,5 \%$ ($f_{1HD} = 0,92$)
Zahnfußbruch ² (gestrahlt)	$s = 2,5 \%$ ($f_{1FD} = 0,94$)	$s = 2,6 \%$ ($f_{1FD} = 0,94$)	$s = 3,4 \%$ ($f_{1FD} = 0,92$)	$s = 3,2 \%$ ($f_{1FD} = 0,93$)	$s = 3,4 \%$ ($f_{1FD} = 0,92$)
Zahnfußbruch ² (ungestrahlt)	$s = 2,9 \%$ ($f_{1FD} = 0,93$)	$s = 2,7 \%$ ($f_{1FD} = 0,94$)	$s = 6,0 \%$ ($f_{1FD} = 0,86$)	$s = 5,3 \%$ ($f_{1FD} = 0,88$)	$s = 5,4 \%$ ($f_{1FD} = 0,87$)

1) Laufversuch 2) Pulsatorversuch

Tabelle 3.2: Auswertung Dauerfestigkeit – Standardabweichungen bei Normalverteilung [96]

Die Auswertung des Zeitfestigkeitsgebiets ist in **Tabelle 3.3** dargestellt. Auch hier bestätigt die neuere Auswertung die bereits aus FVA 304 [226] bekannten Werte hinsichtlich zu Grunde liegender Verteilungsfunktion und Streuparametern. Ausfälle durch Grübchenschäden sind demnach in Richtung der Lastspielzahlen weibullverteilt mit einem konstanten Weibullparameter $b = 2,8 \dots 3,2$. Zahnfußbruchschäden sind logarithmisch normalverteilt mit einer vom Lastniveau (charakterisiert durch Y_{NT}) abhängigen Standardabweichung. Auch die entsprechenden Umrechnungsfaktoren f_{1HN} sowie f_{1FN} sind in **Tabelle 3.3** angegeben. Insgesamt zeigt sich, dass Grübchenschäden im Zeitfestigkeitsgebiet deutlich größere Streuungen aufweisen als Zahnfußbruchversuche.

Ist für einen gegebenen einsatzgehärteten Werkstoff die Wöhlerlinie für 50 % Ausfallwahrscheinlichkeit bekannt, so ist mit den gezeigten Umrechnungsfaktoren eine Umrechnung auf andere Ausfallwahrscheinlichkeiten möglich. Im Zeitfestigkeitsgebiet sollte die Umrechnung

für jedes Lastniveau getrennt erfolgen und anschließend ein neuer Zeitfestigkeitsast mit Hilfe der Methode der kleinsten Fehlerquadrate bestimmt werden. Die Steigung der Wöhlerlinie sowie der Schnittpunkt mit dem Dauerfestigkeitsgebiet können sich dabei u.U. ändern.

	Verteilungsfunktion	Geitner	FVA 304
Grübchen ¹	Weibull	$b = 2,8$ ($f_{1HN} = 0,22$)	$b = 3,2$ ($f_{1HN} = 0,26$)
Zahnfußbruch ² (gestrahlt)	Gaußlog	$s_{log} = 0,05 \dots 0,15$ je Y_{NT} ($f_{1FN} = 0,77 \dots 0,43$)	$s_{log} = 0,06 \dots 0,13$ je Y_{NT} ($f_{1FN} = 0,73 \dots 0,50$)
Zahnfußbruch ² (ungestrahlt)	Gaußlog	$s_{log} = 0,07 \dots 0,10$ je Y_{NT} ($f_{1FN} = 0,69 \dots 0,61$)	$s_{log} = 0,06 \dots 0,11$ je Y_{NT} ($f_{1FN} = 0,71 \dots 0,55$)
1) Laufversuch 2) Pulsatorversuch			

Tabelle 3.3: Auswertung Zeitfestigkeit nach Weibull-Parameter b und Standardabweichung s [96]

3.2.2.2 Normfähiger Ansatz zur Zuverlässigkeitsbetrachtung in der Stirnradtragfähigkeitsberechnung

Neben der erweiterten statistischen Analyse vorhandener Versuchsdaten zeigt Geitner [96] in seiner vom Autor betreuten Masterarbeit einen normfähigen Ansatz zur Zuverlässigkeitsbetrachtung in der Stirnradtragfähigkeitsberechnung, welcher sich in die Normberechnung nach ISO 6336 eingliedern lässt. Ähnlich den bereits vorhandenen Ansätzen für Wälzlager nach ISO 281 [33] sowie für Stirnräder nach AGMA 2001 [3] wird ein zusätzlicher Faktor Z_Z (Grübchentrugfähigkeit nach ISO 6336-2 [35]) bzw. Y_Z (Zahnfußtragfähigkeit nach ISO 6336-3 [36]) eingeführt. Dieser wird mit der zulässigen Flankenpressung σ_{HP} bzw. σ_{FP} multipliziert.

$$\sigma_{HP,Z} = Z_Z \cdot \sigma_{HP} \tag{3.2}$$

$$\sigma_{FP,Z} = Y_Z \cdot \sigma_{FP} \tag{3.3}$$

Z_Z	-	Zuverlässigkeitsfaktor Flanke	Y_Z	-	Zuverlässigkeitsfaktor Fuß
σ_{HP}	N/mm ²	Zulässige Flankenpressung (Ausfallwahrscheinlichkeit 1 %)	σ_{FP}	N/mm ²	Zulässige Zahnfußspannung (Ausfallwahrscheinlichkeit 1 %)
$\sigma_{HP,Z}$	N/mm ²	Zulässige Flankenpressung (Ausfallwahrscheinlichkeit xx %)	$\sigma_{FP,Z}$	N/mm ²	Zulässige Zahnfußspannung (Ausfallwahrscheinlichkeit xx %)

Da nach ISO 6336 immer nur eine Lastsicherheit berechnet wird, d.h. eine auftretende Spannung einer zulässigen Spannung gegenübergestellt wird, muss der Zuverlässigkeitsfaktor für das Dauer- und Zeitfestigkeitsgebiet unterschiedlich berechnet werden. Dieser Ansatz ist beispielsweise in AGMA 2001 [3] nicht enthalten, was zu unplausiblen Berechnungen im Zeitfestigkeitsgebiet führt, wie etwa Beermann [55] zeigt. Die Zuverlässigkeitsfaktoren sind lediglich vom Formparameter der zu Grunde liegenden Verteilungsfunktion (Standardabweichung s bzw. s_{log} sowie Weibullparameter b) und der Wöhlerliniensteigung k abhängig. Weitere Größen werden zur Berechnung nicht benötigt. Ein von Geitner [96] englischsprachig ausformulierter Entwurf des Normansatzes zur Implementierung in die ISO 6336 ist im Anhang zu finden. Dort werden auch die formelmäßigen Zusammenhänge erläutert.

3.3 Schadensakkumulation

Die existierenden Grundlagen der Schadensakkumulation bei Zahnradschäden wurden bereits im Stand des Wissens erläutert. Im Folgenden wird eine globale und lokale Betrachtung unterschieden. Die globale Schadensakkumulation ist hierbei als Überbegriff über alle üblichen Methoden der Lebensdauerberechnung von Zahnradgetrieben zu sehen. Die Berechnung erfolgt "global" für einen Zahneingriff unter Berücksichtigung der auftretenden Belastung sowie der Belastbarkeit. Eine lokal aufgelöste Betrachtung für verschiedene Bereiche der Zahnflanke oder des Zahnfußes erfolgt nicht.

Basis der Überlegungen zur lokalen Schadensakkumulation bilden unter anderem die Ansätze nach FZG/Ziegler [257]. Der Zahn wird hierbei in unterschiedliche Bereiche beziehungsweise Volumenelemente eingeteilt. Die Schadensakkumulation erfolgt mit Hilfe lokal aufgelöster Beanspruchungs- und Festigkeitswerte.

Zur überschlägigen Auslegung von Getrieben unter Lastkollektivbelastung ist eine globale Betrachtung in der Regel vollkommen ausreichend. Eine lokale Betrachtung kann nur einen Mehrwert liefern, wenn die Eingangsgrößen in entsprechend hoher Qualität vorliegen. Die Ergebnisse der lokalen Betrachtung liefern vor allem dann einen Mehrwert, wenn sich in Abhängigkeit der Last die Breitenlastverteilung der Verzahnung stark ändert. Eine globale Betrachtung kann hierbei die tatsächlich erreichbare Lebensdauer oft unterschätzen. Im Folgenden werden Hinweise zur Erweiterung der bestehenden Methoden gegeben. Insbesondere wird hierbei die Schadensart Flankenbruch betrachtet, da diese bisher noch kaum rechnerisch im Rahmen einer Betriebsfestigkeitsrechnung erfasst werden kann. Nicht unerwähnt bleiben sollte an dieser Stelle jedoch, dass die Ausführungen zur Schadensart Flankenbruch bisher nur auf theoretischen Überlegungen beruhen und auf Grund meist fehlender Werkstoffkennwerte nicht ohne weitere experimentelle Untersuchungen in die praktische Anwendung übertragen werden können. Insbesondere fehlen noch Versuchsergebnisse zum Verhalten unter Lastkollektivbeanspruchung. Die bisherigen Berechnungsmodelle gelten streng genommen nur für eine dauerfeste Auslegung bei Einstufenbelastung. Stichversuche von FZG/Witzig [250] zeigen jedoch eine Minderung der dauerfest ertragbaren Belastung bei vorhergehenden Überlasten im Zeitfestigkeitsgebiet.

3.3.1 Globale Betrachtung

Die globale Schadensakkumulation beschreibt die genormte oder anwendungsspezifische Auslegung von Zahnradgetrieben unter Lastkollektivbelastung für verschiedene Schadensarten. Durch die Verknüpfung von Wöhlerlinie und Lastkollektiv mit Hilfe einer geeigneten Schadensakkumulationshypothese kann eine Schadenssumme D ermittelt werden. Übersteigt diese eine zulässige Schadenssumme D_{zul} , so ist nach dieser Laufzeit mit einem Schaden zu rechnen. Für die Schadensarten Grübchen und Zahnfußbruch gelten nach [78, 208, 227, 229] die Empfehlungen in **Tabelle 3.4** zur Wahl der SAH sowie der zulässigen Schadenssumme. Aufgrund fehlender Versuchserfahrungen können für Flankenbruch keine zahlenmäßigen Empfehlungen abgeleitet werden. Stichversuche von FZG/Witzig [250] zeigen jedoch eine Minderung der dauerfest ertragbaren Belastung bei vorhergehenden Überlasten im Zeitfestigkeitsgebiet. Die Wahl der SAH Miner original kann daher nicht empfohlen werden.

Die Ermittlung von Wöhlerlinien hinsichtlich der Schadensarten Grübchen und Zahnfußbruch wurde bereits ausführlich beschrieben. Abgeschätzte Wöhlerlinien zur Schadensart Zahnflankenbruch sind im folgenden Kapitel zu finden.

	Grübchen	Zahnfußbruch
Schadensakkumulationshypothese	Miner-Haibach	Miner-Haibach
Zulässige Schadenssumme D_{zul}	0,85 ... 1,0	0,2

Tabelle 3.4: Empfehlungen zur globalen Schadensakkumulation

Soll eine genormte Berechnung einer Verzahnungsstufe unter Lastkollektivbelastung nach ISO 6336-2 [35] oder ISO 6336-3 [36] erfolgen, so wird das Lastkollektiv in Form des Anwendungsfaktors K_A (als Betriebsfaktor) berücksichtigt. K_A kann dabei entsprechend ISO 6336-6 [38] ausgehend von einem Nennmoment und dem gegebenen Lastkollektiv berechnet werden. Hierzu wird eine Wöhlerlinie sowie ein definiertes Abschneidekriterium (= Knicklastspielzahl der Wöhlerlinie) verwendet. Beide Kenngrößen sind abhängig von der betrachteten Schadensart und für Grübchen und Zahnfußbruch bekannt. Hinsichtlich Zahnflankenbruch existieren bisher noch nicht genügend experimentell abgesicherte Erkenntnisse. Sobald diese verfügbar sind, sollten jedoch die Anwendungsfaktoren schadensartabhängig unterschieden werden: K_{AH} für Grübchen, K_{AF} für Zahnfußbruch und K_{AFF} für Zahnflankenbruch.

3.3.2 Lokale Betrachtung

3.3.2.1 Eingangsgrößen, Annahmen und Grenzen

Die nachfolgend beschriebene Berechnungsmethodik zur Lebensdauer von Getriebesystemen beruht auf einer detaillierten, lokalen Betrachtung des Zahnkontakts. Eingangsgrößen sind daher neben den spezifischen Belastungskollektiven auch die Getriebedaten der betrachteten Stufen inklusive der Wellen- und Lagerdaten. Aus diesen Kenngrößen kann für eine gegebene äußere Belastung (Drehmoment, Drehzahl, Öltemperatur, ...) die innere Beanspruchung des Getriebes ermittelt werden.

Während die Getriebedaten und Geometriegrößen der betrachteten Verzahnungsstufen üblicherweise auch im frühen Auslegungsprozess bereits bekannt sind, müssen Belastungskollektive oft abgeschätzt werden. Hierzu sollten idealerweise vorhandene Messdaten aus früheren, vergleichbaren Anwendungen herangezogen werden. Durch geeignete Klassierverfahren (z.B. nach DIN oder Bertsche [20, 57]) kann aus solchen Messdaten ein Lastkollektiv abgeleitet werden. Dieses sollte repräsentativ für die spezifische Anwendung sein. Gegebenenfalls sind ergänzende Berechnungen auch mit Variationen des Ausgangslastkollektivs durchzuführen, um die Sensibilität des Systems hinsichtlich einer Variation der Last abzuschätzen.

3.3.2.2 Grundlagen

Die lokale Beanspruchung der Zahnflanke hängt im Allgemeinen von der äußeren Belastung, der Lagerung sowie Verzahnungskorrekturen ab. Vor allem in Zahnbreitenrichtung können sich signifikante Unterschiede in der Lastverteilung bei verschiedenen Belastungen ergeben. Das Forschungsvorhaben IGF 15432 / FVA 554 I [256] hat dazu eine schrägungswinkelkorrigierte Verzahnung mit unsymmetrischer Lagerung untersucht. Dies führt sowohl bei niedrigen als auch hohen Drehmomenten zu einer stark einseitigen Beanspruchung auf unterschiedlichen Seiten der Verzahnung. Mit den klassischen Methoden der Tragfähigkeitsberechnung (beispielsweise nach ISO 6336 [35, 36]) kann dieser Umstand bei einer Einstufenbelastung

mit dem Breitenfaktor $K_{H\beta}$ bzw. $K_{F\beta}$ erfasst werden. Ein vollumfänglicher, lokal aufgelöster Nachweis der Betriebsfestigkeit von Getrieben unter Lastkollektivbeanspruchung wird bisher jedoch in der praktischen Anwendung nicht verwendet.

Im Forschungsvorhaben IGF 15432 / FVA 554 I „Systemlebensdauerprüfung“ [256] wurde ein Modell zur lokalen Schadensakkumulation über der Zahnbreite hinsichtlich der Schadensarten Grübchen, Zahnfußbruch, Verschleiß und Graufleckigkeit vorgestellt. Darauf basierend können Lastkollektive unter der Maßgabe eines gleichbleibenden Schadensmechanismus gerafft werden und als Grundlage für verkürzte Lebensdauertests dienen.

Die Schadensart Grübchen wird im bestehenden Modell [256] lokal über der Breite aufgelöst im inneren Einzeleingriffspunkt B betrachtet. Die Tragfähigkeit hinsichtlich Zahnfußbruch wird lokal entsprechend der Lastaufteilung in Zahnbreitenrichtung betrachtet. Die Verzahnung lässt sich für die Betrachtungen zur lokalen Schadensakkumulation also in Breitenrichtung in eine endliche Zahl an Segmenten einteilen. Mit Hilfe dieser Erkenntnisse lassen sich lokale Bauteilwöhlerlinien für jedes betrachtete Breitensegment der Zahnflanke und jede Schadensart ermitteln. Die von Renius [192] eingeführte Darstellung der Bauteilwöhlerlinien bezieht sich im Regelfall auf das Drehmoment am Eingang der Getriebestufe und nicht wie sonst üblich auf die jeweilige Beanspruchung (z.B. Zahnfußspannung oder Flankenpressung). Somit ergibt sich für jedes Breitensegment der Verzahnung eine eigene lokale Bauteilwöhlerlinie (siehe Beispiel in **Bild 3.7**). Die Einhüllende dieser Bauteilwöhlerlinien ergibt die maßgebende Bauteilwöhlerlinie bei Einstufenbelastung. Der Schnittpunkt der Bauteilwöhlerlinien für jede Breitenkoordinate ergibt üblicherweise den Auslegungspunkt für die Verzahnungskorrektur.

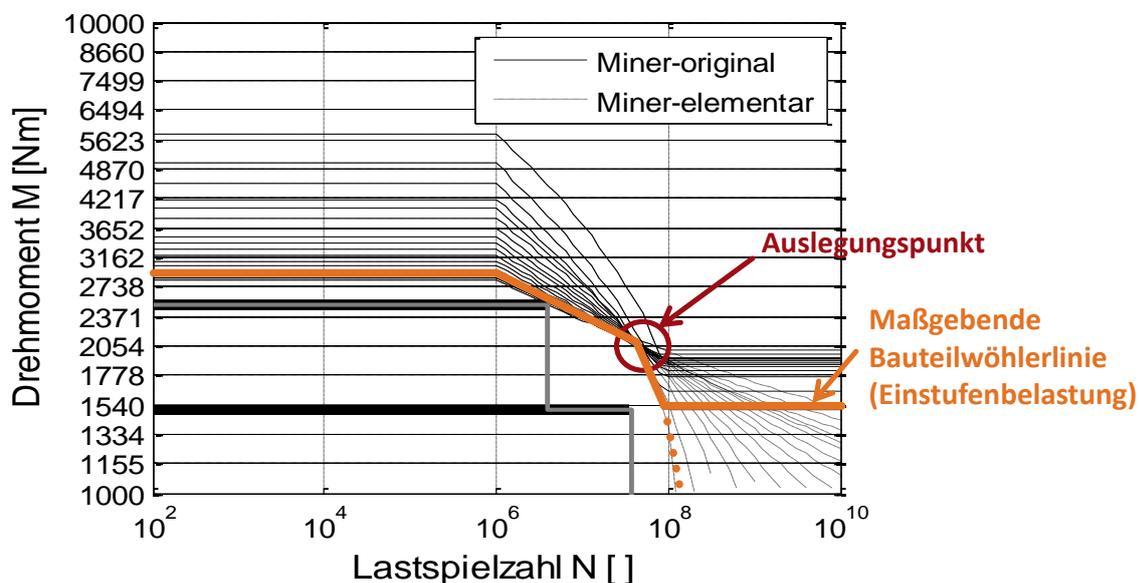


Bild 3.7: Bauteilwöhlerlinien Grübchen nach FZG/Ziegler [256]

Basierend auf den lokalen Bauteilwöhlerlinien für jedes Scheibchen hinsichtlich Zahnfußbruch und Grübchenschäden kann eine lokale Schadensakkumulation durchgeführt werden. Dabei wird für jede Kollektivstufe des Belastungskollektivs eine lokale Schädigung $D_{i,\text{lokal}}$ berechnet. Die lokalen Schädigungen werden anschließend zu einer lokalen Schädigungssumme D_{lokal} aufaddiert:

$$D_{\text{lokal}} = \sum D_{i,\text{lokal}} = \sum \frac{h_i}{N_{i,\text{lokal}}} \tag{3.4}$$

D	- Schadenssumme	h_i	- Lastspielzahl auf Laststufe i
N	- Zulässige Lastspielzahl auf Laststufe i	i	- Laststufe

Bild 3.8 verdeutlicht den Zusammenhang grafisch an Hand der bereits erwähnten schrägungswinkelkorrigierten und unsymmetrisch gelagerten Verzahnungen aus dem Forschungsvorhaben IGF 15432 / FVA 554 I „Systemlebensdauerprüfung“ [256]. Links dargestellt ist die lokale Schadenssumme $D_{i,\text{lokal}}$ hinsichtlich der Schadensart Grübchen, aufgelöst über der Zahnbreite für zwei Laststufen des betrachteten Lastkollektivs. Man erkennt deutlich, dass bei der Laststufe bei 1500 Nm Drehmoment überwiegend die Bereiche der Zahnflanke mit großen Breitenkoordinaten ($b > 30$ mm) geschädigt werden, wohingegen bei einem Drehmoment von 2500 Nm das Maximum der Schädigung auf der anderen Seite der Flanke liegt.

Durch Aufsummieren der lokalen Schadenssummen $D_{i,\text{lokal}}$ für jedes betrachtete Scheibchen ergibt sich die im rechten Bild dargestellte lokale Schädigung für das gesamte Lastkollektiv. Würde man für das betrachtete Beispiel eine globale Schadensakkumulation nach DIN 3990-6 [19] oder ISO 6336-6 [38] durchführen, so erhält man eine (globale) Schadenssumme $D \approx 1,3$.

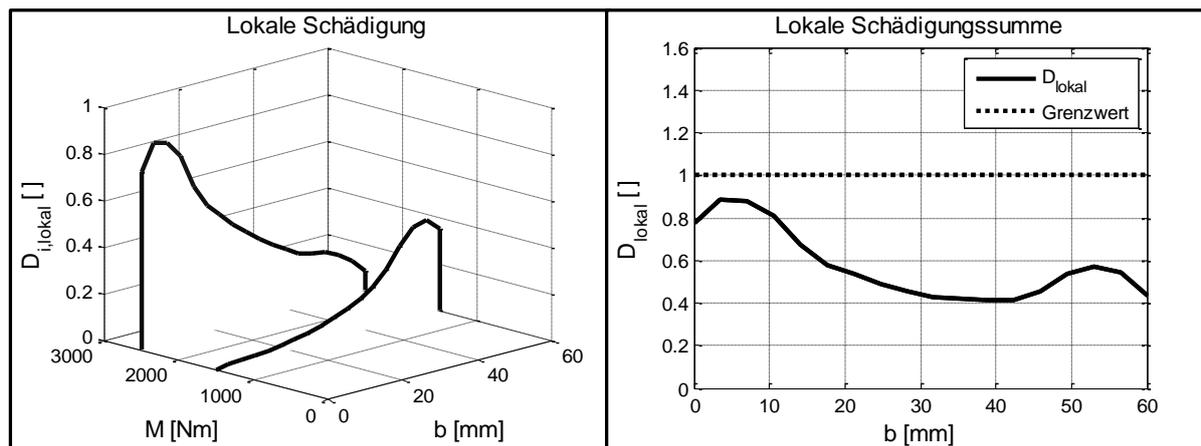


Bild 3.8: Lokale Schädigung und lokale Schadenssumme (= Schädigungssumme) [256]

Die unterschiedliche Lastverteilung für beide Laststufen wird auch bei einer normgerechten Schadensakkumulation mit dem Breitenfaktor $K_{H\beta}$ korrekt erfasst, sofern dieser mit einem höherwertigen Programm (z.B. RIKOR [181]) berechnet wird. Die Schadenssumme für die einzelnen Laststufen würde korrekt zu $D_{1500Nm} \approx 0,4$ bzw. $D_{2500Nm} \approx 0,9$ berechnet werden und somit den Maximalwerten der lokalen Schadenssumme entsprechen. Bei der globalen Schadensakkumulation werden nun jedoch nicht die lokalen Schadenssummen für jeden betrachteten Abschnitt der Verzahnung aufsummiert, sondern die beiden Maximalwerte:

$$D_{\text{global}} = \sum D_i \tag{3.5}$$

D	- Schadenssumme	i	- Laststufe
-----	-----------------	-----	-------------

Im Forschungsvorhaben IGF 15432 / FVA 554 I [256] durchgeführte Versuche auf dem FZG-Verspannungsprüfstand mit der betrachteten unsymmetrischen Lagerung haben eine gute Korrelation der Versuchsergebnisse mit den Ergebnissen der lokalen Schadensakkumulation

gezeigt. Die Schadenssumme wird also bei einer normgerechten Berechnung im Allgemeinen zu hoch berechnet und somit eine zu niedrige Sicherheit ausgewiesen. Diese Berechnung liegt somit jedoch immer auf der sicheren Seite. Sollten genaue Informationen zum Verformungsverhalten des betrachteten Getriebes vorliegen, ist die lokale Schadensakkumulation einer globalen vorzuziehen.

Die Auskolkungstiefe durch Grauflecken wird im vorhandenen Modell nach FZG/Ziegler [256] bei Lastkollektivbeanspruchung aus den Beiträgen der einzelnen Laststufen nach FZG/Schrade [213] berechnet. Eine Bauteilwöhlerlinie kann nur durch Vorgabe einer zulässigen Auskolkungstiefe angegeben werden. Verschleiß an Verzahnungen wird im vorhandenen Modell zunächst global nach FZG/Plewe [189] berechnet. Kann eine Schädigung nach Stand des Wissens ausgeschlossen werden, erfolgt keine lokale Berechnung. Bei verschleißkritischen Bedingungen erfolgt eine lokale Berechnung der Verschleißtiefe über Zahnbreite und –höhe nach FZG/Michaelis/Brinck [173] bzw. FZG/Schudy [215]. Dabei wird iterativ vorgegangen; die Verschleißbeträge werden jeweils als Korrektur im nächsten Schritt vorgegeben. Die Angabe einer Bauteilwöhlerlinie und somit eine Lebensdauerberechnung ist unter Vorgabe einer zulässigen Verschleißtiefe möglich.

3.3.2.3 Erweiterte lokale Schadensakkumulation – Schadensart Zahnflankenbruch

Mit dem vorhandenen Modell nach FZG/Ziegler [256] ist eine lokale Schadensakkumulation über Zahnbreite und –höhe möglich. Diese wird um Schäden, welche ihren Ursprung in der Werkstofftiefe haben, erweitert. FZG/Witzig [251] hat die Schadensart Zahnflankenbruch umfangreich an unterschiedlichen Werkstoffen untersucht und gibt einen praxisnahen Berechnungsansatz für die Werkstoffanstrengung A_{FF} sowie ein Kriterium für die Dauerfestigkeit ($A_{FF} < 0,8$) von flankenbruchgefährdeten Zahnradern an. Dieser Kennwert ist unabhängig von der Lastspielzahl, jedoch wurde im Vorhaben A243 / FVA 556 „Flankentragfähigkeit Werkstofftiefe“ [251] auch das Wöhlerverhalten, d.h. die Existenz eines Zeit- und Dauerfestigkeitsgebiets hinsichtlich Zahnflankenbruch experimentell bestätigt (siehe Beispiele in **Bild 3.9**). Dies bildet die Grundlage einer Betriebsfestigkeitsrechnung und somit einer lokalen Schadensakkumulation für Schäden unterhalb der Bauteiloberfläche.

Im Mittelpunkt der Arbeit von FZG/Witzig [250] stand die Angabe eines Grenzkriteriums zur Gefährdung hinsichtlich Zahnflankenbruch (Dauerfestigkeit). Aus den durchgeführten Versuchen lässt sich jedoch auch auf ein typisches Ermüdungsverhalten der Schadensart Zahnflankenbruch schließen. Die Ergebnisse lassen sich gut mit einer Wöhlerlinie beschreiben (siehe **Bild 3.10**). Das charakteristische Kriterium zur Beschreibung der Beanspruchung ist dabei die Werkstoffanstrengung A_{FF} (analog für Grübchen: auftretende Flankenpressung σ_H , für Zahnfußbruch: auftretende Zahnfußspannung σ_F) Systematische experimentelle Untersuchungen hierzu stehen jedoch noch aus.

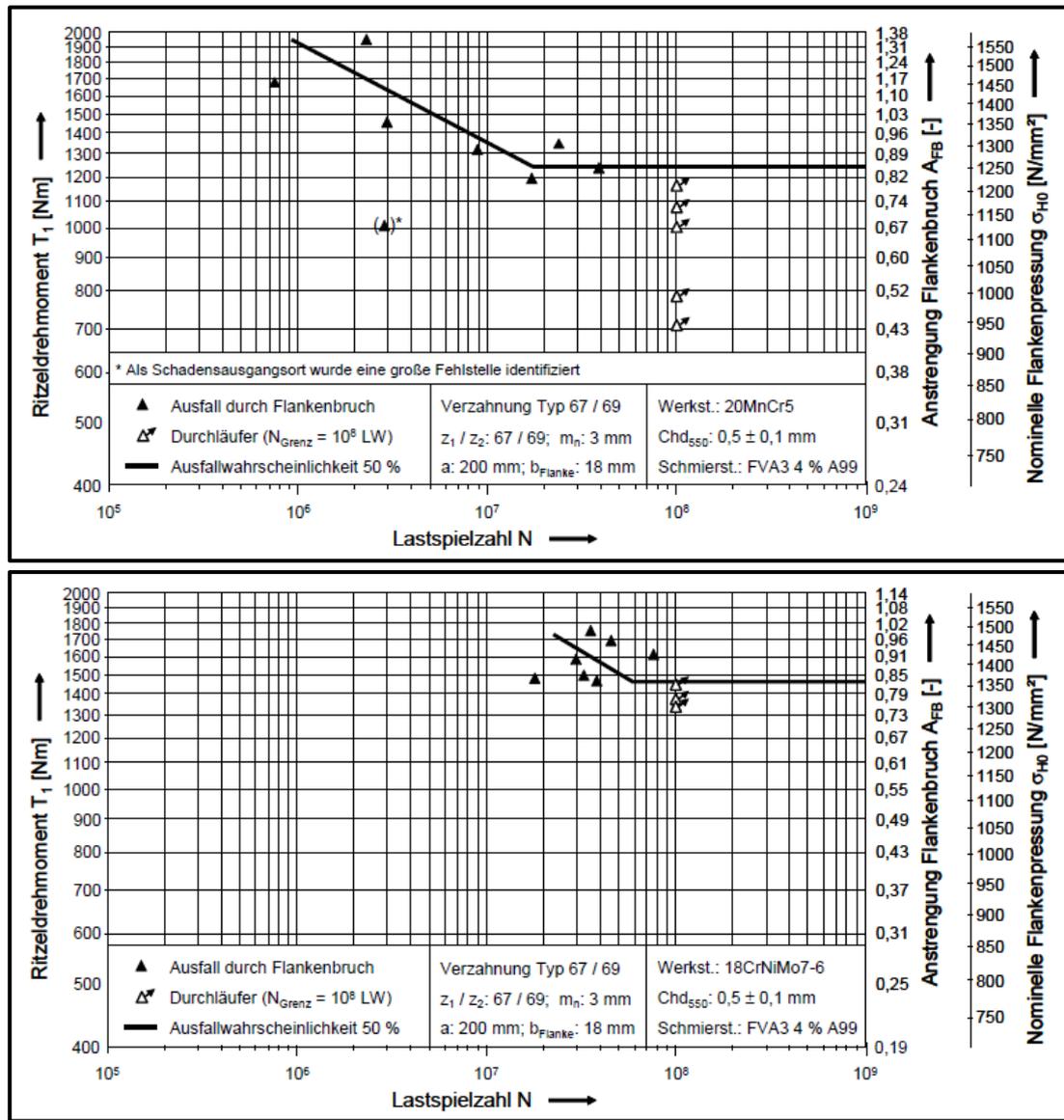


Bild 3.9: Wöhlerlinien zur Schadensart Zahnflankenbruch [251], Sicherheit gegen Zahnfußbruch für Dauerfestigkeitsniveau > 1,5

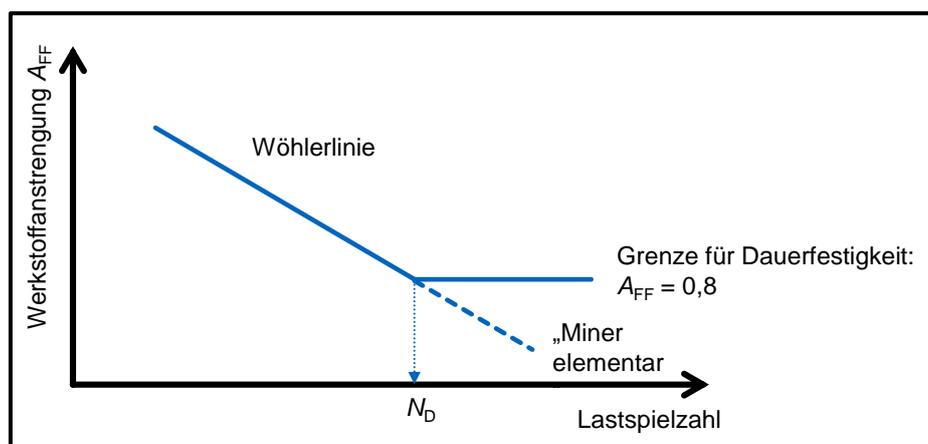


Bild 3.10: Wöhlerverhalten Zahnflankenbruch

Anhand der vorhandenen Versuchswerte von FZG/Witzig [251] lassen sich die Kennwerte der Wöhlerlinie in Form von Wöhlerliniensteigung k , Knicklastspielzahl N_D sowie in Form des dauerhaftesten Anstrengungswertes A_{FF} ermitteln. Die ermittelten Kennwerte für die im Vorhaben A243 / FVA 556 „Flankentragfähigkeit Werkstofftiefe“ [251] untersuchten Verzahnungen sind in **Tabelle 3.5** zusammengestellt. Zu beachten ist dabei, dass die angegebenen Werte für eine Wöhlerlinie mit 50 % Ausfallwahrscheinlichkeit gelten und auf die Anstrengung A_{FF} und nicht auf das Drehmoment bezogen sind. Informationen zum statistischen Ausfallverhalten der Schadensart Zahnflankenbruch sind bisher nicht vorhanden. Für diese Schadensart kann daher nach aktuellem Stand des Wissens auch keine Zuverlässigkeitsberechnung durchgeführt werden.

	Werkstoff 20MnCr5		Werkstoff 18CrNiMo7-6	
	Verzahnung 67/69 $m_n=3$	Verzahnung 40/41 $m_n=5$	Verzahnung 67/69 $m_n=3$	Verzahnung 40/41 $m_n=5$
A_{FF}	0,85	0,84	0,87	0,81
k	6,7	4,8	5,1	20,7
N_D	~ 17 Mio.	~ 50 Mio.	~ 60 Mio.	~ 26 Mio.

Tabelle 3.5: Kenngrößen Wöhlerlinie Zahnflankenbruch mit Daten aus [251]

Obwohl die experimentellen Untersuchungen zur Schadensart Zahnflankenbruch von FZG/Witzig [251] zwar auf ein Wöhlerverhalten hindeuten, darf hier nicht unerwähnt bleiben, dass die theoretischen Grundlagen von FZG/Oster [186], FZG/Hertter [116] und A243 / FVA 556 [251] zur Berechnung eines Anstrengungskennwerts der Zahnflanke in ihrer ursprünglichen Form nur für eine generelle Berechnung hinsichtlich einer Gefährdung bezüglich Zahnflankenbruch gedacht sind. Berechnungen im Zeitfestigkeitsgebiet mit begrenzten Lebensdauern sind bisher nicht vorgesehen. Nichtsdestotrotz ist der praktische Berechnungsansatz nach FZG/Witzig [250] mit den ermittelten Kennwerten der Wöhlerlinie auch für überschlägige Berechnungen im Zeitfestigkeitsgebiet geeignet. Ein geeigneter formelmäßiger Zusammenhang könnte bei Vorliegen einer ausreichenden experimentellen Basis hergeleitet werden.

Stichversuche von FZG/Witzig [250] zum Einfluss von Überlasten auf die Dauerfestigkeit belegen zudem eine Reduzierung der dauerhaft ertragbaren Drehmomente bei vorangehenden Belastungen im Zeitfestigkeitsgebiet. Dies stützt weitergehend die Vermutung, dass auch die Schadensart Zahnflankenbruch einer ausführlichen Betriebsfestigkeitsrechnung zugänglich ist und das für Ermüdungsschäden typische Verhalten zeigt. Hinsichtlich der Grenzlastspielzahl, ab welcher von einer Dauerfestigkeit bezüglich Zahnflankenbruch bei Einstufenbelastungen gesprochen werden kann, werden im Rahmen dieser Arbeit und basierend auf den experimentellen Untersuchungen von FZG/Witzig und weitergehender Erfahrungen aus der industriellen Anwendung ca. 10^8 Lastspiele empfohlen. Im Allgemeinen geht man davon aus, dass erst eine Belastung bis zum Anriss im Zeitfestigkeitsgebiet zu einer relevanten Reduzierung der (Rest-)Dauerfestigkeit führt. Bei den Schadensarten Grübchen und Zahnfußbruch liegt die Anrisslinie für einsatzgehärtete Werkstoffe auch im hohen Zeitfestigkeitsgebiet noch nahe an der

Wöhlerlinie [218]. Der Anriss beginnt bei beiden Schadensarten an der Oberfläche bzw. zumindest nahe der Oberfläche. Die hohe Festigkeit im Randbereich oberflächengehärteter Bauteile mag dazu führen, dass die Rissgeschwindigkeiten zunächst sehr gering sind und daher die (messbare) Anrisslinie nahe an der Wöhlerlinie liegt. An dieser Stelle kann vermutet werden, dass diese Grundgesetzmäßigkeiten nur schwer auf Zahnflankenbruch übertragbar sind, da das Rissgeschehen im Werkstoff, meist am Übergang zum Kerngefüge, beginnt. Somit ist es denkbar, dass bereits Belastungen mit wenigen Lastspielen im Zeitfestigkeitsgebiet zu einem deutlichen Anriss im Werkstoffinneren führen. Durch die relativ geringe Festigkeit dürften die Rissausbreitungsgeschwindigkeiten entsprechend hoch sein. Gegebenenfalls sollten hinsichtlich einer Betriebsfestigkeitsrechnung für die Schadensart Flankenbruch zukünftig auch nichtlineare Schadensakkumulationshypothesen in Betracht gezogen werden. Experimentelle Untersuchungen zum (An-)Rissgeschehen sollten dazu durchgeführt werden.

Die Werkstoffanstrengung A_{FF} kann mit Hilfe des praxisnahen Berechnungsansatzes von FZG/Witzig [251] in Abhängigkeit von Belastung, Werkstoff und Wärmebehandlung sowie der Werkstofftiefe y berechnet werden. Die Ermittlung des Anstrengungstiefenverlaufs kann für jeden Punkt auf der Zahnflanke sowohl in Breitenrichtung als auch entlang der Eingriffsstrecke erfolgen. Dies kann genutzt werden, um das Modell zur lokalen Schadensakkumulation aus dem Vorgängervorhaben zu erweitern.

Basierend auf einer berechneten Pressungsverteilung (z.B. mit Hilfe von RIKOR [181]) kann für jeden betrachteten Punkt der Anstrengungstiefenverlauf $A_{FF}(y)$ ermittelt werden. Mit Kenntnis des Anstrengungstiefenverlaufs kann somit eine dreidimensionale lokale Schadensakkumulation hinsichtlich der Schadensart Zahnflankenbruch sowohl in Zahnbreiten- und Zahnhöhenrichtung als auch in Richtung der Tiefenkoordinate y erfolgen. Man erhält für jeden betrachteten Punkt auf der Zahnflanke und zusätzlich für jede berechnete, diskrete Tiefenkoordinate eine lokale Schädigungssumme. Im Regelfall wird zur Beurteilung der Gefährdung hinsichtlich Zahnflankenbruch das Anstrengungsmaximum in einer Tiefe $> 1 \cdot b_H$ betrachtet (b_H : halbe Hertzsche Abplattungsbreite). Im Rahmen der hier durchgeführten lokalen Schadensakkumulation wird zunächst der gesamte Verlauf in der Werkstofftiefe betrachtet. Die lokale Schadensakkumulation erfolgt dann für jeden betrachteten Punkt auf der Zahnflanke sowie jede betrachtete diskrete Werkstofftiefskoordinate in einer Tiefe $> 1 \cdot b_H$. Dieses Vorgehen ist notwendig, da sich bei einer Veränderung der örtlichen Belastung und daraus resultierend der örtlichen Beanspruchung auch der Ort des Anstrengungsmaximums sowohl auf der Zahnflanke als auch in der Werkstofftiefe verändern kann. Die maximale lokale Schadenssumme $D_{\text{lokal,max}}$ liegt also nicht zwingend am Ort der maximalen lokalen Anstrengung für eine Laststufe $A_{FF,i,\text{lokal,max}}$. Diese Methode liefert im Rahmen des praxisorientierten Berechnungsansatzes nach A243 / FVA 556 [251] eine erweiterte Aussage hinsichtlich einer lokalen Gefährdung durch Flankenbruch.

Hinsichtlich der Schadensakkumulationshypothese wird bezüglich der Schadensart Zahnflankenbruch die Methode "Miner elementar" oder "Miner-Haibach" vorgeschlagen, da zumindest eine Reduzierung der dauerfest ertragbaren Drehmomente bei Belastungen im Zeitfestigkeitsgebiet bereits durch Stichversuche von FZG/Witzig [250] nachgewiesen ist. Durch Berücksichtigung von Lasten auch unterhalb der Dauerfestigkeit $A_{FF} = 0,8$ erfolgt stets eine konservative Berechnung auf der sicheren Seite. Die zulässige Schädigungssumme D_{zul} sollte im ersten Schritt auf 1,0 festgelegt werden.

Allgemein erhält man als Ergebnis der erweiterten lokalen Schadensakkumulation für die Schadensart Zahnflankenbruch eine dreidimensionale Verteilung der lokalen Schadenssummen über der gesamten Zahnflanke sowie im betrachteten Werkstofftiefenbereich für Tiefen $> 1 \cdot b_H$. Hieraus lässt sich der maßgebende Ort der maximalen Schädigung ableiten.

3.3.2.4 Erweiterte lokale Schadensakkumulation – Zusammenfassung

Ein theoretischer dreidimensionaler Berechnungsansatz zur lokalen Schadensakkumulation hinsichtlich der Schadensart Zahnflankenbruch wurde aufgezeigt. Insgesamt steht hiermit eine Möglichkeit zur Betriebsfestigkeitsrechnung an Getriebestufen im Hinblick auf die Schadensarten Grübchen, Zahnfußbruch, Verschleiß, Graufleckigkeit und Zahnflankenbruch zur Verfügung. Um korrekte Ergebnisse zu erhalten, sind die Größen zur Betriebsfestigkeitsrechnung nach aktuellem Stand der Technik und des Wissens zu wählen. Folgende Größen müssen für eine Schadensakkumulation hinsichtlich der betrachteten Schadensarten festgelegt werden:

- Schadensakkumulationshypothese
- Zulässige Schadenssummen D_{zul}
- Wöhlerliniensteigung k
- Knicklastspielzahl zur Dauerfestigkeit (wenn diese berücksichtigt wird) N_D

Um eine korrekte Berechnung der Lebensdauern sowie der maßgeblichen Schadensart durchführen zu können, sollten die zu Grunde liegenden Wöhlerliniendaten für dieselbe Ausfall- bzw. Überlebenswahrscheinlichkeit angegeben werden. Bei Zahnradern wird hier üblicherweise eine Überlebenswahrscheinlichkeit $R(t_{Ausfall}) = 99\%$ verwendet. Weiterhin müssen die zulässigen Schadenssummen sowie die verwendete Schadensakkumulationshypothese auch für die Anwendbarkeit bei einer lokalen Betrachtung geeignet sein. Da der Grenzfall der hier vorgestellten Methodik eine Einstufenbelastung (Lastkollektiv mit einer Stufe) ist, für welche die SAH sowie die zulässige Schadenssumme D_{zul} Gültigkeit haben, sollte diese Voraussetzung in der Regel erfüllt sein.

Zur Identifizierung der maßgeblichen Schadensart muss zunächst die lokale Schadensakkumulation für alle betrachteten Schadensarten durchgeführt werden:

$$D_{\text{lokal}} = \sum D_{i,\text{lokal}} = \sum \frac{h_i}{N_{i,\text{lokal}}} \quad (3.6)$$

D	-	Schadenssumme	h_i	-	Lastspielzahl auf Laststufe i
N	-	Zulässige Lastspielzahl auf Laststufe i	i	-	Laststufe

Die zulässige Lastspielzahl für jede Laststufe $N_{i,\text{lokal}}$ kann mit Hilfe der zu Grunde liegenden Wöhlerlinie ermittelt werden (z.B. [103]); die tatsächlichen Lastspielzahlen h_i sind aus dem Lastkollektiv bekannt. Zur besseren Übersichtlichkeit bietet sich hier die Darstellung in Form der bereits vorgestellten Bauteilwöhlerlinien nach Renius [192] an. Innerhalb eines Berechnungsprogramms kann die Berechnung jedoch auch mit Hilfe der üblichen Beanspruchungs- und Beanspruchbarkeitskennwerte durchgeführt werden, sofern die lokalen Belastungsverhältnisse korrekt wiedergegeben werden.

Die maßgebliche Schadensart kann identifiziert werden, in dem die maximale lokale Schadenssumme ins Verhältnis zur zulässigen Schadenssumme für die jeweilige Schadensart gesetzt wird:

$$D_{rel} = \frac{\max(D_{lokal})}{D_{zul}} \tag{3.7}$$

<i>D</i> - Schadenssumme	<i>rel</i> - Relative Betrachtung
--------------------------	-----------------------------------

Die Schadensart mit dem höchsten berechneten Wert für D_{rel} ist maßgeblich für das betrachtete Lastkollektiv. Über D_{rel} können auch die Lebensdauern sowie die maßgeblichen Schadensmechanismen für einzelne Flankenbereiche berechnet werden. Hierzu ist in obiger Gleichung nicht der Maximalwert der lokalen Schädigungssumme einzusetzen, sondern der Wert des betrachteten Flankenbereichs.

$$D_{rel,lokal} = \frac{D_{lokal}}{D_{zul}} \tag{3.8}$$

<i>D</i> - Schadenssumme	<i>rel</i> - Relative Betrachtung
--------------------------	-----------------------------------

Die berechnete Lebensdauer für xx % Überlebenswahrscheinlichkeit $t_{xx\%}$ bzw. $N_{xx\%}$ hinsichtlich der betrachteten Schadensarten erhält man durch eine lineare Anpassung des Lastkollektivumfangs unter Beibehaltung der Form, bis man eine relative Schadenssumme $D_{rel} = 1,0$ erreicht. Grundlage der Schadensakkumulation bildet die Wöhlerlinie mit xx % Überlebenswahrscheinlichkeit. Die Lebensdauer entspricht anschließend der Summe der Einzelhäufigkeiten des Lastkollektivs:

$$N_{xx\%} = \sum h_{i,angepasst} \tag{3.9}$$

<i>N</i> - Lebensdauer (Lastspiele)	$h_{i,angepasst}$ - Lastspielzahlen des angepassten Kollektivs
-------------------------------------	--

Die berechnete Lebensdauer hinsichtlich der maßgeblichen Schadensart entspricht der Systemlebensdauer der betrachteten Getriebestufe.

3.3.3 Gesichtspunkte einer ganzheitlichen Optimierung

Die ideale Auslegung eines Getriebes mit der höchsten Leistungsdichte führt zu einer optimalen Ausnutzung aller Werkstoffvolumenelemente. Im Schadensfall treten also zeitgleich alle betrachteten Schadensmechanismen auf. Die berechneten Schadenssummen entsprechen zu diesem Zeitpunkt den zulässigen Schadenssummen. Steht die Zuverlässigkeit im Vordergrund der Auslegung, so werden die Auswirkungen unterschiedlicher Schäden oft verschieden bewertet. Meist gilt es, Bruchschäden in jedem Fall zu vermeiden; die dahingehende Auslegung sollte folglich sicherer sein. Im Rahmen der Auslegungsberechnung werden einzelne Schadensarten in der Regel unabhängig voneinander betrachtet. Oftmals erfolgt keine ganzheitliche Betrachtung und Potentiale hinsichtlich einer höheren Leistungsdichte werden daher nicht ausgenutzt.

Die Identifizierung des maßgeblichen Schadensmechanismus im Rahmen der lokalen Schadensakkumulation wurde bereits im vorangegangenen Kapitel beschrieben. Insgesamt eignet sich das von Renius [192] etablierte Konzept der Bauteilwöhlerlinien sehr gut zur Identifizierung des maßgeblichen Schadensmechanismus bei lokaler oder globaler Betrachtung. Durch die "Normierung" der einzelnen Beanspruchungskenngrößen (z.B. Flankenpressung, Zahnfußspannung, ...) auf die äußere Belastung (Drehmoment am Getriebeeingang) können alle berücksichtigten Schadensmechanismen ganzheitlich betrachtet werden. Anschaulich lässt

sich sowohl eine Iststandsanalyse als auch eine gezielte Optimierung nach allen Kriterien in einem Lastspielzahl/Drehmoment-Diagramm übersichtlich darstellen, weil die Bauteilwöhlerlinien dem Lastkollektiv gegenübergestellt werden können. Im Falle einer Einstufenbelastung lässt sich so bereits grafisch der maßgebliche Schadensmechanismus ermitteln. Auch für einfache Lastkollektivanwendungen ist dies möglich. Wie in [191] von Renius gezeigt, kann ein solches Diagramm auch als eine sehr geeignete Grundlage für Laborversuche gelten, bei denen man sowohl die Bauteilwöhlerlinien testen kann oder auch einen kompletten, zeitgerafften Betriebsfestigkeitsversuch durchführt. Nach [197] sind bei diesem Vorgehen bisher die Unsicherheiten der Bauteilwöhlerlinienberechnung größer als die der Schädigungsrechnung. Dies ist die Motivation für weitere Verbesserungen der Prognose von Bauteilwöhlerlinien.

Werden für jede Schadensart unterschiedliche Mindestsicherheiten oder zulässige Schadenssummen definiert, bleibt das Optimierungsprinzip an Hand von Bauteilwöhlerlinien nach Renius [191] auch hier gültig, verliert aber bezüglich einer rein optischen Bewertung der Lage der Ziel-Bauteilwöhlerlinien etwas an Aussagekraft.

3.4 Berechnung von Zuverlässigkeitskennwerten bei Lastkollektivbelastung

Mit Hilfe der vorgestellten Berechnungsmethodik können verschiedene Zuverlässigkeitskennwerte unter Verwendung der Berechnungsgrößen ermittelt werden. Diese werden nachfolgend vorgestellt. Zur generellen Berechnung von Zuverlässigkeiten sei auf Kapitel 5.2.1 sowie [57, 103, 115, 171, 203] verwiesen. Bei der Betrachtung von Zuverlässigkeiten werden lediglich solche Schäden und Laststufen betrachtet, welche einen Beitrag zur Schadenssumme liefern. Laststufen unterhalb der Dauerfestigkeit werden also bei Anwendung der SAH Miner original nicht berücksichtigt.

Eine weiterführende Berechnung der Zuverlässigkeiten ist nur möglich, wenn das statistische Ausfallverhalten der untersuchten Schadensarten hinreichend genau bekannt ist. Bei einer Betrachtung hinsichtlich einer Lastkollektivbelastung sollte vor allem die statistische Verteilung der zulässigen Schadenssummen bekannt sein. Die Anwendbarkeit von Verteilungskennwerten globaler Schadenssummen (z.B. aus [78, 208, 227, 229]) auf eine Berechnung der lokalen Schadenssummen und Zuverlässigkeiten wurde bislang noch nicht umfangreich untersucht.

Lokale Zuverlässigkeitskenngrößen

Im Rahmen der lokalen Schadensakkumulation werden für alle betrachteten Schadensmechanismen lokale Beanspruchungs- sowie Beanspruchbarkeitsgrößen für die untersuchten Laststufen des Lastkollektivs berechnet. Maßgebende Beanspruchungskenngröße ist hierbei die lokale Schadenssumme D_{lokal} für jeden betrachteten Bereich der Zahnflanke. Die Beanspruchbarkeit wird sowohl bei der globalen Betrachtung als auch bei der lokalen Betrachtung mit D_{zul} ausgedrückt.

Üblicherweise ist die statistische Verteilung der Schadenssummen nicht bekannt. Geht man jedoch vom Grenzfall eines Lastkollektivs mit einer Laststufe aus (= Einstufenversuch), so kann für diesen Fall das statistische Ausfallverhalten der betrachteten Schadensart im Zeitfestigkeitsgebiet zu Grunde gelegt werden, da die Schadenssumme in diesem Fall direkt proportional zur Lastspielzahl auf diesem Niveau ist. Die zulässige Schadenssumme D_{zul} korreliert dabei mit der Ausfalllastspielzahl N_{Ausfall} . Für Grübchen würde man somit beispielsweise eine Weibullverteilung mit Formparameter $b = 3,2$ verwenden und für Zahnfußbruch eine logarith-

mische Normalverteilung mit lastabhängiger Streuung s_{log} . Im Rahmen der hier getätigten Betrachtungen wird folglich angenommen, dass diese statistischen Verteilungen der Ausfalllastspielzahlen auch auf Lastkollektive mit wenigen Laststufen anwendbar sind. Eine Verifizierung der Anwendbarkeit bei Lastkollektiven mit einer großen Anzahl an Laststufen wurde bisher noch nicht durchgeführt.

Die Überlebenswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Schadenssumme wird durch $R(D)$ ausgedrückt. Ermüdungsschäden folgen im Zeitfestigkeitsgebiet üblicherweise einer Weibullverteilung (Gleichung (3.10)) oder einer logarithmischen Normalverteilung (Gleichung (3.11)). Die Zusammenhänge dafür sind nachfolgend dargestellt:

$$R(D) = e^{\left(-\frac{D}{T}\right)^b} \tag{3.10}$$

$$R(D) = 1 - \left(\frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot s_{log}} \cdot \int_0^D \frac{1}{t} \cdot e^{-\left(\frac{(\ln(t) - \mu_{log})^2}{2 \cdot s_{log}^2}\right)} dt \right) \tag{3.11}$$

$R(D)$	- Zuverlässigkeit	D	- Schadenssumme
T	- Charakteristische Lebensdauer	b	- Formparameter der Weibullverteilung
s_{log}	- Logarithmische Standardabweichung	t	- Integrationsvariable
μ_{log}	- Logarithmischer Mittelwert		

Während Werte für die Weibullverteilung analytisch berechnet werden können, existiert für die logarithmische Normalverteilung keine geschlossene Lösung. Werte müssen mit Hilfe von Tabellen für die Standardnormalverteilung z.B. nach [61] oder mit Hilfe entsprechender Rechenprogramme ermittelt werden.

Zur Berechnung von lokalen Zuverlässigkeitsparametern basierend auf den Verteilungsfunktionen für Einstufenbelastungen im Zeitfestigkeitsgebiet müssen zunächst die Lageparameter T bzw. μ_{log} basierend auf der zulässigen Schädigungssumme D_{zul} sowie der dazugehörigen Überlebenswahrscheinlichkeit bestimmt werden. Somit sind Form- und Lageparameter der Gleichungen bekannt.

Die lokale Zuverlässigkeit/Überlebenswahrscheinlichkeit der betrachteten Flankenbereiche z.B. hinsichtlich Grübchenschäden wird folgendermaßen berechnet:

$$R_{lokal,Grübchen} = R(D_{lokal,Grübchen}) \tag{3.12}$$

$R(t)$	- Zuverlässigkeit	D	- Schadenssumme
--------	-------------------	-----	-----------------

Die lokale Zuverlässigkeit hinsichtlich aller betrachteten Schadensarten erhält man durch Multiplikation der Einzelzuverlässigkeiten:

$$R_{lokal} = \prod_{Schadensarten\ i} R_{lokal,i} \tag{3.13}$$

$R(t)$	- Zuverlässigkeit	i	- Schadensarten
--------	-------------------	-----	-----------------

Hierbei wird davon ausgegangen, dass jede Schadensart für sich genommen zum Totalversagen des Getriebes führen kann. Vergleichende Betrachtungen dieser Zuverlässigkeiten dürfen nur erfolgen, wenn jeweils die gleichen Schadensarten berücksichtigt wurden.

Globale Zuverlässigkeitskenngrößen

Die Überlegungen zur Berechnung einer globalen Zuverlässigkeit gelten analog zur lokalen Betrachtung. Anstatt der lokalen Schadenssummen D_{lokal} wird hierbei jedoch das Maximum der berechneten lokalen Schadenssummen für die betrachtete Schadensart verwendet:

$$R_{\text{global}} = \prod_{\text{Schäden } i} R_{\text{global},i} = \prod_{\text{Schäden } i} R(\max(D_{\text{lokal},i})) \quad (3.14)$$

$R(t)$ - Zuverlässigkeit	i - Schadensarten
D - Schadenssumme	

Informationen zur Verteilung der Zuverlässigkeiten über der Zahnflanke gehen bei der globalen Betrachtung verloren. Wenn jedoch alle betrachteten Schäden in ähnlichen Zahnflankenbereichen ihren Maximalwert erreichen, liefert auch die globale Zuverlässigkeitsberechnung aussagekräftige Werte. Dies trifft in der Regel jedoch nicht zu. Im Zweifelsfall sind daher die Werte der lokalen Zuverlässigkeitsberechnung zu untersuchen.

Beim Vergleich von globalen Zuverlässigkeiten für verschiedene Auslegungsvarianten ist auch hier darauf zu achten, dass jeweils die gleichen Schadensarten bei der Berechnung berücksichtigt werden.

Hinsichtlich der Multiplikation einzelner Zuverlässigkeitswerte im Rahmen der Booleschen Theorie gelten auch hier die Anmerkungen aus Kapitel 2.4.3.

4 Experimentelle Untersuchungen zur Lebensdauer von Zahnradgetrieben

Ziel der durchgeführten experimentellen Untersuchungen ist es, u.a. Rückschlüsse auf den Schadensverlauf bei Lebensdauerprüfungen zu gewinnen. Im Rahmen dieser Arbeit wird hierzu exemplarisch die Schadensart Grübchen an einsatzgehärteten Verzahnungen bei Einstufen- und Lastkollektivbelastung untersucht. Versuchsbegleitend werden soweit möglich unterschiedliche zerstörungsfreie sowie zerstörende Analysen an den betrachteten Zahnrädern durchgeführt. Somit können verschiedene Werkstoffkennwerte zu unterschiedlichen Laufzeiten dokumentiert werden. Auf dieser Datenbasis lassen sich die Verläufe der untersuchten Werkstoffkennwerte mit zunehmendem Schädigungsgrad analysieren. Die detaillierte Auswertung der durchgeführten Analysen ist in Abschnitt 5.2.2 beschrieben.

Der Schädigungsgrad wird im Folgenden als Kenngröße in Prozent angegeben. Die Schädigung 100 % entspricht dabei dem Ausfall durch einen Grübchenschaden nach Definition in ISO 6336-5 [37], d.h. einer Grübchenfläche von 4 % an einer Flanke bzw. 0,5 % der gesamten aktiven Flankenfläche. Ein Schädigungsgrad von 0% entspricht dem geschliffenen, aber ungelauten Neuzustand. Zusätzlich wird noch der Zustand "Einlauf" betrachtet. Der Schädigungsgrad kann mit Hilfe einer Schadensakkumulation berechnet werden und entspricht hierin der Schädigungssumme D_{rel} . Für die im Rahmen der Referenzversuche durchgeführten Einstufenversuche entspricht die Schädigungssumme dem Verhältnis aus bereits ertragener Lastspielzahl zur ertragbaren Lastspielzahl. Entsprechend dem Stand des Wissens wird hierbei die SAH Miner-Haibach angewendet. Die zulässige Lastspielzahl wird bei ausgefallenen Zahnrädern durch die erreichte Lastspielzahl bis zum Eintritt des Schädenskriteriums definiert. Für Zahnräder, welche vor Eintritt einer Schädigung einer zerstörenden Prüfung unterzogen werden, wird die zulässige Lastspielzahl mit Hilfe der ermittelten Wöhlerlinie definiert. Aufgrund der niedrigen Lasten und Lastspielzahlen im Rahmen des Einlaufvorgangs, wird für die betrachteten Zahnräder auch nach dem Einlauf ein Schädigungsgrad von 0% ermittelt.

Bild 4.1 zeigt schematisch das Prüfprogramm für die durchgeführten experimentellen Untersuchungen. Zerstörungsfreie und zerstörende Analysen werden bei unterschiedlichen Schädigungsgraden auf mehreren Lastniveaus durchgeführt. Im Falle einer zerstörungsfreien Prüfung wird der Versuchslauf mit dem Prüfling auf demselben Lastniveau fortgesetzt.

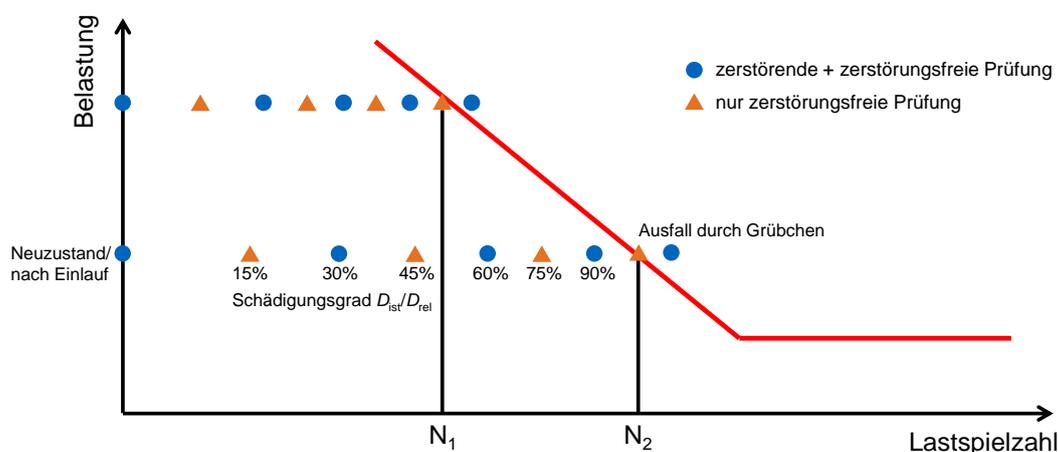


Bild 4.1: Prüfprogramm der experimentellen Untersuchungen

Mit Kenntnis der Verläufe der Werkstoffkenngrößen mit zunehmendem Schädigungsgrad kann ggf. eine Ermittlung der Restlebensdauer von vorgeschädigten Komponenten aus verkürzten Lebensdauerprüfungen durchgeführt werden.

Ergänzend zu den experimentellen Untersuchungen zur Ermittlung der Restlebensdauer von Zahnradern werden Lastkollektivversuche mit verschiedenen Durchmischungen durchgeführt. Alle Versuche wurden mit derselben Verzahnungsgeometrie durchgeführt. **Tabelle 4.1** gibt eine Übersicht über die durchgeführten Versuchsreihen.

Versuchsreihe	Referenzversuche	Lastkollektivversuche	
		Geringe Durchmischung	Hohe Durchmischung
Zielsetzung	- Gewinnung der Wöhlerlinie - Entwicklung des Vorgehensmodell zur Restlebensdauerabschätzung	- Untersuchung des Schadensfortschritts bei Lastkollektivversuchen mit geringer Durchmischung	- Untersuchung des Schadensfortschritts bei Lastkollektivversuchen mit hoher Durchmischung
Verwendete Verzahnung	$z_1 = 17 / z_2 = 18, m_n = 5 \text{ mm},$ $\beta = 0^\circ, a = 91,5 \text{ mm}$		
Anzahl Prüflinge	24	6	6
Verwendeter Prüfstand	FZG-Standardverspannungsprüfstand $a = 91,5 \text{ mm}$		Lastkollektivprüfstand $a = 91,5 \text{ mm}$

Tabelle 4.1: Übersicht über durchgeführte Versuchsreihen

4.1 Versuchseinrichtung, Prüfkörper und Versuchsprogramm

4.1.1 FZG-Standardverspannungsprüfstand mit statischer Verspanneinheit

Sowohl die Referenzversuche als auch die Lastkollektivversuche mit geringer Durchmischung werden auf FZG-Zahnradverspannungsprüfständen [29] mit Achsabstand $a = 91,5 \text{ mm}$ durchgeführt, welche auch zur Durchführung von Standardtests bezüglich Grauflecken- und Fresstragfähigkeit verwendet werden. Der Prüfstand funktioniert nach dem Verspannungsprinzip, d.h. zwischen Prüfgetriebe und Übertragungsgetriebe wird Drehmoment über eine mechanische Verspanneinrichtung eingeleitet. Der an der Ritzelwelle angebrachte Elektromotor dient lediglich zur Aufbringung der auftretenden Verlustleistung im Verspannkreislauf sowie zur Regelung der Drehzahl. **Bild 4.2** zeigt eine schematische Darstellung des FZG-Stirnradverspannungsprüfstands. Prüf- und Übertragungsgetriebe werden mit Hilfe eines Ölaggregats mit ca. 30 l Fassungsvermögen versorgt.

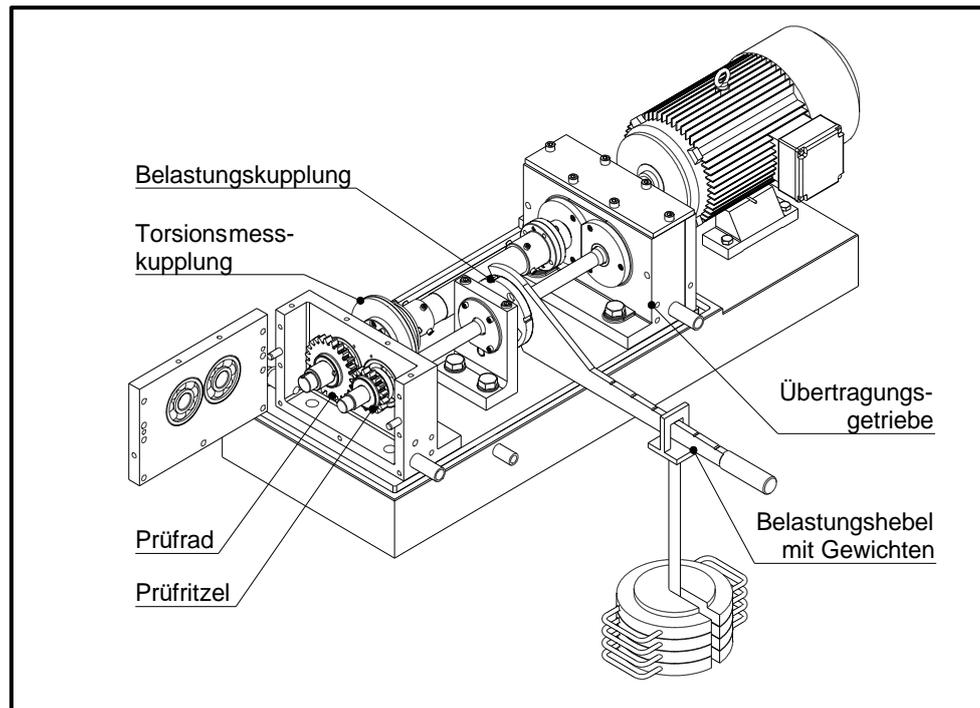


Bild 4.2: FZG-Stirnradverspannungsprüfstand [29, 136]

4.1.2 FZG-Lastkollektivprüfstand mit dynamischer Lastaufbringung

Für die Lastkollektivversuche mit hoher Durchmischung wurde ein Verspannungsprüfstand (Achsabstand $a = 91,5 \text{ mm}$) mit hydraulischer Verspanneinheit und Computersteuerung konstruiert und aufgebaut. Damit ist die kontinuierlich veränderliche Vorgabe von Drehmoment, Drehzahl und Öltemperatur bei entsprechend hoher Regelfrequenz möglich. Dies ermöglicht eine umfassende Prüfung unter Lastkollektivbeanspruchung. **Bild 4.3** zeigt den Aufbau des Prüfstands mit hydraulischer Verspanneinheit.

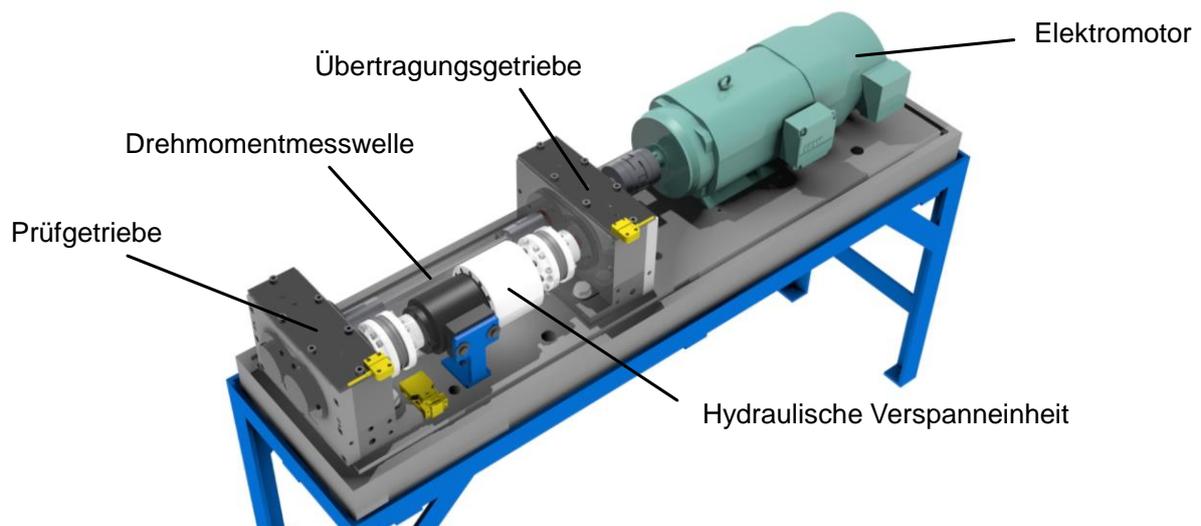


Bild 4.3: Verspannungsprüfstand mit hydraulischer Lastaufbringung

4.1.3 Prüfverzahnung

Die verwendete Verzahnung wurde bei der Fa. ZF Friedrichshafen AG vorverzahnt und wärmebehandelt. Die Hartfeinbearbeitung wurde an der FZG durchgeführt und erfolgte nach dem Prinzip des diskontinuierlichen Wälzschleifens auf einer Schleifmaschine des Typs Höfler Nova CNC 400. Die Prüfverzahnung wurde mit einem Protuberanzfräser hergestellt, um Schleifkerben zu vermeiden. Die Verzahnungs- und Werkzeugdaten sind in **Tabelle 4.2** enthalten.

Benennung	Zeichen	Einheit	Geradverzahnung	
Zähnezahl	z_1 / z_2	-	17	18
Normalmodul	m_n	mm	5	
Stirnmodul	m_t	mm	5	
Normaleingriffswinkel	α_n	°	20	
Betriebseingriffswinkel	α_{wt}	°	26,02	
Schrägungswinkel	β	°	0	
Profilüberdeckung	ϵ_α	-	1,38	
Sprungüberdeckung	ϵ_β	-	0	
Achsabstand	a		91,5	
Profilverschiebungsfaktor	x_1 / x_2	-	0,475	0,445
Teilkreisdurchmesser	d_1 / d_2	mm	85,00	90,00
Kopfkreisdurchmesser	d_{a1} / d_{a2}	mm	99,75	104,45
Zahnbreite	b	mm	14	
Profilkorrektur	-	-	ja, Kopfrücknahme Ca = 30µm	ja, Kopfrücknahme Ca = 30µm
Werkstoff	-	-	18CrNiMo7-6	
Werkzeugkopfhöhenfaktor	h_{a0}	-	1,50	
Werkzeugfußhöhenfaktor	h_{f0}	-	1,54	
Werkzeugkopfabrundungsfaktor	ρ_{a0}	-	0,38	
Protuberanzbetrag	p_{r0}	mm	0,22	
Protuberanzwinkel	α_{pr0}	°	12,0	
Bearbeitungszugabe	q	mm	0,20	

Tabelle 4.2: Verzahnungsdaten der verwendeten Prüfverzahnung

Die Makrogeometrie der verwendeten Geradverzahnung entspricht der aus mehreren Forschungsvorhaben bekannten [83, 219, 233]. Die Geradverzahnungen werden mit einer kurzen Kopfrücknahme $C_a = 30 \mu\text{m}$ an Ritzel und Rad nach Stand der Technik ausgeführt. Diese Kopfrücknahme hat sich in den früheren Vorhaben bewährt und führt in erster Linie zur Vermeidung von Pressungsüberhöhungen am Eingriffsbeginn und -ende sowie einem verminderten Eingriffsstoß. Dieser Effekt wurde auch durch eine Nachrechnung mit Hilfe von RIKOR I [231] bestätigt.

Die Prüfzahnräder wurden bei der Fa. ZF Friedrichshafen AG aus dem Werkstoff 18CrNiMo7-6 gefertigt und anschließend einsatzgehärtet. Alle Prüfräder entstammen aus einer Werkstoffcharge. Ebenso wurden alle Ritzel und Räder in derselben Ofenreise gehärtet. Die Vorgaben bzgl. der Wärmebehandlung sind in **Tabelle 4.3** dargestellt.

	Geradverzahnung
Wärmebehandlung	Einsatzhärten
Randhärte	$720 \pm 20 \text{ HV1}$ ($\approx 61 \text{ HRC}$)
Einsatzhärtungstiefe CHD ₅₅₀ (unter Berücksichtigung des Schleifaufmaßes)	1,0 – 1,2 mm

Tabelle 4.3: Vorgaben Wärmebehandlung

4.1.4 Dokumentation der Prüfverzahnungen

Nach Abschluss der Hartfeinbearbeitung wurden alle Prüfräder im Neuzustand umfangreich dokumentiert. Es wurden alle zerstörungsfreien Analysen durchgeführt, welche auch im Rahmen der Referenzversuche Anwendung finden (siehe auch 4.1.5.2). Darüber hinaus wurde ein Radpaar einer zerstörenden Prüfung unterzogen, um metallographische und röntgenografische Untersuchungen durchzuführen sowie um die Einhaltung der Härtewerte zu überprüfen. Die so ermittelten Werte dienen zum einen als Ausgangsgrößen für die Erstellung des Modells zur Abschätzung der Lebensdauer und dienen zum anderen der Fertigungskontrolle. Die vollständige Dokumentation der Prüfteile im Neuzustand ist im Anhang beschrieben. Insgesamt entsprechen die Verzahnungen der Zeichnungsvorgabe und bezüglich der Wärmebehandlung dem Stand der Technik.

4.1.5 Betriebsbedingungen und Versuchsprogramm

4.1.5.1 Betriebsbedingungen

Für alle durchgeführten Versuche wurde eine Ritzeldrehzahl von $n_1 = 3000 \text{ 1/min}$ eingestellt. Die Verspannung wurde so gewählt, dass das Ritzel der treibende Partner der Zahnradpaarung ist. Alle Versuche wurden mit Einspritzschmierung in den Eingriff bei einer Einspritztemperatur von $\vartheta_E = 60^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ durchgeführt. Die Einspritzmenge wurde bei der untersuchten Variante mit Achsabstand $a = 91,5 \text{ mm}$ auf 2 l/min festgelegt. Für alle durchgeführten experimentellen Untersuchungen wurde das FVA-Referenzöl Nr. 3 mit einer Additivierung von 4% Anglamol 99 verwendet. Beim Additiv Anglamol 99 handelt es sich um ein EP-Additiv auf S-P-Basis.

Vor Beginn der Versuchsläufe wurde ein zweistufiger Einlauf zur Glättung der Zahnflanken durchgeführt. Für die untersuchte Verzahnung wurden in Anlehnung an [80] und [233] folgende Einlaufparameter verwendet:

- $20 \cdot 10^3 \text{ LS}$ bei $n_1 = 3000 \text{ 1/min}$, $\vartheta_E = 40^\circ\text{C}$, $T_1 = 225 \text{ Nm}$, $\sigma_{H0} = 1150 \text{ N/mm}^2$;
- $180 \cdot 10^3 \text{ LS}$ bei $n_1 = 1500 \text{ 1/min}$, $\vartheta_E = 90^\circ\text{C}$, $T_1 = 225 \text{ Nm}$, $\sigma_{H0} = 1150 \text{ N/mm}^2$.

Die nominellen Flankenpressungen σ_{H0} wurden nach ISO 6336-2 [35] bestimmt.

4.1.5.2 Versuchsprogramm Referenzversuche

Im Rahmen der durchgeführten Referenzversuche wird ein Vorgehensmodell zur Bewertung der Restlebensdauer von vorgeschädigten Zahnrädern entwickelt. Hierzu werden versuchsbegleitend zerstörende und zerstörungsfreie Analysen gemäß dem bereits dargestellten Vorgehen durchgeführt. Untersucht werden hierbei 24 Radpaare der vorgestellten Geradverzahnung mit Achsabstand $a = 91,5$ mm. Die Versuchsläufe werden überwiegend im Zeitfestigkeitsgebiet durchgeführt, da ein Erreichen des Schadenskriteriums erforderlich ist, um Aussagen zur Restlebensdauer treffen zu können. Die Dauerfestigkeit der untersuchten Geradverzahnung wird nur anhand weniger Versuchspunkte abgeschätzt. Im Rahmen der durchgeführten Versuche erhält man auch den Zeitfestigkeitsast der Wöhlerlinie. Dieser dient als Referenzwert zur Charakterisierung des Schädigungsgrades für die durchgeführten zerstörenden Analysen.

Im Rahmen der durchgeführten Referenzversuche werden folgende zerstörungsfreie Analysemethoden angewendet:

- Rauheitsmessung;
- 3D-Vermessung der Zahnflankentopologie;
- Oberflächenhärtemessung;
- 3MA: Mikromagnetischer Multiparameter Mikrostruktur- und Spannungs-Analysator;
- ROLLSCAN: Barkhausenrauschen.

Des Weiteren werden folgende zerstörende Prüfverfahren eingesetzt:

- Gefügebeurteilung im Schliiff;
- Härtemessung im Schliiff;
- Eigenspannungsmessung im Röntgendiffraktometer;
- Restaustenitgehaltmessung im Röntgendiffraktometer;
- FIB: Focused Ion Beam (nahezu zerstörungsfrei), Untersuchung des Werkstoffs in der Randzone (extern bei NMI, Reutlingen an 5 Zahnrädern);
- SNMS: Sekundärneutralteilchenmassenspektrometrie, tiefenabhängiger Verlauf der Elementkonzentrationen (extern bei NMI, Reutlingen an 5 Zahnrädern).

4.1.5.3 Versuchsprogramm Lastkollektivversuche

Zur Bestätigung der Erkenntnisse aus den Einstufenversuchen werden Lastkollektivversuche sowohl am FZG Standardverspannungsprüfstand als auch am neu aufgebauten hydraulischen FZG-Verspannungsprüfstand durchgeführt. Dazu werden mehrere Lastkollektivtypen mit hoher beziehungsweise niedriger Völligkeit eingesetzt (**Bild 4.4**). Der Anteil von Lasten im hohen Zeitfestigkeitsgebiet variiert dabei. Die konkreten Lastkollektive werden basierend auf den Ergebnissen der Referenzversuche festgelegt.

Im Rahmen der Lastkollektivversuche wird die Anwendbarkeit des entwickelten Vorgehensmodells zur Bestimmung der Restlebensdauer von Zahnrädern bei Versuchen mit geringer sowie hoher Durchmischung verifiziert. Auch diese Versuche werden bis zum Eintritt eines Schadens durchgeführt. Der Schädigungsgrad wird dabei anhand der Schädigungssumme

nach der SAH Miner-Haibach ermittelt. Die Schadensakkumulation wird gegen die im Rahmen der Referenzversuche ermittelte Wöhlerlinie für 50 % Ausfallwahrscheinlichkeit durchgeführt.

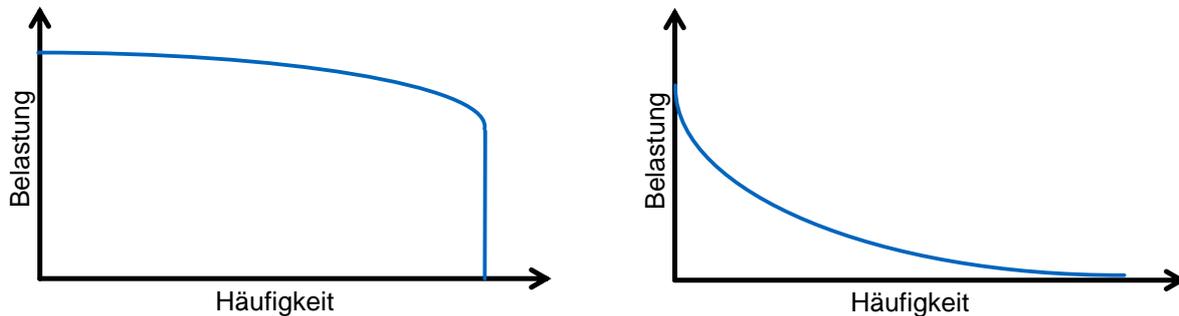


Bild 4.4: Lastkollektive schematisch (Summenhäufigkeit)

Im Rahmen der durchgeführten Lastkollektivversuche werden folgende zerstörungsfreie Analysemethoden angewendet:

- Rauheitsmessung;
- 3D-Vermessung der Zahnflankentopologie;
- Oberflächenhärtemessung;
- 3MA: Mikromagnetischer Multiparameter Mikrostruktur- und Spannungs-Analysator;
- ROLLSCAN: Barkhausenrauschen.

Des Weiteren werden folgende zerstörende Prüfverfahren eingesetzt:

- Gefügebeurteilung im Schliiff;
- Härtemessung im Schliiff;
- Eigenspannungsmessung im Röntgendiffraktometer;
- Restaustenitgehaltmessung im Röntgendiffraktometer.

Versuche mit geringer Durchmischung

Die Lastkollektivversuche mit geringer Durchmischung werden am FZG Standardverspannungsprüfstand durchgeführt. Die Durchmischung wird dabei so gewählt, dass ca. alle $3 \cdot 10^6$ Lastspiele eine Änderung des Drehmoments erfolgt. Dies ermöglicht die Verwendung eines Prüfstands mit manueller Verspannung. Durch die sehr geringe Durchmischung können Randeffekte durch Drehmomentwechsel wie beispielsweise Überschwinger etc. vernachlässigt werden. Es kann allerdings nicht sichergestellt werden, dass bis zum Eintritt des Schadensereignisses die Form des verwendeten Lastkollektivs erhalten bleibt. Betrachtet man beispielsweise ein Lastkollektiv mit 50 % der Lastwechsel auf einer Laststufe mit 400 Nm Drehmoment und 50 % der Lastwechsel auf einer Laststufe mit 600 Nm Drehmoment: tritt der Ausfall im konkreten Versuch nach $6 \cdot 10^6$ LS auf der Laststufe mit 400 Nm Drehmoment und $3 \cdot 10^6$ LS auf der Laststufe mit 600 Nm ein, so wird die Form des ursprünglichen Lastkollektivs um fast 50% verändert. Bei der Auswertung der Lastkollektivversuche mit geringer Durchmischung müssen also stets die konkret durchlaufenen Laststufen betrachtet werden.

Versuche mit hoher Durchmischung

Zusätzlich zu den Lastkollektivversuchen mit geringer Durchmischung werden solche mit hoher Durchmischung durchgeführt. Die zu Grunde liegenden Lastkollektive sind dabei dieselben, jedoch wird die Durchmischung hierbei so eingestellt, dass ca. alle 500 Lastspiele (alle 10 s) eine Änderung des aufgebrachtten Drehmoments erfolgt. Aufgrund dieser Anforderung wurde ein Lastkollektivprüfstand mit hydraulischer Lastaufbringung basierend auf einem FZG-Standardverspannungsprüfstand aufgebaut. Dieser ermöglicht hochdynamische Versuche mit wechselnden Drehmomenten, Drehzahlen und Öltemperaturen.

Aufgrund der hohen Durchmischung und der Trägheit der hydraulischen Lastaufbringung bei einer drastischen Drehmomentänderung treten im Versuchslauf auch Belastungen zwischen den einzelnen Laststufen bzw. Überschwinger auf. Durch eine exakte Einstellung des Regelventils konnten diese soweit reduziert werden, dass der Anteil der Lastspiele mit nicht im Lastkollektiv enthaltenen Drehmomenten bei ca. 1 % liegt. Durch die hohe Durchmischung ist jedoch auch sichergestellt, dass die Form des Kollektivs bis zum Ausfall erhalten bleibt.

4.2 Versuchsergebnisse - Tragfähigkeit

4.2.1 Referenzversuche: Ermittlung der Grübchentragfähigkeit

Zur Gewinnung der Wöhlerlinie als Referenzwert für die zerstörenden und zerstörungsfreien Prüfungen wurden Versuche mit einer geradzahnten Prüfradvariante mit 17 Zähnen am Ritzel und 18 Zähnen am Rad auf dem FZG-Standardverspannungsprüfstand mit Achsabstand $a = 91,5$ mm durchgeführt. Die aufgetretenen Grübchenschäden entsprechen dem erwarteten Schadensbild bei einsatzgehärteten Zahnrädern (siehe **Bild 4.5**). Abhängig vom Lastniveau tritt vereinzelt Graufleckigkeit im Bereich negativen spezifischen Gleitens auf.

Zur Bestimmung des Zeitfestigkeitsasts wurden vorwiegend Lastniveaus im Zeitfestigkeitsgebiet bis zu einer nominellen Flankenpressung σ_{H0} von ca. 2000 N/mm^2 (nach ISO 6336-2 [35]) herangezogen. Darauf basierend wurde der Zeitfestigkeitsast unter Annahme von weibullverteilten Ausfalllebensdauern [128, 226] ermittelt. Die Dauerfestigkeit wurde mit wenigen Versuchspunkten mit Hilfe des modifizierten Probitverfahrens [127] abgeschätzt. Dieses Vorgehen zur Ermittlung einer Wöhlerlinie ist ausführlich bei FZG/Stahl [226] beschrieben. Die resultierende

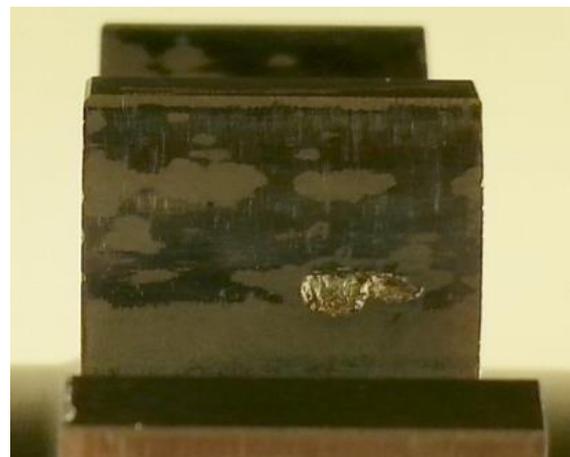


Bild 4.5: Grübchenschaden Referenzversuche

Wöhlerlinie für 50 % Ausfallwahrscheinlichkeit basierend auf den 31 eingezeichneten und ausgewerteten Versuchspunkten ist in **Bild 4.6** dargestellt. Diese dient als Referenz für die zerstörenden Prüfungen zur Ermittlung der durchschnittlichen Restlebensdauer auf den untersuchten Lastniveaus sowie für die Lastkollektivversuche zur Ermittlung der Schädigungssumme.

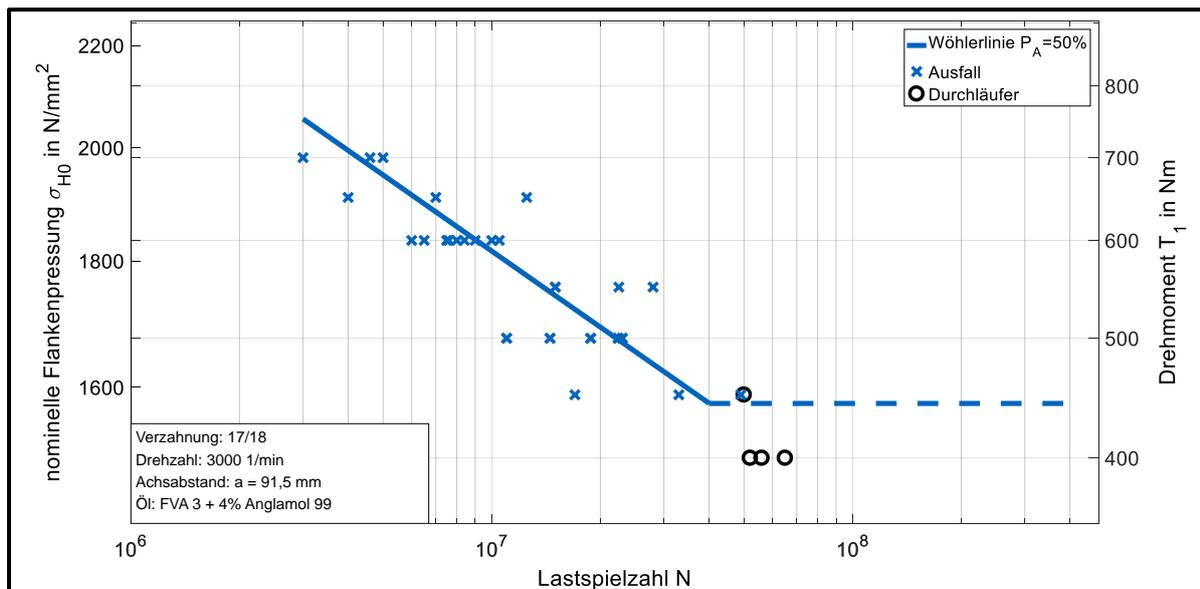


Bild 4.6: Wöhlerlinie Referenzversuche

4.2.2 Lastkollektivversuche

Im Folgenden wird die Auswertung der durchgeführten Lastkollektivversuche mit geringer und hoher Durchmischung vorgestellt. Die 10 verwendeten Lastkollektive sind in **Tabelle 4.4** dargestellt. Diese basieren auf der im Rahmen der Referenzversuche ermittelten Wöhlerlinie. Die Laststufen wurden überwiegend im Zeitfestigkeitsgebiet gewählt. Eine grafische Übersicht über die verwendeten Lastkollektive in Einzelhäufigkeitsdarstellung findet sich im Anhang.

Für die Lastkollektive LK 5 bis LK 10 wird eine hohe Durchmischung gewählt, d.h. eine Änderung des aufgetragenen Drehmoments erfolgt nach ca. jeweils 500 Lastspielen. Ein repräsentativer Drehmomentverlauf aus einem Versuchslauf mit dem Lastkollektiv LK 7 ist als Ausschnitt in **Bild 4.7** dargestellt.

Die durchgeführten Lastkollektivversuche werden hinsichtlich der erreichten Schadenssummen D ausgewertet. Diese werden mit Hilfe der durch die Referenzversuche ermittelten Wöhlerlinie für 50% Ausfallwahrscheinlichkeit berechnet. Zur Berechnung der Schädigung hinsichtlich Grübchen wird die Schadensakkumulationshypothese Miner-Haibach [103] verwendet, bei welcher mit einem absinkenden Dauerfestigkeitsast mit der Steigung $2k-1$ gerechnet wird. Eine Schadenssumme von 0,5 bedeutet dabei beispielsweise, dass die Lebensdauer halb so groß ist wie theoretisch erwartet; 2,0 hingegen eine doppelt so große Lebensdauer wie erwartet. Die berechneten Schadenssummen aller durchgeführten Einzelversuche sind in **Bild 4.8** dargestellt. Zur Berechnung der Schadenssummen D für die Lastkollektivversuche mit geringer Durchmischung wurden die Lastspielzahlen verwendet, welche im konkreten Versuch innerhalb einer Laststufe erreicht wurden. Zur Berechnung der Schadenssummen D für die Lastkollektivversuche mit hoher Durchmischung wurden die Lastspielzahlen pro Laststufe anhand der zu Grunde liegenden Verteilung des Kollektivs ermittelt.

Bild 4.9 zeigt die Mittelwerte der Schadenssummen für die betrachteten Lastkollektive. Im Vergleich zu den Einstufenversuchen sind bei den Versuchen mit geringer Durchmischung großteils deutlich reduzierte Laufzeiten erkennbar. Die erreichten mittleren Schadenssummen pro Lastkollektiv liegen dabei im Bereich von $D = 0,4 \dots 1,0$. Der arithmetische Mittelwert aller Lastkollektivversuche mit geringer Durchmischung beträgt ca. $D_{\emptyset, \text{gering}} = 0,6$. Diese Ergebnisse

zeigen im Wesentlichen geringere Schadenssummen als beispielsweise die Ergebnisse von FZG/Eberspächer [78]. Systematische Unterschiede hinsichtlich der erreichten mittleren Schadenssummen zwischen den verwendeten Lastkollektiven mit geringer Durchmischung sind unter Berücksichtigung der Versuchsanzahl nicht feststellbar.

Lastkollektiv	Durchmischung	Laststufen	Anteil der Laststufen	Bemerkung
LK 1	gering	400Nm + 700Nm	10 : 1	
LK 2	gering	300Nm + 600Nm	5 : 1	
LK 3	gering	400Nm + 500Nm + 600Nm	3 : 2 : 2	
LK 4	gering	300Nm + 600Nm	5 : 1	Basis: LK 2 Reihenfolgeeinfluss
LK 5	hoch	400Nm + 700Nm	10 : 1	Basis: LK 1
LK 6	hoch	300Nm + 600Nm	5 : 1	Basis: LK 2
LK 7	hoch	400Nm + 500Nm + 600Nm	3 : 2 : 2	Basis: LK 3
LK 8	hoch	450Nm + 500Nm + 550Nm + 600Nm + 650Nm	3 : 2 : 2 : 1 : 1	
LK 9	hoch	300Nm + 600Nm	1 : 5	Basis: LK 6 große Völligkeit
LK 10	hoch	450Nm + 500Nm + 550Nm + 600Nm + 650Nm	1 : 2 : 2 : 3 : 3	Basis: LK 8 große Völligkeit

Tabelle 4.4: Verwendete Lastkollektive

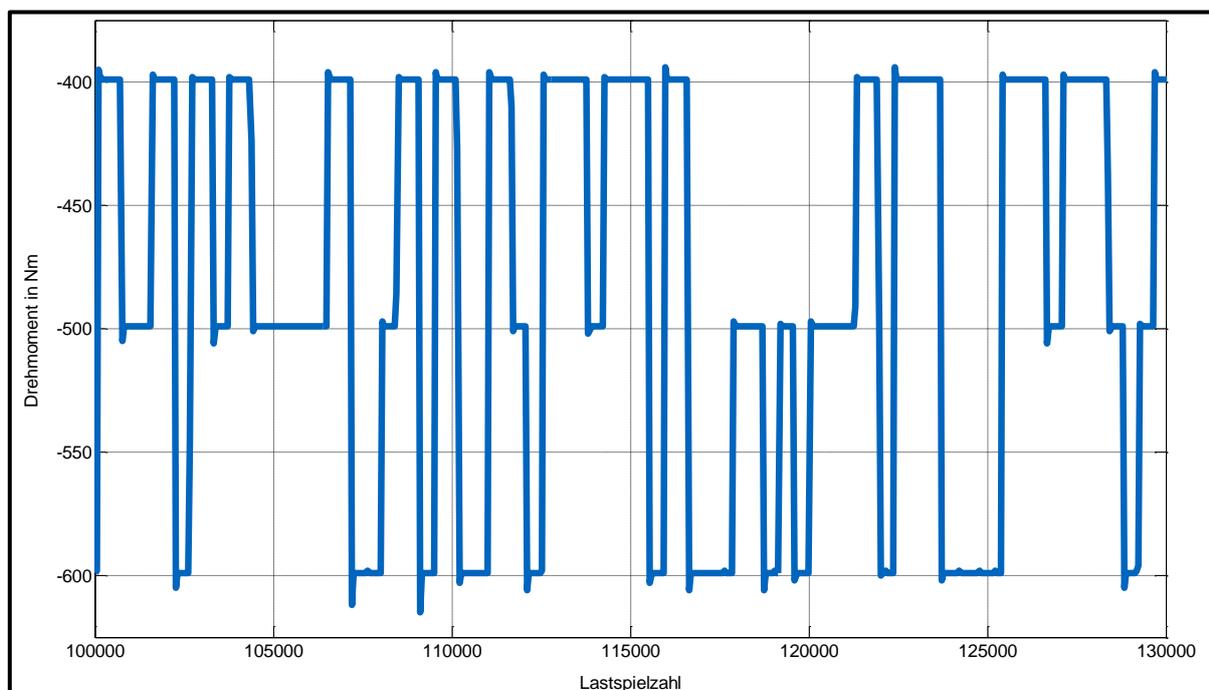


Bild 4.7: Repräsentativer Drehmomentverlauf Lastkollektivversuche (LK 7)

Im Gegensatz dazu zeigen die Versuche mit hoher Durchmischung großteils deutlich höhere Laufzeiten. Die errechneten mittleren Schadenssummen liegen im Bereich von $D = 1,3 \dots 2,8$, der arithmetische Mittelwert aller Lastkollektivversuche mit hoher Durchmischung beträgt ca. $D_{\emptyset, \text{hoch}} = 1,8$. Auch hier zeigen sich keine systematischen Unterschiede hinsichtlich der erreichten Schadenssummen zwischen den verwendeten Lastkollektiven mit hoher Durchmischung.

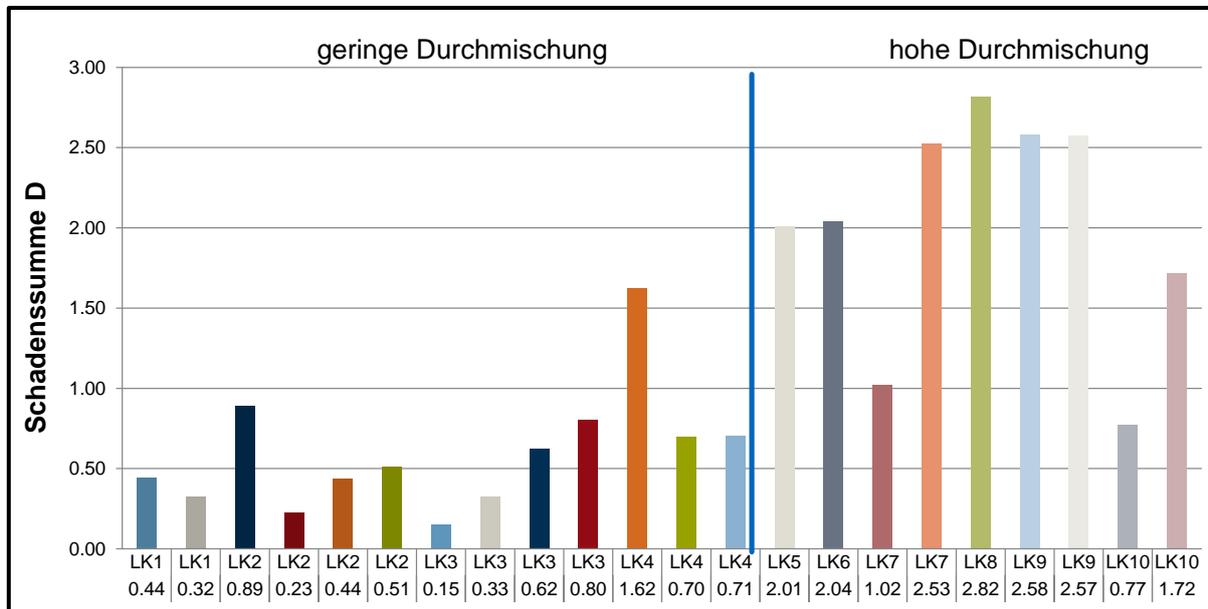


Bild 4.8: Auswertung Schadenssummen Lastkollektive, Übersicht Einzelversuche

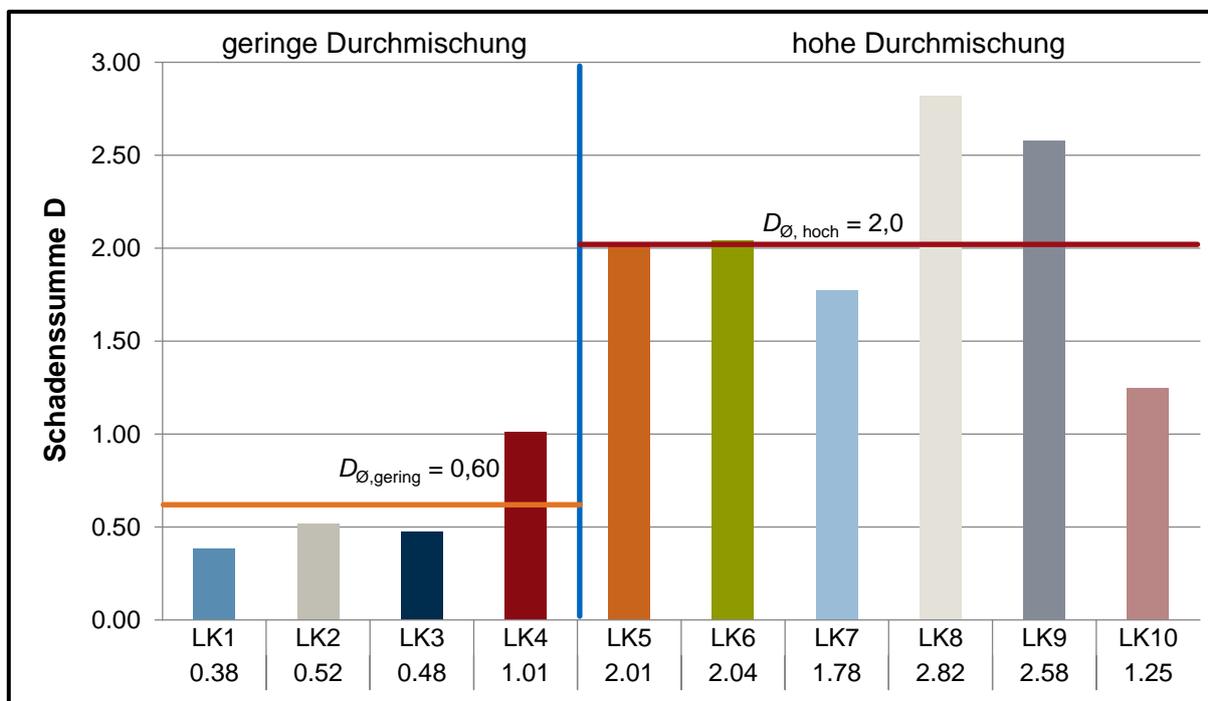


Bild 4.9: Auswertung Schadenssummen Lastkollektive

Eine Erklärung der deutlich unterschiedlichen erreichten Schädigungssummen für beide gewählten Durchmischungsarten konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht gefunden werden. Ein

signifikanter Einfluss des verwendeten Prüfstands kann weitestgehend ausgeschlossen werden. Graufleckigkeit war zwar an nahezu allen Prüfrädern nach Abschluss der Prüfläufe sichtbar, die Ausprägung war jedoch bei den Versuchen mit hoher sowie mit niedriger Durchmischung in einem vergleichbaren Rahmen. Auf Grund der relativ ähnlichen Lasthorizonte dürfte auch die örtliche Temperatur auf der Zahnflanke nur wenig Einfluss haben. Denkbar ist eine Anpassung der Eigenschaften der Zahnflanke, z.B. hinsichtlich Eigenspannungszustand, Oberflächenbeschaffenheit etc. an einen konstanten Belastungszustand, welche zu einem früheren Ausfall durch Grübchen führen kann. Bei Versuchen mit hoher Durchmischung ist diese Anpassung nicht gegeben. Ähnliche Ergebnisse sind auch bei FZG/Eberspächer [78] – wenn auch nicht in dieser ausgeprägten Form – enthalten. Insgesamt zeigen diese Ergebnisse jedoch die enorme Bedeutung einer praxisnahen Versuchsdurchführung. Treten im Praxiseinsatz durchwegs hohe Durchmischungen der Lasten auf, so sollten diese auch im Rahmen der Absicherungs- bzw. Freigabeversuche abgebildet werden.

Ergänzend zur Berechnung der Schadenssummen für die Lastkollektivversuche wurden auch die Schadenssummen D für die Referenzversuche (Einstufenbelastung) mit Hilfe der SAH Miner-Haibach [103] und der Referenzwöhlerlinie ermittelt. Eine Übersicht der mittleren Schadenssummen D_{\emptyset} (arithmetischer Mittelwert), der Standardabweichungen s_D sowie der Versuchsanzahl n für die Referenzversuche sowie die Lastkollektivversuche ist in **Tabelle 4.5** dargestellt. Im Anhang findet sich eine Übersichtstabelle der Schadenssummen für alle ausgewerteten Versuche. Dort sind ebenfalls die berechneten Schadenssummen D für die Schadensakkumulationshypothesen Miner elementar und Miner original zu finden.

		Referenzversuche	Lastkollektivversuche geringe Durchmischung	Lastkollektivversuche hohe Durchmischung
Mittlere Schadenssumme	D_{\emptyset}	0,99	0,60	2,01
Standardabweichung	s_D	0,40	0,38	0,72
Anzahl Versuche	n	34	13	9

Tabelle 4.5: Statistische Auswertung der Schadenssummen

Um die statistische Verteilung der berechneten Schädigungssummen D abschätzen zu können, wurden die logarithmierten Werte in ein Gaußnetz eingetragen. **Bild 4.10**, **Bild 4.11** und **Bild 4.12** zeigen die Verteilung der logarithmierten Schädigungssummen D für jeden Versuch im Gaußnetz. Die Referenzversuche sowie die Lastkollektivversuche mit geringer Durchmischung lassen sich sehr gut durch eine Ausgleichsgerade annähern; die erreichten Schadenssummen der Lastkollektivversuche mit hoher Durchmischung zeigen zum Teil größere Abweichungen von der Ausgleichsgeraden. Dies deutet darauf hin, dass die Schadenssummen logarithmisch normalverteilt sind. Für 50 % Ausfallwahrscheinlichkeit ergeben sich folgende Schadenssummen basierend auf einer logarithmischen Normalverteilung:

- Referenzversuche: $D_{50\%} \approx 0,90$;
- Lastkollektivversuche mit geringer Durchmischung: $D_{50\%} \approx 0,50$;
- Lastkollektivversuche mit hoher Durchmischung: $D_{50\%} \approx 2,0$.

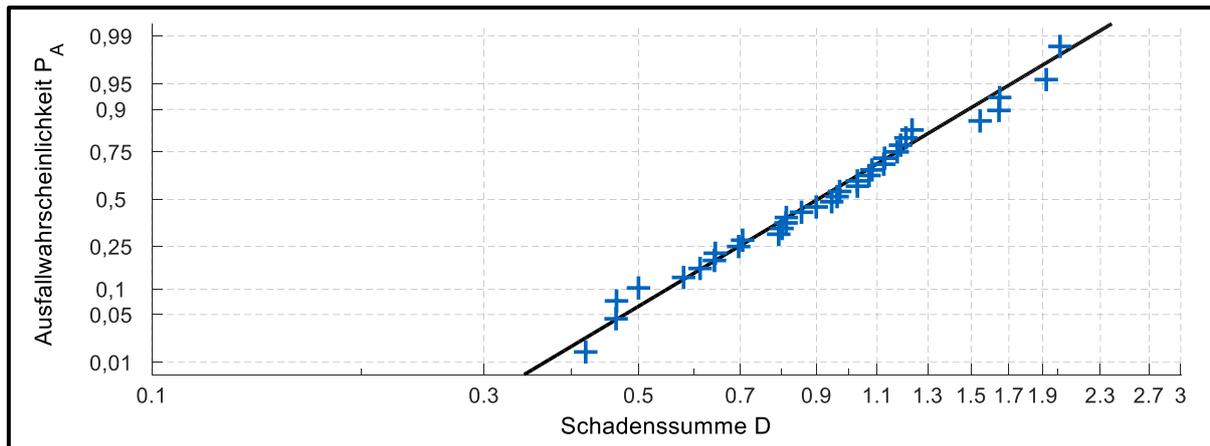


Bild 4.10: Verteilung der Schadenssummen D der Referenzversuche

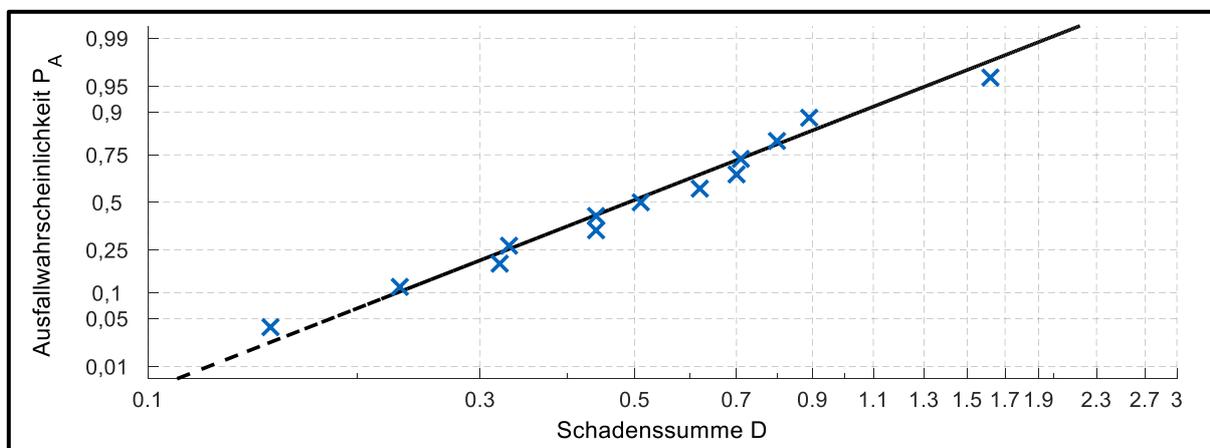


Bild 4.11: Verteilung der Schadenssummen D der Lastkollektivversuche mit geringer Durchmischung

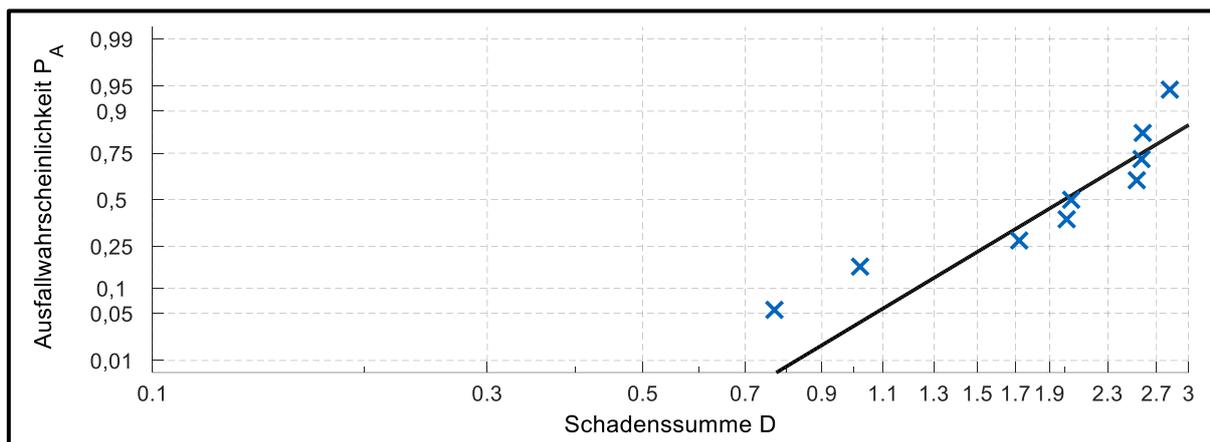


Bild 4.12: Verteilung der Schadenssummen D der Lastkollektivversuche mit hoher Durchmischung

Eine alternative Eintragung der Schadenssummen in ein Weibullnetz zeigte für keine der betrachteten Versuchsreihen (Referenzversuche und Lastkollektivversuche mit hoher sowie geringer Durchmischung) eine bessere Übereinstimmung. Die Verteilung der Schadenssummen der Lastkollektivversuche steht somit in guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen von FZG/Eberspächer [78] bzw. FZG/Stahl [227]. Eine logarithmische Verteilung der Lastspielzah-

len bei Einstufenversuchen wird beispielsweise von FZG/Eberspächer [78] bestätigt, widerspricht jedoch den Ergebnissen des Vorhabens "Lebensdauerstatistik" [226]. Insgesamt unterscheiden sich die Verteilungsfunktionen "logarithmische Normalverteilung" sowie "Weibullverteilung" für die hier betrachteten Versuche jedoch nur in den Randbereichen. Diese können stark durch einzelne Ausreißer verzerrt werden.

5 Erweitertes Vorgehensmodell zur Durchführung von verkürzten Lebensdauerversuchen

Neben der betriebsfesten Auslegung von Getrieben unter Lastkollektivbelastung spielt auch die Prüfung von Getriebesystemen eine große Rolle. Zwar werden bereits im Rahmen des Auslegungsprozesses in der Regel aktuelle Berechnungsmethoden nach Stand der Technik berücksichtigt und somit eine recht genaue Vorhersage der Lebensdauer getroffen, trotzdem wird zumeist noch der experimentelle Nachweis des Erreichens der mindesterforderlichen Lebensdauer gefordert. Aus ökonomischen Gründen werden diese Freigabeteils üblicherweise mit gerafften Lastkollektiven durchgeführt, um die Prüfzeit zu verkürzen. Vor allem bei Getrieben mit langen Laufzeiten (Windkraft- oder Bahngetriebe) ergibt sich darüber hinaus die unabdingbare Notwendigkeit für verkürzte Lebensdauerprüfungen. Ausgangsbasis zur Durchführung von gerafften Lebensdauerprüfungen ist stets die Kenntnis des realen Belastungsverhaltens in Form eines maßgeblichen Lastkollektivs.

Im Folgenden wird ein zweistufiges Vorgehen zur Verkürzung der Prüfzeit von Lebensdauerversuchen beschrieben. In einem ersten Schritt wird die Ableitung eines gerafften Prüflastkollektivs maßgeblich basierend auf den Erkenntnissen von FZG/Ziegler [257] beschrieben. Anschließend wird eine Methodik zur Durchführung von weiter verkürzten Lebensdauerversuchen gezeigt. Hierbei steht die Abschätzung der Restlebensdauer von einzelnen Getriebe-komponenten im Vordergrund. Dabei werden Versuche betrachtet, welche nicht bis zum Erreichen eines Schadenskriteriums durchgeführt werden.

5.1 Ableitung von gerafften Prüfkollektiven

Grundlage zur Ableitung von gerafften Prüfkollektiven ist zunächst die hinreichend genaue Kenntnis des relevanten Belastungskollektivs. Vorhandene Streuungen und Ungenauigkeiten in der Abschätzung des zu Grunde liegenden Betriebslastkollektivs müssen bei den folgenden Überlegungen stets berücksichtigt werden. Im Vordergrund der Raffung von Lastkollektiven steht die Reduzierung der Laufzeit. Hierzu können grundlegend zwei Methoden unterschieden werden:

- Omission: Weglassen von Niedriglasten;
- Raffung: Verschärfung der Betriebsbedingungen.

Im Rahmen dieser Arbeit soll darüber hinaus auch der maßgebende Schadensmechanismus bei der Ableitung eines gerafften Prüfkollektivs unverändert bleiben. Nur so ist es möglich, durch verkürzte Prüfung auf das Ausfallverhalten des realen Getriebes zu schließen.

Nachfolgend werden die beiden Methoden bezogen auf Drehmomentlastkollektive mit schädigungsrelevanten Anteilen im Zeitfestigkeitsgebiet (z.B. auch durch Verwendung der SAH Miner-Haibach) kurz erläutert. Die Ausführungen beziehen sich – wenn nicht anders angegeben – auf die Schadensarten Grübchen und Zahnfußbruch. Neben den Drehmomenten müssen stets auch weitere Betriebsparameter, wie beispielsweise Drehzahl, Öltemperatur, Einschaltzeiten einzelner Gänge oder äußere Kräfte, beachtet werden. Je nach Anwendungsgebiet können diese Effekte unterschiedlich stark ausfallen. Ein Beispiel zur Ableitung eines gerafften, kundennahen Lastkollektivs für Fahrzeuggetriebe ist beispielsweise in [108] oder in [191] zu finden.

5.1.1 Omission

Omission bedeutet das Weglassen von Niedriglasten und Lastanteilen mit geringen Schädigungsanteilen. Hierzu zählen u.a. auch Stillstandszeiten oder Schubmomente mit geringen Belastungen. Da diese Lastanteile oftmals hohe Lastspielzahlen aufweisen, lässt sich hierdurch mitunter eine erhebliche Reduzierung der Prüflaufzeit erreichen. Die Anzahl der wegzulassenden Laststufen sollte so gewählt werden, dass die Ausfallwahrscheinlichkeit des Getriebes hinsichtlich des ursprünglichen Lastkollektivs sowie des gekürzten Lastkollektivs vergleichbar ist. Wang [241] entwickelt ein komplexes Kriterium zur Omission bei Lastkollektiven basierend auf einer statistischen Auswertung der resultierenden Ausfallwahrscheinlichkeiten, welches jedoch umfangreiches Wissen zum statistischen Ausfallverhalten verlangt. Weitere experimentelle Untersuchungen [104, 125] zeigen für exakt vorgegebene Lastkollektive den Einfluss des Omissionsgrades (Anzahl wegzulassender Laststufen) auf die resultierende Ausfallwahrscheinlichkeit. Mit dieser Betrachtung lässt sich für ein vorgegebenes Lastkollektiv experimentell ein zulässiger Omissionsgrad definieren. FZG/Eberspächer [77, 78] gibt "verzichtbare Schädigungsanteile" in Abhängigkeit der geschätzten Standardabweichung sowie der Anzahl an Einzelversuchen für Grübchenschäden an.

FZG/Höhn et al. [122, 123] empfehlen für Zahnfußfestigkeitsversuche, die Lastspiele aller Lasten unter 50 % der Zahnfußdauerfestigkeit wegzulassen. Dieses Vorgehen wird u.a. auch durch Untersuchungen von Heuler [118] an Standardmaterialproben bestätigt. Da Lastkollektive üblicherweise großen Streuungen unterliegen, wird dieses (vereinfachte) Verfahren auch im Rahmen dieser Arbeit zur Omission hinsichtlich der Schadensarten Grübchen und Zahnfußbruch empfohlen. Die zu erwartende gesteigerte Genauigkeit durch die Anwendung höherwertiger Verfahren zur Bestimmung des Omissionsgrades rechtfertigt in der Regel nicht den höheren Arbeitsaufwand. In Ausnahmefällen kann dies jedoch abhängig vom Lastkollektiv zu besseren Ergebnissen führen.

5.1.2 Raffung

Neben der Omission von wenig schädigenden Anteilen des Lastkollektivs kann auch eine Verschärfung der Betriebsbedingungen zu einer weiteren Verkürzung der Prüflaufzeit führen. Eine Verschärfung der Prüfbedingungen kann dabei beispielsweise auf folgende Arten erfolgen:

- Erhöhung des Drehmoments;
- Erhöhung der Drehzahl;
- Erhöhung der Öltemperatur;
- Kombination der genannten Möglichkeiten.

Wird ein Schadensmechanismus isoliert betrachtet, so lässt sich durch Kombination dieser Methoden stets eine bedeutende Raffung bis hin zum Übergang in eine statische Belastung bis zum Ausfall erzielen. Auch wenn dieses Vorgehen in der Praxis vereinzelt durchaus Anwendung findet, ist es hinsichtlich einer anwendungsorientierten Prüfung von Getriebesystemen wenig geeignet. In vielen Fällen wird sich dadurch der maßgebliche Schadensmechanismus ändern. Geht man von einem Anwendungsfall mit Grübchen als maßgeblichem Schadensmechanismus im realen Betrieb aus, kann z.B. eine unzulässige Steigerung der Drehzahl bzw. der Öltemperatur über die maximal im Betrieb auftretenden Werte hinaus zu einem Fressschaden und eine unzulässige Erhöhung des Drehmoments zu einem Zahnfußbruchschaden führen. Diagramme mit Bauteilwöhlerlinien nach Renius [192] für eine gegebene Radpaarung helfen bei der Beurteilung des kritischen Schadensmechanismus.

Zur sinnvollen Durchführung von gerafften Lastkollektivversuchen ist es daher zwingend erforderlich, Raffungsmethoden zu verwenden, welche den maßgeblichen Schadensmechanismus nicht verändern. Hierzu bietet sich vor allem die Anwendung der von FZG/Ziegler [257] entwickelten Methodik zur Lastkollektivraffung basierend auf globalen und lokalen Bauteilwöhlerlinien nach Renius [192] an. Durch Kombination von Omission und weitergehender Raffung lassen sich nach FZG/Ziegler [257] oft Raffungsfaktoren im Bereich bis zu 10 realisieren, abhängig vom zu Grunde liegenden Lastkollektiv. Je fülliger das Summenkollektiv ist, desto geringere Raffungen sind vertretbar. Der Raffungsfaktor ist dabei folgendermaßen definiert:

$$RF = \frac{t_{Anwendung}}{t_{Versuch}} \tag{5.1}$$

RF	- Raffungsfaktor	$t_{Anwendung}$	- Laufzeit Betriebslastkollektiv
$t_{Versuch}$	- Laufzeit im Versuch		

5.2 Durchführung verkürzter Lebensdauerersuche

Führt die Anwendung der vorhergehend beschriebenen Methoden nicht zur gewünschten Laufzeitverkürzung im Versuch, so ist wie eingangs bereits erwähnt eine weitere Verkürzung durch Reduktion der Prüflaufzeit möglich (siehe **Bild 5.1**). Eine Extrapolation der Erkenntnisse auf längere Laufzeiten kann durch statistische Methoden und Werkstoffanalysen erfolgen. Naturgemäß geht bei zusätzlicher Verkürzung der Prüflaufzeit weitere Information verloren. Diese Methodik ist daher vor allem für Anwendungsgebiete geeignet, wo auch im gerafften Versuch typischerweise keine Prüfung bis zum Lebensdauerende möglich ist, z.B. Windkraft oder Bahn.

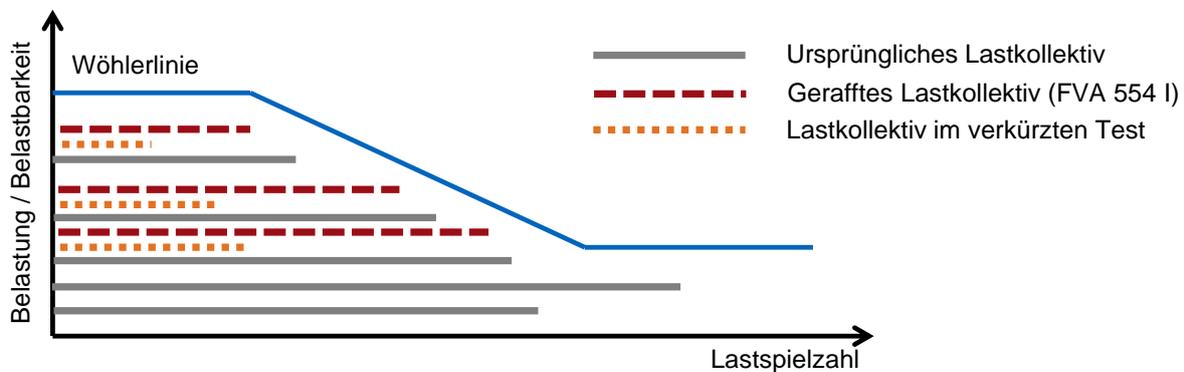


Bild 5.1: Verkürzte Versuche

5.2.1 Statistische Auswertung von verkürzten Versuchen

In den folgenden Abschnitten wird die Anwendung der Zuverlässigkeitstestplanung auf Zahnräder beschrieben. Dabei werden vorrangig die Schadensarten Grübchen und Zahnfußbruch betrachtet und aus statistischer Sicht bewertet, da diese einer Lebensdauerberechnung zugänglich sind. Die Verteilungsfunktion der Ausfallzeiten bezüglich des maßgeblichen Schadensmechanismus muss dabei ebenso wie die geplante Prüfdauer t_P und die geforderte Lebensdauer t bekannt sein. Die geforderte Lebensdauer t wird üblicherweise mit Mitteln der Lebensdauer-/Tragfähigkeitsberechnung unter Angabe einer Überlebenswahrscheinlichkeit (üblicherweise 50 %, 90 % oder 99 %) ermittelt und dementsprechend mit $t_{x\%}$ bezeichnet.

Analog zur geforderten Lebensdauer $t_{xx\%}$ kann auch die erforderliche Lastspielzahl $N_{xx\%}$ verwendet werden. Für Zahnräder wird hierfür beispielsweise eine Tragfähigkeitsberechnung entsprechend ISO 6336 [35, 36] durchgeführt. Die Lastspielzahl $N_{xx\%}$, für welche die Sicherheit $S = 1$ im Zeitfestigkeitsgebiet ermittelt wird, ist für die Zuverlässigkeitstestplanung maßgeblich. Zentrale Bewertungsgröße bei der Zuverlässigkeitstestplanung unter Berücksichtigung von verkürzten Laufzeiten ist die Aussagewahrscheinlichkeit P_A , welche angibt, mit welcher Wahrscheinlichkeit eine bestimmte Zuverlässigkeit zur Ziellaufzeit t sicher erreicht wird.

Als Grundlage zur Durchführung von verkürzten Lebensdauerprüfungen dienen häufig bereits geraffte Lastkollektive, z.B. entsprechend der Vorgaben nach FZG/Ziegler [257]. Die gerafften Lastkollektive enthalten üblicherweise große Anteile im Zeitfestigkeitsgebiet. Daher ist für die folgenden Betrachtungen vor allem die Verteilung der Lastspielzahlen bis zum Ausfall im Zeitfestigkeitsgebiet maßgeblich und nicht die Verteilung der Belastungen im Dauerfestigkeitsbereich.

Nachfolgend wird die Anwendung der Zuverlässigkeitstestplanung auf die Schadensarten Grübchen und Zahnfußbruch an Zahnrädern und somit auf weibull- und logarithmisch normalverteilte Ausfallmechanismen ausführlich behandelt. Diese Erkenntnisse werden anschließend auf weitere Schadensmechanismen und Maschinenelemente übertragen. Des Weiteren wird eine Möglichkeit zur Auswertung von verkürzten Lastkollektivversuchen skizziert.

5.2.1.1 Schadensart Grübchen

Statistisches Ausfallverhalten

Bezüglich der Schadensart Grübchen an einsatzgehärteten Stirnrädern lässt sich nach FZG/Stahl [226, 226] das Ausfallverhalten bezogen auf die Lastspielzahlen, also im Bereich der Zeitfestigkeit, selbst bei sehr geringen Ausfallwahrscheinlichkeiten gut mit einer zweiparametrischen Weibullverteilung mit Formparameter $b = 3,2$ beschreiben. Die charakteristische Lebensdauer T in Abhängigkeit von der geforderten Lebensdauer für 50 % Überlebenswahrscheinlichkeit $t_{50\%}$ berechnet sich mit der Zuverlässigkeit $R(t) = 50\%$ folgendermaßen:

$$T = \left(- \frac{t_{50\%}^b}{\ln R(t)} \right)^{\frac{1}{b}} \quad (5.2)$$

T	-	Charakteristische Lebensdauer	$t_{50\%}$	-	Geforderte Lebensdauer für $R(t) = 50\%$
b	-	Formparameter der Weibullverteilung	$R(t)$	-	Zuverlässigkeit

Wird die Ziellaufzeit als Referenzwert betrachtet und zu $t_{50\%} = 1,0$ gesetzt, so ergibt sich die charakteristische Lebensdauer $T = 1,1214$ für Grübchenschäden. Zur besseren grafischen Darstellbarkeit wird das Lebensdauerverhältnis L_V als Laufvariable der Abszisse verwendet und ist folgendermaßen definiert:

$$L_V = \frac{t_p}{t_{xx\%}} \quad (5.3)$$

L_V	-	Lebensdauerverhältnis	t_p	-	Prüfzeit im verkürzten Versuch
$t_{xx\%}$	-	Geforderte Lebensdauer			

Für $L_V = 1,0$ gilt für die Ausfall- und Überlebenswahrscheinlichkeit entsprechend der Definition der Ziellaufzeit $t_{50\%}$:

$$F(L_V = 1,0) = R(L_V = 1,0) = 50\% \tag{5.4}$$

$F(t)$ - Ausfallwahrscheinlichkeit	$R(t)$ - Zuverlässigkeit
L_V - Lebensdauerverhältnis	

Der Verlauf der Ausfallwahrscheinlichkeit und der Dichtefunktion der statistischen Verteilung der Ausfallzeiten bezüglich Grübchenschäden an Zahnrädern ist im Anhang dargestellt.

Ziel dieser Arbeit ist es, vorrangig Aussagen für niedrige Lebensdauerhältnisse im Bereich von $L_V = 0,1 \dots 0,2$ zu treffen. Für diesen Bereich sind nur geringe Ausfallwahrscheinlichkeiten zu erwarten ($F(0,1 \cdot t_{50\%}) = 0,04\%$ und $F(0,2 \cdot t_{50\%}) = 0,4\%$). Ein Erreichen des Schadenskriteriums bezüglich Grübchen im verkürzten Versuch tritt daher voraussichtlich nicht ein. Nachfolgend werden Methoden vorgestellt, um verkürzte Lebensdauerexperimente bezüglich weibullverteilter Grübchenschäden aus statistischer Sicht bewertbar zu machen. Dabei werden sowohl Testläufe ohne Ausfälle, als auch solche mit x Ausfällen bei n Prüflingen betrachtet.

Verkürzte Lebensdauerexperimente ohne Ausfälle

Bertsche [57] gibt für zensierte Testläufe mit weibullverteilten Zufallsgrößen folgenden Zusammenhang für Versuchsreihen ohne Ausfall an:

$$R(t) = (1 - P_A)^{\frac{1}{(L_V)^{b \cdot n}}} \tag{5.5}$$

$$P_A = 1 - R(t)^{(L_V)^{b \cdot n}} \tag{5.6}$$

$R(t)$ - Zuverlässigkeit	P_A - Aussagewahrscheinlichkeit
L_V - Lebensdauerverhältnis	b - Formparameter der Weibullverteilung
n - Anzahl der Prüflinge	

Die Aussagewahrscheinlichkeit P_A beschreibt dabei zum einen, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Ausfall bei einem verkürzten Lebensdauerexperiment mit n Prüflingen und bekannter Komponentenzuverlässigkeit $R(t)$ zur Ziellaufzeit t eintritt, andererseits kann damit bei erfolgreich durchgeführtem Versuch ohne Ausfall eine Aussage darüber gemacht werden, mit welcher Wahrscheinlichkeit die vorgegebene Mindestzuverlässigkeit $R(t)$ zur Ziellaufzeit t sicher erreicht wird. Die Aussagesicherheit nimmt mit steigender Prüfdauer t_p und wachsender Prüflosgröße n zu.

Verkürzte Lebensdauerexperimente mit x Ausfällen

Für verkürzte Lebensdauerexperimente von weibullverteilten Zufallsgrößen mit x Ausfällen bei n Prüflingen gibt Bertsche [57] folgende allgemeingültige Formel basierend auf dem Binomialsatz an:

$$P_A = 1 - \sum_{i=0}^x \binom{n}{i} \cdot (1 - R(t))^i \cdot R(t)^{n-i} \tag{5.7}$$

i - Laufvariable	P_A - Aussagewahrscheinlichkeit
x - Anzahl der Ausfälle	$R(t)$ - Zuverlässigkeit
n - Anzahl der Prüflinge	

Mit dem Ansatz zur Berechnung der Überlebenswahrscheinlichkeit bei Vorliegen einer Weibullverteilung (Gleichung (5.8)) und dem speziellen Ansatz für die Zuverlässigkeit zur Prüfzeit t_p bei verkürzten Lebensdauerests (Gleichung (5.9)) ergibt sich daraus eine Gleichung zur Ermittlung der Aussagewahrscheinlichkeit P_A bei verkürzten Lebensdauerests mit x Ausfällen (Gleichung (5.10)).

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b} \quad (5.8)$$

$$R(t_p) = R(t)^{(L_V)^b} \quad (5.9)$$

$$P_A = 1 - \sum_{i=0}^x \binom{n}{i} \cdot \left(1 - R(t)^{(L_V)^b}\right)^i \cdot R(t)^{(L_V)^b \cdot (n-i)} \quad (5.10)$$

$R(t)$	- Zuverlässigkeit	T	- Charakteristische Lebensdauer
L_V	- Lebensdauerverhältnis	b	- Formparameter der Weibullverteilung
i	- Laufvariable	x	- Anzahl der Ausfälle
t_p	- Prüfzeit im verkürzten Versuch	P_A	- Aussagewahrscheinlichkeit
n	- Anzahl der Prüflinge		

5.2.1.2 Schadensart Zahnfußbruch

Statistisches Ausfallverhalten

Ausfälle durch Zahnfußbruch im Zeitfestigkeitsgebiet sind gemäß den Erkenntnissen von FZG/Stahl [226] logarithmisch normalverteilt. Die Streuung s_{\log} ist lastabhängig; die Basis zur Ermittlung bildet der dekadische Logarithmus. FZG/Stahl [226] gibt den Zusammenhang zwischen Standardabweichung s_{\log} und Lebensdauerfaktor Y_{NT} basierend auf einer großen Anzahl ausgewerteter Pulsatorversuchsergebnisse an. Die Standardabweichung der logarithmischen Lastspielzahlen nimmt demnach Werte im Bereich von $0,05 < s_{\log} < 0,13$ an.

Der qualitative Verlauf der Ausfallwahrscheinlichkeit und der Dichtefunktion der statistischen Verteilung der Ausfallzeiten bezüglich der Schadensart Zahnfußbruch an Zahnrädern ist im Anhang dargestellt.

Ziel dieser Arbeit ist es, vorrangig Aussagen für niedrige Lebensdauererhältnisse im Bereich von $L_V = 0,1 \dots 0,2$ zu treffen. Für diesen Bereich sind nur sehr geringe Ausfallwahrscheinlichkeiten zu erwarten ($F(0,1 \cdot t_{50\%}) = 7,6 \cdot 10^{-22} \%$ und $F(0,2 \cdot t_{50\%}) = 1,4 \cdot 10^{-10} \%$). Diese Werte liegen deutlich unter denjenigen für weibullverteilte Grübchenschäden. Ein Zahnfußbruch im verkürzten Versuch ist daher bei gleicher geforderter Lebensdauer t deutlich unwahrscheinlicher als ein Grübchenschaden. Nachfolgend werden Methoden vorgestellt, um verkürzte Lebensdauerests bezüglich Zahnfußbrüchen aus statistischer Sicht bewertbar zu machen. Dabei werden sowohl Testläufe ohne Ausfälle, als auch solche mit x Ausfällen bei n Versuchen betrachtet.

Verkürzte Lebensdauerests ohne Ausfälle

Für die Aussagewahrscheinlichkeit P_A gibt Bertsche [57] folgenden allgemeingültigen Zusammenhang in Abhängigkeit von der Zuverlässigkeit $R(t)$ an.

$$P_A = 1 - R(t)^n \quad (5.11)$$

$R(t)$ - Zuverlässigkeit	P_A - Aussagewahrscheinlichkeit
t - Geforderte Laufzeit	n - Anzahl der Prüflinge

Bei einer logarithmischen Normalverteilung lässt sich die Zuverlässigkeit zur logarithmierten Laufzeit t_{\log} wie folgt angeben [115]:

$$R(t_{\log}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot s_{\log}} \cdot \int_{t_{\log}}^{\infty} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\tau - \mu_{\log}}{s_{\log}} \right)^2} d\tau = 1 - \Phi \left(\frac{t_{\log} - \mu_{\log}}{s_{\log}} \right) = \underbrace{\Phi \left(\frac{\mu_{\log} - t_{\log}}{s_{\log}} \right)}_{\text{Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung}} \quad (5.12)$$

$R(t)$ - Zuverlässigkeit	μ_{\log} - Erwartungswert (Lognormalverteilung)
s_{\log} - Standardabweichung (Lognormalvert.)	t_{\log} - Logarithmierte Lebensdauer
τ - Integrationsvariable	Φ - Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung

Die geforderte Lebensdauer für 50 % Überlebenswahrscheinlichkeit $t_{50\%}$ entspricht bei einer Normalverteilung dem Mittelwert μ . Wird $t_{50\%} = 1,0$ als Referenzwert gesetzt, folgt für den Mittelwert der logarithmischen Normalverteilung:

$$\mu_{\log} = t_{50\%, \log} = \log_{10} 1,0 = 0 \quad (5.13)$$

μ_{\log} - Erwartungswert (Lognormalverteilung)	$t_{50\%, \log}$ - Logarithmierte Lebensdauer
---	---

Für $t_{50\%} = 1,0$, gilt für das Lebensdauerverhältnis im verkürzten Versuch:

$$L_V = \frac{t_P}{t_{50\%}} = t_P \quad (5.14)$$

t_P - Prüfzeit im verkürzten Versuch	$t_{50\%}$ - Geforderte Lebensdauer
L_V - Lebensdauerverhältnis	

Entsprechend berechnet sich die Zuverlässigkeit für verkürzte Lebensdauerprüfungen und daraus resultierend die Vertrauenswahrscheinlichkeit (siehe auch Gleichung (5.11)) mit Hilfe der Verteilungsfunktion für die Standardnormalverteilung Φ folgendermaßen:

$$R(t_P) = \Phi \left(\frac{-\log L_V}{s_{\log}} \right) \quad (5.15)$$

$$P_A = 1 - \left(\Phi \left(\frac{-\log L_V}{s_{\log}} \right) \right)^n \quad (5.16)$$

$R(t)$ - Zuverlässigkeit	P_A - Aussagewahrscheinlichkeit
L_V - Lebensdauerverhältnis	s_{\log} - Standardabweichung (Lognormalvert.)
n - Anzahl der Prüflinge	Φ - Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung

Wird die geforderte Lebensdauer $t_{xx\%}$ für Überlebenswahrscheinlichkeiten, welche von 50 % abweichen, angegeben, z.B. 99 % bei Zahnrädern oder 90 % bei Wälzlagern, so ist der Zusammenhang zwischen Aussagewahrscheinlichkeit und Lebensdauerverhältnis komplexer und wird im Folgenden basierend auf den obigen Überlegungen hergeleitet:

$$R(t_p) = \Phi\left(\frac{\mu_{log} - t_{p,log}}{s_{log}}\right) \tag{5.17}$$

$$L_V = \frac{t_p}{t_{xx\%}} \Rightarrow t_{p,log} = \log(L_V \cdot t_{xx\%}) = \log L_V + t_{xx\%,log} \tag{5.18}$$

$$R(t_p) = \Phi\left(\frac{\mu_{log} - (\log L_V + t_{xx\%,log})}{s_{log}}\right) \tag{5.19}$$

$$P_A = 1 - (R(t_p))^n = 1 - \left(\Phi\left(\frac{\mu_{log} - (\log L_V + t_{xx\%,log})}{s_{log}}\right)\right)^n \tag{5.20}$$

$R(t)$ - Zuverlässigkeit	P_A - Aussagewahrscheinlichkeit
L_V - Lebensdauerverhältnis	s_{log} - Standardabweichung (Lognormalvert.)
μ_{log} - Erwartungswert (Lognormalverteilung)	t_{log} - Logarithmierte Lebensdauer
n - Anzahl der Prüflinge	Φ - Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung

Der Mittelwert der Verteilung μ_{log} entspricht auch bei dieser Auswertung der geforderten Lebensdauer für 50 % Überlebenswahrscheinlichkeit $t_{50\%,log}$. Referenziert man die Lebensdauerwerte auf $t_{50\%} = 1,0$, gilt auch hier $\mu_{log} = 0$. Dieses Vorgehen bietet den Vorteil, dass für die Berechnung die konkreten Lebensdauerwerte nicht bekannt sein müssen, sondern lediglich die Umrechnungsfaktoren auf von 50 % abweichende Überlebenswahrscheinlichkeiten. Mit Kenntnis der (lastabhängigen) Form- und Lageparameter μ_{log} und s_{log} sind diese ermittelbar.

Verkürzte Lebensdauerests mit x Ausfällen

Grundlage für die statistische Auswertung von verkürzten Lebensdauerests mit x Ausfällen bei n Versuchen bildet Gleichung (5.7). Mit den Erkenntnissen zur logarithmischen Normalverteilung aus dem vorangegangenen Abschnitt lassen sich die bekannten Gleichungen auf das Ausfallverhalten bezüglich Zahnfußbruch anwenden. Bei einer geforderten Lebensdauer für 50% Überlebenswahrscheinlichkeit besteht dabei folgender Zusammenhang für die Vertrauenswahrscheinlichkeit:

$$P_A = 1 - \sum_{i=0}^x \binom{n}{i} \cdot \left(1 - \Phi\left(\frac{-\log L_V}{s_{log}}\right)\right)^i \cdot \left(\Phi\left(\frac{-\log L_V}{s_{log}}\right)\right)^{n-i} \tag{5.21}$$

P_A - Aussagewahrscheinlichkeit	i - Laufvariable
L_V - Lebensdauerverhältnis	s_{log} - Standardabweichung (Lognormalvert.)
Φ - Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung	n - Anzahl der Prüflinge

Für beliebige Überlebenswahrscheinlichkeiten bezüglich der geforderten Lebensdauer $t_{xx\%}$ lässt sich die Aussagewahrscheinlichkeit allgemeingültig berechnen.

$$P_A = 1 - \sum_{i=0}^x \binom{n}{i} \cdot \left(1 - \Phi \left(\frac{\mu_{\log} - (\log L_V + t_{xx\%, \log})}{s_{\log}} \right) \right)^i \cdot \left(\Phi \left(\frac{\mu_{\log} - (\log L_V + t_{xx\%, \log})}{s_{\log}} \right) \right)^{n-i} \quad (5.22)$$

P_A	-	Aussagewahrscheinlichkeit	i	-	Laufvariable
L_V	-	Lebensdauererhältnis	s_{\log}	-	Standardabweichung (Lognormalvert.)
t_{\log}	-	Logarithmierte Lebensdauer	μ_{\log}	-	Erwartungswert (Lognormalverteilung)
Φ	-	Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung	n	-	Anzahl der Prüflinge

5.2.1.3 Weitere Schadensarten

Die Zusammenhänge der Zuverlässigkeitstestplanung für die Schadensarten Grübchen und Zahnfußbruch wurden beispielhaft in den vorangegangenen Abschnitten beschrieben. Die angegebenen Gleichungen können jedoch auch allgemein auf weibull- und logarithmisch normalverteilte Zufallsgrößen angewendet werden. Die meisten Komponenten der Antriebstechnik lassen sich hinsichtlich ihrer Ausfallzeiten diesen beiden Verteilungen zuordnen und sind somit aus statistischer Sicht bewertbar. Ermüdungsschäden an Wälzlagern folgen nach Bertsche [57] beispielsweise ebenfalls einer Weibullverteilung. Hier können somit die Gleichungen entsprechend Kapitel 5.2.1.1 Anwendung finden.

Die angegebenen Gleichungen zur logarithmischen Normalverteilung gelten bei Verwendung der üblichen Verteilungskennwerte (μ , s und t) anstelle der entsprechenden logarithmischen Größen (μ_{\log} , s_{\log} , t_{\log}) auch für die Gaußverteilung, von welcher die logarithmische Normalverteilung abgeleitet ist. Somit können auch Schadensarten statistisch untersucht werden, welche normalverteilt sind.

5.2.1.4 Anwendung auf Lastkollektive

Die bisher hergeleiteten Zusammenhänge zur Zuverlässigkeitstestplanung gelten nur für konstante Lasten (Einstufenbelastung). Basis der hier betrachteten verkürzten Lebensdauerprüfungen sind jedoch üblicherweise Lastkollektive, welche beispielsweise entsprechend der Vorgaben von FZG/Ziegler [257] gerafft wurden. Im Folgenden werden daher die Möglichkeiten zur systematischen, statistischen Bewertung verkürzter Lebensdauerprüfungen unter Lastkollektivbeanspruchung betrachtet.

$$L_{V,K} = \frac{D_P}{D} = \frac{\sum \frac{h_{P,i}}{N_i}}{\sum \frac{h_i}{N_i}} \quad (5.23)$$

$$h_{P,i} = L_{V,K} \cdot h_i \quad (5.24)$$

$L_{V,K}$	-	Lebensdauererhältnis (Lastkollektiv)	D_P	-	Schadenssumme im verkürzten Versuch
D	-	Geforderte Schadenssumme	$h_{P,i}$	-	Lastspielzahl auf Lastniveau i im verkürzten Versuch
N_i	-	Ertragbare Lastspielzahl auf Lastniveau i	h_i	-	Lastspielzahl auf Lastniveau i

Für verkürzte Lebensdauerprüfungen unter Lastkollektivbeanspruchung kann das Lebensdauererhältnis $L_{V,K}$ in Abhängigkeit von der Schadenssumme im verkürzten Test D_P und der zulässigen Schadenssumme D für die geforderte Lebensdauer bei vorgegebener Überlebens-

wahrscheinlichkeit $t_{xx\%}$ angegeben werden. Die Größen $h_{P,i}$ und h_i bezeichnen dabei die Lastspiele auf der i -ten Stufe des jeweiligen Lastkollektivs. Für die folgenden Betrachtungen wird für das Prüfkollektiv dieselbe Form gefordert, wie sie das Ausgangskollektiv besitzt (Gleichungen (5.23) und (5.24) sowie **Bild 5.2**).

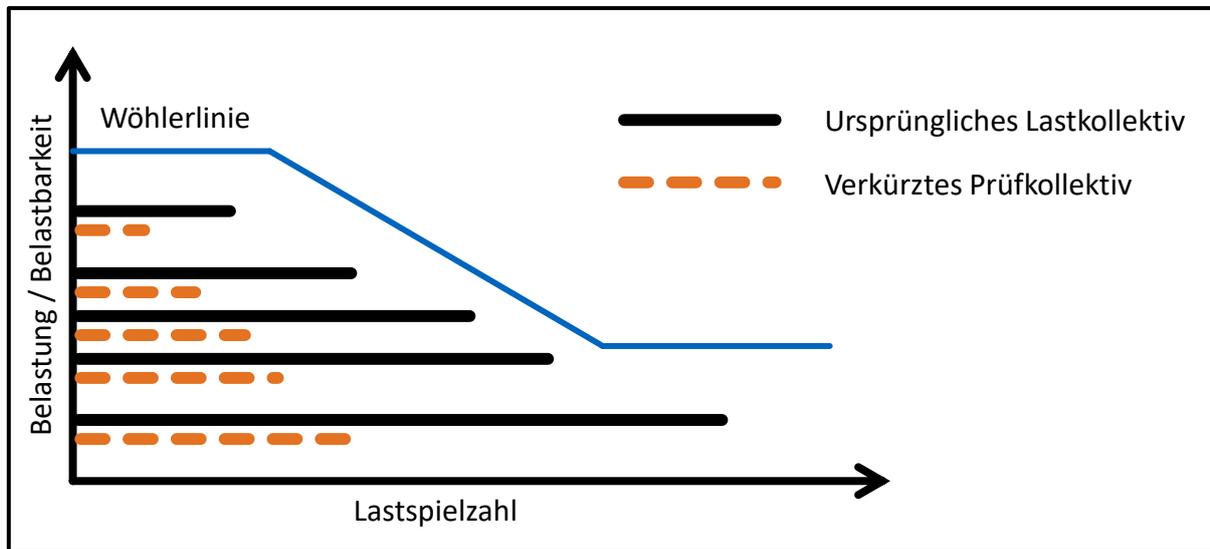


Bild 5.2: Ursprüngliches Lastkollektiv und Prüfkollektiv

Zu beachten ist dabei, dass verkürzte Lebensdauerprüfungen unter Lastkollektivbeanspruchung mit dem Lebensdauerverhältnis $L_{V,K}$ nicht zwingend zur gleichen Prüfzeitverkürzung wie solche mit dem Lebensdauerverhältnis L_V führen. Unterschiedliche Drehzahlen pro Laststufe können zu unterschiedlichen Prüfzeiten führen. Ausgehend von der Definition des Lebensdauerverhältnisses entsprechend Gleichung (2.3) kann folgender Zusammenhang zwischen den Lebensdauerverhältnissen hergestellt werden:

$$L_V = \frac{t_P}{t} = \frac{\sum t_{P,i}}{\sum t_i} = \frac{\sum \frac{h_{P,i}}{n_i}}{\sum \frac{h_i}{n_i}} = \frac{\sum L_{V,K} \cdot h_i}{\sum h_i} \stackrel{\text{für } n_i = \text{konst.}}{=} L_{V,K} \quad (5.25)$$

$L_{V,K}$	- Lebensdauerverhältnis (Lastkollektiv)	$h_{P,i}$	- Lastspielzahl auf Lastniveau i im verkürzten Versuch
L_V	- Lebensdauerverhältnis	h_i	- Lastspielzahl auf Lastniveau i
n_i	- Ertragbare Lastspielzahl auf Lastniveau i	t	- Geforderte Lebensdauer
t_P	- Prüfdauer		

Das Lebensdauerverhältnis für Lastkollektivbeanspruchung $L_{V,K}$ entspricht nur unter der Voraussetzung konstanter Drehzahlen dem Lebensdauerverhältnis für Einstufenbelastungen L_V .

Im Folgenden werden drei Varianten abgeleitet, welche die Ermittlung der Aussagewahrscheinlichkeit P_A für verkürzte Lebensdauertests unter Lastkollektivbeanspruchung erlauben. Variante 1 verwendet dazu die statistische Verteilung der Schadenssumme D und kann folglich nur angewendet werden, wenn die Verteilungsparameter hinreichend genau aus systematischen Untersuchungen bekannt sind. Variante 2 und 3 ermöglichen die Anwendung der bekannten Formeln zur Ermittlung der Aussagewahrscheinlichkeit P_A basierend auf der Zuverlässigkeit des Lastkollektivs $R_L(t)$. Diese Zuverlässigkeit wird bei Variante 2 basierend auf dem

Superpositionsprinzip aus den Zuverlässigkeiten $R_i(t)$ auf jeder Laststufe ermittelt; bei Variante 3 aus einem schadensäquivalenten Einstufenkollektiv. Sind Informationen zur statistischen Verteilung der Schadenssumme D bekannt, ist Variante 1 vorzuziehen. Sind keine Informationen zur statistischen Verteilung der Schadenssumme D vorhanden, sollte die Aussagewahrscheinlichkeit P_A mit Variante 2 ermittelt werden, da diese im Vergleich zu Variante 3 deutlich mehr Einflussparameter berücksichtigt, wie etwa unterschiedliche Drehzahlen pro Laststufe oder die lastabhängige logarithmische Standardabweichung s_{\log} . Die Ermittlung der Aussagewahrscheinlichkeit P_A nach Variante 3 ist für eine überschlägige Abschätzung geeignet.

Um unterschiedliche Vorgehensweisen für verkürzte Lebensdauererprobungen untereinander zu vergleichen, ist darauf zu achten, dass zur Berechnung der Aussagewahrscheinlichkeit P_A durchgehend dieselbe Variante verwendet wird. Mit unterschiedlichen Verfahren berechnete Werte sind nicht miteinander vergleichbar und können auch nicht ineinander überführt werden.

Variante 1: Statistische Verteilung der Schadenssumme D bekannt

Im Idealfall ist die Verteilung der erreichten Schadenssummen bis zum Ausfall bereits aus durchgeführten Versuchen mit ähnlichen Komponenten und Lastkollektiven bekannt. Frühere Versuche [78, 208, 227, 229] zeigen, dass sich die Schadenssummen bis zum Ausfall D_{zul} gut durch eine logarithmische Normalverteilung annähern lassen. Dies wird auch im Rahmen der für diese Arbeit durchgeführten Lastkollektivversuche bestätigt. Beispielsweise ist in **Bild 5.3** die Zuverlässigkeit $R(D)$ für logarithmisch normalverteilte Schädigungssummen D mit einer logarithmischen Standardabweichung $s_{\log} = 0,3$ und dem Mittelwert $D = 1,0$ aufgetragen. Eine direkte Interpretation der berechneten Zuverlässigkeitswerte ist nur dann möglich, wenn die Schadensakkumulation gegen die 50 % / 90 % / 99 % - Wöhlerlinie erfolgt und die Schadenssumme eins tatsächlich einer Zuverlässigkeit $R(D=1,0) = 50\% / 90\% / 99\%$ entspricht. Andere Werte müssen umgerechnet werden. Entscheidend ist, dass sowohl für die ursprüngliche Auswertung als auch für die Auswertung verkürzter Lebensdauererprobungen unter Lastkollektivbeanspruchung dieselbe Schadensakkumulationshypothese verwendet wird.

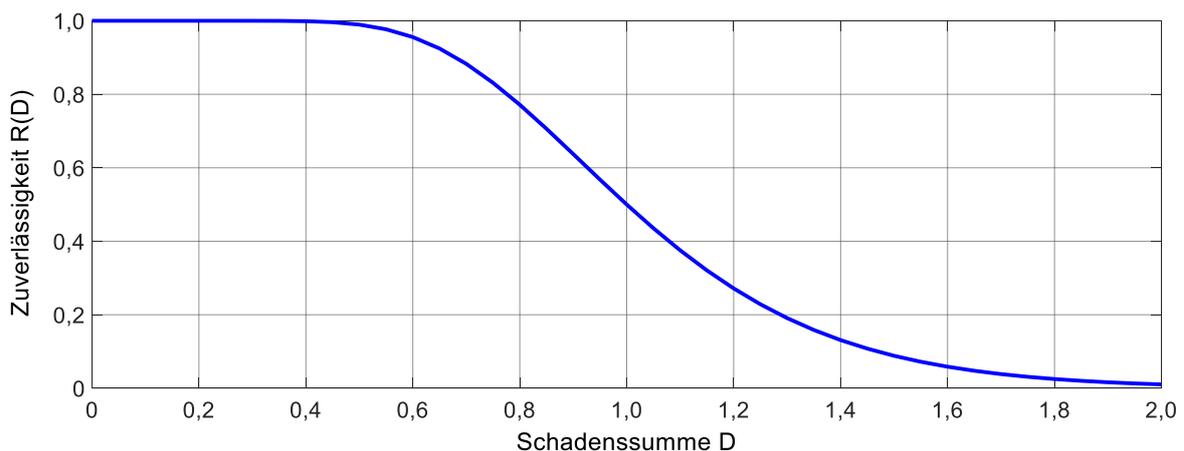


Bild 5.3: Zuverlässigkeit $R(D)$ für logarithmisch normalverteilte Schadenssummen

Ist das statistische Ausfallverhalten bezüglich der Schadenssumme D bekannt, können also die bekannten Zusammenhänge für logarithmisch normalverteilte (falls benötigt: weibullverteilte) Versuchsgrößen auch auf die Berechnung von verkürzten Lebensdauerprüfungen unter Lastkollektivbelastung angewandt werden. Werden die Lebensdauern t und t_P durch die Schädigungssummen D und D_P ersetzt sowie das Lebensdauer Verhältnis $L_{V,K}$ verwendet, lassen

sich die bereits hergeleiteten Gleichungen zur Ermittlung der Aussagewahrscheinlichkeit P_A entsprechend der vorhergehenden Abschnitte verwenden, was die Herleitung eines Kennwerts zur statistischen Aus- und Bewertung von verkürzten Lebensdauerversuchen unter Lastkollektivbeanspruchung zulässt. Für verkürzte Lebensdauertests ohne Ausfälle gilt folglich Gleichung (5.26), für Lebensdauertests mit x Ausfällen bei n Versuchen Gleichung (5.27):

$$P_A = 1 - R(D_P)^n \quad (5.26)$$

$$P_A = 1 - \sum_{i=0}^x \binom{n}{i} \cdot (1 - R(D_P))^i \cdot (R(D_P))^{n-i} \quad (5.27)$$

$R(t)$	-	Zuverlässigkeit	i	-	Laufvariable
D_P	-	Schadenssumme im verkürzten Versuch	x	-	Anzahl der Ausfälle
n	-	Anzahl der Prüflinge			

Üblicherweise ist die Verteilung der Schadenssummen, welche zum Ausfall führen, allerdings nicht bekannt. Geht man vom Grenzfall eines Lastkollektivs mit einer Laststufe aus (dies entspricht einem Einstufenversuch), so kann für diesen Fall vereinfachend das statistische Ausfallverhalten der betrachteten Schadensart im Zeitfestigkeitsgebiet zu Grunde gelegt werden, da die Schadenssumme in diesem Fall direkt proportional zur Lastspielzahl auf diesem Niveau ist. Die zulässige Schadenssumme D_{zul} korreliert dabei mit der Ausfalllastspielzahl $N_{Ausfall}$. Für Grübchen würde man somit beispielsweise eine Weibullverteilung mit Formparameter $b = 3,2$ verwenden und für Zahnfußbruch eine logarithmische Normalverteilung mit lastabhängiger Streuung s_{log} . Diese Näherung ist nur für Lastkollektive mit wenigen Laststufen und geringer Durchmischung gültig. Die Anwendbarkeit bei Lastkollektiven mit einer großen Anzahl an Laststufen ist noch zu überprüfen.

Nachfolgend werden daher zwei weitere Varianten auf Basis getroffener Hypothesen entwickelt und skizziert, mit welchen Lastkollektive dennoch bei der Auswertung verkürzter Lebensdauerprüfungen berücksichtigt werden können. Entscheidend ist dabei die Ermittlung der Zuverlässigkeit des Bauteils unter Lastkollektivbeanspruchung $R_L(t)$.

Variante 2: Ermittlung der Zuverlässigkeit bei Prüfung durch Lastkollektiv mittels Superposition

Die Zuverlässigkeit eines Bauteils unter Lastkollektivbeanspruchung lässt sich mit Hilfe des Superpositionsprinzips ermitteln. Dabei werden die Ausfallwahrscheinlichkeiten $F_i(t_i)$ für jede Stufe i des Lastkollektivs zu einer Ausfallwahrscheinlichkeit des Lastkollektivs $F_L(t)$ aufsummiert. Diese Größe kann in eine Gleichung für die Zuverlässigkeit des Lastkollektivs $R_L(t)$ überführt werden. Mit dieser Methode lassen sich auch theoretische Ausfallwahrscheinlichkeiten $F_L(t) > 100\%$ berechnen, welche so nicht interpretiert werden können. Die folgenden Zusammenhänge sind somit nur für sehr geringe Einzelausfallwahrscheinlichkeiten $F_i(t_i)$ bei relativ wenigen Laststufen gültig. Dies stellt jedoch für verkürzte Lebensdauertests unter Lastkollektivbeanspruchung keine Einschränkung dar, da Ausfälle im Prüfzeitraum in der Regel sehr unwahrscheinlich sind (siehe Abschnitt 5.2.1.1 und 5.2.1.2).

$$F_L(t) = \sum_{i=1}^n F_i(t_i) \quad (5.28)$$

$$R_L(t) = 1 - F_L(t) = 1 - \sum_{i=1}^n (1 - R_i(t_i)) = \sum_{i=1}^n R_i(t_i) + (1 - n) \quad (5.29)$$

gültig für: $F_i(t_i) \ll 50\%$ bzw. $R_i(t_i) \gg 50\%$

$R_L(t)$ -	Zuverlässigkeit bei Prüfung durch Lastkollektiv	$F_L(t)$ -	Ausfallwahrscheinlichkeit des Lastkollektivs
i -	Laststufe	t -	Prüfdauer
n -	Anzahl der Versuche		

Mit dieser Methode kann man bei der statistischen Auswertung verkürzter Lebensdauertests unter Lastkollektivbeanspruchung unterschiedliche Drehzahlen pro Laststufe sowie im Falle einer logarithmischen Normalverteilung die lastabhängige Streuung s_{log} berücksichtigen.

Zur Auswertung von verkürzten Testläufen werden zunächst die Lastkollektive analog zum vorherigen Abschnitt mit dem Lebensdauerverhältnis $L_{V,K}$ gekürzt. Anschließend wird für jede Stufe i des Kollektivs die zugehörige Ziellaufzeit $t_{xx\%}$ mit Mitteln der Tragfähigkeitsberechnung ermittelt. Damit können die Zuverlässigkeiten der einzelnen Stufen $R_i(t_{p,i})$ im verkürzten Test in Abhängigkeit des maßgeblichen Schadensmechanismus sowie die Kollektivzuverlässigkeit $R_L(t_p)$ ermittelt werden (Gleichung (5.30)). In Kapitel 5.2.1.1 und 5.2.1.2 ist dies für weibull- und logarithmisch normalverteilte Größen dargestellt. Denkbar ist auch eine Betrachtung hinsichtlich unterschiedlicher Schadensarten für verschiedene Kollektivstufen.

$$R_L(t_p) = \sum_{i=1}^n R_i(t_{p,i}) + (1 - n) \quad (5.30)$$

$R_L(t)$ -	Zuverlässigkeit bei Prüfung durch Lastkollektiv	i -	Laststufe
$t_{p,i}$ -	Prüfdauer auf Laststufe i	t_p -	Prüfdauer
n -	Anzahl der Prüflinge		

Maßgebliche Größe zur statistischen Auswertung ist die Aussagewahrscheinlichkeit P_A gemäß Gleichung (5.7) und (5.11). Für verkürzte Lebensdauertests ohne Ausfälle sowie solche mit x Ausfällen bei n Versuchen gelten die folgenden Zusammenhänge zur Ermittlung der jeweiligen Aussagewahrscheinlichkeiten P_A :

$$P_A = 1 - R_L(t_p)^n \quad (5.31)$$

$$P_A = 1 - \sum_{i=0}^x \binom{n}{i} \cdot (1 - R_L(t_p))^i \cdot (R_L(t_p))^{n-i} \quad (5.32)$$

$R_L(t)$ -	Zuverlässigkeit bei Prüfung durch Lastkollektiv	P_A -	Aussagewahrscheinlichkeit
L_V -	Lebensdauerverhältnis	i -	Laufvariable
n -	Anzahl der Prüflinge	x -	Anzahl der Ausfälle

Damit sind verkürzte Lebensdauertests unter Lastkollektivbeanspruchung hinsichtlich der Aussagewahrscheinlichkeit P_A statistisch auswertbar. Die vorgestellte Variante 2 bietet den Vorteil, dass unterschiedliche Betriebsbedingungen oder Verteilungskenngrößen und darüber hinaus auch variierende Schädigungsmechanismen auf den einzelnen Laststufen des betrachteten Kollektivs berücksichtigt werden können.

Variante 3: Reduzierung auf ein schadensäquivalentes Einstufenkollektiv

Die einfachste Möglichkeit zur Berechnung der Aussagewahrscheinlichkeit P_A für verkürzte Lebensdauertests unter Lastkollektivbelastung ist die Reduzierung des mehrstufigen Lastkollektivs auf ein schadensäquivalentes Einstufenkollektiv mit den Kenngrößen T_{eq} und N_{eq} beziehungsweise t_{eq} (**Bild 5.4**).

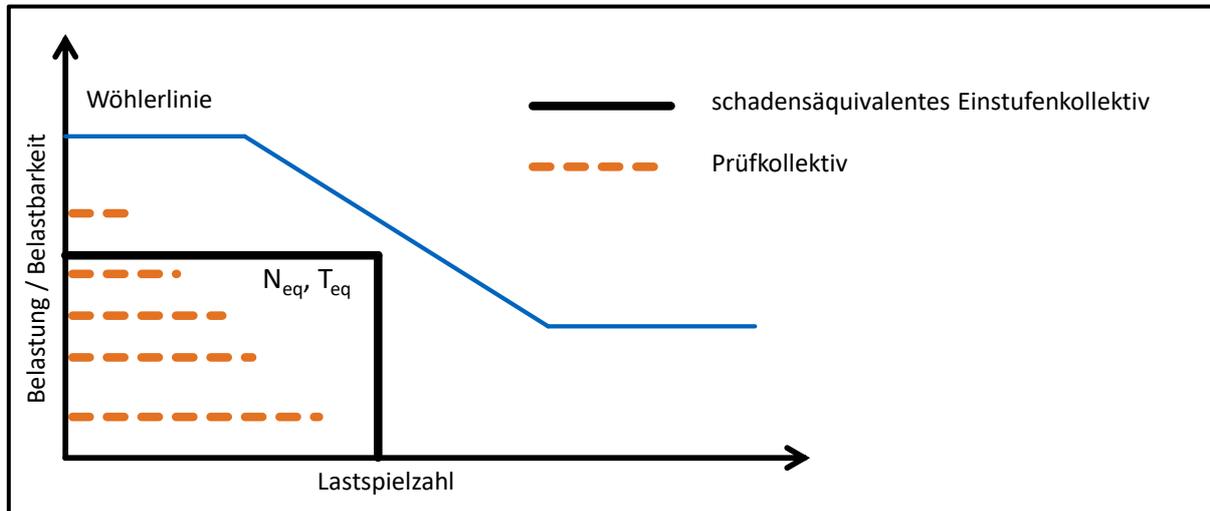


Bild 5.4: Lastkollektiv und schadensäquivalentes Einstufenkollektiv

Können die Betriebsbedingungen für alle Lastkollektivstufen als konstant angenommen werden und liegt derselbe maßgebliche Schadensmechanismus für alle Stufen vor, so sind die grundlegenden Voraussetzungen zur Reduzierung auf ein schadensäquivalentes Einstufenkollektiv gegeben. Basis ist das verkürzte Prüflastkollektiv mit dem Lebensdauer Verhältnis $L_{V,K}$. Durch Reduzierung auf ein Einstufenkollektiv mit den Kenngrößen T_{eq} und $t_{P,eq}$ ist es möglich, die Aussagewahrscheinlichkeit P_A entsprechend der Abschnitte 5.2.1.1 und 5.2.1.2 in Abhängigkeit des maßgeblichen Schadensmechanismus zu ermitteln.

Unterschiedliche Methoden zur Berechnung der Kenngrößen des Einstufenkollektivs für Zahnradgetriebe sind bei Niemann/Winter [182], FZG/Stahl [227] oder nach ISO 6336 - 6 [38] beschrieben. Nach Niemann/Winter wird zunächst eine äquivalente Lastspielzahl N_{eq} bestimmt, welche die kumulierte Lastspielzahl für alle Betriebslasten oberhalb von 50 % des Nenndrehmoments T_{nenn} darstellt (max. ist hier jedoch die Knicklastspielzahl anzusetzen). Ausgehend davon wird das äquivalente Drehmoment T_{eq} mit folgender Gleichung nach Niemann/Winter [182] bzw. analog zur Wälzlagerberechnung ermittelt:

$$T_{eq,NW} = \left(\frac{h_1 T_1^k + h_2 T_2^k + \dots}{N_{eq}} \right)^{\frac{1}{k}} \tag{5.33}$$

$T_{eq,NW}$ Nm	Äquivalentes Drehmoment nach Niemann/Winter	k	-	Wöhlerliniensteigung
h_i	-	T_i	Nm	Drehmoment auf Laststufe i
N_{eq}	-			Äquivalente Lastspielzahl

FZG/Stahl [227] erweitert diesen Ansatz um die Betrachtung von zulässigen Schadenssummen $D_{zul} \neq 1$. Ist bekannt, dass die zulässige Schädigungssumme von eins abweicht, so kann

dies bei diesem Ansatz bereits bei der Reduktion des Lastkollektivs auf ein Einstufenkollektiv durch den zusätzlichen Faktor in der Gleichung berücksichtigt werden.

$$T_{eq,Stahl} = \left(\frac{h_1 T_1^k + h_2 T_2^k + \dots}{N_{eq}} \right)^{\frac{1}{k}} \cdot D_{zul}^{-\left(\frac{1}{k}\right)} \quad (5.34)$$

$T_{eq,Stahl}$	Nm	Äquivalentes Drehmoment nach Stahl	k	-	Wöhlerliniensteigung
h_i	-	Lastspiele auf Laststufe i	T_i	Nm	Drehmoment auf Laststufe i
N_{eq}	-	Äquivalente Lastspielzahl	D_{zul}	-	Zulässige Schadenssumme

Die in ISO 6336 - 6 [38] beschriebene Methode zur Ermittlung des äquivalenten Drehmoments weicht von den bereits beschriebenen Methoden dahingehend ab, dass zunächst die Lastspielzahlen der Kollektivstufen unter Berücksichtigung des Wöhlerverhaltens aufaddiert werden, bis die Grenzlastspielzahl zur Dauerfestigkeit erreicht ist. Ausgehend von diesem Wert wird ein äquivalentes Drehmoment geringfügig unter der Höhe der zuletzt betrachteten Laststufe interpoliert. **Bild 5.5** zeigt qualitativ, dass dieses Vorgehen zwar zu anderen absoluten Werten T_{eq} und N_{eq} führt, jedoch beide Ergebnisse auf einer Parallelen zum Zeitfestigkeitsast der Wöhlerlinie liegen. Da zur Ermittlung der Werte jedoch unterschiedliche Umfänge des Kollektivs herangezogen werden, können diese Methoden trotzdem abweichende Ergebnisse liefern.

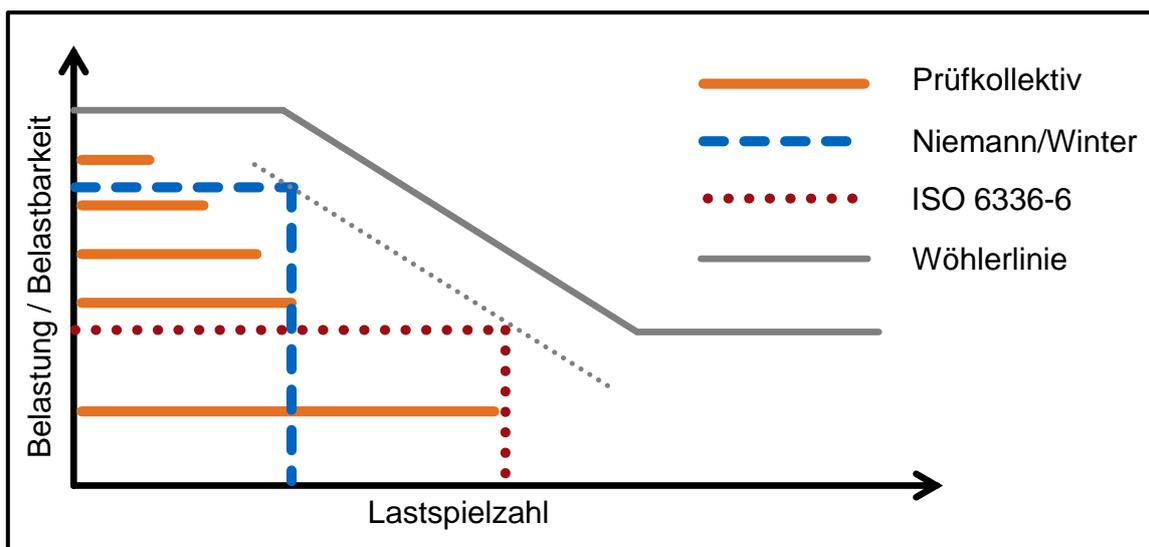


Bild 5.5: Methoden zur Ermittlung eines schadensäquivalenten Einstufenkollektivs

Exkurs: Lastkollektivraffung bei verkürzten Versuchen mit Lastkollektivbelastung

Ausgangsbasis der in dieser Arbeit beschriebenen Methodik zur Auswertung von verkürzten Lebensdauerersuchen sind in der Regel bereits geraffte Lastkollektive. Eine Lastkollektivraffung kann nach den in Abschnitt 5.1 beschriebenen Methoden durchgeführt werden. Dabei kommen vor allem eine Omission von nicht schadensrelevanten Laststufen sowie eine Lastanhebung unter Beibehaltung des maßgeblichen Schadensmechanismus zum Einsatz.

Speziell für die Durchführung von verkürzten Versuchen bei Lastkollektivbelastung ergibt sich jedoch noch eine zusätzliche Möglichkeit zur Verkürzung der Prüflaufzeiten. Dabei muss beachtet werden, dass im Vorfeld der Versuchsdurchführung eine detaillierte Berechnung des Getriebes erforderlich ist, um die Anwendbarkeit der geplanten Verkürzung zu bestätigen.

Ausgehend von einem gerafften Kollektiv kann für verkürzte Versuche überlegt werden, ob nur hohe Laststufen betrachtet werden beziehungsweise bei der Verkürzung des Lastkollektivs die Form des Kollektivs geändert wird. Die Aussagewahrscheinlichkeit P_A steigt mit größer werdender Schadenssumme D_P im verkürzten Test. Bei gleicher Prüfdauer kann diese Schadenssumme mitunter deutlich erhöht werden, wenn die Völligkeit des verwendeten Lastkollektivs erhöht wird, d.h. eine Verschiebung der Lastspielzahlen hin zu hohen Lasten erfolgt. Der Extremfall dieses Vorgehens ist eine Einstufenbelastung auf dem höchsten Lastniveau. Wenn dieses Verfahren angewendet wird, muss jedoch durch Berechnung (siehe Kapitel 3) sichergestellt werden, dass sich der erwartete Schadensmechanismus im verkürzten Test nicht ändert. Unter Umständen kann es auch sinnvoll sein, darüber hinaus die lokalen Schadenssummen zu betrachten.

5.2.1.5 Parametervariation – Lebensdauer Verhältnis und Prüflosgröße

Auf Grund der sehr kleinen absoluten Werte der Aussagewahrscheinlichkeiten P_A eignet sich die vorgestellte Methode zur statistischen Auswertung von verkürzten Lebensdauer tests vorrangig zur Bewertung unterschiedlicher Prüfparameter. Die zentrale Fragestellung ist dabei, ob es sinnvoller ist, einen größeren Stichprobenumfang kurz, d.h. mit einem kleinen Lebensdauer Verhältnis L_V , zu prüfen, oder wenige Prüflinge über einen längeren Zeitraum. **Bild 5.6** zeigt diesen Zielkonflikt grafisch. Dargestellt ist der Wert der Aussagewahrscheinlichkeit P_A in Prozent für unterschiedliche Lebensdauer Verhältnisse L_V und Prüflosgrößen n .

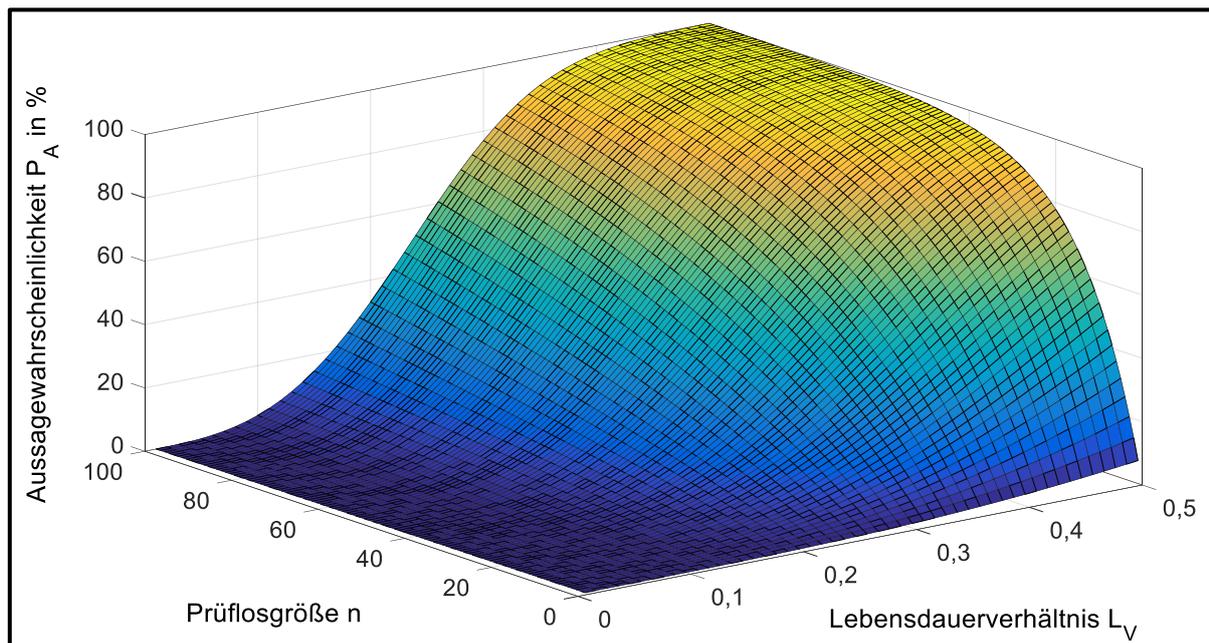


Bild 5.6: Parametervariation für weibullverteilte Größen (Weibullverteilung, $R(t) = 50\%$)

Für ansteigende Lebensdauer Verhältnisse L_V ist der Verlauf der zu Grunde liegenden statistischen Verteilung (in obigem Beispiel: Weibullverteilung) zu erkennen. Bei den meisten Verteilungen nimmt die Steigung dieses Verlaufs zunächst zu, um im späteren Verlauf nach passieren eines Wendepunktes wieder abzufallen, wenn sich die Ausfallwahrscheinlichkeit dem Wert 100 % nähert (Verlauf der Verteilungsdichtefunktion).

Mit zunehmender Prüflosgröße n lässt sich der Graph zu folgender Gleichung identifizieren:

$$P_A = 1 - R(t)^n \quad (5.35)$$

$R(t)$ - Zuverlässigkeit	P_A - Aussagewahrscheinlichkeit
n - Anzahl der Prüflinge	

Dieser steigt zunächst steil an und nähert sich ebenfalls asymptotisch dem Wert 100 %.

Um abschließend beurteilen zu können, ob nun eine größere Prüflosgröße n oder eine längere Prüfdauer t_p sinnvoller ist, sind neben den statistischen Kenngrößen der zu Grunde liegenden Verteilung auch wirtschaftliche Aspekte zu bewerten. Von besonderem Interesse ist dabei das Verhältnis der Herstellkosten für jeden Prüfling zu den anfallenden Kosten für die Prüfstandsbelegung und -betreuung. Auf Basis dieser Daten kann somit fallspezifisch das Optimum aus Prüflosgröße n und Prüfdauer t_p ermittelt werden.

5.2.1.6 Zwischenfazit

Das Ausfallverhalten von Grübchenschäden an Zahnrädern folgt gemäß FZG/Stahl [226] einer Weibullverteilung, dasjenige von Zahnfußbrüchen einer logarithmischen Normalverteilung. Basierend auf den Erkenntnissen von Bertsche [57] können somit für diese Schadensarten Gleichungen zur statistischen Auswertung verkürzter Lebensdauerprüfungen angegeben werden. Zur qualitativen und quantitativen Bewertung dieser Tests eignen sich beispielsweise die Aussagewahrscheinlichkeit P_A oder die Zuverlässigkeit $R(t)$ zur Ziellaufzeit t . Da $R(t_{xx\%})$ oft bereits zur rechnerischen Bestimmung der geforderten Lebensdauer $t_{xx\%}$ verwendet wird, ist es sinnvoll diesen Wert (beispielsweise für 50 % Überlebenswahrscheinlichkeit) beizubehalten und P_A als Bewertungsgröße zu verwenden.

Die Aussagewahrscheinlichkeit P_A beschreibt dabei zum einen, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Ausfall bei einem verkürzten Lebensdauerterst mit n Prüflingen und bekannter Komponentenzuverlässigkeit $R(t)$ zur Ziellaufzeit t eintritt, andererseits kann damit bei erfolgreich durchgeführtem Versuch ohne Ausfall eine Aussage darüber gemacht werden, mit welcher Wahrscheinlichkeit die vorgegebene Mindestzuverlässigkeit $R(t)$ zur Ziellaufzeit t erreicht wird. Die Aussagesicherheit nimmt mit steigender Prüfdauer t_p und wachsender Prüflosgröße n zu. Neben schadensfreien Versuchen werden die Zusammenhänge auch für Versuche mit x Ausfällen bei n Versuchen angegeben.

Die Grundlage der verkürzten Lebensdauerprüfungen bilden üblicherweise geraffte Lastkollektive. Aus diesem Grund werden die statistischen Methoden zur Bewertung der verkürzten Versuche auch auf Versuche mit Lastkollektivbeanspruchung angewandt und die entsprechenden Zusammenhänge hergeleitet. Somit können die Aussagewahrscheinlichkeiten P_A für verkürzte Lebensdauerprüfungen mit dem Lebensdauer Verhältnis L_V sowohl für Prüfläufe ohne Ausfälle, als auch für solche mit x Ausfällen bei n Versuchen ermittelt werden. Die Auswertung erfolgt sowohl für Einstufen- als auch für Lastkollektivbelastungen.

Zu beachten ist dabei, dass die Absolutwerte der Aussagewahrscheinlichkeit P_A meist unbefriedigende, sehr niedrige Werte liefern. Diese Betrachtungsweise eignet sich jedoch für eine vergleichende Betrachtung unterschiedlicher Prüfverfahren und Schadensarten. Tritt beispielsweise in einem verkürzten Lebensdauerterst mit dem Lebensdauer Verhältnis L_V ein Zahnfußbruch an einer Verzahnung und ein Grübchenschaden an einer anderen Verzahnung auf, so ist die Aussagewahrscheinlichkeit P_A hinsichtlich der grübchengeschädigten Verzahnung

deutlich höher als die der durch Zahnfußbruch geschädigten Verzahnung. Die Wahrscheinlichkeit, dass die Grübchenverzahnung die geforderte Lebensdauer erreicht, ist im Vergleich zu der Verzahnung, die im verkürzten Testverfahren durch Zahnfußbruch ausgefallen ist, wesentlich größer.

Übergeordnetes Ziel ist die Ermittlung einer aussagekräftigen Kennzahl zur statistischen Bewertung von verkürzten Lebensdauerprüfungen. Neben der Aussagewahrscheinlichkeit P_A sollen in diese Kennzahl auch Erkenntnisse aus den folgenden Abschnitten zur Berücksichtigung von Erfahrungswissen bei der Zuverlässigkeitstestplanung mit einfließen.

5.2.1.7 Methoden zur Berücksichtigung von Erfahrungswissen

Die gezeigte Methode zur Zuverlässigkeitstestplanung an Zahnrädern für verkürzte Lebensdaueruntersuchungen ist mit Hilfe des gezeigten Formelwerks für (logarithmisch) normalverteilte sowie weibullverteilte Ausfallmechanismen anwendbar. Die zu Grunde liegende Verteilungsfunktion für den betrachteten Schadensmechanismus kann aus der Literatur entnommen werden (z.B. FZG/Stahl [226]) oder auch aus eigenen Testreihen ermittelt werden. Für spezielle Werkstoffe oder beispielsweise Wärmebehandlungsverfahren kann die Durchführung von eigenen Wöhleruntersuchungen zum Ausfallverhalten der Bauteile notwendig sein, falls dazu keine abgesicherten Quellen vorhanden sind. Sollen Verteilungsfunktionen aus unterschiedlichen Quellen miteinander kombiniert werden, so wird hierzu nachfolgend eine Vorgehensweise hergeleitet. Diese ist nur anwendbar, wenn alle Daten ein und derselben Verteilungsfunktion (Weibullverteilung, Normalverteilung, ...) folgen.

Bei dem bisher vorgestellten Verfahren zur statistischen Auswertung von verkürzten Lebensdaueruntersuchungen wird bereits durch die Annahme einer Verteilungsfunktion für das Ausfallverhalten bezüglich eines Schadensmechanismus Erfahrungswissen gemäß FZG/Stahl [226] berücksichtigt. Soll darüber hinaus auch betriebsinternes Erfahrungswissen aus Vorgängermodellen ähnlicher Bauart, gleichen Werkstoffen oder ähnlichem berücksichtigt werden, stellt die nachfolgend vorgestellte Methodik eine Möglichkeit dazu dar.

Dabei werden die Form- und Lageparameter der angenommenen Verteilungsfunktion (gemäß FZG/Stahl [226]) mit denen der Verteilungsfunktion aus dem betriebsinternen Erfahrungswissen kombiniert. Die Verknüpfung erfolgt mittels des Wissensfaktors A_V , welcher den Einfluss des betriebsinternen Vorwissens beschreibt. Für $A_V = 1$ erfolgt die Berechnung ausschließlich basierend auf dem betriebsinternen Erfahrungswissen. Der Wissensfaktor A_V darf nur Werte im Bereich $0 \dots 1,0$ annehmen. Nachfolgende Gleichung zeigt diesen Zusammenhang beispielsweise für den Weibullexponenten b .

$$b = A_V \cdot b_{\text{Erfahrungswissen}} + (1 - A_V) \cdot b_{\text{Annahme}} \quad (5.36)$$

A_V	-	Wissensfaktor	b	-	Formparameter der Weibullverteilung
-------	---	---------------	-----	---	-------------------------------------

Das Vorgehen für weitere Form- und Lageparameter erfolgt analog. Sollen mehr als zwei Funktionen kombiniert werden, so gilt entsprechend:

$$b = A_{V,1} \cdot b_{Erfahrungswissen,1} + A_{V,2} \cdot b_{Erfahrungswissen,2} + \dots + (1 - \sum A_{V,i}) \cdot b_{Annahme} \tag{5.37}$$

$$\text{mit } \sum A_{V,i} \leq 1,0 \tag{5.38}$$

A_V -	Wissensfaktor	b -	Formparameter der Weibullverteilung
---------	---------------	-------	-------------------------------------

Bild 5.7 zeigt die Anwendung der Methode beispielhaft für unterschiedliche Wissensfaktoren ausgehend von der bekannten Weibullverteilung für Grübchen mit $b = 3,2$ und 50 % Ausfällen bei $L_V = 1$ und einer Weibullverteilung mit $b = 2,0$ und 40 % Ausfällen bei $L_V = 1$ aus Erfahrungswissen. Je größer der Wissensfaktor gewählt wird, desto weiter nähert sich die Verteilungsfunktion derjenigen aus Erfahrungswissen an.

Zu beachten ist jedoch, dass beide Verteilungsfunktionen vom gleichen Typ sind und sich nur in den Form- und Lageparametern voneinander unterscheiden. Sollen unterschiedliche Verteilungsfunktionen miteinander kombiniert werden, so ist dies prinzipiell mit nachfolgender Formel möglich:

$$f_{res} = A_V \cdot f_1(L_V) + (1 - A_V) \cdot f_2(L_V) \tag{5.39}$$

A_V -	Wissensfaktor	f -	Verteilungsfunktion
---------	---------------	-------	---------------------

Die Zusammenhänge für mehrere zu Grunde liegende Verteilungsfunktionen gelten analog zu Gleichung (5.35). Die resultierende Verteilungsdichtefunktion $f_{res}(L_V)$ sollte hierbei jedoch in jedem Fall kritisch geprüft werden, da sich bei dieser Methode u.U. auch Funktionen mit mehreren Extremalstellen ergeben können. Auch die Anwendung der aufgezeigten Formeln zur Zuverlässigkeitstestplanung bei verkürzten Lebensdauerests ist im Allgemeinen nicht möglich.

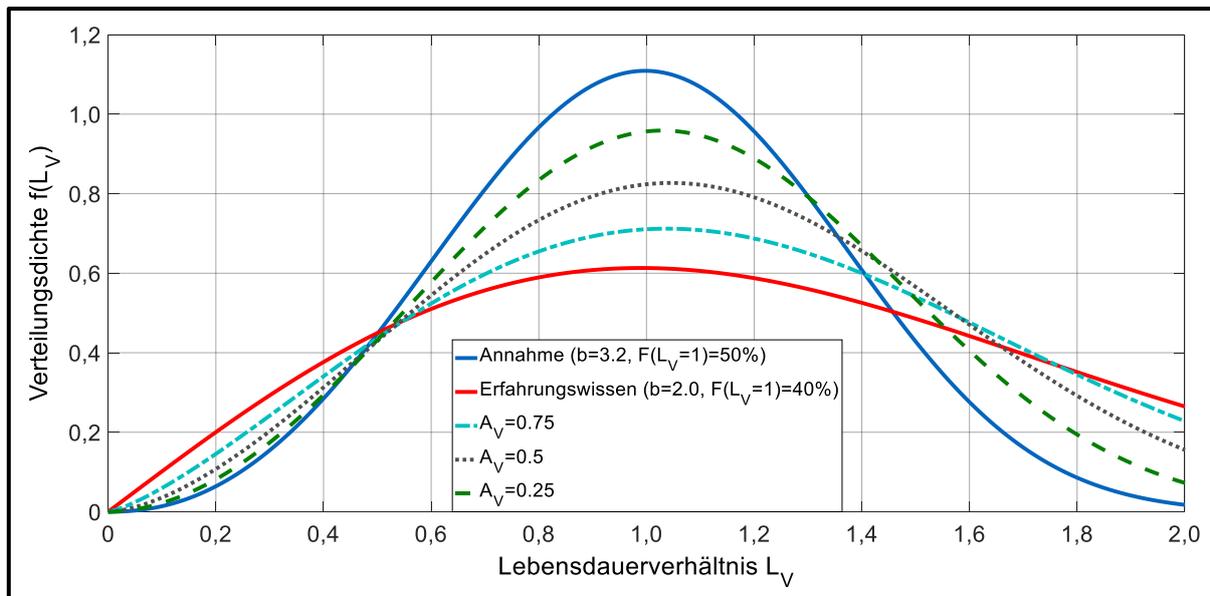


Bild 5.7: Berücksichtigung von Erfahrungswissen

5.2.1.8 Kennwert zur statistischen Auswertung von verkürzten Lebensdauerersuchen

Mit der Aussagewahrscheinlichkeit P_A wurde ein Kennwert definiert, welcher es ermöglicht, verkürzte Lebensdauerests statistisch auszuwerten und insbesondere für eine vergleichende

Bewertung nutzbar zu machen. Die Absolutwerte sind in der Regel nur wenig aussagekräftig, ermöglichen jedoch eine Analyse unterschiedlicher Prüfverfahren mit variierenden Prüfparametern und den Vergleich mehrerer Schadensarten hinsichtlich ihrer Eignung für verkürzte Lebensdauerests. Die Ermittlung der Aussagewahrscheinlichkeit P_A erfolgt in mehreren Schritten ausgehend von den vorgegebenen Größen hinsichtlich Schadensart, Belastung und Prüfverfahren. Eine Übersicht über die benötigten Größen gibt **Bild 5.8**.

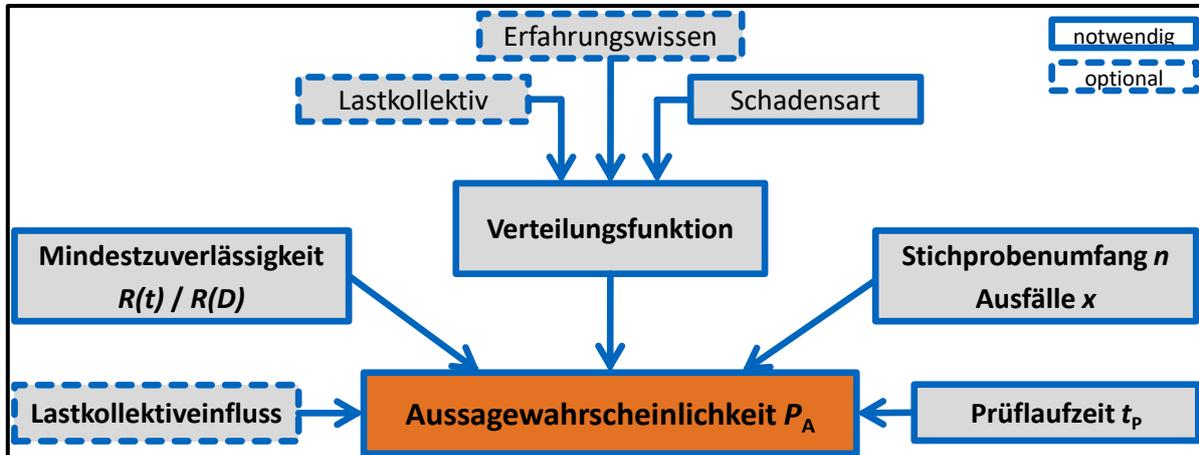


Bild 5.8: Ermittlung der Aussagewahrscheinlichkeit

Die Berechnung der Aussagewahrscheinlichkeit P_A für Schäden mit weibull- bzw. logarithmisch normalverteilten Ausfallzeiten wurde für Einstufenbelastungen sowie Lastkollektivbelastungen gezeigt. Darüber hinaus wurde eine Methode zur Berücksichtigung von Erfahrungswissen bei der Berechnung von P_A gezeigt sowie eine erweiterte Zuverlässigkeitsrechnung basierend auf einer Gegenüberstellung von Beanspruchung und Beanspruchbarkeit vorgestellt.

Soll nun für einen konkreten Anwendungsfall die Aussagewahrscheinlichkeit P_A berechnet werden, so sind zunächst die folgenden Fragen zu klären:

- Wie groß ist die Prüflaufzeit im verkürzten Versuch?
Durch die Vorgabe der maximalen Prüflaufzeit t_{\max} im verkürzten Versuch ergibt sich ein erstes Kriterium zur Bestimmung des Lebensdauerverhältnisses L_V .

- Welche ist die maßgebliche Schadensart, welche im verkürzten Versuch auftritt?

Hierzu sollte eine detaillierte Berechnung entsprechend dem gezeigten Modell durchgeführt werden. Werden Einstufenversuche sowie Lastkollektivversuche betrachtet, bei welchen die Verkürzung zu keiner Änderung der Form führt, so entspricht die maßgebliche Schadensart im verkürzten Versuch in der Regel derjenigen zur Ziellaufzeit.

Basierend auf der maßgeblichen Schadensart sowie evtl. Vorwissen kann nun die zu Grunde liegende Verteilungsfunktion der Ausfallzeiten bestimmt werden.

- Welche Mindestzuverlässigkeit soll zur Ziellaufzeit t erreicht werden?

Hieraus ergibt sich die Kenngröße $R(t)$ bzw. $R(D)$.

- Welcher maximale Stichprobenumfang n_{\max} steht zur Verfügung?

Basierend auf den Kenngrößen n_{\max} und t_{\max} kann nun eine Parametervariation durchgeführt werden. Zusätzlich können u. U. noch verschiedene Raffungsmethoden bei einer Lastkollektivbelastung betrachtet werden, um so das Lebensdauerverhältnis L_V zu erhöhen. Letztendlich

sollte die Variante ausgewählt werden, welche die höchste berechnete Aussagewahrscheinlichkeit P_A erzielt. Der Wert von P_A gilt als Kennwert zur statistischen Auswertung von verkürzten Lebensdauerversuchen.

5.2.2 Ermittlung der Restlebensdauer von vorgeschädigten Komponenten am Beispiel von Grübchenschäden an Zahnrädern

Im Rahmen der durchgeführten experimentellen Untersuchungen (siehe Kapitel 4) wurden Versuche zur Schadensart Grübchen analysiert. Hierbei handelt es sich um einen klassischen Ermüdungsschaden. Im Zeitfestigkeitsgebiet, d.h. bei Belastungen oberhalb der Dauerfestigkeit im Wöhlerdiagramm führt bei Ermüdungsschäden jedes Lastspiel zu einer gewissen Vorschädigung des betrachteten Bauteils. Eine vollständige Schädigung tritt erst bei Erreichen des Schadenskriteriums (sichtbarer Grübchenschaden) ein. Basierend auf diesen Erkenntnissen zu Ermüdungsschäden wird daher für die nachfolgenden Betrachtungen der Begriff der Schädigung in % definiert. Eine Schädigung von 100 % bedeutet einen Ausfall durch Grübchenschaden. Niedrigere Schädigungswerte beziehen sich auf eine Vorschädigung durch Ermüdungsvorgänge im Werkstoff, welche noch nicht zu einem visuell feststellbaren Grübchenschaden an der Zahnflankenoberfläche führen.

Kapitel 4 (und insbesondere **Bild 4.1**) gibt bereits einen Überblick über die angewandte Methodik zur Charakterisierung der Restlebensdauer hinsichtlich Grübchenschäden. Versuchsläufe werden nach verschiedenen Laufzeiten vor Eintritt eines sichtbaren Schadens beendet und sowohl zerstörenden als auch zerstörungsfreien Analysemethoden unterzogen. Die Ergebnisse der Analysen sollen eine Aussage über die Restlebensdauer der Bauteile ermöglichen. Im Falle einer rein zerstörungsfreien Analyse ist eine weitere Versuchsdurchführung möglich. Referenzwert (100 %) für die Berechnung der Schädigung in % ist bei zerstörenden Analysen die im Rahmen der Referenz- bzw. Praxisversuche ermittelte Wöhlerlinie für Grübchenschäden, bei zerstörungsfreien Analysen die tatsächlich erreichte Laufzeit bis zum Schadenseintritt. Nachfolgend werden kurz die Wesentlichen Erkenntnisse der durchgeführten Analysen beschrieben. Eine detaillierte Übersicht aller Ergebnisse ist im Anhang zu finden.

5.2.2.1 Zerstörende Analysemethoden

Härtetiefenverlauf

An den untersuchten Verzahnungen wurden Härtetiefenverläufe im Schliff mittels einer Vickers-Härteprüfung gemessen. Mit zunehmendem Grad der Schädigung zeigt sich qualitativ eine Abnahme der oberflächennahen (Tiefe: 0,1 mm) Härtewerte vor allem im Bereich negativen spezifischen Gleitens. Basierend auf den durchgeführten Messungen konnte eine signifikante, qualitative Korrelation zwischen oberflächennahem Härtewert und dem vorhandenen Schädigungsgrad hergestellt werden, welche eine rechnerische Bestimmung des Schädigungsgrades basierend auf dem Härtetiefenverlauf zulässt. Dieses Erkenntnis ist jedoch nur eingeschränkt auf praxisnahe Untersuchungen übertragbar. Die Abnahme der oberflächennahen Härtewerte bewegt sich im Rahmen weniger Prozentpunkte. In der Regel streuen die Werte bereits im Neuzustand um diesen Wert. Da bei einer zerstörenden Prüfung keine Analyse des konkreten Bauteils im Neuzustand und im geschädigten Zustand erfolgen kann, ist man hier auf Mittelwerte der Kenngrößen im Neuzustand angewiesen. Für einzelne Bauteile ist somit keine sichere Abschätzung der Restlebensdauer möglich.

Eigenstressverläufe

Die gemessenen Verläufe sind typisch für die untersuchten, einsatzgehärteten Verzahnungen und zeigen innerhalb der untersuchten Werkstofftiefen ausschließlich Druckeigenstressungen. Signifikante Unterschiede zwischen den gemessenen Eigenstressungen nach verschiedenen Laufzeiten bzw. bei unterschiedlichen Schädigungsgraden sind lediglich an der Oberfläche erkennbar. Bei durch Grübchen geschädigten Zahnrädern ist nur mehr ein wenig ausgeprägtes Druckeigenstressmaximum an der Oberfläche vorhanden. Insgesamt zeigen alle gelaufenen Zahnräder im Vergleich zum Neuzustand geringere Druckeigenstressmaxima. Durchläufer zeigen dabei trotz der höheren Laufzeiten größere Druckeigenstressungen an der Oberfläche als Versuche im Zeitfestigkeitsgebiet. Auch Messungen nach dem Einlauf belegen weiterhin hohe Werte der Druckeigenstressungen an der Oberfläche. In der Werkstofftiefe sind keine signifikanten Unterschiede zwischen Zahnrädern im Neuzustand und geschädigten Zahnrädern erkennbar. Dieser Druckeigenstressabbau an der Oberfläche wird bereits von FZG/Schönönenbeck [210] und FZG/Elstorff [80] beschrieben. Die Gründe dafür liegen unter anderem im fortschreitenden Risswachstum, welches an der Oberfläche einen teilweisen Abbau der Eigenstressungen ermöglicht. Der Abbau der oberflächennahen Eigenstressungen kann also mit einer fortschreitenden Werkstoffermüdung begründet werden. Eine zahlenmäßige Quantifizierung der Abnahme ist jedoch basierend auf den durchgeführten Untersuchungen nicht möglich.

Restausenitgehalt

Im Zuge der Eigenstressmessungen mittels Röntgendiffraktometer wurde auch der Restausenitgehalt gemessen. Erkennbar ist, dass sich der Restausenitgehalt bis in größere Werkstofftiefen verändert. Mit zunehmender Schädigung werden jedoch vor allem die Messwerte an der Oberfläche beeinflusst. Der Restausenitgehalt an der Oberfläche (höchster Wärmeeintrag!) liegt bei allen gelaufenen Zahnrädern deutlich unterhalb des Wertes im Neuzustand. Durchläufer zeigen dabei trotz der höheren Laufzeiten einen höheren Restausenitgehalt an der Oberfläche als Versuche im Zeitfestigkeitsgebiet. Nach dem Einlauf zeigen sich ähnlich hohe Werte des Restausenitgehalts wie im Neuzustand.

Eine eindeutige quantitative Charakterisierung des fortschreitenden Schädigungsgrades mit Hilfe der röntgenografisch ermittelten Restausenitgehaltswerte ist aufgrund der hohen Messstreuungen für einzelne Zahnräder in der Regel nicht möglich. Zusätzlich liegen insgesamt nur wenige aussagekräftige Messungen im Bereich zwischen Neuzustand und 100% Schädigung vor. Allerdings kann eine qualitative Bewertung des Schadens erfolgen, da eine zunehmende Zahnflankenermüdung mit einer Abnahme der Werte des Restausenitgehalts vor allem im oberflächennahen Bereich einhergeht. Ergänzend wurden auch die ermittelten Halbwertsbreiten ausgewertet. Diese zeigen keinen signifikanten Einfluss des Schädigungsgrades.

Metallografische Untersuchungen

Im Rahmen der zerstörenden Analysen wurden metallografische Untersuchungen durchgeführt. Hierbei wurden ungeätzte und geätzte Schlibfbilder bei unterschiedlichen Schädigungsgraden angefertigt. Auch die Werkstoffzusammensetzung wurde untersucht. Folgende Feststellungen können mit zunehmendem Schädigungsgrad getroffen werden:

- Zunahme von dunklen, randnahen Bereichen im geätzten Schlibfbild (Intensität ist lastabhängig);

- Oberflächennahe, zum Wälzpunkt hin orientierte, zunehmende Rissbildung bis hin zur Bildung von Ausbrüchen / Grübchen am treibenden Ritzel.

Eine allgemeingültige, zahlenmäßige Charakterisierung des Schädigungsgrads ist nur schwer möglich, da die metallografisch feststellbaren Effekte zum einen stark last- und baugrößenabhängig sind und zum anderen nur schwer quantitativ beurteilt werden können.

FIB/SNMS-Analysen

Ergänzend zu den bisher vorgestellten zerstörenden Analysemethoden, welche an der Forschungsstelle durchgeführt wurden, wurden am NMI Reutlingen FIB- und SNMS-Analysen an gelaufenen Zahnflanken durchgeführt. Bei diesen Analysen handelt es sich um Methoden der Grenzflächen- und Mikrostrukturanalytik. Mit Hilfe des Focused Ion Beam (FIB) können lokal begrenzte Mikroquerschnitte (siehe **Bild 5.9**) an der Zahnflanke erzeugt werden [76]. Durch den Einsatz des Ionenstrahls sowie einer aufgebrauchten Schutzschicht erfolgt der Materialabtrag äußerst materialschonend. In diesen Mikroquerschnitten kann anschließend eine Analyse des oberflächennahen Gefüges sowie der Grenzfläche mit Hilfe des Rasterelektronenmikroskops durchgeführt werden. Zusätzlich wird mit Hilfe der Sekundär-Neutralteilchen-Massenspektrometrie (SNMS) die Materialzusammensetzung direkt an der Zahnflankenoberfläche untersucht.

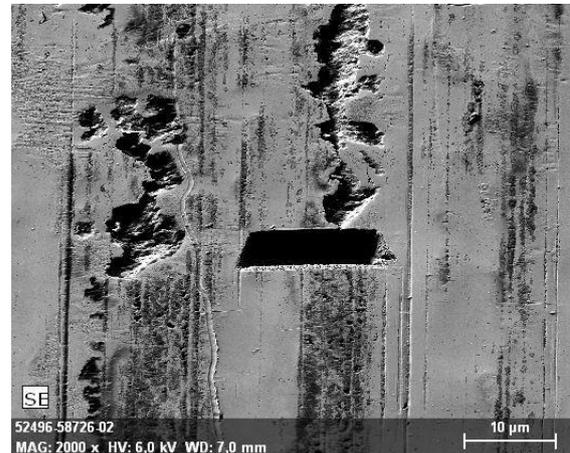


Bild 5.9: FIB - Mikroquerschnitt

Im Rahmen der Referenzversuche wurden FIB- und SNMS-Analysen an jeweils einer Zahnflanke im Neuzustand, bei 25 %, 50 %, 75 % sowie 100 % Schädigung durchgeführt. Die Mikroquerschnitte wurden im Bereich negativen spezifischen Gleitens angefertigt. Die Ergebnisse der FIB-Analysen belegen folgendes:

- Heterogener Zustand der Zahnflankenoberfläche (Bereiche mit starker Zerrüttung bzw. einzelnen Ausbrüchen liegen neben glatten Bereichen);
- Feinkörniges Gefüge direkt unterhalb der Oberfläche bei allen untersuchten Zahnradern (auch im Neuzustand);
- Der Anteil an feinkörnigem Gefüge direkt unterhalb der Oberfläche nimmt mit zunehmendem Schädigungsgrad zu. Risse und Ausbrüche sind meist von feinkörnigem Gefüge umgeben. Das feinkörnige Gefüge begünstigt im Allgemeinen die Bildung von Rissen.

Hinsichtlich der Elementkonzentration an der Oberfläche, welche mit Hilfe der SNMS-Analyse ermittelt wurden, zeigt das Oberflächenspektrum der gelaufenen Zahnflanken die typischen „Triboelemente“ wie P und S, welche auf das verwendete EP-Additiv Anglamol 99 zurückzuführen sind. Statistisch abgesicherte Tendenzen der Elementkonzentrationen mit zunehmendem Schädigungsgrad konnten nicht festgestellt werden.

5.2.2.2 Zerstörungsfreie Analysemethoden

ROLLSCAN: Barkhausenrauschen

Das ROLLSCAN-Messgerät ist ein industriell weit verbreitetes Gerät zur Analyse des Barkhausenrauschens. Damit kann beispielsweise eine Schleifbrandschädigung festgestellt werden [151, 217]. Üblicherweise wird als Ausgabekenngröße die maximale Amplitude des Barkhausenrauschens betrachtet.

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen wurde die Barkhausenrauschamplitude für die untersuchten Verzahnungen bei unterschiedlichen Schädigungszuständen ermittelt. Insgesamt ist nur ein leichter Abfall der Barkhausenrauschamplitude festzustellen, welcher jedoch im Rahmen der Messabweichungen einer Einzelmessung liegt. Diese Erkenntnisse decken sich mit den untersuchten Kenngrößen der Barkhausen-Rausch-Analyse im Rahmen der 3MA-Messungen. Auch dort sind nur geringe Einflüsse erkennbar. Diese Methode ist daher nach aktuellem Kenntnisstand nicht alleine zur Beurteilung des Schädigungsgrades geeignet.

Oberflächenhärtemessungen

Versuchsbegleitend wurden Messungen der Oberflächenhärte mit Hilfe eines Esatest-Prüfgerätes (Produktname – ermöglicht einfache Härtebestimmung an der Oberfläche durch Messung des elektrischen Widerstandes) durchgeführt. Diese Messungen sind weitestgehend zerstörungsfrei und ermöglichen somit eine Fortführung des Versuchslaufs. Gemessen wurden an jedem untersuchten Zahnrad 4 Zähne mit jeweils drei Messpunkten im Kopf- und Fußflankenbereich sowie am Wälzkreis.

Das Verfahren zur Oberflächenhärtemessung eignet sich prinzipiell zur Charakterisierung einer Schädigung. Die bereits zerstörend nachgewiesene Abnahme der Härtewerte konnte auch zerstörungsfrei nachgewiesen werden. Aufgrund des Messprinzips sind die ermittelten Kennwerte jedoch stark abhängig von den lokalen Gegebenheiten am konkreten Messpunkt. Eine zuverlässige, quantitative Charakterisierung ist daher mit zunehmender Schädigung für ein einzelnes Zahnrad nicht mehr zuverlässig gegeben bzw. erfordert eine vernünftige Mittelung mehrerer Messwerte.

Rauheitsmessungen

Die durchgeführten Rauheitsmessungen der untersuchten Bauteile zeigen mit zunehmendem Schädigungsgrad zunächst einen leichten Abfall durch Einlaufeffekte sowie zum Versuchsende hin wiederum einen Anstieg der Rauheitskennwerte. Dieser Anstieg lässt sich z.T. auf zunehmende Graufleckigkeit sowie Überrollungen mit geschädigten Flankenbereichen zurückführen. Eine Charakterisierung des Schädigungsgrades mit Hilfe der Rauheitskennwerte ist jedoch nicht möglich.

Topographievermessung der Flankenoberfläche

Mit Hilfe der durchgeführten dreidimensionalen Topographievermessung ist eine sehr genaue Charakterisierung der Zahnflankenoberfläche hinsichtlich Flankenformabweichungen möglich. Eventuell vorhandene Graufleckigkeit kann zuverlässig im kompletten Eingriffsfeld festgestellt werden. Im Rahmen der durchgeführten Auswertung konnte jedoch keine Korrelation zwischen der Oberflächenbeschaffenheit und einer fortschreitenden Ermüdung hergestellt werden. Die dreidimensionale Vermessung der Zahnflankenoberfläche ist daher nicht zur Charakterisierung der Restlebensdauer von vorgeschädigten Komponenten hinsichtlich eines Grübenschadens geeignet.

Wird jedoch die Schadensart Graufleckigkeit als Ausfallkriterium betrachtet, so ist die dreidimensionale Topographievermessung sehr gut zur Charakterisierung der Restlebensdauer geeignet. Hierzu muss eine maximal zulässige Flankenformabweichung als Ausfallkriterium vorgegeben werden. Unter Berücksichtigung des Verlaufs der Auskolkungstiefe nach FZG/Schrade [213] kann somit eine Schädigung der Zahnflanke berechnet werden.

5.2.2.3 3MA-Verfahren

Mit Hilfe des Multiparameter Mikrostruktur- und Spannungsanalysators (3MA) können durch periodische Ummagnetisierung in ferromagnetischen Werkstoffen 41 elektrische und magnetische Kenngrößen für verschiedene Anregungsfrequenzen ermittelt werden.

Mit der an der FZG zur Verfügung stehenden Messtechnik können geradverzahnte Zahnräder automatisiert geprüft werden. Pro Zahnflanke werden mit dieser Vorrichtung 100 Messstellen erfasst, welche von einem entsprechenden Sensor nacheinander abgefahren werden. Für jede Messstelle werden die 41 gemessenen Kennwerte gespeichert.

Die Messtechnik vereint vier zerstörungsfreie, elektromagnetische Prüfverfahren. Diese zeigen unterschiedlich ausgeprägte Wechselwirkungen mit verschiedenen Gefüge- und Werkstoffeigenschaften sowie Spannungszuständen. Die Prüfverfahren sind im Einzelnen nachfolgend zusammen mit ihren vorrangig beeinflussenden Parametern aufgeführt (Details hierzu werden beispielsweise in [235] erläutert):

- Barkhausen-Rausch-Analyse ~ Eigenspannungszustand;
- Oberwellenanalyse ~ Mikrogefüge;
- Mehrfrequenzwirbelstromimpedanzanalyse ~ Mikrostruktur;
- Überlagerungspermeabilität ~ Härte.

Im Rahmen der versuchsbegleitenden zerstörungsfreien Messungen wurde zunächst festgestellt, dass sich einzelne Kenngrößen mit zunehmender Laufzeit bzw. Schädigung verändern. Ausgewertet werden die Messwerte im Bereich negativen spezifischen Gleitens im Bereich der Zahnbreitenmitte (Randeinflüsse werden somit vernachlässigt). Insgesamt kann somit davon ausgegangen werden, dass eine Wechselwirkung zwischen den erfassten, elektromagnetischen Messgrößen und dem Schädigungszustand des Werkstoffes vorliegt.

Das 3MA-Prüfverfahren wurde bereits in früheren Forschungsvorhaben ([150, 217]) erfolgreich zur Charakterisierung von Randzonenzuständen hinsichtlich Eigenspannungs- und Härtetiefenverläufen sowie der Oberflächenhärteverläufe verwendet.

Durch einen Kalibriervorgang besteht die Möglichkeit, Polynome zu finden, welche einen Zusammenhang zwischen der Schädigung und den Messgrößen x_i herstellen. Ein Polynom könnte beispielsweise die folgende Form haben:

$$\text{Schädigung} = a_0 + a_1 \cdot x_1 + \sqrt{x_1} + a_2 \cdot x_2^2 + \dots \quad (5.40)$$

a_i	-	Koeffizienten aus Regressionsanalyse	x_i	-	Messgröße i
-------	---	--------------------------------------	-------	---	---------------

Im Rahmen der durchgeführten Versuche wurde diese Auswertung mit Hilfe der Software zur 3MA-Messtechnik durchgeführt. Das detaillierte Vorgehen ist im Anhang beschrieben. Insge-

samt ergibt sich eine gute Korrelation zwischen den vorgegebenen Sollgrößen (Schädigungen) und den ermittelten 3MA-Werten nach dem durchgeführten Kalibrierprozess an den untersuchten Referenzversuchen. Die Qualität der Kalibrierung wird jedoch stark durch die große Anzahl an Messwerten sowie den lokalen Inhomogenitäten des Werkstoffs im Bereich der aktiven Zahnflanken beeinflusst. **Bild 5.10** zeigt beispielhaft den Verlauf des ermittelten 3MA-Schädigungswertes für sechs verschiedene Messungen. Bei 8 Mio. Lastspielen wurde der Versuch durch einen Grübchenschaden beendet. Die einzelnen Bilder zeigen für jede Messung 17 Quadrate welche den einzelnen Zähnen entsprechen. Jedes "Mess"-quadrat enthält ein Raster von 10x10 Messpunkten, welche einem repräsentativen Ausschnitt der Zahnflanke in Profil- und Flankenlinienrichtung entsprechen. Eine deutliche Veränderung der 3MA-Messwerte über der Laufzeit ist erkennbar, wenngleich die Messwerte sichtbaren Streuungen unterliegen (vergleiche Lastspielzahl 4 Mio. und 6 Mio.). Bei Versuchsende wird auch vom 3MA-Gerät lokal ein kritischer lokaler Flankenzustand ausgewiesen.

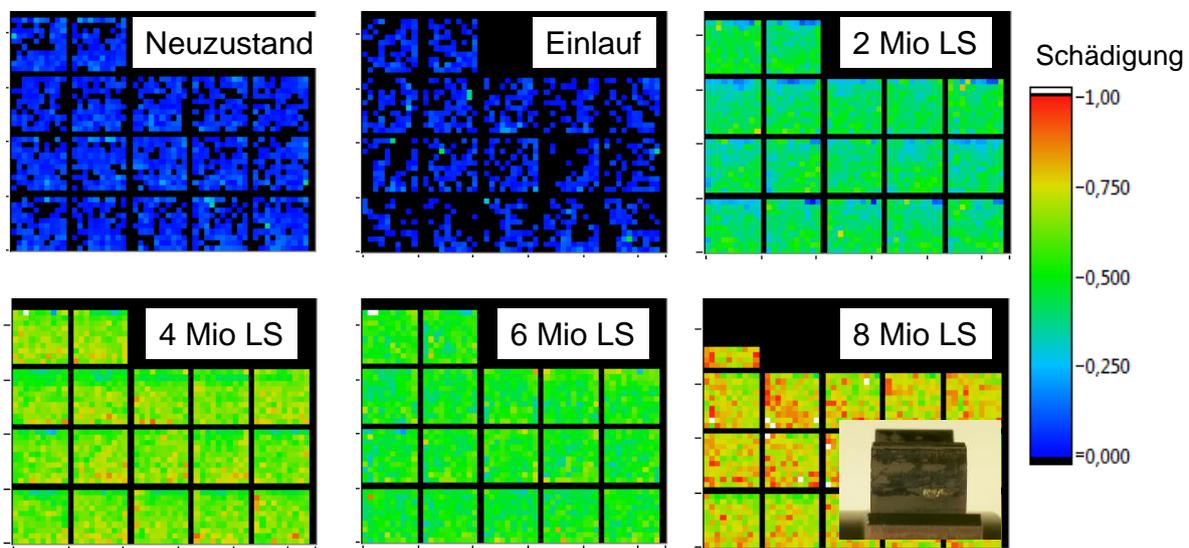


Bild 5.10: Beispielhafter Verlauf 3MA-Werte

Die Auswertung der Schädigung mit dem 3MA-Verfahren zeigte auch im Zusammenhang mit den Lastkollektivversuchen eine gute Übereinstimmung. Sowohl bei den Lastkollektivversuchen mit geringer Durchmischung als auch solchen mit hoher Durchmischung konnte eine gute Korrelation zwischen rechnerischer Schädigungssumme und dem ermittelten 3MA-Wert der Schädigung festgestellt werden. Den Versuchen wird nach dem Einlauf mittels des verwendeten Polynoms ein Schädigungsbeitrag nahe Null zugewiesen. Mit Hilfe des Geräts ist zukünftig bei umfangreicheren Lastkollektivversuchen auch eine Überprüfung der Annahmen eines linearen Schadensfortschritts denkbar.

Eignung zur Charakterisierung der Restlebensdauer von vorgeschädigten Komponenten

Mit Hilfe des 3MA-Geräts scheint eine Charakterisierung der Restlebensdauer von vorgeschädigten Zahnflanken hinsichtlich einer Wälzermüdung grundsätzlich gut möglich. Die ermittelte Kalibrierung ermöglicht eine Berechnung des Schädigungszustands einzelner Flankenbereiche basierend auf den ermittelten elektrischen und magnetischen Kenngrößen. Die Werte zeigen v. a. im Bereich negativen spezifischen Gleitens, in welchem Grübchenschäden in der Regel zuerst auftreten, eine gute Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen. Insgesamt

muss jedoch mit einer Streuung aufgrund der lokalen Gegebenheiten auf der Zahnflanke gerechnet werden. Daher ist nur eine ganzheitliche Betrachtung mehrerer Zahnflanken zur Ermittlung des Schädigungsgrades mittels 3MA zielführend. Die Kalibrierung wurde bisher nur an der verwendeten Geradverzahnung überprüft. Die Übertragbarkeit auf andere Werkstoffchargen bzw. Werkstoffe ist noch zu überprüfen.

5.2.2.4 Abschließende Bewertung der Methoden zur Charakterisierung der Restlebensdauer vorgeschädigter Komponenten

Verschiedene Prüf- beziehungsweise Analysemethoden belegen eine Veränderung von (lokalen) Werkstoffeigenschaften mit zunehmendem Schädigungsgrad. Insbesondere zeigen sich Veränderungen hinsichtlich der Härtewerte, der Eigenspannungen, des Restaustenitgehalts und des Mikrogefüges an der Oberfläche sowie im oberflächennahen Bereich. Dies steht grundsätzlich mit dem Stand des Wissens zur Ermüdung metallischer Werkstoffe im Einklang.

Die im Rahmen der durchgeführten Versuche aufgetretenen Veränderungen sind jedoch absolut gesehen relativ gering. Zudem ergeben sich Streuungen aufgrund des inhomogenen Werkstoffs sowie der Messgenauigkeit der verwendeten Verfahren. Einzelne Messgrößen sind daher nur schwer zuverlässig zu beurteilen. Eine Kombination der einzelnen Messgrößen kann jedoch ggf. die Aussagekraft deutlich erhöhen.

Mit Hilfe des mikromagnetischen 3MA-Verfahrens werden gleichzeitig vielfältige magnetische und elektrische Kenngrößen ermittelt, welche in direktem Zusammenhang zu diesen werkstoffphysikalischen Gegebenheiten stehen. Diese Kenngrößen zeigen eine starke Wechselwirkung untereinander, weshalb eine einzelne Messgröße wenig aussagekräftig ist. Dies erscheint plausibel, da auch die werkstoffphysikalischen Eigenschaften (Härte, Eigenspannungen, Restaustenit, Mikrogefüge) eng miteinander verknüpft sind. Erst durch eine angepasste Kalibrierung unter Verwendung mehrerer Messgrößen lässt sich der Werkstoffzustand und somit der Schädigungsgrad quantitativ beschreiben. Die Messung mit Hilfe des 3MA-Verfahren erfolgt darüber hinaus zerstörungsfrei. **Tabelle 5.1** zeigt eine Übersicht über die Bewertung der verschiedenen vorgestellten Analyseverfahren zur Charakterisierung der Restlebensdauer von vorgeschädigten Komponenten, basierend auf den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen.

Bei entsprechender statistisch abgesicherter Datenbasis ist zu erwarten, dass allgemein aussagekräftige Kenn- beziehungsweise Grenzwerte zur Restlebensdauer abgeleitet werden können. Da das 3MA-Verfahren an Zahnrädern bisher im Wesentlichen im Labormaßstab verwendet wird und keine weiteren systematischen Untersuchungen zur Bestimmung einer Restlebensdauer mit diesem Verfahren bekannt sind, erscheint die Datenbasis dieser Arbeit zur zuverlässigen Ableitung eines allgemeingültigen Kennwertes zur Charakterisierung der Restlebensdauer von vorgeschädigten Bauteilen zu gering. Insbesondere die Übertragbarkeit auf andere Werkstoffchargen, Einsatzstähle sowie Baugrößen sowie die Lastabhängigkeit ist noch zu überprüfen. Da die Methodik großes Potential aufweist, sollten hierzu zukünftig jedoch weitere Untersuchungen durchgeführt werden.

Auch wenn keine absolute Aussage zur Restlebensdauer mit Hilfe der vorgestellten Methoden abgeleitet werden kann, so ist zumindest die Ableitung von Belastbarkeitsgrenzen (z.B. Dauerfestigkeit) denkbar. Zeigt sich nach einer gewissen Laufzeit keine Veränderung der Messwerte, so kann unter Umständen darauf geschlossen werden, dass keine Werkstoffermüdung vorliegt und eine einfache Aussage zur Dauerfestigkeit abgeleitet werden.

	Relevanz zur Charakterisierung der Restlebensdauer	Quantitativer Kennwert	Streuung	Zerstörungsfrei	Gesamtbewertung
Metallographie	o	--	++	--	o
Härtetiefenverlauf (HV)	o	+	++	--	o
Röntgenografische Untersuchungen	+	+	+	--	+
FIB/SNMS	++	-	++	-	+
Zahnflankenrauheit	--	+	-	++	--
3D-Zahnflankenvermessung	--	+	++	++	--
Barkhausenrauschenanalyse (ROLLSCAN)	+	+	-	++	o
Oberflächenhärte (ESATEST)	+	+	--	+	o
3MA	++	++	o	++	++

++ sehr gut, + gut, o neutral, - mäßig, -- nicht möglich

Tabelle 5.1: Bewertung der verwendeten Prüfverfahren zur Charakterisierung der Restlebensdauer bei Flankenbeanspruchung, basiert auf den durchgeführten Messungen im Rahmen dieser Arbeit

Auch wenn keine absolute Aussage zur Restlebensdauer mit Hilfe der vorgestellten Methoden abgeleitet werden kann, so ist zumindest die Ableitung von Belastbarkeitsgrenzen (z.B. Dauerfestigkeit) denkbar. Zeigt sich nach einer gewissen Laufzeit keine Veränderung der Messwerte, so kann unter Umständen darauf geschlossen werden, dass keine Werkstoffermüdung vorliegt und eine einfache Aussage zur Dauerfestigkeit abgeleitet werden.

Insgesamt zeigt dieser Abschnitt am Beispiel der durchgeführten experimentellen Untersuchungen, dass eine Charakterisierung der Restlebensdauer von vorgeschädigten Komponenten durch zerstörende und zerstörungsfreie Analysemethoden bereits nach relativ geringer Laufzeit möglich ist, insbesondere für die Ermüdung der Zahnflanke. Prinzipiell ist dieses Vorgehen auch auf andere Getriebekomponenten und Schadensarten übertragbar. Für besondere Anwendungsfälle steht somit eine weitere Möglichkeit zur Verkürzung der Prüflaufzeit zur Verfügung, welche bei genügend Erfahrungswissen durchaus zuverlässige Kennwerte liefern kann.

5.3 Allgemeines Vorgehensmodell zur Planung und Durchführung von Lebensdauerversuchen mit reduzierter Laufzeit

In den vorangegangenen Abschnitten wurde zunächst eine Methodik zur Raffung von Lastkollektiven unter Beibehaltung des maßgebenden Schadensmechanismus vorgestellt. Zur weiteren Verkürzung der Prüflaufzeit wurde daran anschließend ein Vorgehensmodell zur statistischen Planung und Auswertung von verkürzten Lebensdauerversuchen sowie zur Ermittlung der Restlebensdauer von vorgeschädigten Komponenten vorgestellt. Zusätzliche stehen aus der Auslegungsberechnung des Getriebes noch Informationen zur berechneten Lebensdauer für eine maßgebliche Überlebenswahrscheinlichkeit zur Verfügung. Insgesamt lässt sich dies in die Bereiche "Statistik", "Berechnung" und "Werkstoff" aufteilen. Für alle drei Bereiche ist,

bei ausreichendem Kenntnisstand und Datenbasis, eine Bewertung von verkürzten Lebensdauerprüfungen und vor allem eine Berechnung der Restlebensdauer bis zum Eintritt eines Schadens, möglich. Folgende drei Kenngrößen können dabei als maßgeblich zur Bewertung von verkürzten Lebensdauerprüfungen betrachtet werden:

- "Statistik": Aussagewahrscheinlichkeit P_A ;
- "Berechnung":
 - t_{rel} bzw. N_{rel} : Verhältnis von Laufzeit aus Lastkollektiv t bzw. N zur berechneten Lebensdauer für $xx\%$ Überlebenswahrscheinlichkeit $t_{xx\%}$ bzw. $N_{xx\%}$
 - Globale Einzel- und Gesamtzuverlässigkeiten $R_{global,i}$ bzw. R_{global} .
- "Werkstoff":
 - Schädigung D
 - Restlebensdauer L_{Rest} in %.

Die Kenngrößen aus der Auslegungsberechnung können bereits vor einer konkreten Durchführung von Lebensdauerests ermittelt werden. Damit ist bereits eine grobe Abschätzung der erwarteten Laufzeit sowie der Zuverlässigkeit im realen Anwendungsfall möglich.

Basierend auf diesen Kenngrößen können verkürzte Lebensdauerests mit den vorgestellten Methoden der Statistik geplant und ausgewertet werden. Wird dieses Verfahren erstmalig angewandt, sollten zunächst frühere Versuche hinsichtlich der Kenngröße P_A bewertet werden, um eine Abschätzung der richtigen Größenordnung vornehmen zu können. Zur Ermittlung der größtmöglichen Kenngröße P_A sollte immer eine Parametervariation durchgeführt werden. Eingangsgrößen sind die maximal mögliche Anzahl an Prüflingen sowie die maximal mögliche Prüfdauer. Im Rahmen einer erstmaligen Berechnung von P_A für einen konkret geplanten Lebensdauerest wird immer ein Versuchslauf ohne Ausfälle angenommen. Hieraus ist ein Optimum in Hinblick auf die zu erwartenden Prüfkosten und die Aussagewahrscheinlichkeit P_A zu ermitteln.

Nach bzw. während der Durchführung der verkürzten Lebensdauerests sollten die Werkstoffkenngrößen versuchsbegleitend ermittelt werden. Die Zusammenhänge für die Schadensart Grübchen wurden im Rahmen dieser Arbeit grundlegend aufgezeigt. Diese sollten in weiteren Untersuchungen verifiziert und zahlenmäßig abgesichert werden. Erkenntnisse für andere Schadensarten stehen noch aus. Mit der Schädigung D bzw. der Restlebensdauer L_{Rest} können bei ausreichender Datenbasis bzw. Absicherung zwei Kenngrößen berechnet werden, welche eine Überprüfung der Ansätze aus der zu Grunde liegenden Auslegungsberechnung ermöglichen. Die berechneten Lebensdauern sollten in derselben Größenordnung liegen.

Eine umfassende, aussagekräftige Bewertung von verkürzten Lebensdauerprüfungen, welche nicht bis zum Laufzeitende durchgeführt werden, ist nur möglich, wenn alle drei Bereiche – "Statistik", "Berechnung" und "Werkstoff" – hinreichend genau betrachtet werden und die Ergebnisse mit denen bereits durchgeführter Versuche in gutem Einklang stehen. Insgesamt muss festgehalten werden, dass mit zunehmender Prüfzeitverkürzung stets ein Erkenntnisverlust einhergeht, welcher nur durch möglichst sorgfältige Planung, Durchführung und Auswertung der Versuche ausgeglichen werden kann. Die Feststellung vorhandener Leistungsgrenzen eines Getriebes in Prüfstandsversuchen, welche zur weiteren Optimierung bekannt sein müssen, erfordert aktuell leider oftmals nach wie vor Versuche bis zum Ausfall.

Die beschriebene Vorgehensweise kann zukünftig jedoch bei sorgsamer Anwendung einen zuverlässigen und kundennahen experimentellen Nachweis der Betriebsicherheit eines Getriebesystems auch in verkürzten Versuchen ermöglichen. Durch Anwendung der Methodik lässt sich die heutzutage sehr bedeutende "Time-to-market" deutlich reduzieren.

6 Auslegung von Verzahnungskorrekturen bei Lastkollektivbelastung

Flankenkorrekturen dienen vorrangig dem Erreichen einer ausgeglichenen Lastverteilung und damit einer hohen Tragfähigkeit. Sie müssen zusätzlich häufig die Nebenbedingung günstigen Geräuschverhaltens erfüllen und womöglich zu Wirkungsgradverbesserungen im Teillastbereich führen.

Die Notwendigkeit für Korrekturen an der Zahnflanke ergibt sich in Leistungsgetrieben maßgeblich aus den lastbedingten Verformungen der umliegenden Bauteile (Wellen, Lager, Gehäuse) sowie der Zahn- und Radkörperverformung selbst.

Da viele Getriebe unter Lastkollektivbelastung betrieben werden, sind auch die Verformungen im Betrieb nicht konstant. Die Korrektur von Verzahnungen hinsichtlich Profil- und Flankenlinie erfolgt in der industriellen Praxis üblicherweise auf Basis einer Nenn- oder Auslegungslast beziehungsweise für den Lasthorizont mit größter Schädigung oder einzeln für jede Laststufe unter Verwendung der heute verfügbaren Berechnungsprogramme. Die Lage der Auslegungslast kann beispielsweise durch die erforderliche Sicherheit oder die zu erreichende Mindestlebensdauer bezüglich des maßgeblichen Schadensmechanismus bestimmt werden. Weitere Schadensmechanismen werden üblicherweise nicht detailliert betrachtet. Für ein stufenweises Vorgehen fehlt bisher eine allgemeingültige Vorgehensweise zur Kombination der Einzelkorrekturen zu einer resultierenden Gesamtkorrektur. Hier wird häufig auf Erfahrungswerte aus früheren Auslegungsprozessen zurückgegriffen. Sfar [220] zeigt zwar eine grundlegende Methodik hierzu, jedoch erfordert diese vom Benutzer sehr viele Eingabewerte.

Es gilt, für die Flankenkorrektur einen guten Kompromiss für alle zu erwartenden Betriebszustände und damit Verformungszustände zu finden [140, 141, 142, 220]. Hinzu kommt, dass bei Lastrichtungswechsel die im Zahnkontakt wirksamen Verformungen neu zu bestimmen sind.

In üblichen Praxisgetrieben besteht häufig die Anforderung, für eine gegebene Kollektivbelastung und auch für wechselnde Drehrichtungen tragfähigkeits- beziehungsweise lebensdauer-optimale Korrekturen für die Zahnflanken auszulegen. Eine einheitliche Methode zur Bestimmung der Verzahnungskorrekturen bei Kollektivbelastung, insbesondere im Hinblick auf mehrere Schadensmechanismen mit ähnlichen Sicherheitswerten, liegt bislang jedoch nicht vor. Die Kollektivbelastung kann sich hierbei aus Drehmoment- und/oder Drehzahlkollektiven sowie gegebenenfalls auch aus Öltemperaturkollektiven und unterschiedlichen äußeren Belastungen zusammensetzen.

Gegenstand dieser Arbeit ist nachfolgend die örtliche Analyse eines Zahneingriffs unter Lastkollektivbeanspruchung mit dem Ziel einer optimalen Korrekturauslegung. Hierbei werden Lager- und Wellenverformungen sowie wechselnde äußere Kräfte, Drehzahlen und Öltemperaturen berücksichtigt. Für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit steht die Korrekturauslegung hinsichtlich der Tragfähigkeit im Vordergrund. Eine Erweiterung auf Betrachtungen hinsichtlich Geräusch und Wirkungsgrad ist denkbar.

Es werden hierbei die verschiedenen Ergebnisse zur Lastverteilung und der Tragfähigkeitsberechnungen (z.B. Tragfähigkeit bezüglich Grübchen, Zahnfußbruch, Grauflecken, Fressen und Verschleiß) des Programms RIKOR [181] genutzt, um Korrekturziele zu definieren und die

Korrekturen entsprechend auszulegen. Ziel ist es, eine für das jeweilige Anwendungsfeld optimale Korrektur für einen Zahneingriff unter Lastkollektivbelastung anzugeben. Bei der Berechnung des Korrekturvorschlages sollen unterschiedliche Benutzereingaben (z.B. Toleranzen bei der Fertigung, fertigmögliche Standardkorrekturen) berücksichtigt werden, um die optimale Korrektur im Hinblick auf die Zielsetzung des Anwenders zu erreichen.

6.1 Berechnungsstudie zu optimalen Korrekturen

Im Rahmen der Arbeit wurde eine RIKOR-Berechnungsstudie zu optimalen Korrekturen durchgeführt. Ziel der Studie ist es, die Auswirkungen verschiedener Korrekturen auf die von RIKOR ermittelten Kennwerte zu untersuchen. Insbesondere werden dabei Kennwerte betrachtet, welche sowohl in Zahnbreiten als auch in Zahnhöhenrichtung (= Eingriffsfeld) erfasst werden. Somit sollen Probleme aufgezeigt werden, welche bei einer automatisierten Korrekturauslegung bei Lastkollektivbelastung zu unplausiblen Ausgaben führen können. Dazu wurden beispielhaft drei verschiedene Verzahnungsvarianten in RIKOR [181] betrachtet. Diese sind in **Tabelle 6.1** dargestellt.

Bei den untersuchten Verzahnungen handelt es sich um zwei typische FZG-Prüfverzahnungen mit senkstarrer/drehweicher und symmetrischer Lagerung sowie einer asymmetrisch und biegeweich ausgeführten Variante mit Achsabstand $a = 200$ mm.

	Variante 1	Variante 2	Variante 3
z_1/z_2	17/18	22/24	87/105
Schrägungswinkel β	0°	29°	12°
Modul	5 mm	4,25 mm	2 mm
Achsabstand a	91,5 mm	112,5 mm	200 mm
Bemerkungen	Lagerung steif und symmetrisch	Lagerung steif und symmetrisch	Lagerung steif und asymmetrisch, Welle biegeweich ausgeführt

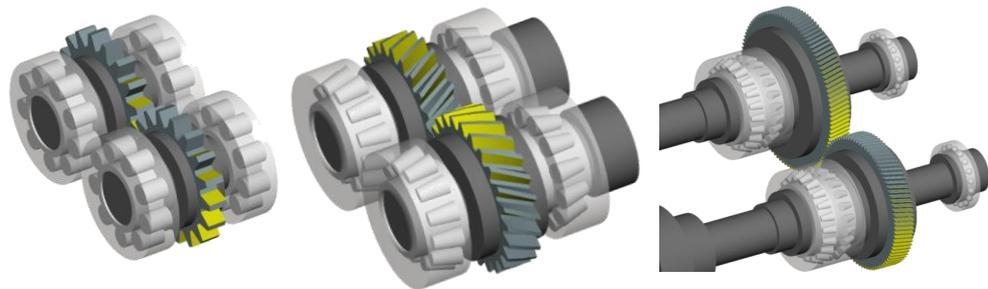


Tabelle 6.1: Varianten Berechnungsstudie

Die Pressungs- und Linienlastverteilungen der betrachteten Verzahnungsvarianten im unkorrigierten Zustand für ein Drehmoment, welches in etwa dem dauerhaft ertragbaren Drehmoment hinsichtlich Grübchen (Variante 1 + 2) bzw. Zahnfußbruch (Variante 3) entspricht, sind im Anhang zu finden. Die Berechnung in RIKOR wurde unter Berücksichtigung des vor- und nachzeitigen Eingriffs durchgeführt. Die geradverzahnte Variante 1 zeigt im Bereich von Eingriffsbeginn und -ende deutliche Pressungsüberhöhungen aufgrund des vor- und nachzeitigen Eingriffs. Des Weiteren lässt sich hier deutlich Einzel- und Doppelingriffsgebiet unterscheiden. Variante 2 und Variante 3 zeigen ebenfalls im Bereich von Eingriffsbeginn und -ende, welcher bei den schrägverzahnten Varianten stirnseitig an Zahnkopf und -fuß liegt,

Pressungsüberhöhungen. Variante 3 zeigt zudem eine einseitig ausgeprägte Pressungsverteilung, welche in der asymmetrischen Ausführung der Lagerung sowie der Wellengestaltung begründet ist.

Die Berechnung der Zahnfußspannungen sowie der Flankentemperaturen stützt sich im Wesentlichen auf die ermittelte Linienlastverteilung. Zur Berechnung der Flankentemperaturen werden zusätzlich die Gleitgeschwindigkeiten auf der Zahnflanke herangezogen. Diese nehmen mit zunehmendem Abstand vom Wälzkreis zu. Bei gleichbleibender Linienlast nehmen somit die berechneten Flankentemperaturen in Richtung Fuß- und Kopfflankenbereich zu. Zur Berechnung der Zahnfußspannungen wird neben der Linienlast auch der wirksame Biegebelastarm berücksichtigt. Im Vergleich zur Hertzschen Pressung sind bei Betrachtung der Linienlast vor allem die unterschiedlichen Verläufe im Bereich von Eingriffsbeginn und –ende auffällig. Dies ist auf die ungenügende rechnerische Berücksichtigung des Krümmungsradius der Zahnkopfkante zur Berechnung der Hertzschen Pressung im Bereich des vor- und nachzeitigen Eingriffs zurückzuführen.

RIKOR [181] ermittelt basierend auf einer Analyse der lastbedingten Verformungen für verschiedene Eingriffsstellungen einen optimalen Korrekturvorschlag, um eine ideale Linienlast- und Pressungsverteilung zu erhalten. Aus dem Korrekturvorschlag lassen sich für die betrachteten Varianten folgende Korrekturen ableiten:

- Variante 1: Kopfrücknahme an Ritzel und Rad;
- Variante 2: Kopfrücknahme an Ritzel und Rad;
Gewälzte Korrektur;
- Variante 3: Kopfrücknahme an Ritzel und Rad;
Schrägungswinkelkorrektur;
Gewälzte Korrektur.

Durch Anwendung dieser Korrekturen mit an den jeweiligen Lastfall angepassten Beträgen lassen sich sowohl die maximalen Beträge der Hertzschen Pressungen als auch die auftretenden Linienlasten und somit die maximalen Zahnfußspannungen sowie die maximalen Flankentemperaturen reduzieren. Die ermittelten Korrekturen sind jedoch nur für die betrachtete Laststufe ideal.

Eine weitere Erhöhung der Korrekturbeträge führt in der Regel zu steigenden Beanspruchungen im verbleibenden, tragenden Bereich der Zahnflanke. Eine Erniedrigung der Korrekturbeträge bedingt die Gefahr eines Anstiegs der Kennwerte in den Randbereichen der Verzahnung. Auch Korrekturen zum Ausgleich von Fertigungsabweichungen, z.B. Breitenballigkeiten zur Vermeidung von Kantenrängern oder übertriebene Schrägungswinkelkorrekturen, führen zu einer Erhöhung der Kennwerte und lassen sich somit nur schwer quantitativ erfassen.

Dazu kommen numerische Ungenauigkeiten bei der Berechnung der Hertzschen Pressungen im Bereich des vor- und nachzeitigen Eingriffs, weil hier durch den Kontakt Zahnkopfkante – Evolvente die Hertzsche Theorie streng genommen nicht gilt, welche die ermittelten Kennwerte massiv verändern können.

Bei Betrachtung einer Einstufenbelastung (z.B. dem Lasthorizont der größten Schädigung) können die auftretenden Effekte durch einen erfahrenen Anwender gut eingeschätzt werden, da die Ausgaben einzeln zur Verfügung stehen und bewertet werden können. Somit kann eine

plausible Korrektur unter Berücksichtigung des eigenen Erfahrungswissens ermittelt werden. Diese Möglichkeit ist bei der Korrekturauslegung bezüglich eines Lastkollektivs nicht gegeben, da hierbei keine manuelle Auswertung der Ausgabekenngrößen möglich ist.

Insgesamt zeigt sich somit, dass die RIKOR Ausgabekenngrößen plausibel auf eingegebene Korrekturen reagieren. Korrekturen, welche zu einer ausgeglichenen Linienlast- und Pressungsverteilung führen, zeigen sich auch gleichzeitig als geeignet zur Reduzierung der auftretenden Zahnfußspannungen sowie der berechneten Flankentemperaturen. Im Bereich des vor- und nachzeitigen Eingriffs können sich vor allem bei Geradverzahnungen sehr hohe Pressungswerte ergeben. Auch Korrekturen zum Ausgleich von Fertigungstoleranzen und möglicher Abweichungen lassen sich nur durch eine fachkundige Beurteilung durch den Anwender erfassen. Zur automatisierten Auslegung von Verzahnungskorrekturen bei Lastkollektivbelastung müssen diese Effekte daher gesondert betrachtet werden.

6.2 Methodik zur Korrekturauslegung bei Lastkollektivbeanspruchung

Nachfolgend wird die Methodik zur Ermittlung von Zahnflankenkorrekturen bei Lastkollektivbelastung beschrieben. Die Ermittlung der Zahnflankenkorrekturen erfolgt unter Zuhilfenahme des Programmsystems RIKOR [181]. Dieses bildet das Welle-Lager-System sowie die relevanten Verzahnungsstufen eines Getriebes ab. Die aus dem Zahnkontakt resultierenden Verformungen im Welle-Lager-System sowie am Zahn werden bei der Berechnung berücksichtigt. Als Ergebnisse erhält man u.a. einen Korrekturvorschlag für das vorgegebene Drehmoment, die Pressungs-, Linienlast- und Kontakttemperaturverteilung im Eingriffsfeld sowie die Verteilung der maximalen Zahnfußspannungen über der Zahnbreite.

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Methodik zur Ermittlung von Zahnflankenkorrekturen bei Lastkollektivbelastung beruht auf diesen Ausgangsgrößen. Als Ausgangsgrößen dienen ein RIKOR-Eingabedatensatz für eine unkorrigierte Verzahnung sowie ein relevantes Lastkollektiv. Das Vorgehen kann im Allgemeinen in die folgenden Schritte eingeteilt werden (siehe auch **Bild 6.1**):

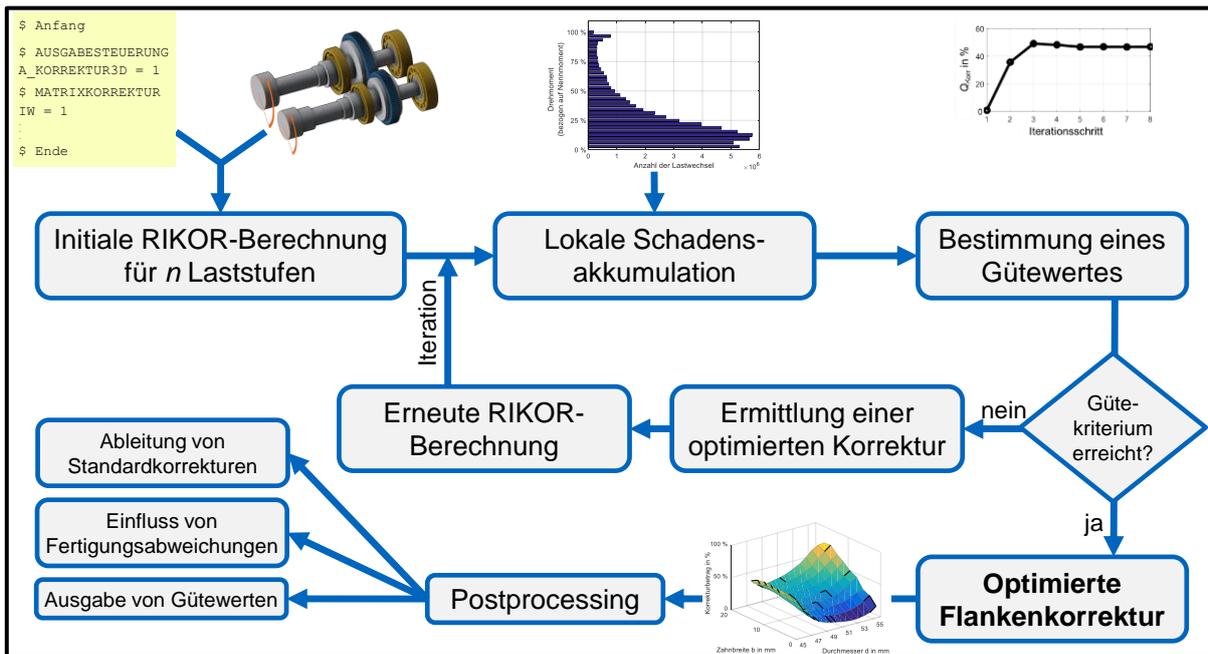


Bild 6.1: Vorgehensmodell zur Korrekturauslegung bei Lastkollektivbelastung

- **1. Schritt:** Initiale RIKOR-Berechnung für n Laststufen
Erstellung eines RIKOR-Eingabedatensatzes und Berechnung der RIKOR Ausgabe-
größen für eine sinnvoll vorgegebene Anzahl an Laststufen n im Bereich zwischen Mi-
nimal- und Maximallast des Lastkollektivs. Relevante Zwischenergebnisse werden da-
bei zur späteren Auswertung gespeichert.
- **2. Schritt:** Lokale Schadensakkumulation
Durchführung einer lokalen Schadensakkumulation hinsichtlich Grübchenschäden für
das vorgegebene Lastkollektiv an Hand der ermittelten Pressungsverteilung.
- **3. Schritt:** Bestimmung der Güte hinsichtlich der vorgegebenen Korrektur
Zur Charakterisierung der Qualität einer ermittelten Korrektur wird - basierend auf den
Ergebnissen aus Schritt 2 - ein Gütewert bestimmt.
- **4. Schritt:** Ermittlung einer optimierten Flankenkorrektur
Die von RIKOR ermittelten Korrekturvorschläge für die einzelnen Laststufen werden
mit den zugehörigen relativen lokalen Schadenssummen gewichtet und anschließend
zu einer Gesamtkorrektur zusammengesetzt.
- **5. Schritt:** Erneute RIKOR-Berechnung für n Laststufen
Erneute Berechnung der RIKOR Ausgabegrößen für eine sinnvoll vorgegebene Anzahl
an Laststufen n im Bereich zwischen Minimal- und Maximallast des Lastkollektivs unter
Vorgabe der in Schritt 4 ermittelten Korrektur für die betrachtete Verzahnungsstufe.
- **6. Schritt:** Iteration der Schritte 2 bis 5
Die Schritte 2 bis 5 werden iterativ durchgeführt bis ein definiertes Abbruchkriterium
erreicht wurde. Die Überprüfung, ob das Abbruchkriterium erreicht wurde, erfolgt nach
Schritt 3.
- **7. Schritt:** Abbruch der Iteration
Wird die Iterationsschleife durch Erreichen des Abbruchkriteriums beendet, so werden
die Ergebnisse (ermittelter Korrekturvorschlag in Form einer Matrixkorrektur, lokale
Schadenssummen für die Schadensarten Grübchen und Zahnfußbruch, ...) des letzten
bzw. des optimalen Iterationsschritts ausgegeben.
- **8. Schritt:** Ableitung von Standardkorrekturen unter Berücksichtigung von Fertigungs-
abweichungen
Ableitung von fertigen Standardkorrekturen aus dem ermittelten Korrekturvorschlag
in Form einer Matrixkorrektur unter Berücksichtigung vorgegebener Fertigungsabwei-
chungen und damit erneute Berechnung der Schadenssummen.

Im Fokus der beschriebenen Methodik zur Korrekturauslegung bei Lastkollektivbelastung steht eine Auslegung hinsichtlich optimaler Flankentragfähigkeit. Eine optimierte Korrekturauslegung hinsichtlich der Schadensart Zahnfußbruch kann zu etwas abweichenden Korrekturvorschlägen führen. Die im Rahmen des gezeigten Vorgehensmodells ermittelte optimierte Korrektur wirkt sich jedoch in den allermeisten der betrachteten Fälle auch nicht negativ auf die berechneten Schädigungssummen hinsichtlich Zahnfußbruch aus (siehe Kapitel 6.3). Da Flan-

kenkorrekturen in der Regel zur Steigerung der Flankentragfähigkeit bzw. zur Vermeidung ungleicher Lastverteilung eingesetzt werden, stehen sie im Rahmen dieser Betrachtungen im Mittelpunkt.

Die einzelnen Schritte der Methodik bezüglich der Zahnflanke werden nachfolgend detailliert beschrieben.

Ausgangsgrößen

Ausgangsgrößen zur Korrekturermittlung bei Lastkollektivbelastung sind zum einen ein RIKOR-Eingabedatensatz ohne Vorgabe von Korrekturen und zum anderen ein repräsentatives Lastkollektiv für den konkreten Anwendungsfall. Eine Laststufe setzt sich hierbei aus einer Kombination von Drehmoment, Drehzahl, Öltemperatur und äußeren Kräften zusammen. Im Rahmen der hier dokumentierten Untersuchungen wurde vor allem eine Variation des Drehmoments betrachtet, da dies der maßgebliche Einflussfaktor auf die Zahnradschäden Grübchen und Zahnfußbruch ist.

1. Schritt: Initiale RIKOR-Berechnung für n Laststufen

Zunächst werden RIKOR-Berechnungen für eine beliebige Anzahl n an Laststufen durchgeführt. Die Anzahl an Laststufen kann hierbei prinzipiell frei gewählt werden und muss nicht der Anzahl der Laststufen des vorgegebenen Lastkollektivs entsprechen. Sinnvoll ist es, die niedrigste Laststufe des vorgegebenen Lastkollektivs, d.h. beispielsweise die Stufe mit dem niedrigsten Drehmoment als untere Grenze und die höchste Laststufe des vorgegebenen Lastkollektivs als obere Grenze zu definieren. Die weiteren Laststufen sollten äquidistant zwischen diesen Grenzen verteilt werden, um im späteren Verlauf gute Berechnungsergebnisse zu erzielen. Eine höhere Anzahl an Laststufen führt i.d.R. zu präziseren Berechnungsergebnissen, jedoch auch zu einer deutlichen Erhöhung der Rechenzeit. Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen hat sich eine Laststufenanzahl $n = 5 \dots 10$ als ausreichend genau erwiesen.

Die relevanten Berechnungsergebnisse (ermittelte Linienlast-, Kontakttemperatur- und Pressungsverteilung, Zahnfußspannungsverlauf, Korrekturvorschlag) für jede Laststufe werden gespeichert und in den folgenden Schritten weiterverarbeitet.

2. Schritt: Lokale Schadensakkumulation

Basierend auf den ermittelten RIKOR-Berechnungsergebnissen wird anschließend eine lokale Schadensakkumulation hinsichtlich der Hertzschen Pressung durchgeführt. Die Festigkeitsparameter (Wöhlerliniensteigung k , Grenzlastspielzahl N_D sowie Dauerfestigkeitswert σ_{HP}) zur Beschreibung der Wöhlerlinie werden dabei als Eingabegrößen vorgegeben. Dies ermöglicht außerdem die direkte Berücksichtigung von Normangaben, Literaturwerten oder Versuchsergebnissen.

Die Grundlagen zur lokalen Schadensakkumulation an Zahnrädern hinsichtlich der Schadensarten Grübchen und Zahnfußbruch nach FZG/Ziegler [256] wurden bereits erläutert. Die lokale Schadensakkumulation wird im Rahmen der hier entwickelten Methodik für jeden Berechnungspunkt im Eingriffsfeld durchgeführt. Zunächst wird die berechnete Pressungsverteilung für jede Laststufe des Lastkollektivs durch Interpolation zwischen den Berechnungsergebnissen aus Schritt 1 bestimmt. Anschließend wird für jede Laststufe i und jeden Punkt im Eingriffsfeld j eine lokale Schadenssumme $d_{i,j}$ ermittelt. Hierzu wird zunächst die zulässige Lastspielzahl $N_{i,j}$ für die berechnete Pressung aus der Festigkeitskennfunktion ermittelt und an-

schließlich der auftretenden Lastspielzahl n_i auf dieser Laststufe, welche im Lastkollektiv definiert ist, gegenübergestellt. Die verwendete Schadensakkumulationshypothese (SAH) kann hierbei prinzipiell frei gewählt werden. Für die Schadensart Grübchen sei jedoch die Anwendung der modifizierten SAH nach Miner/Haibach [103] empfohlen. Anschließend wird eine lokale Gesamtschädigungssumme für jeden betrachteten Punkt j gebildet:

$$D_j = \sum d_{i,j} = \sum \frac{n_i}{N_{i,j}} \quad (6.1)$$

D	- Schadenssumme	d	- Teilschädigung
N	- Zulässige Lastspielzahl	n	- Auftretende Lastspielzahl
i	- Laststufe	j	- Punkt im Eingriffsfeld

Bild 6.2 zeigt die Pressungsverteilung einer Beispielverzahnung für eine ausgewählte Laststufe sowie die daraus abgeleitete Verteilung der lokalen Schadenssummen d (ermittelt mit der Schadensakkumulationshypothese Miner-Haibach).

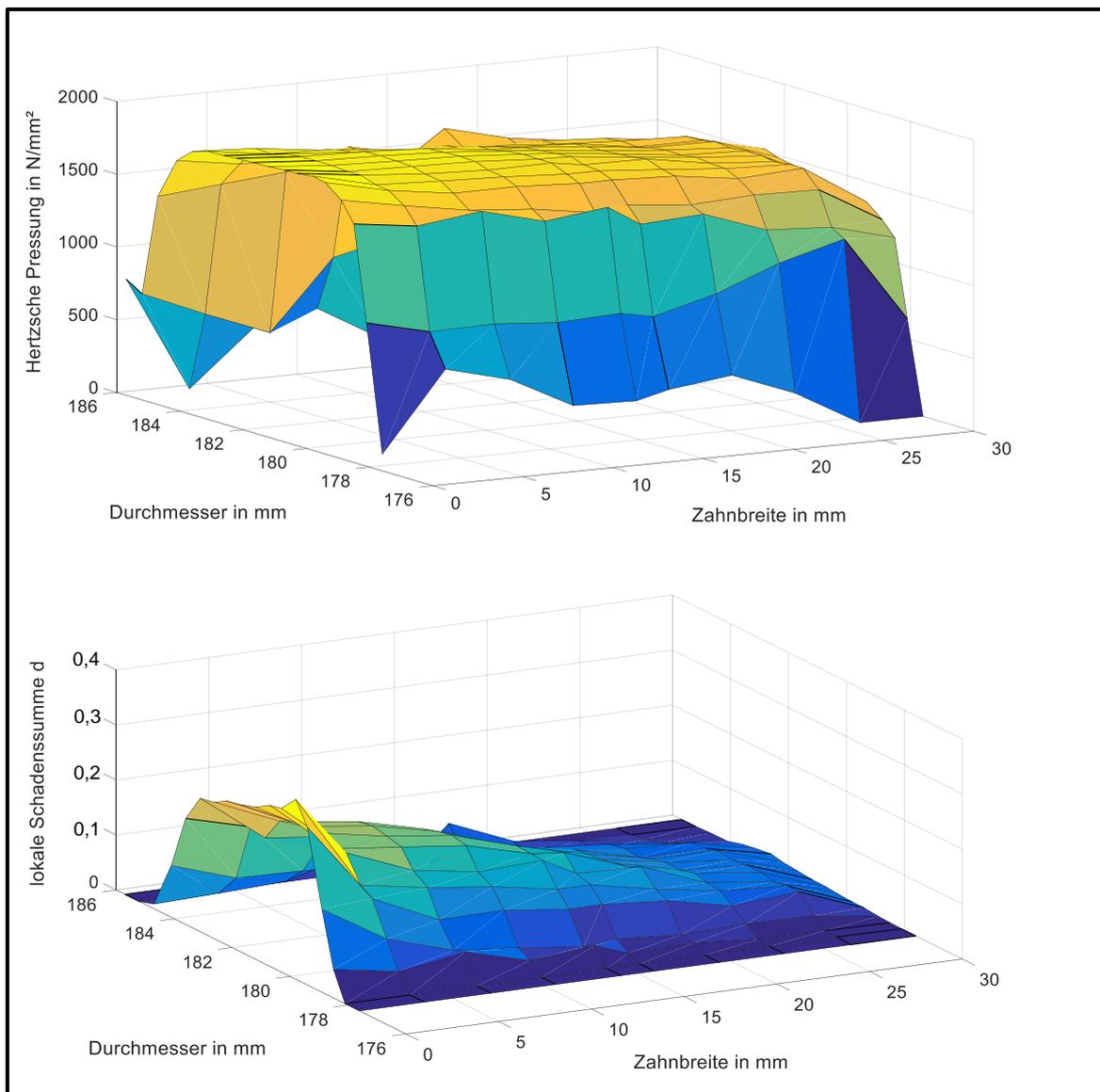


Bild 6.2: Beispielhafte Pressungsverteilung und abgeleitete lokale Schadenssummen d für diese Kollektivstufe

Man erkennt, dass die lokalen Schadenssummen empfindlich auf leichte Pressungsüberhöhungen im Bereich der vorgegebenen Dauerfestigkeit reagieren. Dies ist in der Wahl der SAH begründet; Pressungen unterhalb des vorgegebenen Dauerfestigkeitswerts ergeben nur geringe Schadenssummen, während Pressungen im Zeitfestigkeitsgebiet zu hohen Schadenssummen führen.

Bei dem hier beschriebenen Vorgehen sei angemerkt, dass die ermittelten Werte der lokalen Schadenssummen als Absolutwerte keine direkte Aussage im Hinblick auf die Flankenlebensdauer erlauben. Da hier mittels RIKOR berechnete Hertzsche Pressungen mit Normwerten für die Festigkeit verglichen werden, handelt es sich streng genommen nicht um eine normfähige Lebensdauerberechnung. Hierzu müsste anstatt der Hertzschen Pressungen ein normfähiger Kennwert analog zur auftretenden Flankenpressung σ_H Anwendung finden. Für die im Folgenden angewendete relative Betrachtung zur Korrekturermittlung ist diese Problematik jedoch ohne Auswirkungen.

3. Schritt: Bestimmung der Güte hinsichtlich der vorgegebenen Korrektur

Um eine gegebene Korrektur bewerten zu können, wird im Rahmen der vorgestellten Methodik ein Gütewert Q_{Korr} definiert. Dieser wird in jedem Iterationsschritt berechnet, also initial auch für die unkorrigierte Variante, um einen Ausgangswert zu erhalten. Die Definition der Korrekturgüte Q_{Korr} basiert auf der Verteilung der lokalen Gesamtschädigungssummen D . Zunächst werden relative, lokale Gesamtschädigungssummen gebildet, indem die lokale Gesamtschädigungssumme für jeden betrachteten Punkt im Eingriffsfeld zum Maximalwert der lokalen Gesamtschädigungssummen im Eingriffsfeld ins Verhältnis gesetzt wird.

$$D_{j,rel} = \frac{D_j}{\max(D_j)} \quad (6.2)$$

D	-	Schadenssumme	j	-	Punkt im Eingriffsfeld
$D_{j,rel}$	-	Relative, lokale Gesamtschadenssumme			

Die Güte Q_{Korr} wird nun definiert als Integral über den relativen, lokalen Gesamtschädigungssummen $D_{j,rel}$. Hierbei wird nur ein definierter, relevanter Bereich des Eingriffsfeldes betrachtet. Bei Gerad- und Schrägverzahnungen mit Einzeleingriffsgebiet werden nur die im Einzeleingriffsgebiet liegenden Punkte ausgewertet, bei allen anderen Verzahnungen das gesamte Eingriffsfeld.

$$Q_{Korr} = \int_{\substack{\text{relevantes} \\ \text{Eingriffsfeld}}} D_{j,rel} \quad (6.3)$$

Q_{Korr}	-	Korrekturgüte	$D_{j,rel}$	-	Relative, lokale Gesamtschadenssumme
------------	---	---------------	-------------	---	--------------------------------------

Durch die Verwendung der relativen, lokalen Schadenssummen $D_{j,rel}$ sowie normierter Breiten- und Profilkordinaten, kann die Korrekturgüte Q_{Korr} nur Werte im Bereich von 0 ... 100 % annehmen. Eine Güte von 100% entspricht einer absolut gleichmäßigen Schädigung im relevanten Eingriffsfeld. Zudem ist dabei sichergestellt, dass die Maximalwerte der Schädigungen in eben diesem Bereich liegen und nicht etwa am Rand der Verzahnung. Im Fall eines Schadens fallen somit theoretisch alle Flankenbereiche bei vorgegebener Lastkollektivbelastung zum gleichen Zeitpunkt aus; die Lebensdauer ist dabei maximal.

Mit Hilfe der Korrekturgüte Q_{Korr} ist somit eine Charakterisierung einer Verzahnungskorrektur hinsichtlich einer vorgegebenen Lastkollektivbelastung möglich. Die Korrekturgüte wird zudem als Abbruchkriterium der später beschriebenen Iterationsschleife verwendet.

4. Schritt: Ermittlung einer optimierten Flankenkorrektur

Die Ermittlung einer optimierten Flankenkorrektur basiert maßgeblich auf den Ergebnissen der lokalen Schadensakkumulation (Schritt 2) sowie den RIKOR-Berechnungsergebnissen. RIKOR [181] berechnet für jede der n Laststufen einen Korrekturvorschlag, welcher nach unterschiedlichen Kriterien ermittelt werden kann (z.B. linearer Anstieg und Abfall der Linienlasten zu Eingriffsbeginn und –ende sowie gleichmäßige Verteilung der Linienlasten dazwischen).

Dieser Korrekturvorschlag wird zunächst durch Interpolation der Berechnungsdaten für jede Laststufe i des Lastkollektivs ermittelt. Die Korrekturbeträge für jede Laststufe i des Lastkollektivs $x_{\text{Korr},i,j}$ werden anschließend punktweise mit den lokalen Schadenssummen $d_{i,j}$ bezogen auf die lokale Gesamtschädigungssumme D_j im betrachteten Flankenpunkt j gewichtet und abschließend für jede Laststufe i punktweise zu einem optimierten Korrekturvorschlag addiert.

$$x_{\text{Korr},j} = \sum x_{\text{Korr},i,j} \cdot \frac{d_{i,j}}{D_j} \quad (6.4)$$

D	-	Schadenssumme	d	-	Teilschädigung
x_{Korr}	-	Korrekturbetrag	j	-	Punkt im Eingriffsfeld
i	-	Laststufe			

Wurde in einem vorangegangenen Iterationsschritt bereits eine optimierte Korrekturmatrix bestimmt, so wird die neue Korrekturmatrix punktweise addiert. Um unnötig große Korrekturbeträge zu vermeiden, wird als letzter Schritt der Minimalwert der neuen Korrekturmatrix von allen Werten subtrahiert.

5. Schritt: Erneute RIKOR-Berechnung für n Laststufen

Um die in Schritt 4 ermittelte optimierte Flankenkorrektur für das gegebene Getriebesystem bei Lastkollektivbelastung hinsichtlich ihrer Korrekturgüte Q_{Korr} bewerten zu können, ist eine erneute RIKOR-Berechnung für die festgelegten n Laststufen notwendig. Die optimierte Korrektur wird hierbei als Matrixkorrektur im verwendeten RIKOR-Eingabedatensatz vorgegeben.

6. Schritt: Iteration der Schritte 2 bis 5

Durch unterschiedliche Kreuzeinflüsse zwischen Lager, Wellen und Verzahnung ist eine iterative Berechnung der Schritte 2 bis 5 nötig. Für jeden Schritt wird eine Korrekturgüte Q_{Korr} ermittelt. Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen zeigte sich, dass Q_{Korr} in der Regel konvergiert (siehe z.B. **Bild 6.3**). Die Anzahl der Iterationsschritte bis ein vorgegebenes Abbruchkriterium erreicht ist, variiert hierbei in Abhängigkeit von Welle-Lager-System, Verzahnung und Lastkollektiv.

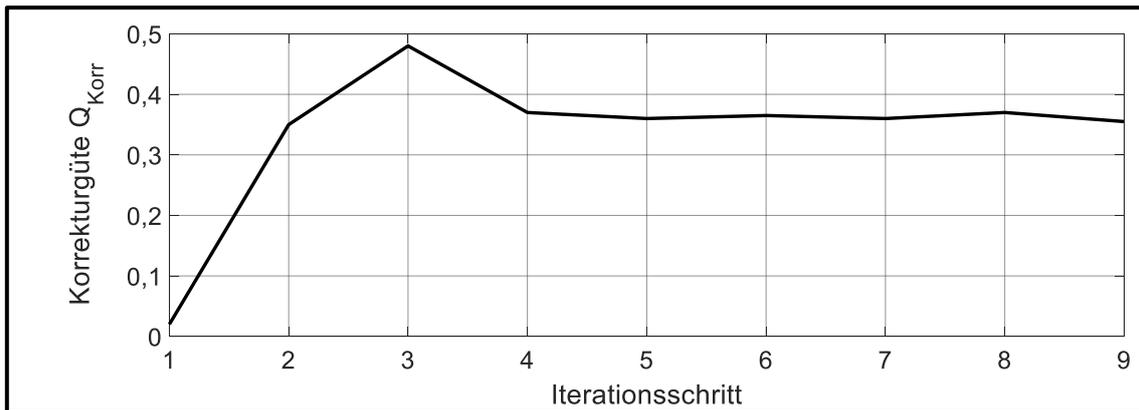


Bild 6.3: Verlauf der Korrekturgüte Q_{Korr}

7. Schritt: Abbruch der Iteration

Die Iterationsschleife der Schritte 2 bis 5 wird beendet, wenn ein vorgegebenes Abbruchkriterium erreicht ist. Dies kann auf verschiedene Arten definiert werden:

- Vorgegebene maximale Anzahl an Iterationsschritten erreicht. (Begrenzung der Rechenzeit);
- Differenz der letzten beiden berechneten Werte der Korrekturgüte Q_{Korr} liegt in einem bestimmten Intervall. (Konvergenz);
- Ermitteltes Maximum der Korrekturgüte Q_{Korr} liegt eine vorgegebene Anzahl an Iterationsstufen zurück. (keine Konvergenz).

Ist das Abbruchkriterium der Iterationsschleife erreicht, so wird diejenige Flankenkorrektur ausgegeben, für welche ein Maximum der Korrekturgüte Q_{Korr} erreicht wurde. Diese Korrektur stellt unter Berücksichtigung der vorgegebenen Randbedingungen ein Optimum dar.

8. Schritt: Ableitung von Standardkorrekturen

Als Ergebnis der beschriebenen Methodik zur Korrekturauslegung bei Lastkollektivbelastung erhält man eine optimierte Flankenkorrektur in Form einer Korrekturmatrix für jeden Berechnungspunkt im Eingriffsfeld. Diese Korrekturform ist in vielen Fällen mit einem gegebenen Maschinenpark nicht direkt fertigbar und muss daher in Standardkorrekturen, welche in einfachen Schleifprozessen fertigbar sind, überführt werden. Das Programmsystem RIKOR [181] bietet bereits seit Version H eine einfache Möglichkeit zur Ableitung von Standardkorrekturen aus einer berechneten Matrixkorrektur.

6.3 Anwendbarkeit der ermittelten Korrektur für weitere Schadensarten

Im Rahmen der bisher durchgeführten Untersuchungen wurde die Methodik zur Korrekturermittlung bei Lastkollektivbelastung auch hinsichtlich weiterer Schadensarten untersucht. In RIKOR [181] stehen hierzu die 3D-Verteilungen der Linienlast, der Kontakttemperatur sowie der Blitztemperatur sowie die 2D-Verteilung der Zahnfußspannungen zur Verfügung. Linienlast, Kontakttemperatur sowie Blitztemperatur sind grundlegende Berechnungsgrößen hinsichtlich der Schadensarten Verschleiß, Graufleckigkeit sowie Fressen.

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen wurde für die Kenngrößen Linienlast, Kontakttemperatur sowie Blitztemperatur ebenfalls ein Gütewert analog zum in Abschnitt 6.2 / Schritt 3 beschriebenen Vorgehen definiert und berechnet. Es zeigt sich, dass die

Verläufe der so ermittelten Gütewerte ein ähnliches Verhalten zeigen wie die Korrekturgüte. Mit einer pressungsoptimierten Korrektur ist folglich auch eine gute Korrektur hinsichtlich der Schadensarten Verschleiß, Graufleckigkeit und Fressen zu erzielen.

Hinsichtlich der Schadensart Zahnfußbruch wird der mit RIKOR [181] berechnete Verlauf der Zahnfußspannungen über der Zahnbreite betrachtet. Basierend auf einer durch Wöhlerliniensteigung k , Knicklastspielzahl N_D und Dauerfestigkeitskennwert σ_{FP} definierten Festigkeitskennfunktion wird eine lokale Schadensakkumulation über der Zahnbreite analog zum in Abschnitt 6.2 / Schritt 2 beschriebenen Vorgehen durchgeführt. Anschließend wird für die ermittelte Gesamtschädigungssumme hinsichtlich Zahnfußbruch ein Gütewert analog zum in Abschnitt 6.2 / Schritt 3 beschriebenen Vorgehen definiert und berechnet. Die Güte der berechneten Flankenkorrektur hinsichtlich Zahnfußbruch zeigt für Geradverzahnungen einen ähnlichen Verlauf wie die Korrekturgüte hinsichtlich Grübchenschäden. Bei Schrägverzahnungen ergeben sich z.T. größere Abweichungen im Verlauf der beiden Kurven. Allgemein wird jedoch auch hier mit Hilfe der pressungsorientiert berechneten, optimierten Flankenkorrektur eine bessere Güte erreicht als für die unkorrigierte Ausgangsvariante.

6.4 Validierung der Methodik zur Ermittlung von optimierten Verzahnungskorrekturen bei Lastkollektivbelastung

Die entwickelte Methodik zur Auslegung von Verzahnungskorrekturen bei Lastkollektivbelastung hinsichtlich Zahnflankenschäden wurde mit verschiedenen Datensätzen validiert (siehe Anhang). **Bild 6.4** zeigt für eine ausgewählte PKW-Verzahnung das verwendete Lastkollektiv, den Verlauf der Korrekturgüte Q_{Korr} , die ermittelte optimierte Korrektur in Matrixform sowie die Matrix der Gesamtschädigungssummen D unter Berücksichtigung der optimierten Korrektur.

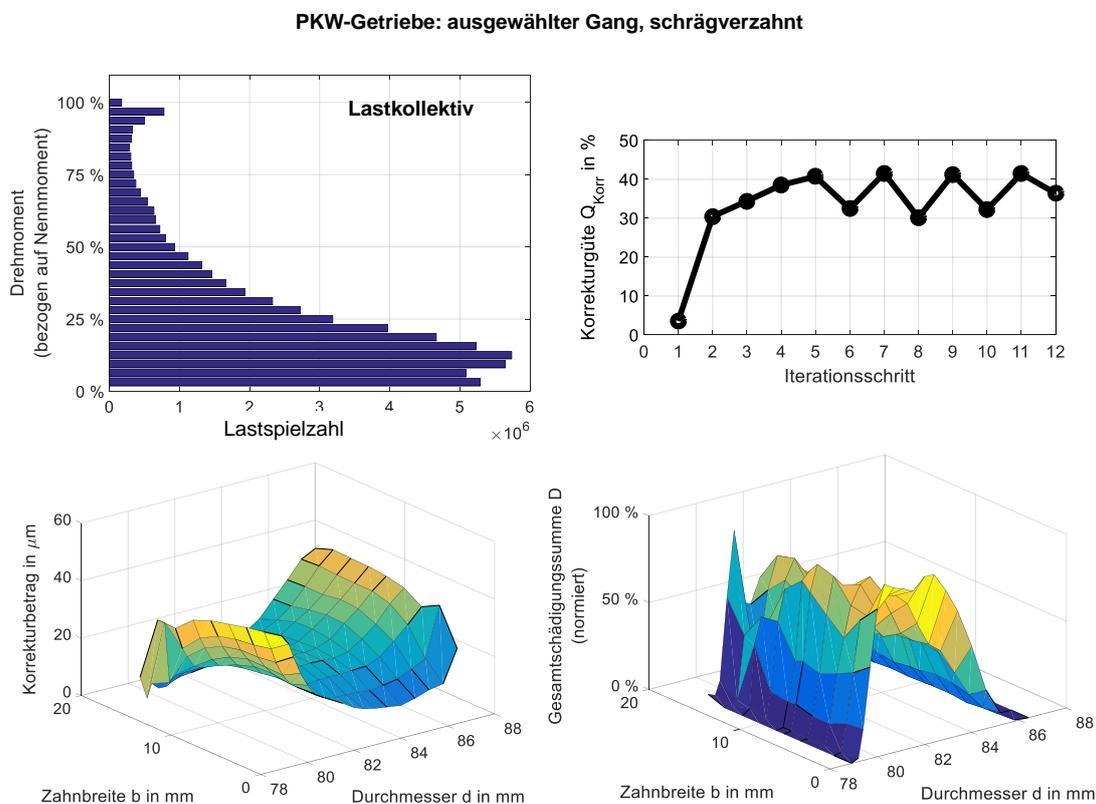


Bild 6.4: Berechnungsergebnisse PKW-Verzahnung (Beispiel)

Man erkennt, dass als optimierte Korrektur eine Kombination aus Höhenballigkeit, Schrägungswinkelkorrektur und gewälzter Korrektur berechnet wurde. Die berechneten Korrekturen erscheinen in Bezug auf die Verzahnungsmakrogeometrie sowie das Welle-/Lager-System sinnvoll und entsprechen auch weitestgehend der tatsächlich ausgeführten Verzahnungskorrektur. Die Korrekturberechnung erreicht im fünften Iterationsschritt ein optimiertes Ergebnis und konvergiert anschließend auf diesem Niveau.

Neben den bereits gezeigten Beispielen wurden im Rahmen dieser Arbeit noch zusätzlich Berechnungen mit ausgewählten Industriegetrieben durchgeführt. Insgesamt zeigte sich auch bei den zusätzlich betrachteten Beispielen eine gute Korrelation der berechneten Korrektur sowie der tatsächlich ausgeführten Korrektur für das gegebene Lastkollektiv.

Die durchgeführten Berechnungen zur Validierung der entwickelten Methodik zur Auslegung von optimierten Verzahnungskorrekturen bei Lastkollektivbelastung belegen eine sehr gute Anwendbarkeit und weisen eine hohe Übereinstimmung mit praxisüblichen, ausgeführten Zahnflankenkorrekturen auf.

6.5 Implementierung in RIKOR

Die entwickelte Methodik zur Auslegung von Flankenkorrekturen bei Lastkollektivbelastung wurde als Erweiterung in das Programmsystem RIKOR [181] implementiert und steht somit industriellen Anwendern zur Verfügung. Basierend auf einem vorhandenen RIKOR-Datensatz stehen den industriellen Anwendern dabei folgende Eingabemöglichkeiten zur Verfügung:

- Vorgabe eines Lastkollektivs mit mehreren Drehmoment- und Drehzahlstufen sowie äußeren Lasten;
- Vorgabe der Anzahl zulässiger Berechnungsschritte;
- Vorgabe des Abbruchkriteriums;
- Vorgabe der Anzahl von RIKOR-Berechnungen pro Iterationsschritt;
- Wahl der fertigen Standardkorrekturen;
- Vorgabe von Fertigungstoleranzen als Profil- und Flankenformabweichungen;
- Wahl der Schadensakkumulationshypothese für Zahnflanke und Zahnfuß;
- Vorgabe der Werkstoffparameter (Wöhlerliniensteigung, Knicklastspielzahl, Dauerfestigkeit).

Neben der automatisierten Ermittlung von optimierten Korrekturen mit Hilfe von RIKOR [181] ist durch die Implementierung in das Programmsystem auch die Nachrechnung von vorgegebenen Korrekturen hinsichtlich ihrer Eignung für eine gegebene Lastkollektivbelastung möglich. Insgesamt bietet RIKOR folgende Ausgabegrößen, wenn das Modul zur Korrekturauslegung unter Lastkollektivbelastung angesteuert wird:

- Ausgabe der optimierten Flankenkorrektur in Matrixform;
- Ausgabe der abgeleiteten Standardkorrekturen;
- Ausgabe des Verlaufs der berechneten Gütwerte;
- Ausgabe der Gütwerte für die Betrachtung der Fertigungsabweichungen (Minimal- und Maximalwerte);
- Ausgabe der Gesamtschadenssummen hinsichtlich Grübchen (im Eingriffsfeld als Matrix) und Zahnfußbruch (entlang der Zahnbreite als Vektor).

Die gezeigte Methodik zur Korrekturauslegung von Verzahnungen unter Lastkollektivbelastung ist darüber hinaus auch für die Ermittlung von Verzahnungskorrekturen von Planetengetrieben anwendbar. Hierbei ergibt sich oft die Problematik, dass sich für unterschiedliche Stegstellungen ein unterschiedliches Steifigkeitsverhalten der Verzahnung ergibt. Die Ableitung von Flankenkorrekturen für eine Einstufenbelastung ist folglich lediglich für eine konkrete Stegstellung optimal. Durch Anwendung der gezeigten Methodik und Gewichtung der Einzelkorrekturen mit den Schadenssummen für mehrere betrachtete Stegstellungen ist die Auslegung von optimierten Flankenkorrekturen für Planetengetriebe möglich. Durch Mehrfachrechnung ist auch eine Kombination mit einer Lastkollektivbelastung denkbar. Vor dem Hintergrund der oftmals großen erforderlichen Korrekturbeträge vor allem am Sonnenritzel, kann die Anwendung dieser Methodik zu einer weiteren Steigerung der (Flanken-)Tragfähigkeit führen.

Die Berechnung einer optimierten Flankenkorrektur für eine übliche Verzahnungsstufe unter Lastkollektivbelastung dauert mit Hilfe der in RIKOR [181] implementierten Methodik ca. 15 Minuten, wenn pro Iterationsschritt $n = 10$ Einzelberechnungen durchgeführt werden. Diese relativ lange Berechnungszeit ergibt sich aus der Notwendigkeit, die Lagersteifigkeiten für jeden Berechnungsschritt neu ermitteln zu müssen. Werden steife Lager vorgegeben, so ist die Berechnung in weniger als einer Minute abgeschlossen.

Insgesamt steht durch die Implementierung der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Methodik zur Korrekturauslegung einer Verzahnungsstufe unter Lastkollektivbelastung in RIKOR ein umfangreiches und leicht anwendbares Werkzeug zur Verfügung. Die betriebsfeste Auslegung von Zahnradgetrieben wird somit weiter vereinfacht. Dies wird auch in den Arbeiten von Renius [191] deutlich, welcher die Vorteile eine betriebsfesten, ganzheitlichen Auslegung für Traktorgetriebe im Serieneinsatz zeigt.

7 Ganzheitlicher Ansatz zur betriebsfesten Auslegung und Prüfung von Zahnradgetrieben

7.1 Zusammenfassende Beschreibung des Vorgehensmodells

Basierend auf den bisher gezeigten Inhalten dieser Arbeit kann ein ganzheitlicher Ansatz zur betriebsfesten Auslegung und Prüfung von Zahnradgetrieben abgeleitet werden. Dieser ist in **Bild 7.1** schematisch dargestellt. Für die einzelnen Schritte werden in den folgenden Abschnitten nochmals kurz die wesentlichen Punkte erläutert und auf die relevanten Kapitel dieser Arbeit verwiesen.

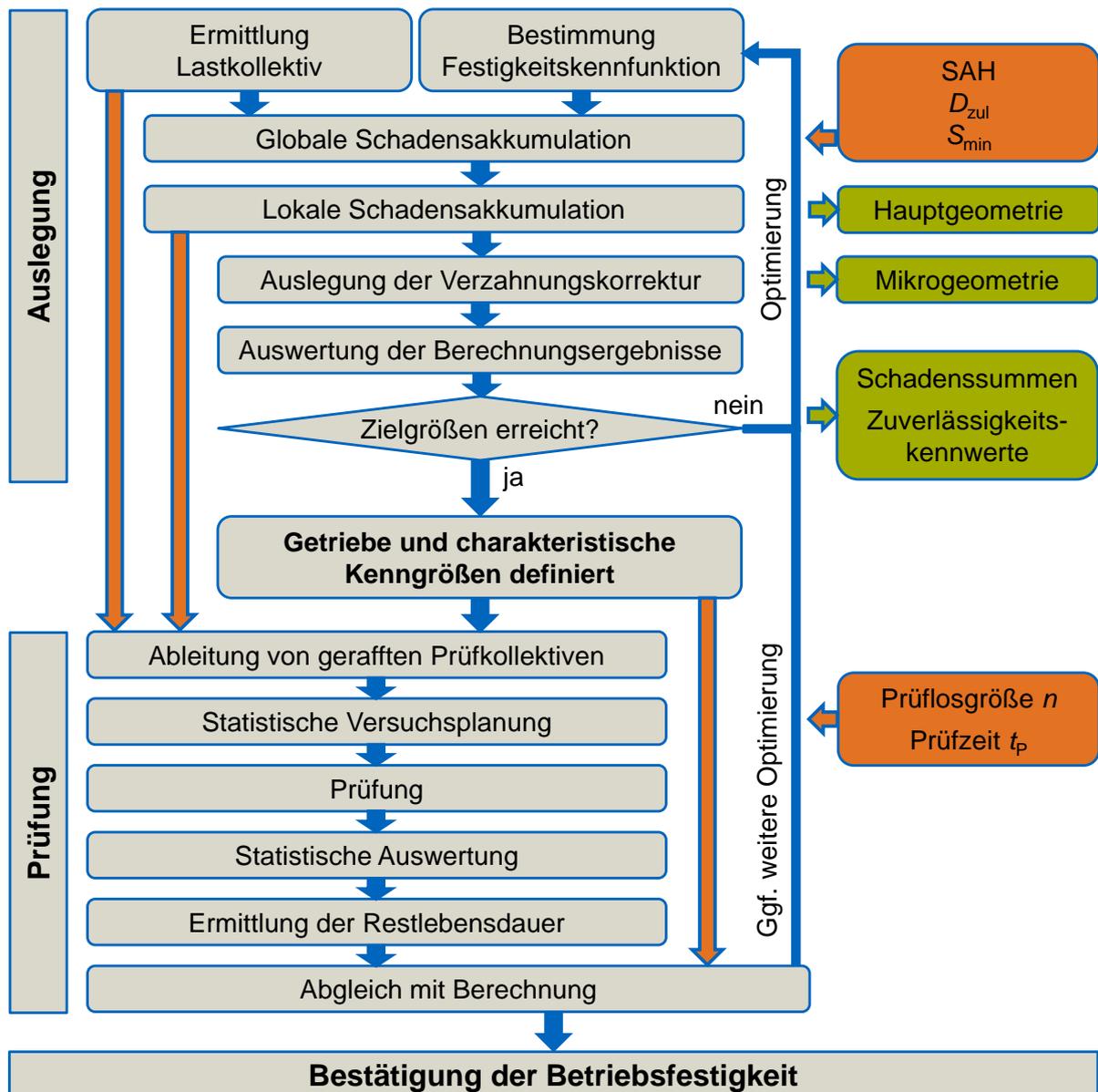


Bild 7.1: Vorgehensmodell zur betriebsfesten Auslegung und Prüfung von Zahnradgetrieben

7.2 Erweiterte betriebsfeste Auslegung von Zahnradgetrieben

Die betriebsfeste Auslegung von Zahnradgetrieben beruht maßgeblich auf der Vorgabe eines relevanten Lastkollektivs sowie einer Festigkeitskennfunktion für verschiedene Ausfallmechanismen. Beide Eingabeparameter sind immer mit einer gewissen Ausfallwahrscheinlichkeit verknüpft, welche statistischen Streuungen unterliegt. Während Streuungen der Beanspruchbarkeit vor allem im Werkstoff begründet und somit – zumindest theoretisch – experimentell erfassbar sind, sind die Streuungen der Belastung auf unterschiedliches Kundenverhalten (z.B. bei PKW-Getrieben) oder zufällige Prozesse (z.B. Windkraftanlagen) zurückzuführen. Diese Einflüsse sind für in vielen Anwendungsfällen nur schwer erfass- und abbildbar. Oft kann zwar zumindest die Maximallast bestimmt oder konstruktiv begrenzt werden, die Verteilungen von Belastungen darunter unterliegen jedoch starken Schwankungen. Für manche Anwendungsgebiete hingegen, wie etwa Traktorgetriebe [196] sind Lastkollektive mitunter gut abschätzbar.

Für die Schadensarten Grübchen und Zahnfußbruch wird die Verwendung einer Wöhlerlinie bezogen auf 1 % Ausfallwahrscheinlichkeit empfohlen. Diese sollte zunächst für 50 % Ausfallwahrscheinlichkeit experimentell ermittelt werden und anschließend mit Hilfe der Umrechnungsfaktoren aus Kapitel 3.2.1 auf 1 % Ausfallwahrscheinlichkeit umgerechnet werden. Das relevante Lastkollektiv sollte anwendungsspezifisch unter Berücksichtigung eventuell vorhandener Streuungen gewählt werden. Erst die Kombination aus Ausfallwahrscheinlichkeit der Wöhlerlinie und Auftretenswahrscheinlichkeit des relevanten Lastkollektivs lässt eine Aussage zur zu erwartenden Schadenshäufigkeit zu.

7.2.1 Grundlegende Auslegung der Verzahnungsmakrogeometrie

Unter Vorgabe des relevanten Lastkollektivs sowie der Festigkeitskennfunktion für die betrachteten Schadensmechanismen kann entsprechend Kapitel 3.3 zunächst eine globale Schadensakkumulation durchgeführt werden. Für die Schadensmechanismen Grübchen und Zahnfußbruch wird die Anwendung der Schadensakkumulationshypothese Miner-Haibach [103] empfohlen. Liegen keine Erfahrungswerte vor, können als zulässige Schadenssummen zunächst die Werte nach FZG/Schaller [206, 208] und FZG/Eberspächer [77, 78] ($D_{H,zul} = 0,5 \dots 0,85$) für Grübchen sowie FZG/Stahl [227] und FZG/Suchandt [229] ($D_{F,zul} = 0,1 \dots 0,2$) abhängig von der Ausfallwahrscheinlichkeit der zu Grunde liegenden Wöhlerlinie verwendet werden. Die Berechnungen mit diesen Werten liegen in der Regel auf der sicheren Seite.

Durch ein iteratives Vorgehen kann mit Hilfe der globalen Schadensakkumulation zunächst eine Makrogeometrie der Verzahnung (Zähnezahlen, Achsabstand, Modul) bestimmt werden, welche die grundlegenden Tragfähigkeitsanforderungen erfüllt. Mit dieser ausgewählten Verzahnung kann anschließend eine lokale Schadensakkumulation erfolgen, wenn auch das Verzahnungsumfeld bekannt ist (Lager, Wellen, Gehäusenachgiebigkeit). Die lokale Schadensakkumulation liefert weitere Informationen zur Bestimmung des maßgeblichen Schadensmechanismus sowie des Schadensorts auf der Verzahnung und bildet die Grundlage zur Ermittlung von lokalen Schadenssummen (gemäß Kapitel 3.3.2) sowie Zuverlässigkeitskennwerten (Abschnitt 3.4). Durch Anwendung des Prinzips der Bauteilwöhlerlinien nach Renius [192] kann überprüft werden, inwiefern der Werkstoff optimal ausgenutzt wird. Gegebenenfalls kann somit durch ein iteratives Vorgehen eine weitere Steigerung der Leistungsdichte erreicht werden.

Im Rahmen dieser ganzheitlichen Optimierung sollte versucht werden, den Werkstoff bestmöglich auszunutzen, d.h. die berechneten Schadenssummen für alle betrachteten Schadensmechanismen möglichst nahe an die zulässigen Schadenssummen zu bringen. Nur so kann tatsächlich sichergestellt werden, dass eine ganzheitliche Optimierung hinsichtlich der Leistungsdichte vorliegt. Eine grafische Darstellung der Bauteilwöhlerlinien nach Renius [192] für verschiedene Schadensarten und im besten Fall im eingebauten Zustand (d.h. durch experimentelle Erkenntnisse im realen Umfeld abgesichert) kann hierbei zu einem besseren Verständnis führen. Eine optimale Auslegung wäre demnach erreicht, wenn alle Bauteilwöhlerlinien zusammenfallen würden. Zu beachten ist dabei, dass die grafische Darstellung zunächst einmal nur für eine zulässige Schadenssumme von $D_{zul} = 1,0$ gültig ist.

Werden im Rahmen einer ersten Berechnung unter Verwendung realer zulässiger Schadenssummen noch Optimierungspotentiale identifiziert, so können die Bauteilwöhlerlinien durch Anpassung geeigneter Stellgrößen verschoben werden. **Tabelle 7.1** gibt einen Überblick über mögliche Maßnahmen zur Steigerung der Tragfähigkeit hinsichtlich Grübchen, Zahnfußbruch sowie Zahnflankenbruch. Zu beachten sind dabei gegensätzliche Einflüsse auf unterschiedliche Schadensarten.

Schadensart	Auswahl von Möglichkeiten zur Steigerung der Tragfähigkeit
Grübchen	<ul style="list-style-type: none"> • Modul reduzieren; • Positive Profilverschiebung; • Größere Eingriffswinkel; • Oberflächenhärtung (Einsatzhärten); • Rauheit reduzieren (z.B. Gleitschleifen); • Festigkeitsstrahlen Zahnflanke (Einbringen von Druckeigenspannungen in oberflächennahe Bereiche); • Eht im Bereich $0,15 \cdot m_n$; • Angepasster Schmierstoff (hohe Grübchentragfähigkeit, hohe Viskosität, synthetische Öle, geeignete Additive).
Zahnfußbruch	<ul style="list-style-type: none"> • Modul erhöhen; • Positive Profilverschiebung; • Größere Eingriffswinkel; • Größerer Fußrundungsradius; • Vermeiden von Kerben; • Oberflächenhärtung (Einsatzhärten); • Festigkeitsstrahlen Zahnfuß (Einbringen von Druckeigenspannungen in oberflächennahe Bereiche); • Rauheit im Zahnfuß reduzieren (z.B. Gleitschleifen); • Verzahnungsqualität verbessern; • Rohlinge vorschmieden [194].
Zahnflankenbruch	<ul style="list-style-type: none"> • Kleinere Eingriffswinkel; • Erhöhung der Einsatzhärte;tiefe; • Druckeigenspannungen in großer Tiefe; • Erhöhung der Kernhärte; • Reduzierung von Fehlstellen im Werkstoffgefüge.

Tabelle 7.1: Stellgrößen zur Steigerung der Tragfähigkeit (Auswahl)

7.2.2 Auslegung der Verzahnungsmikrogeometrie

Basierend auf den Ergebnissen der lokalen Schadensakkumulation kann mit Hilfe des in Kapitel 6 vorgestellten Verfahrens zur Auslegung einer Flankenkorrektur bei Lastkollektivbelastung die Mikrogeometrie bestimmt werden. Mit Hilfe des gezeigten, iterativ arbeitenden Algorithmus erfolgt dies vollautomatisch unter Zuhilfenahme eines 3D-Lastverteilungsberechnungsprogrammes.

7.3 Prüfung von Zahnradgetrieben

Sind die relevanten Getriebestufen des betrachteten Getriebes unter Lastkollektivbelastung hinsichtlich Makro- und Mikrogeometrie ausgelegt, kann eine Prüfung des Getriebes erfolgen. Da in den seltensten Fällen eine vollständige Lebensdauerprüfung mit dem gesamten auslegungsrelevanten Lastkollektiv durchgeführt werden kann beziehungsweise sinnvoll ist, wird dieses zunächst gerafft. Ist eine weitere Verkürzung der Prüflaufzeit notwendig, können die Versuche auch verkürzt, d.h. ohne zwingendes Erreichen eines Schadens, durchgeführt werden. Mit den in Abschnitt 5.2.1 entwickelten Methoden kann eine statistische Versuchsplanung durchgeführt werden. Abhängig von der gewünschten Prüfzeitverkürzung und den wirtschaftlichen Rahmenbedingungen, können die optimalen Parameter hinsichtlich Prüflosgröße und Prüfzeitverkürzung gewählt werden, um eine hohe Aussagesicherheit zu erreichen.

7.3.1 Geraffte Lebensdauerprüfung von Zahnradgetrieben

Methoden zur Raffung sind basierend auf den Erkenntnissen von FZG/Ziegler [257] in Kapitel 5.1 dargestellt. Die Raffung von Lastkollektiven sollte stets unter der Prämisse erfolgen, dass der maßgebende Schadensmechanismus unverändert bleibt. Die gezeigte Methodik verwendet hierzu die Ergebnisse der lokalen Schadensakkumulation. Auf die Aufbringung von Drehzahlen und Drehmomenten über denjenigen, welche im realen Betrieb auftreten können, sollte verzichtet werden, wenn keine detaillierte Betrachtung hierzu erfolgt. Valide Methoden zur Lastkollektivraffung sind die Omission, also das Weglassen von Niedriglasten sowie eine Lastanhebung.

7.3.2 Auswertung verkürzter Lebensdauerversuche

Werden verkürzte Lebensdauerversuche ohne zwingendes Erreichen des Schadenskriteriums durchgeführt, so können diese auf zwei Arten ausgewertet werden. Die statistische Auswertung solcher Versuche ist in Abschnitt 5.2.1 beschrieben und liefert mit der Kenngröße der Aussagewahrscheinlichkeit P_A einen Parameter zur Bestimmung der erreichbaren Lebensdauer bzw. Zuverlässigkeit. Zusätzlich kann die Bestimmung der Restlebensdauer von vorgeschädigten Komponenten durch umfangreiche Werkstoffuntersuchungen erfolgen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde hierzu ein Modell entwickelt, welches in Kapitel 5.2.2 detailliert beschrieben ist. Mit Kenntnis der Restlebensdauer kann von der Laufzeit im verkürzten Test durch Extrapolation auf die tatsächliche Laufzeit geschlossen werden.

7.4 Beispiel: Potentiale durch betriebsfeste Auslegung

In mehreren vom Autor betreuten Studienarbeiten [54, 65, 79, 119, 240] wurden die Potentiale einer betriebsfesten Auslegung in Hinblick auf Bauraum, Gewicht und Tragfähigkeit an beispielhaften Fahrzeuggetrieben im Vergleich zu einer dauerfesten Auslegung untersucht. Be-

trachtet wurden dabei vor allem die Schadensarten Grübchen und Zahnfußbruch, überschlägig auch die Lagerlebensdauern sowie die Festigkeit der Wellen. Zunächst wurde ein für den Anwendungsfall repräsentatives Lastkollektiv bestimmt und dieses auf unterschiedliche Ziellaufzeiten extrapoliert. Die dauerfeste Auslegung, bei welcher alle auftretenden Betriebslasten unterhalb der Dauerfestigkeitsgrenze für Grübchen und Zahnfußbruch liegen wurde zunächst – wengleich auch wenig praxisnah – als Referenzvariante ermittelt. Anschließend wurde mit den hier vorgestellten Methoden der globalen und lokalen Betriebsfestigkeitsrechnung eine bzw. mehrere Verzahnungen für den konkreten Anwendungsfall ausgelegt. Die zulässigen Lastspielzahlen wurden dabei entsprechend obiger Empfehlungen gewählt. Beide Varianten wurden anschließend konstruktiv mit Lagern und Wellen ausgeführt. **Bild 7.2** zeigt ein entsprechendes Beispiel für ein 6-Gang PKW-Getriebe. Durch die Bestimmung der charakteristischen Größen wie Gewicht und Bauraum im CAD System ist eine grobe Abschätzung des Potentials einer betriebsfesten Auslegung möglich. Abhängig vom zu Grunde liegenden Lastkollektiv und der gewünschten Ziellaufzeit lässt sich feststellen, dass die betriebsfeste Auslegung für die hier betrachteten Anwendungsfälle bis zu 50 % leichter und 20 – 30 % kürzer ausgeführt werden kann.

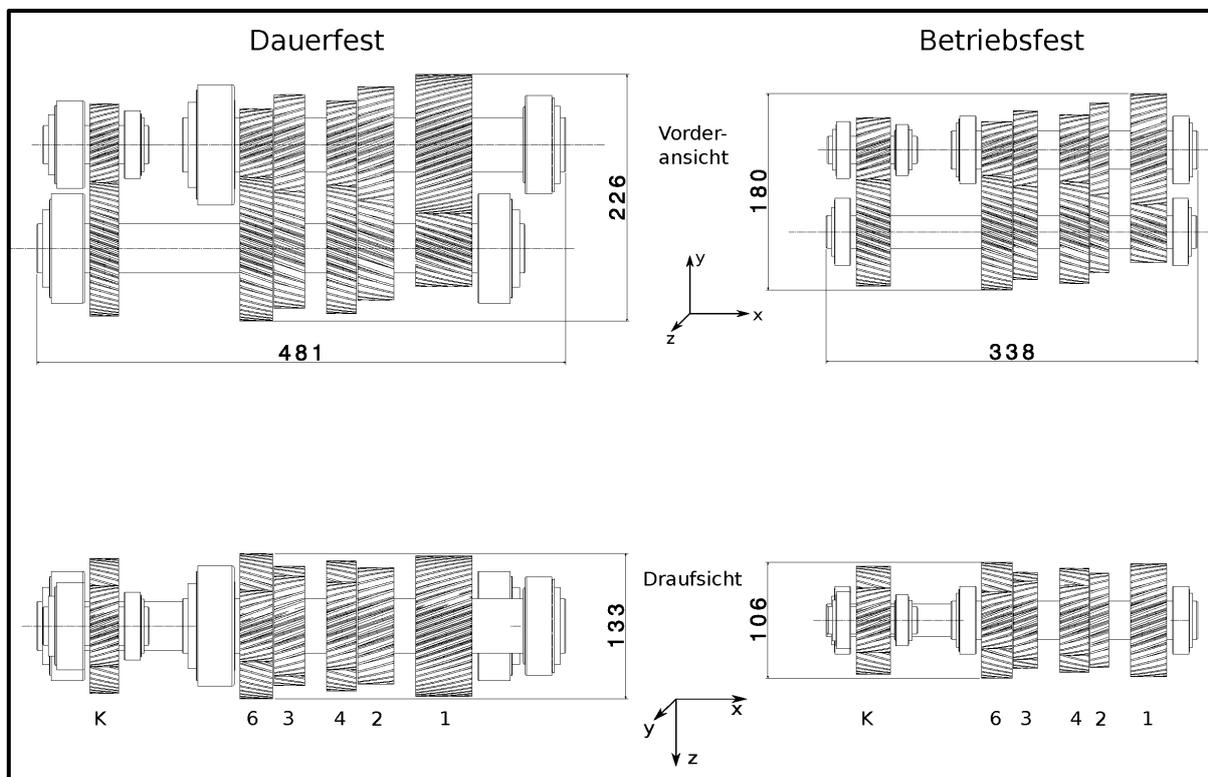


Bild 7.2: Vergleich von betriebsfester und dauerfester Auslegung am Beispiel eines Fahrzeuggetriebes [240]

Mit diesen Beispielen wurde das enorme Potential einer betriebsfesten Auslegung gegenüber einer dauerfesten Auslegung belegt. Vor allem für Anwendungsgebiete mit hohen Anforderungen an die Leistungsdichte und ausgeprägter Lastkollektivbelastung, wie etwa Fahrzeuggetriebe, ergeben sich oftmals deutliche Einsparpotentiale [110].

8 Diskussion und Bewertung des erweiterten Betriebsfestigkeitsmodells

Das gezeigte ganzheitliche Modell zur betriebsfesten Auslegung und Prüfung von Zahnradgetrieben unter Lastkollektivbelastung ermöglicht eine detaillierte Betrachtung des Getriebes und somit die theoretische Erreichung einer hohen Leistungsdichte. Um alle Vorteile des Ansatzes zu nutzen, ist sehr viel Wissen und Erfahrung erforderlich. Da viele der Eingabegrößen mit z.T. erheblichen Streuungen behaftet sind, kann auch das Ergebnis nur so exakt sein wie die Eingabegrößen. Einige der benötigten Eingabegrößen, wie etwa das Lastkollektiv oder die Wöhlerlinien unterliegen einer statistischen Verteilung mit z.T. erheblichen Streuungen. Nur wenn diese Streuungen bekannt und quantifizierbar sind, können sie auch im Rahmen des Auslegungsprozesses berücksichtigt werden.

Die Bestimmung eines maßgebenden Lastkollektivs stellt eine große Herausforderung dar, da dieses von vielen Einflussgrößen abhängig sein kann. Zunächst einmal muss geklärt werden, ob die auftretenden Lasten in irgendeiner Art und Weise begrenzt sind. Bei Fahrzeugen bildet beispielsweise die maximale Drehzahl sowie das maximale Drehmoment der Antriebsmaschine eine obere Grenze. Bei Windkraftgetrieben existiert solch eine obere Grenze nicht, da die auftretende Windgeschwindigkeit auch große Ausreißer aufweisen kann. Hier müssen beispielsweise konstruktive Elemente und umfangreiche Messsensorik installiert werden, um die auftretenden Lasten zu begrenzen. Für Industriegetriebe, welche als Baukastengetriebe verkauft werden und nicht kundenspezifisch, wird oftmals ein maximal zulässiges Drehmoment angegeben. Damit kann zwar eine obere Grenze der Belastung definiert werden, eine Verteilung der tatsächlich auftretenden Belastungen ist jedoch nicht bekannt. Das Getriebe könnte durchgehend im statischen Betriebszustand bei maximaler Last betrieben werden oder einer ausgeprägten Lastkollektivbelastung mit nur sehr wenigen (Über-)Lasten im Bereich der maximalen Last unterliegen. Für diesen Anwendungsfall müsste zwangsweise eine dauerfeste Auslegung erfolgen, um für alle Kunden eine ausreichende Betriebssicherheit gewährleisten zu können.

Bei der Ermittlung eines relevanten Lastkollektivs, sollte nicht außer Acht gelassen werden, welcher Typ von äußerer Belastung für welche Schadensart relevant ist. Während für die klassischen Ermüdungsschäden an Zahnrädern – Grübchen und Zahnfußbruch – das Drehmoment die maßgebende Berechnungsgröße ist, so ist dies hinsichtlich Fressen auch die Drehzahl sowie die Öltemperatur, bezüglich der Schädigung einer Kupplung könnte es hingegen die Häufigkeit der Betätigung sein. Alles in allem bleibt festzuhalten, dass die Bestimmung eines relevanten Lastkollektivs sehr viel Erfahrung und Wissen aus dem Feld erfordert. Zudem sollte die Methode zur Ermittlung des Lastkollektivs stets an die betrachteten Schadensarten angepasst sein.

Neben dem Lastkollektiv spielt auch die Vorgabe einer Festigkeitskennfunktion eine große Rolle für das gezeigte erweiterte Betriebsfestigkeitsmodell. Während der Dauerfestigkeitswert sowie die dazugehörige Standardabweichung für bekannte Zahnradstähle meist recht gut aus wenigen Versuchspunkten oder vergleichbaren Werkstoffen mit ähnlicher Wärme- und Oberflächenbehandlung abgeschätzt werden kann, unterliegt der Verlauf der Wöhlerlinie im Zeitfestigkeitsgebiet mitunter großen Streuungen. Diese können sowohl die Lage des Knickpunktes als auch die Wöhlerliniensteigung selbst betreffen. In der Regel, können diese Streuungen

jedoch im Rahmen von umfangreichen experimentellen Untersuchungen gut quantifiziert werden. Um diese Ergebnisse auf die praktische Anwendung übertragen zu können, muss im Rahmen der Qualitätssicherung jedoch sichergestellt werden, dass die Werkstoffqualitäten und Bearbeitungsverfahren im Produktionsprozess vergleichbar mit den geprüften Varianten sind.

Die entwickelte Methodik zur Korrekturermittlung bei Lastkollektivbelastung beruht maßgeblich auf den Ergebnissen der lokalen Schadensakkumulation, in welche das Lastkollektiv sowie die Festigkeitskennfunktion einfließen. Unterliegen diese starken Streuungen, so wird auch die ermittelte Korrektur nicht für alle Anwendungsfälle gute Tragfähigkeitskenngrößen liefern. Während ein zu großer Korrekturbetrag vor allem die Beanspruchungen in Zahnmitte moderat steigert, kann ein zu geringer Korrekturbetrag zu starken Pressungsüberhöhungen vor allem im Bereich des vor- und nachzeitigen Eingriffs führen. Liegen also große Unsicherheiten bei der Bestimmung des maßgebenden Lastkollektivs vor, so empfiehlt sich bei Lastkollektiven mit hoher Völligkeit unter Umständen eine Korrekturauslegung hinsichtlich der größten auftretenden Lasten bzw. hinsichtlich des meistschädigenden Lastniveaus.

Die vorgestellte Methodik zur Durchführung verkürzter Prüfungen von Getrieben unter Lastkollektivbelastung ermöglicht eine deutliche Verkürzung der Prüfzeit. Diese geht jedoch auch mit einem Informationsverlust einher. Soll von verkürzten Versuchen auf die Restlebensdauer der Bauteile geschlossen werden, so unterliegt diese gewissen Streuungen, welche bei der Beurteilung der Ergebnisse berücksichtigt werden müssen. Zudem zeigen die durchgeführten Lastkollektivversuche eine starke Abhängigkeit der Versuchsergebnisse von der Art der Lastaufbringung (Durchmischung und Reihenfolge). Um möglichst praxisnahe Ergebnisse zu erreichen, sollten diese Parameter folglich an den realen Gegebenheiten orientiert werden. Abhängig vom gewünschten Raffungsgrad ist dies nicht immer möglich.

Insgesamt zeigt sich, dass die hier vorgestellte Methode zur erweiterten Betriebsfestigkeitsrechnung gute Ergebnisse erzielen kann, wenn die Streuungen der Eingabegrößen bekannt sind. Liegen große Streuungen vor, welche nur schwer quantifizierbar sind, so sollte vor allem eine robuste Lösung gesucht werden und nicht diejenige mit der höchsten Leistungsdichte. Auch hierzu eignen sich die gezeigten Methoden. Im Auslegungsprozess sollten dabei die erwarteten Extrema der Eingabegrößen berücksichtigt werden.

9 Zusammenfassung und Ausblick

9.1 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein ganzheitlicher Ansatz zur erweiterten betriebsfesten Auslegung und Prüfung von Leistungsgetrieben vorgestellt, basierend auf früheren Arbeiten von Renius [193], FZG/Ziegler [257] und weiteren Arbeiten. Im Vordergrund stehen hierbei Betrachtungen bezüglich der Schadensarten Zahnfußbruch und Grübchen, welche bei Leistungsgetrieben häufig die maßgeblichen Ausfallmechanismen darstellen. Die theoretischen Betrachtungen zu betriebsfester Auslegung, zur Durchführung von verkürzten Lebensdauerexperimenten sowie zur Ermittlung von Verzahnungskorrekturen bei Lastkollektivbelastung werden um experimentelle Untersuchungen an Standardverspannungsprüfständen zur Ermittlung der Restlebensdauer von vorgeschädigten Komponenten sowie zur Ermittlung von Schadenssummen in Lastkollektivversuchen ergänzt. Basierend auf diesen Einzelkomponenten wurde ein ganzheitliches Vorgehensmodell abgeleitet.

Erweiterung der Lebensdauerberechnung bei Lastkollektivbelastung

Zunächst wurde ein erweitertes Modell zur Lebensdauerberechnung von Leistungsgetrieben unter Lastkollektivbelastung für die Schadensarten Zahnfußbruch und Grübchen vorgestellt. Neben der Ermittlung von Lastkollektiven wird auch ein neuer Ansatz zur Auswertung von experimentellen Untersuchungen zur Dauerfestigkeit gezeigt. Mit diesem Ansatz ist die zuverlässige Bestimmung des Dauerfestigkeitswertes für eine Ausfallwahrscheinlichkeit von 50 % auch bei wenigen Versuchspunkten möglich. Ergänzend werden umfangreiche Untersuchungen zur statistischen Verteilung der Dauerfestigkeitswerte für einsatzgehärtete Stähle gezeigt, welche eine robuste Umrechnung auf kleinere Ausfallwahrscheinlichkeiten ermöglichen. Basierend auf Lastkollektiv und Festigkeitskennfunktion werden anschließend die Grundlagen sowie Vorzüge einer globalen und lokalen Schadensakkumulation gezeigt und um die Schadensart Zahnflankenbruch erweitert. Damit ist eine detaillierte Auslegung der Verzahnungsmakrogeometrie sowie die Bestimmung von globalen und lokalen Schadenssummen sowie Zuverlässigkeitskennwerten möglich. Durch eine weitergehende Optimierung auf Basis einer ganzheitlichen Betrachtung ist eine deutliche Steigerung der Leistungsdichte möglich.

Experimentelle Untersuchungen

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden experimentelle Untersuchungen an FZG Standardverspannungsprüfständen durchgeführt. Zum einen wurden Lastkollektivversuche bei unterschiedlicher Durchmischung durchgeführt und zum anderen Referenzversuche zur Ermittlung der Restlebensdauer hinsichtlich der Schadensart Grübchen. Im Rahmen der Lastkollektivversuche wurde ein starker Einfluss der Durchmischung auf die erreichten Schadenssummen bis zum Ausfall durch Grübchenschäden festgestellt. Hieraus lässt sich das Erfordernis für die praktische Anwendung ableiten, dass die Betriebsbedingungen auf dem Prüfstand möglichst realitätsnah abgebildet werden. Zudem wurde bestätigt, dass die ermittelten Schadenssummen bis zum Ausfall logarithmisch normalverteilt sind.

Zur Ermittlung der Restlebensdauer von vorgeschädigten Zahnrädern hinsichtlich der Schadensart Grübchen wurden verschiedene zerstörende und zerstörungsfreie Werkstoffanalysemethoden untersucht. Für die unterschiedlichen Methoden wurde jeweils die Korrelation der ermittelten Kennwerte mit einer zunehmenden Ermüdung der Zahnflanke analysiert. Für viele Kennwerte zeigt sich eine eindeutige qualitative Tendenz. Die Ableitung von quantitativen

Kennwerten ist mitunter schwierig und mit großen Streuungen behaftet. Vielversprechende Ergebnisse lassen sich mit dem zerstörungsfrei agierenden 3MA-Messgerät erzielen. Damit war im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen eine zerstörungsfreie Charakterisierung des Schädigungsgrades der Zahnflanke möglich.

Durchführung von verkürzten Lebensdauerversuchen

Basierend auf den ermittelten Berechnungsergebnissen und Versuchsergebnissen wird eine Methodik zur Durchführung von verkürzten Lebensdauerversuchen abgeleitet. Die Notwendigkeit für verkürzte Versuche ergibt sich vor allem bei langen, geplanten Laufzeiten, welche aus wirtschaftlichen Gründen nicht in vollem Umfang durchgeführt werden können. Die gezeigte Methodik beruht zunächst auf einer vorangeschalteten Lastkollektivraffung unter Beibehaltung des maßgeblichen Schadensmechanismus. Basierend auf den so gerafften Lastkollektiven erfolgt eine statistische Versuchsplanung mit den Parametern Prüflosgröße und Prüfzeit. Basierend auf entsprechenden Maximalwerten, welche aus wirtschaftlichen Überlegungen abgeleitet werden, kann eine optimale Kombination bestimmt werden, welche zu einer möglichst hohen Aussagesicherheit führt. Die entwickelte Methodik zur Auswertung der anschließend durchgeführten Versuche beruht zum einen auf einer statistischen Analyse und zum anderen auf einer Werkstoffanalyse. Aus der Werkstoffanalyse können Restlebensdauern der betrachteten Komponenten gewonnen werden und aus der statistischen Analyse Zuverlässigkeitskenngrößen.

Auslegung von Verzahnungskorrekturen bei Lastkollektivbelastung

Zur Bestimmung der Verzahnungsmikrogeometrie wird im Rahmen dieser Arbeit eine Methodik zur Auslegung von Verzahnungskorrekturen bei Lastkollektivbelastung vorgestellt. Diese beruht auf einer vollständigen Analyse des Verzahnungsumfeldes inklusive Wellen und Lager. Durch eine lokale Schadensakkumulation werden mit Hilfe des Programmsystems RIKOR gewichtete Korrekturen für jede Laststufe des Lastkollektivs ermittelt, welche letztlich zu einer Gesamtkorrektur zusammengesetzt werden. Durch Kreuzeinflüsse ergibt sich die Notwendigkeit eines iterativen Vorgehens an dessen Ende eine optimierte Verzahnungskorrektur in Matrixform steht, welche zu einer möglichst gleichmäßigen Werkstoffausnutzung führt. Ziel der Korrekturauslegung ist es, dass alle Zahnflankenbereiche zeitgleich ausfallen. Durch die Implementierung in das Programmsystem RIKOR findet dieser Prozess vollautomatisiert und somit äußerst anwenderfreundlich statt.

Basierend auf all diesen Einzelschritten wurde ein ganzheitliches Modell zur betriebsfesten Auslegung und Prüfung von Zahnradgetrieben abgeleitet und diskutiert. Dieses erweiterte Betriebsfestigkeitsmodell liefert einen wertvollen Beitrag zur gesamtheitlichen Analyse und Synthese von Getriebesystemen im Entwicklungsprozess. Durch korrekte Anwendung der gezeigten Methoden und Berechnungsmodelle kann eine deutliche Zunahme der Leistungsdichte von Zahnradgetrieben, eine merkbare Reduktion der Time-to-market sowie eine erhebliche Steigerung der Zuverlässigkeit erzielt werden.

9.2 Ausblick

Die Unsicherheiten der gezeigten Methodik beruhen maßgebend auf auftretenden Streuungen bei der Ermittlung von Lastkollektiven und Festigkeitskennfunktionen sowie auf bislang begrenztem Wissen zu zulässigen Schadenssummen oder zum Werkstoffverhalten bei Ermüdung. Zukünftige Arbeiten sollten sich demnach darauf fokussieren, diese Punkte einzeln zu untersuchen. Das hier gezeigte Vorgehensmodell kann einzelne Themen nur anschnitten, jedoch keinen vollständigen Lösungsansatz liefern. Es wurde versucht, den Stand der Technik so weit möglich und sinnvoll darzustellen. Offene Punkte werden wo möglich erwähnt und auf die Unsicherheiten verwiesen.

Während normierte Lastkollektive für manche Anwendungen (z.B. landwirtschaftliche Traktoren, Windkraftanlagen) z.T. bereits seit längerer Zeit bekannt sind und angewendet werden, ist dies für viele andere Anwendungsgebiete noch nicht der Fall. Hier ergeben sich durch die zunehmende Ausrüstung von Maschinen und Antrieben mit elektrischen Sensoren im Zuge der Industrie 4.0 neue Möglichkeiten. Denkt man beispielsweise an die Verwendung von Drehmomentsensoren in Getrieben, so können Lastkollektive aufgezeichnet oder sogar eine Online-Schadensakkumulation durchgeführt werden. Damit würden sich Wartungen oder anstehende Austauscharbeiten bedarfsgerecht planen lassen. Diese Möglichkeit könnte auch vorhandene Unsicherheiten bei der Auslegung von Getrieben kompensieren, wenn das bzw. die zu Grunde liegenden Lastkollektive sehr starken Streuungen unterliegen.

Durch steigende Werkstoffqualitäten und zunehmende Prozesssicherheiten bei Wärme- und Oberflächenbehandlungsmethoden werden langfristig auch die Streuungen der Festigkeitskennfunktionen abnehmen bzw. besser vorhersagbar sein. Dadurch wird eine exaktere und vor allem zuverlässigere Ermittlung der Lebensdauer möglich werden.

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten experimentellen Untersuchungen belegen ein großes Potenzial einiger Analysemethoden zur Charakterisierung der Restlebensdauer von Zahnrädern hinsichtlich Flankenermüdung. Diese Untersuchungen sollten intensiviert werden und auch auf die Zahnfußermüdung ausgedehnt werden. Eine mobile Anwendung der Analysemethoden könnte zu einer erweiterten Vorhersage der Restlebensdauer auch in der praktischen Anwendung führen. Die durchgeführten Lastkollektivuntersuchungen belegen deutliche Unterschiede der ermittelten Schadenssummen in Abhängigkeit der Durchmischung und bestätigen damit bisherige Erkenntnisse. Insgesamt fehlen allerdings weitere systematische Prüfstandsuntersuchungen zum Einfluss der Lastkollektivbelastung auf die Zahnradtragfähigkeit, welche ein tiefergehendes Verständnis der zu Grunde liegenden Gesetzmäßigkeiten erlauben. Vor allem in Kombination mit den Möglichkeiten zur Ermittlung des Schädigungsgrades wäre auch eine weitergehende Überprüfung der Anwendbarkeit der linearen Schadensakkumulationshypothesen interessant.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Methodik die Grundlagen zur systematischen Auslegung und Prüfung von Lastkollektiven unter Lastkollektivbelastung basierend auf dem aktuellen Stand der Technik darstellt und erweitert. Kurzfristig gesehen wird die Erfordernis experimenteller Untersuchungen zur Bestätigung der Betriebsfestigkeit von Leistungsgetrieben nicht entfallen können. Werden offene Probleme jedoch zunehmend geklärt und weitere Erkenntnisse gewonnen, so wird langfristig wohl eine zuverlässige betriebsfeste Auslegung von Zahnradgetrieben sowie eine Aussage zur Restlebensdauer mit deutlich reduziertem experimentellen Untersuchungsumfang möglich sein.

10 Literatur

10.1 Normen und Richtlinien

- [1] ISO/TS 6336-20:2017-11: Calculation of load capacity of spur and helical gears - Part 20: Calculation of scuffing load capacity (also applicable to bevel and hypoid gears) - Flash temperature method (2017).
- [2] ISO/TS 6336-21:2017-11: Calculation of load capacity of spur and helical gears -- Part 21: Calculation of scuffing load capacity (also applicable to bevel and hypoid gears) -- Integral temperature method (2017).
- [3] ANSI/AGMA 2001-D04:Dezember 2004: Fundamental Rating Factors and Calculation Methods for Involute Spur and Helical Gear Teeth (2004).
- [4] ANSI/AGMA 2101-D04:Dezember 2004: Fundamental Rating Factors and Calculation Methods for Involute Spur and Helical Gear Teeth (2004).
- [5] ANSI/AGMA 6006-Bxx:2017-08: Standard for Design and Specification of Gearboxes for Wind Turbines - Draft (2017).
- [6] ANSI/AGMA/AWEA 6006-A03:2003: Standard for Design and Specification of Gearboxes for Wind Turbines (2003).
- [7] DIN 3962 Teil 1:1978-08: Toleranzen für Stirnradverzahnungen Toleranzen für Abweichungen einzelner Bestimmungsgrößen (1978).
- [8] DIN 3962 Teil 2:1978-08: Toleranzen für Stirnradverzahnung Toleranzen für Flankenlinienabweichungen (1978).
- [9] DIN 3962 Teil 3:1978-08: Toleranzen für Stirnradverzahnungen Toleranzen für Teilungsspannenabweichungen (1978).
- [10] DIN 3990 Teil 11:Februar 1989: Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern Anwendungsnorm für Industriegetriebe Detail-Methode (1989).
- [11] DIN 3990 Teil 21:Februar 1989: Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern Anwendungsnorm für Schnellaufgetriebe und Getriebe ähnlicher Anforderungen (1989).
- [12] DIN 3990 Teil 31:Juli 1990: Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern Anwendungsnorm für Schiffsgetriebe (1990).
- [13] DIN 3990 Teil 41:Mai 1990: Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern Anwendungsnorm für Fahrzeuggetriebe (1990).
- [14] DIN 3990-1:Dezember 1987: Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern Einführung und allgemeine Einflußfaktoren (1987).
- [15] DIN 3990-2:1987-12: Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern - Berechnung der Grübchentragfähigkeit (1987).
- [16] DIN 3990-3:Dezember 1987: Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern Berechnung der Zahnfußtragfähigkeit (1987).
- [17] DIN 3990-4:1987-12: Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern Berechnung der Freßtragfähigkeit (1987).

-
- [18] DIN 3990-5:Dezember 1987: Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern Dauerfestigkeitswerte und Werkstoffqualitäten (1987).
- [19] DIN 3990-6:Dezember 1994: Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern Teil 6: Betriebsfestigkeitsberechnung (1994).
- [20] DIN 45667:Oktober 1969: Klassierverfahren für das Erfassen regelloser Schwingungen (1969).
- [21] DIN 50100:Februar 1978: Dauerschwingversuch- Begriffe, Zeichen, Durchführung, Auswertung (1978).
- [22] DIN 50100:2016-12: Schwingfestigkeitsversuch – Durchführung und Auswertung von zyklischen Versuchen mit konstanter Lastamplitude für metallische Werkstoffproben und Bauteile (2016).
- [23] DIN 51354 Teil 2:April 1990: Prüfung von Schmierstoffen FZG-Zahnrad-Verpannungs-Prüfmaschine Prüfverfahren A/8,3/90 für Schmieröle (1990).
- [24] DIN 743-1:Dezember 2012: Tragfähigkeitsberechnung von Wellen und Achsen – Teil 1: Grundlagen (2012).
- [25] DIN 743-2:Dezember 2012: Tragfähigkeitsberechnung von Wellen und Achsen – Teil 2: Formzahlen und Kerbwirkungszahlen (2012).
- [26] DIN 743-3:Dezember 2012: Tragfähigkeitsberechnung von Wellen und Achsen – Teil 3: Werkstoff-Festigkeitswerte (2012).
- [27] DIN 743-4:Dezember 2012: Tragfähigkeitsberechnung von Wellen und Achsen – Teil 4: Zeitfestigkeit, Dauerfestigkeit – Schädigungsäquivalente Spannungsamplitude (2012).
- [28] DIN EN 10084:Juni 2008: Einsatzstähle – Technische Lieferbedingungen (2008).
- [29] DIN ISO 14635-1:2006-05: Zahnräder – FZG-Prüfverfahren – Teil 1: FZG-Prüfverfahren A/8,3/90 zur Bestimmung der relativen Fresstragfähigkeit von Schmierölen (2006).
- [30] DIN ISO 281:2010-10: Wälzlager – Dynamische Tragzahlen und nominelle Lebensdauer (2010).
- [31] DIN ISO 76:Januar 2009: Wälzlager – Statische Tragzahlen (2009).
- [32] FKM Richtlinie:2001: Bruchmechanischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile (2001).
- [33] ISO 281:2007-02: Rolling bearings - Dynamic load ratings and rating life (2007).
- [34] ISO 6336-1:2006-09: Calculation of load capacity of spur and helical gears — Part 1: Basic principles, introduction and general influence factors (2006).
- [35] ISO 6336-2:2006-09: Calculation of load capacity of spur and helical gears — Part 2: Calculation of surface durability (pitting) (2006).
- [36] ISO 6336-3:2006-09: Calculation of load capacity of spur and helical gears — Part 3: Calculation of tooth bending strength (2006).
- [37] ISO 6336-5:2016-08: Calculation of load capacity of spur and helical gears — Part 5: Strength and quality of materials (2016).

- [38] ISO 6336-6:2006-08: Calculation of load capacity of spur and helical gears — Part 6: Calculation of service life under variable load (2006).
- [39] ISO/DTS 6336-4:draft 2018: Calculation of load capacity of spur and helical gears - Calculation of tooth flank fracture load capacity (draft 2018).
- [40] ISO/TR 13989-1:03/2000: Calculation of scuffing load capacity of cylindrical, bevel and hypoid gears — Part 1: Flash temperature method (2000).
- [41] ISO/TR 15144-1:2014: Calculation of micropitting load capacity of cylindrical spur and helical gears - Part 1: Introduction and basic principles (2014).
- [42] VDI 4008 Blatt 2: Mai 1998: Boolesches Modell (1998).

10.2 Zeitschriftenaufsätze, Bücher, Dissertationen, Studienarbeiten

- [43] Al, B. C.; Langlois, P.: Analysis of Tooth Interior Fatigue Fracture Using Boundary Conditions from an Efficient and Accurate LTCA. Gear Solutions 2016. Heft 02 (2016).
- [44] Al, B. C.; Patel, R.; Langlois, P.: Comparison of Tooth Interior Fatigue Fracture Load Capacity to Standardized Gear Failure Modes. 2016 Fall Technical Meeting (FTM), Pittsburgh, USA. American Gear Manufacturers Association (2016).
- [45] Al, B. C.; Patel, R.; Langlois, P.: Finite Element Analysis of Tooth Flank Fracture Using Boundary Conditions from LTCA. Gear Technology 2016. Heft 09/10, S. 62–68 (2016).
- [46] Annast, R.: Kegelrad-Flankenbruch. Dissertation, Technische Universität München.
- [47] Antoniadou, I.; Manson, G.; Staszewski, W. J.; Barszcz, T.; Worden, K.: A time–frequency analysis approach for condition monitoring of a wind turbine gearbox under varying load conditions. Mechanical Systems and Signal Processing 64-65, S. 188–216, DOI:10.1016/j.ymssp.2015.03.003 (2015).
- [48] Bader, M.: Beitrag zur Charakterisierung der Wälzbeanspruchung von Gradientenschichten - Am Beispiel von Nitrierschichten. Dissertation, TU Bergakademie Freiberg (2002).
- [49] Bauer, E.: Beispiele für Verzahnungsschäden, ausgehend von innenliegenden Fehlstellen - Antriebstechnik. Allianz Report 6 (1995).
- [50] Bauer, E.: Windenergieanlagen- Schadenbetrachtung. Allianz Report. Heft 2 (2001).
- [51] Bauer, E.; Böhl, A.: Flank Breakage on Gears for Energy Systems. Gear Technology 28. Heft 8, S. 36–42 (2011).
- [52] Bauer, E.; Wikidal, F.: Verfrühte Ausfälle von Verzahnungen und Wälzlagerungen. Allianz Report, S. 2–6 (2004).
- [53] Bayes: An Essay towards solving a Problem in the Doctrine of Chances. Philosophical Transactions of the Royal Society of London 53, S. 370–418 (1763).
- [54] Beck, M.: Auslegung und Konstruktion eines Fahrradgetriebes für den Geländeeinsatz. Bachelorarbeit, Technische Universität München (2016).
- [55] Beermann, S.: Reliability, Lifetime and Safety Factors - 17FTM12. 2017 Fall Technical Meeting (FTM), Columbus, USA. American Gear Manufacturers Association (2017).

- [56] Berger, C.; Eulitz, K.-G.; Heuler, P.; Kotte, K.-L.; Naundorf, H.; Schuetz, W.; Sonsino, C. M.; Wimmer, A., Zenner, H.: Betriebsfestigkeit in Germany — an overview. *International Journal of Fatigue* 24. Heft 6, S. 603–25, DOI:10.1016/S0142-1123(01)00180-3 (2002).
- [57] Bertsche, B.; Lechner, G.: *Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau - Ermittlung von Bauteil- und System-Zuverlässigkeiten*. Springer: Berlin [u.a.], 3. Auflage (2004).
- [58] Bonnen, J.J.F.; Topper, T.H.: The effect of bending overloads on torsional fatigue in normalized 1045 steel. *International Journal of Fatigue* 21. Heft 1, S. 23–33, DOI:10.1016/S0142-1123(98)00054-1 (1999).
- [59] Brecher, C.; Löpenhaus, C.; Goergen, F.; Mevissen, D.: Crack Propagation Analysis of Pitting Damages of High-Strength Material Systems in Gear Applications. *International Conference on Gears 2017 - VDI-Bericht 2294*, Garching. VDI - Verein Deutscher Ingenieure (2017).
- [60] Brecher, C.; Löpenhaus, C.; Goergen, F.; Mevissen, D.: Erweiterte Schadensanalyse von Grübchenausbrüchen an einsatzgehärteten Zahnrädern. *Forschung im Ingenieurwesen* 81. Heft 2-3, S. 221–32, DOI:10.1007/s10010-017-0243-z (2017).
- [61] Bronštejn, I. N.; Semendjaev, K. A.; Musiol, G.; Mühlig, H.: *Taschenbuch der Mathematik*. Europa-Lehrmittel: Haan-Gruiten, 9., korr. Aufl. (2013).
- [62] Bruckmeier, S.: *Flankenbruch bei Stirnradgetrieben*. Dissertation, Technische Universität München.
- [63] Buck, G.: Eine Berechnungsmethode für die lebensdauerorientierte Dimensionierung von Schleppertriebwerken und Achsen. *Grundlagen der Landtechnik* 33. Heft 5, S. 138–48 (1983).
- [64] Bühler, H.; Schreiber, W.: Lösen einer Aufgabe der Dauerschwingfestigkeit mit dem Treppenstufen-Verfahren. *Archiv für da Eisenhüttenwesen* 28. Heft 3 (1957).
- [65] Buß, A.: *Betriebslastenermittlung sowie betriebsfeste Auslegung am Beispiel eines Fahrradgetriebes*. Semesterarbeit, Technische Universität München (2016).
- [66] Coenenberg, H.-H.: Drehmomentschwingungen in Kupplungen von Schleppern und Maschinen. *Grundlagen der Landtechnik*. Heft 13, S. 44–53 (1961).
- [67] Coenenberg, H.-H.: *Zum Verhalten der Kupplung im Schleppertriebwerk*. Dissertation, TH Braunschweig (1962).
- [68] Corten, H. T.; Dolan, T. J.: Cumulative Fatigue Damage. *Proceedings of the International Conference on Fatigue of Metals*, S. 235–46 (1956).
- [69] Curà, F.: ISO Standard based method for calculating the in-operation application factor KA in gears subjected to variable working conditions. *International Journal of Fatigue* 91, S. 459–65, DOI:10.1016/j.ijfatigue.2015.11.014 (2016).
- [70] Curà, F.: Method for Calculating the Application Factor KA in Gears Subjected to Variable Working Conditions. *Procedia Engineering* 101, S. 109–16, DOI:10.1016/j.pro-eng.2015.02.015 (2015).
- [71] Dąbrowski, D.; Natarajan, A.: Assessment of Gearbox Operational Loads and Reliability under High Mean Wind Speeds. *Energy Procedia* 80, S. 38–46, DOI:10.1016/j.egypro.2015.11.404 (2015).

- [72] Dietrich, M.: Konzeption und Konstruktion einer Prüfvorrichtung für resistometrische Messungen an Zahnrädern. Bachelor's Thesis: Lehrstuhl für Maschinenelemente, TU München (2013).
- [73] Dlugosch, A.; Küçükay, F.: Effiziente Getriebeerprobung mit repräsentativen Lastkollektiven - VDI-Berichte Nr. 1827 (2004).
- [74] Döbereiner, R.: Tragfähigkeit von Hochverzahnungen geringer Schwingungsanregung. Dissertation, Technische Universität München (1998).
- [75] Dowson, D.; Higginson, G. R.: Elasto-hydrodynamic lubrication. Pergamon Press: Oxford [England], New York, SI ed. (1977).
- [76] Dreher, W. F.: Focused Ion Beam FIB: Reutlingen.
- [77] Eberspächer, C.: Einflüsse auf die Grübchentragfähigkeit einsatzgehärteter Zahnräder bis in das höchste Zeitfestigkeitsgebiet. Dissertation, Technische Universität München.
- [78] Eberspächer, C.; Höhn, B.-R.: FVA-Nr. 125/ III- Heft 457- Zahnflankenlebensdauer Abschlussbericht - Untersuchungen zur nicht-linearen Schädigung bei der Grübchenbildung an Zahnflanken. Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (1995).
- [79] Eckardt, T.: Vergleich von betriebsfester und dauerfester Auslegung von Stirnradgetrieben. Bachelorarbeit: Lehrstuhl für Maschinenelemente, TU München (2015).
- [80] Elstorpff, M.-G.: Einflüsse auf die Grübchentragfähigkeit einsatzgehärteter Zahnräder bis in das höchste Zeitfestigkeitsgebiet. Dissertation, Technische Universität München (1993).
- [81] Emmert, S.; Schönnenbeck, G.: FVA-Arbeitsblatt Nr. 54/6 Graufleckigkeit - Praktische Nachrechnung gegen Graufleckigkeit. Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (1993).
- [82] Emmert, S.; Schönnenbeck, G.; Oster, P.; Rettig, H.; Höhn, B.-R.: Informationsblatt 54/7 Graufleckigkeit - Testverfahren zur Untersuchung des Schmierstoffeinflusses auf die Entstehung von Grauflecken bei Zahnrädern (1993).
- [83] Felbermaier, M.: IGF Nr. 16088, FVA-Nr. 459 II- Heft 1087- Grauflecken – Grübchen II Abschlussbericht - Einfluss der Graufleckigkeit auf die Grübchentragfähigkeit einsatzgehärteter Zahnräder im Zeit- und Dauerfestigkeitsbereich. Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V.: Frankfurt/Main (2014).
- [84] Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V.: FVA-Nr. 131/IV- FVA-Richtlinie- Richtlinie Zählverfahren - Zählverfahren zur Bildung von Kollektiven und Matrizen aus Zeitfunktionen (2010).
- [85] Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V.: FVA-Richtlinie: Tragfähigkeitsberechnung von Wellen und Achsen Ergänzung zu DIN 743 (2004).
- [86] Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V.: Merkblatt FVA-Nr. 0/5 Vereinheitlichung von Flankentragfähigkeitsversuchen - Empfehlung zur Vereinheitlichung von Flankentragfähigkeitsversuchen an vergüteten und gehärteten Zylinderrädern (1999).

- [87] Foulard, S.; Ichchou, M.; Rinderknecht, S.; Perret-Liaudet, J.: Online and real-time monitoring system for remaining service life estimation of automotive transmissions – Application to a manual transmission. *Mechatronics* 30, S. 140–57, DOI:10.1016/j.mechatronics.2015.06.013 (2015).
- [88] Foulard, S.; Rinderknecht, S.; Fietzek, R.: Leichtbau von Fahrzeuggetrieben durch Online- und Echtzeit-Lebensdauerüberwachung. *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 118. Heft 3, S. 74–79, DOI:10.1007/s35148-015-0207-2 (2016).
- [89] Foulard, S.; Rinderknecht, S.; Ichchou, M.: Real-time and on-line lifetime monitoring system for automotive transmissions Application to a manual transmission. The 14th IFToMM World Congress, Taipei, Taiwan. IFToMM World Congress, DOI:10.6567/IFToMM.14TH.WC.OS6.005 (2015).
- [90] Frank, J.; Kimmelman, M.; Bertsche, B.: Methodik zur Auswahl von Raffungsmodellen für beschleunigte Versuche - Methodical Approach for the Selection of Models for Accelerated tests. *Konstruktion*. Heft 11/12, S. 86–90 (2015).
- [91] Fröh, A.; Otto, M.; Höhn, B.-R.: FVA-Nr. 241/VIII- Heft 973- Erweiterung STplus Benutzeranleitung - Erweiterung FVA-Stirradprogramm STplus. Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (2011).
- [92] Fromberger, M.; Weinberger, U.; Kohn, B.; Utakapan, T.; Otto, M.; Stahl, K.: Condition Monitoring by Position Encoders. *Inter.noise 2016*, Hamburg. DEGA (2016).
- [93] Gao, H.; Huang, H.-Z.; Lv, Z.; Zuo, F.-J.; Wang, H.-K.: An improved Corten-Dolan's model based on damage and stress state effects. *Journal of Mechanical Science and Technology* 29. Heft 8, S. 3215–23, DOI:10.1007/s12206-015-0721-x (2015).
- [94] Gao, H.; Huang, H.-Z.; Zhu, S.-P.; Li, Y.-F.; Yuan, R.: A modified nonlinear damage accumulation model for fatigue life prediction considering load interaction effects. *TheScientificWorldJournal* 2014, S. 164378, DOI:10.1155/2014/164378 (2014).
- [95] Gaßner, E.: Lueger, Lexikon der Technik, Band Fahrzeugtechnik - Begriffsbestimmungen der Betriebsfestigkeit. Deutsche Verlagsanstalt Stuttgart: Stuttgart (1967).
- [96] Geitner, M.: Erweiterte Zuverlässigkeitsbetrachtung für Zahnradschäden. Masterarbeit, Technische Universität München (2017).
- [97] Geitner, M.: Statistische Auswertung von verkürzten Lebensdaueruntersuchungen. Bachelorarbeit: Lehrstuhl für Maschinenelemente, TU München (2014).
- [98] Gerlach, A.: Über die Kräfte in Zahnradgetrieben von Schleppern. *Grundlagen der Landtechnik*. Heft 7, S. 107–10 (1956).
- [99] Ghribi, D.; Octrue, M.: Some theoretical and simulation results on the study of the tooth flank. *International Gear Conference*, Lyon Villeurbanne, France. Woodhead Publishing (2014).
- [100] Ghribi, D.; Octrue, M.; Sainsot, P.: Comparative study of the tooth flank fracture in cylindrical gears - Efficient method to assess the risk of the tooth flank fracture on the cylindrical gears. *International Conference on Gears 2015 - VDI-Bericht 2255*. VDI - Verein Deutscher Ingenieure (2015).

- [101] Graham, J. A.; Berns, D. K.; Olberts, a. D. R.: Cumulative Damage Used to Analyze Tractor Final Drives. Transactions of the ASAE 5. Heft 2, S. 139–46, DOI:10.13031/2013.40960 (1962).
- [102] Groß, H.: Bedeutung und Ermittlung von Betriebsfaktoren für die Auslegung von Leistungstriebwerken. Konstruktion 28. Heft 3, S. 85–89 (1976).
- [103] Haibach, E.: Betriebsfestigkeit - Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung. Springer: Berlin [u.a.], 3. Auflage (2006).
- [104] Hailing, T.; Rui, B.; Jianyu, Z.; Xiaoling, Z.; Binjun, F.: Influence of Low Load Truncation Level on Crack Growth for Al 2324-T39 and Al 7050-T7451. Chinese Journal of Aeronautics 22. Heft 4, S. 401–06, DOI:10.1016/S1000-9361(08)60117-X (2009).
- [105] Haslinger, K.: Untersuchungen zur Grübchentrugfähigkeit profilkorrigierter Zahnräder. Dissertation, Technische Universität München (1991).
- [106] Hein, M.; Fingerle, A.; Tobie, T.; Otto, M.; Stahl, K.: FVA-Nr. 722 I - Heft 1309 - RIKOR Lastkollektiv Abschlussbericht - Auslegung von Verzahnungskorrekturen bei Lastkollektiven. Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V.: Frankfurt/Main (2018).
- [107] Hein, M.; Geitner, M.; Tobie, T.; Stahl, K.; Pinnekamp, B.: Reliability of Gears – Determination of Statistically Validated Material Strength Numbers - 18FTM26. 2018 Fall Technical Meeting (FTM), Chicago, USA. American Gear Manufacturers Association (2018).
- [108] Hein, M.; Kunze, C.; Lee, J.-K.; Tobie, T.; Stahl, K.: Customer-focused modular test procedure for driveline components. Getriebe in Fahrzeugen 2017 - VDI-Bericht 2313, Bonn. VDI - Verein Deutscher Ingenieure (2017).
- [109] Hein, M.; Tobie, T.; Stahl, K.: Calculation of tooth flank fracture load capacity – Practical applicability and main influence parameters - 17FTM21. 2017 Fall Technical Meeting (FTM), Columbus, USA. American Gear Manufacturers Association (2017).
- [110] Hein, M.; Tobie, T.; Stahl, K.: Holistic approach for fatigue life design of vehicle transmissions. Dritev 2018 - Drivetrain for Vehicles - VDI-Berichte 2328, Bonn. VDI - Verein Deutscher Ingenieure (2018).
- [111] Hein, M.; Tobie, T.; Stahl, K.: IGF Nr. 17347, FVA-Nr. 554 II - Heft 1178 - Systemlebensdauerprüfung II Abschlussbericht - Verkürztes Testverfahren für Getriebe und Antriebselemente zur Bestätigung der Betriebsfestigkeit der Bauteile. Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V.: Frankfurt/Main (2016).
- [112] Hein, M.; Tobie, T.; Stahl, K.: IGF Nr. 17347, FVA-Nr. 554 II - Systemlebensdauerprüfung II Informationsblatt - Verkürztes Testverfahren für Getriebe und Antriebselemente zur Bestätigung der Betriebsfestigkeit der Bauteile. Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V.: Frankfurt/Main (2016).
- [113] Hein, M.; Tobie, T.; Stahl, K.: Parameter study on the calculated risk of tooth flank fracture of case hardened gears. Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing 11. Heft 6, DOI:10.1299/jamdsm.2017jamdsm0074 (2017).
- [114] Hein, M.; Tobie, T.; Stahl, K.: Test method for time-scaled fatigue tests of gear transmission systems. Forschung im Ingenieurwesen 81. Heft 2-3, S. 291–97, DOI:10.1007/s10010-017-0226-0 (2017).

- [115] Henning, H.-J.; Wilrich, P.-T.; Graf; Stange: Formeln und Tabellen der angewandten mathematischen Statistik. Springer: Berlin Heidelberg New York, 3. Auflage (1987).
- [116] Hertter, T.: Rechnerischer Festigkeitsnachweis der Ermüdungstragfähigkeit vergüteter und einatzgehärteter Stirnräder. Dissertation, Technische Universität München (2003).
- [117] Heuler, P.; Klatschke, H.: Generation and use of standardised load spectra and load-time histories. *International Journal of Fatigue* 27. Heft 8, S. 974–90, DOI:10.1016/j.ijfatigue.2004.09.012 (2005).
- [118] Heuler, P.; Seeger, T.: A criterion for omission of variable amplitude loading histories. *International Journal of Fatigue* 8. Heft 4, S. 225–30, DOI:10.1016/0142-1123(86)90025-3 (1986).
- [119] Hildebrand, L.: Vergleich von betriebsfester und dauerfester Auslegung am Beispiel eines Motorradgetriebes. Semesterarbeit, Technische Universität München (2015).
- [120] Hinkelmann, K.: FVA-Nr. 485/II- Heft 943- Lebensdauerberechnung von Komponenten II Abschlussbericht - Geführte Lebensdauerberechnung für Komponenten der Antriebstechnik in Form eines digitalen Leitfadens. Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (2010).
- [121] Hitziger, T.: Übertragbarkeit von Vorkenntnissen bei der Zuverlässigkeitstestplanung. Dissertation, Universität Stuttgart (2007).
- [122] Höhn, B.-R.; Oster, P.; Michaelis, K.; Suchandt, T.; Stahl, K.: Zahnfuß-Betriebsfestigkeitsuntersuchungen an einatzgehärteten Zahnrädern. Teil I: Versuchsbedingungen. *antriebstechnik* 40. Heft 8, S. 37–40 (2001).
- [123] Höhn, B.-R.; Oster, P.; Michaelis, K.; Suchandt, T.; Stahl, K.: Zahnfuß-Betriebsfestigkeitsuntersuchungen an einatzgehärteten Zahnrädern. Teil II: Versuchsergebnisse. *antriebstechnik* 40. Heft 9, S. 65–70 (2001).
- [124] Höhn, B.-R.; Oster, P.; Tobie, T.; Schwienbacher, S.; Koller, P.: Indicating Grinding Burn on Gears – Comparison and Evaluation of Different Testing Methods. 7th International Conference on Barkhausen Noise and Micromagnetic Testing, Aachen, S. 43–52 (2009).
- [125] Homola, P.; Růžek, R.; Běhal, J.: Effect of Loading Spectrum Clipping and Truncation on Fatigue Crack Growth Behavior of 7475-T7351 Aluminum Alloy under Variable Amplitude Loading. *Procedia Engineering* 101, S. 203–10, DOI:10.1016/j.proeng.2015.02.027 (2015).
- [126] Hösel, T.; Goebbelet, J.: Empfehlung zur Vereinheitlichung von Flankentragfähigkeitsversuchen an vergüteten und gehärteten Zylinderrädern. FVA-Merkblatt Nr. 0/5 (1979).
- [127] Hösel, T.; Joachim, F.: Zahnflankenwälzfestigkeit unter Berücksichtigung der Ausfallwahrscheinlichkeit. *antriebstechnik* 17. Heft 12, S. 533–37 (1978).
- [128] Hösel, T.; Käser, W.: Einfluß der Einsatzhärtungstiefe auf die Flankentragfähigkeit von Zahnrädern. *antriebstechnik* 17. Heft 3, S. 105–08 (1978).
- [129] Hück, M.: Ein verbessertes Verfahren für die Auswertung von Treppenstufenversuchen. *Zeitschrift für Werkstofftechnik* 14, S. 406–17 (1983).

- [130] Igba, J.; Alemzadeh, K.; Durugbo, C.; Henningsen, K.: Performance assessment of wind turbine gearboxes using in-service data - Current approaches and future trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 50, S. 144–59, DOI:10.1016/j.rser.2015.04.139 (2015).
- [131] Inacker, O.; Beckmann, P.; Oster, P.: FVA-Nr. 289/I+II- Heft 595 Triboschutzschichtcharakterisierung Abschlussbericht - Untersuchungen zur Bildung, Charakterisierung und Wirkungsweise von Triboschutzschichten. Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V.: Frankfurt/Main (2000).
- [132] Inacker, O.; Beckmann, P.; Oster, P.: IGF Nr. 8103, FVA-Nr. 186/ I- Heft 438- Wasserstoffabsorption - Veränderungen der Grenzflächen einsatzgehärteter Zahnräder durch Wasserstoffschäden. Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V.: Frankfurt/Main (1994).
- [133] Inacker, O.; Beckmann, P.; Oster, P.; Radev, T.: FVA-Nr. 289/Ib+IIb- Heft 733- Triboschutzschichten II Abschlussbericht - Zusammenhänge zwischen Zahnrad- und Wälzlagerschäden und tribologischen Veränderungen des oberflächennahen Werkstoffbereichs. Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V.: Frankfurt/Main (2004).
- [134] Ismail, A.; Jung, W.; Liu, Q.; Che Ghani, S. A.; Alias, A.; Mamat, R.; Rahman, M. M.: Accelerated Life Test Design for Tractor Powertrain Front Axle. *MATEC Web of Conferences* 74, S. 20, DOI:10.1051/mateconf/20167400020 (2016).
- [135] Joachim, F.: Streuung der Grübchentragsfähigkeit. *antriebstechnik* 21. Heft 4, S. 156–59 (1982).
- [136] Kadach, D.: IGF-Nr. 17186, FVA-Nr. 284 V Lastverteilungseinfluss Schrägverzahnung - Abschlussbericht - Einfluss der Lastverteilung auf die Grübchentragsfähigkeit von einsatzgehärteten Stirnrädern. Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V.
- [137] Kahrs, M.: Die Auslegung von Landmaschinenbauteilen nach Lastkollektiven. *Landtechnische Forschung* 13. Heft 6, S. 171–79 (1963).
- [138] Käser, W.: Beitrag zur Grübchenbildung an gehärteten Zahnrädern, Einfluß von Härte-tiefe und Schmierstoff auf die Flankentragsfähigkeit. Dissertation, Technische Universität München (1977).
- [139] Kawalec, A.; Wiktor, J.; Ceglarek, D.: Comparative Analysis of Tooth-Root Strength Using ISO and AGMA Standards in Spur and Helical Gears With FEM-based Verification. *Journal of Mechanical Design* 128. Heft 5, S. 1141, DOI:10.1115/1.2214735 (2006).
- [140] Kissling, U.: Licht am Ende des Tunnels - Flankenlinienkorrekturen per Software - eine Fallstudie, Teil 1. *antriebstechnik*. Heft 11, S. 108–11 (2013).
- [141] Kissling, U.: Licht am Ende des Tunnels - Flankenlinienkorrekturen per Software - eine Fallstudie, Teil 2. *antriebstechnik*. Heft 12, S. 54–57 (2013).
- [142] Kissling, U.: Licht am Ende des Tunnels - Flankenlinienkorrekturen per Software - eine Fallstudie, Teil 3. *antriebstechnik*. Heft 11, S. 98–103 (2014).
- [143] Kissling, U.; Bae, I.; Stangl, M.: From the single component safety factor to the system reliability rating. *The Proceedings of the JSME international conference on motion and power transmissions 2017*. Heft 0, 08-01, DOI:10.1299/jsmeimpt.2017.08-01 (2017).

- [144] Kissling, U.; Stangl, M.: The documentation of gearbox reliability - an upcoming demand. International Conference on Gears 2017 - VDI-Bericht 2294, Garching. VDI - Verein Deutscher Ingenieure (2017).
- [145] Klätschke, H.: Standardisierte Lastkollektive und Lastfolgen für PKW-Antriebsstränge mit Automatikgetriebe, CARLOS-PTA - LBF-Bericht Nr. 110310/110370(d): Darmstadt (2002).
- [146] Klein, B.; Haas, W.; Bertsche, B.: VDI-Berichte Nr. 2065 Ansätze zur Bestimmung der Zuverlässigkeit des Dichtsystems Radial-Wellendichtring (RWDR) - An Approach to Determine the Reliability of the Sealing System Radial Shaft Seal (RSS) (2009).
- [147] Kleyner, A.; Bhagath, S.; Gasparini, M.; Robinson, J.; Bender, M.: Bayesian techniques to reduce sample size in automotive electronics attributes testing (1997).
- [148] Knauer, G.: Zur Grübchentragfähigkeit einsatzgehärteter Zahnräder - Einfluß von Werkstoff, Schmierstoff und Betriebstemperatur. Dissertation, Technische Universität München (1988).
- [149] Köhler, M.; Jenne, S.; Pötter, K.; Zenner, H.: Zählverfahren und Lastannahme in der Betriebsfestigkeit. Springer: Berlin Heidelberg New York (2012).
- [150] Koller, P.: FVA-Nr. 453/II- Heft 1034- Randzonentragfähigkeit – Zahnflanke II, Abschlussbericht - Einfluss der Schleifbearbeitung auf Randzonenkennwerte und Zahnflankentragfähigkeit unter besonderer Berücksichtigung einer zusätzlichen Oberflächenbearbeitung. Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (2012).
- [151] Koller, P.: Steigerung der Zahnflankentragfähigkeit durch Optimierung von Eigenspannungs- und Oberflächenzustand. Dissertation, Technische Universität München (2013).
- [152] Krolo, A.: Planung von Zuverlässigkeitstests mit weitreichender Berücksichtigung von Vorkenntnissen. Dissertation, Universität Stuttgart (2004).
- [153] Küçükay, F.; Kassel, T.: Anforderungsoptimierung für Getriebe und Komponenten. ATZ 109. Heft 09 (2007).
- [154] Lee, Y.-L.; Tjhung, T.: Rainflow Cycle Counting Techniques. In: Metal Fatigue Analysis Handbook, S. 89–114, DOI:10.1016/B978-0-12-385204-5.00003-3 (2012).
- [155] Li, S.; Kahraman, A.: A micro-pitting model for spur gear contacts. International Journal of Fatigue 59, S. 224–33, DOI:10.1016/j.ijfatigue.2013.08.015 (2014).
- [156] Li, S.; Kahraman, A.: A physics-based model to predict micro-pitting lives of lubricated point contacts. International Journal of Fatigue 47, S. 205–15, DOI:10.1016/j.ijfatigue.2012.09.002 (2013).
- [157] Li, S.; Kahraman, A.: Micro-pitting fatigue lives of lubricated point contacts - Experiments and model validation. International Journal of Fatigue 48, S. 9–18, DOI:10.1016/j.ijfatigue.2012.12.003 (2013).
- [158] Linke, H.: Stirnradverzahnung. Hanser: München Wien, 2. Auflage (2010).
- [159] Liu, W.; Oster, P.; Höhn, B.-R.: Arbeitsblatt FVA-Nr. 259/II+III Graufleckentätigkeit II - Einfluss verschiedener Fertigungsverfahren auf die Graufleckentragfähigkeit von Zahnradgetrieben (2002).

- [160] Lohmann, C.: Zusammenhang von Ermüdung, Rissbildung, Verschleiß und Graufleckentragfähigkeit an Stirnrädern. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum (2016).
- [161] Lohmann, C.; Walkowiak, M.; Tenberge, P.: Optimal modifications on helical gears for good load distribution and minimal wear. International Gear Conference, Lyon Villeurbanne, France. Woodhead Publishing (2014).
- [162] Lüpfer, U.: Ermittlung und Anwendung von Lastkollektiven im Traktorenbau. Grundlagen der Landtechnik 1. Heft 23, S. 7–10 (1973).
- [163] MackAldener, M.; Olsson, M.: Analysis of crack propagation during tooth interior fatigue fracture. Engineering Fracture Mechanics 69. Heft 18, S. 2147–62, DOI:10.1016/S0013-7944(02)00016-4 (2002).
- [164] MackAldener, M.; Olsson, M.: Interior fatigue fracture of gear teeth. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures 2000. Heft 23, S. 283–92 (2000).
- [165] MackAldener, M.; Olsson, M.: Tooth Interior Fatigue Fracture — computational and material aspects. International Journal of Fatigue 23. Heft 4, S. 329–40, DOI:10.1016/S0142-1123(00)00099-2 (2001).
- [166] Maier, E.; Ziegler, A.; Lohner, T.; Stahl, K.: Characterization of TEHL contacts of thermoplastic gears. Forschung im Ingenieurwesen 81. Heft 2-3, S. 317–24, DOI:10.1007/s10010-017-0230-4 (2017).
- [167] Maisch, C.; Bertsche, B.: VDI-Bericht Nr. 1884 Zuverlässigkeitstestplanung für Systeme unter Verwendung von Komponentenvorwissen - Reliability Demonstration Test for Systems under Consideration of Component Prior Information (2005).
- [168] Matt, P.: IGF Nr. 15682, FVA-Nr. 284/IV - Heft 1023 - Stirnkanteneinfluss - Schrägverzahnung - Einfluss der Stirnkante auf die Tragfähigkeit von Zahnrädern unter Berücksichtigung des Schrägungswinkels. Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V.
- [169] Matt, P.; Tobie, T.: FVA Richtlinie 563/I - Empfehlung zur Vereinheitlichung von Tragfähigkeitsversuchen an vergüteten und gehärteten Zylinderrädern. Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (2012).
- [170] Mattetti, M.; Molari, G.; Vertua, A.; Guarnieri, A.: Tractor accelerated test on test rig. Journal of Agricultural Engineering 44. Heft 2s, DOI:10.4081/jae.2013.s2.e76 (2013).
- [171] Mauch, H.: IGF Nr. 11154, FVA-Nr. 304/I - Heft 591 - Lebensdauerstatistik Abschlussbericht - Statistische Methoden zur Beurteilung von Bauteillebensdauer und Zuverlässigkeit und ihre beispielhafte Anwendung auf die Zahnräder (1999).
- [172] Meis, J.-A.: Flank fracture assessment under consideration of material quality. International Conference on Gears 2017 - VDI-Bericht 2294, Garching. VDI - Verein Deutscher Ingenieure (2017).
- [173] Michaelis, K.; Brinck, P.: Berechnung der verschleißbedingten Flankenformänderung langsam laufender Zahnräder, Teil 1+2. antriebstechnik 22. Heft 11 (1983).
- [174] Miller, K. J.; Mohamed, H. J.; de los Rios, E. R.: Fatigue Damage Accumulation Above and below the Fatigue Limit - The Behaviour of Short Fatigue Cracks. Mechanical Engineering Publications: London (1986).

- [175] Miner, M. A.: Cumulative Damage in Fatigue. *Journal of applied mechanics* 12. Heft 3, S. 159–64 (1945).
- [176] Müller, C.: Zur statistischen Auswertung experimenteller Wöhlerlinien. Dissertation, Technische Universität Clausthal (2015).
- [177] Müller, C.; Hinkelmann, K.: FVA-Nr. 485/III- Heft 1011- Lebensdauerberechnung für Komponenten III - Weiterentwicklung einer geführten Lebensdauerberechnung für Komponenten der Antriebstechnik mit Vernetzung zur FVA-Software. Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (2012).
- [178] Müller, C.; Hinkelmann, K.; Masendorf, R.; Esderts, A.: Zur Treffsicherheit der experimentellen Dauerfestigkeitsschätzung. Fakultät für Mathematik/Informatik und Maschinenbau, TU Clausthal (2014).
- [179] Müller, D.: Sensitivitätsanalyse von Fahrzeugparametern bezüglich der Getriebebelastung auf Basis realer Kundendaten. Masterarbeit, Technische Universität München (2017).
- [180] Mulzer, F.; Otto, H.-P.: FVA-Nr. 498/I- Heft 842- Betriebsfestigkeitsberechnung Abschlussbericht - Erweiterte Betriebsfestigkeitsberechnung für Stirnräder. Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (2008).
- [181] Neubauer, B.; Otto, M.; Stahl, K.: FVA-Nr. 571/II - Heft 1197 - LAPLASn - Berechnung der Lastverteilung in Getriebesystemen mit beliebig angeordneten Planetenradstufen. Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V.
- [182] Niemann, G.; Winter, H.: *Maschinenelemente - Band 2: Getriebe allgemein, Zahnradgetriebe-Grundlagen, Stirnradgetriebe*. Springer-Verlag: Berlin Heidelberg New York, 2. Auflage (2003).
- [183] Niemann, G.; Winter, H.; Höhn, B.-R.: *Maschinenelemente - Band 1: Konstruktion und Berechnung von Verbindungen, Lagern, Wellen*. Springer-Verlag: Berlin Heidelberg New York, 4. Auflage (2005).
- [184] Nikkel, K.: FVA-Nr. 485/I- Heft 866- Lebensdauerberechnung für Komponenten Abschlussbericht - Geführte Lebensdauerberechnung für Komponenten der Antriebstechnik in Form eines digitalen Leitfadens. Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (2008).
- [185] Olsson, E.; Olander, A.; Öberg, M.: Fatigue of gears in the finite life regime — Experiments and probabilistic modelling. *Engineering Failure Analysis* 62, S. 276–86, DOI:10.1016/j.engfailanal.2016.01.012 (2016).
- [186] Oster, P.: Beanspruchung der Zahnflanken unter Bedingungen der Elastohydrodynamik. Dissertation, Technische Universität München (1982).
- [187] Palmgren, A.: Die Lebensdauer von Kugellagern. *Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure (Z. VDI)* 68. Heft 14, S. 339–41 (1924).
- [188] Panagopoulos, A.; Dengel, D.: *Die Schadenslinie im Wohlerdiagramm*. Chemie GmbH, Weinheim (1984).
- [189] Plewe, H.-J.: Untersuchung über den Abriebsverschleiß von geschmierten, langsam laufenden Zahnrädern. Dissertation, Technische Universität München (1980).

- [190] Renius, K.-T.: Betriebsfestigkeit von Traktorgetrieben. Landtechnik. Heft 6, S. 390–91 (2001).
- [191] Renius, K.-T.: Betriebsfestigkeitsberechnung und Laborerprobung von Zahnrädern in Ackerschleppergetrieben. VDI-Bericht 332. VDI - Verein Deutscher Ingenieure (1979).
- [192] Renius, K.-T.: Betriebsfestigkeitsberechnungen von Maschinenelementen in Ackerschleppern mit Hilfe von Lastkollektiven. Springer: Berlin Heidelberg New York (1977).
- [193] Renius, K.-T.: European Tractor Transmission Design Concepts. In: ASAE-Paper 76-1526, St. Joseph, MI: American Society of Agricultural Engineers (1976).
- [194] Renius, K.-T.: Expertengespräch 11.02.2018, München (2018).
- [195] Renius, K.-T.: Festlegung der Getriebeabstufung von Ackerschleppern nach Fahrgeschwindigkeitskollektiven. Grundlagen der Landtechnik 30. Heft 1, S. 7–15 (1980).
- [196] Renius, K.-T.: Last- und Fahrgeschwindigkeitskollektive als Dimensionierungsgrundlagen für die Fahrgetriebe von Ackerschleppern. Fortschrittsberichte VDI-Z 1. Heft 49 (1976).
- [197] Renius, K.-T.: Random load fatigue in tractor transmissions. Landtechnik. Heft 6, S. 390–91 (2001).
- [198] Rettig, H.: Die Grübchengrenzlast bei Zahnrädern. Maschinenmarkt 75. Heft 80, S. 1770–76 (1969).
- [199] Rettig, H.: Die Wöhlerlinie als Werkstoff-Energiegrenze - Ein Beitrag zur physikalischen Deutung der Wöhlerlinie und zum Problem der Bauteilfestigkeit im elastisch-plastischen Gebiet. Der Maschinenschaden 43. Heft 1, S. 15–24 (1970).
- [200] Rettig, H.: Zur Lebensdauerfrage von Bauteilen im elastisch-plastischen Bereich. Materialprüfung 12. Heft 12, S. 401–07 (1970).
- [201] Rinderknecht, S.; Fietzek, R.; Foulard, S.: Online and Real-Time Condition Prediction for Transmissions based on CAN-Signals. WCX™ 17: SAE World Congress Experience. SAE, DOI:10.4271/2017-01-1627 (2017).
- [202] Römhild, I.; Linke, H.; Schlecht, B.: FVA-Nr. 321/III- Heft 799- Weiterentwicklung von DIN 743 Studie - Grundlagen zur Weiterentwicklung der Wellenberechnung auf der Basis von DIN 743 (2006).
- [203] Sachs, L.: Angewandte Statistik Methodensammlung mit R. Springer: Berlin [u.a.], 13., aktualisierte und erw. Aufl. (2009).
- [204] Sagraloff, N.; Hein, M.; Tobie, T.; Stahl, K.: Practical use of micropitting test results according to FVA 54/7 for calculation of micropitting load capacity acc. to ISO/TR 15144-1. International Conference on Gears 2017 - VDI-Bericht 2294, Garching. VDI - Verein Deutscher Ingenieure (2017).
- [205] Sánchez, M. B.; Pedrero, J. I.; Pleguezuelos, M.: Critical stress and load conditions for bending calculations of involute spur and helical gears. International Journal of Fatigue 48, S. 28–38, DOI:10.1016/j.ijfatigue.2012.11.015 (2013).
- [206] Schaller, K. V.: Betriebsfestigkeitsuntersuchungen zur Grübchenbildung an einsetzgehärteten Stirnradflanken. Dissertation, Technische Universität München.

- [207] Schaller, K. V.: FVA-Nr. 125/ I- Heft 290- Zahnrad-Lebensdauerprüfung mit Lastkollektiven Abschlussbericht - Entwicklung eines Verfahrens zur Prüfung von Zahnradern mit Beanspruchungskollektiven (Belastung, Drehzahl, Temperatur) auf dem FZG-Zahnradverspannungsprüfstand und Vergleichuntersuchungen zur Grübchentrugfähigkeit im Mehrstufenversuch. Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (1989).
- [208] Schaller, K. V.: IGF Nr. 7609, FVA-Nr. 125/ II- Heft 320- Zahnradlebensdauerprüfung Abschlussbericht - Betriebsfestigkeitsuntersuchung zur Grübchenbildung an einsatzgehärteten Stirnflanken. Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (1991).
- [209] Schinagl, S.: IGF Nr. 11965N, FVA-Nr. 257/II- Heft 677- Zahnfußtragfähigkeit Hoch- und Schrägverzahnungen Abschlussbericht. Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (2001).
- [210] Schönnenbeck, G.: Einfluß der Schmierstoffe auf die Zahnflankenermüdung im Umfangsgeschwindigkeitsbereich 1 ... 9 m/s. Dissertation, Technische Universität München.
- [211] Schönnenbeck, G.: IGF Nr. 3888, FVA-Nr. 54/I - Heft 106 Einfluß der Schmierstoffe auf die Zahnflankenermüdung... Abschlussbericht Teil I. Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (1981).
- [212] Schönnenbeck, G.: IGF Nr. 3888FVA-Nr. 54/II - Heft 152 Graufleckigkeit - Testverfahren zur Untersuchung des Schmierstoffeinflusses auf die Entstehung von Grauflecken bei Zahnradern zu den Forschungsvorhaben. Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (1983).
- [213] Schrade, U.: IGF Nr. 9888, FVA-Nr.259/I - Heft 583 - Graufleckentragfähigkeit - Einfluß von Verzahnungsgeometrie und Betriebsbedingungen auf die Graufleckentragfähigkeit von Zahnradgetrieben. Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (1999).
- [214] Schreiber, H.-H.: Zur Auswertung von Lebensdauerversuchen an Wälzlagern. Dissertation, Technische Hochschule München.
- [215] Schudy, J.: Untersuchungen zur Flankentragfähigkeit von Außen- und Innenverzahnungen - Einflüsse auf das Grübchen-, Grauflecken- und Verschleißverhalten, insbesondere bei langsam laufenden Getriebestufen. Dissertation, Technische Universität München (2010).
- [216] Schurer, S.: Einfluss nichtmetallischer Einschlüsse in hochreinen Werkstoffen auf die Zahnfußtragfähigkeit. Dissertation, Technische Universität München (2016).
- [217] Schwienbacher, S.: Einfluss von Schleifbrand auf die Flankentragfähigkeit einsatzgehärteter Zahnradern. Dissertation, Technische Universität München (2008).
- [218] Schwienbacher, S.: FVA-Nr. 374/I- Heft 725- Schadensrisikominderung Abschlussbericht - Berücksichtigung von Sonderereignissen bei der Zahnfußtragfähigkeit. Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (2004).
- [219] Schwienbacher, S.; Wolter, B.; Tobie, T.; Höhn, B.-R.; Kröning, M.: AVIF Nr. A200, FVA-Nr. 453/I- Heft 830- Randzonentragfähigkeit - Zahnflanke, Abschlussbericht - Ermittlung und Charakterisierung von Randzonen-Kennwerten und –eigenschaften und deren Einfluss auf die Flankentragfähigkeit einsatzgehärteter, geschliffener Zahnradern. Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (2007).

- [220] Sfar, M. Z.: Bestimmung von Verzahnungskorrekturen und Lagerkräften in Planetengetrieben für Lastkollektive. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum (2011).
- [221] Simbürger, A.: Festigkeitsverhalten zäher Werkstoffe bei einer mehrachsigen, phasenverschobenen Schwingbeanspruchung mit körperfesten und veränderlichen Hauptspannungsrichtungen. Dissertation, TH Darmstadt (1975).
- [222] Singh, A.: Development and Validation of an S-N Based Two Phase Bending Fatigue Life Prediction Model. *Journal of Mechanical Design* 125. Heft 3, S. 540, DOI:10.1115/1.1564572 (2003).
- [223] Singh, A.: The nature of initiation and propagation S–N curves at and below the fatigue limit. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. Heft 25, S. 79–89 (2002).
- [224] Sonsino, C. M.: Betriebsfestigkeit — Eine Einführung in die Begriffe und ausgewählte Bemessungsgrundlagen. *Materials Testing* 50. Heft 1-2, S. 77–90, DOI:10.3139/120.100862 (2008).
- [225] Stahl, K.: Grübchentragfähigkeit einsatzgehärteter Gerad- und Schrägverzahnungen unter besonderer Berücksichtigung der Pressungsverteilung. Dissertation, Technische Universität München (2001).
- [226] Stahl, K.: IGF Nr. 11154, FVA-Nr. 304/I- Heft 580- Lebensdauerstatistik Abschlussbericht - Statistische Methoden zur Beurteilung von Bauteillebensdauer und Zuverlässigkeit und ihre beispielhafte Anwendung auf Zahnräder (1999).
- [227] Stahl, K.: IGF Nr. 9889, FVA-Nr. 188/II- Heft 502- Zahnfuß-Betriebsfestigkeit Abschlussbericht - Zahnfuß-Betriebsfestigkeitsuntersuchungen an einsatzgehärteten Zahnrädern. Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (1996).
- [228] Starke, P.; Walther, F.; Eifler, D.: Fatigue assessment and fatigue life calculation of quenched and tempered SAE 4140 steel based on stress–strain hysteresis, temperature and electrical resistance measurements. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. Heft 30, S. 1044–51 (2007).
- [229] Suchandt, T.: IGF Nr. 8387, FVA-Nr. 188/I- Heft 408- Zahnfuß-Betriebsfestigkeit Abschlussbericht - Zahnfuß-Betriebsfestigkeitsuntersuchungen an einsatzgehärteten Zahnrädern. Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (1993).
- [230] Sun, B. Yang, L; Gud, Y.: A high-cycle fatigue accumulation model based on electrical resistance for structural steels. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. Heft 30, S. 1052–62 (2007).
- [231] Thoma, F.; Otto, M.; Höhn, B.-R.: FVA-Nr. 30/VI- Heft 914- RIKOR I Abschlussbericht - Erweiterung Ritzelkorrekturprogramm (RIKOR) zur Bestimmung der Lastverteilung von Stirnradgetrieben. Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V.: Frankfurt/Main (2009).
- [232] Thomas, J.: Flankentragfähigkeit und Laufverhalten von hart-feinbearbeiteten Kegelrädern. Dissertation, Technische Universität München (1998).
- [233] Tobie, T.: Zur Grübchen- und Zahnfußtragfähigkeit einsatzgehärteter Zahnräder - Einflüsse aus Einsatzhärtungstiefe, Wärmebehandlung und Fertigung bei unterschiedlicher Baugröße. Dissertation, Technische Universität München (2001).

- [234] Trencsényi, B.; Palkovics, L.: Driveline torque observer for heavy duty vehicle. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering* 39. Heft 2, S. 91, DOI:10.3311/pp.tr.2011-2.08 (2011).
- [235] Tschuncky, R.: Sensor- und geräteunabhängige Kalibrierung elektromagnetischer zerstörungsfreier Prüfverfahren zur praxisorientierten Werkstoffcharakterisierung. Dissertation, Universität des Saarlandes.
- [236] Vahlensieck, B.: Messung und Anwendung von Lastkollektiven für einen stufenlosen Kettenwandler-Traktorfahrtrieb - Messung und Anwendung von Lastkollektiven für einen stufenlosen Kettenwandler-Traktorfahrtrieb. VDI-Verl.: Düsseldorf, Als Ms. gedr (1999).
- [237] van de Sandt, N.: IGF Nr. 11712, FVA-Nr. 327/I- Ölkennwerte Wälzlagerverschleiß Abschlussbericht - Entwicklung experimenteller Grundlagen für eine schmierstoffabhängige Verschleißlebensdauerberechnung für Wälzlager. Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (2001).
- [238] Voskamp, A. P.: Microstructural Changes During Rolling Contact Fatigue - Metal Fatigue in the Subsurface Region of Deep Groove Ball Bearing Inner Rings. Dissertation.
- [239] Wagner, S.: Erweiterte statistische Auswertung von Versuchen zur Zahnradtragfähigkeit. Bachelorarbeit, Technische Universität München (2017).
- [240] Walther, L.: Vergleich von betriebsfester und dauerfester Auslegung eines Fahrzeuggetriebes. Semesterarbeit, Technische Universität München (2016).
- [241] Wang, C. J.; Yao, W. X.; Xia, T. X.: A small-load-omitting criterion based on probability fatigue. *International Journal of Fatigue* 68, S. 224–30, DOI:10.1016/j.ijfatigue.2014.04.014 (2014).
- [242] Warkenthin, W.: Kritik an der Theorie von Corten-Dolan und Schlussfolgerungen für den Betriebsfestigkeitsnachweis. *Technische Mechanik* 4. Heft 2, S. 53–57 (1983).
- [243] Weber, H.: Einführung in die Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik für Ingenieure. Vieweg+Teubner Verlag: Wiesbaden (1992).
- [244] Weber, R.: Auslegungskonzept gegen Volumenversagen bei einsatzgehärteten Stirnrädern. Dissertation, Universität Kassel (2015).
- [245] Weber, R.; Damerau, J.; Rötting, J.; Bacher-Höchst, M.: Simulation of dynamic tooth loads and local stress histories in involute gears. *International Conference on Gears 2013*, München. VDI - Verein Deutscher Ingenieure (2013).
- [246] Weber, R.; Rötting, J.; Scholtes, B.; Bacher-Höchst, M.: Load stresses and residual stresses in the tooth interior, Lyon Villeurbanne, France. Woodhead Publishing (2014).
- [247] Weibring, M.; Gondecki, Leonard, Tenberge, Peter: Simulation of fatigue failure on tooth flanks in consideration of pitting initiation and growth. *International Conference on Gears 2017 - VDI-Bericht 2294*, Garching. VDI - Verein Deutscher Ingenieure (2017).
- [248] Weitzl, R. M.: Zur Tragfähigkeitsberechnung von Wälzlagern und Stirnrädern. Dissertation, Technische Universität München.

- [249] Winter, H.; Michaelis, K.; Schaller, K. V.: Betriebsfestigkeitsuntersuchungen zur Grübchenbildung an einsatzgehärteten Stirnrädern - Teil II. *antriebstechnik* 35. Heft 2, S. 57–60 (1995).
- [250] Witzig, J.: Flankenbruch - Eine Grenze der Zahnradtragfähigkeit in der Werkstofftiefe. Dissertation, Technische Universität München.
- [251] Witzig, J.; Tobie, T.; Stahl, K.: AVIF A243, FVA-Nr. 556/I- Heft 1000- Flankentragfähigkeit-Werkstofftiefe - Entwicklung eines erweiterten Berechnungsverfahrens zur Ermittlung optimaler Zahnflankentragfähigkeit bis in den Bereich großer Werkstofftiefen. Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (2012).
- [252] Zenner, H.; Liu, J.: Vorschlag zur Verbesserung der Lebensdauerabschätzung nach dem Nennspannungskonzept - Festigkeitsberechnung. *Konstruktion* 44 44. Heft 9, S. 9–17 (1992).
- [253] Zenner, H.; Richter, I.: Eine Festigkeitshypothese für die Dauerfestigkeit bei beliebigen Beanspruchungskombinationen. *Konstruktion* 29, S. 11–18 (1977).
- [254] Zenner, H.; Simbürger, A.; Liu, J.: On the fatigue limit of ductile metals under complex multiaxial loading. *International Journal of Fatigue* 22, S. 137–45 (200).
- [255] Zhu, S.-P.; Huang, H.-Z.; Liu, Y.; He, L.-P.; Liao, Q.: A Practical Method for Determining the Corten-Dolan Exponent and Its Application to Fatigue Life Prediction. *Int. J. Turbo Jet-Engines* 29. Heft 2, DOI:10.1515/tjj-2012-0013 (2012).
- [256] Ziegler, A.; Michaelis, K.; Höhn, B.-R.: IGF Nr. 15432, FVA-Nr. 554/I- Heft 978- Systemlebensdauerprüfung Abschlussbericht - Verkürztes Testverfahren für Getriebe und Antriebselemente zur Bestätigung der Betriebsfestigkeit der Bauteile (Raffung). Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V.: Frankfurt/Main (2011).
- [257] Ziegler, A. G.: Zur verkürzten Systemlebensdauerprüfung von Zahnradgetrieben. Dissertation, Technische Universität München (2011).
- [258] Zwirlein, O.; Schlicht, H.: Rolling Contact Fatigue Mechanisms- Accelerated Testing Versus Field Performance.

10.3 Betreute und für diese Arbeit relevante Studienarbeiten

Folgende Studienarbeiten, deren Bearbeitung, Auswertung, Interpretation und Darstellung von Ergebnissen unter wesentlicher wissenschaftlicher Anleitung des Autors dieser Dissertation entstanden sind, wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit am Lehrstuhl für Maschinenelemente, Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau angefertigt. Ergebnisse flossen zum Teil in die Arbeit ein.

Bachelorarbeiten

BECK, M.: Auslegung und Konstruktion eines Fahrradgetriebes für den Geländeeinsatz. Bachelorarbeit, TU München (2016).

BUß, A.: Durchführung und Auswertung von zerstörungsfreien Prüfungen an Zahnrädern. Bachelorarbeit, TU München (2014).

DIETRICH, M.: Konzeption und Konstruktion einer Prüfvorrichtung für resistometrische Messungen an Zahnrädern. Bachelorarbeit, TU München (2013).

ECKARDT, T.: Vergleich von betriebsfester und dauerfester Auslegung von Stirnradgetrieben. Bachelorarbeit, TU München (2015).

FRUTH, S.: Betriebsfestigkeitsuntersuchungen an Zahnrädern. Bachelorarbeit, TU München (2014).

GEITNER, M.: Statistische Auswertung von verkürzten Lebensdauerversuchen. Bachelorarbeit, TU München (2014).

KRATZER, D.: Entwicklung eines Programms zur Systemlebensdauerberechnung. Bachelorarbeit, TU München (2014).

MÜLLER, R.: Durchführung und Auswertung von zerstörungsfreien Prüfungen an Zahnrädern. Bachelorarbeit, TU München (2014).

OPFERKUCH, J.: Auslegung von Verzahnungskorrekturen bei Lastkollektivbelastung. Bachelorarbeit, TU München (2016).

PAULI, M.: Grundlegende Parameterstudie zur Tragfähigkeitsberechnung hinsichtlich der Schadensart Zahnflankenbruch an Stirnrädern. Bachelorarbeit, TU München (2016).

RIEDERER, D.: Zerstörungsfreie Prüfverfahren zur Ermittlung des Schädigungsgrades bei Zahnrädern. Bachelorarbeit, TU München (2014).

WAGNER, S.: Erweiterte statistische Auswertung von Versuchen zur Zahnradtragfähigkeit. Bachelorarbeit, TU München (2017)

WARNECKE, C.: Auslegung und Konstruktion eines zweistufigen Getriebes für ein elektrisch angetriebenes Formula Student Fahrzeug. Bachelorarbeit, TU München (2014).

Semesterarbeiten

BADUR, P.: Erweiterte lokale Schadensakkumulation und Betriebsfestigkeitsrechnung hinsichtlich der Schadensart Zahnflankenbruch. Semesterarbeit, TU München (2013).

BUß, A.: Betriebslastenermittlung sowie betriebsfeste Auslegung am Beispiel eines Fahrradgetriebes. Semesterarbeit, TU München (2016).

ECKARDT, T.: Erweiterte theoretische Untersuchungen zur Schadensart Zahnflankenbruch. Semesterarbeit, TU München (2017).

HILDEBRAND, L.: Vergleich von betriebsfester und dauerfester Auslegung am Beispiel eines Motorradgetriebes. Semesterarbeit, TU München (2015).

MÜLLER, R.: Optimale Zahnflankenkorrekturen für verschiedene Schadensarten an Stirnrädern. Semesterarbeit, TU München (2015).

THALMAIR, S.: Vergleich von Berechnung und Versuch hinsichtlich der Entwicklung der Auskolkungstiefen durch Grauflecken bei Einstufen- und Lastkollektivbelastung. Semesterarbeit, TU München (2016).

WALTHER, L.: Vergleich von betriebsfester und dauerfester Auslegung eines Fahrzeuggetriebes. Semesterarbeit, TU München (2016).

Masterarbeiten

BORHAUER, J.: Einfluss sportlichen Fahrerverhaltens auf die Lebensdauer von Fahrzeuggetrieben. Masterarbeit, TU München (2014).

CERMAK, H.: Zahnflankenbruch - Erweiterung bestehender Berechnungsverfahren. Masterarbeit, TU München (2017).

GEITNER, M.: Erweiterte Zuverlässigkeitsbetrachtung für Zahnradschäden. Masterarbeit, TU München (2017).

MÜLLER, D.: Sensitivitätsanalyse von Fahrzeugparametern bezüglich der Getriebebelastung auf Basis realer Kundendaten. Masterarbeit, TU München (2017).

PRUY, S.: Schwingungsprofilermittlung für eine Komponentenerprobung am Shaker auf Basis einer Fahrzeugkollektivmessung. Masterarbeit, TU München (2016).

WARNECKE, C.: Entwicklung eines kurz bauenden Getriebekonzeptes durch den Einsatz von Evolventen-Sonderverzahnungen. Masterarbeit, TU München (2017).

10.4 Sonstige Dokumente

Diese Arbeit basiert auf den Ergebnissen der Forschungsvorhaben der Forschungsvereinigung Antriebstechnik FVA 554 II / IGF 17347 N/1 sowie FVA 722. Die Inhalte der Abschlussberichte zu den Forschungsvorhaben werden in dieser Dissertation verwendet. Zudem sind folgende Arbeiten in den Jahren 2012 bis 2017, die vom Autor selbst oder unter Beteiligung von Mitarbeitern des Lehrstuhls für Maschinenelemente, Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau erstellt wurden, zum Teil mit in diese Arbeit eingeflossen:

HEIN, M.; TOBIE, T.; STAHL, K.: IGF Nr. 17347, FVA-Nr. 554 II – Heft 1178 – Systemlebensdauerprüfung II Abschlussbericht – Verkürztes Testverfahren für Getriebe und Antriebselemente zur Bestätigung der Betriebsfestigkeit der Bauteile. Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., Frankfurt/Main (2016).

HEIN, M.; TOBIE, T.; STAHL, K.: IGF Nr. 17347, FVA-Nr. 554 II - Systemlebensdauerprüfung II Informationsblatt – Verkürztes Testverfahren für Getriebe und Antriebselemente zur Bestätigung der Betriebsfestigkeit der Bauteile. Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., Frankfurt/Main (2016)

HEIN, M.; FINGERLE, A.; TOBIE, T.; OTTO, M.; STAHL, K.: FVA-Nr. 722 I – Heft 1309 – RIKOR Lastkollektiv Abschlussbericht – Auslegung von Verzahnungskorrekturen bei Lastkollektiven. Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., Frankfurt/Main (2018).

HEIN, M.; FINGERLE, A.; TOBIE, T.; OTTO, M.; STAHL, K.: FVA-Nr. 722 I – RIKOR Lastkollektiv Informationsblatt – Auslegung von Verzahnungskorrekturen bei Lastkollektiven. Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., Frankfurt/Main (2018).

A Anhang

A.1 Normfähiger Ansatz zur Zuverlässigkeitsbetrachtung in der Stirnradtragfähigkeitsberechnung nach ISO 6336 entsprechend [96]

Der in den nachfolgenden Kapiteln A.1.1 sowie A.1.2 ausformulierte Ansatz zur Zuverlässigkeitsbetrachtung in der Stirnradtragfähigkeitsbetrachtung nach ISO 6336 entstammt vollständig der vom Autor betreuten Masterarbeit von Geitner [96].

A.1.1 Berechnung der Flankentragfähigkeit

Calculation of load capacity of spur and helical gears — Part 2: Calculation of surface durability (pitting)

(...)

5.4.2 Permissible contact stress, σ_{HP} : Method B

The permissible contact stress is calculated from

$$\sigma_{HP} = \frac{\sigma_{H \lim} \cdot Z_{NT}}{S_{H \min}} \cdot Z_Z \cdot Z_L \cdot Z_v \cdot Z_R \cdot Z_W \cdot Z_x = \frac{\sigma_{HG}}{S_{H \min}} \quad (6)$$

where

(...)

Z_Z is the reliability factor (see Clause 15), which accounts the considered reliability level;

(...)

15 Reliability factor, Z_Z

The reliability factor, Z_Z , takes into account the effect of statistical spread of failures found in experimental material testing. According to ISO 6336-5, the calculation of $\sigma_{H \lim}$ and the S-N curves given in this standard are related to a failure probability of 1 % respectively a reliability, R , of 99 %. By using Z_Z , the permissible contact stress, σ_{HP} , can be transformed to another reliability level, R . The calculation of the reliability factor, Z_Z , varies between the range of long and limited life.

15.1 Reliability factor, Z_Z , for long life

For $Z_{NT} = 1$ (long life, see Clause 11), Z_Z can be calculated by using Equation (64). This formula is based on the laws of the normal statistical distribution.

$$Z_Z = \frac{1 - s_H \cdot \text{norminv}(R)}{1 - s_H \cdot \text{norminv}(0.99)} \quad (64)$$

where

s_H	is the standard deviation for the normal distribution of the flank endurance limit (related to the mean value);
$norminv(\dots)$	gives the inverse of the standard normal cumulative distribution function;
R	is the considered reliability.

The standard deviation for the normal distribution of the flank endurance limit, s_H , has to be determined by experimental testing. It is related to the mean value of the experimental flank endurance limit and a dimensionless quantity. For some materials, Z_Z is given in Table 4 based on previous statistical analyses on numerous experimental test results.

15.2 Reliability factor, Z_Z , for limited life

For a specific $Z_{NT} > 1$ (limited life, see Clause 11), Z_Z can be calculated by using Equation (65). This formula is based on the laws of the Weibull distribution.

$$Z_Z = \sqrt[(-exp)]{wbl \sqrt{\frac{\ln(R)}{\ln(0.99)}}} \quad (65)$$

where

exp	is the material specific S-N curve gradient (for limited life, see Clause 5.4.3.2);
wbl	is the shape parameter for the Weibull distribution of the number of cycles to failure (pitting);
$\ln(\dots)$	is the natural logarithm of a number;
R	is the considered reliability.

The shape parameter of the Weibull distribution regarding the number of cycles to failure by pitting, wbl , has to be determined by experimental testing. For some materials, Z_Z is given in Table 4 based on previous statistical analyses on numerous experimental test results.

15.3 Reliability factor, Z_Z : Material specific values

The reliability factor, Z_Z , can be taken from Table 4 for some materials and may be used for a modification of the permissible contact stress, σ_{HP} , depending on the desired reliability, R . Z_Z is calculated by linear interpolation for other values of the reliability, R .

Table 4 – Reliability factor, Z_Z

Material ^a	Z_{NT}	Reliability, R , %								
		50	90	95	97	99	99.5	99.9	99.95	99.99
Eh	1	1.09	1.04	1.03	1.02	1	0.99	0.97	0.96	0.95
	> 1	1.11	1.06	1.04	1.03	1	0.98	0.94	0.93	0.89
V	1	1.11	1.05	1.03	1.02	1	0.99	0.96	0.95	0.93
	> 1	1.19	1.10	1.07	1.05	1	0.97	0.91	0.88	0.83
St	1	1.11	1.05	1.03	1.02	1	0.99	0.96	0.95	0.93

^a See ISO 6336-1:2006, Table 2 for an explanation of the abbreviations used.

(...)

A.1.2 Berechnung der Zahnfußtragfähigkeit

Calculation of load capacity of spur and helical gears — Part 3: Calculation of tooth bending strength

(...)

5.3.2 Permissible bending stress, σ_{FP} : Method B

Subject to the reservations given in 5.3.2.1 and 5.3.2.2, Equation (5) is to be used for this calculation:

$$\sigma_{FP} = \frac{(\sigma_{F \text{ lim}} \cdot Y_{ST}) \cdot Y_{NT}}{S_{F \text{ min}}} \cdot Y_Z \cdot Y_{\delta \text{ relT}} \cdot Y_{R \text{ relT}} \cdot Y_X = \frac{\sigma_{FG}}{S_{F \text{ min}}} \quad (5)$$

where

(...)

Y_Z is the reliability factor (see Clause 16), which accounts the considered reliability level;

(...)

16 Reliability factor, Y_Z

The reliability factor, Y_Z , takes into account the effect of statistical spread of failures found in experimental material testing. According to ISO 6336-5, the calculation of $\sigma_{F \text{ lim}}$ and the S-N curves given in this standard are related to a failure probability of 1 % respectively a reliability, R , of 99 %. By using Y_Z , the permissible bending stress, σ_{FP} , can be transformed to another reliability level, R . The calculation of the reliability factor, Y_Z , varies between the range of long and limited life.

16.1 Reliability factor, Y_Z , for long life

For $Y_{NT} = 1$ (long life, see Clause 12), Y_Z can be calculated by using Equation (62). This formula is based on the laws of the normal statistical distribution.

$$Y_Z = \frac{1 - s_F \cdot \text{norminv}(R)}{1 - s_F \cdot \text{norminv}(0.99)} \quad (62)$$

where

s_F	is the standard deviation for the normal distribution of the root endurance limit (related to the mean value);
$norminv(\dots)$	gives the inverse of the standard normal cumulative distribution function;
R	is the considered reliability.

The standard deviation for the normal distribution of the root endurance limit, s_F , has to be determined by experimental testing. It is related to the mean value of the experimental root endurance limit and a dimensionless quantity. For some materials, Y_Z is given in Table 4 based on previous statistical analyses on numerous experimental test results.

16.2 Reliability factor, Y_Z , for limited life

For a specific $Y_{NT} > 1$ (limited life, see Clause 12), Y_Z can be calculated by using Equation (63). This formula is based on the laws of the lognormal statistical distribution.

$$Y_Z = \frac{(-exp)}{\sqrt{10^{(norminv(0.99) - norminv(R)) \cdot s_{log}}}} \quad (63)$$

where

exp	is the material specific S-N curve gradient (for limited life, see Clause 5.3.3.2)
$norminv(\dots)$	gives the inverse of the standard normal cumulative distribution function;
R	is the considered reliability;
s_{log}	is the standard deviation parameter for the lognormal distribution of the number of cycles to failure (tooth root breakage).

The standard deviation parameter for the lognormal distribution of the number of cycles to failure by tooth root breakage, s_{log} , has to be determined by experimental testing. Usually, s_{log} depends on the load level and should be specified for the applied life factor, Y_{NT} . For some materials, Y_Z is given in Table 4 based on previous statistical analyses on numerous experimental test results.

15.3 Reliability factor, Y_Z : Material specific values

The reliability factor Y_Z , can be taken from Table 4 for some materials and may be used for a modification of the permissible bending stress, σ_{FP} , depending on the desired reliability, R . Y_Z is calculated by linear interpolation for other values of the life factor, Z_{NT} , or the reliability, R .

Table 4 – Reliability factor, Y_Z

Material ^a	Y_{NT}	Reliability, R , %								
		50	90	95	97	99	99.5	99.9	99.95	99.99
Eh, peened ^b	1	1.08	1.04	1.024	1.012	1	0.99	0.974	0.967	0.95
	1.2	1.07	1.03	1.02	1.01	1	0.99	0.98	0.97	0.96
	1.8	1.04	1.02	1.011	1.007	1	0.996	0.99	0.985	0.978
	2.3	1.08	1.04	1.024	1.015	1	0.99	0.974	0.968	0.95
Eh, unpeened ^b	1	1.14	1.06	1.04	1.03	1	0.98	0.95	0.94	0.92
	1.2	1.08	1.03	1.02	1.01	1	0.99	0.98	0.97	0.96
	1.8	1.04	1.02	1.011	1.007	1	0.966	0.99	0.985	0.978
	2.3	1.04	1.02	1.013	1.008	1	0.995	0.99	0.98	0.97
V, unpeened ^b	1	1.11	1.05	1.03	1.02	1	0.99	0.96	0.95	0.93

^a See ISO 6336-1:2006, Table 2 for an explanation of the abbreviations used.
^b In the tooth root area.

(...)

A.2 Dokumentation der Prüfverzahnungen

A.2.1 Dokumentation der Verzahnungsqualität

Die Prüfverzahnungen wurden auf einem CNC-gesteuertem Verzahnungsmesszentrum vom Typ Klingelnberg P40 vermessen. Im Rahmen der durchgeführten Messungen wurden die Flanken- und Profillinien an jeweils drei gleichmäßig über den Umfang verteilten Zähnen pro Flankenseite sowie die Teilungs- und Rundlaufabweichungen des Zahnrades gemessen. Diese Werte werden einer Qualität gemäß DIN 3962 [7, 8, 9] zugeordnet. Die Prüfräder erfüllen im Neuzustand nach der Hartfeinbearbeitung die geforderte Qualität $Q \leq 5$. Auch die erforderlichen Profilkorrekturen wurden entsprechend der Vorgaben aufgebracht. Neben den Vermessungen von Profil- und Flankenlinie in Zahnbreiten- bzw. Zahnhöhenmitte wurde auch eine dreidimensionale Vermessung der Zahnflankentopographie durchgeführt. Diese dient vor allem als Ausgangsbasis für die Entwicklung des Modells zur Bewertung der Restlebensdauer von vorgeschädigten Komponenten. Exemplarische Profil- und Flankenlinienmessschriebe sind in **Bild A.1** sowie **Bild A.2** dargestellt.

Bild A.3 zeigt eine repräsentative dreidimensionale Vermessungen der Zahnflanke eines Ritzels. Man erkennt die korrekte Ausführung der aufgetragenen Kopfrücknahme.

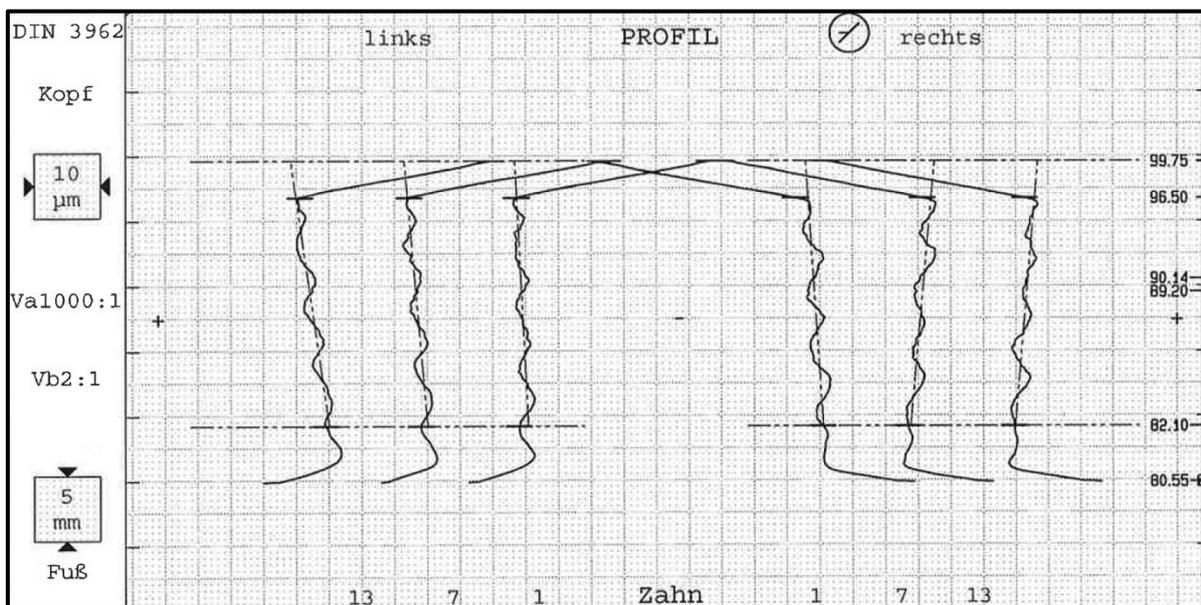


Bild A.1: Exemplarische Profillinien eines Ritzels im Neuzustand

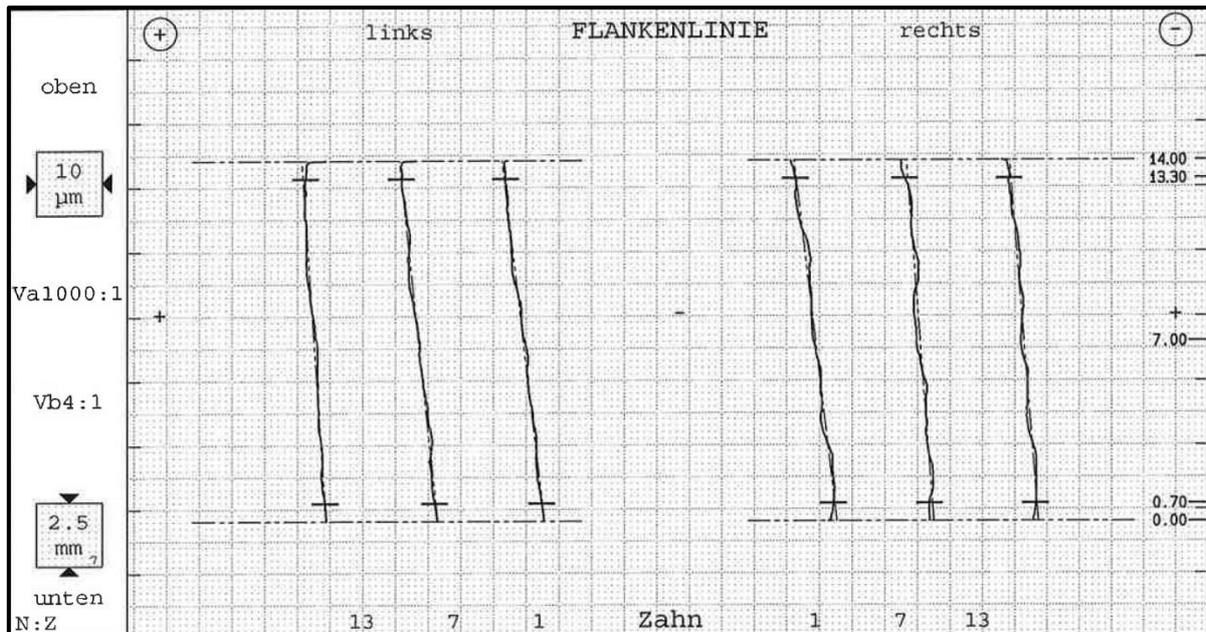


Bild A.2: Exemplarische Flankenlinien eines Ritzels im Neuzustand

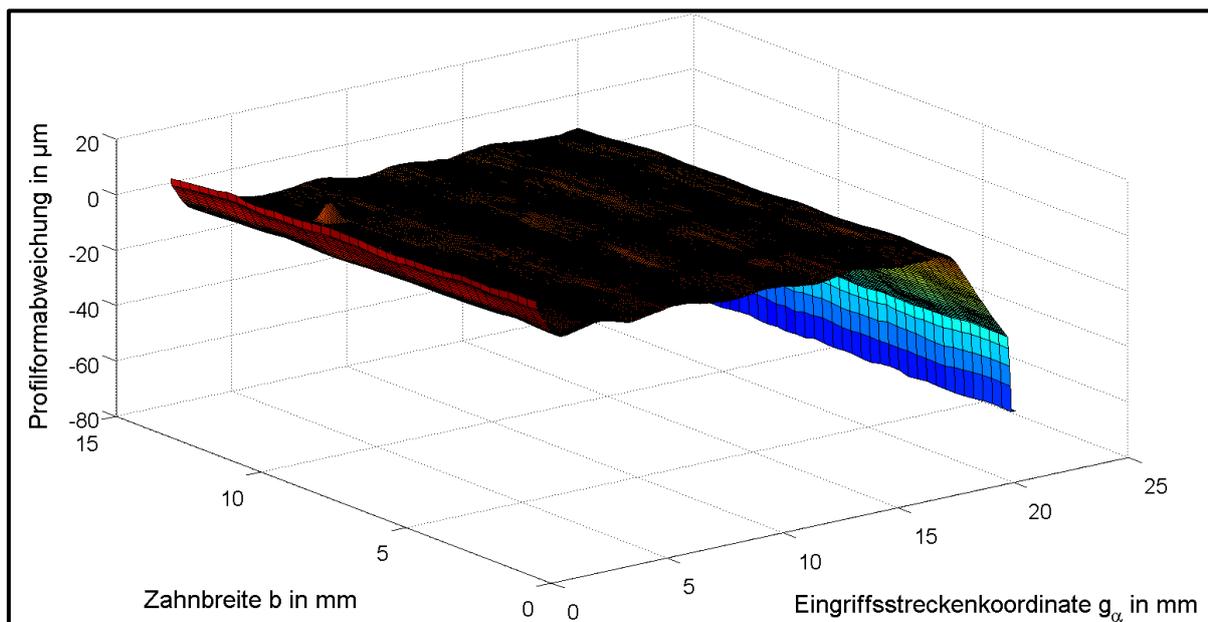


Bild A.3: 3D-Vermessung der Zahnflanke eines Ritzels

A.2.2 Dokumentation der Oberflächenrauheit

Die Oberflächenrauheit der verwendeten Prüfverzahnungen wurde im Neuzustand sowohl an Links- als auch an Rechtsflanke an jeweils drei gleichmäßig über den Umfang verteilten Zähnen gemessen. Zur Vermessung der Zahnflankenrauheit wurde eine Messmaschine vom Typ HOMMEL-ETAMIC T8000 mit folgenden Messparametern verwendet:

- Taster-Typ: TK 100
- Messbereich: 80 µm
- Taststrecke: 4,80 mm

- Geschwindigkeit: 0,50 mm/s
- Auswertestrecke: 4 mm
- Filter: ISO 11562(M1)

Die ermittelten arithmetischen Mittenrauwerte für jedes untersuchte Zahnrad im Neuzustand sind in **Bild A.4** dargestellt. Insgesamt liegen die ermittelten Kennwerte zur Zahnflankenrauheit im Bereich der Zeichnungsvorgabe. Die berechneten Mittelwerte liegen im Bereich von $R_a = 0,25 \dots 0,30 \mu\text{m}$.

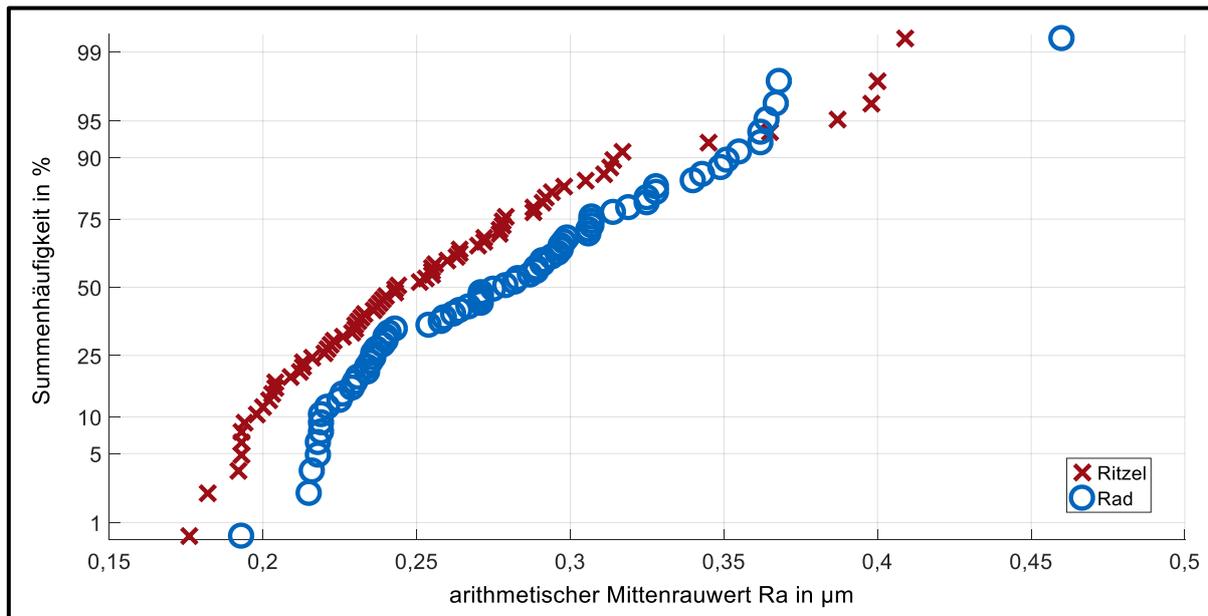


Bild A.4: Zahnflankenrauheit an Ritzel und Rad

A.2.3 Dokumentation der chemischen Zusammensetzung

Zur Dokumentation der chemischen Zusammensetzung der Prüfräder wurde die Elementkonzentration in Masse-% mit Hilfe eines Funkenspektrometers ermittelt. Die chemische Zusammensetzung der untersuchten Prüfräder ist in **Tabelle A.1** beispielhaft für ein Ritzel dargestellt.

Masse-%	C	Si	S	P	Mn	Ni
Gemessener Wert	0,177	0,205	0,0195	0,0081	0,526	1,491
Sollwert für 18CrNiMo7-6	0,15 – 0,21	< 0,40	< 0,035	< 0,025	0,50 – 0,90	1,40 – 1,70

Masse %	Cr	Mo	Cu	Al	Pb	Zn	Fe
Gemessener Wert	1,575	0,250	0,116	0,023	0,0016	0,003	95,61
Sollwert für 18CrNiMo7-6	1,50 – 1,80	0,25 – 0,35	-	-	-	-	-

Tabelle A.1: Chemische Zusammensetzung des Werkstoffs, Sollwerte nach DIN EN 10084 [28]

Die gemessenen Masse-% der überprüften Elemente sind den zulässigen Werten für den verwendeten Werkstoff 18CrNiMo7-6 nach DIN EN 10084 [28] gegenübergestellt. Die chemische Zusammensetzung der Prüfverzahnungen liegt innerhalb der Spezifikationen des verwendeten Werkstoffs.

A.2.4 Metallographische Untersuchungen – Gefügebeurteilung

Zur Dokumentation des Gefügestands wurde das Gefüge der betrachteten Verzahnungen exemplarisch an einem Radpaar im Neuzustand untersucht. Dazu wurde ein Querschliff an zwei Zähnen pro Zahnrad angefertigt. An diesem Querschliff wurde auch der Härtetiefenverlauf ermittelt. **Bild A.5** zeigt exemplarisch das Gefüge im Zahnflanken- und Kernbereich der betrachteten Verzahnung im Querschliff nach der Ätzung (Nital, 0,3 %, 20s).

Das Kerngefüge zeigt überwiegend Anteile an feinkörnigem Martensit sowie oberem und unterem Bainit. Im Randgefüge der geschliffenen Flankenbereiche überwiegt feinkörniger Martensit. Das Randgefüge im Fußbereich besteht überwiegend aus feinkörnigem Martensit und enthält geringe Anteile an Restaustenit. Das Gefüge der untersuchten Zahnräder entspricht somit dem typischen Gefüge eines einsatzgehärteten Stahls.

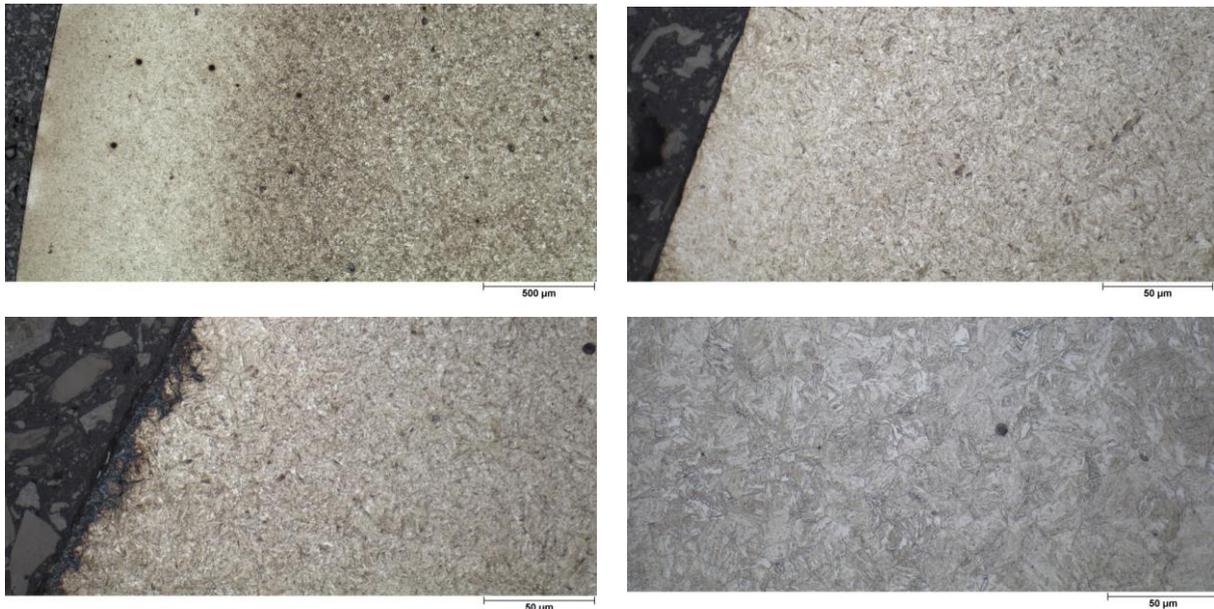


Bild A.5: Gefügeuntersuchung (oben: Flanke, unten links: Fuß, unten rechts: Kern)

A.2.5 Härtetiefenverlauf

Im Rahmen der Dokumentation des Neuteilzustands wurde auch der Härtetiefenverlauf im Neuzustand sowohl im Flanken- als auch im Fußbereich ermittelt. Repräsentative Härtetiefenverläufe im Zahnflanken- und Zahnfußbereich sind in **Bild A.6** dargestellt. Diese Verläufe entsprechen dem typischen Verlauf für einsatzgehärtete Verzahnungen. Die Randhärte liegt im Bereich von ca. 700 HV1 und damit innerhalb der Zeichnungsvorgabe. Die ermittelte Einsatzhärtungstiefe CHD_{550} an Links- und Rechtsflanke liegt für die betrachteten Verzahnungen im Bereich von ca. 0,9...1,0 mm und damit innerhalb der Zeichnungsvorgabe.

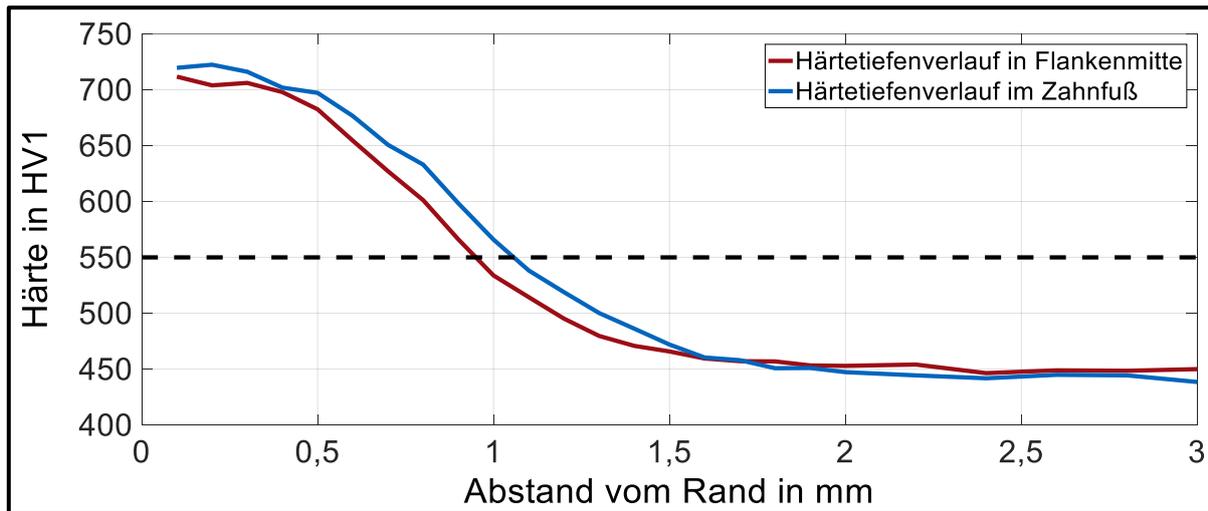


Bild A.6: Exemplarischer Härtetiefenverlauf (Ritzel)

A.2.6 Röntgenografische Untersuchungen

Neben den metallographischen Untersuchungen zur Charakterisierung des Gefüges wurde der Neuteilzustand auch mit Hilfe von röntgenografischen Untersuchungen dokumentiert. Im Rahmen dieser Messungen wurde der Eigenspannungs- und Restaustenitgehalttiefenverlauf bestimmt. Hierfür wurde ein Röntgendiffraktometer vom Typ Seifert XRD 3003 PTS verwendet. FZG/Kadach [136] beschreibt die Prüfparameter folgendermaßen: Die Ermittlung der Eigenspannungen sowie des Restaustenitgehalts erfolgte in Zahnhöhenrichtung unter Verwendung einer Chrom- K_{α} -Strahlung bei einem Röhrenstrom von 40 mA und einer Spannung von 40 kV. Die Auswertung der Eigenspannungen erfolgt aus 20 Reflexionsmessungen bei unterschiedlichen Einstellwinkeln der Probe nach dem $\sin^2\psi$ -Verfahren.

Bild A.7 zeigt einen repräsentativen Eigenspannungstiefenverlauf für die betrachtete Verzahnung im Neuzustand. Es wurden ausschließlich Druckeigenspannungen gemessen. Wie üblich für einsatzgehärtete, geschliffene Zahnräder zeigen diese an der Oberfläche ein Maximum und nehmen in Richtung der Werkstofftiefe ab. Zugeigenspannungen konnten im betrachteten Messbereich nicht festgestellt werden. **Bild A.8** zeigt einen repräsentativen Restaustenitgehalttiefenverlauf für die betrachtete Verzahnung im Neuzustand.

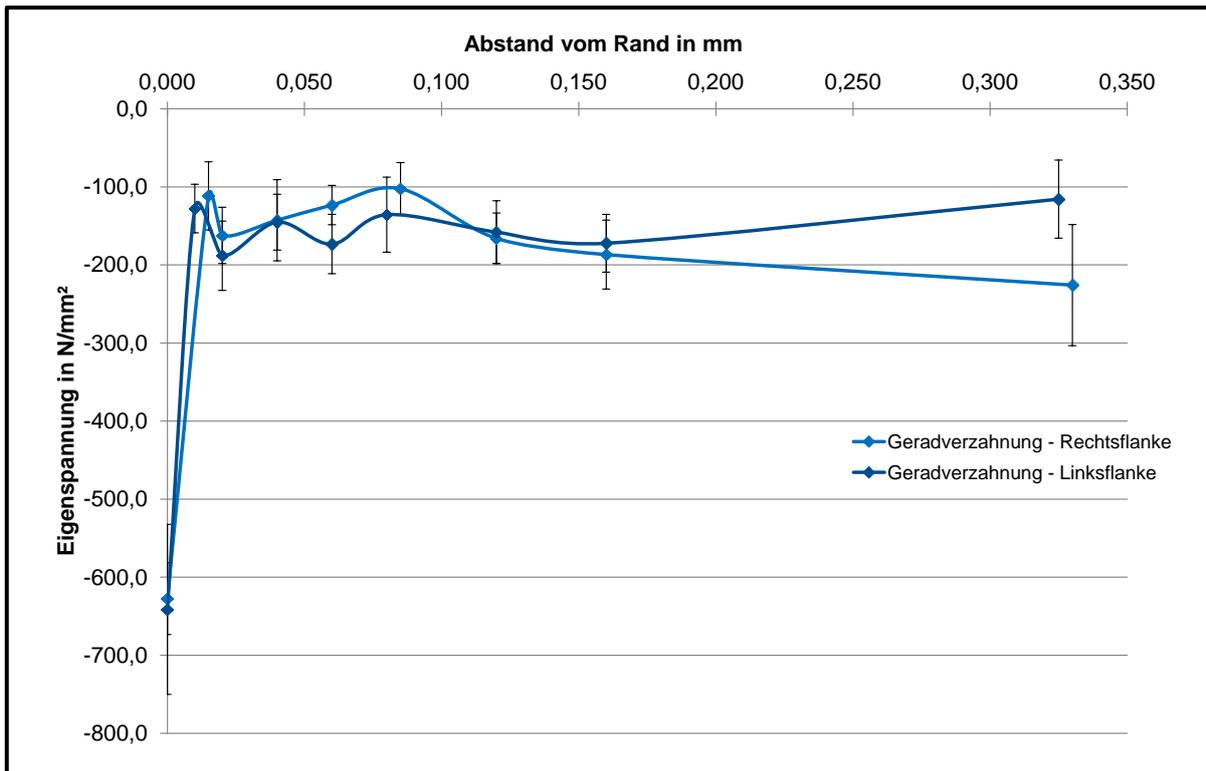


Bild A.7: Eigenspannungstiefenverlauf im Neuzustand

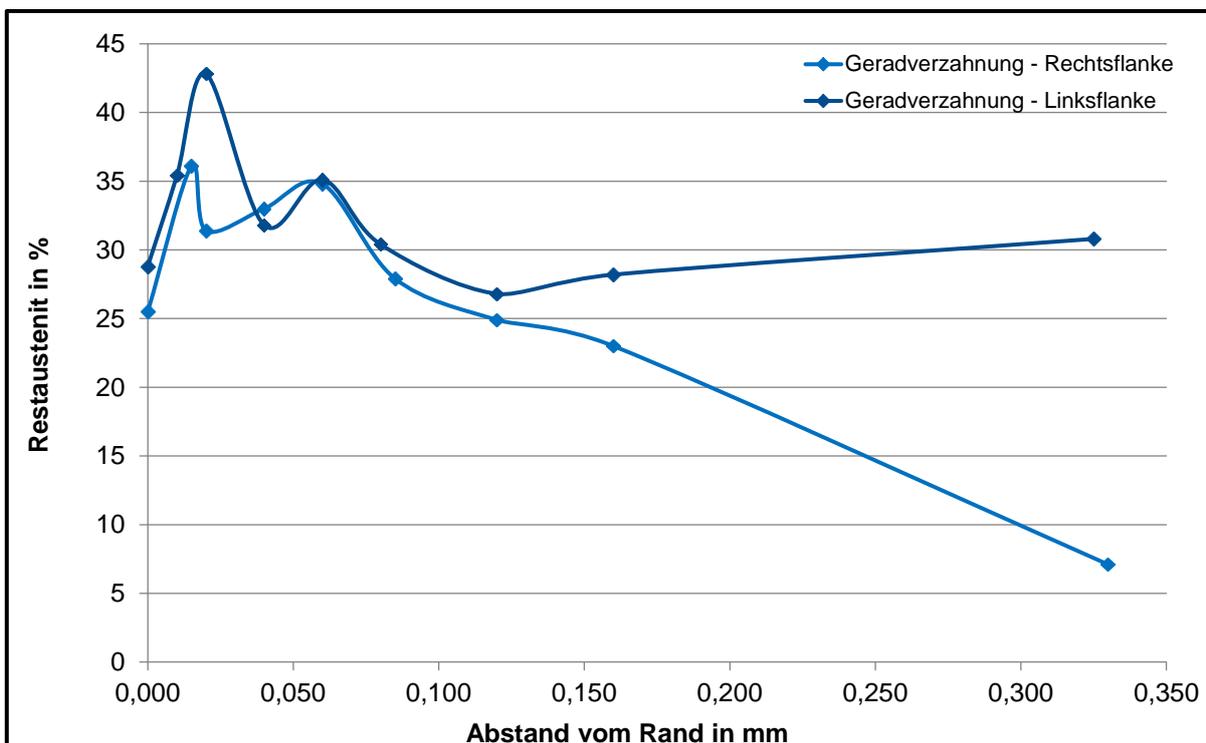


Bild A.8: Restausenitgehaltstiefenverlauf im Neuzustand

A.2.7 Barkhausenrauschamplitude – Schleifbrandschädigung

Zur Kontrolle der Qualität der durchgeführten Hartfeinbearbeitung wurden Messungen mit Hilfe eines Messgeräts vom Typ Rollscan der Fa. Stresstech durchgeführt. Dieses Gerät ermittelt die Barkhausenrauschamplitude. An der betrachteten Verzahnung erfolgt die Messung vollautomatisiert an allen Zähnen. Während der Messung wird die Verzahnung in Zahnhöhenrichtung mit einem magnetischen Sensor abgetastet. Als Ergebnis erhält man den Verlauf der maximalen Barkhausenrauschamplitude über der Zahnhöhe. Ausschlaggebende Kenngröße zur Charakterisierung einer möglichen Schleifbrandschädigung ist nach FZG/Schwiebacher [217] der maximale Rauschpegel M_{MAX} der Barkhausenrauschamplitude. Basierend auf den Arbeiten von FZG/Schwiebacher [217] wurden hier folgende Messparameter gewählt:

- Magnetisierung MAGN = 80
- Signalverstärkung GAIN = 25

FZG/Schwiebacher [217] gibt als Anhaltswert für eine leichte Schleifbrandschädigung des Werkstoff 18CrNiMo7-6 einen Wert der maximalen Barkhausenrauschamplitude $M_{max} > 50$ an.

Für die hier untersuchten Verzahnungen ergibt sich ein mittlerer Wert von 30; der Grenzwert von 50 wird nicht überschritten. Auch im Rahmen der durchgeführten Gefügeuntersuchungen konnten keine Anzeichen einer Schleifbrandschädigung im Neuzustand festgestellt werden.

A.3 Verwendete Lastkollektive

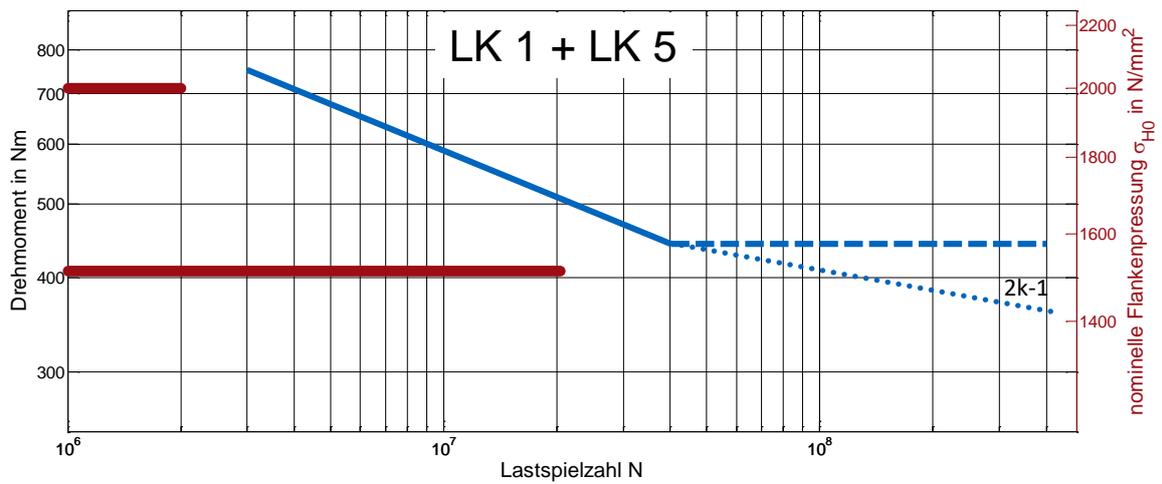


Bild A.9: Lastkollektive LK 1 und LK 5

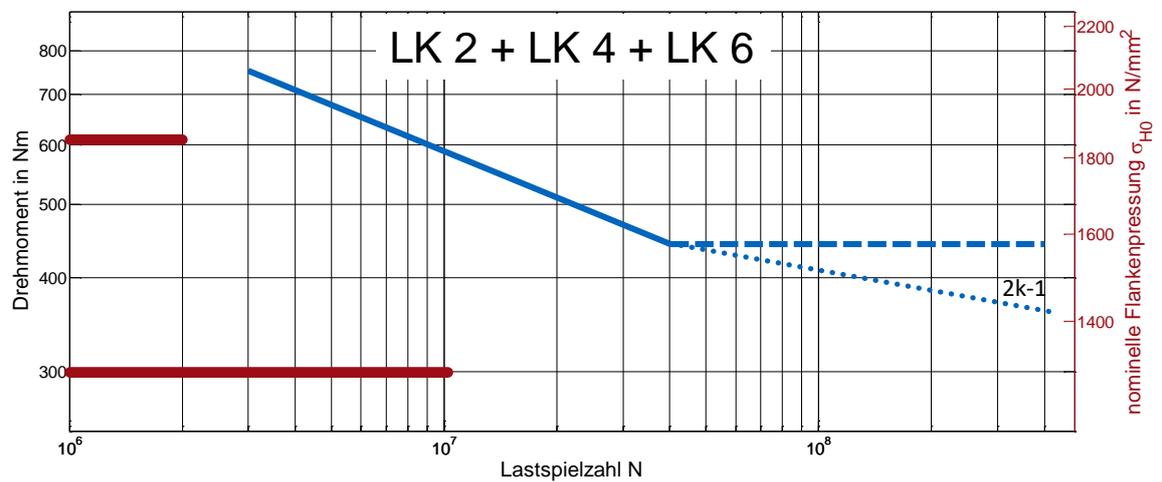


Bild A.10: Lastkollektive LK 2, LK 4 und LK 6

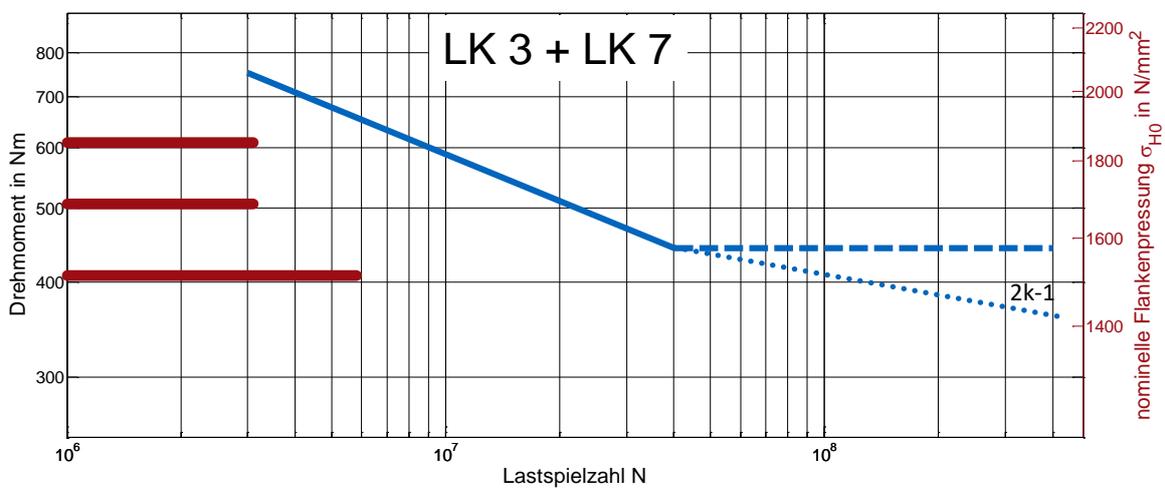


Bild A.11: Lastkollektive LK 3 und LK 7

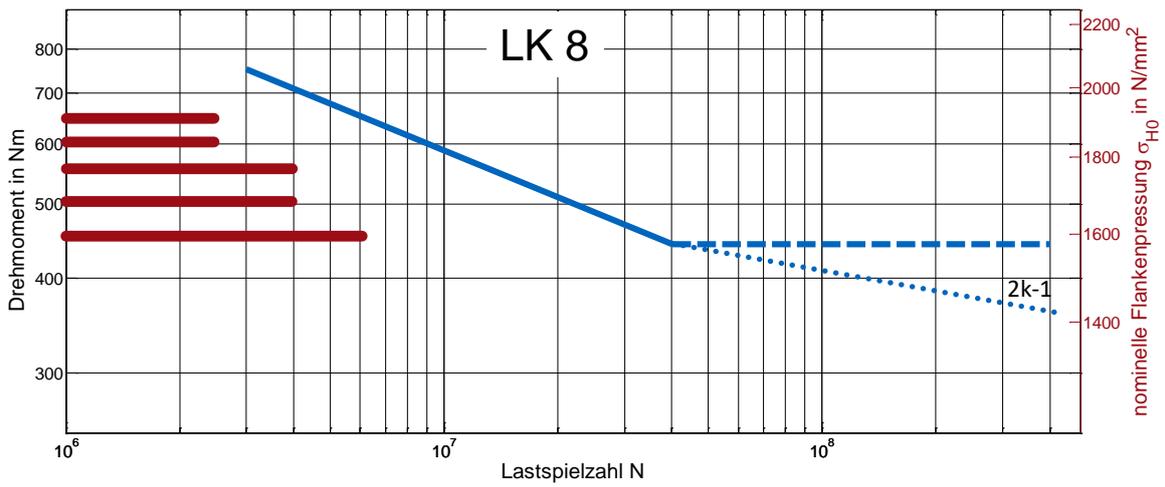


Bild A.12: Lastkollektiv LK 8

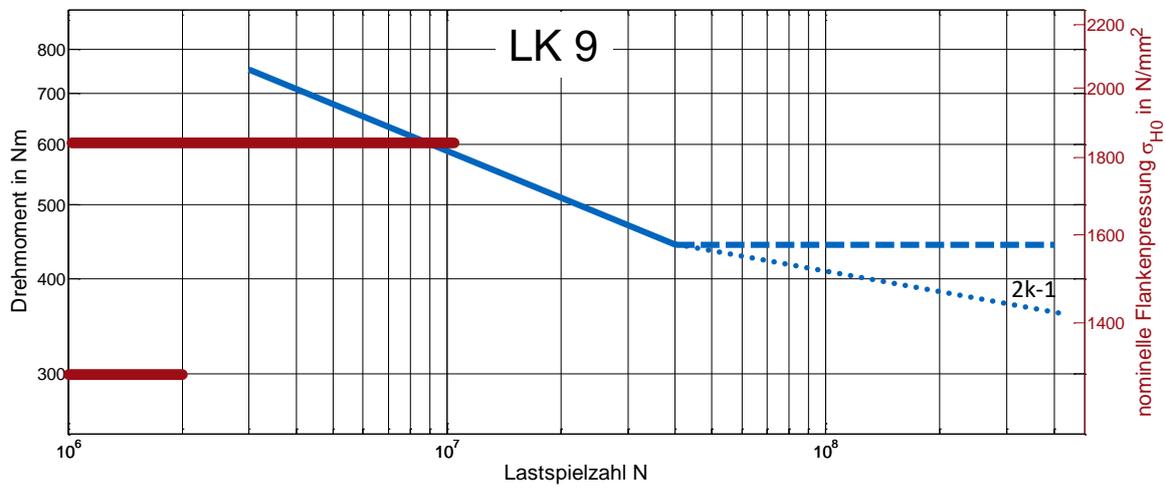


Bild A.13: Lastkollektiv LK 9

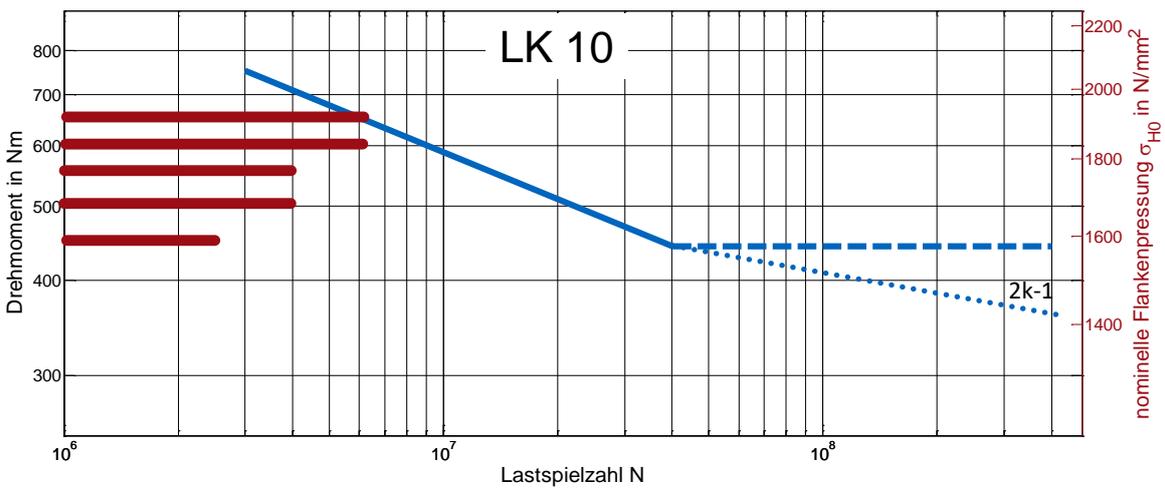


Bild A.14: Lastkollektiv LK 10

A.4 Berechnete Schadenssummen der Lastkollektivversuche

Versuch	Drehmoment am Ritzel T_1 bzw. Lastkollektiv	Schadenssummen		
		SAH nach Miner- Haibach	SAH nach Miner elementar	SAH nach Miner original
1	400 Nm	0,464	0,704	0,000
2	400 Nm	0,500	0,758	0,000
3	400 Nm	0,580	0,880	0,000
4	450 Nm	1,234	1,234	1,234
5	450 Nm	1,210	1,210	1,210
6	450 Nm	0,420	0,420	0,420
7	450 Nm	0,815	0,815	0,815
8	500 Nm	0,794	0,794	0,794
9	500 Nm	0,613	0,613	0,613
10	500 Nm	0,972	0,972	0,972
11	500 Nm	0,465	0,465	0,465
12	500 Nm	0,946	0,946	0,946
13	550 Nm	1,030	1,030	1,030
14	550 Nm	1,923	1,923	1,923
15	550 Nm	1,030	1,030	1,030
16	550 Nm	1,546	1,546	1,546
17	550 Nm	1,188	1,188	1,188
18	550 Nm	1,649	1,649	1,649
19	600 Nm	1,124	1,124	1,124
20	600 Nm	0,696	0,696	0,696
21	600 Nm	0,803	0,803	0,803
22	600 Nm	0,814	0,814	0,814
23	600 Nm	0,964	0,964	0,964
24	600 Nm	0,899	0,899	0,899
25	600 Nm	1,071	1,071	1,071
26	600 Nm	0,856	0,856	0,856
27	600 Nm	0,642	0,642	0,642
28	650 Nm	0,644	0,644	0,644
29	650 Nm	1,127	1,127	1,127
30	650 Nm	2,013	2,013	2,013
31	700 Nm	1,081	1,081	1,081
32	700 Nm	0,705	0,705	0,705
33	700 Nm	1,175	1,175	1,175
34	700 Nm	1,645	1,645	1,645
35	LK1	0,442	0,488	0,352
36	LK1	0,324	0,370	0,235
37	LK2	0,441	0,491	0,428
38	LK2	0,891	1,028	0,856
39	LK2	0,227	0,277	0,214
40	LK2	0,512	0,633	0,482
41	LK3	0,154	0,168	0,127
42	LK3	0,325	0,339	0,299
43	LK3	0,624	0,638	0,597
44	LK3	0,805	0,846	0,725
45	LK4	1,625	1,699	1,606
46	LK5	2,008	2,273	1,497
47	LK6	2,043	2,228	1,996
48	LK7	1,023	1,066	0,938
49	LK7	2,529	2,636	2,320
50	LK8	2,820	2,820	2,820
51	LK9	0,772	0,776	0,771
52	LK9	2,573	2,588	2,569
53	LK10	2,579	2,579	2,579
54	LK10	1,719	1,719	1,719

Tabelle A.2: Berechnete Schadenssummen

A.5 Statistisches Ausfallverhalten von Zahnrädern bezüglich Grübchenschäden

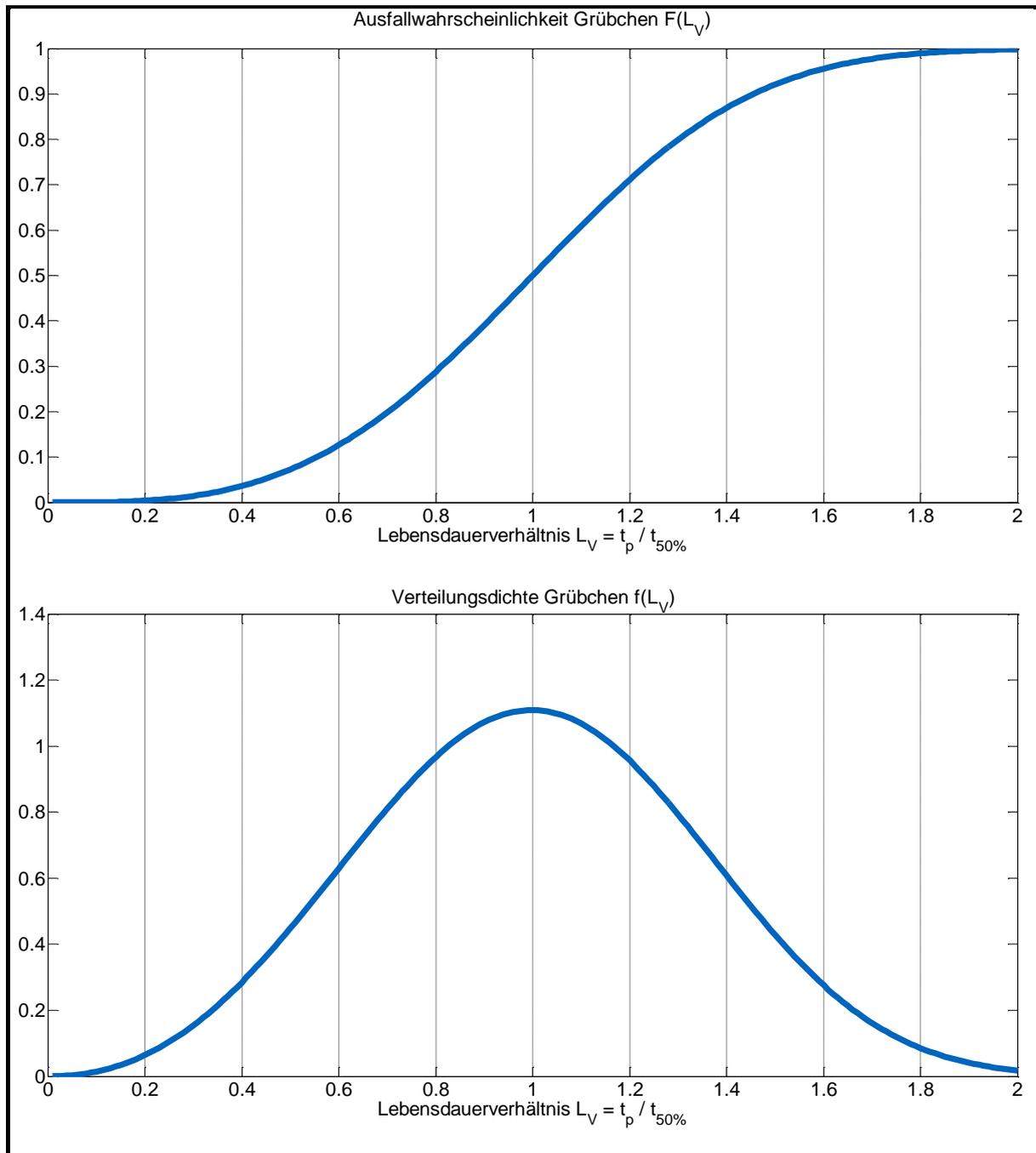
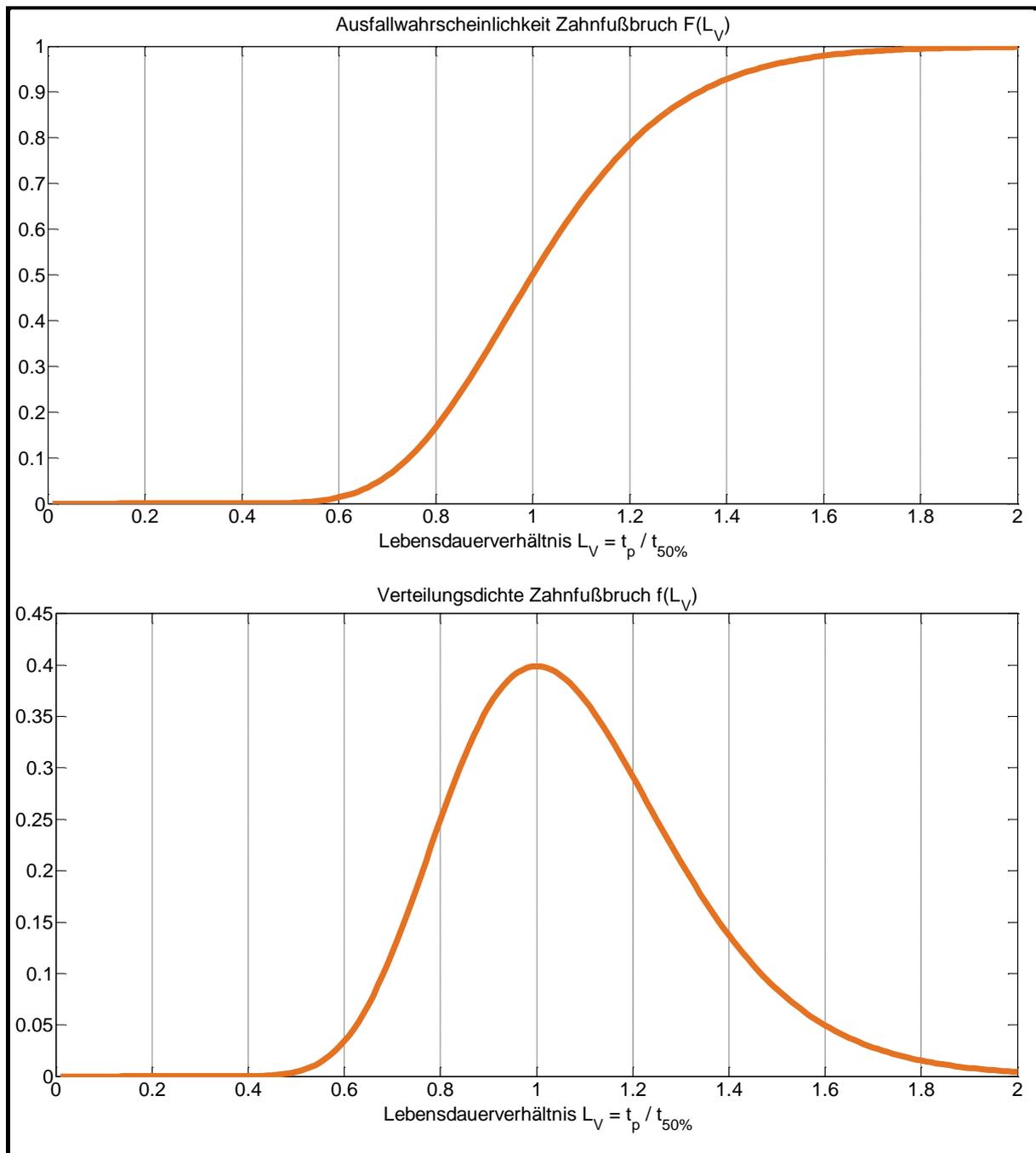


Bild A.15: Statistisches Ausfallverhalten von Zahnrädern bezüglich Grübchenschäden ($b = 3,2$)

A.6 Statistisches Ausfallverhalten von Zahnrädern bezüglich Zahnfußbruch**Bild A.16:** Statistisches Ausfallverhalten von Zahnrädern bezüglich Zahnfußbruch ($s_{\log} = 0,10$)

A.7 Zur Restlebensdauer von vorgeschädigten Komponenten – Detaillierte Auswertung der zerstörenden Analysen

Zur Untersuchung der Restlebensdauer von vorgeschädigten Komponenten werden sowohl zerstörende als auch zerstörungsfreie Prüfverfahren eingesetzt. Mit Hilfe von zerstörenden Prüfverfahren können die Werkstoff- und Gefügeeigenschaften mit großer Genauigkeit beurteilt werden. Hierzu werden folgende Prüfverfahren eingesetzt:

- Gefügebeurteilung im Schliiff
- Härtemessung im Schliiff
- Eigenspannungsmessung im Röntgendiffraktometer
- Restaustenitgehaltmessung im Röntgendiffraktometer
- FIB: Focused Ion Beam (nahezu zerstörungsfrei), Untersuchung des Werkstoffs in der Randzone (extern bei NMI, Reutlingen an 5 Zahnrädern)
- SNMS: Sekundärneutralteilchenmassenspektrometrie, tiefenabhängiger Verlauf der Elementkonzentrationen (extern bei NMI, Reutlingen an 5 Zahnrädern)

Bei den nachfolgenden Auswertungen werden überwiegend Versuche im Zeitfestigkeitsgebiet betrachtet, da nur dort mit einem Ausfall der Verzahnung durch Grübchen zu rechnen ist. Referenzwert für die Berechnung der erreichten Lebensdauer in % bis zum Ausfall ist die im Rahmen der Referenzversuche ermittelte Wöhlerlinie für Grübchenschäden. Aufgrund der üblichen Streuungen der Versuchspunkte untereinander ist daher die Definition der Schädigung hier nur als Hilfe zur Abschätzung der Schädigung und nicht als Absolutwert zu verstehen.

Zur besseren Einordnung der Ergebnisse werden z.T. auch Durchläufer, d.h. Versuchsläufe bei denen nach $5 \cdot 10^7$ Lastwechseln noch kein Schaden eingetreten ist, betrachtet. Hier ist zu beachten, dass die Versuche im Dauerfestigkeitsgebiet auf relativ hohen Lastniveaus durchgeführt wurden. Für die betrachteten Durchläufer ergeben sich daher nach der konservativen Schadensakkumulationshypothese Miner-Haibach mit absinkendem Dauerfestigkeitsast Schädigungssummen D im Bereich von ca. 0,5. Es kann daher nicht ausgeschlossen werden, dass diese Versuchsläufe bei längerer Laufzeit zu einem Grübchenschaden geführt hätten.

Nachfolgend werden für die einzelnen Analysemethoden zunächst die Ergebnisse der Referenzversuche umfassend dargestellt. Diese werden anschließend mit den Lastkollektivversuchen verglichen. Wenn nicht anders angegeben, werden dabei nur die untersuchten Ritzel betrachtet, da bei beiden betrachteten Verzahnungen nur an diesen Schäden aufgetreten sind. Darüber hinaus wird auch auf die Lastabhängigkeit der jeweiligen Kenngrößen eingegangen sowie ihre qualitative und quantitative Eignung zur Charakterisierung der Restlebensdauer von vorgeschädigten Zahnrädern bewertet.

A.7.1 Metallographie

Im Rahmen der zerstörenden Analysen wurden metallografische Untersuchungen durchgeführt. Hierbei wurden ungeätzte und geätzte Schliiffbilder bei unterschiedlichen Schädigungsgraden angefertigt. Auch die Werkstoffzusammensetzung wurde untersucht. Insgesamt können folgende Feststellungen mit zunehmendem Schädigungsgrad getroffen werden:

- Zunahme von dunklen, randnahen Bereichen im geätzten Schliiffbild (Intensität ist lastabhängig, **Bild A.18**)

- Oberflächennahe, zum Wälzpunkt hin orientierte, zunehmende Rissbildung bis hin zur Bildung von Ausbrüchen / Grübchen am Ritzel (siehe **Bild A.17**)
- Oberflächennahe, vom Wälzpunkt weg orientierte, zunehmende Rissbildung am Rad
- Das Kerngefüge bleibt unverändert mit zunehmender Zahnflankenschädigung
- Die Werkstoffzusammensetzung im Kern bleibt unverändert (Die chemische Zusammensetzung der Randzone wurde im Rahmen der FIB/SNMS-Analysen untersucht)

Referenzversuche

Im Rahmen der durchgeführten Referenzversuche wurden umfangreiche metallographische Untersuchungen bei unterschiedlichen Schädigungszuständen durchgeführt. Unterschieden werden folgende Zustände:

- Ungelaufener Neuzustand (Schädigung = 0 %)
- Zustand nach Einlauf (Schädigung \approx 0 %)
- Verschiedene Schädigungszustände bis hin zum Ausfall durch Grübchenschäden (Schädigung = xx % bis 100 %)

Bild A.17 zeigt repräsentative Schliffbilder im ungeätzten Zustand für Ritzel im Neuzustand, nach dem Einlauf sowie bei 25 %, 50 %, 75 % und 100 % Schädigung. Bei den geschädigten Flanken ist die für Grübchenschäden typische zum Wälzpunkt hin orientiert Rissbildung erkennbar. Im Neuzustand sowie nach dem Einlauf sind keine Risse erkennbar. Insgesamt nimmt sowohl die Anzahl der Risse als auch die Risslänge mit zunehmender Schädigung tendenziell zu. Für die betrachtete Geradverzahnung liegen die maximalen Risslängen bei ca. 40...50 μm . Bei hohen Schädigungswerten sind bereits erste Ausbrüche an der Flanke erkennbar. Diese können exponentiell zunehmen und letztendlich zu einem Grübchen führen.

Bild A.18 zeigt repräsentative Schliffbilder im geätzten (Nital, 0,3 %, 20s) Zustand für Ritzel im Neuzustand, nach dem Einlauf sowie bei 25 %, 50 %, 75 % und 100 % Schädigung. Nach dem Einlauf zeigt sich keine Veränderung der Randzone. Bei den geschädigten Verzahnungen ist eine Zunahme von dunklen, randnahen Bereichen erkennbar. Diese sind vor allem im Bereich der vorhandenen Risse zu finden und entstehen vermutlich durch einen lokal begrenzten Wärmeeintrag in der Flanke, welcher zu einer beginnenden Gefügeumwandlung führt.

Lastabhängigkeit

Mit zunehmender Last nimmt tendenziell die Intensität der Rissbildung sowie der dunklen, randnahen Zonen zu. Verlässliche Aussagen hierzu sind jedoch anhand der durchgeführten Untersuchungen nicht möglich. Die untersuchten Durchläufer zeigten hinsichtlich der Ausprägung der Rissbildung sowie der Intensität der dunklen, randnahen Zonen die geringsten Werte.

Lastkollektivversuche

Die Beobachtungen der durchgeführten Referenzversuche konnten anhand der Lastkollektivversuche bestätigt werden. Besondere Einflüsse durch die Lastkollektivbelastung konnten nicht festgestellt werden.

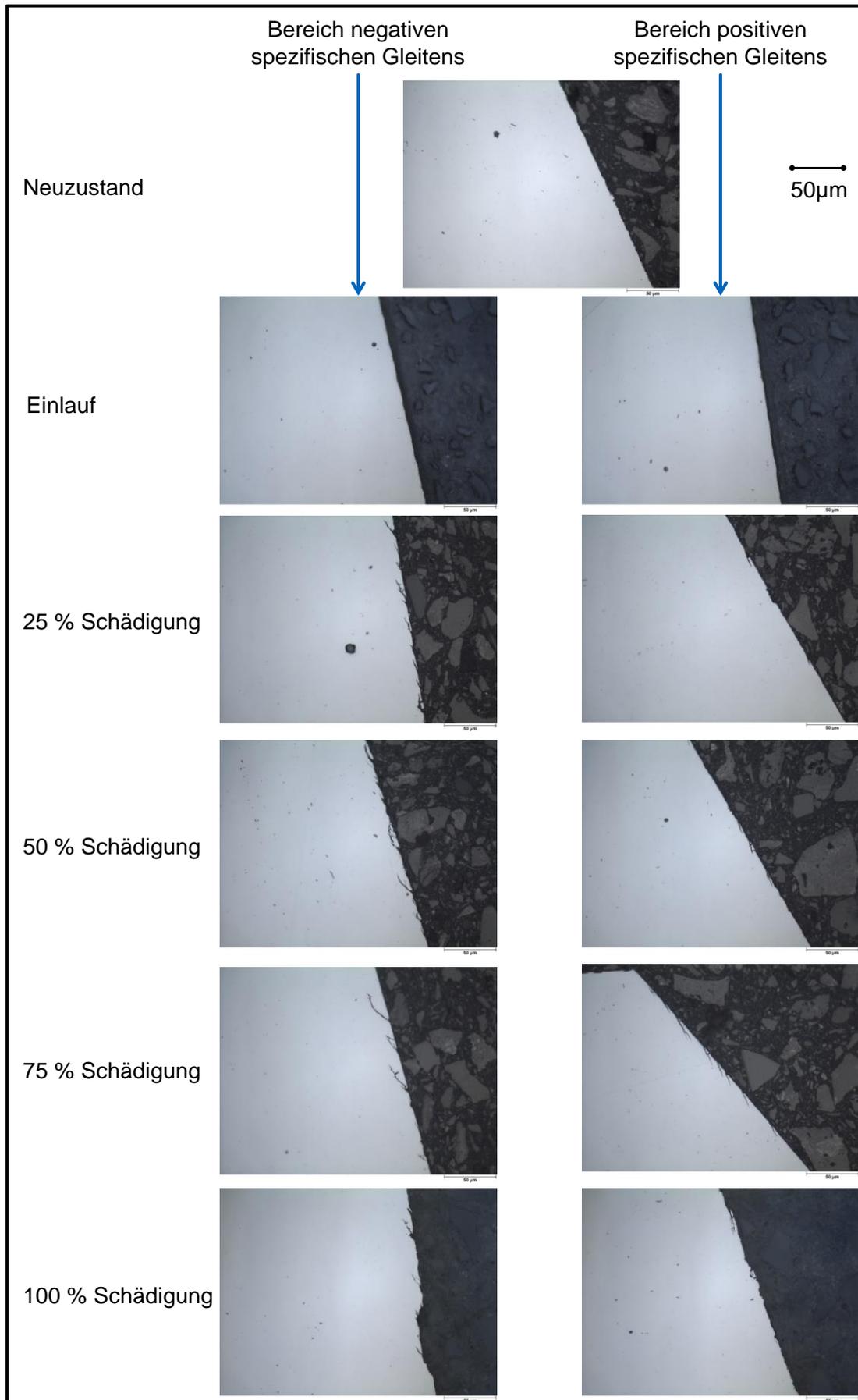


Bild A.17: Übersicht Metallographie: ungeätzte Schliffe (Referenzversuche)

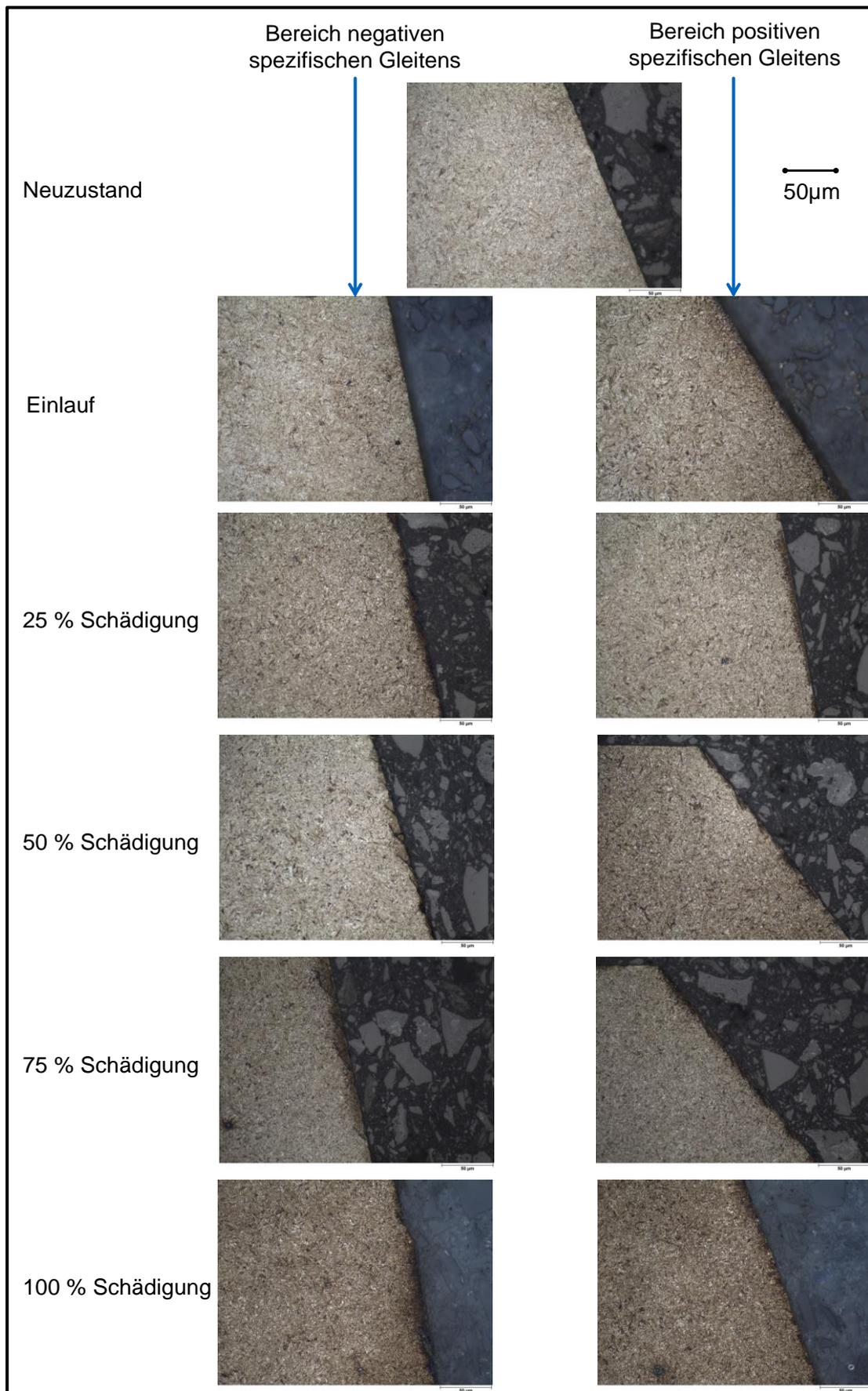


Bild A.18: Übersicht Metallographie: geätzte Schlitze (Referenzversuche)

Eignung zur Charakterisierung der Restlebensdauer von vorgeschädigten Komponenten

Eine allgemeingültige, zahlenmäßige Charakterisierung des Schädigungsgrads mit Hilfe metallographischer Untersuchungen ist nur schwer möglich, da die metallographisch feststellbaren Effekte zum einen last- und baugrößenabhängig sind und zum anderen nur schwer quantitativ beurteilt werden können. Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen hat sich zudem gezeigt, dass die Veränderung des Randgefüges stark vom Ausgangszustand beeinflusst wird. Einzig eine vollständig rissfreie Zahnflanke kann im Allgemeinen als Hinweis auf einen ungeschädigten Zustand gesehen werden.

A.7.2 Härtetiefenverläufe

An den untersuchten Verzahnungen wurden Härtetiefenverläufe im Schliff mittels einer Vickers-Härteprüfung ermittelt. Mit zunehmender Schädigung zeigt sich qualitativ eine Abnahme der oberflächennahen Härtewerte.

Referenzversuche

In **Bild A.19** ist eine Übersicht der gemittelten Härtetiefenverläufe im Bereich negativen spezifischen Gleitens für unterschiedliche Schädigungszustände dargestellt. Betrachtet wurden hierbei alle im Rahmen der Referenzversuche durchgeführten Messungen. Aufgrund des zerstörenden Charakters der Prüfungen ergeben sich bei der Durchführung der Messungen kaum Streuungen an einem Zahnrad. Deutlicher sind allerdings die Streuungen zwischen den betrachteten Zahnradern vergleichbaren Schädigungszustands messbar. Diese liegen jedoch aufgrund gleicher Werkstoffcharge sowie Härtung in einer Ofenreise in einem akzeptablen Rahmen. Die Standardabweichung des oberflächennächsten Punktes beträgt bei den betrachteten Verzahnungen ca. 12 HV im Neuzustand. In der Werkstofftiefe ist keine Veränderung der Härtewerte mit zunehmender Laufzeit erkennbar. Auch die Einsatzhärtungstiefe CHD_{550} ändert sich nur geringfügig mit zunehmender Schädigung.

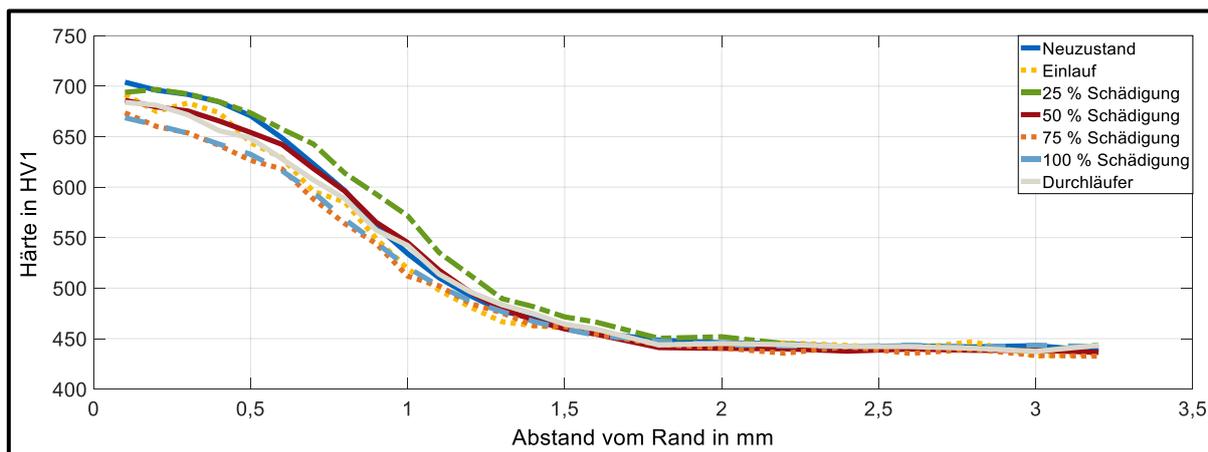


Bild A.19: Gemittelte Härtetiefenverläufe zu unterschiedlichen Schädigungszuständen

Bild A.20 zeigt einen Ausschnitt aus **Bild A.19** mit den relevanten Härtetiefenverläufen im oberflächennahen Bereich. Hier erkennt man einen Abfall der oberflächennahen Härtewerte mit zunehmender Schädigung um ca. 4 % beziehungsweise ca. 30 HV. Diese Abnahme trat bei allen betrachteten Verzahnungen auf. Durchläufer zeigen hier (trotz größerer absoluter Laufzeiten) signifikant höhere Werte als Zahnflanken mit 100 % Schädigung. Allerdings ist bereits nach dem Einlauf eine Abnahme der Härtewerte festzustellen.

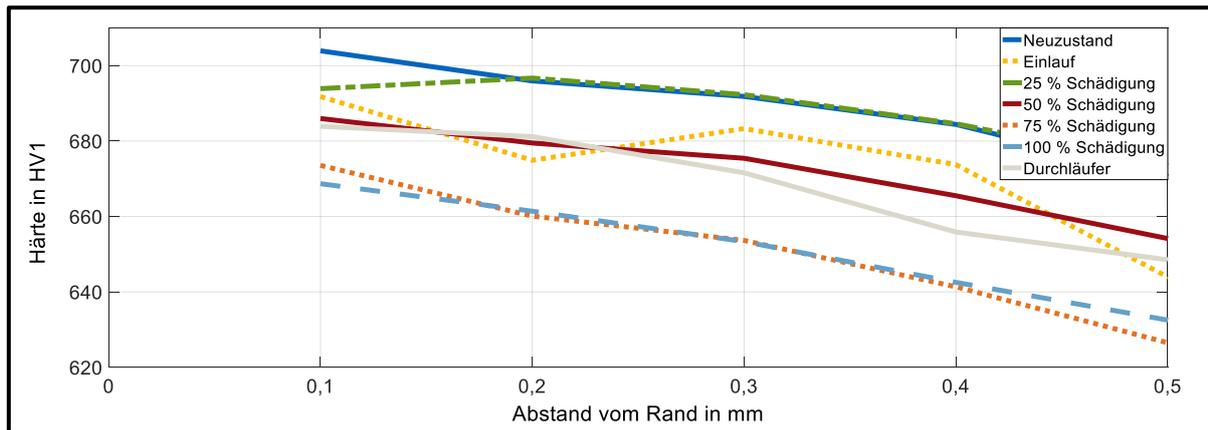


Bild A.20: Gemittelte Härtetiefenverläufe zu unterschiedlichen Schädigungszuständen (Detail)

Ergänzend wurden die Härtetiefenverläufe auch im Bereich des Wälzkreises sowie im Bereich positiven spezifischen Gleitens ermittelt. **Bild A.21** zeigt den Einfluss des spezifischen Gleitens auf die im Rahmen der Referenzversuche ermittelten Härtetiefenverläufe für 100 % Schädigung. Am Wälzkreis ergeben sich um ca. 10 HV1 höhere Werte im Vergleich zu den Bereichen negativen und positiven spezifischen Gleitens. Dieser Unterschied nimmt mit zunehmender Schädigung zu.

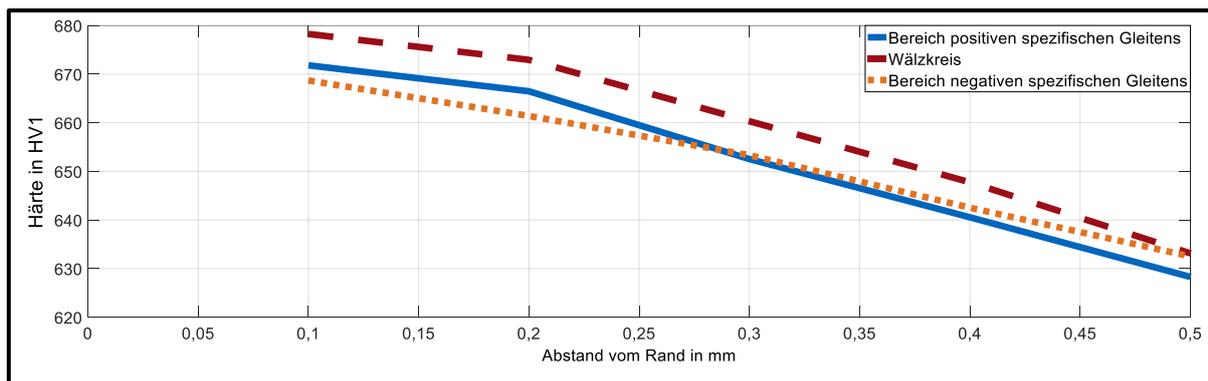


Bild A.21: Gemittelte Härtetiefenverläufe in unterschiedlichen Flankenbereichen (100% Schädigung)

Eignung zur Charakterisierung der Restlebensdauer von vorgeschädigten Komponenten

Basierend auf den durchgeführten Messungen konnte eine signifikante, qualitative Korrelation zwischen oberflächennahem Härtewert und dem vorhandenen Schädigungsgrad hergestellt werden, welche eine rechnerische Bestimmung des Schädigungsgrades basierend auf dem Härtetiefenverlauf zulässt. Diese Erkenntnis ist jedoch nur eingeschränkt auf praxisnahe Untersuchungen übertragbar. Die Abnahme der oberflächennahen Härtewerte bewegt sich im Rahmen weniger Prozentpunkte. In der Regel streuen die Werte bereits im Neuzustand um diesen Wert. Da bei einer zerstörenden Prüfung keine Analyse des konkreten Bauteils im Neuzustand und im geschädigten Zustand erfolgen kann, ist man hier auf Mittelwerte der Kenngrößen im Neuzustand angewiesen. Für einzelne Bauteile ist somit keine sichere Abschätzung der Restlebensdauer möglich.

A.7.3 Eigenspannungstiefenverläufe

An den untersuchten Verzahnungen wurden Eigenspannungstiefenverläufe mittels eines Röntgendiffraktometers vom Typ Seifert XRD 3003 PTS ermittelt.

Referenzversuche

Die gemessenen Verläufe sind typisch für die untersuchten, einsatzgehärteten Verzahnungen und zeigen innerhalb der untersuchten Werkstofftiefen ausschließlich Druckeigenspannungen.

Bild A.22 zeigt gemittelte Eigenspannungstiefenverläufe im Neuzustand, nach dem Einlauf sowie bei 25%, 50%, 75% und 100% Schädigung (100% Schädigung = Ausfall durch Grübchen, Messung an ungeschädigten Zähnen) sowie für untersuchte Durchläufer.

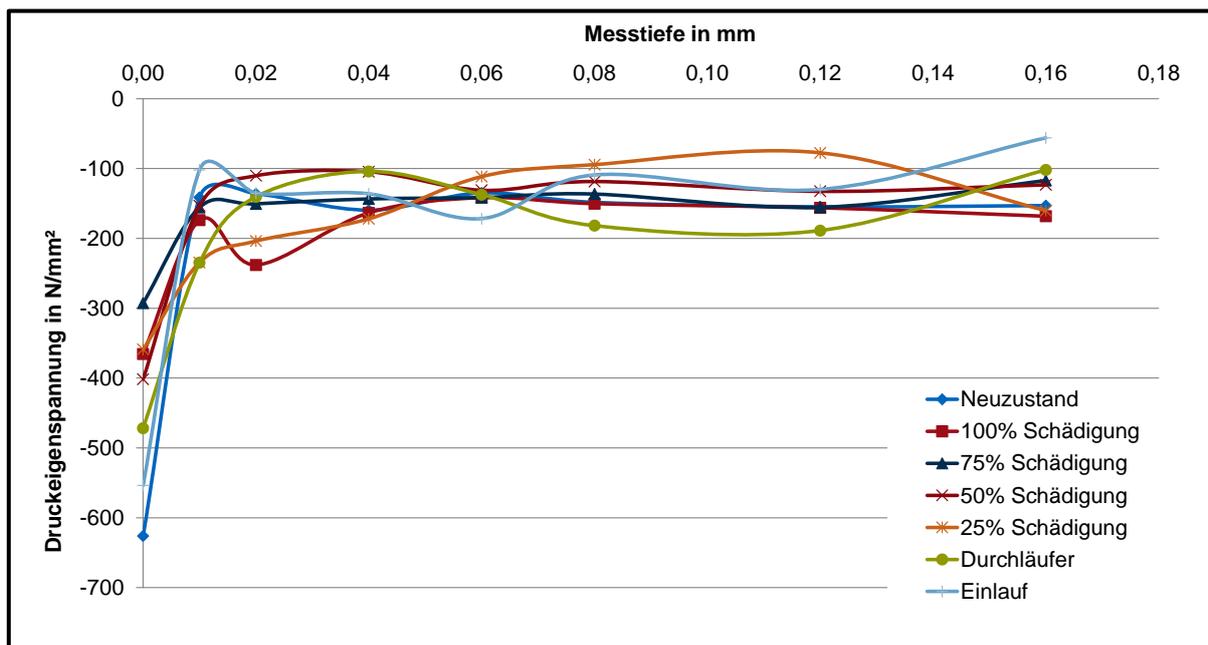


Bild A.22: Eigenspannungstiefenverlauf im Neuzustand & bei unterschiedlichen Schädigungsgraden

Signifikante Unterschiede zwischen den gemessenen Eigenspannungen sind lediglich an der Oberfläche erkennbar (siehe **Bild A.23**). Bei durch Grübchen geschädigten Zahnrädern ist nur mehr ein wenig ausgeprägtes Druckeigenspannungsmaximum an der Oberfläche vorhanden.

Insgesamt zeigen alle gelaufenen Zahnräder im Vergleich zum Neuzustand geringere Druckeigenspannungsmaxima. Durchläufer zeigen dabei trotz der höheren Laufzeiten größere Druckeigenspannungen an der Oberfläche als Versuche im Zeitfestigkeitsgebiet. Auch Messungen nach dem Einlauf belegen weiterhin hohe Werte der Druckeigenspannungen an der Oberfläche. In der Werkstofftiefe sind keine signifikanten Unterschiede zwischen Zahnrädern im Neuzustand und geschädigten Zahnrädern erkennbar. Dieser Druckeigenspannungsabbau an der Oberfläche wird bereits von Schönnebeck [210] und Elstorpff [80] beschrieben. Die Gründe dafür liegen unter anderem im fortschreitenden Risswachstum, welches an der Oberfläche einen teilweisen Abbau der Eigenspannungen ermöglicht. Der Abbau der oberflächennahen Eigenspannungen kann also mit einer fortschreitenden Werkstoffermüdung begründet werden. Eine zahlenmäßige Quantifizierung der Abnahme ist jedoch basierend auf den durchgeführten Untersuchungen nicht möglich.

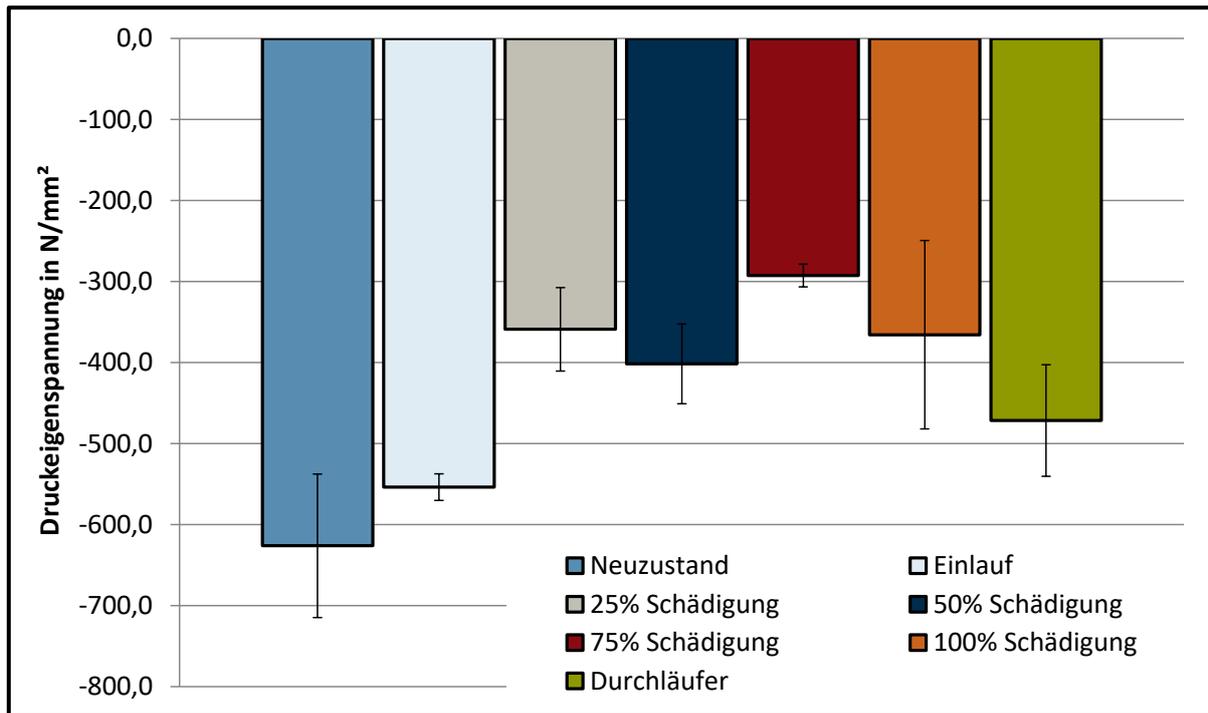


Bild A.23: Druckeigenspannungen an der Oberfläche im Neuzustand & bei unterschiedlichen Schädigungsgraden

Eignung zur Charakterisierung der Restlebensdauer von vorgeschädigten Komponenten

Eine eindeutige quantitative Charakterisierung des fortschreitenden Schädigungsgrades mit Hilfe der röntgenografisch ermittelten Eigenspannungswerte ist aufgrund der hohen Messstreuungen für einzelne Zahnräder in der Regel nicht möglich. Zusätzlich liegen insgesamt nur wenige aussagekräftige Messungen im Bereich zwischen Neuzustand und 100% Schädigung vor. Allerdings kann eine qualitative Bewertung des Schadens erfolgen, da eine zunehmende Zahnflankenermüdung mit einer Abnahme der oberflächennahen Druckeigenspannungen einhergeht.

A.7.4 Analyse des Restaustenitgehalts

An den untersuchten Verzahnungen wurden Restaustenitgehaltstiefenverläufe mittels eines Röntgendiffraktometers vom Typ Seifert XRD 3003 PTS ermittelt.

Referenzversuche

Im Zuge der Eigenspannungsmessungen mittels Röntgendiffraktometer wurde auch der Restaustenitgehalt gemessen. **Bild A.24** zeigt den Tiefenverlauf und **Bild A.25** die Oberflächenwerte des gemittelten Restaustenitgehalts für Zahnräder im Neuzustand, nach dem Einlauf sowie bei 25%, 50%, 75% und 100% Schädigung (= Ausfall durch Grübchen, Messung an ungeschädigten Zähnen) sowie für untersuchte Durchläufer.

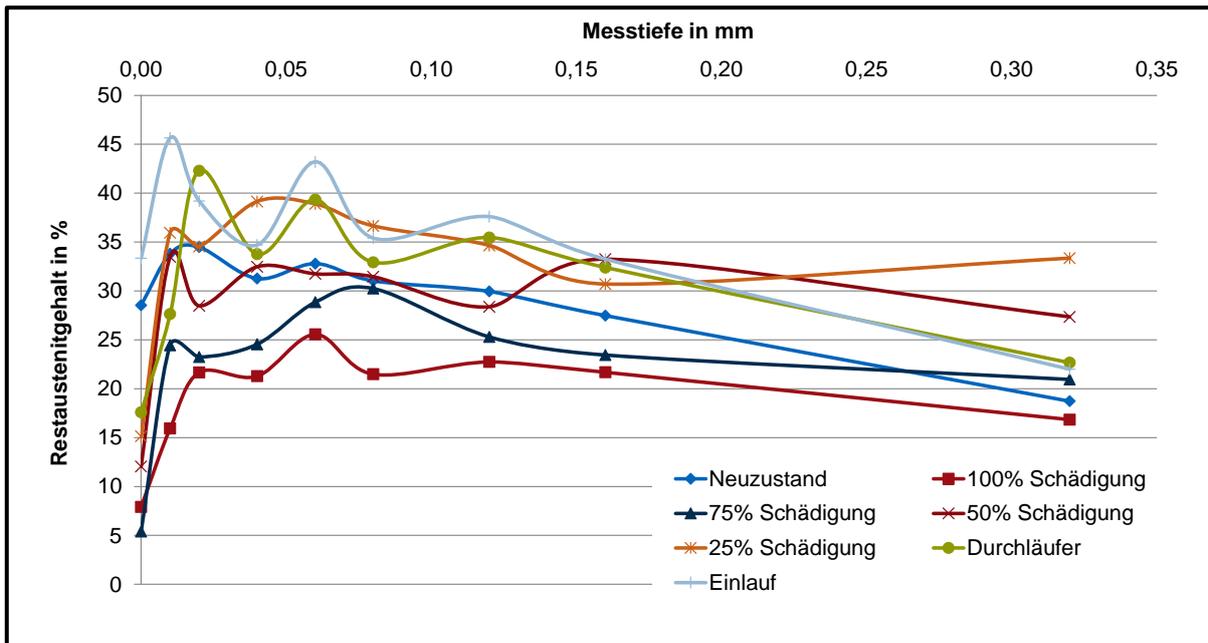


Bild A.24: Tiefenverlauf Restaustenitgehalt im Neuzustand und bei unterschiedlichen Schädigungen

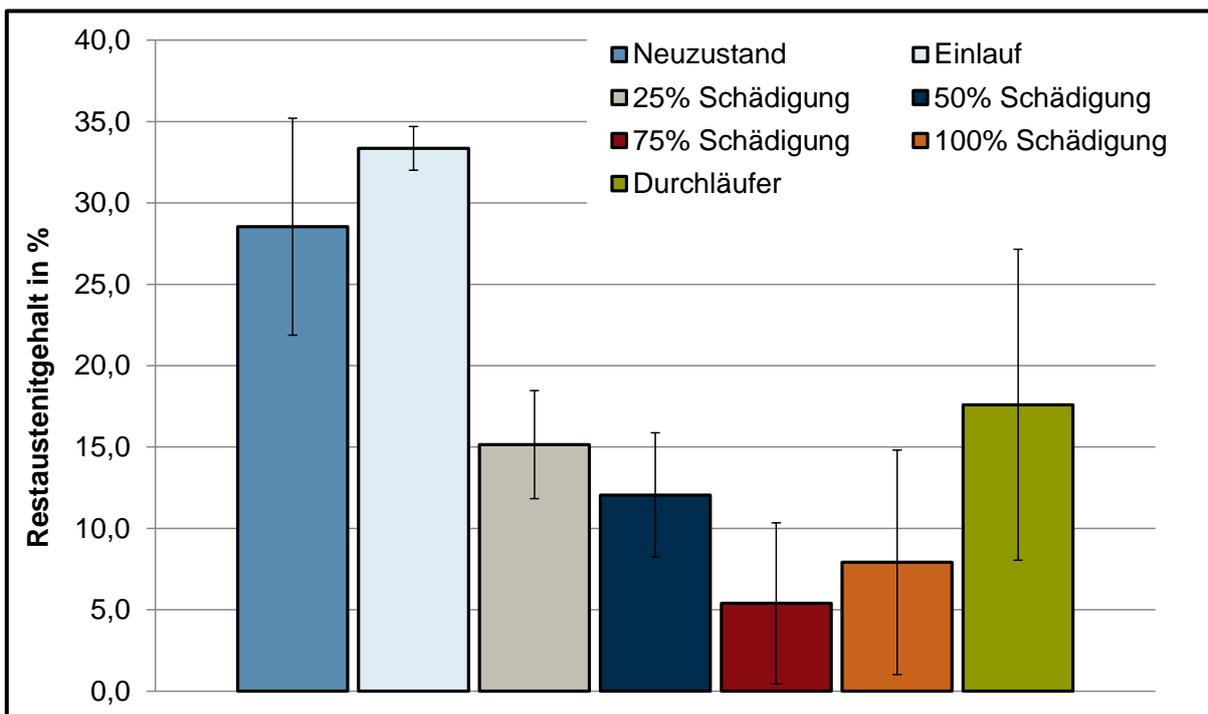


Bild A.25: Oberflächenwerte Restaustenitgehalt im Neuzustand und bei unterschiedlichen Schädigungen

Erkennbar ist, dass sich der Restaustenitgehalt bis in größere Werkstofftiefen verändert. Mit zunehmender Schädigung werden jedoch vor allem die Messwerte an der Oberfläche beeinflusst. Der Restaustenitgehalt an der Oberfläche liegt bei allen gelaufenen Zahnrädern deutlich unterhalb des Wertes im Neuzustand. Durchläufer zeigen dabei trotz der höheren Laufzeiten einen höheren Restaustenitgehalt an der Oberfläche als Versuche im Zeitfestigkeitsgebiet. Nach dem Einlauf zeigen sich ähnlich hohe Werte des Restaustenitgehalts wie im Neuzustand. Elstorpff [80] hat bereits Betrachtungen des Restaustenitgehalts im Rahmen von Laufversuchen zur Zahnflankentragfähigkeit durchgeführt. Er wertete dazu jedoch nur Schlibfbilder aus.

Im Rahmen dieser Arbeiten konnte im Gegensatz zu den hier durchgeführten Untersuchungen keine Abnahme des Restaustenitgehalts mit zunehmender Laufzeit festgestellt werden. Gründe für die hier erkennbare deutliche Abnahme des oberflächennahen Restaustenits könnten in einer wärme- und/oder spannungsinduzierten Umwandlung des Restaustenits mit zunehmender Laufzeit liegen. Dies würde sich gut mit den durchgeführten metallographischen Untersuchungen decken.

Eignung zur Charakterisierung der Restlebensdauer von vorgeschädigten Komponenten

Eine eindeutige quantitative Charakterisierung des fortschreitenden Schädigungsgrades mit Hilfe der röntgenografisch ermittelten Restaustenitgehaltswerte ist aufgrund der hohen Messstreuungen für einzelne Zahnräder in der Regel nicht möglich. Zusätzlich liegen insgesamt nur wenige aussagekräftige Messungen im Bereich zwischen Neuzustand und 100% Schädigung vor. Allerdings kann eine qualitative Bewertung des Schadens erfolgen, da eine zunehmende Zahnflankenermüdung mit einer Abnahme der Werte des Restaustenitgehalts vor allem im oberflächennahen Bereich einhergeht.

A.7.5 FIB/SNMS-Analysen

Ergänzend zu den bisher vorgestellten zerstörenden Analysemethoden, welche an der Forschungsstelle durchgeführt wurden, wurden am NMI Reutlingen FIB- und SNMS-Analysen an gelaufenen Zahnflanken durchgeführt. Bei diesen Analysen handelt es sich um Methoden der Grenzflächen- und Mikrostrukturanalytik. Mit Hilfe des Focused Ion Beam (FIB) können lokal begrenzte Mikroquerschnitte (siehe **Bild A.26**) an der Zahnflanke erzeugt werden [76]. Durch den Einsatz des Ionenstrahls sowie einer aufgebrauchten Schutzschicht erfolgt der Materialabtrag äußerst materialschonend. In diesen Mikroquerschnitten kann anschließend eine Analyse des oberflächennahen Gefüges sowie der Grenzfläche mit Hilfe des Rasterelektronenmikroskops durchgeführt werden. Zusätzlich wird mit Hilfe der Sekundär-Neutralteilchen-Massenspektrometrie (SNMS) die Materialzusammensetzung direkt an der Zahnflankenoberfläche untersucht.

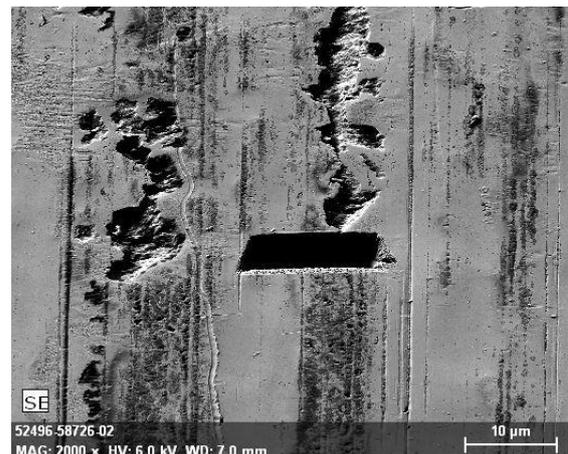


Bild A.26: FIB - Mikroquerschnitt

Referenzversuche

Im Rahmen der Referenzversuche wurden FIB- und SNMS-Analysen an jeweils einer Zahnflanke im Neuzustand, bei 25 %, 50 %, 75 % sowie 100 % Schädigung durchgeführt. Die Mikroquerschnitte wurden im Bereich negativen spezifischen Gleitens angefertigt. Die Ergebnisse der FIB-Analysen belegen folgendes:

- Heterogener Zustand der Zahnflankenoberfläche (Bereiche mit starker Zerrüttung bzw. einzelnen Ausbrüchen liegen neben glatten Bereichen).
- Feinkörniges Gefüge direkt unterhalb der Oberfläche bei allen untersuchten Zahnrädern (auch Neuzustand).

- Der Anteil an feinkörnigem Gefüge direkt unterhalb der Oberfläche nimmt mit zunehmendem Schädigungsgrad zu. Risse und Ausbrüche sind meist von feinkörnigem Gefüge umgeben (siehe **Bild A.27**). Das feinkörnige Gefüge begünstigt im Allgemeinen die Bildung von Rissen.

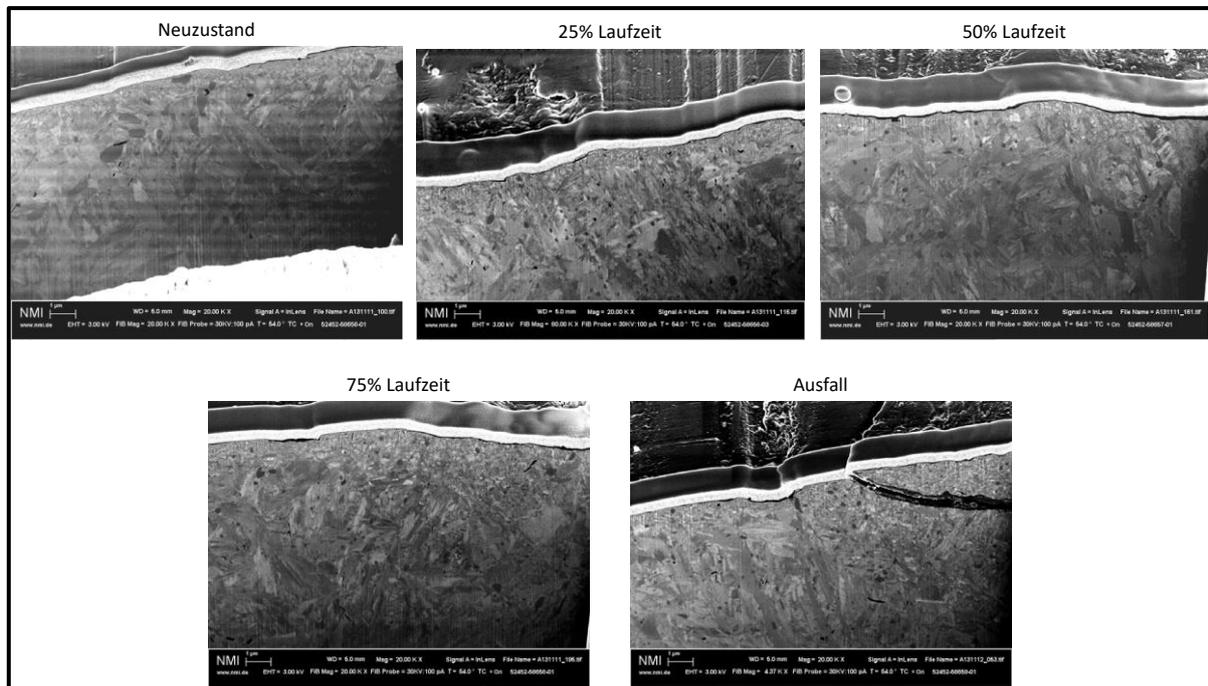


Bild A.27: FIB/SEM-Analysen Referenzversuche

Hinsichtlich der Elementkonzentration an der Oberfläche, welche mit Hilfe der SNMS-Analyse ermittelt wurden, zeigt das Oberflächenspektrum der gelaufenen Zahnflanken die typischen „Triboelemente“ wie P und S, welche auf das verwendete EP-Additiv Anglamol 99 zurückzuführen sind. Statistisch abgesicherte Tendenzen der Elementkonzentrationen mit zunehmenden Schädigungsgrad konnten nicht festgestellt werden.

Eignung zur Charakterisierung der Restlebensdauer von vorgeschädigten Komponenten

Die durchgeführten FIB- und SNMS-Analysen haben einen rein qualitativen Charakter und dienen dem besseren Verständnis der Vorgänge im Werkstoff bei einer fortschreitenden Wälzermüdung. Die Ergebnisse zeigen mikrostrukturelle Veränderungen in Form einer Zunahme feinkörnigen Gefüges. Eine quantitative Charakterisierung der Restlebensdauer von vorgeschädigten Komponenten ist bisher nicht möglich.

A.8 Zur Restlebensdauer von vorgeschädigten Komponenten - Detaillierte Auswertung der zerstörungsfreien Analysen

Zur Untersuchung der Restlebensdauer von vorgeschädigten Komponenten werden auch zerstörungsfreie Prüfverfahren eingesetzt. Die zerstörungsfreien Prüfverfahren bieten bei der Gewinnung der Erkenntnisse zum Werkstoffverhalten in Abhängigkeit der Laufzeit den Vorteil, dass damit dasselbe Zahnrad zu unterschiedlichen Zeitpunkten während des Versuchslaufs geprüft werden kann. Als zerstörungsfreie Prüfverfahren kommen folgende zum Einsatz:

- Rauheitsmessung
- 3D-Vermessung der Zahnflankentopologie
- Oberflächenhärtemessung
- ROLLSCAN: Barkhausenrauschen
- 3MA: Mikromagnetischer Multiparameter Mikrostruktur- und Spannungs-Analysator

Nachfolgend werden die durchgeführten Untersuchungen beschrieben. Dabei wird besonderes Augenmerk auf diejenigen Verfahren gelegt, welche eine Bestimmung der Restlebensdauer vorgeschädigter Bauteile ermöglichen.

A.8.1 Zahnflankenrauheit

Bild A.41 zeigt die Messpunkte der durchgeführten Rauheitsmessungen im Rahmen der Referenzversuche. Gemessen wurde die Rauheit jeweils an drei Zähnen über den Umfang verteilt sowohl an Ritzel als auch Rad. Die Grafik zeigt die einzelnen Messwerte normiert auf den Ausgangswert im Neuzustand in Ordinateurichtung und auf den Zeitpunkt des Ausfalls in Abszissenrichtung. Zusätzlich eingetragen sind eine Regressionskurve (Polynom 3. Ordnung) sowie das 95% Konfidenzintervall. Vor Beginn des Prüflaufs wurde an allen Verzahnungen ein Einlauf durchgeführt um Rauheitsspitzen zu glätten und die Graufleckentragfähigkeit zu erhöhen. Die Werte nach dem Einlauf sind nicht dargestellt. Im Mittel liegen diese ca. 20% unterhalb des Ausgangsniveaus.

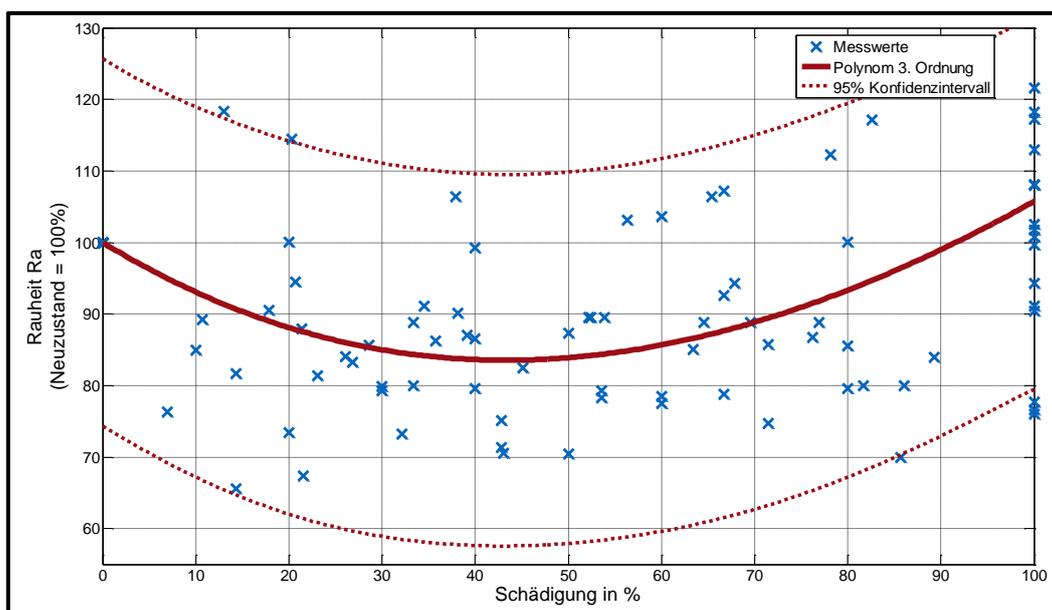


Bild A.28: Veränderung des arithmetischen Mittenrauwerts Ra mit zunehmender Schädigung

Im ersten Drittel der Lebensdauer ist ein zusätzliches Einlaufverhalten zu beobachten und damit einhergehend ein Absinken der Rauheit. Im weiteren Verlauf bis zum Ausfall der Verzahnung kann hingegen ein leichter Anstieg in Richtung des Ausgangswertes des arithmetischen Mittenrauwertes beobachtet werden. Dies lässt sich u.a. durch Überrollungen mit den grubchengeschädigten Zähnen erklären.

Innerhalb einer Messung streuen die Rauheitskennwerte im Mittel um ca. 30% (Standardabweichung). Diese Streuung nimmt mit zunehmender Laufzeit zu. Diese Zunahme ist in der größer werdenden Inhomogenität der Oberfläche durch kleinste Ausbrüche und Zerrüttungen oder beginnender Graufleckigkeit begründet. **Bild A.29** und **Bild A.30** zeigen den Einfluss von vorhandener Graufleckigkeit auf die Rauheitskennwerte. Diese nehmen mitunter deutlich zu.

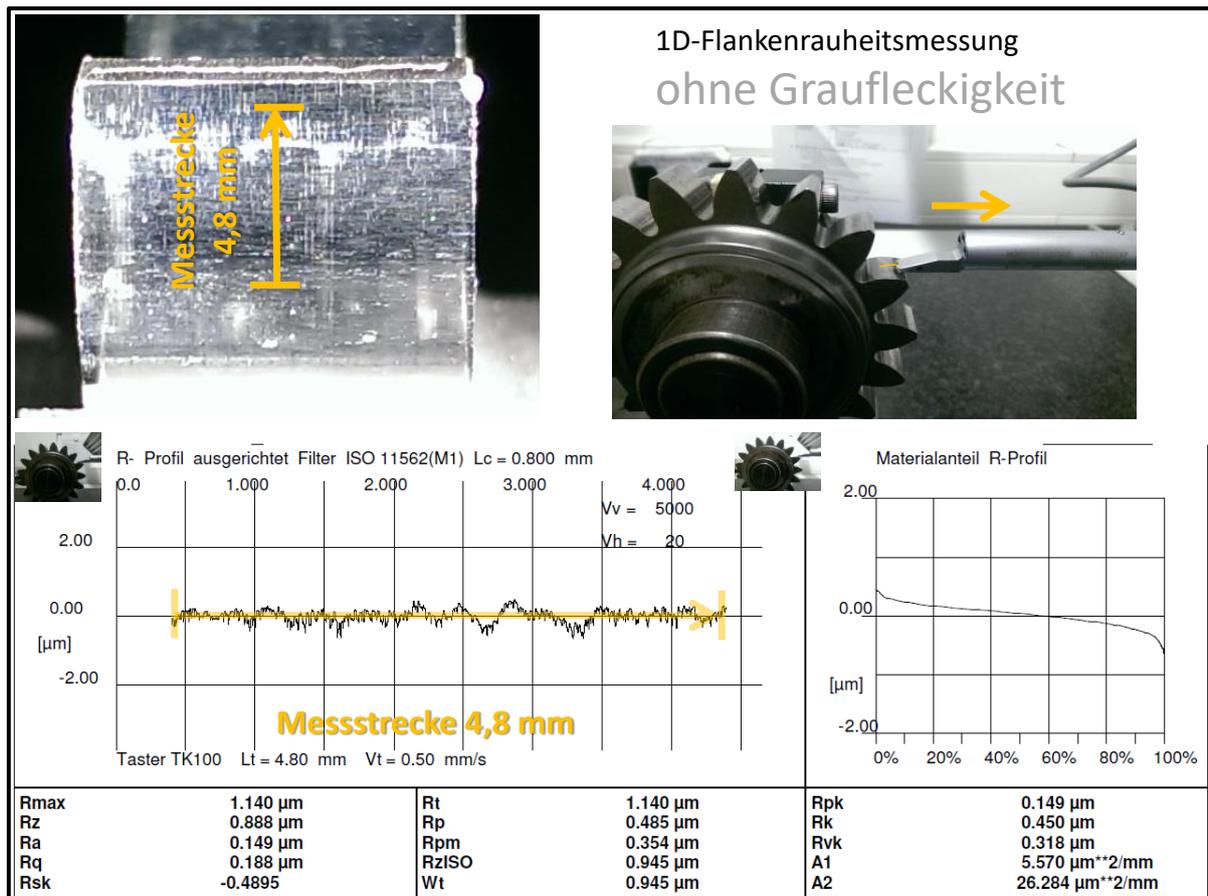


Bild A.29: Einfluss der Graufleckigkeit auf die Rauheitskenngrößen (keine Graufleckigkeit)

Rauheitsmessungen wurden auch im Rahmen der Lastkollektivversuche durchgeführt. Die Auswertung zeigt ähnliche Ergebnisse wie sie auch bei den Referenzversuchen gezeigt wurden. Auch die Verwendung anderer Rauheitskenngrößen (z.B. R_z) liefert keine bessere Korrelation.

Eignung zur Charakterisierung der Restlebensdauer von vorgeschädigten Komponenten

Insgesamt eignet sich die Zahnflankenrauheit nicht zur Charakterisierung der (Vor-)Schädigung hinsichtlich einer Zahnflankenermüdung. Zum einen lässt sich kein eindeutiger Verlauf der Kennwerte feststellen und zum anderen liegen die Messstreuungen aufgrund großer Inhomogenitäten der Zahnflankenoberfläche im Bereich der zu erwartenden Veränderung.

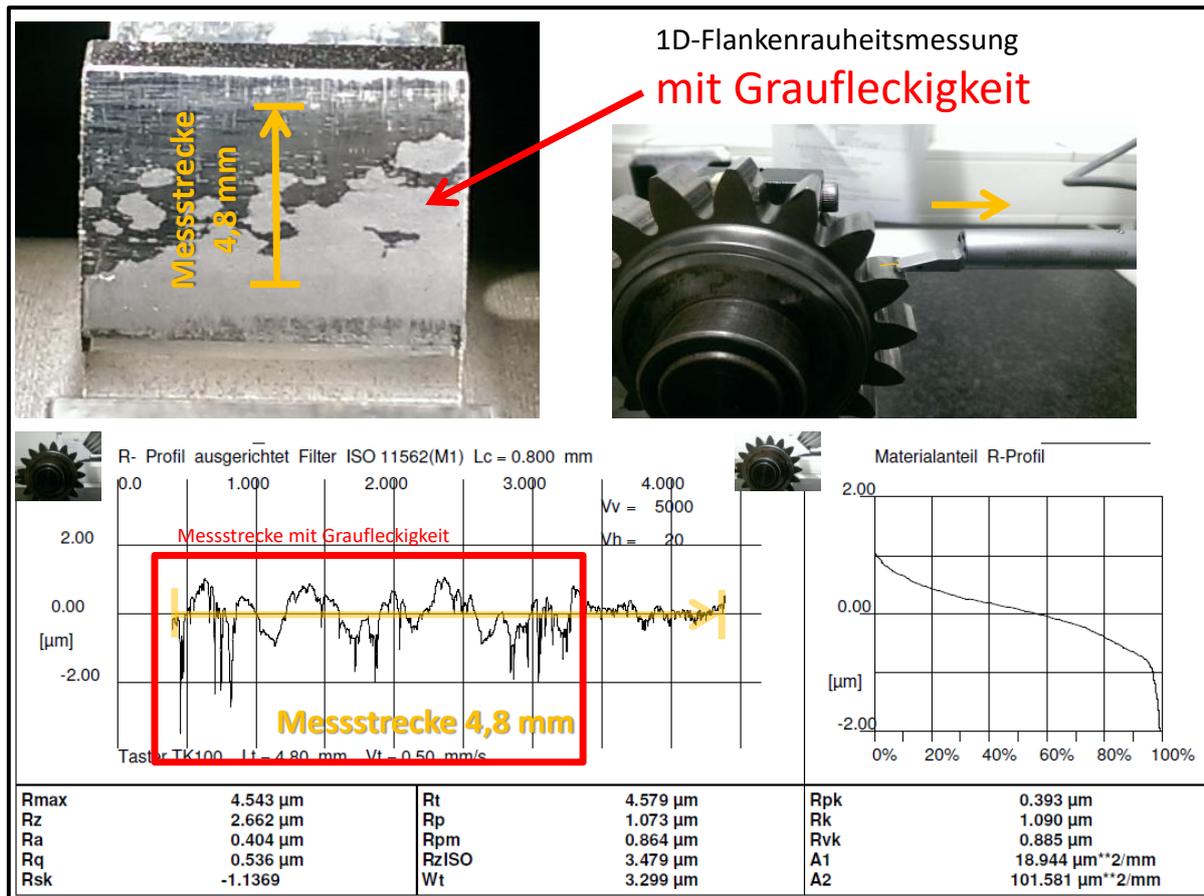


Bild A.30: Einfluss der Graufleckigkeit auf die Rauheitskenngrößen (mit Graufleckigkeit)

A.8.2 Topographievermessung

Während der Laufzeit wird die Topographie der Zahnflanke mit Hilfe eines CNC-gesteuerten Verzahnungsmesszentrums vom Typ Klingenberg P40 erfasst. Die Messdaten werden jeweils mit der Topographiemessung im Neuzustand verglichen. **Bild A.31** zeigt das Ergebnis dieses Vergleichs an einer Flanke mit Grübchenschaden (oben) sowie an einer Flanke mit leichter Graufleckigkeit (unten). Dargestellt ist jeweils die Oberflächenabweichung in μm im Vergleich zum Ausgangszustand. Eventuell vorhandene Graufleckigkeit tritt bei den betrachteten Versuchen überwiegend im Bereich negativen spezifischen Gleitens in unterschiedlich starker Ausprägung auf. Der Betrag der Oberflächenabweichung (Auskoklungstiefe) nimmt dabei kontinuierlich mit der Laufzeit zu.

Eignung zur Charakterisierung der Restlebensdauer von vorgeschädigten Komponenten

Mit Hilfe der durchgeführten dreidimensionalen Topographievermessung ist eine sehr genaue Charakterisierung der Zahnflankenoberfläche hinsichtlich Flankenformabweichungen möglich. Eventuell vorhandene Graufleckigkeit kann zuverlässig im kompletten Eingriffsfeld festgestellt werden. Im Rahmen der durchgeführten Auswertung konnte jedoch keine Korrelation zwischen der Oberflächenbeschaffenheit und einer fortschreitenden Ermüdung hergestellt werden. Die dreidimensionale Vermessung der Zahnflankenoberfläche ist daher nicht zur Charakterisierung der Restlebensdauer von vorgeschädigten Komponenten hinsichtlich eines Grübchenschadens geeignet.

Wird jedoch die Schadensart Graufleckigkeit als Ausfallkriterium betrachtet, so ist die dreidimensionale Topographievermessung sehr gut zur Charakterisierung der Restlebensdauer geeignet. Hierzu muss eine maximal zulässige Flankenformabweichung als Ausfallkriterium vorgegeben werden. Unter Berücksichtigung des Verlaufs der Auskolkungstiefe nach Schraide [213] kann somit eine Schädigung der Zahnflanke berechnet werden.

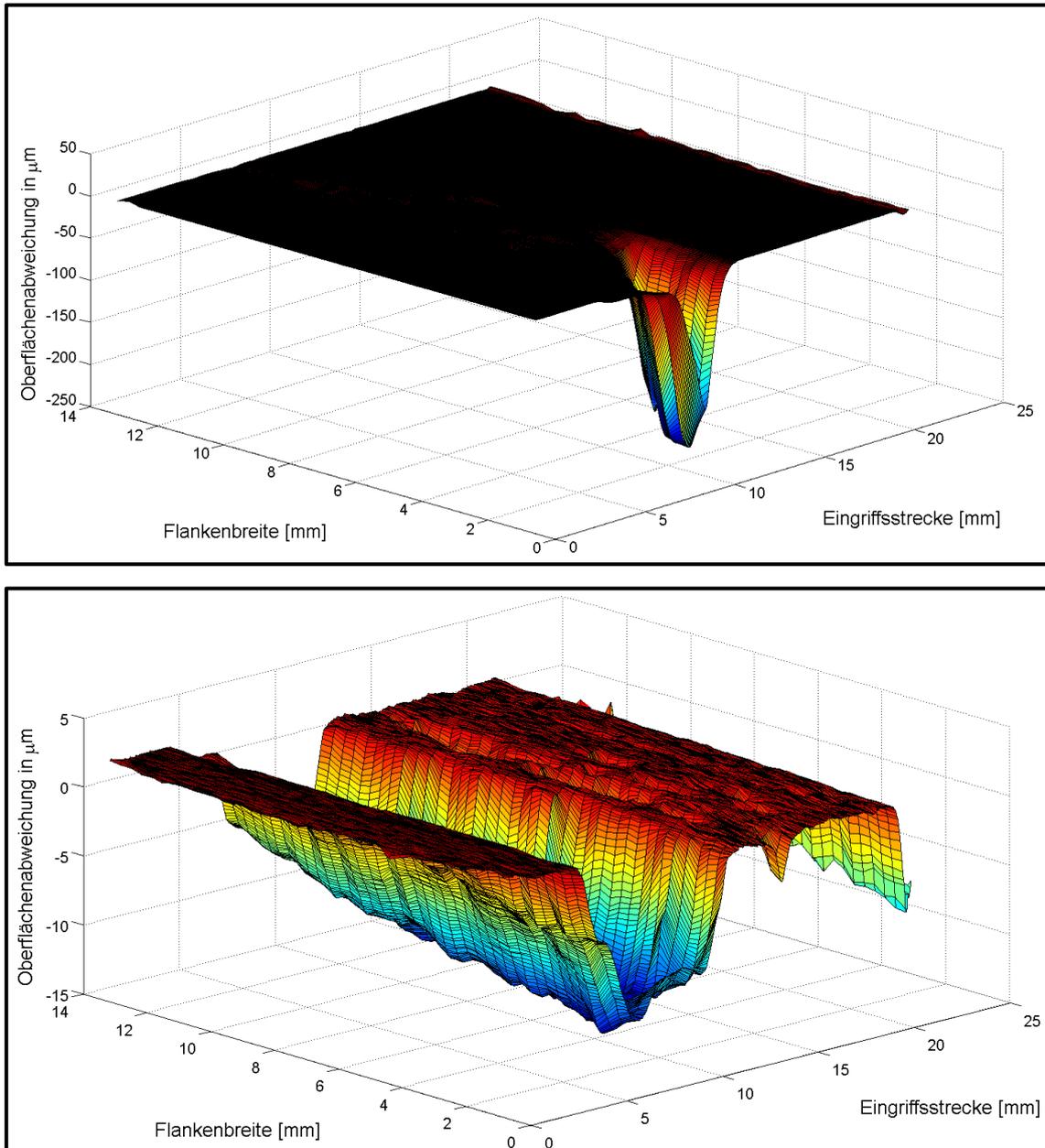


Bild A.31: Zahnflankentopographie (oben: Grübchen, unten: Graufleckigkeit)

A.8.3 Barkhausenrauschenanalyse

Versuchsbegleitend wurde auch eine Barkhausenrauschenanalyse mit Hilfe des ROLLSCAN Messgeräts der Fa. Stresstech durchgeführt. Wie bereits beschrieben, wird dieses Gerät überwiegend zur Charakterisierung einer Schleifbrandschädigung verwendet und ist industriell weit verbreitet. Im Rahmen der zerstörungsfreien Analysen wurden an den Geradverzahnungen während der Laufzeit Messungen durchgeführt. Dabei wurden alle Zähne automatisiert vermessen.

Referenzversuche

Bild A.32 zeigt die Mittelwerte einiger repräsentativer Messreihen an den Ritzeln der Referenzversuche. Diese sind über der Laufzeit aufgetragen. Ergänzend ist eine lineare Regressionsgerade sowie das 95% Konfidenzintervall eingetragen.

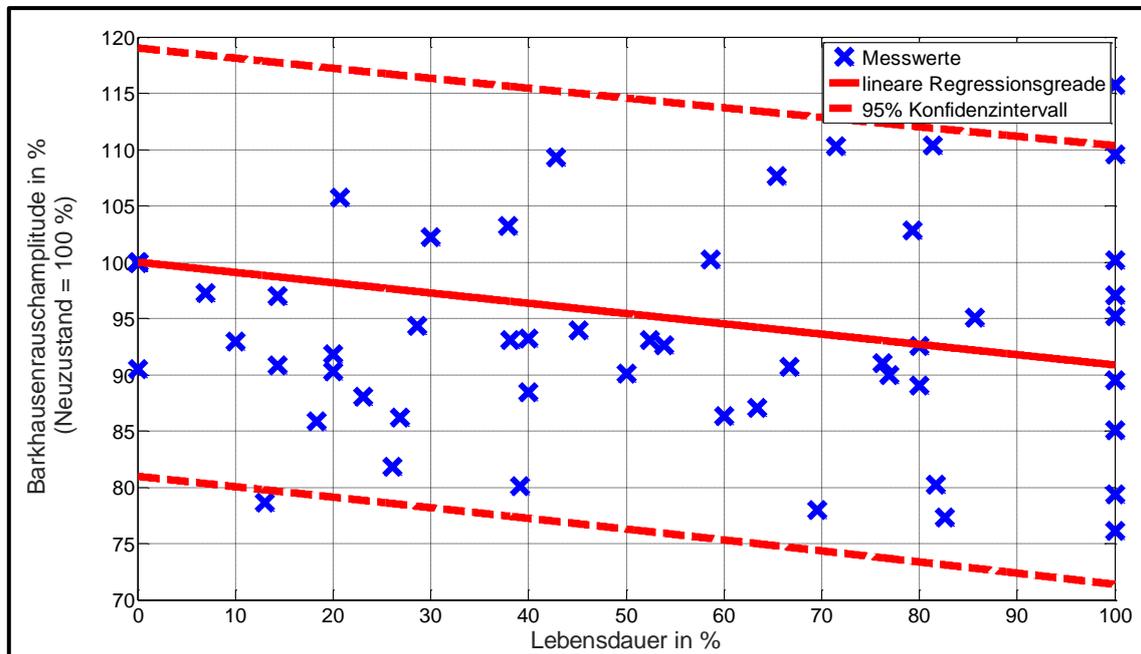


Bild A.32: Veränderung der Barkhausenrauschamplitude mit zunehmender Schädigung

Bis zum Ausfall ergibt sich eine Abnahme der maximalen Barkhausenrauschamplitude um ca. 10%. Dieses Verhalten lässt sich bei nahezu allen betrachteten Ritzeln beobachten. Da die Messung an allen Zähnen erfolgt, liegt eine sehr große Datenbasis vor, um eine statistisch abgesicherte Aussage zu erhalten. Die Streuung zwischen den 17 Zähnen eines Ritzels liegt bei ca. 10...15 %; ist also höher als die festgestellte Abnahme über der Laufzeit.

Eine Beeinflussung der Barkhausenrauschamplitude mit zunehmender Schädigung deckt sich gut mit den bisher beschriebenen Erkenntnissen der zerstörenden und zerstörungsfreien Analysemethoden. Eine mikromagnetische Messung, wie etwa die Messung des Barkhausenrauschens oder das später beschriebene 3MA-Verfahren, basiert immer auf einer Korrelation der mikromagnetischen Kenngrößen mit dem Werkstoffzustand (Eigenspannungen, Gefüge, ...) Die Barkhausenrauschanalyse ist dabei jedoch auf den äußersten oberflächennahen Bereich begrenzt.

Weitergehend wurde auch eine Betrachtung der Werte der einzelnen Zähne durchgeführt. Hier konnten keine statistisch abgesicherten Erkenntnisse zum Schadensverlauf gewonnen werden. Solche Zähne, welche als erstes einen Grübchenschaden aufweisen, zeigen zuvor keine Auffälligkeiten bei einer Betrachtung der maximalen Barkhausenrauschamplitude.

Lastabhängigkeit

Eine Lastabhängigkeit des Verlaufs der Barkhausenrauschamplitude mit zunehmender Schädigung konnte nicht festgestellt werden.

Die Erkenntnisse der Referenzversuche (Abnahme des Mittelwerts der Barkhausenrauschamplitude um ca. 10 %) konnten auch im Rahmen der Auswertung der Lastkollektivversuche bestätigt werden.

Eignung zur Charakterisierung der Restlebensdauer von vorgeschädigten Komponenten

Eine Analyse der maximalen Barkhausenrauschamplitude scheint grundsätzlich eine Charakterisierung der Restlebensdauer von vorgeschädigten Zahnflanken zu ermöglichen. Im Rahmen der ausgewerteten Versuchsreihen konnte eine Abnahme von ca. 10 % im Vergleich zum Neuzustand belegt werden. Zu beachten ist hierbei jedoch die große Streuung innerhalb der Messwerte an einem Zahnrad. Diese können durchaus die zu erwartete Veränderung bis zum Schadenseintritt übertreffen. Eine Analyse der Barkhausenrauschamplitude zur Charakterisierung der Restlebensdauer ist daher nur anwendbar, wenn eine genügend große Prüflosgröße vorhanden ist und eine aussagekräftige Messung sichergestellt werden kann. Die Messung sollte im Idealfall automatisiert an allen Zahnflanken durchgeführt werden. Eine Anpassung der Messparameter erfolgte im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen nicht. Stichversuche im Rahmen der Analysen mit dem 3MA-Gerät ergaben jedoch keine signifikante Verbesserung der Aussagekraft solcher mikromagnetischer Messungen durch Anpassung der Messparameter.

A.8.4 Oberflächenhärte

Versuchsbegleitend wurden Messungen der Oberflächenhärte mit Hilfe eines Esatest-Prüfgerätes der Fa. Ernst durchgeführt. Diese Messungen sind weitestgehend zerstörungsfrei und ermöglichen somit eine Fortführung des Versuchslaufs [150] im Anschluss an die Messung. Das Messprinzip beruht auf einer Messung des elektrischen Widerstands zwischen dem elektrisch leitfähig beschichteten Eindringkörper und dem Prüfling. Im Vergleich zu einer üblichen Härtemessung erfolgt keine optische Auswertung des Eindringabdrucks. Der gemessene Widerstand während dem Eindringen wird mit einer vorher kalibrierten Härte korreliert. Der Eindringabdruck kann somit verschwindend klein gewählt werden. Gemessen wurden an jedem untersuchten Zahnrad 4 Zähne mit jeweils drei Messpunkten im Kopf- und Fußflankenbereich sowie am Wälzkreis.

Referenzversuche

Im Rahmen der Referenzversuche wurde die Oberflächenhärte mit zunehmender Schädigung ermittelt. Im Folgenden wird dabei zwischen den Oberflächenhärtewerten im Kopf- und Fußflankenbereich sowie am Wälzkreis unterschieden. Für diese Bereiche wird aus den Messungen jeweils ein Mittelwert gebildet. **Tabelle A.3** gibt einen Überblick über die ermittelten Werte im Neuzustand sowie bei 100 % Schädigung. Zusätzlich ist die Standardabweichung angegeben.

	Neuzustand		100 % Schädigung	
	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung
Kopfflanke	763 HV1	10 HV1	781 HV1	105 HV1
Fußflanke	757 HV1	12 HV1	730 HV1	37 HV1
Wälzkreis	765 HV1	12 HV1	751 HV1	22 HV1

Tabelle A.3: Oberflächenhärtewerte

Bild A.33, **Bild A.34** und **Bild A.35** zeigen darüber hinaus die Verläufe der Oberflächenhärte-
werte in den jeweiligen Bereichen in der bereits bekannten relativen Darstellung. Im Vorder-
grund der Betrachtungen sollen hier nicht die Absolutwerte stehen (diese sind nur schwer mit
den zerstörend ermittelten Werten vergleichbar), sondern vielmehr der relative Vergleich. Ins-
gesamt zeigt sich im Bereich der Kopfflanke ein leichter Anstieg der Härtewerte, am Wälzkreis
eine leichte Abnahme und im Fußflankenbereich eine deutliche Abnahme der Oberflächenhär-
te-
werte um ca. 5%. Weiterhin nimmt die Standardabweichung vor allem in den Bereichen mit
hohen Gleitanteilen (Kopf- und Fußflankenbereich) deutlich zu im Vergleich zum Neuzustand.

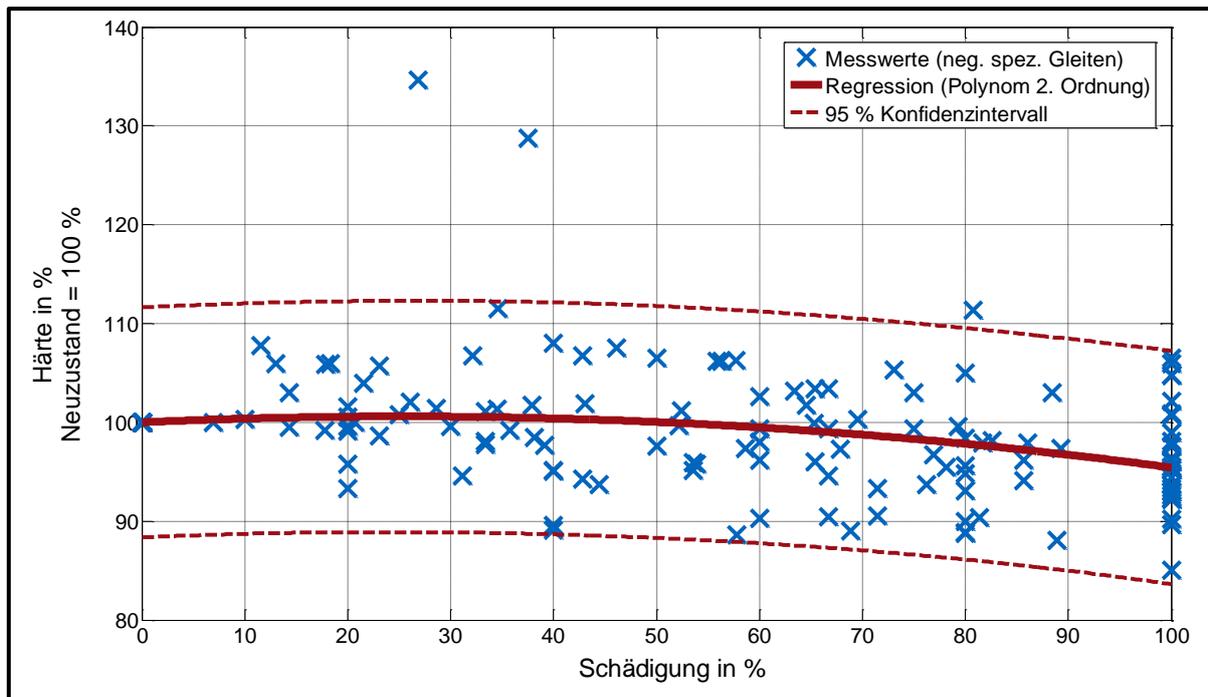


Bild A.33: Veränderung der Oberflächenhärte im Fußflankenbereich

Bei dem hier betrachteten Messverfahren zur Oberflächenhärte spielen lokale Einflussgrößen auf der Zahnflanke eine entscheidende Rolle und können die Messwerte maßgeblich beeinflussen. Die bereits gezeigte zunehmende Zerrüttung der Oberfläche sowie das Entstehen von ersten Anrissen und Ausbrüchen führt zu einer stark inhomogenen Oberflächenbeschaffenheit, welche sich im oberflächennahen Gefüge fortsetzt (wie z.B. anhand der FIB-Analysen gezeigt). Die lokalen Ungleichmäßigkeiten führen zu einer größer werdenden Streuung der Messwerte mit zunehmender Schädigung. Während im Neuzustand noch verlässliche Aussagen erzielt werden können, sind diese bei hohen Schädigungsgraden der Oberfläche nur noch sehr ungenau.

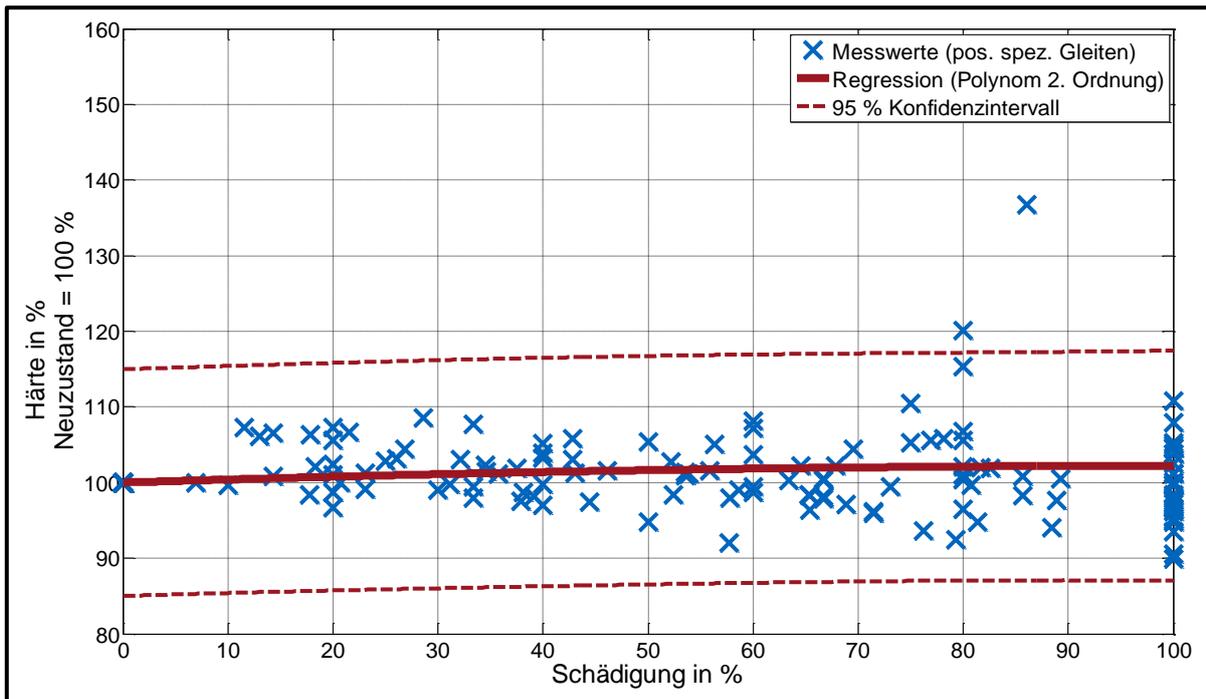


Bild A.34: Veränderung der Oberflächenhärte im Kopfflankenbereich

Lastabhängigkeit

Eine Lastabhängigkeit des Verlaufs der Oberflächenhärte mit zunehmender Schädigung konnte nicht festgestellt werden.

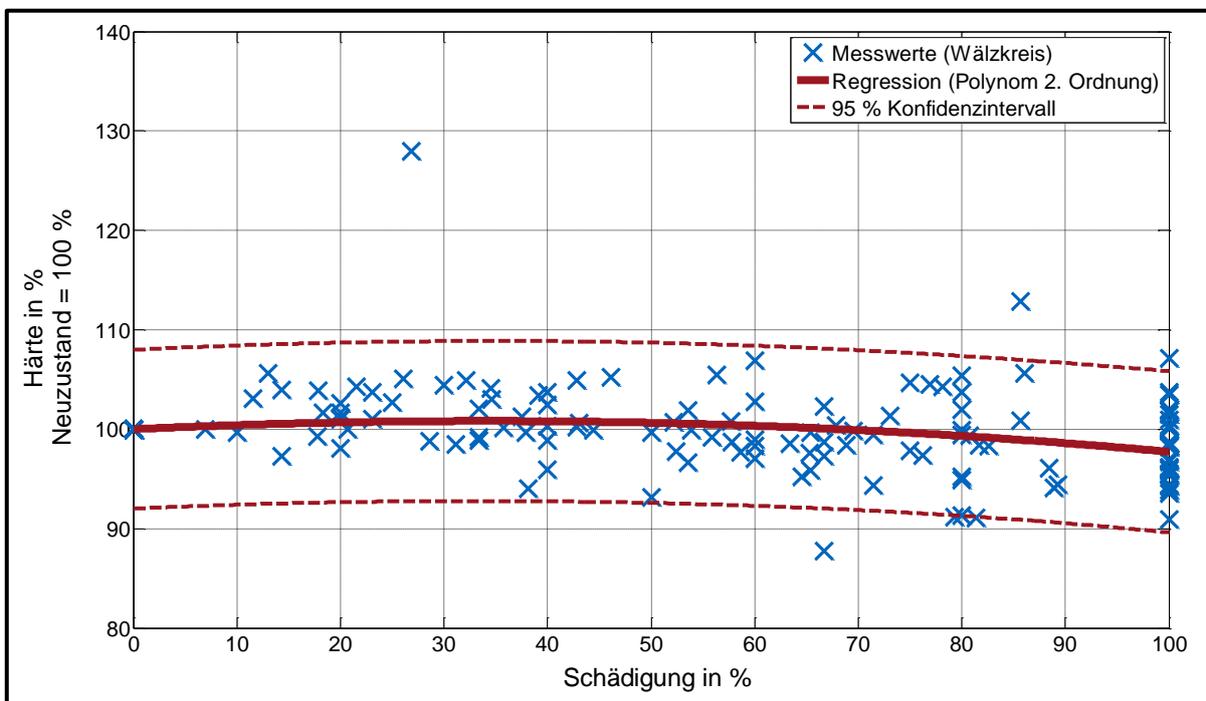


Bild A.35: Veränderung der Oberflächenhärte am Wälzkreis

Lastkollektivversuche

Die Erkenntnisse der Referenzversuche konnten auch im Rahmen der Auswertung der Lastkollektivversuche bestätigt werden. Hierzu standen jedoch aufgrund eines Defekts des Messgeräts nur wenige vollständige Messreihen zur Verfügung.

Eignung zur Charakterisierung der Restlebensdauer von vorgeschädigten Komponenten

Das Verfahren zur Oberflächenhärtemessung eignet sich prinzipiell zur Charakterisierung einer Schädigung. Die bereits zerstörend nachgewiesene Abnahme der Härtewerte konnte auch zerstörungsfrei nachgewiesen werden. Aufgrund des Messprinzips, sind die ermittelten Kennwerte jedoch stark abhängig von den lokalen Gegebenheiten am konkreten Messpunkt. Eine zuverlässige, quantitative Charakterisierung ist daher mit zunehmender Schädigung für ein einzelnes Zahnrad nicht mehr gegeben.

A.8.5 3MA-Verfahren

Mit Hilfe des Multiparameter Mikrostruktur- und Spannungsanalysators (3MA, **Bild A.36**) können durch periodische Ummagnetisierung in ferromagnetischen Werkstoffen 41 elektrische und magnetische Kenngrößen für verschiedene Anregungsfrequenzen ermittelt werden.

Mit der an der FZG zur Verfügung stehenden Messtechnik können geradzahnte Zahnräder automatisiert geprüft werden. Pro Zahnflanke werden mit dieser Vorrichtung 100 Messstellen erfasst, welche von einem entsprechenden Sensor nacheinander abgefahren werden. Für jede Messstelle werden die 41 gemessenen Kennwerte gespeichert.

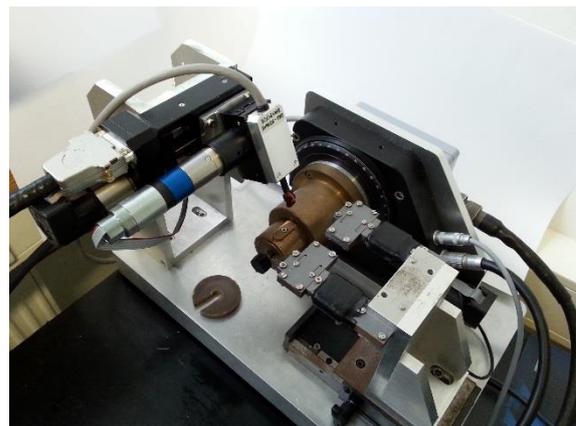


Bild A.36: 3MA-Messtechnik für Zahnräder

Die Messtechnik vereint vier zerstörungsfreie, elektromagnetische Prüfverfahren. Diese zeigen unterschiedlich ausgeprägte Wechselwirkungen mit verschiedenen Gefüge- und Werkstoffeigenschaften sowie Spannungszuständen. Die Prüfverfahren sind im Einzelnen nachfolgend zusammen mit ihren vorrangig beeinflussenden Parametern aufgeführt (Details hierzu werden beispielsweise in [235] erläutert):

- | | | |
|--|---|--------------------|
| - Barkhausen-Rausch-Analyse | ~ | Eigenstresszustand |
| - Oberwellenanalyse | ~ | Mikrogefüge |
| - Mehrfrequenzwirbelstromimpedanzanalyse | ~ | Mikrostruktur |
| - Überlagerungspermeabilität | ~ | Härte |

Bild A.37 zeigt beispielhaft die Veränderung der Kenngrößen der Oberwellenanalyse eines Zahnrades mit steigender Laufzeit in Form eines Boxplots. Die einzelnen Balken zeigen die statistische Analyse der ausgewerteten Daten. Ausgewertet werden die Messwerte im Bereich negativen spezifischen Gleitens im Bereich der Zahnmitte (Randeinflüsse werden somit vernachlässigt). Jeder Balken gibt den Median (markiert durch einen schwarzen Punkt) sowie ein Streumaß (innerhalb des aufgetragenen Balkens liegen die mittleren 50% der ausgewerteten Messwerte) an. Auf der Abszisse sind die Kenngrößen (R_{Vmag} ... R_{Hro}) aufgetragen, in

Ordinatenrichtung die Werte der einzelnen Kenngrößen normiert auf den Median im Neuzustand. Für das untersuchte Zahnrad werden vier Zustände (neu, 30% Laufzeit, 60% Laufzeit, Ausfall durch Grübchen) betrachtet. Die ausgewerteten Messdaten sind im Diagramm für jeden Parameter in aufsteigender Reihenfolge nebeneinander dargestellt.

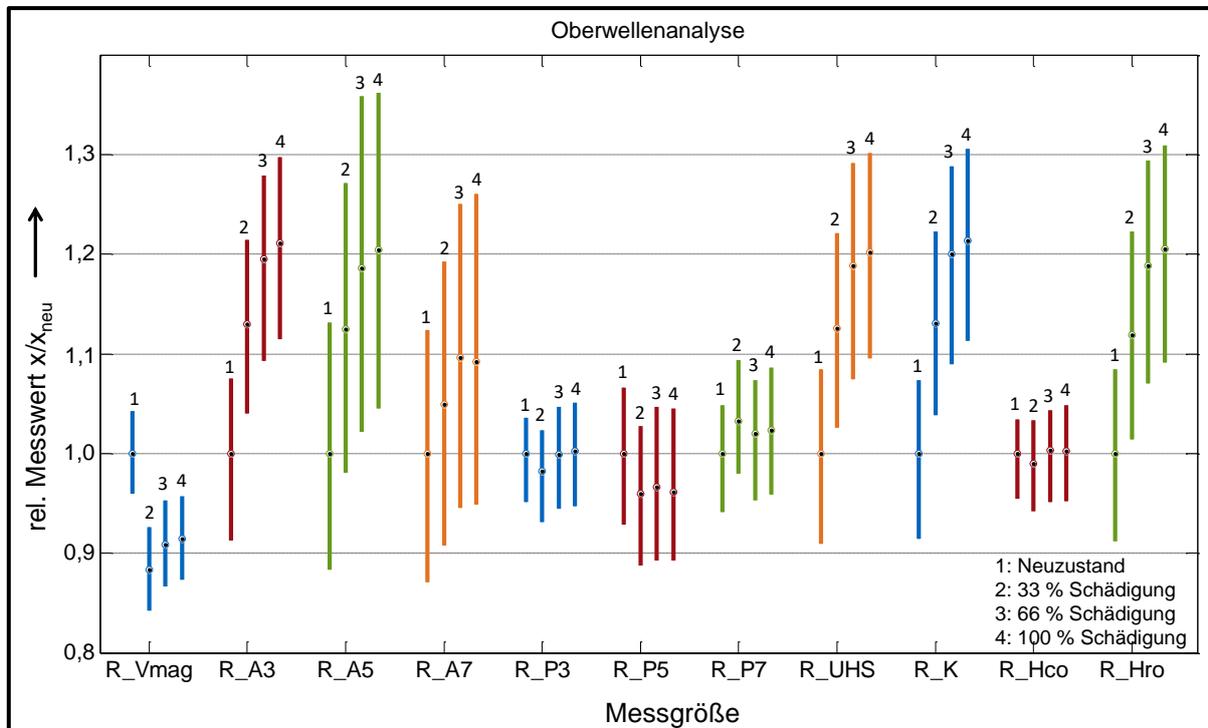


Bild A.37: 3MA – Oberwellenanalyse über Lebensdauer

Für den Klirrfaktor R_K erkennt man in obigem Diagramm beispielsweise einen signifikanten Anstieg mit zunehmender Laufzeit, wohingegen die Werte der Koerzitivfeldstärke R_{Hco} nahezu konstant bleiben. Ähnliche, ansteigende Tendenzen zeigen auch die Kennwerte R_{A3} , R_{A5} , R_{A7} , R_{UHS} und R_{Hro} . Für viele Parameter der übrigen Prüfverfahren (hier nicht dargestellt) zeigen sich ähnliche Verläufe mit klarer Tendenz. Mit diesen Ergebnissen kann somit davon ausgegangen werden, dass eine Wechselwirkung zwischen elektromagnetischen Messgrößen und dem Schädigungszustand des Werkstoffes vorliegt.

Das Verfahren wurde bereits in früheren Forschungsvorhaben ([150, 217]) erfolgreich zur Charakterisierung von Randzonenzuständen hinsichtlich Eigenspannungs- und Härtetiefenverläufe sowie der Oberflächenhärteverläufe verwendet.

Durch einen Kalibriervorgang besteht die Möglichkeit, Polynome zu finden, welche einen Zusammenhang zwischen der Schädigung und den Messgrößen x_i herstellen. Ein Polynom könnte beispielsweise die folgende Form haben:

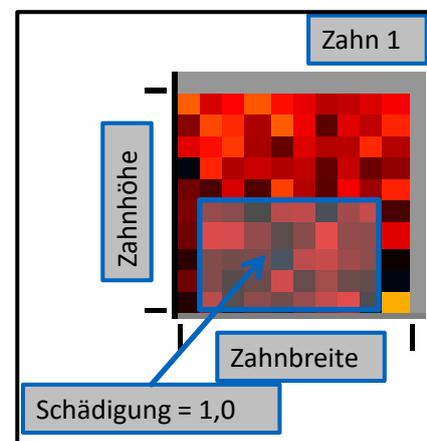


Bild A.38: 3MA Kalibrierung

$$\text{Schädigung} = a_0 + a_1 \cdot x_1 + \sqrt{x_1} + a_2 \cdot x_2^2 + \dots \quad (\text{A.1})$$

a_i	-	Koeffizienten aus Regressionsanalyse	x_i	-	Messgröße i
-------	---	--------------------------------------	-------	---	---------------

Im Rahmen der durchgeführten Versuche wurde diese Auswertung mit Hilfe der Software zur 3MA-Messtechnik durchgeführt. Während des Kalibriervorgangs werden einzelnen Bereichen der Zahnflanke (vor allem: Bereich negativen spezifischen Gleitens) definierte Schädigungswerte (0 = Neuzustand, 1 = Ausfall durch Grübchen) zugewiesen (siehe **Bild A.39** für Zahn 1 mit Schädigung 1,0). Da Zahnflanken mit Grübchen nicht gemessen werden können, wird die Kalibrierung an hinsichtlich Grübchen visuell ungeschädigten Zahnflanken derselben Zahnrad durchgeführt. Dieser Vorgang wird für alle Zähne an mehreren Zahnradern wiederholt, um so Einzeleinflüsse zu eliminieren. Die Software ermittelt im Anschluss daran im Rahmen einer multiplen Regressionsanalyse einen formelmäßigen Zusammenhang von Messgrößen und Schädigungszustand sowie die Koeffizienten a_i . Diese Kalibrierung kann auf Messdaten, welche nicht zur Kalibrierung herangezogen wurden, angewandt werden und erscheint als zusätzlicher Parameter in der Auswahl. Damit lässt sich die Zuverlässigkeit des Kalibrierpolynoms ermitteln.

Referenzversuche

Bild A.39 zeigt den Zusammenhang zwischen den vorliegenden, laufzeitabhängigen Schädigungsgraden der untersuchten Prüfzahnrad und den ermittelten 3MA-Werten nach dem durchgeführten Kalibrierprozess an den untersuchten Referenzversuchen (dargestellt sind ca. 20000 ausgewertete Messpunkte). Dem Neuzustand wurde der Wert 0,0 zugewiesen; einem geschädigten Zahnrad der Wert 1,0. Man erkennt eine gute Korrelation zwischen den Schädigungsgraden der Zahnflanke im Laufversuch und den berechneten 3MA-Werten. Die Qualität der Kalibrierung wird stark durch die große Anzahl an Messwerten sowie den lokalen Inhomogenitäten des Werkstoffs im Bereich der aktiven Zahnflanken beeinflusst.

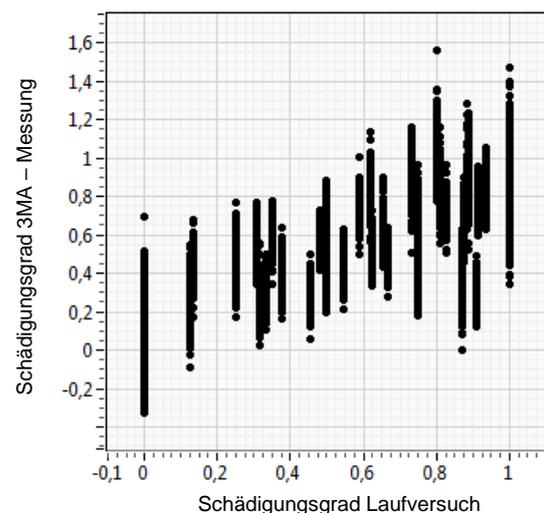


Bild A.39: 3MA Korrelation

Bild A.40 zeigt beispielhaft den Verlauf des ermittelten 3MA-Schädigungswertes für sechs verschiedene Messungen. Bei 8 Mio. Lastwechseln wurde der Versuch durch einen Grübchenschaden beendet. Eine deutliche Veränderung der 3MA-Messwerte über der Laufzeit ist erkennbar. Bei Versuchsende wird auch vom 3MA-Gerät ein kritischer lokaler Flankenzustand ausgewiesen.

Lastabhängigkeit

Im Rahmen des Kalibriervorgangs blieb die Belastungsintensität bewusst unberücksichtigt, da eine einheitliche Kalibrierung erzielt werden sollte. Zu einer möglichen Lastabhängigkeit der Ergebnisse kann daher keine Aussage getroffen werden.

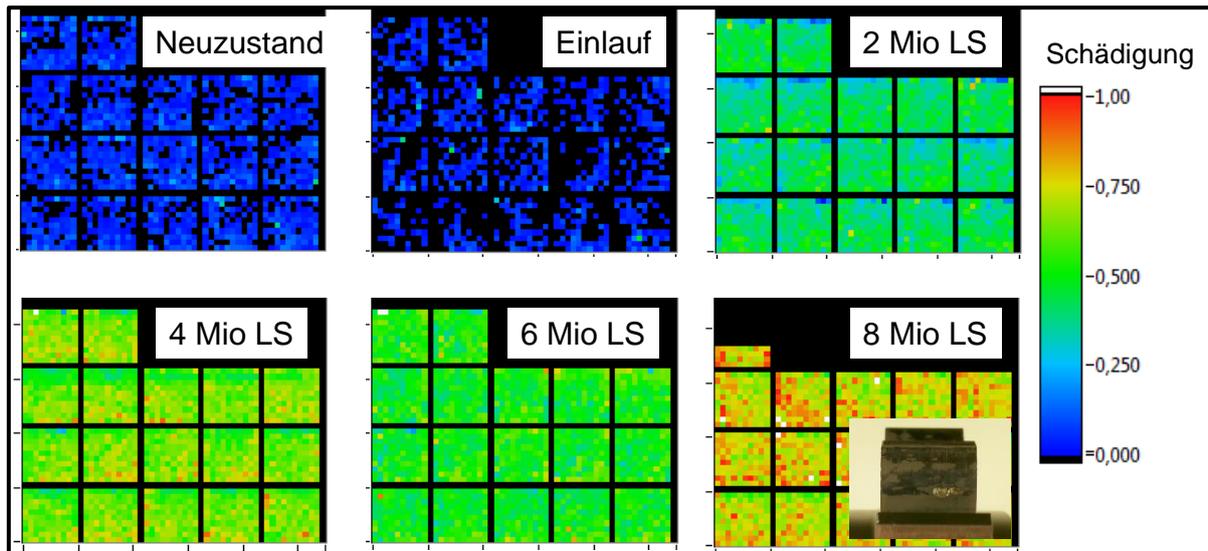


Bild A.40: Beispielhafter Verlauf 3MA-Werte

Lastkollektivversuche

Die Auswertung der Schädigung mit dem 3MA-Verfahren zeigte auch im Zusammenhang mit den Lastkollektivversuchen eine gute Übereinstimmung. Sowohl bei den Lastkollektivversuchen mit geringer Durchmischung als auch solchen mit hoher Durchmischung konnte eine gute Korrelation zwischen rechnerischer Schadenssumme und dem ermittelten 3MA-Wert der Schädigung festgestellt werden. Versuchen nach dem Einlauf wird mittels des verwendeten Polynoms ein Schädigungsbeitrag nahe Null zugewiesen. Mit Hilfe des Geräts ist bei umfangreicheren Lastkollektivversuchen zukünftig auch eine Überprüfung der Annahmen eines linearen Schadensfortschritts denkbar.

Eignung zur Charakterisierung der Restlebensdauer von vorgeschädigten Komponenten

Mit Hilfe des 3MA-Geräts scheint eine Charakterisierung der Restlebensdauer von vorgeschädigten Zahnflanken hinsichtlich einer Wälzermüdung grundsätzlich gut möglich. Die ermittelte Kalibrierung ermöglicht eine Berechnung des Schädigungszustands einzelner Flankenbereiche basierend auf den ermittelten elektrischen und magnetischen Kenngrößen. Die Werte zeigen v. a. im Bereich negativen spezifischen Gleitens, in welchem Grübchenschäden in der Regel zuerst auftreten, eine gute Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen. Insgesamt muss jedoch mit einer Streuung aufgrund der lokalen Gegebenheiten auf der Zahnflanke gerechnet werden. Daher ist nur eine ganzheitliche Betrachtung mehrerer Zahnflanken zur Ermittlung des Schädigungsgrades mittels 3MA zielführend. Die Kalibrierung wurde bisher nur an der verwendeten Geradverzahnung überprüft. Die Übertragbarkeit auf andere Werkstoffchargen bzw. Werkstoffe ist noch zu überprüfen.

A.8.6 Weitere Analysemethoden

Ergänzend zu den bereits dargestellten Untersuchungen wurden weitere zerstörungsfreie Prüfmethode mit dem Ziel einer Charakterisierung des Schädigungszustandes angewandt. Am Lehrstuhl für zerstörungsfreie Prüfung der TU München wurden stichprobenartige Untersuchungen mittels ultraschallangeregter Thermografie zur Risserkennung durchgeführt.

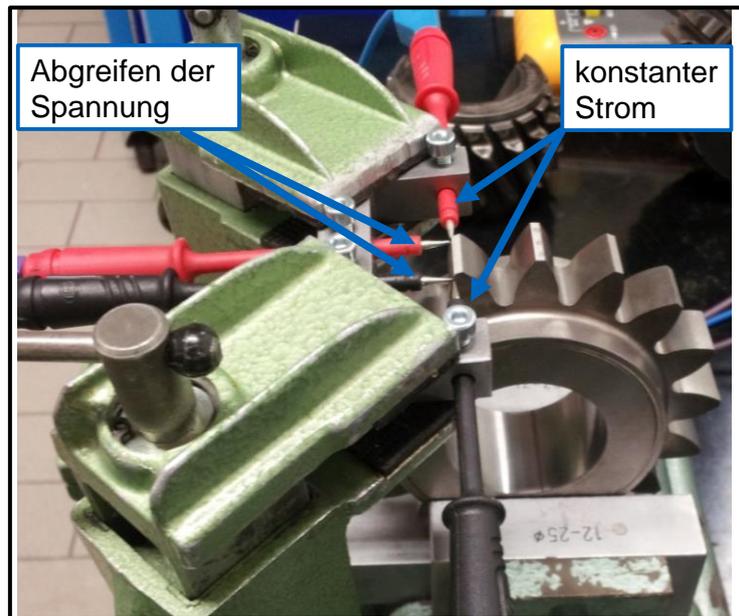
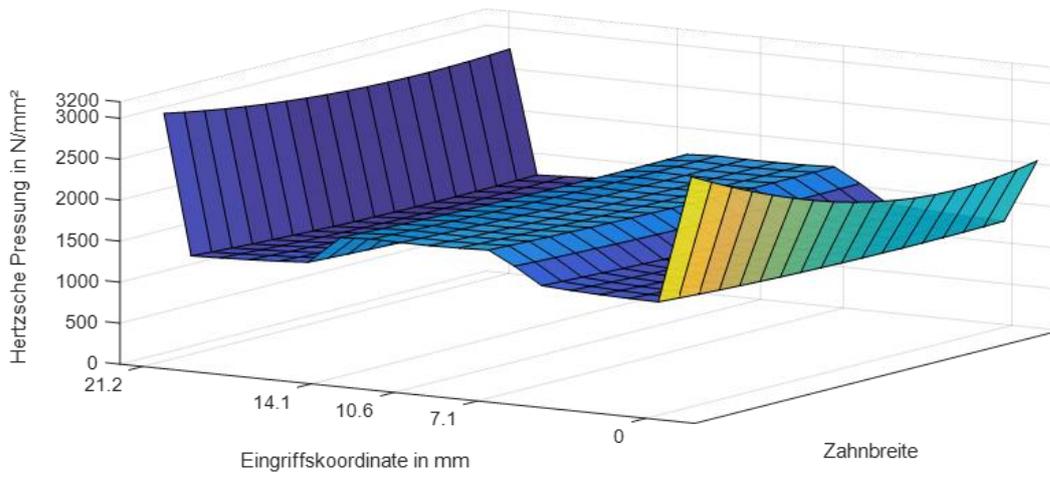
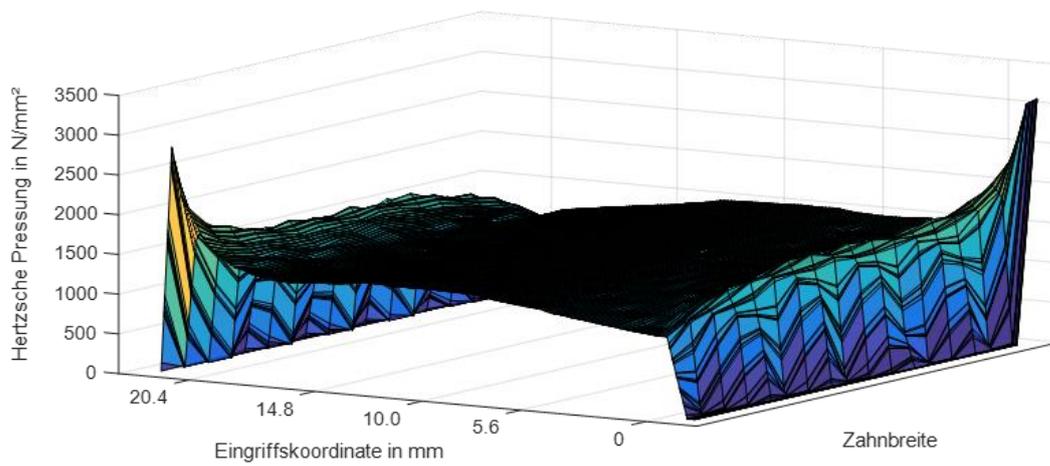
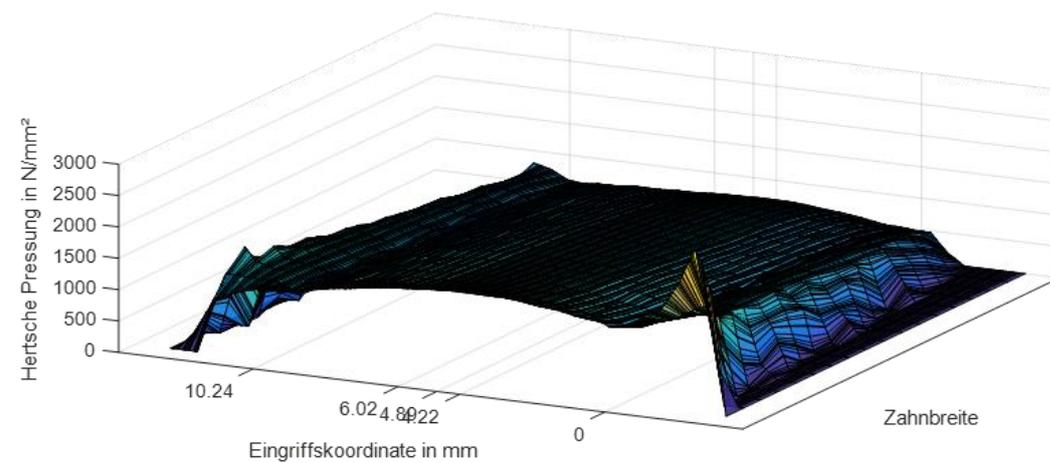


Bild A.41: Messanordnung resistometrische Messungen [72]

An der FZG wurden resistometrische Messungen an den Zahnradern durchgeführt mit dem Ziel einer Lebensdauerabschätzung durch Veränderung des elektrischen Widerstandes. Dazu wurde eine Messanordnung in Vierleitertechnik entwickelt, welche eine Messung von Widerständen im Bereich von $R = 1,0 \cdot 10^{-4} \Omega$ ermöglicht (siehe **Bild A.41**). In diesem Bereich liegen ca. die Durchgangswiderstände der verwendeten Geradverzahnung von Stirnflanke zu Stirnflanke gemessen.

Mit beiden Messmethoden ist zwar eine Detektierung von visuell wahrnehmbaren Grübchenschäden möglich, nicht jedoch eine Charakterisierung des Schädigungsgrades. Sind auf der Oberfläche noch keine Grübchen sichtbar, ist weder eine Erwärmung des Werkstoffes durch Mikroreibung in den Rissflächen messbar, noch ein Anstieg des elektrischen Widerstandes. Nach aktuellem Stand der Technik ist mit diesen beiden Messmethoden somit an den untersuchten Zahnradern keine zuverlässige Charakterisierung der Werkstoffschädigung durch eine Quantifizierung vorhandener Mikrorisse möglich.

A.9 Berechnungsstudie zu optimalen Zahnflankenkorrekturen**Variante 1****Variante 2****Variante 3****Bild A.42:** Hertzische Pressungen der betrachteten Verzahnungsvarianten

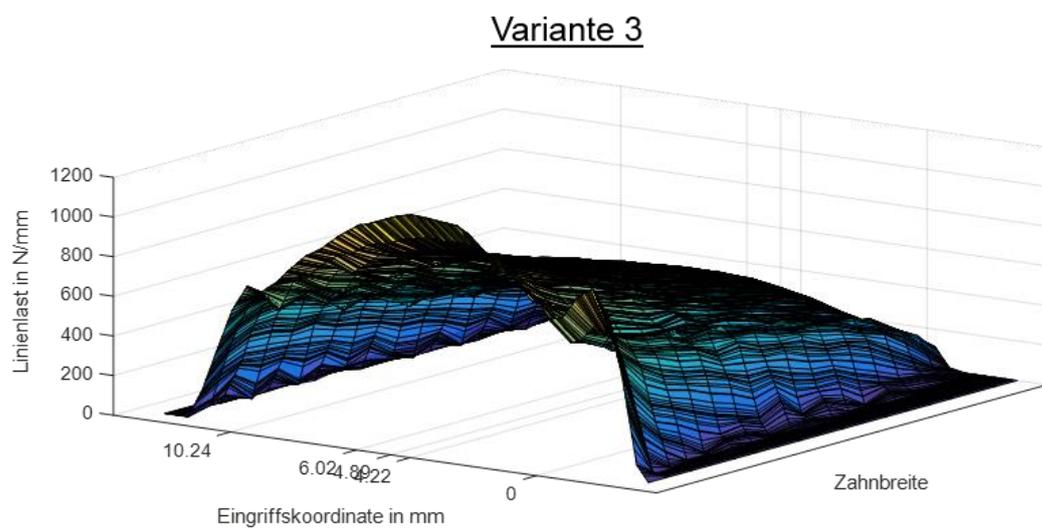
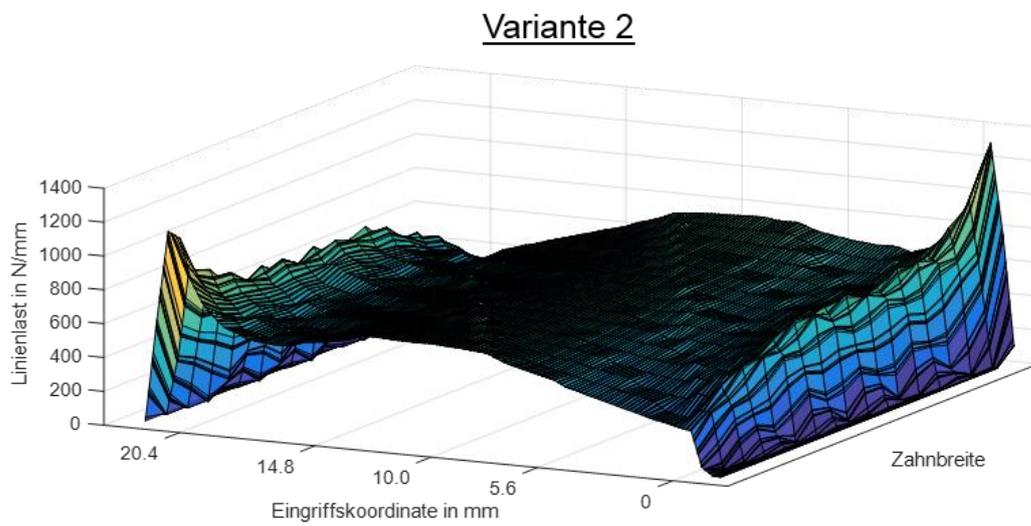
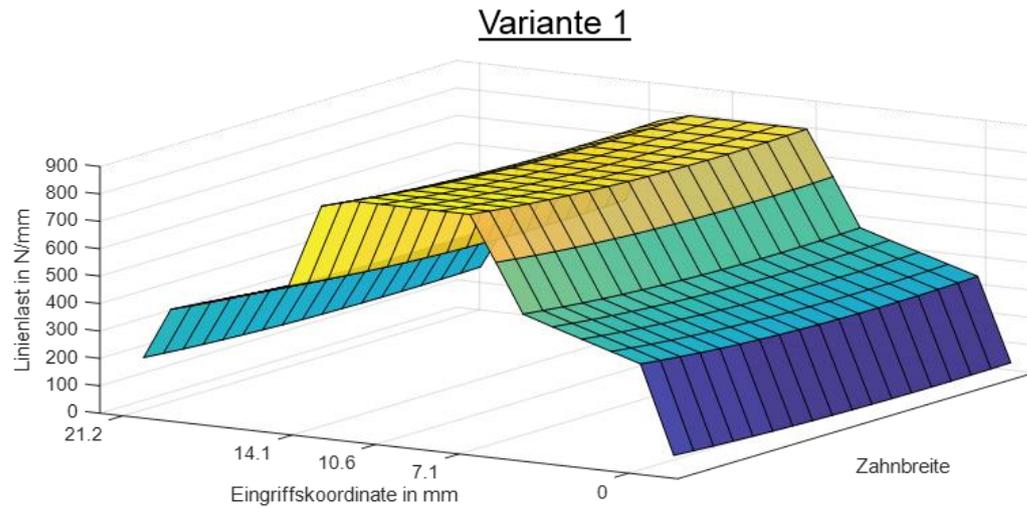
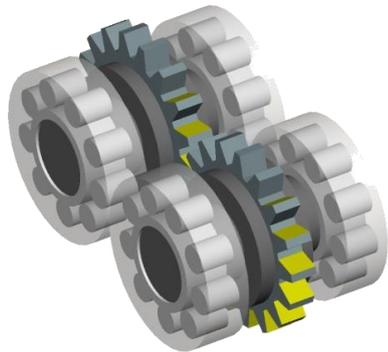


Bild A.43: Linienlasten der betrachteten Verzahnungsvarianten

A.10 Validierung der Methodik zur Ermittlung von optimierten Verzahnungskorrekturen bei Lastkollektivbelastung



z_1/z_2	17/18
Schrägungswinkel β	0°
Modul	5 mm
Achsabstand a	91,5 mm
Bemerkungen	Lagerung steif und symmetrisch

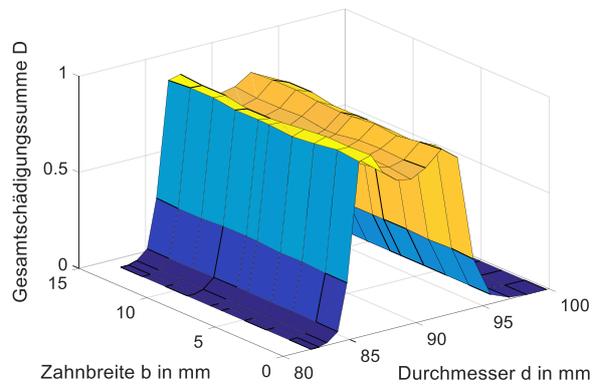
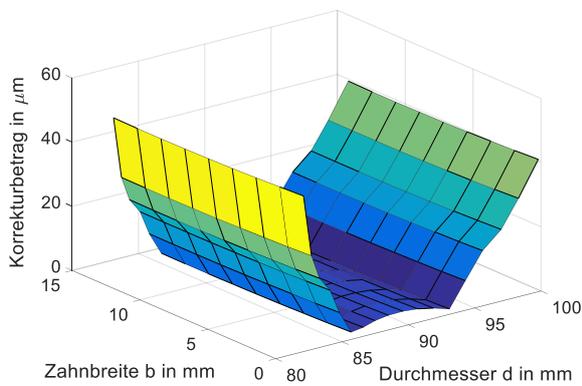
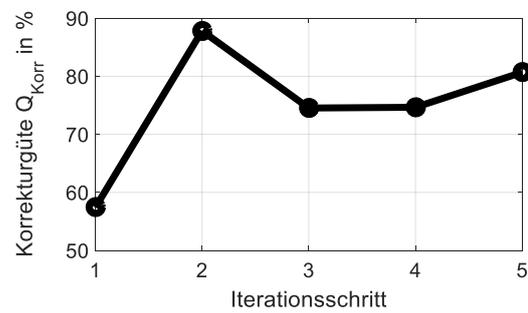
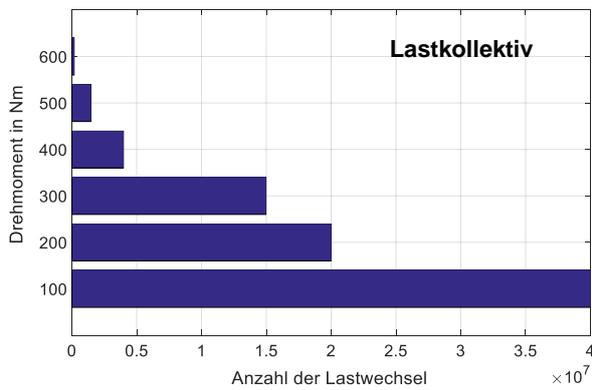
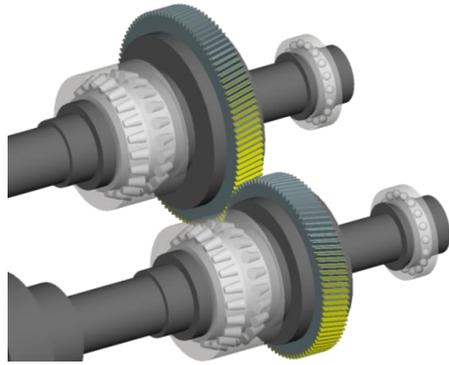


Bild A.44: Beispiel 1 – Variante 1



z_1/z_2	87/105
Schrägungswinkel β	12°
Modul	2 mm
Achsabstand a	200 mm
Bemerkungen	Lagerung steif und asymmetrisch, Welle biegeweich ausgeführt

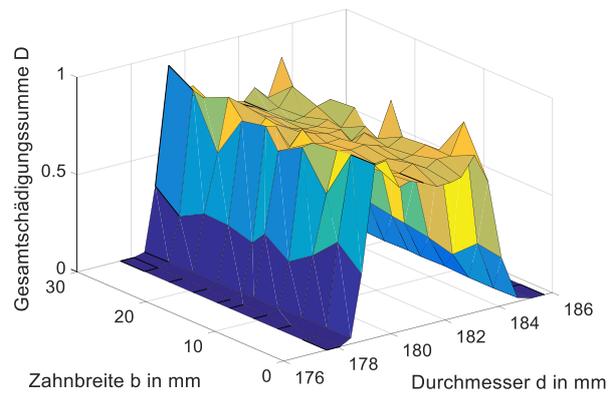
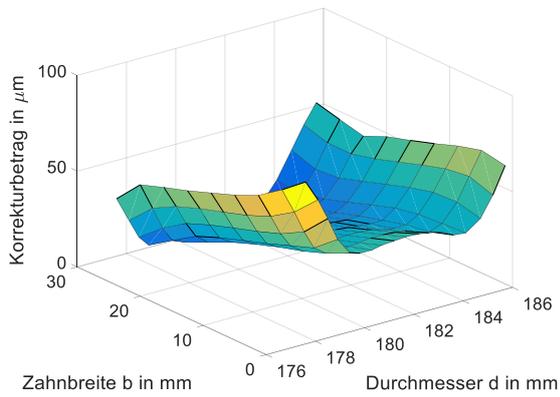
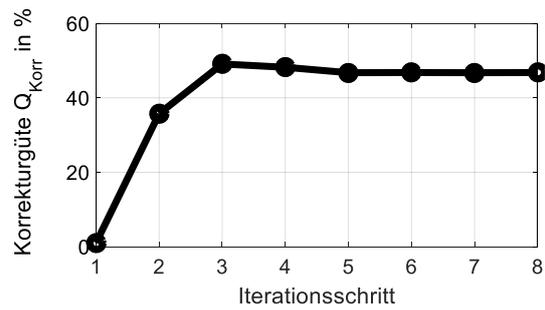
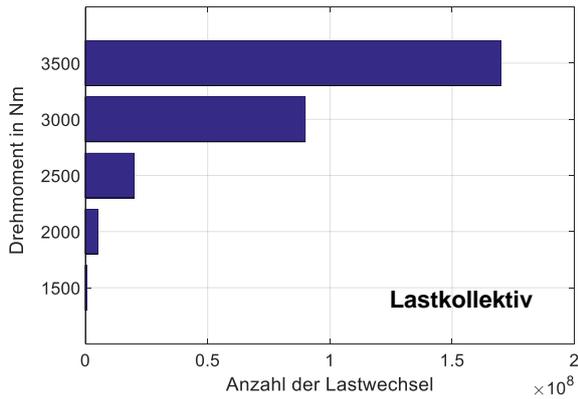


Bild A.45: Beispiel 2 – Variante 3

Dissertationen der FZG

- 1 PERRET, H. Übertragung konstanter Leistung durch stufenlos mechanische Regeltriebe. TH Braunschweig (1935).
- 2 BELLMANN, H. Beiträge zur Prüfung von Bremsbelägen. TH Braunschweig (1939).
- 3 HIERSIG, H.M. Der Zusammenhang von Gestaltung und Beanspruchung bei Schneckengetrieben mit Evolventenverzahnung. TH Braunschweig (1943).
- 4 HELBIG, F. Walzenfestigkeit und Grübchenbildung von Zahnrad- und Wälzlagerwerkstoffen. TH Braunschweig (1943).
- 5 ARF, D. Pendelrollenlager mit symmetrischen und unsymmetrischen Rollen. TH Braunschweig (1944).
- 6 OESMANN, W. Entwicklung einer Stahlsand-Schalt- und Regelkupplung. TH Braunschweig (1945).
- 7 RUBO, E. Ermittlung der Achsfehler-Empfindlichkeit verschiedener Zylinder-Schneckengetriebe mit Hilfe des Einlauf-Abschliffvolumens. TH Braunschweig (1948).
- 8 GLAUBITZ, H. Drehmomentmessungen zum Wendevorgang bei Raupenfahrwerken. TH Braunschweig (1948).
- 9 TALKE, H. Beiträge zur hydrodynamischen Schmiertheorie des ebenen Gleitschuhes auf ebener Fläche. TH Braunschweig (1948).
- 10 CRAMER, H. Über die Reibung und Schmierung feinmechanischer Geräte. TH Braunschweig (1949).
- 11 THOMAS, W. Reibscheiben-Regelgetriebe mit Linienberührung. TH Braunschweig (1949).
- 12 MAUSHAKE, W. Theoretische Untersuchung von Schneckengetrieben mit Globoidschnecke und Stirnrad. TH Braunschweig (1950).
- 13 KRAUPNER, K.W. Das plastische Verhalten umlaufender Stahlrollen bei Punktberührung. TH Braunschweig (1951).
- 14 BANASCHEK, K. Die Gleitreibung geschmierter Flächen kleiner Schmiegunng. Einfluß von Werkstoffpaarung, Krümmung, Oberfläche und Schmierstoff. TH Braunschweig (1951).
- 15 HEYER, E. Versuche mit Zylinderschneckengetrieben. Einfluß von Zahnform, Modul, Durchmesser und Schmierstoff auf Verlustleistung und Tragfähigkeit. TH München (1952).
- 16 HENTSCHEL, G. Der Hochleistungswälztrieb. Entwicklungsstand und Entwicklungsmöglichkeiten. TH München (1952).
- 17 WINTER, H. Tragfähigste Evolventengeradverzahnung. TH München (1954).
- 18 ROY, A.K. Spannungsoptische Untersuchung eines schrägverzahnten Stirnrades. TH München (1957).

-
- | | | |
|----|-----------------|---|
| 19 | RETTIG, H. | Dynamische Zahnkraft. TH München (1957). |
| 20 | OHLENDORF, H. | Verlustleistung und Erwärmung von Stirnrädern. TH München (1958). |
| 21 | UNTERBERGER, M. | Geräuschuntersuchungen an geradverzahnten Zahnradern. TH München (1958). |
| 22 | LOOMAN, J. | Das Abrichten von profilierten Schleifscheiben zum Schleifen von schrägverzahnten Stirnrädern. TH München (1959). |
| 23 | JARCHOW, F. | Versuche an Stirnrad-Globoidschneckenrieben. TH München (1960). |
| 24 | POPOVIC, L. | Einfluß von Zahnform und Bearbeitung auf die Zahnfußfestigkeit. TH München (1960). |
| 25 | EHRENSPIEL, K. | Die Festkörperreibung von geschmierten und ungeschmierten Metallpaarungen mit Linienberührung. TH München (1962). |
| 26 | PITTROFF, H. | Riffelbildung infolge Stillstandserschütterungen bei Wälzlagern. TH München (1962). |
| 27 | SCHREIBER, H. | Zur Auswertung von Lebensdauerversuchen an Wälzlagern. TH München (1962). |
| 28 | ROTH, K. | Untersuchungen über die Eignung der Evolventenzahnform für eine allgemein verwendbare feinwerktechnische Normverzahnung. TH München (1963). |
| 29 | NARUSE, Ch. | Verschleiß, Tragfähigkeit und Verlustleistung bei Schraubenradgetrieben. TH München (1964). |
| 30 | GARTNER, F. | Die Mischreibung bei Linienberührung. TH München (1964). |
| 31 | ASSMANN, H. | Vergleichende Untersuchung von Getriebeölen im FZG-Stirnrad- und Esso-Hypoidprüfstand. TH München (1965). |
| 32 | REISTER, D. | Einseitiges Breitentragen bei Stirnrädern. TH München (1965). |
| 33 | KORRENN, H. | Gleitreibung in den Kontaktstellen zwischen den Wälzkörpern und den Laufbahnen der Ringe von Wälzlagern. TH München (1965). |
| 34 | HÖSEL, Th. | Geräuschuntersuchungen an schrägverzahnten Stirnrädern mit Evolventenverzahnung. TH München (1965). |
| 35 | LANGENBECK, K. | Die Verschleiß- und Freßgrenzlast der Hypoidgetriebe. TH München (1966). |
| 36 | MEMMEL, M. | Untersuchungen über die Tragfähigkeit und Gebrauchsdauer von Gelenklagern. TH München (1966). |

-
- | | | |
|----|-----------------|--|
| 37 | BÖTSCH, H. | Der Einfluß der Oberflächenbearbeitung und -behandlung auf die Flankenfestigkeit von Stirnrädern aus Vergütungsstahl. TH München (1966). |
| 38 | LECHNER, G. | Die Freßlastgrenze bei Stirnrädern aus Stahl. TH München (1966). |
| 39 | LANGE, S. | Untersuchungen von Helicon- und Spiroidgetrieben mit abwickelbaren Schneckenflanken nach der hydrodynamischen und nach der Hertzschen Theorie. TH München (1967). |
| 40 | SCHWÄGERL, D. | Untersuchung von Helicon- und Spiroidgetrieben mit trapezförmigem Schneckenprofil nach der Hertzschen und nach der hydrodynamischen Theorie. TH München (1967). |
| 41 | MICHELS, K. | Schneckengetriebe mit Werkstoffpaarung Stahl/Grauguß. TH München (1968). |
| 42 | GACKSTETTER, G. | Verlustarme Verzahnung. TH München (1968). |
| 43 | GEUPEL, H. | Flüssigkeitsreibung bei Punktberührung. TH München (1969). |
| 44 | GREKOUSSIS, R. | Vergleichende Untersuchungen zur Freßtragfähigkeit von Hypoid- und Stirnrädern. TH München (1969). |
| 45 | BAETHGE, J. | Zahnfederhärte, Drehwegfehler und Geräusch bei Stirnrädern. TH München (1969). |
| 46 | SCHULZ, H.D. | Untersuchung über Tragfähigkeiten und Verlustleistung von Schneckengetrieben mit trapezförmigem Schneckenprofil und kegeliger Schnecke. TH München (1969). |
| 47 | STÖLZLE, K. | Leistungsübertragung in Planetengetrieben bei statischem und dynamischem Betrieb. Berechnung, Optimierung und Versuchsergebnisse. TH München (1970). |
| 48 | SEITZINGER, K. | Die Erwärmung einsatzgehärteter Zahnräder als Kennwert für ihre Freßtragfähigkeit. TU München (1971). |
| 49 | STÖSSEL, K. | Reibungszahlen unter elasto-hydrodynamischen Bedingungen. TU München (1971). |
| 50 | SCHMIDT, G. | Berechnung der Wälzpressung schrägverzahnter Stirnräder unter Berücksichtigung der Lastverteilung. TU München (1972). |
| 51 | HIRT, M. | Einfluß der Zahnfußausrundung auf Spannung und Festigkeit von Geradstirnrädern. TU München (1974). |
| 52 | WILKESMANN, H. | Berechnung von Schneckengetrieben mit unterschiedlichen Zahnprofilformen (Tragfähigkeits- und Verlustleistung für Hohlkreis-, Evolventen- und Geradlinienprofil). TU München (1974). |

-
- 53 RICHTER, M. Der Verzahnungswirkungsgrad und die Freßtragfähigkeit von Hypoid- und Schraubenradgetrieben - Versuchsergebnisse und Berechnungsmethoden. TU München (1976).
- 54 RÖSCH, H. Untersuchungen zur Wälzfestigkeit von Rollen - Einfluß von Werkstoff, Wärmebehandlung und Schlupf. TU München (1976).
- 55 GAGGERMEIER, H. Untersuchungen zur Reibkraftübertragung in Regel-Reibradgetrieben im Bereich elasto-hydrodynamischer Schmierung. TU München (1977).
- 56 KÄSER, W. Beitrag zur Grübchenbildung an gehärteten Zahnrädern. Einfluß von Härtetiefe und Schmierstoff auf die Flanken-tragfähigkeit. TU München (1977).
- 57 KNABEL, W. Geräusche und Schwingungen an Stirnradgetrieben. Untersuchungen geometrischer Einflüsse bei hohen Drehzahlen und Belastungen. TU München (1977).
- 58 WIRTH, X. Über den Einfluß von Schleifkerben auf die Zahnfußtragfähigkeit und das Schädigungsverhalten oberflächengehärteter Zahnräder. TU München (1977).
- 59 HUBER, G. Zylinderschneckengetriebe, ein Beitrag zur Berechnung von Grübchen- und Gleitverschleiß und Angaben zum Wirkungsgradverhalten aus Versuchen. TU München (1978).
- 60 BROSSMANN, U. Über den Einfluß der Zahnfußausrundung und des Schrägungswinkels auf Beanspruchung und Festigkeit schrägverzahnter Stirnräder. TU München (1979).
- 61 PLEWE, H.-J. Untersuchungen über den Abriebverschleiß von geschmierten, langsam laufenden Zahnrädern. TU München (1980).
- 62 FRESEN, G. Untersuchungen über die Tragfähigkeit von Hypoid- und Kegelradgetrieben (Grübchen, Ridging, Rippling, Graufleckigkeit und Zahnbruch). TU München (1981).
- 63 OSTER, P. Beanspruchung der Zahnflanken unter Bedingungen der Elastohydrodynamik. TU München (1982).
- 64 HORNING, K. Zahnräder aus Bainitischem Gusseisen mit Kugelgraphit. TU München (1983).
- 65 WEISS, T. Zum Festigkeits- und Verzugsverhalten von randschichtgehärteten Zahnrädern. TU München (1983).
- 66 VOJACEK, H. Das Reibungsverhalten von Fluiden unter elastohydrodynamischen Bedingungen. Einfluß der chem. Struktur des Fluides, der Werkstoffe und der Makro- und Mikrogeometrie der Gleit/Wälzkörper. TU München (1984).

-
- 67 SCHÖNNENBECK, G. Einfluß der Schmierstoffe auf die Zahnflankenermüdung (Graufleckigkeit und Grübchenbildung) hauptsächlich im Umfangsgeschwindigkeitsbereich 1...9 m/s. TU München (1984).
- 68 WIENER, H. Untersuchung der Rollenkinematik im Axial-Pendelrollenlager. TU München (1984).
- 69 MATHIAK, D. Untersuchungen über Flankentragfähigkeit, Zahnfußtragfähigkeit und Wirkungsgrad von Zylinderschneckengetrieben. TU München (1984).
- 70 STRASSER, H. Einflüsse von Verzahnungsgeometrie, Werkstoff und Wärmebehandlung auf die Zahnfußtragfähigkeit. TU München (1984).
- 71 JOACHIM, F.-J. Untersuchungen zur Grübchenbildung an vergüteten und normalisierten Zahnrädern (Einfluß von Werkstoffpaarung, Oberflächen- und Eigenspannungszustand). TU München 1984.
- 72 GERBER, H. Innere dynamische Zusatzkräfte bei Stirnradgetrieben - Modellbildung, innere Anregung und Dämpfung. TU München (1984).
- 73 SIMON, M. Messung von elasto-hydrodynamischen Parametern und ihre Auswirkung auf die Grübchentragfähigkeit vergüteter Scheiben und Zahnräder. TU München (1984).
- 74 SCHMIDT, W. Untersuchungen zur Grübchen- und zur Zahnfußtragfähigkeit geradverzahnter evolventischer Innenstirnräder. TU München (1984).
- 75 FUNCK, G. Wärmeabführung bei Getrieben unter quasistationären Betriebsbedingungen. TU München (1985).
- 76 PAUL, M. Einfluß von Balligkeit und Lageabweichungen auf die Zahnfußbeanspruchung spiralverzahnter Kegelräder. TU München (1986).
- 77 HOPPE, F. Das Abschalt- und Betriebsverhalten von mechanischen Sicherheitskupplungen. TU München (1986).
- 78 MICHAELIS, K. Die Integraltemperatur zur Beurteilung der Freßtragfähigkeit von Stirnradgetrieben. TU München (1987).
- 79 WECH, L. Untersuchungen zum Wirkungsgrad von Kegelrad- und Hypoidgetrieben. TU München (1987).
- 80 KNAUER, G. Zur Grübchentragfähigkeit einsatzgehärteter Zahnräder - Einfluß von Werkstoff, Schmierstoff und Betriebstemperatur. TU München (1988).
- 81 PLACZEK, T. Lastverteilung und Flankenkorrektur in gerad- und schrägverzahnten Stirnradstufen. TU München (1988).
- 82 PFLAUM, H. Das Reibungsverhalten ölgeschmierter Kegelreibkupplungen in Synchronisationseinrichtungen von Kraftfahrzeug-Schaltgetrieben. TU München (1988).

-
- | | | |
|----|-------------------|---|
| 83 | BRINCK, P. | Zahnfußtragfähigkeit oberflächengehärteter Stirnräder bei Lastrichtungsumkehr. TU München (1989). |
| 84 | | entfallen |
| 85 | NEUPERT, K. | Verschleißtragfähigkeit und Wirkungsgrad von Zylinder-Schneckengetrieben. TU München (1990). |
| 86 | PREXLER, F. | Einfluß der Wälzflächenrauheit auf die Grübchenbildung vergüteter Scheiben im EHD-Kontakt. TU München (1990). |
| 87 | SCHALLER, K.-V. | Betriebsfestigkeitsuntersuchungen zur Grübchenbildung an einsatzgehärteten Stirnradflanken. TU München (1990). |
| 88 | COLLENBERG, H.-F. | Untersuchungen zur Freßtragfähigkeit schnelllaufender Stirnradgetriebe. TU München (1991). |
| 89 | MÜLLER, R. | Schwingungs- und Geräuschanregung bei Stirnradgetrieben. TU München (1991). |
| 90 | ANZINGER, M. | Werkstoff- und Fertigungseinflüsse auf die Zahnfußtragfähigkeit, insbesondere im hohen Zeitfestigkeitsgebiet. TU München (1991). |
| 91 | KAGERER, E. | Messung von elasto-hydrodynamischen Parametern im hochbelasteten Scheiben- und Zahnkontakt. TU München (1991). |
| 92 | HASLINGER, K. | Untersuchungen zur Grübchentrugfähigkeit profilkorrigierter Zahnräder. TU München (1991). |
| 93 | VOLLHÜTER, F. | Einfluß der Achsversetzung auf die Grübchen- und Zahnfußtragfähigkeit von spiralverzahnten KegeLRädern. TU München (1992). |
| 94 | PINNEKAMP, B. | Das Schaltverhalten von PKW-Getriebesynchronisierungen. TU München (1992). |
| 95 | SCHUBERT, M. | Einfluß der Befestigungsart und Radkranzdicke auf die Zahntragfähigkeit von Innenstirnrädern. TU München (1993). |
| 96 | STEINGRÖVER, K. | Untersuchung zu Verschleiß, Verlustgrad und Fressen bei Zylinder-Schneckengetrieben. TU München (1993). |
| 97 | ELSTORPFF, M.-G. | Einflüsse auf die Grübchentrugfähigkeit einsatzgehärteter Zahnräder bis in das höchste Zeitfestigkeitsgebiet. TU München (1993). |
| 98 | EMMERT, S. | Untersuchungen zur Zahnflankenermüdung (Graufleckigkeit, Grübchenbildung) schnelllaufender Stirnradgetriebe. TU München (1994). |
| 99 | SUCHANDT, Th. | Betriebsfestigkeitsuntersuchungen zur Zahnfußtragfähigkeit einsatzgehärteter Zahnräder und zur Bruchfestigkeit vergüteter Laschenketten. TU München (1994). |

-
- | | | |
|-----|---------------------|---|
| 100 | HÄMMERL, B. | Lebensdauer- und Temperaturverhalten ölgekühlter Lamellenkupplungen bei Lastkollektivbeanspruchung. TU München (1994). |
| 101 | WEISS, R. | Einfluß der Ölalterung auf die Zahnflankentragfähigkeit. TU München (1994). |
| 102 | SCHLENK, L. | Untersuchungen zur Freßtragfähigkeit von Großzahnradern. TU München (1995). |
| 103 | MANN, U. | Schmierfilmbildung in elasto-hydrodynamischen Kontakten, Einfluß verschiedener Grundöle und Viskositäts-Index-Verbesserer. TU München (1995). |
| 104 | RUDZEWSKI, S. | Systemtechnische Verknüpfung eingeführter Getriebeberechnungsprogramme. TU München (1995). |
| 105 | RANK, R. | Untersuchungen zur Lebensdauerprüfung von Synchronisierungen. TU München (1995). |
| 106 | EBERSPÄCHER, C. | Reihenfolgeeffekte bei der Grübchen-Betriebsfestigkeit einsatzgehärteter Zahnräder. TU München (1995). |
| 107 | RANK, B. | Untersuchungen zur Grübchenbildung bei Zylinder-Schneckengetrieben. TU München (1996). |
| 108 | SATTELBERGER, K. | Schwingungs- und Geräuschanregung bei ein- und mehrstufigen Stirnradgetrieben. TU München (1997). |
| 109 | HIRSCHMANN, V. | Tragfähigkeitsuntersuchungen an stufenlosen Umschlingungsgetrieben. TU München (1997). |
| 110 | THOMAS, J. | Flankentragfähigkeit und Laufverhalten von hartfeinbearbeiteten Kegelrädern. TU München (1998). |
| 111 | WIKIDAL, F. | Berechnung der Flankenpressung gerad- und schrägverzahnter Stirnräder für last- und fertigungsbedingte Abweichungen. TU München (1998). |
| 112 | PERPONCHER, V., CH. | Einflüsse von Reibflächentopographie und Beanspruchungen auf das Reibungs- und Verschleißverhalten von Synchronisierungen. TU München (1998). |
| 113 | SCHEDL, U. | Einfluß des Schmierstoffs auf die Grübchenlebensdauer einsatzgehärteter Zahnräder. TU München (1998). |
| 114 | VOLLMER, T. | Methodik zur Entwicklung einer Fahrstrategie für Fahrzeuge, ausgeführt am Beispiel des Autarken Hybrids. TU München (1998). |
| 115 | HEITMANN, A. | Entwicklung des i ² -Getriebes für den Autarken Hybrid-Antriebsstrang. TU München (1998). |
| 116 | PFLEGER, F. | Schalt- und Lebensdauerverhalten von Lamellenkupplungen. TU München (1998). |
| 117 | KERSCHL, S. | Der Autarke Hybrid - Optimierung des Antriebsstrangs hinsichtlich Energieverbrauch und Bestimmung des Einsparpotentials. TU München (1998). |

-
- | | | |
|------|-----------------|---|
| 118 | DÖBEREINER, R. | Tragfähigkeit von Hochverzahnungen geringer Schwingungsanregung. TU München (1998). |
| 119 | WEIGAND, U. | Werkstoff- und Wärmebehandlungseinflüsse auf die Zahnfußtragfähigkeit. TU München (1999). |
| 120 | SCHRADE, U. | Einfluß von Verzahnungsgeometrie und Betriebsbedingungen auf die Graufleckentragfähigkeit von Zahnradgetrieben. TU München (2000). |
| 121 | KÖLL, J. | Konstruktion des Getriebes für ein Pkw-Hybridantriebssystem. TU München (2000). |
| 122 | FÖRSTER, W. | Der Lastschaltvorgang beim stufenlosen i^2 -Getriebe des Autarken Hybrid-Antriebsstrangs. TU München (1999). |
| 123 | LANGE, N. | Hoch fresstragfähige Schneckengetriebe mit Rädern aus Sphaeroguß. TU München (2000). |
| 124 | LUTZ, M. | Methoden zur rechnerischen Ermittlung und Optimierung von Tragbildern an Schneckengetrieben. TU München (2000). |
| 125 | KOPATSCH, F. | Wirksamkeit von Viskositätsindex-Verbesserern im EHD-Zahnradkontakt. TU München (2000). |
| 126 | BAYERDÖRFER, I. | Einfluß von betriebsbedingten Schmierstoffveränderungen auf die Flankentragfähigkeit einsatzgehärteter Stirnräder. TU München (2000). |
| 126e | DOMIAN, H.-J. | Systematische Synthese von Getriebestrukturen der Vorgelegebauart. TU München 2001. |
| 127 | TOBIE, T. | Zur Grübchen- und Zahnfußtragfähigkeit einsatzgehärteter Zahnräder. TU München (2001). |
| 128 | STAHL, K. | Grübchentragfähigkeit einsatzgehärteter Gerad- und Schrägverzahnungen unter besonderer Berücksichtigung der Pressungsverteilung. TU München (2001). |
| 129 | NEUMÜLLER, M. | Einfluß der Ölalterung auf Reibungs- und Verschleißverhalten von Synchronisierungen. TU München (2001). |
| 130 | MOSBACH, C. | Das Reibungs- und Reibschwing-Verhalten nasslaufender Lamellenkupplungen. TU München (2002). |
| 131 | DYLA, A. | Modell einer durchgängig rechnerbasierten Produktentwicklung. TU München (2002). |
| 132 | GRASWALD, C. | Reibung im elastohydrodynamischen Kontakt von Reibradgetrieben. TU München (2002). |
| 133 | GEISER, H.. | Grundlagen zur Beurteilung des Schwingungsverhaltens von Stirnrädern. TU München (2002). |
| 134 | SCHINAGL, S. | Zahnfußtragfähigkeit schrägverzahnter Stirnräder unter Berücksichtigung der Lastverteilung. TU München (2002). |
| 135 | DOLESCHEL, A. | Wirkungsgradberechnung von Zahnradgetrieben in Abhängigkeit vom Schmierstoff. TU München (2003). |

-
- 136 ANNAST, R. Kegelrad-Flankenbruch. TU München (2003)
- 137 SÜSSMUTH, J.-F. Eignungsbeurteilung von Schmierstoffen für stufenlose Umschlingungsgetriebe. TU München (2003).
- 138 MATTEN, D. Methode zur Entwicklung ingenieurwissenschaftlicher Berechnungsprogramme. TU München (2003).
- 139 GEIER, N. Untersuchung des Reibungs- und Verschleißverhaltens nasslaufender Kupplungen in Abhängigkeit ihrer Reibflächentopographie. TU München (2003).
- 140 HERTTER, T. Rechnerischer Festigkeitsnachweis der Ermüdungstragfähigkeit vergüteter und einsatzgehärteter Stirnräder. TU München (2003).
- 141 KRIEGER, H. Alterung von Schmierstoffen im Zahnradprüfstand und in Praxisgetrieben. TU München (2004).
- 142 STEUTZGER, M. Einfluß der Baugröße auf die Zahnfußtragfähigkeit einsatzgehärteter Stirnräder. TU München (2004).
- 143 SCHMIDBAUER, T. Aufbau und Erprobung des Autarken Hybrid-Antriebsstrangs im Versuchsfahrzeug. TU München (2004).
- 144 LIU, W. Einfluss verschiedener Fertigungsverfahren auf die Graufleckentragfähigkeit von Zahnradgetrieben. TU München (2004).
- 145 FEHLING, R. Höhere Tragfähigkeit bei Zahnradflanken durch eine nichtevolventische Profilmodifikation. TU München (2004).
- 146 GUTTENBERG, P. Der autarke Hybrid am Prüfstand - Funktion, Kraftstoffverbrauch und energetische Analyse. TU München (2004).
- 147 WIMMER, T. Einflüsse auf das Lastübernahmeverhalten von nasslaufenden Lamellenkupplungen. TU München (2004).
- 148 RADEV, T. Einfluss des Schmierstoffes auf die Grübchentragfähigkeit einsatzgehärteter Zahnräder - Entwicklung des Praxisnahen Pittingtests. TU München (2005).
- 149 KRASDEV, I. Optimierung des Lastschaltvorgangs im i²-Getriebe. TU München (2005).
- 150 HEILEMANN, J. Tragfähigkeit und Wirkungsgrad bei unterschiedlichen Schnecken-Zahnflankenformen unter Berücksichtigung der Oberflächenhärte und Härtetiefe. TU München (2005).
- 151 HEIZENRÖTHER, M. Das Stirnradifferential mit Innenverzahnung im Vergleich zum Kegelradifferential inklusive einer Sperrwertanalyse. TU München (2005).
- 152 WIMMER, A. Lastverluste von Stirnradverzahnungen - Konstruktive Einflüsse, Wirkungsgradmaximierung, Tribologie. TU München (2006).

-
- | | | |
|-----|-------------------|--|
| 153 | BRUCKMEIER, S. | Flankenbruch bei Stirnradgetrieben. TU München (2006). |
| 154 | HAUSER, C. | Einfluss der Ölalterung auf Reibcharakteristik und Reibschwingverhalten von Lamellenkupplungen. TU München (2007). |
| 155 | GROSSL, A. | Einfluss von PVD-Beschichtungen auf die Flanken- und Fußtragfähigkeit einsatzgehärteter Stirnräder. TU München (2007). |
| 156 | STEINBERGER, G. | Optimale Grübchentragfähigkeit von Schrägverzahnungen. TU München (2007). |
| 157 | JAROS, M. | Integration des STEP-Produktmodells in den Getriebeentwicklungsprozess. TU München (2007). |
| 158 | RADEV, S. | Einfluss von Flankenkorrekturen auf das Anregungsverhalten gerad- und schrägverzahnter Stirnradpaarungen. TU München (2007). |
| 159 | BRAYKOFF, C. | Tragfähigkeit kleinmoduliger Zahnräder. TU München (2007). |
| 160 | STANGL, M. | Methodik zur kinematischen und kinetischen Berechnung mehrwelliger Planeten-Koppelgetriebe. TU München (2007). |
| 161 | STENICO, A. | Werkstoffmechanische Untersuchungen zur Zahnfußtragfähigkeit einsatzgehärteter Zahnräder. TU München (2007). |
| 162 | SCHWIENBACHER, S. | Einfluss von Schleifbrand auf die Flankentragfähigkeit einsatzgehärteter Zahnräder. TU München (2008). |
| 163 | WINKLER, J. | Tribologischer Schichtaufbau bei Synchronisierungen und sein Einfluss auf Reibung und Verschleiß. TU München (2008). |
| 164 | WIRTH, C. | Zur Tragfähigkeit von Kegelrad- und Hypoidgetrieben. TU München (2008). |
| 165 | KREIL, O. | Einfluss der Oberflächenstruktur auf Druckverteilung und Schmierfilmdicke im EHD-Kontakt. TU München (2009). |
| 166 | OTTO, H.-P. | Flank load carrying capacity and power loss reduction by minimised lubrication. TU München (2009). |
| 167 | OTTO, M. | Lastverteilung und Zahnradtragfähigkeit von schrägverzahnten Stirnrädern. TU München (2009). |
| 168 | TOMIC, D. | Zum Verschleiß von Kegelreibkupplungen - Einflüsse von Belastung und Schmierstoff auf Reibschichteigenschaften. TU München (2009). |
| 169 | WEISEL, C. | Schneckengetriebe mit lokal begrenztem Tragbild. TU München (2009). |
| 170 | WEITL, R. | Zur Tragfähigkeitsberechnung von Wälzlagern und Stirnrädern. TU München (2010). |

-
- | | | |
|-----|---------------|--|
| 171 | MULZER, F. | Systematik hochübersetzender coaxialer Getriebe. TU München (2010). |
| 172 | SCHUDY, J. | Untersuchungen zur Flankentragfähigkeit von Außen- und Innenverzahnungen. TU München (2010). |
| 173 | BRETL, N. | Einflüsse auf die Zahnfußtragfähigkeit einsatzgehärteter Zahnräder im Bereich hoher Lastspielzahlen. TU München (2010). |
| 174 | GRIGGEL, T. | Einfluss der Fertigungsqualität auf die Schwingungsanregung von Stirnrädern. TU München (2010). |
| 175 | LAYHER, M. | Einfluss der Schmierstoffadditivierung auf das Reibungsverhalten nasslaufender Reibschaltelemente. TU München (2011). |
| 176 | HOCHMANN, M. | Zahnradtragfähigkeit bei Schmierung mit Getriebefließfetten. TU München (2011). |
| 177 | DETZEL, J. | Tribologische Untersuchungen an Achsgetrieben zur Verbesserung des Wirkungsgrads. TU München (2011). |
| 178 | ZIEGLER, A. | Zur verkürzten Systemlebensdauerprüfung von Zahnradgetrieben. TU München (2011). |
| 179 | THOMA, F. | Lastübertragung im verformten System Lager-Welle-Zahnrad. TU München (2012). |
| 180 | FRÜHE, T. | Berechnung und Minimierung der Zahnfußspannung von Standard- und LowLos-Verzahnungen. TU München (2012). |
| 181 | WITZIG, J. | Flankenbruch - Eine Grenze der Zahnradtragfähigkeit in der Werkstofftiefe. TU München (2012). |
| 182 | KLEIN, M. | Zur Fresstragfähigkeit von Kegelrad- und Hypoidgetrieben. TU München (2012). |
| 183 | KURTH, F. | Efficiency Determination and Synthesis of Complex-Compound Planetary Gear Transmissions. TU München (2012). |
| 184 | WOHLLEBER, F. | Thermischer Haushalt nasslaufender Lamellenkupplungen. TU München (2012). |
| 185 | HEIDER, M. | Schwingungsverhalten von Zahnradgetrieben. TU München (2012). |
| 186 | MONZ, A. | Tragfähigkeit und Wirkungsgrad von Schneckengetrieben bei Schmierung mit konsistenten Getriebefetten. TU München (2012). |
| 187 | WIRTH, M. | Schleppmomente in Synchronisierungen von Fahrzeuggetrieben. TU München (2012). |
| 188 | BANSEMIR, G. | Konstruktionsleitsystem für den durchgängig rechnerbasierten Zahnradgetriebeentwurf. TU München (2012). |

-
- | | | |
|-----|--------------------|--|
| 189 | HERGESELL, M. | Grauflecken- und Grübchenbildung an einsatzgehärteten Zahnradern mittlerer und kleiner Baugröße. TU München (2013). |
| 190 | KOLLER, P. | Steigerung der Zahnflankentragfähigkeit durch Optimierung von Eigenspannungs- und Oberflächenzustand. TU München (2013). |
| 191 | SCHLEICH, T. | Temperatur- und Verlustleistungsverhalten von Wälzlagern in Getrieben. TU München (2013). |
| 192 | STEMPLINGER, J.-P. | Tragfähigkeit und Wirkungsgrad von Stirnradgetrieben bei Schmierung mit hochviskosen Fluiden und Fetten NLGI 0,1 und 2. TU München (2013). |
| 193 | FÜRSTENBERGER, M. | Betriebsverhalten verlustoptimierter Kunststoffzahnradern. TU München (2013). |
| 194 | HOMBAUER, M. | Grauflecken an Kegelrad- und Hypoidverzahnungen und deren Einfluss auf die Grübchentragfähigkeit. TU München (2013). |
| 195 | MAYER, J. | Einfluss der Oberfläche und des Schmierstoffs auf das Reibungsverhalten im EHD-Kontakt. TU München (2013). |
| 196 | BAUHOFFER, H. | Kontakt- und Laufverhalten von Kronenradern unter Montageabweichungen. TU München (2014). |
| 197 | LECHNER, C. | Energiebilanzierung des CVT-Hybrid. TU München (2014). |
| 198 | HINTERSTOISSER, M. | Zur Optimierung des Wirkungsgrades von Stirnradgetrieben TU München (2014). |
| 199 | LOMBARDO, S. | Einfluss von verschiedenen Carbonitrierverfahren auf die Zahnfuß- sowie Zahnflankentragfähigkeit von Stirnrädern. TU München (2014). |
| 200 | IDLER, S. | Die Fresstragfähigkeit stufenloser Umschlingungsgetriebe. TU München (2014). |
| 201 | LANGHEINRICH, A. | Geometrie, Beanspruchung und Verformung asymmetrischer Stirnradverzahnungen. TU München (2014). |
| 202 | MATT, P. | Einfluss der Stirnkanten auf die Tragfähigkeit von Verzahnungen. TU München (2014). |
| 203 | HENSEL, M. | Thermische Beanspruchbarkeit und Lebensdauerverhalten von nasslaufenden Lamellenkupplungen. TU München (2014). |
| 204 | GEIGER, J. | Wirkungsgrad und Wärmehaushalt von Zahnradgetrieben bei stationären Betriebszuständen. TU München (2015). |
| 205 | SIGMUND, W. | Untersuchung und Simulation des Verschleißverhaltens von Schneckengetrieben mit unvollständigem Tragbild. TU München (2015). |

-
- | | | |
|-----|-----------------|--|
| 206 | PARLOW, J. | Erweiterter Verzahnungsentwurf im Anforderungs- und Gesamtsystemkontext. TU München (2016). |
| 207 | NEUBAUER, B. | Lastverteilung und Anregungsverhalten in Planetengetriebesystemen. TU München (2016). |
| 208 | NITSCH, C. | Dynamisches Betriebsverhalten von Werkstoffverbundzahnradern. TU München (2016). |
| 209 | BIHR, J. | Untersuchung des Schwingungsverhaltens von mehrstufigen Stirnradgetrieben unter besonderer Berücksichtigung des Welle-Lager-Systems. TU München (2016). |
| 210 | SCHURER, S. | Einfluss nichtmetallischer Einschlüsse in hochreinen Werkstoffen auf die Zahnfußtragfähigkeit. TU München (2016). |
| 211 | KADACH, D. | Stillstandsmarkierungen an Zahnradern und deren Auswirkungen auf die Flankentragfähigkeit. TU München (2016). |
| 212 | FELBERMAIER, M. | Untersuchungen zur Graufleckenbildung und deren Einfluss auf die Grübchentragfähigkeit einsatzgehärteter Stirnräder. TU München (2016). |
| 213 | ACUNER, R. | Synchronisierungen mit Carbon-Reibwerkstoffen unter hohen und extremen Beanspruchungen. TU München (2016). |
| 214 | LOHNER, T. | Berechnung von TEHD Kontakten und Einlaufverhalten von Verzahnungen. TU München (2016). |
| 215 | ZIMMER, M. | Berechnung und Optimierung von Geometrie und Eingriffsverhalten von Verzahnungen beliebiger Achslage. TU München (2017). |
| 216 | GWINNER, P. | Auslegung schwingungsarmer Stirnradverzahnungen für den automobilen Einsatz in hochdrehenden, elektrisch angetriebenen Achsgetrieben. TU München (2017). |
| 217 | SCHULTHEIß, H. | Zum Verschleißverhalten einsatzgehärteter Zahnradpaarungen in Abhängigkeit des Schmierungsmechanismus bei Fettschmierung. TU München (2017). |
| 218 | MOSER, K. | Methode zur Untersuchung des Betriebsverhaltens stufenloser Umschlingungsgetriebe. TU München (2017). |
| 219 | STREBEL, M. | Spontanschäden an nasslaufenden Lamellenkupplungen. TU München (2017). |
| 220 | BAAR, M. | Kennwerte zur Tragfähigkeit kleinmoduliger Kronenradverzahnungen unterschiedlicher Werkstoffpaarung. TU München (2017). |
| 221 | WICKBORN, C. | Erweiterung der Flankentragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern in der Werkstofftiefe. TU München (2017). |
| 222 | MEINGASSNER, G. | Methodik zur Untersuchung des Reibungsverhaltens nasslaufender Lamellenkupplungen bei Langsamlauf- und Mikroschlupf. TU München (2017). |

- | | | |
|-----|-------------|--|
| 223 | ZORNEK, B. | Untersuchungen zur Flankentragfähigkeit vergüteter und nitrierter Innen- und Außenverzahnungen. TU München (2018). |
| 224 | DOBLER, F. | Einflüsse auf die Tragfähigkeit induktiv umlaufgehärteter Stirnräder. TU München (2018). |
| 225 | DAFFNER, M. | Validierung von Verformungsberechnungen im System Zahnrad-Welle-Lager-Gehäuse. TU München (2018). |
| 226 | HEIN, M. | Zur ganzheitlichen betriebsfesten Auslegung und Prüfung von Getriebezahnrädern |