

Yvonne Gretzinger

Steigerung der nutzbaren Restlebensdauer von Zahnrädern durch eine adaptive Betriebsstrategie

D 93
ISBN 978-3-948308-05-6

Institut für Maschinenelemente

Antriebs-, Dichtungs-, Schienenfahrzeug- u. Zuverlässigkeitstechnik

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

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

**Steigerung der nutzbaren Restlebensdauer von Zahnrädern
durch eine adaptive Betriebsstrategie**

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

Vorgelegt von

Yvonne Gretzinger, M. Sc.

aus Laupheim

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Bernd Bertsche
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Karsten Stahl

Tag der mündlichen Prüfung: 24. Januar 2022

Institut für Maschinenelemente der Universität Stuttgart

2022

Meiner Familie gewidmet

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als akademische Mitarbeiterin am Institut für Maschinenelemente (IMA) der Universität Stuttgart.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Bertsche, Leiter des Instituts für Maschinenelemente. Durch sein hohes Maß an entgegengebrachtem Vertrauen und seine Unterstützung wurde diese Arbeit erst möglich. Auch die von ihm stets geförderte familiäre Atmosphäre sowie die fachliche und wissenschaftliche Führung hat zum Gelingen dieser Promotion beigetragen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Karsten Stahl, Ordinarius des Lehrstuhls für Maschinenelemente der Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau (FZG) an der Technischen Universität München, danke ich für die Übernahme des Mitberichts sowie die konstruktive Diskussion und Durchsicht meiner Arbeit. Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Gundelsweiler danke ich für die Übernahme des Mitberichts.

Besonders bedanken möchte ich mich bei Herrn Dr.-Ing. Martin Dazer, Bereichsleiter Zuverlässigkeitstechnik und Antriebstechnik, für die zahlreichen konstruktiven Diskussionen und die freundschaftliche Unterstützung während der Erstellung der Arbeit. Ihm sowie Herr Dr.-Ing. Peter Fietkau und Herr Thomas Herzig danke ich für die Durchsicht der Arbeit und das kritische Hinterfragen. Für die grammatikalische Durchsicht meiner Arbeit danke ich Frau Dr.-Ing. Bettina Rzepka.

Mein herzlicher Dank gilt auch allen aktiven und ehemaligen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts für die hervorragende kollegiale und bereichsübergreifende Zusammenarbeit sowie die zahlreichen privaten Aktivitäten. Insbesondere möchte ich an dieser Stelle meine Kollegen aus dem AT-Bereich, Andreas Kroner und Martin Diesch, hervorheben und mich für die zahlreichen diskussionsfreudigen Montagabende bedanken. Auch allen Mitarbeitern des AK PHM&Safety danke ich für die Diskussionen und die wertvollen Tipps. Weiterhin bedanke ich mich bei allen Studierenden, die mich bei unterschiedlichen Themenstellungen unterstützt haben.

Mein herzlichster Dank gilt meiner Familie für die umfangreiche Unterstützung und den Rückhalt auf meinem gesamten Lebensweg. Ohne euch wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Überdies möchte ich mich bei meinen Freunden bedanken, die mich vor allem in der Endphase entbehren mussten. Vielen Dank für das entgegengebrachte Verständnis und die Geduld. Nicht zuletzt Danke ich dir, Götz, für deine Unterstützung vor allem während des Endsprints der Arbeit.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	V
Abstract	VII
Notation	IX
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation und Problemstellung	2
1.2 Ziele der Arbeit	3
1.3 Aufbau der Arbeit	5
2 Grundlagen und Stand der Technik	7
2.1 Grundlagen der Zuverlässigkeitstechnik und Betriebsfestigkeit	7
2.1.1 Grundbegriffe der Zuverlässigkeitstechnik	8
2.1.2 Wahrscheinlichkeitsverteilungen	9
2.1.3 Parameterschätzung	10
2.1.4 Hypothesentests	11
2.1.5 Monte Carlo Simulation	11
2.1.6 Betriebsfestigkeit	12
2.1.7 Lebensdauermodell nach Wöhler	13
2.1.8 Schadensakkumulation	14
2.1.9 Degradationsmodelle	16
2.2 Schadensarten bei Zahnrädern	18
2.3 Grübchen an Zahnrädern	21
2.3.1 Phänomenologische Beschreibung des Schadensmechanismus Grübchen	21
2.3.2 Einflussfaktoren auf die Grübchenbildung	23
2.3.3 Grübchenwachstum	26
2.3.4 Ausfallverhalten von Grübchen	27
2.4 Prognostics and Health Management (PHM)	29

2.4.1	Einführung in das Themenfeld PHM	29
2.4.2	Methoden für das PHM	30
3	Adaptive Betriebsstrategie zur Steigerung der RUL	34
3.1	Forschungsfrage und Hypothesen	34
3.2	Prognostics and Health Management bei Getrieben	36
3.3	Entwicklung einer adaptiven Betriebsstrategie	41
3.3.1	Die adaptive Betriebsstrategie	42
3.3.2	Herausforderungen der adaptiven Betriebsstrategie	45
3.4	Zwischenfazit zur adaptiven Betriebsstrategie	49
4	Erweiterte Auswertung von Grübchenversuchen	50
4.1	Prüfstand und Prüfumgebung aus vorherigen Arbeiten	51
4.1.1	Hochdynamischer Verspannungsprüfstand	51
4.1.2	Prüfling/Prüfverzahnung	52
4.1.3	Prüfablauf und bisherige Ergebnisse	53
4.1.4	Ausgangsbasis der erweiterten Auswertung	54
4.2	Lage der Grübchen am Umfang	57
4.3	Degradationspfade	62
4.4	Verteilung für alle Zähne	68
4.4.1	Extrapolation auf EOL-Kriterium und Ausfallverteilung	69
4.4.2	Verteilungen über die initiale Grübchengröße und den Erscheinungszeitpunkt	72
4.4.3	Notwendige Untersuchungen zur Erfassung der Gesamtverteilung	75
4.5	Zwischenfazit zur Grübchenauswertung	76
5	Ermittlung der möglichen Lebensdauersteigerung	78
5.1	Simulationsmodell	79
5.1.1	Initial- und Ausfallverteilung	82
5.1.2	Variation des Drehmoments	84
5.1.3	Wöhlerkurve	86
5.1.4	Sortierung der Zufallszahlen am Umfang des Zahnrads	88
5.1.5	Degradationspfade der Einzelzähne	92
5.1.6	Start der adaptiven Betriebsstrategie	93
5.1.7	Schadensakkumulation je Zahn	94
5.1.8	Potenzial je Zahn und Zahnrad	95
5.1.9	Statistische Auswertung	96
5.2	Einflussfaktoren für die Parameterstudie	98
5.3	Plausibilisierung der Simulation	100
5.3.1	Einfluss der Streuung der Belastbarkeit	101
5.3.2	Einfluss des Ausfallzahnes	103

5.3.3	Einfluss der Dauer der adaptiven Betriebsstrategie	112
5.3.4	Einfluss des Lebensdauermodells	118
5.4	Sensitivitätsanalyse	121
5.5	Zwischenfazit zur Lebensdauersteigerung	126
6	Anwendungsbeispiel	128
7	Zusammenfassung und Ausblick	137
	Literaturverzeichnis	141
8	Anhang: Erweiterte Grübchenauswertung	157
9	Anhang: Simulative Studie	166

Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit wird eine adaptive Verlängerung der Lebensdauer von Maschinenelementen im Betrieb untersucht. Vor allem bei einsatzgehärteten Verzahnungen ist der schwächste Zahn am Umfang des Zahnrades für den Ausfall der Komponente durch Grübchenbildung verantwortlich. Die restlichen Zähne sind zu diesem Ausfallzeitpunkt intakt und verfügen somit über Lebensdauer-Reserven. Innerhalb einer adaptiven Betriebsstrategie sollen diese Lebensdauer-Reserven für die Steigerung der Restlebensdauer genutzt werden.

Basis für die adaptive Betriebsstrategie ist die Streuung der Belastbarkeit der individuellen Zähne. Dies bedeutet, dass lediglich der schwächste Zahn zum Ausfall führt. Mit dieser Information wird in der adaptiven Betriebsstrategie der schwächste Zahn am Umfang geschont und der Ausfall somit hinausgezögert. Hierfür wird der schwächste Zahn am Umfang lokalisiert und dem Eingangsmoment eine angepasste periodische Drehmomentvariation überlagert. Das Minimum der Variation liegt bei jeder Umdrehung am schwächsten Zahn an. Die restlichen Zähne werden höher belastet, um die Leistung zu kompensieren. Mit dieser Strategie ist eine Verlängerung der Lebensdauer im Betrieb ohne Reduktion der mittleren Leistung möglich. Das Potenzial der adaptiven Betriebsstrategie wird anschließend in zweierlei Hinsichten untersucht, einerseits über eine erweiterte Grübchenauswertung und andererseits über eine Simulation.

In der erweiterten Grübchenauswertung werden im Gegensatz zum Stand der Technik alle Grübchen am Umfang des Zahnrades betrachtet. Es zeigt sich, dass 30 % der Zahnflanken Grübchen aufweisen und diese mit hoher Wahrscheinlichkeit an benachbarten Zahnflanken auftreten. Aus diesem Grund wird von einer Abhängigkeit der Grübchen ausgegangen, welche durch die Überdeckung in der Verzahnung begründet wird. Zusätzlich werden die Degradationsverläufe der Grübchen untersucht. Es zeigt sich für alle Grübchen ein exponentieller Verlauf und eine deutlich breitere Ausfallverteilung als im Stand der Technik bei ausschließlicher Betrachtung der schwächsten Zähne. Die Streuung der Belastbarkeit ist damit belegt und dient als Basis für die adaptive Betriebsstrategie. Hierbei wird ein enormes Potenzial der adaptiven Betriebsstrategie deutlich, da 70 % der Zahnflanken am Ende der Testzeit

keinerlei Anzeichen eines Grübchens aufweisen. An diesen Zahnflanken muss daher erst ein Grübchen initiiert und im Anschluss auf das End-of-Life Kriterium – 4 % Grübchenfläche bezogen auf eine Zahnflanke – degradiert werden. Die größere Belastbarkeit der anderen Zähne am Umfang wird damit sehr deutlich.

Eine Quantifizierung des Potenzials wird über eine simulative Studie vorgenommen. Hierfür wird ein Simulationsmodell genutzt, welches die Belastbarkeit aller Zähne berücksichtigt und somit die Anwendung der adaptiven Betriebsstrategie erlaubt. Das Zahnrad wird als System definiert, in welchem jede individuelle Zahnflanke als Komponente eine eigene Belastbarkeit aufweist. Plausibilisiert wird das Modell über generelle Zusammenhänge der Eingangsparameter, da Versuche mit der adaptiven Betriebsstrategie zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht möglich sind. Das Ergebnis der Simulation ist die jeweilige Steigerung der Lebensdauer mit angewendeter adaptiver Betriebsstrategie bei unterschiedlichen Eingangsparametern. Damit wird eine Sensitivitätsanalyse vorgenommen, welche als Haupteinflüsse das Eingangssignal der Betriebsstrategie, den Wöhlerexponenten, die Amplitude und die Streuung der Belastbarkeit aufzeigt. Maximal ist innerhalb der Simulation eine Erhöhung der Lebensdauer von ca. 43 % möglich.

Abstract

Increasing the remaining useful life of gear wheels through an adaptive operational strategy

In the present work, an adaptive extension of the service life of machine elements during operation is investigated. Especially for case-hardened gear wheels, solely the weakest tooth on the circumference causes the component failure due to pitting. All the remaining teeth are still intact at this failure time, and thus have lifetime reserves. Within an adaptive operational strategy, these reserves are to be used to increase the remaining useful life.

The scattering in strength of the individual teeth is the basis for the adaptive operational strategy, which results in only the weakest tooth causing failure. This information is used within the adaptive operational strategy to protect the weakest tooth on the circumference and thus delay its failure. For this purpose, the weakest tooth on the circumference is being located, and an adapted periodic input torque is applied. At each revolution of the gear wheel, the minimum of the oscillating torque is at the weakest tooth. All remaining teeth are subjected to higher stress to compensate the power. As a consequence, an increase of lifetime during operation is feasible without reduction of the average power. The examination of the potential of this adaptive operational strategy involves both an extended evaluation of pitting degradation tests and a simulation.

In contrast to the state of the art, the extended evaluation of pitting degradation tests includes all pittings on the circumference of the gear wheel. It turns out that 30 % of the tooth flanks have pittings and they are very likely to be at neighbouring tooth flanks. For that reason, dependency between the pittings is assumed, which is justified by the overlap in the gearing. Analysing all pittings and their respective degradation paths, an exponential progression and a clearly broader failure distribution than in the state of the art is apparent, when exclusively considering the weakest tooth. The scattering in strength is thus proven and serves as a basis for the adaptive operational strategy. Here, an enormous potential of the adaptive operational strategy becomes clear as 70 % of the tooth flanks show no signs of pitting at the termination of the test. Therefore, a pitting must first be initiated on these tooth flanks, and sub-

sequently degrade to the end-of-life criterion of 4 % pitting area based on one tooth flank. The higher strength of the other teeth on the circumference thus becomes very clear.

The potential is quantified with a simulative study. For this purpose, a simulation model is used that considers the strength of all teeth and thus allows the application of the adaptive operational strategy. A gear wheel is defined as a system consisting of tooth flanks as components, which each have their own strength. The plausibility check of the model is conducted by analysing general correlations of the input parameters, as real-life tests with the adaptive operational strategy are currently not yet possible. The result of the simulation is the particular increase in service life with applied adaptive operational strategy for different input parameters. Thus, a sensitivity analysis is performed, which shows the input signal of the operational strategy, the wöhler exponent, the amplitude, and the scattering in strength as the main influences. A maximum increase in service life of approx. 43 % is possible within the simulation.

Notation

Abkürzungen

Abkürzung	Bezeichnung
#	Nummer
3D	3-dimensional
AD	Anderson-Darling
AE	Acoustic Emission (dt. Schallemission)
BMS	Batteriemanagementsystem
CAD	Computer Aided Design
CMS	Condition Monitoring System (dt. Zustandsüberwachungssystem)
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
D	Detektion
DIN	Deutsches Institut für Normung
EA	Evolutionärer Algorithmus
EHD	Elasto-Hydrodynamik
EHT	Einsatzhärtetiefe
EOL	End of Life (dt. Ende der Lebensdauer)
FEM	Finite Element Methode
FF	Forschungsfrage
Gr	Grübchen, Grübchen-Nummer
HV	Härte nach Vickers
IMA	Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart
ISO	International Organization for Standardization
KI	Künstliche Intelligenz
LHS	Latin Hypercube Sampling
LW	Lastwechsel
MCS	Monte Carlo Simulation
Mio.	Millionen

Abkürzung	Bezeichnung
MLE	Maximum Likelihood Estimation (dt. Maximum-Likelihood-Schätzung)
MLS	Method of Least Squares (dt. Methode der kleinsten Fehlerquadrate)
NVH	Noise, Vibration, Harshness (dt. Geräusch, Vibration, Rauigkeit)
OFAT	one-factor-at-a-time
O-SAH	Online Schadensakkumulation
PDF	probability density function (dt. Dichtefunktion)
PHM	Prognostics and Health Management
Pkw	Personenkraftwagen
RMSE	Root-mean-square-error
RUL	Remaining Useful Life (dt. nutzbare Restlebensdauer)
SAH	Schadensakkumulationshypothese
SSE	Sum of Squared Error (dt. Residuenquadratsumme)
SSI	Stress-Strength-Interference
Top10	beste 10 Designs
TZ	Teilziel
W	Welle, Wellennummer
WEA	Windenergieanlage
ZZ	Zufallszahl
aBS	adaptive Betriebsstrategie
hrs	hours (dt. Stunden)
li	links
pos. Eff.	positiver Effekt
re	rechts

Indizes

Index	Bezeichnung
0	ausfallfrei, Grübchen-Initiierung
2,5	Untergrenze von 95 % Quantil
50	Median
97,5	Obergrenze von 95 % Quantil
Ausfall	Ausfallzeitpunkt
B	auf tretende Belastung
BS	mit Betriebsstrategie
D	Dauerfest
EOL	Ausfallzeitpunkt
Gr	Grübchen
Rad	je Zahnrad
Start	Start der Betriebsstrategie
T	auf Moment bezogen
Test	Testdatensatz
W	ertragbare Belastbarkeit
a	Grübchengröße
a0	Initiierungsgröße
dauer	dauerfest
h	high, erhöht
high	erhöht
i	bestimmter Punkt, Laufvariable, Haupt-
j	Laufvariable von 1 bis z für die Einzelzähne, Zahnnummer
l	low, reduziert
low	reduziert
m	mittel, ohne Betriebsstrategie
mess	messbar
n	Normalschnitt, Lastwechsel
n0	Initiierungszeitpunkt
nEOL	Ausfallzeitpunkt
sin	Sinus-Funktion der Betriebsstrategie
x	Zeitpunkt, Variable
~	ohne

Formelzeichen

Symbol	Einheit	Bezeichnung
A	Nm	Amplitude
B_{10}	LW	Lebensdauer mit 10 % Ausfallwahrscheinlichkeit
CoP	–	Coefficient of Prognosis
D	–	Schädigung (engl. damage), Schädigungssumme
E	–	Erwartungswert
ES	–	Eingangssignal des Drehmoments bei Betriebsstrategie
$F(t)$	–	Ausfallwahrscheinlichkeit
Gr	–	Anzahl betrachteter Grübchen innerhalb Auswertung
N	LW	Lastschwingspielzahl, ertragbare Lastwechsel
P	%	Wahrscheinlichkeit
$R(t)$	–	Zuverlässigkeit
R^2	–	Bestimmtheitsmaß
\bar{R}^2	–	korrigiertes Bestimmtheitsmaß
$RMSE$	–	Quadratquadrat des mittleren quadratischen Fehlers (engl. root-mean-square error)
S	z, %	Breite von Sprungfunktion, Einfluss/Sensitivität
S_i	%	Haupteffekt (engl. first order sensitivity)
SSE	–	Residuenquadratsumme
S_{Ti}	%	Gesamteffekt (engl. total sensitivity index)
T	LW, –	Drehmoment, charakteristische Lebensdauer der Weibullverteilung
V	–	Varianz
X	–	Inputgröße
Y	–	Outputgröße
\hat{Y}	–	geschätzte Outputgröße
a	%	Grübchengröße
ab	%	Wahrscheinlichkeit einer Abhängigkeit bei Grübchen
b	–	Formparameter der Weibullverteilung
c	–	y-Achsenabschnitt
$f(t)$	–	Funktion der Variable t , Dichtefunktion
i	–	Laufvariable
j	–	Laufvariable für Zahnnummer von 1 bis z
k	–	Wöhlerexponent
m	–	Steigung

Symbol	Einheit	Bezeichnung
n	–, LW	Replikationszahl, (ertragbare) Lastwechsel, Schwingspiele, Zeitpunkt, Anzahl, Stichprobenumfang
$n_{0,Faktor}$	–	Verhältnis zwischen Initiierungsverteilung und Ausfallverteilung
p	–	Anzahl Parameter im Modell
t	Sek, –	Zeit, Zufallsvariable, statistische Variable
y	–	Messwerte
\hat{y}	–	geschätzte Messwerte
\bar{y}	–	gemittelte Messwerte
z	–	Zähnezahl
Δ	–	Differenz, Veränderung
α	–	Fehler 1. Art, Irrtumswahrscheinlichkeit
β	–	Fehler 2. Art
ϵ	–	Fehler
μ	–	Lageparameter
σ	–	Streumaß, Spannung, Schwingspielamplitude
σ_{H0}	–	nominelle Flankenpressung im Wälzpunkt

Kapitel 1

Einleitung

Die Zuverlässigkeit gehört zu den wichtigsten Kaufargumenten bei technischen Produkten, wie eine Studie von Statista am Beispiel Autokauf belegt [Sta17]. Bei Getrieben wird die Lebensdauer sogar als wichtigstes Leistungsmerkmal definiert [Nau+19]. Dabei fallen innerhalb von Getrieben und Antriebssträngen zwei Maschinenelemente am häufigsten aus, die Lager und die Verzahnungen. Schadensfälle von Lagern machen ca. 60 % und von den Verzahnungen über 30 % aus [Dec21]. Dadurch wird die Bedeutung von Lagern und Verzahnungen sehr deutlich, da alle anderen Komponenten weniger als 5 % ausmachen.

Bei der Betrachtung einer Windenergieanlage (WEA) wird die Bedeutung des Getriebes und damit von Lagern und Verzahnungen noch deutlicher. Die Ausfallquote des Getriebes, definiert als Fehler pro Jahr, liegt bei 0,1, wenn ein Getriebe einer neuen Anlage untersucht wird. Mit der Laufzeit steigt die mittlere Ausfallquote jedoch auf 0,3 an [FHT10] und kann sogar über 0,5 liegen [DKC19]. Verglichen mit elektronischen Komponenten in der Anlage ist diese Ausfallquote gering. Allerdings ist die Instandsetzung des Getriebes deutlich komplexer, woraus extreme Stillstandszeiten der Anlage resultieren [FHT10]. Ein Tag Stillstand einer WEA bedeutet dabei 1.800 € Umsatzverlust [NB21]. Durch einen typischen Service-Einsatz mit vier Wochen Dauer gehen dem Anlagenbetreiber damit ca. 50.000 € verloren [NB21]. Zusätzlich kommen Kosten für den Austausch des Getriebes in Höhe von 90.000 € hinzu, da das Getriebe nach dem Rotorblatt-Satz die zweit teuerste Baugruppe ist [IZP09].

Für eine WEA kann zusammengefasst werden, dass 25 % der Fehler 95 % der Stillstandszeiten verursachen [FHT10]. Es ist daher wichtig, diese Fehler frühzeitig zu erkennen bzw. zu verhindern. Weitere Erforschung von Lebensdauer und Schadensmechanismen von Maschinenelementen in Getrieben ist damit unumgänglich.

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

In der Praxis werden vermehrt Condition Monitoring Systeme (CMS) eingesetzt, um Schäden in Getrieben und Antriebssträngen erkennen zu können [Dec11; NB21]. Damit kann ein plötzlicher Ausfall der Komponenten verhindert und die Instandhaltung besser geplant werden. Die Stillstandszeiten und damit die Umsatzverluste können mit dieser Methode deutlich reduziert werden, da der Fehler im besten Fall bekannt und das Ersatzteil bereits bestellt ist [IZP09; Dec19]. In [NB21] wird beim Einsatz von CMS eine Reduktion der ungeplanten Wartung im Feld von 60 % sowie eine Verringerung der Vorlaufzeit bis zur Reparatur von 85 % genannt. Zum Einsatz kommen hier unterschiedliche Sensoren, welche unter anderem Vibrationen und Schall aufzeichnen. Am Beispiel der Windenergieanlage werden für das CMS des Getriebes mindestens sechs Beschleunigungssensoren benötigt [IZP09].

Für eine Optimierung der Instandhaltung ist die Dauer zwischen Erkennen eines Schadens bis zum schlussendlichen Ausfall der Komponente von Bedeutung. In [Dec19] wird diese Dauer mit mehreren Monaten beziffert. Als Beispiel sind zwei Pendelrollenlager an einer Getriebeeingangswelle aufgeführt, welche noch 5,5 bzw. 14 Monate nach dem Erkennen des ersten Schadens ohne Systemausfall weiter betrieben wurden. Des Weiteren werden in [Dec19] Kegelradgetriebe einer Vertikalmühle aufgeführt. Hier wird beim Erkennen eines Abplatzers an der Zahnflanke eine Notreparatur durchgeführt, wodurch das Getriebe bis zur eigentlichen Instandhaltung noch 3 bzw. über 9 Monate weiterbetrieben werden konnte.

Nachteil an dieser Methode ist, dass der Zustand der Komponente erst erfasst werden kann, sobald die Sensoren eine Veränderung und damit einen Schaden wahrnehmen können. In frühen Phasen des Betriebs ist damit keine Aussage über die verbleibende Lebensdauer, die sogenannte nutzbare Restlebensdauer, möglich. Aus diesem Grund wird die Restlebensdauer über Simulationsmodelle und den tatsächlich im Feld gemessenen Belastungen prognostiziert. Dies wird unter anderem in [Fou+15a] und [Uhl19] behandelt. Diese Methode ist auch unter Last-Monitoring, Online-Schadensakkumulation oder Digitaler Zwilling (engl. Digital Twin) bekannt.

Der Fokus beider Varianten (CMS und Last-Monitoring) liegt auf der Komponenten-Ebene. Ein anstehender Ausfall einer Komponente wird über Sensoren oder das Simulationsmodell prognostiziert, wodurch die Instandhaltung besser geplant und damit die Lebensdauer der Komponente besser ausgenutzt werden kann. Allerdings ist es auch möglich, wie das Beispiel Verzahnung zeigt, dass innerhalb der Komponente ungenutzte Lebensdauer-Reserven vorhanden sind. Ein häufiges Schadensbild an einsatzgehärteten Verzahnungen sind Grübchen. Diese Grübchen treten meist nur an einem einzelnen Zahn oder an wenigen Zähnen auf [DIN3990-2]. Für den Ausfall der Komponente ist schließlich lediglich der schwächste Zahn entscheidend. Die restlichen Zähne am Umfang sind zu diesem Ausfallzeitpunkt noch intakt und könnten länger betrieben werden. Um diese Lebensdauer-Reserve ausnutzen zu

können, ist ein tiefes Verständnis des Schadensmechanismus sowie weiterführende Forschung notwendig.

1.2 Ziele der Arbeit

Aus der im vorherigen Abschnitt beschriebenen Problemstellung lässt sich direkt das übergeordnete Ziel der vorliegenden Arbeit ableiten: Nutzung vorhandener Lebensdauer-Reserven innerhalb von Bauteilen zur Verlängerung der nutzbaren Restlebensdauer während des Betriebs am Beispiel Verzahnung. Durch die damit bestmögliche Ausnutzung der Lebensdauer wird zudem eine Ressourcenschonung erreicht. Im Rahmen der Arbeit werden hierzu die folgenden Teilziele (TZ) behandelt:

TZ1: Entwicklung einer Strategie zur Ausnutzung der Lebensdauer-Reserve

Vorhandene Methoden und Vorgehensweisen zur Lebensdauererlängerung von Verzahnungen sollen analysiert und bewertet werden. Darauf aufbauend soll eine adaptive Betriebsstrategie entwickelt werden, um gezielt die Lebensdauer-Reserven in der Verzahnung nutzen zu können. Dies soll online während des Betriebs möglich sein. Folgende Unterpunkte werden im Detail betrachtet:

- Analyse und Bewertung von PHM bei Getrieben:
Der Stand der Forschung im Bereich Prognostics and Health Management (PHM) bei Getrieben ist zu untersuchen und kritisch hinsichtlich der Lebensdauer-Reserven innerhalb vom Zahnrad zu bewerten.
- Entwicklung einer adaptiven Betriebsstrategie:
Es soll eine allgemeingültige adaptive Betriebsstrategie zur Steigerung der nutzbaren Restlebensdauer entwickelt werden. Diese soll online im Betrieb adaptierbar sein und sich nicht auf eine Anwendung oder Verzahnung beschränken.
- Untersuchung von Herausforderungen:
Die adaptive Betriebsstrategie soll kritisch hinterfragt und Herausforderungen für die Anwendung in der Praxis aufgezeigt werden.

TZ2: Potenzialabschätzung durch tiefergehendes Verständnis von Grübchen

Lebensdauer-Reserven können nur ausgenutzt werden, wenn die grundlegenden Zusammenhänge und der Verlauf des Schadens bekannt sind. Dieses Verständnis soll innerhalb der vorliegenden Arbeit aufgebaut werden. Der Fokus liegt hierbei auf den folgenden Unterpunkten:

- Analyse aller Grübchen und Zähne am Umfang der Zahnräder:
Es ist nicht ausreichend, nur den Ausfall der Komponente und damit den

schwächsten Zahn zu analysieren. Daher müssen die Untersuchungen auf alle Zähne des Zahnrades ausgeweitet werden.

- Erkenntnisgewinn zur Lage der Grübchen am Umfang:
Die Lage der Grübchen am Umfang ist essentiell für die Ausnutzung der Lebensdauer-Reserven, da nur mit dieser Information eine optimierte adaptive Betriebsstrategie aus TZ1 Anwendung finden kann. Aus diesem Grund soll die Lage am Umfang analysiert werden.
- Untersuchung der Degradationspfade aller Grübchen:
Der Degradationspfad beschreibt den Verlauf der Schädigung von der Entstehung bis zum Ausfall. Dieser muss mit ausreichender Genauigkeit bekannt sein, um die Reserven in der Komponente richtig abschätzen zu können.
- Analyse des Ausfallverhaltens:
Das Ausfallverhalten und damit die Streuung der Einzelzähne steht in direktem Zusammenhang zum Potenzial der adaptiven Betriebsstrategie und soll daher analysiert werden. Zusammen mit der Belastung kann daraus die vorhandene Lebensdauer-Reserve des Zahnrades bestimmt werden, was in TZ3 adressiert wird.

TZ3: Abschätzung des Potenzials der Lebensdauer-Reserve

Mit der umfangreichen Analyse der Lebensdauer-Reserve und des Schadensmechanismus soll eine Abschätzung der möglichen Lebensdauersteigerung erfolgen. Hierfür soll die in Teilziel 1 entwickelte Strategie simulativ untersucht und mögliche Einflussfaktoren erkannt und bewertet werden. Hierfür werden folgende Schritte vorgenommen:

- Aufbau eines Simulationsmodells:
Das Simulationsmodell soll generisch aufgebaut werden und alle Besonderheiten der adaptiven Betriebsstrategie erfassen.
- Plausibilisierung des Simulationsmodells:
Für die Plausibilisierung sollen die grundlegenden Zusammenhänge der adaptiven Betriebsstrategie in Kombination mit den Eingangsparameter aufgezeigt und analysiert werden. Diese Zusammenhänge werden zum Abgleich mit den Simulationsergebnissen herangezogen.
- Sensitivitätsanalyse der Einflussgrößen:
Es soll untersucht werden, welche Eingangsparameter der Simulation einen großen Einfluss auf das Potenzial der Betriebsstrategie haben. Damit ist eine allgemeingültige Aussage des Potenzials möglich, sowie eine Abschätzung für Praxisanwendungen.
- Anwendung der Beispielverzahnung aus TZ2:
Die Beispielverzahnung soll simulativ abgebildet werden, um eine Prognose über die mögliche Lebensdauersteigerung im Betrieb zu geben.

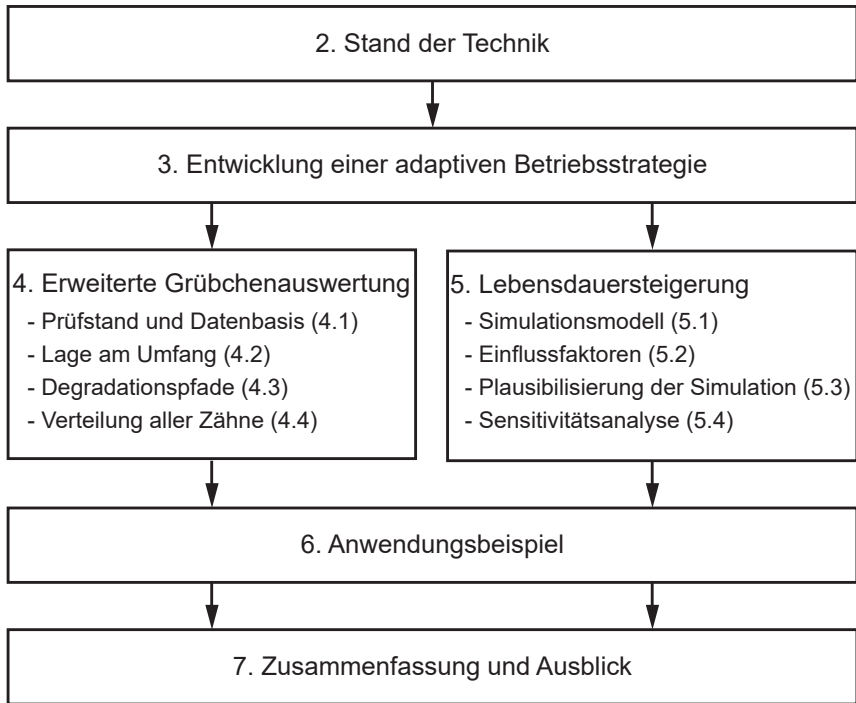


Bild 1.1 Aufbau der Arbeit mit Zuordnung zu den Kapiteln

1.3 Aufbau der Arbeit

Aus den genannten Teilzielen resultiert direkt der Aufbau der vorliegenden Arbeit, siehe Bild 1.1. Zu Beginn wird in Kapitel 2 der Stand der Technik erläutert. Hier werden die drei Hauptblöcke Zuverlässigkeit, Zahnradschäden sowie PHM eingeführt. Der letzte Punkt bezieht sich dabei auf Themen wie Condition Monitoring, aber auch die Prognose der nutzbaren Restlebensdauer sowie Optimierungsmöglichkeiten beispielsweise in der Instandhaltung. Aus dem Stand der Technik resultiert ein Forschungsbedarf. In Kapitel 3 wird darauf aufbauend eine zentrale Forschungsfrage definiert und Hypothesen aufgestellt. Es folgt eine Abgrenzung zum Stand der Forschung und die Entwicklung einer adaptiven Betriebsstrategie, welche Teilziel 1 adressiert. Teilziel 2 mit der erweiterten Grübchenauswertung wird in Kapitel 4 bearbeitet. Hierfür werden vorhandene Prüfstandsversuche ausgewertet und alle Grübchen am Umfang des Zahnrades betrachtet. Eine Abschätzung der möglichen Lebensdauersteigerung durch die entwickelte adaptive Betriebsstrategie erfolgt in

Kapitel 5 und entspricht Teilziel 3. Innerhalb dieses Kapitels wird ein Simulationsmodell aufgebaut und plausibilisiert, um im Anschluss eine Sensitivitätsanalyse der Einflussfaktoren durchzuführen. Abgerundet wird die Arbeit durch die Anwendung der entwickelten adaptiven Betriebsstrategie auf die Beispielverzahnung aus Kapitel 4. Abschließend folgt eine Zusammenfassung und ein Ausblick auf weiteren Forschungsbedarf.

Kapitel 2

Grundlagen und Stand der Technik

In diesem Kapitel werden relevante zuverlässigkeitstechnische Methoden sowie die Betriebsfestigkeit mit Lebensdauer- und Degradationsmodellen vorgestellt. Es folgen die Grundlagen und der Stand der Technik zu Zahnradschäden. Insbesondere wird die Schadensart Grübchen vertieft. Des Weiteren wird das Themengebiet Prognostics and Health Management (PHM) eingeführt.

2.1 Grundlagen der Zuverlässigkeitstechnik und Betriebsfestigkeit

In diesem Unterkapitel werden die grundlegenden Begriffe und Methoden der Zuverlässigkeit und Betriebsfestigkeit eingeführt. Zuerst werden die Grundbegriffe erklärt, um im Anschluss die Wahrscheinlichkeitsverteilungen, aber auch Methoden wie Parameterschätzung, Hypothesentests und die Monte Carlo Simulation vorzustellen. Im Fokus Betriebsfestigkeit steht das Lebensdauermodell nach Wöhler, die Schadensakkumulation und Degradationsmodelle. Basis für die Inhalte bilden die Standardwerke von Bertsche, Meeker, Nelson, Kapur, Hedderich, Fahrmeir und Haibach. [BL04; ME98; Nel04b; Nel04a; KL77; HS18; Fah+16; Hai06]

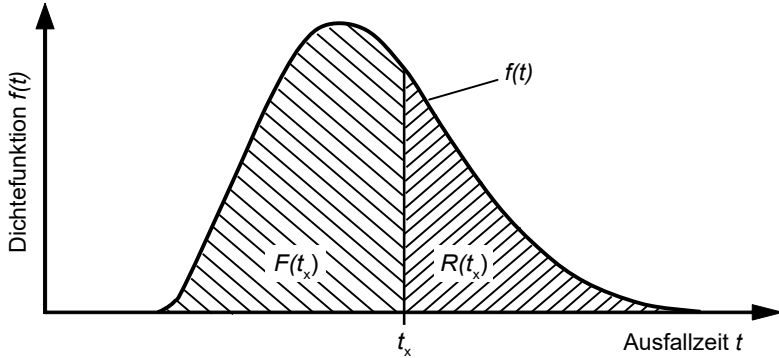


Bild 2.1 Dichtefunktion mit Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t)$ und Zuverlässigkeit $R(t)$

2.1.1 Grundbegriffe der Zuverlässigkeitstechnik

In der Zuverlässigkeitstechnik wird das Ausfallverhalten von Bauteilen und Systemen untersucht und mit statistischen Methoden beschrieben. Die Lebensdauer von Komponenten oder Systemen wird hierbei häufig mit Hilfe von Versuchen bestimmt. Doch auch wenn es sich um dieselben Produkte handelt und dieselbe Belastung aufgebracht wird, streuen die Ausfallzeitpunkte z. B. aufgrund von Materialheterogenitäten und der Fertigung [VDA32]. Die Lebensdauer kann somit nicht deterministisch bestimmt werden. Die Ausfallzeitpunkte sind statistisch verteilt. Als Darstellungsform bietet sich daher die **Dichtefunktion** $f(t)$ an, welche die Anzahl der Ausfälle in einem kleinen Zeitintervall dt angibt.

Weiterhin kann zum Zeitpunkt t_x bestimmt werden, mit welcher Wahrscheinlichkeit das Produkt bereits ausgefallen ist. Dies wird durch das Integral der Dichtefunktion erreicht, woraus die **Ausfallwahrscheinlichkeit** $F(t)$ resultiert. Da zu jedem Zeitpunkt die Summe der intakten und ausgefallenen Produkte 100 % ergibt, kann auch das Komplement zur Ausfallwahrscheinlichkeit bestimmt werden, die Überlebenswahrscheinlichkeit oder auch **Zuverlässigkeit** $R(t)$.

$$R(t) = 1 - F(t) \tag{2.1}$$

Die **Zuverlässigkeit** ist nach Bertsche und Lechner [BL04] definiert als Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein Produkt während einer definierten Zeitdauer unter gegebenen Funktions- und Umgebungsbedingungen nicht ausfällt.

Zusammengefasst ist diese Beziehung zwischen Dichtefunktion, Zuverlässigkeit und Ausfallwahrscheinlichkeit in Bild 2.1.

2.1.2 Wahrscheinlichkeitsverteilungen

Werden Ausfallzeiten in der Praxis analysiert, unterscheidet sich der zeitliche Verlauf der Ausfälle von Bauteil zu Bauteil aufgrund der streuenden Belastung und Belastbarkeit. Für die weitere Analyse der Ausfälle sowie eine einfache Anwendbarkeit ist eine mathematische Beschreibung mit möglichst wenigen Parametern notwendig. Es gibt zahlreiche Wahrscheinlichkeitsverteilungen, die zur Darstellung des Zusammenhangs verwendet werden können [BL04]. Eine einfache symmetrische Normalverteilung ist dabei meist nicht ausreichend, sondern es werden asymmetrische Verteilungen herangezogen. Die wichtigsten zwei Verteilungen im Bereich Zahnradschäden werden im Folgenden kurz vorgestellt. Nach Stahl et al. [Sta+99] eignet sich für Zahnfußbruch eine logarithmische Normalverteilung und für Grübchen eine Weibullverteilung, um das Ausfallverhalten im Zeitfestigkeitsbereich abzubilden. Im Dauerfestigkeitsbereich wird für beide Ausfallmechanismen eine Normalverteilung zur Beschreibung herangezogen [Sta+99].

Logarithmische Normalverteilung

Oft liegen bei Lebensdaueranalysen, aber auch in der Biologie und der Wirtschaft, rechtsschiefe Verteilungen vor [Nel04b; HS18]. Dies kann damit erklärt werden, dass bei Lebensdauerdaten zum Beispiel der Grenzwert Null für die Ausfallzeit nicht unterschritten werden kann. Bei der logarithmischen Normalverteilung (kurz: Lognormalverteilung) wird durch das Logarithmieren der Zufallsvariable t der Bereich zwischen 0 und 1 auf einen Bereich von $-\infty$ bis 0 gestreckt. Dadurch ergeben sich annähernd normalverteilte Werte wenn die Abszisse logarithmiert dargestellt wird.

Vorteile der Lognormalverteilung sind die einfache und universelle Anwendbarkeit. Die Lognormalverteilung lässt sich einfach von der von allen Verteilungen am besten untersuchten Normalverteilung ableiten. Zudem lässt sich die Lognormalverteilung auf viele unterschiedliche Ausfallverhalten anwenden, da sehr unterschiedliche Dichtefunktionen möglich sind. Nachteil ist jedoch, dass nur die Dichtefunktion in geschlossener Form darstellbar ist und die Ausfallwahrscheinlichkeit und Zuverlässigkeit nur über eine nicht geschlossen lösbare Integration definiert ist. Beschrieben wird die Lognormalverteilung über den Lageparameter μ und das Streumaß σ . Die Formeln für die Dichtefunktion, Ausfallverteilung etc. sowie die graphische Beschreibung der Lognormalverteilung können zahlreichen Grundlagenwerken entnommen werden, wie zum Beispiel [BL04; HS18; Fah+16; Nel04b].

Weibullverteilung

Im Jahr 1937 erfand Waloddi Weibull die Weibullverteilung. Diese wird heutzutage sehr häufig im Maschinenbau eingesetzt, da sie sehr flexibel ist und die unterschiedlichsten Ausfallverteilungen abbilden kann. Zudem sind die Formeln sehr einfach

und die Auswertung kann durch den Weibullplot sehr gut veranschaulicht werden. [Abe96; Law03]

Die Weibullverteilung existiert in zwei- und dreiparametrischer Form. Gemeinsam sind die Charakteristische Lebensdauer T , welche die Lage der Ausfallzeiten beschreibt, und der Formparameter b , welcher die Form der Kurve definiert. Bei der dreiparametrischen Weibullverteilung kommt zusätzlich die ausfallfreie Zeit t_0 hinzu, ab welcher Ausfälle möglich sind. Die Formeln und Grafiken sind in zahlreichen Fachliteraturen zu finden, weshalb diese hier nicht weiter aufgeführt werden [Abe96; BL04; HS18; Nel04b; Law03].

Die hohe Flexibilität der Weibullverteilung liegt an den sehr unterschiedlichen Dichtekurven je nach Formparameter b . Es können folgende drei Bereiche abgedeckt werden:

- $b < 1$: fallende Ausfallrate, Abbildung von Frühausfällen aufgrund von Fertigungs-, Montage-, Werkstofffehlern
- $b = 1$: konstante Ausfallrate, Abbildung von Zufallsausfällen aufgrund von Bedienungs-, Wartungsfehlern oder Schmutzpartikeln
- $b > 1$: steigende Ausfallrate, Abbildung von Ermüdungs- und Verschleißausfällen aufgrund von Dauerbruch, Grübchen oder Alterung

2.1.3 Parameterschätzung

Lebensdauerdaten sind immer nur von einer Stichprobe vorhanden und nicht von der Grundgesamtheit. Aus diesem Grund sind die exakten Parameter der Ausfallverteilung nicht bekannt. Diese werden durch unterschiedliche Methoden aus der vorhandenen Stichprobe geschätzt. Bei der **Methode der kleinsten Fehlerquadrate (MLS)** werden die Parameter bestimmt, indem die Quadrate der Residuen zwischen den Datenpunkten der Stichprobe und der Ausgleichskurve minimiert werden. Diese Methode wird häufig bei Regressionsanalysen angewendet, ist allerdings anfällig bezüglich Ausreißern [FKL07]. Das Verfahren ist jedoch nicht in der Lage, zensierte Daten zu berücksichtigen, weshalb für die Lebensdaueranalyse oft die **Maximum Likelihood Methode (MLE)** Verwendung findet [ME98]. Die MLE ist auch für die Anwendung komplexer Schätzsituationen geeignet [Fah+16]. Entwickelt wurde sie von R.A. Fisher. Es werden diejenigen Parameter bestimmt, mit welchen die vorliegenden Ausfalldaten am plausibelsten abgebildet werden [Fah+16]. Hierfür wird die Likelihood-Funktion ermittelt, welche sich aus der Multiplikation der Wahrscheinlichkeiten der Einzel-Intervalle zusammensetzt. Die Parameter werden dann durch Maximierung dieser Likelihood-Funktion geschätzt.

2.1.4 Hypothesentests

Statistische Entscheidungen müssen immer anhand einer Stichprobe getroffen werden. Die genauen Parameter der Grundgesamtheit sind daher nicht bekannt, jedoch können diese durch eine repräsentative Stichprobe mit hoher Wahrscheinlichkeit angenähert werden. Bei einem Vergleich zweier Stichproben besteht aufgrund des Stichprobenfehlers das Risiko, eine falsche Entscheidung bezüglich der statistischen Signifikanz zu treffen. Um dieses Risiko beziffern zu können, werden Hypothesentests angewendet. Hierfür werden zwei Hypothesen aufgestellt. Bei der Nullhypothese wird eine Behauptung beispielsweise über eine Parameter- oder Verteilungseigenschaften aufgestellt, wohingegen bei der Alternativhypothese vom Gegenteil ausgegangen wird. Mithilfe des gewählten statistischen Tests wird versucht, die Nullhypothese zu widerlegen und somit die Alternativhypothese indirekt zu bestätigen. Gelingt es mit den vorliegenden Daten nicht, die Nullhypothese zu widerlegen, wird diese mit einem gewissen Restrisiko beibehalten. Bei der Entscheidung für oder gegen die Nullhypothese sind dabei zwei Fehlentscheidungen möglich. Der Fehler 1. Art oder α -Fehler verwirft die Nullhypothese, obwohl kein Effekt vorliegt. Beim Fehler 2. Art, auch β -Fehler genannt, wird ein signifikanter Effekt nicht erkannt und daher die Nullhypothese beibehalten. Der α -Fehler wird z. B. je nach den Kosten, welche durch den Fehler entstehen, gewählt und wird im Allgemeinen ab einem Wert von $\leq 5\%$ als klein angesehen [HS18]. Ab diesem Wert wird die Nullhypothese verworfen. An dieser Stelle soll daher betont werden, dass eine Hypothese nur verworfen werden kann, wenn die Daten stark von der Behauptung abweichen. Ein Beweis für die Gültigkeit der Hypothese ist nicht möglich. [HS18; SBH10]

Heutzutage kann auf zahlreiche Hypothesentests zurückgegriffen werden. Unterschieden wird hierbei zwischen den parametrischen Tests, wie beispielsweise dem t-Test, und den verteilungsfreien oder verteilungsunabhängigen Tests, wie den Mediantest oder U-Test. Die Voraussetzungen für die Anwendung der einzelnen Tests sowie die Vor- und Nachteile einiger verteilungsfreier Tests sind z. B. in [HS18] enthalten.

2.1.5 Monte Carlo Simulation

Monte Carlo Simulationen (MCS) werden in vielen Bereichen der Naturwissenschaft und Technik eingesetzt, wenn komplexe Interaktionen zwischen einer Vielzahl an Komponenten vorliegen [BZ20]. Es werden sowohl probabilistische als auch deterministische Problemstellungen auf einfache und allgemeine Weise gelöst, indem auf Basis von Pseudo-Zufallszahlen die Lösung angenähert wird. Grundgedanke ist hierbei, dass die Simulation mit hoher Wahrscheinlichkeit zum globalen Optimum der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion konvergiert, wenn die simulierte Stichprobe ausreichend groß ist. Der Nachteil der Monte Carlo Simulation ist somit, dass das Zufallsexperiment sehr häufig durchgeführt werden muss und daraus lange Simu-

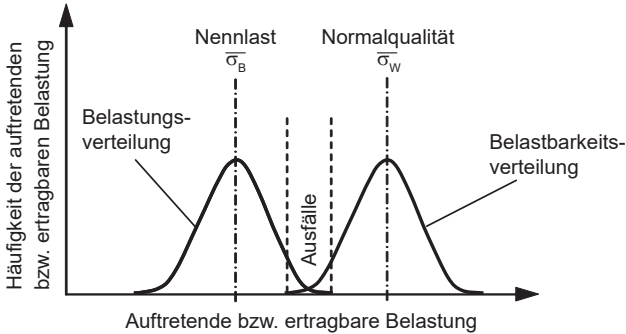


Bild 2.2 Zusammenhang zwischen auftretender und ertragbarer Belastung bzw. Beanspruchung (in Anlehnung an [BL04])

lationszeiten resultieren. Dies liegt daran, dass der Fehler ϵ mit $1/\sqrt{n}$ gegen Null konvergiert. Je mehr Zufallszahlen erzeugt werden, desto höher ist somit die Genauigkeit der Simulation. [VDA32; BZ20; HH79]

Vorteil der Monte Carlo Simulation ist die einfache Variationsmöglichkeit unterschiedlicher Parameter. Einflüsse können so relativ einfach bestimmt werden, ohne auf Prüfläufe oder Feldversuche angewiesen zu sein. Aus diesem Grund eignet sich die MCS sehr gut für Sensitivitätsanalysen [Zio13].

2.1.6 Betriebsfestigkeit

Der Ausfall von einem Bauteil hängt von vielen Einflussfaktoren ab, wie zum Beispiel der Belastung und der Belastbarkeit des Bauteils. Beispiele für die Belastung sind die anliegende Spannung, Kraft, Drehmoment, Temperatur, Druck, Vibrationen, etc. [Sun95]. Im Getriebe sind Themen wie das anliegende Getriebeeingangsmoment aber auch die Ölviskosität und damit die Temperatur von Bedeutung. Es handelt sich um äußere Lasten auf das Bauteil. Die Belastbarkeit eines Produkts ist definiert als die Fähigkeit, die geforderten äußeren Belastungen zu ertragen [Dhi83]. Sie hängt von inneren Einflussfaktoren ab, wie dem Material, der Fertigungsqualität und auch von der Geometrie. Da sowohl die Belastung als auch die Belastbarkeit statistische Größen sind, folgen diese einer Verteilung, wie in Bild 2.2 ersichtlich. Die Belastbarkeit ist hierbei gleichbedeutend mit der ertragbaren Belastung. Dieser Zusammenhang ist auch als Stress-Strength-Interference (SSI) bekannt.

Sind nun beide Verteilungen bekannt, können Aussagen über die Zuverlässigkeit und Ausfallwahrscheinlichkeit getroffen werden. Ausfälle treten auf, sobald die auftretende Belastung die ertragbare Belastung bzw. Belastbarkeit überschreitet und damit im überlappenden Bereich der Dichtekurven aus Bild 2.2. Die Zuverlässigkeit

R des Produkts ergibt sich, wenn die auftretende Belastung σ_B kleiner ist als die ertragbare σ_W : [BL04; PHS13; LSD67]

$$R = P(\sigma_W > \sigma_B) \quad (2.2)$$

Die Belastbarkeit eines Produkts kann mit der zugehörigen Wöhlerkurve angenähert werden. Die Belastung wird in Lastkollektiven festgehalten, welche für eine Schadensakkumulation verwendet werden. Diese Zusammenhänge werden in den nachfolgenden Abschnitten näher beschrieben.

2.1.7 Lebensdauermodell nach Wöhler

Die Belastbarkeit von Bauteilen ist von vielen Einflussparametern abhängig, z. B. von dem Werkstoffzustand, der Oberfläche, der Geometrie sowie den Umgebungsbedingungen. In [DIN50100] sind Schwingfestigkeitsversuche genormt, mit welchen die Belastbarkeit über Einstufenversuche ermittelt wird. Die resultierende Wöhlerlinie oder Wöhlerkurve ist nach August Wöhler (1819–1914) benannt und kann für unterschiedliche Ausfallwahrscheinlichkeiten angegeben werden. Die Grundlagen des Lebensdauermodells nach Wöhler können zahlreichen Literaturstellen entnommen werden wie beispielsweise [RV07; Láp16; SS16].

Die Wöhlerkurve wird in drei Bereiche eingeteilt, die Kurzzeitfestigkeit, Zeitfestigkeit und Dauerfestigkeit, wie in Bild 2.3 dargestellt. Im Gebiet der Kurzzeitfestigkeit können lediglich 100 bis 10.000 Schwingspiele ertragen werden, da die Spannungen sehr nahe an der Zugfestigkeit des Werkstoffs liegen. Im Zeitfestigkeitsbereich können mit sinkender Belastung mehr Lastspiele ertragen werden, wodurch sich im doppellogarithmischen Diagramm eine Gerade ergibt. Im Dauerfestigkeitspunkt, ca. 10^6 bis 10^7 Lastspiele, knickt die Gerade je nach Werkstoff ab [RV07].

Sehr viele Bauteile werden in der Praxis zeitfest ausgelegt. Diese Zeitfestigkeit kann im doppellogarithmischen Diagramm mit einer einfachen Gleichung beschrieben werden, wobei k die Steigung der Wöhlerkurve angibt:

$$N_i = N_D \cdot \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_D} \right)^{-k} \quad (2.3)$$

Es ergibt sich also ein Zusammenhang zwischen der anliegenden Spannung und der ertragbaren Lastspielzahl. Im Getriebebereich liegt in der Regel anstatt der anliegenden Spannung das Getriebeeingangsmoment T_i vor, weshalb hier auch die Darstellung mit Drehmoment über der Lastspielzahl üblich ist [Nau+19].

$$N_i = N_D \cdot \left(\frac{T_i}{T_D} \right)^{-k_T} \quad (2.4)$$

Bei dieser Betrachtung ist jedoch wichtig, dass die Umrechnung von k auf k_T vom Schadensfall abhängig ist [Nau+19]. Für den Ausfallmechanismus Grübchen bei

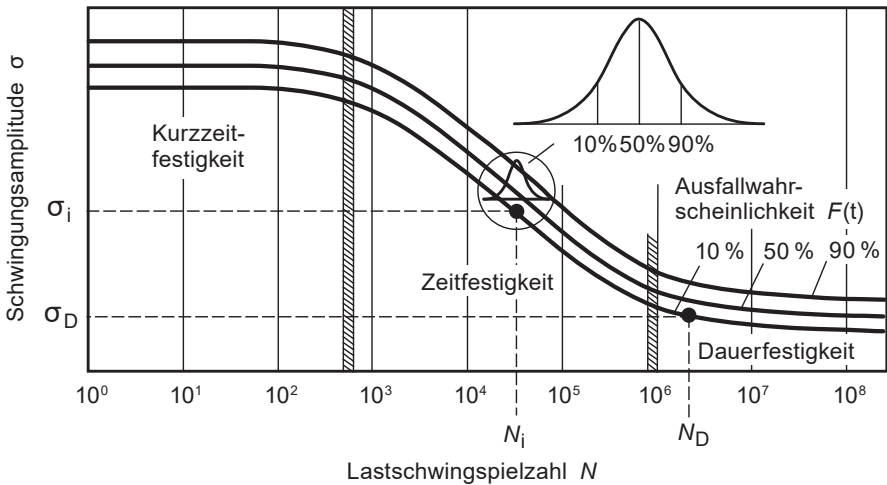


Bild 2.3 Wöhlerlinie der zulässigen Werkstoffbeanspruchung [Nau+19]

Zahnradern ergibt sich $k = 2k_T$, da die Spannung und das Moment über eine Wurzelfunktion verbunden sind. Die Herleitung zeigt die nachfolgende Gleichung:

$$\left(\frac{\sigma_i}{\sigma_D}\right)^{-k} = \left(\frac{\sqrt{T_i}}{\sqrt{T_D}}\right)^{-k} = \left(\frac{T_i}{T_D}\right)^{-k/2} \quad (2.5)$$

Bei Zahnfußbruch oder Wellenbruch besteht ein linearer Zusammenhang zwischen Spannung und Moment und es gilt $k = k_T$.

2.1.8 Schadensakkumulation

Die Wöhlerversuche und damit auch die Wöhlerlinie basieren auf einer konstanten Schwingamplitudenhöhe. Im Betrieb kann sich diese jedoch innerhalb eines Lastkollektivs ändern. Für die Berechnung der Lebensdauer unter Lastkollektivbeanspruchung muss daher auf Schadensakkumulationshypothesen (SAH) zurückgegriffen werden. Am einfachsten und am häufigsten angewendet ist die Methode der linearen Schadensakkumulation nach Palmgren [Pal24] und Miner [Min45].

Bei der linearen SAH werden Schwingspiele gleicher Amplitude n_i in Klassen zusammengefasst und durch die ertragbare Lastwechselanzahl N_i aus der Wöhlerkurve geteilt. Dadurch ergeben sich Teilschädigungen je Lasthorizont, welche zu

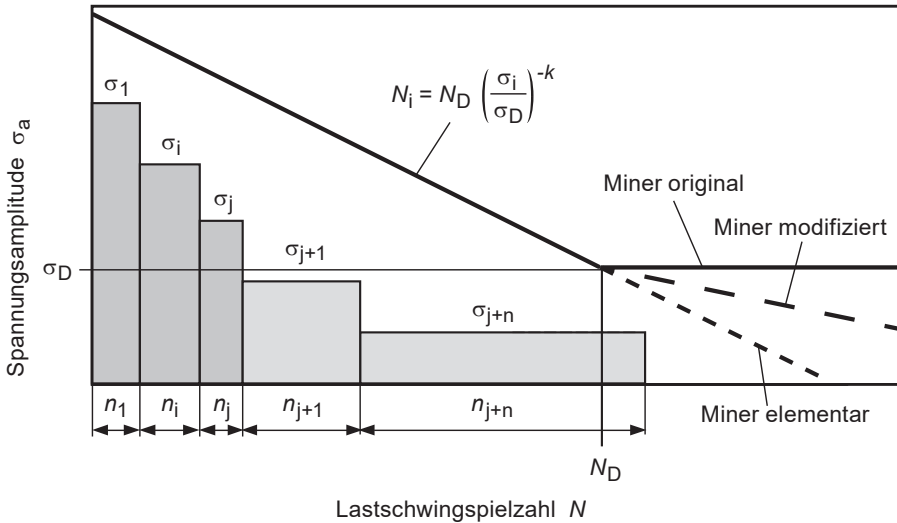


Bild 2.4 Schadensakkumulationstheorie und Modifikationen der Wöhlerkurve im Langzeitfestigkeitsbereich (in Anlehnung an [San18; Nau+19])

einer Schädigungssumme D (engl. damage) aufsummiert werden [San18]:

$$D = \sum_{i=1}^j \frac{n_i}{N_i} \quad (2.6)$$

Für die Schädigungssumme $D = 1$, ist das theoretische Lebensdauerende des Bauteils erreicht. In der praktischen Anwendung kann es allerdings zu sehr großen Abweichungen von diesem theoretischen Wert kommen. In Schütz und Zenner [SZ73] ist von Werten zwischen 0,3 und größer 5 die Rede. Der Haupteinfluss auf diese abweichenden Schädigungssummen wird mit den nicht berücksichtigten Eigenspannungen erklärt.

Im Langzeitfestigkeitsbereich finden unterschiedliche Konzepte Anwendung, welche in Bild 2.4 verdeutlicht sind. Im Konzept Miner original werden bei der Aufsummierung der Teilschädigungen lediglich die Beanspruchungen im Zeitfestigkeitsbereich berücksichtigt und die Wöhlerkurve knickt im Dauerfestigkeitspunkt zu einer horizontalen Linie ab. Da die Beanspruchungen unterhalb der Dauerfestigkeit nicht berücksichtigt werden, wird hier die Lebensdauer oft überschätzt. Um diese Überschätzung zu vermeiden, gibt es unterschiedliche Formen der Miner-Regel. In der Miner elementar wird die Zeitfestigkeitsgerade der Wöhlerkurve auch im Dauerfestigkeitsbereich weitergeführt. Somit sind die Beanspruchungen im Langzeitfestigkeitsbereich mit denen im Zeitfestigkeitsbereich gleichgesetzt, was zu einer Unter-

schätzung der Lebensdauer führen kann. Die dritte Möglichkeit ist die modifizierte Miner-Regel. Hier wird die Zeitfestigkeitsgerade unterhalb des Dauerfestigkeitspunkts durch eine fiktive Gerade mit flacherer Neigung weitergeführt. Diese Form wird auch als Miner-Haibach bezeichnet und die Steigung von k im Zeitfestigkeitsbereich auf $(2k - 1)$ im Dauerfestigkeitsbereich reduziert. [SZ73; RV07; Hai06; San18]

Bei dieser Form der linearen SAH werden keine Reihenfolge- und Interaktionseffekte berücksichtigt [RV07]. Aus diesem Grund gibt es zahlreiche weitere Schädigungsrechnungen auf nicht-linearer Basis, welche unter anderem in [FY98; Sie06; HH86] beschrieben und verglichen werden.

2.1.9 Degradationsmodelle

Die Degradation von Materialien ist ein Schädigungsprozess, welcher teilweise direkt nach der Produktion des Bauteils oder mit der Inbetriebnahme startet und bis zum Ausfall fortschreitet. Untergliedert werden kann die Degradation in mehrere Typen, die auf physikalische, chemische und biologische Phänomene zurückzuführen sind. Mit der Degradation kann ein Leistungsverlust im System einhergehen, welcher durch unterschiedliche Parameter hervorgerufen werden kann. Ein Beispiel hierfür ist der Verlust der mechanischen Festigkeit eines Bauteils aufgrund von Verschleiß. Da die Degradation irreversibel ist, verschlechtert sich der Zustand des Bauteils monoton. Der Ausfall bahnt sich langsam an, weshalb auch von einem weichen Schaden (*soft-failure*) gesprochen wird. Die nachfolgenden Ausführungen zu den Degradationsmessungen, den Verläufen und der Auswertung sind folgenden Standardwerken entnommen [BLC11; ME98; BL04; Nel04b].

Der Schädigungsprozess im Bauteil, wie beispielsweise der Verschleiß, kann zyklisch oder kontinuierlich anhand eines Degradationsmerkmals gemessen werden und so ein Ausfall im Vorfeld prognostiziert werden. Die Auswahl der Messgröße ist hier von zentraler Bedeutung, da nur bei direkter Messung des Degradationsmerkmals eine eindeutige Aussage über den Zustand getroffen werden kann. Bei einer indirekten Messung, z. B. über den Abrieb im Öl, kann die Messgröße auch von anderen Einflüssen abhängig sein und ein plausibler Rückschluss auf das Degradationsmerkmal ist somit nicht ohne Weiteres möglich. Oft ist es auch nicht möglich, das Degradationsmerkmal im montierten Zustand zu messen. Ist jedoch eine Demontage und nach der Messung wieder eine Montage notwendig, kann sich der Degradationsprozess ändern, was bei der anschließenden Analyse und Bewertung berücksichtigt werden muss.

Mit den Messdaten kann der Verlauf des Degradationsmerkmals über der Zeit aufgetragen werden. Eine schematische Darstellung unterschiedlicher Verläufe ist in Bild 2.5a zu erkennen. Ein linearer Verlauf ist beispielsweise beim Verschleiß von Pkw-Reifen zu beobachten. Risswachstum folgt meist einem progressiven Verlauf.

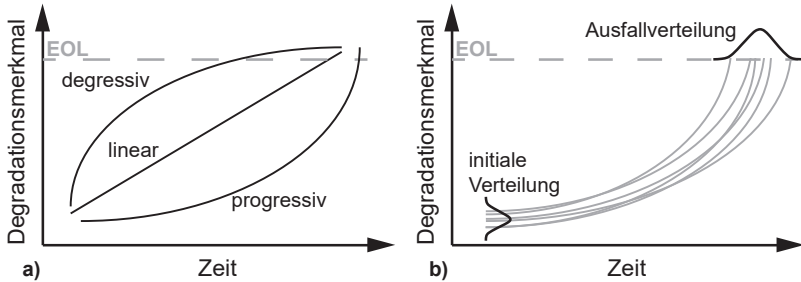


Bild 2.5 Schematische Darstellung unterschiedlicher Degradationsmodelle. a) mögliche Formen der Degradationskurven b) Variation der Einzel-Verläufe und resultierende Ausfallverteilung am Beispiel progressiver Degradation (in Anlehnung an [ME98])

Ein Beispiel für einen degressiven Verlauf ist das Wachstum von leitenden Fäden in Leiterplatten. Die Betrachtung von Degradation erfordert zudem eine bestimmte Grenze, welche als Ausfall des Systems definiert wird. Dies ist in der Abbildung durch das End-of-Life (EOL) Kriterium gekennzeichnet.

Ist eine Beziehung zwischen messbarem Degradationsmerkmal und der Zeit vorhanden, kann damit eine Prognose der Ausfallzeit durch Extrapolation stattfinden. Dies ist besonders im Hinblick auf die immer kürzeren Entwicklungszeiten und die damit geringe Zeit zum Nachweis der Produktzuverlässigkeit von Vorteil. Hier können über die Degradationsdaten vor allem bei Tests mit wenigen oder keinen Ausfällen sehr viele Informationen bezüglich der Zuverlässigkeit gewonnen werden. Zudem kann bei der direkten Messung des Degradationsmerkmals der Fehlermechanismus sehr präzise modelliert werden. Durch die anschließende Extrapolation wird die Abschätzung der Zuverlässigkeit genauer, da auch die Zwischenmessungen zur Verfügung stehen. Im Gegensatz dazu liegt bei beschleunigten Tests lediglich die Endzeit des Versuches vor. Zudem können diese genauen Abschätzungen bereits früher vorgenommen und somit die Testzeit wesentlich verkürzt werden.

Die Wachstumsgeschwindigkeit des Degradationsmerkmals hängt von Betriebs- und Umwelteinflüssen ab, wie beispielsweise Temperatur, Feuchtigkeit, Spannung und Stößen. Aufgrund von Materialeinflüssen unterscheidet sie sich von Bauteil zu Bauteil. Dadurch können sich, wie in Bild 2.5b ersichtlich, kreuzende Degradationspfade der unterschiedlichen Bauteile ergeben. Verstärkt wird dies durch unterschiedliche initiale Zustände der unterschiedlichen Bauteile. Der erste initiale Anriss oder der erste Ausbruch von Material an einer Fläche ist unterschiedlich groß und tritt auch zu unterschiedlichen Zeitpunkten ein. Dies kann durch Toleranzen in der Geometrie, aber auch durch Defekte im Material und unterschiedlich große Anrisse hervorgerufen werden. Die Degradationspfade verlaufen daher nicht zwangsläufig durch den Ursprung des Diagramms.

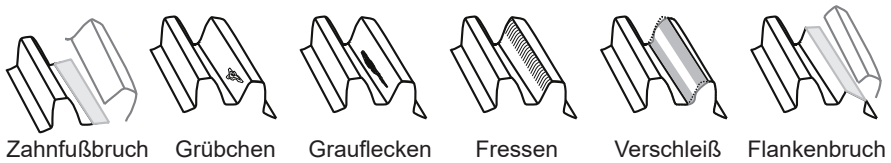


Bild 2.6 Schematische Darstellung unterschiedlicher Zahnschäden

Für die Abschätzung der Zuverlässigkeit können einerseits Degradationsmodelle aus der Literatur herangezogen werden. Andererseits kann aus direkt am Bauteil durchgeführten Messungen der mathematische Zusammenhang des zugrundeliegenden Degradationsprozesses entwickelt werden. Die Beschreibung erfolgt in beiden Fällen über Gleichungen, welche durch eine definierte Zufälligkeit erweitert werden, um die Variabilität in der Wachstumsgeschwindigkeit und des Anfangszustands zu integrieren. Hierfür werden häufig empirische Wahrscheinlichkeitsverteilungen herangezogen und über eine Monte Carlo Simulation die Streuung in den Modell-Parametern realisiert. Somit können simulativ viele Degradationspfade erzeugt werden und eine Abschätzung der Zuverlässigkeit vorgenommen werden.

Weiterführende Literatur zu Degradationsmechanismen sind in Batchelor et al. [BLC11] zu finden. In Yang [Yan07] wird die Messung der Degradation sowie die Analyse fokussiert. Die Modellierung der Degradation ist in Meeker und Escobar [ME98] detailliert beschrieben und das Abschätzen der Ausfallverteilung anhand der Degradationsmessung in Lu und Meeker [LM93]. Die Beschleunigung von Degradationstests ist Inhalt in [ME98].

2.2 Schadensarten bei Zahnrädern

Seit Jahrzehnten werden die Schädigungsmechanismen an Verzahnungen untersucht und erforscht. Die Grundlagen und Einflussfaktoren sind daher in zahlreichen Grundlagenwerken zu finden, wie z. B. [KB17; NW03; Bar99; Nau+19; DIN3979]. Die allgemeinen mechanisch und tribologischen Beanspruchungen sowie physikalisch und chemische Verschleißmechanismen werden unter anderem in Sommer et al. [SHS18] näher betrachtet.

Grundsätzlich wird zwischen Schäden am Zahnfuß und an der Zahnflanke unterschieden [DIN3979]. Am Zahnfuß ist der Bruch ausschlaggebend. Die Zahnflanke kann unterschiedliche Schäden wie zum Beispiel Grübchen, Grauflecken, Fressen, Verschleiß und Zahnflankenbruch aufweisen. Diese genannten Schadensarten bei Zahnrädern werden im Folgenden kurz erläutert, siehe Bild 2.6. Weitere Schäden wie zum Beispiel die Korrosion, Erosion oder der Stromdurchgang werden an dieser Stelle nicht beschrieben. Hierbei wird auf [DIN3979; Bar99] verwiesen.

Zahnfußbruch

Bei Zahnfußbruch brechen ganze Zähne am Zahnfuß ab, was zum Totalausfall des Getriebes führt, da der Leistungsfluss unterbrochen wird. Hauptursache ist die Biegebelastung der Zähne im Eingriff, was zu einem Spannungsmaximum im Zahnfußbereich führt. Durch die Befundung der Bruchfläche kann zwischen einem Gewaltbruch und einem Dauer- oder Ermüdungsbruch unterschieden werden. Der Gewaltbruch resultiert aus einer oder wenigen Überlastungen, die nicht prognostizierbar sind. Diese Überlastungen können zum Beispiel aus einem falschen Einsatz, Blockieren des Getriebes aufgrund anderer Maschinenelemente etc. resultieren. Je nach Werkstoff ist eine feinkörnige oder wulstartige Bruchfläche kennzeichnend. Der Dauerbruch dagegen resultiert aus der dauerhaften wechselnden Biegebelastung der Zähne im Eingriff, was eine Ermüdung zur Folge hat. Im ersten Schritt entsteht nach einer gewissen Betriebszeit ein Anriss. Dieser Riss pflanzt sich mit zunehmender Betriebszeit fort. Kann der vorhandene Restquerschnitt der Belastung nicht mehr standhalten, bricht der Zahn plötzlich ab, was dem zweiten Schritt entspricht und auch als Restbruch bezeichnet wird. Aus diesem Grund ist die Bruchfläche durch zwei Zonen gekennzeichnet. Der erste Bereich ist eben und von Rastlinien durchzogen, wohingegen der zweite Bereich des Restbruchs deutlich rauer ist.

Grübchen

Grübchenschäden sind muschelförmige Materialausbrüche an der Zahnflanke. Diese treten aufgrund der Gleit-Wälzbelastung hauptsächlich unterhalb des Wälzkreises auf und lassen sich in Einlaufgrübchen und fortschreitende Grübchen unterscheiden. Bei Einlaufgrübchen (häufig bei ungehärteten Zahnrädern [DIN3979]) ist der Schadensverlauf degressiv und kommt daher nach einer bestimmten Zeit zum Stillstand. In dieser Zeit werden erhöhte Oberflächenspannungen aufgrund von Ungenauigkeiten in der Fertigung und der Oberflächenrauheit abgebaut, bis die Berührfläche der Flanken so groß ist, dass die Belastungen ohne weitere Schädigung übertragen werden kann. Fortschreitende Grübchen können linear oder progressiv wachsen und sind die Folge einer lokalen Überschreitung der Wälzfestigkeit. Da diese Ausbrüche nicht direkt zum Totalausfall führen, handelt es sich bei diesem Schaden um einen sogenannten weichen Schaden (soft-failure) [ME98]. Allerdings wird die Flanke mit fortschreitendem Grübchen geschwächt, sodass die Belastung nicht mehr übertragen werden kann und ein Folgeschaden durch Zahnfußbruch entsteht.

Grauflecken

Unter Graufleckigkeit versteht man ein Netz von Rissen an der Oberfläche der Zahnflanke mit vielen ausgebrochenen Poren. Die Tiefe der Ausbrüche beträgt maximal 10 µm und die Form ist dreieckig. Es handelt sich um eine Auskolkung meist im

Bereich des Zahnfußes und ist durch mattgraue Bereiche gekennzeichnet. Hiervon ausgehend können Risse in die Tiefe wachsen und dadurch das Entstehen von Grübchen begünstigt werden [Fel16]. Ursache für dieses Schadensbild ist eine tribologisch ungünstige Kontaktbedingung. Grauflecken treten nur auf, wenn die Flanken nicht vollständig durch einen Schmierfilm getrennt sind und dadurch eine Mischreibung mit erhöhtem Anteil der Festkörperreibung stattfindet. Dieser Zustand kommt durch eine erhöhte Oberflächenrauheit der Zahnflanken und eine geringe Schmierfilmdicke zustande.

Fressen

Fressen ist gekennzeichnet durch streifige Riefen in Abwählrichtung mit unterschiedlicher Tiefe und Breite. Meist tritt der Schaden am Zahnkopf auf, wo sowohl eine hohe Hertz'sche Pressung als auch eine große Gleitgeschwindigkeit vorliegt. Der Schaden kann bereits nach kurzzeitiger Überlastung auftreten und gilt daher als besonders kritisch. Unterschieden wird zwischen Kalt- und Warmfressen, wobei das Warmfressen deutlich häufiger vorliegt und daher hier beschrieben wird. Durch die hohe Pressung und Gleitgeschwindigkeit kommt es zu einer lokalen Erhöhung der Temperatur, was zu einem Abreißen des Ölfilms führt. Dadurch reiben die beiden metallischen Flanken direkt aufeinander und es kommt aufgrund der hohen Kontakttemperatur zu örtlichen Verschweißungen, welche durch die Relativbewegung wieder auseinandergerissen werden. Der Fressschaden beruht daher auf dem Verschleißmechanismus Adhäsion. Als Maßnahme gegen Fressen kann dem Öl ein Extrem-Pressure (EP)-Zusatz beigemischt werden. Diese Additive bilden bei hoher Pressung und Temperatur eine Reaktionsschicht auf der Flanke aus, wodurch der direkte metallische Kontakt verringert wird.

Verschleiß

Durch Verschleiß ändert sich die Zahnflankenform meist an allen Zähnen, wodurch sich andere Eingriffsverhältnisse ergeben. Dies kann zu Folgeschäden wie Zahnfußbruch führen. Unterschieden wird hier zwischen einem gewollten Einlaufverschleiß und dem Abrasivverschleiß. Beim Einlaufverschleiß werden in den ersten Betriebsstunden des Getriebes die Oberflächen der Flanken eingeebnet und somit fertigungsbedingte Oberflächenstrukturen und Rauheitsspitzen entfernt. Die Zahnflanken erscheinen in der Folge als glatte, glänzende Oberflächen. Der Verlauf ist hierbei degressiv und weder die Funktion noch die Lebensdauer wird beeinträchtigt. Kommt es zu einem kontinuierlichen Materialabtrag an der Flanke, ist von Abrasivverschleiß die Rede, welcher die Lebensdauer der Verzahnung negativ beeinflusst. Einerseits kann Material durch Rauheitsspitzen der Flanke abgetragen werden, wenn eine zu geringe Schmierfilmdicke vorliegt. Andererseits sind harte Verunreinigungen im Öl

möglich, welche für den Materialabtrag sorgen (Schleifverschleiß). Eine weitere Ursache kann eine Störung des Zahneingriffes sein, wodurch der Zahnkopf abgerundet und der Bereich des Zahnfußes ausgehöhlt wird (Verschleiß durch Eingriffsstörung).

Zahnflankenbruch

Der Zahnflankenbruch zählt ebenfalls zu den Ermüdungsschäden, tritt aber im Vergleich zu Grübchen und Grauflecken spontan auf, also ohne messbare Degradationsmerkmale. Dies liegt daran, dass die Rissinitiierung in der Regel deutlich unterhalb der Oberfläche stattfindet, meist im Übergangsbereich der Härteschicht zum weichen Kern an Fehlstellen im Gefüge oder an nicht-metallischen Einschlüssen. Dadurch ist dieser sogenannte Primärriss bei der Inspektion nicht erkennbar. Unter einem Winkel von ca. 40 bis 50° zur aktiven Flanke wächst der Primärriss in beide Richtungen, also in Richtung der Bauteiloberfläche und auch in Richtung Werkstoffkern. Zusätzlich traten in Versuchen Schäden auf, die auf Sekundärrisse schließen lassen, welche parallel zum Zahnkopf von der Oberfläche in die Werkstofftiefe wachsen, bis sie auf den Primärriss treffen. Witzig [Wit12] belegte anhand eines FE-Modells eine Spannungskonzentration nahe der Oberfläche aufgrund des innenliegenden Primärrisses. Schlussendlich folgt, wie auch beim Zahnfußbruch, ein Restgewaltbruch, der spontan auftritt und zum Ausfall führt. Zahnflankenbruch tritt häufig bei geringen Einsatzhärtungstiefen und geringen Zahnquerschnitten auf. [Her03; Bru06; Wit12]

2.3 Grübchen an Zahnrädern

Der Fokus innerhalb der vorliegenden Arbeit liegt auf dem Schadensmechanismus Grübchen. Aus diesem Grund wird im Folgenden eine genaue phänomenologische Beschreibung des Mechanismus dargelegt sowie wichtige Einflussfaktoren auf die Grübchentrugfähigkeit aufgezeigt. Schlussendlich wird der Stand der Forschung im Bereich Grübchenwachstum verdeutlicht und Ausfallverteilungen von Grübchen aus der Literatur vorgestellt.

2.3.1 Phänomenologische Beschreibung des Schadensmechanismus Grübchen

Die Beschreibung des Schadensmechanismus Grübchen wurde bereits vor mehr als 50 Jahren vorgenommen (unter anderem [Gap62; BK71]) und immer weiter untersucht und ergänzt [KBK76; Kna88; Sch90; Bre+17; SHS18]. Die muschelförmigen oder dreiecksförmigen Ausbrüche an der Zahnflanke entstehen aufgrund einer Überschreitung der Wälzfestigkeit in der Randzone des Werkstoffs. Vor allem kleinere Grübchen weisen eine dreieckige Form auf. Im Laufe der Betriebszeit wachsen die Grübchen weiter und das Aussehen nähert sich einer Muschel an. Dies ist in Bild 2.7

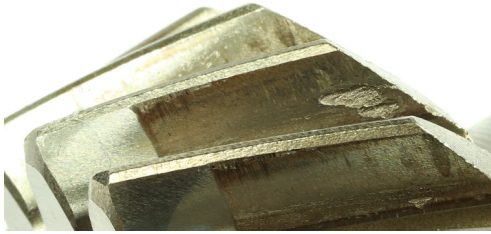


Bild 2.7 Foto von Grübchenschäden an zwei benachbarten, einsatzgehärteten Zahnflanken

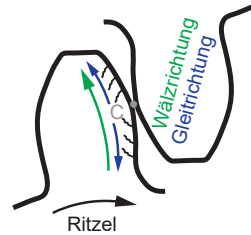


Bild 2.8 Schematische Darstellung der Rissorientierung am treibenden Ritzel

an zwei benachbarten Zahnflanken zu erkennen. Ebenfalls wird auf dem Foto deutlich, dass die Grübchen im Bereich des Zahnfußes, also unterhalb des Wälzkreises entstehen [KBK76]. In diesem Bereich liegt negatives Gleiten vor. Die Spitze des Dreiecks ist dabei aufgrund der Tangentialkraft zum Zahnfuß gerichtet [Bre+17].

Die Tiefe des parallel zur Flankenoberfläche verlaufenden Ausbruchs wird in Tobie [Tob01] untersucht und mit 0,3 bis 0,4 mm angegeben. In maximalen Fällen treten bei den Versuchen mit einem Achsabstand von 91,5 mm Grübchentiefen von 0,5 mm auf. Bei einem Achsabstand von 200 mm ergeben sich mit 0,7 bis 1,2 mm deutlich tiefere Grübchen. Die Grübchen sind dabei im Bereich des Zahnfußes sehr flach und fallen zum Wälzkreis hin deutlich ab, wodurch eine steilere Grübchenflanke entsteht [KBK76]. Zudem ist der Grund des Grübchenausbruchs sehr zerklüftet, was in Bild 2.7 deutlich zu erkennen ist. Bei nitrierten Zahnrädern dagegen sind die Bruchflächen deutlich glatter [KBK76]. Flächenmäßig liegen die Grübchen ein bis zwei Zehnerpotenzen über den Ausbrüchen der Graufleckigkeit [Bre+17].

Die bisherigen Beschreibungen beziehen sich lediglich auf eine einzelne beschädigte Zahnflanke eines Zahnrades. Bei der Betrachtung des gesamten Zahnradpaares fällt auf, dass die Grübchen fast ausschließlich am treibenden Ritzel auftreten [KBK76]. Dies kann mit der Übersetzung der Zahnradstufe und dadurch höherer Drehzahl am Ritzel erklärt werden, was gleichzeitig zu einer höheren Anzahl an Überrollungen führt [SHS18]. Zudem tritt der Grübchenschaden bei einsatzgehärteten Zahnrädern meist an einem Zahn und nur in seltenen Fällen an mehreren Zähnen auf [Sch90; NW03].

Viele Literaturstellen (unter anderem [Kna88; Bre+17]) beschreiben eine Sprengwirkung von Öl in Rissen als Ursache für das Phänomen Grübchen. Eine weitere Theorie ist das Entstehen von Rissen unterhalb der Oberfläche, welche durch nicht-metallische Einschlüsse initiiert werden [Kna88; DJK96; DR03; DG09]. Beide Theorien werden im Folgenden erläutert.

Bei den oberflächeninduzierten Grübchen ermüdet die Zahnflankenoberfläche aufgrund der zyklischen Belastung im Zahneingriff. Diese Ermüdung hat Anrisse an der Flanke zur Folge, welche eine bestimmte Rissorientierung aufweisen. Sowohl

unterhalb als auch oberhalb des Wälzkreises verlaufen die Hauptrisse beim treibenden Ritzel unter einem Winkel von 20 bis 30° zum Wälzpunkt hin, was durch die unterschiedlichen Gleit-Wälzbeanspruchungen zustande kommt [Kna88]. Der Bereich oberhalb des Wälzpunkts wird als Bereich des positiven Gleitens bezeichnet, da die Wälz- und Gleitrichtung gleichgerichtet sind. Unterhalb des Wälzkreises sind diese beiden Geschwindigkeiten entgegengesetzt und es liegt negatives Gleiten vor, siehe Bild 2.8. Zum Grübchenausbruch führt schließlich das in den Riss eindringende Öl. Dieses wird im Bereich des negativen Gleitens beim Abwälzen der Verzahnung in den Riss gepresst. Da Öl nicht kompressibel ist, steigt der Druck innerhalb des Risses an, wodurch eine Sprengwirkung entsteht und Materialteilchen ausbrechen. Dieses Ausbrechen erfolgt entlang von Sekundärrissen, welche in einem Winkel von ca. 45° vom Hauptriss in Richtung der Oberfläche verlaufen. Im Bereich des positiven Gleitens dagegen wird das Öl beim Abwälzen aus dem Riss gepresst und es kommt zu keinen Ausbrüchen.

Die zweite Theorie geht von Grübchen aus, welche im Suboberflächenbereich induziert werden. Ein Materialdefekt nahe der Oberfläche, z. B. Einschlüsse, Oxidationen oder Ablagerungen an Korngrenzen, führt zu lokal hohen Spannungsspitzen. Hieraus resultiert eine Zerrüttung und damit eine Rissinitiierung. Durch die Belastung durch den Abwälzvorgang verbinden sich die Schwachstellen zu einem größeren Riss, welcher seine Vorzugsrichtung in einem Winkel von 20° zur Oberfläche ausbildet und zum Zahnfuß hin verläuft [Bre+17]. Trifft der Riss auf die Flankenoberfläche, brechen die ersten Materialteilchen aus. Durch die Druck- und Scherbelastungen auf der Oberfläche vergrößert sich der Ausbruch und es entstehen tiefe Grübchen. In Richtung Wälzkreis ist der Ausbruch deutlich tiefer und die Flanke steiler. Der Riss läuft hier im Winkel von 50°, was sich durch die Hauptspannungen erklären lässt. Nach Knauer [Kna88] ist ein Riss unter der Oberfläche alleine nicht ausreichend, um ein Grübchenschaden zu verursachen. Der Ausbruch erfolgt lediglich, wenn Öl in den Riss eindringen kann und dadurch die Reibung zwischen den beiden Rissflanken reduziert wird. Das Vorhandensein von Schmieröl ist damit ausschlaggebend für die Grübchenbildung.

Liegt ein Grübchenschaden vor, steigen die Schwingungen im Getriebe stark an. Durch die Einzelschäden auf der Zahnflanke reduziert sich die Berührlänge und die Kontaktsteifigkeit im Zahneingriff wird beeinflusst [Ngu02]. Das Resultat ist eine Amplitudenmodulation der Schwingungen [Ngu02], welche mithilfe von Beschleunigungssensoren am Getriebegehäuse aufgenommen und für eine Schadensdetektion herangezogen werden [Ran11; EGA17].

2.3.2 Einflussfaktoren auf die Grübchenbildung

Einflussfaktoren auf die Grübchenbildung können nach Bartz [Bar99] in direkte und indirekte Faktoren unterteilt werden. Zu den direkten zählen die Zahngeometrie, der

E-Modul und die Belastung. Bei den indirekten spielen die Rauheit der Zahnflankenoberfläche, die Schmierfilmdicke im elasto-hydrodynamischen (EHD) Kontakt und die Reibkraft eine Rolle.

Einen positiven Einfluss auf die Grübchentragsfähigkeit haben alle Parameter der Zahngeometrie, welche die maximale örtliche Pressung reduzieren [Sta01]. Hierzu zählen unter anderem ein kleiner Modul, großer Eingriffs- und Profilwinkel sowie eine positive Profilverschiebung [NW03; Bar99]. Ein Wechsel von Geradverzahnung hin zu Schrägverzahnung ist ebenfalls positiv [Bar99; Döb98]. Zudem beeinflusst die minimale Nutzbreite der Verzahnung die Grübchentragsfähigkeit. Diese sollte bei Schrägverzahnungen möglichst groß gewählt werden, was durch eine große Profilüberdeckung und möglichst ganzzahlige Sprungüberdeckung erreicht werden kann [Sta01]. Der Einfluss der Profilkorrektur auf die Grübchentragsfähigkeit wurde in Haslinger [Has91] untersucht. Es zeigte sich ein positiver Einfluss auf die Zeitfestigkeit durch eine lange Kopfrücknahme sowohl für gerad- als auch für schrägverzahnte Zahnräder aus Vergütungsstahl. Im Dauerfestigkeitsbereich konnte kein Unterschied zwischen langer und kurzer Korrektur festgestellt werden. Für einsatzgehärtete Zahnräder ist der Einfluss langer und kurzer Korrekturen weniger dominant. Die Unterschiede zwischen Außen- und Innenverzahnungen wurde in Schudy [Sch10] untersucht. Auch bei Innenverzahnungen traten die Grübchen im Bereich des negativen Gleitens auf und wuchsen in Richtung Wälzkreis.

Unter dem direkten Faktor E-Modul werden im Folgenden alle Einflüsse des Werkstoffes zusammengefasst. Bezogen auf Vergütungsstähle kann laut Bartz [Bar99] durch das Nitrieren eine doppelte Grübchentragsfähigkeit erreicht werden, wenn das Drehmoment bei Dauerfestigkeit betrachtet wird. Einsatzgehärtete Zahnräder zeigen eine fünffache Steigerung der Tragsfähigkeit. Es muss jedoch beachtet werden, dass die Einsatzhärtetiefe (EHT) vom Modul bzw. Ersatzkrümmungsradius abhängig ist. Um einen Kompromiss zwischen Zahnfußbruch- und Grübchentragsfähigkeit zu erreichen, empfiehlt Tobie [Tob01] eine EHT von $0,15 \dots 0,2 \cdot m_n$. Des Weiteren hat sich bei den Untersuchungen von [Tob01] gezeigt, dass Grübchen bei einer geringen EHT nur am treibenden Ritzel auftreten. Bei einer hohen EHT kommen dagegen sowohl am Ritzel als auch am Rad Grübchen vor. Druckeigenspannungen zeigen ebenfalls einen positiven Effekt auf die Tragsfähigkeit [Köc96], wie auch die Erhöhung der Härte bis 800 HV [SHS18] und ein hoher Restaustenitgehalt im Werkstoff [Raz67]. Anlassvorgänge dagegen senken die Grübchentragsfähigkeit [Kna88]. Der negative Einfluss von Schleifbrand auf die Tragsfähigkeit wurde in Schwienbacher [Sch07] und Koller [Kol13] untersucht.

Das anliegende Drehmoment hat direkt Einfluss auf die Pressungsverteilung auf der Zahnflanke und damit auf die Grübchentragsfähigkeit [Sta01]. Reihenfolge-Effekte bei der Aufbringung der Last können jedoch vernachlässigt werden, da sich keine verkürzte Lebensdauer aufgrund schneller Wechsel gezeigt hat [Ebe95]. In Schaller [Sch90] wurde der Einfluss von Lasten unterhalb der Dauerfestigkeit untersucht und

kein Schädigungsbeitrag erkannt. Aus diesem Grund wurde für die Berechnung die SAH nach Miner-Original verwendet. Zudem wurde erkannt, dass durch niedrige Drehzahlen und hohe Momente eine Glättung der Flankenoberflächen erreicht wird. Dies hat eine lokal reduzierte Beanspruchung zur Folge und damit eine Erhöhung der Lebensdauer.

Die indirekten Faktoren Rauheit, Schmierfilm und Reibkraft beeinflussen sich gegenseitig im hohen Maße. Aus diesem Grund werden diese Einflussfaktoren unter dem Hauptbegriff Kontaktbedingung/-zustand zusammengefasst. Ist die Reibungszahl hoch, ergibt sich eine geringere Grübchentragfähigkeit. Bei vergüteten Zahnradern kann eine Verdopplung der Reibungszahl einen Abfall des übertragbaren Moments auf lediglich 40% des Ausgangsmoments bedeuten [Bar99]. Eine Reduzierung der Reibungszahl und somit auch der Tangentialbeanspruchung und Verlustleistung kann durch das Öl erreicht werden, indem Syntheseöl anstatt Mineralöl verwendet wird [SHS18; Sim84]. Die Verwendung von Syntheseöl zur Steigerung der Grübchentragfähigkeit wird in zahlreichen Literaturstellen empfohlen [Bar99; Els93; Hei90; Hir90; Bay00]. Zusätzlich zum Grundöl ist die Viskosität von entscheidender Bedeutung [Hoc11]. Für eine hohe Grübchentragfähigkeit sollte die Nennviskosität hoch sein und die Betriebsviskosität niedrig [Kna88; Bar99]. Die Viskosität im Schmierpalt beeinflusst den Aufbau des EHD-Schmierkontakts und die Schmierfilmdicke. Mit größerer Schmierfilmdicke wird die Grübchentragfähigkeit gesteigert, da die beiden Flanken komplett durch Schmieröl getrennt sind und keine Mischreibung mehr vorliegt [Bar99]. Der Einfluss der Schmierfilmdicke gilt jedoch lediglich, wenn die Differenz zwischen Filmdicke und Rauheit kleiner als 1,0 ist [Bar99]. Die Schmierfilmdicke kann auch über die Erhöhung der Umfangsgeschwindigkeit erreicht werden, wobei der Effekt hier größer ist als bei der Steigerung durch die Viskosität [Bar99]. Nachteil ist hier jedoch, dass die dynamischen Zusatzkräfte durch die hohen Umfangsgeschwindigkeiten gesteigert werden, was zu einer Verringerung der Graufleckentragfähigkeit führt [Emm94; SHS18]. Die zusätzliche Beeinflussung von Grauflecken auf die Grübchentragfähigkeit wurde unter anderem von Radev [Rad05] und Felbermaier [Fel16] untersucht. Geringe Graufleckigkeit hat eine entlastende Wirkung auf die Zahnflanke, die ähnlich wie Flankenkorrekturen wirken. Somit kann eine Steigerung der Grübchentragfähigkeit erreicht werden. Liegen jedoch große Grauflecken vor, geht eine erhöhte Absenkung der Lebensdauer bezogen auf den Schadensmechanismus Grübchen einher. Weitere Einflüsse sind die Ölmenge im Eingriff, die Additive im Öl sowie der Alterungszustand, wobei auch Wasser im Öl oder die Verunreinigung durch harte Partikel eine Rolle spielen [Ott09; KBK76; Bay00; Eng19].

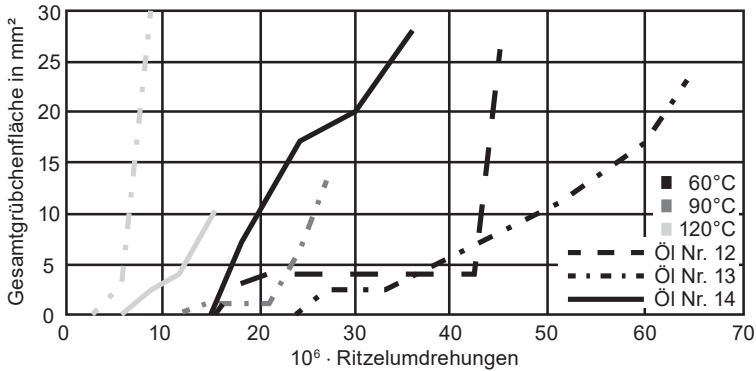


Bild 2.9 Degradationsverläufe von Grübchen bei unterschiedlichen Temperaturen und Ölen (vgl. [Kna88])

2.3.3 Grübchenwachstum

Das Gebiet des Grübchenwachstums ist weniger erforscht als die Einflussfaktoren. Oft werden nur qualitative Aussagen getroffen. Beispiele hierfür sind die Abhängigkeit von der Temperatur und Viskosität, dem Material, der EHT sowie des Achsabstands. In Schaller [Sch90] werden plötzliche großflächige Grübchen beschrieben, wenn dünnes Öl und hohe Temperaturen anliegen. Knauer [Kna88] beschreibt bei hohen Temperaturen und daraus folgenden geringen Schmierfilmdicken ebenfalls große Grübchen, die vom Bereich des negativen Gleitens bis weit über den Wälzkreis reichen. Liegen niedrige Temperaturen und hohe Nennviskositäten vor, treten schmale Grübchen auf. Zudem untersuchte Knauer [Kna88] unterschiedliche Werkstoffe mit dem Ergebnis, dass die Grübchen bei 16MnCr5 langsamer wachsen als bei 17CrNiMo6. Die Wachstumsgeschwindigkeit der Grübchen bei unterschiedlichen EHT und Achsabständen wurde in Tobie [Tob01] untersucht. Bei geringer EHT wachsen die Grübchen langsamer als bei höherer EHT und bei größerem Achsabstand von 200 mm ist von einem extrem schnellen Wachstum die Rede.

Die Zeit zwischen Beginn des Betriebs und Rissentstehung wird in Sommer et al. [SHS18] Inkubationszeit genannt. Nach dieser Inkubationszeit brechen die ersten Grübchen aus. In Bartz und Käser [BK71] wird beschrieben, dass zu Beginn sehr kleine Ausbrüche vorliegen. Die Größe der Ausbrüche steigt, je später der Ausbruch stattfindet. Der Verlauf nach dieser Initiierung des Grübchens kann nach Brecher et al. [Bre+17] linear oder progressiv erfolgen. Die Beschreibung eines progressiven Verlaufs ist jedoch häufiger [OBK60; SHS18; MMS18; SSM19; Bes20]. Zudem ist der Verlauf der Grübchengröße über der Zeit nicht stetig, sondern teilweise sprunghaft [BK71; Kna88].

Beispielhaft sind in Bild 2.9 Degradationsverläufe aus [Kna88] dargestellt. Die

Flankenpressung ist konstant bei $\sigma_{H0} = 1525 \text{ N/mm}^2$, das Material ist 16MnCr5. Die Auswertung der Grübchengröße erfolgte visuell, wobei die Gesamtgrübchenfläche von Rad und Ritzel über der Zeit aufgetragen wurde. Es wird deutlich, dass die Grübcheninitiierung bei hohen Temperaturen und damit dünnflüssigerem Öl früher stattfindet als bei niedrigeren Temperaturen. Zudem ist die Wachstumsgeschwindigkeit deutlich größer als bei niedrigeren Temperaturen, wo zwischen Initiierung und Ende des Testlaufs noch eine erhebliche Laufzeit vorlag.

In aktuelleren Forschungsarbeiten erfolgt die Bewertung der Grübchengröße über Negativabdrücke der Grübchen und anschließender 3D Vermessung. In Müller et al. [MMS18] und Schlecht et al. [SSM19] wird dieses Verfahren für Kegelräder angewendet und in Beslic [Bes20] für Stirnräder. In beiden Fällen ergibt sich ein progressiver Verlauf des Grübchenwachstums.

2.3.4 Ausfallverhalten von Grübchen

Die Berechnungsgrundlagen für die Grübchentragfähigkeit von Zahnrädern sind in der [DIN3990-2] und [ISO6336-2] jeweils in Teil 2 beschrieben. Nach diesen Normen erfolgt auch die Auslegung von Verzahnungen bezüglich der unterschiedlichen Schadensmechanismen. In der ISO6336 von 2019 wurden neue Erkenntnisse unter anderem aus Steinberger [Ste07] aufgenommen und die Auslegung von Schrägverzahnungen dadurch verbessert. Für eine gute Vergleichbarkeit von Versuchen ist in den Normen auch der Ausfall durch Grübchen definiert. Dies ist jeweils in Teil 5 der DIN und ISO zu finden und bezieht sich lediglich auf die Testauswertung und nicht die reale Anwendung [DIN3990-5; ISO6336-5]. Für ungehärtete Zahnräder wird als Ausfallkriterium eine Gesamtgrübchenfläche von 2% bezogen auf alle aktiven Zahnflanken definiert. Für oberflächengehärtete Verzahnungen wird zwischen zwei Ausfallkriterien unterschieden. Einerseits wird die gesamte Grübchenfläche summiert und auf alle aktiven Flanken bezogen. Hier gilt das Ausfallkriterium von 0,5% Grübchenfläche (in Niemann und Winter [NW03] wird hier 1% angegeben). Sind andererseits nur wenige große Grübchen vorhanden, kommt das zweite Ausfallkriterium zum Einsatz. Dieses ist definiert mit einer Grübchenfläche von 4% eines Einzelzahnes bezogen auf eine einzelne aktive Zahnflanke. Der Ausfall im Versuch tritt bei oberflächengehärteten Zahnrädern ein, sobald eines der Kriterien erreicht ist.

Bei einsatzgehärteten Zahnrädern treten meist wenige große Grübchen auf, so dass als Ausfallkriterium die 4% bezogen auf eine aktive Zahnflanke gilt. Werden nitrierte Zahnräder eingesetzt, liegen kleinere Grübchen am Umfang verteilt vor, weshalb das 0,5% Kriterium zutrifft [NW03; KBK76]. Der Unterschied zwischen den beiden Wärmebehandlungsverfahren liegt im Aufbau der Härteschicht. Sowohl beim Einsatzhärten als auch beim Nitrieren wird die Randzone mit Kohlenstoff bzw. Stickstoff angereichert und dadurch gehärtet. Die Tiefe dieser harten Randzone unterscheidet sich jedoch und ist bei nitrierten Zahnrädern geringer als bei einsatz-

gehärteten [KB17]. Zudem können einsatzgehärtete Zahnräder im Vergleich zu nitrirten Zahnrädern weit höher beansprucht werden [Bar99], was einen direkten Vergleich der Schadensbilder erschwert.

Die unterschiedlichen Werkstoffe und Wärmebehandlungsverfahren für Verzahnungen sind in Linke [Lin10] ausführlich beschrieben, wobei im Getriebebau hauptsächlich einsatzgehärtete Zahnräder Anwendung finden. Aus diesem Grund wird im Folgenden der Fokus auf einsatzgehärtete Zahnräder und deren Ausfallverteilung gelegt. Umfangreiche Untersuchungen im Zeit- und Dauerfestigkeitsbereich zum Grübchenausfall, aber auch Zahnfußbruch, wurden in Stahl et al. [Sta+99] mit einer sehr hohen Stichprobenanzahl durchgeführt. Hinsichtlich Grübchen wurden in 38 Versuchsreihen insgesamt 230 Versuchspunkte im Zeitfestigkeitsbereich und 279 im Dauerfestigkeitsbereich aufgenommen. Die statistische Auswertung der Versuche wurde parallel in Mauch und Zenner [MZ99] vorgenommen. Im Zeitfestigkeitsbereich der Grübchenversuche lassen sich die Ergebnisse gut mit einer zweiparametrischen Weibullverteilung annähern. Der Formparameter b liegt für alle Lasthorizonte bei 3,2. Die Versuche zum Zahnfußbruch zeigen dagegen eine Lognormalverteilung mit einer Standardabweichung von 0,06 bis 0,13. In Hein et al. [Hei+18] wird ebenfalls die zweiparametrische Weibullverteilung für die Auswertung der Grübchenversuche im Zeitfestigkeitsbereich herangezogen. Es ergibt sich ein Formparameter b von 2,8 und damit eine geringfügig größere Streuung im Vergleich zu [Sta+99]. Empfohlen wird in [Hei+18] allerdings ein Formparameter b von 3,0 für alle Lasthorizonte. Bei höheren Einsatzhärte-tiefen sind noch größere Formparameter möglich. Zudem wird eine Erweiterung der [DIN3990-2] und [ISO6336-2] vorgeschlagen, da diese lediglich eine Ausfallwahrscheinlichkeit von 1 % vorgeben. Die Auswertung von Versuchsergebnissen basiert dagegen häufig auf einer Ausfallwahrscheinlichkeit von 50 %, da der Median der Messwerte verwendet wird.

Im Gegensatz zu der bisher aufgezeigten zweiparametrischen Auswertung wird in Bertsche und Lechner [BL04] eine dreiparametrische Weibullverteilung für Grübchen herangezogen. Hier kommt als zusätzlicher Parameter eine ausfallfreie Zeit t_0 hinzu. Der Formparameter b wird zwischen 1,1 und 1,5 und die ausfallfreie Zeit t_0 mit $0,4 \dots 0,8 \cdot B_{10}$ angegeben. Die Formparameter von zweiparametrischen Weibullverteilungen sind im Vergleich zur dreiparametrischen Auswertung immer größer [BL04]. Aus diesem Grund wird von einer guten Übereinstimmung zu den oben genannten Werten ausgegangen. Auch in Beslic [Bes20] wird eine dreiparametrische Weibullverteilung für die Auswertung von zwei Lasthorizonten verwendet. Auf dem hohen Lasthorizont mit 200 Nm ergibt sich folgende Verteilung: $b = 2,4$, $T = 10,49e6$ LW und $t_0 = 9,58e6$ LW. Die Verteilung für den niedrigeren Lasthorizont mit 175 Nm ergibt folgende Verteilungsparameter: $b = 2,34$, $T = 43,52e6$ LW und $t_0 = 32,33e6$ LW. Zudem handelt es sich bei diesen Untersuchungen um Serienverzahnungen aus dem Fahrzeugbau und nicht um Testverzahnungen wie in [Sta+99; Hei+18].

2.4 Prognostics and Health Management (PHM)

Im folgenden Unterkapitel wird die sehr junge Disziplin des Prognostics and Health Managements (PHM) eingeführt. Laut Gouriveau et al. [GMZ16] wurden 1997 die ersten Veröffentlichungen in diesem Themenfeld dokumentiert und der folgende Anstieg der Zahlen von Veröffentlichungen und Zitationen war bis heute exponentiell. Dies zeigt die wachsende Bedeutung für Forschung und Entwicklung, aber auch für die Industrie.

Nach einer Einführung des Themenfeldes mit wichtigen Definitionen wird auf das Vorgehen innerhalb der PHM Modellierung eingegangen sowie Anwendungsfelder aufgezeigt. Die Grundlagen zu PHM sind hierbei den folgenden Literaturstellen entnommen [GMZ16; KAC17; EGA17; Hen21].

2.4.1 Einführung in das Themenfeld PHM

Im Gegensatz zur klassischen Zuverlässigkeit nach Bertsche und Lechner [BL04], welche statistische Aussagen über die Grundgesamtheit trifft und anhand historischer Daten repräsentative Lastkollektive erstellt, wird im PHM der Fokus auf jedes individuelle System im Feld gelegt. Es handelt sich nach Kim et al. [KAC17] daher um einen neuen technischen Ansatz, der die Echtzeitdaten aus dem Betrieb heranzieht, um das System zu bewerten und neues Wissen zu generieren. Zusammen mit den realen Betriebsbelastungen sind somit sehr präzise Prognosen möglich und es kann eine Strategie erarbeitet werden, um das System in seiner vorgesehenen Funktion zu erhalten. Als Definition für PHM und die darin enthaltene nutzbare Restlebensdauer ergibt sich damit nach Henß [Hen21]:

Prognostics and Health Management (PHM) [Hen21]:

„Prognostics and Health Management ist eine technische Disziplin, die sich mit der Bewertung, Optimierung und Regelung der nutzbaren Restlebensdauer (RUL) eines Systems unter Betriebsbedingungen beschäftigt.“

Nutzbare Restlebensdauer (RUL) [Hen21]:

„Die nutzbare Restlebensdauer RUL (engl. Remaining Useful Life) ist die, zum Zeitpunkt der Aussage, ermittelte verbleibende Lebensdauer, für die angenommen wird, dass das System unter angenommenen zukünftigen Funktions-, Nutzungs- und Umgebungsbedingungen nicht ausfällt.“

Möglich wird diese Bewertung, Optimierung und Regelung der RUL durch mehrere Treiber [EGA17; Hen21]. Einerseits werden immer mehr Daten erhoben, welche durch leistungsfähige Computer und durch maschinelles Lernen ausgewertet werden können. Andererseits werden im Kontext der Betreibermodelle immer mehr Funktionen anstelle von Produkten verkauft, wodurch eine genaue Kontrolle und Bewertung der Systeme unumgänglich ist. Zuletzt verbreiten sich autonome Systeme immer

weiter. Hier können Fehler nicht wie z. B. im Fahrzeug durch den Fahrer ermittelt werden. Es bedarf daher einer Diagnose, welche die sicherheitsrelevanten Funktionen überwacht und gegebenenfalls eine Wartung oder das Abstellen anordnet.

Wichtig ist in diesem Zusammenhang der sogenannte **Health** der Komponente oder des Systems. Dieser beschreibt den aktuellen Zustand, sozusagen die „Gesundheit“ des Systems. Für Ermüdungsausfälle nimmt der Health über der Lebensdauer kontinuierlich ab. Mit speziellen Health Indikatoren, z. B. Vibration, Temperatur usw., kann dieser Zustand beschrieben und die RUL prognostiziert werden.

Aus den oben genannten Schilderungen wird deutlich, dass der Bereich des PHM multi-disziplinär ist. Nach Kim et al. [KAC17], Ekwaro-Osire et al. [EGA17] und Henß [Hen21] werden folgende Disziplinen im PHM vereint: Sensor- und Messtechnik, Fehlerphysik, Künstliche Intelligenz und das maschinelle Lernen, moderne Statistik, Zuverlässigkeit sowie Sicherheit. Die Vorteile ergeben sich wie folgt:

- Prognose der zukünftigen Ausfälle von kritischen Komponenten und Systemen:
 - Steigerung der Sicherheit von Menschen und Güter
 - Erhöhung der Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit der Funktion und damit deren Qualität
 - Reduzierung von Gewährleistungskosten
 - Ermöglichung von vorausschauender Instandhaltungsstrategien
 - Reduzierung der Lagerbestände
 - Reduzierung der Wartungskosten
- Health Management mit optimierter Regelung im Betrieb:
 - ganzheitliche Betrachtung des Lebenszyklus
 - Verlängerung der Lebensdauer einzelner Komponenten
 - nachhaltiger Umgang mit Ressourcen
 - optimaler Instandhaltungsplan eines Gesamtsystems

Viele dieser Vorteile hängen mit der gewählten Instandhaltungsstrategie zusammen. Diese sind unter anderem die korrektive, zustandsorientierte oder voraussagende Instandhaltung, welche in [DIN13306] definiert sind.

2.4.2 Methoden für das PHM

Innerhalb eines PHM Ansatzes gibt es mehrere grundlegende Modellierungselemente, die sich je nach Literaturstelle in geringem Maße unterscheiden können. An dieser Stelle wird der Ansatz nach Henß [Hen21] erläutert, da dieser einen sehr ausführlichen und holistischen Regelkreis definiert. Der PHM-Regelkreis enthält die fünf wesentlichen Elemente System, Daten, Diagnose, Prognose sowie Optimierung und ist in Bild 2.10 dargestellt.

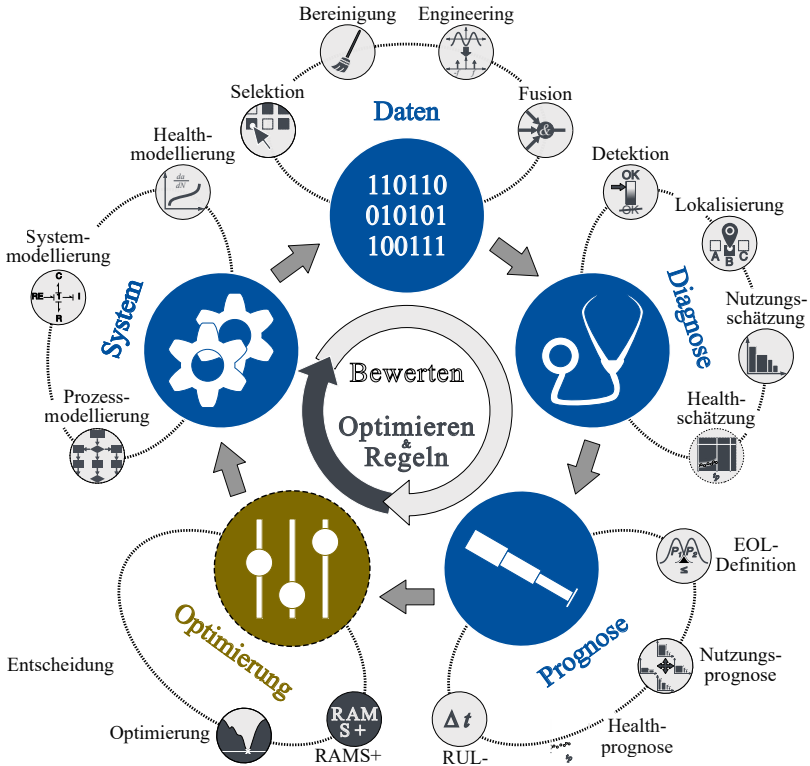


Bild 2.10 PHM-Regelkreis: Wesentliche Elemente der Modellierung. Fokus Prognostics in blau und Fokus Health Management in gold [Hen21]

Im ersten Schritt muss das **System** analysiert und eine entsprechende analytische oder numerische Modellierung für Prozess, System und den Health-Zustand gewählt werden. Im nächsten Schritt werden zum Beispiel mit unterschiedlichen Sensoren **Daten** erhoben, die dann aufbereitet werden. Hierzu zählt unter anderem die Selektion von relevanten Daten, die Bereinigung der Daten zur Sicherstellung einer geforderten Datenqualität, aber auch die Transformation, um Merkmale mit erhöhtem Informationsgehalt zu erzielen. Diese Daten können anschließend für eine **Diagnose** herangezogen und der aktuelle Zustand des Produkts ermittelt werden. In diesem Schritt wird beispielsweise über einen Ansatz des maschinellen Lernens wie der Anomaliedetektion ein Fehler erkannt und lokalisiert. Mit dieser Information wird eine Schätzung des Health-Zustands vorgenommen. Zudem wird in diesem Schritt auch der Verlauf des Health-Zustands, d.h. der Degradationsverlauf ermittelt. In der **Prognose** werden diese Informationen genutzt, um das Lebensdauerende des Systems

zu prognostizieren. Hierfür wird der Health-Zustand über den Degradationsverlauf bei angenommenen Belastungsszenarien auf das EOL-Kriterium extrapoliert und dadurch die nutzbare Restlebensdauer ermittelt. Da bei der Prognose der RUL viele Unsicherheiten enthalten sind, werden verschiedene Belastungsszenarien angenommen und so ein Vertrauensbereich der RUL ermittelt. Im letzten Schritt können die neu gewonnenen Informationen für eine **Optimierung** der Lebensdauer aber auch Sicherheit, Verfügbarkeit und Instandhaltbarkeit verwendet werden. Beispielsweise ist eine Lebensdauersteigerung durch eine Reduktion der Belastung möglich. Es kann aber auch die Wartung und Logistik optimiert werden, weshalb dieser Schritt auch als Health Management bezeichnet wird.

Für detailliertere Informationen zu den unterschiedlichen Modellierungsschritten wird auf weiterführende Literatur verwiesen. Das System und die Daten sind in Gouriveau et al. [GMZ16] beschrieben, bezüglich Diagnose wird auf Isermann [Ise97], Randall [Ran11] und Botzler [Bot18] verwiesen. Die Prognose wird ausführlich in Gouriveau et al. [GMZ16] und Kim et al. [KAC17] dargestellt und die Optimierung in Chebel-Morello et al. [CNV17], Johnson et al. [Joh+11] und Koller [Kol16].

In dem PHM-Kreis kommt der Prognose eine sehr wichtige Bedeutung zu, da hiervon die Genauigkeit des gesamten Ansatzes abhängt. Aus diesem Grund werden hier in aller Kürze die zwei Modellierungsansätze Physics-Based und Data-Driven für die Prognose erläutert, welche auch speziell für Getriebe Anwendung finden [ZTZ17]. Beim **Physics-Based** Ansatz, auch **Model-Based** genannt, wird die Fehlerinitiierung und -ausbreitung physikalisch beschrieben, wodurch der Vorgang im Bauteil sehr gut verstanden werden muss. Es resultiert ein Fehlerfortschrittsmodell für die entsprechende Versagensart, welches für die Prognose herangezogen werden kann. Da dieser Ansatz auf die physikalischen Gesetze zurückgreift, kann hiermit die höchste Prognose-Genauigkeit erreicht werden. Der **Data-Driven** Ansatz greift auf die große Menge an Sensordaten zurück und bewertet anhand dieser Daten den aktuellen Zustand des Getriebes. Wichtig bei der datengetriebenen Methode ist, dass sie lediglich auf den Daten basiert und kein Input aus dem physikalischen Verhalten oder einem mathematischen Degradationsmodell vorhanden ist. Aus den Daten muss daher ein Merkmal extrahiert werden, welches den Zustand des Systems abbildet und empfindlich gegenüber Veränderungen im Betrieb ist. Das Merkmal sollte zum Beispiel monoton mit zunehmender Beschädigung ansteigen und unanfällig gegenüber Rauschen und Änderungen in der Umgebungs- oder den Betriebsbedingungen sein. In der Getriebediagnose spielen vor allem Schwingungssignale eine wesentliche Rolle, wobei jedoch die Empfindlichkeit der Amplitude auf die Änderung des Fehlermerkmals geprüft werden muss. Vor allem bei nicht stationären Betriebsbedingungen sind hier Grenzen geboten. Für die Auswertung der Schwingungssignale sind daher Methoden aus der Signalverarbeitung und des maschinellen Lernen notwendig. Zusätzlich zu den Vibrationssignalen sind als Health Indikatoren akustische Signale, die Überwachung des Öls, Thermographie oder eine visuelle Inspektion

denkbar [EGA17]. Die Beschreibung der zwei Ansätze macht deutlich, dass es für die Prognose keinen universellen Ansatz gibt. Die Wahl eines Ansatzes hängt von unterschiedlichen Einschränkungen und Fragestellungen ab [GMZ16]:

- Welche Daten sind vorhanden und was kann gemessen werden?
- Sind technische Modelle vorhanden oder physikalisches Wissen über die Versagensphänomene?
- Wie dynamisch und komplex ist das reale System?
- Wie variabel sind die Betriebsbedingungen und oder das Missionprofil?
- Gibt es Einschränkungen in der Implementierung bezüglich Präzision, Rechenzeit etc.?

In der Praxis ist es jedoch auch möglich, einen **Hybridansatz** zu wählen und so die Vorteile aus beiden Modellierungsansätzen zu nutzen. Hierfür werden der Physics-Based und Data-Driven Ansatz kombiniert und beispielsweise das physikalische Degradationsmodell mit dem aktuellen Fehlerzustand aus den Sensordaten aktualisiert [ZTZ17].

Kapitel 3

Adaptive Betriebsstrategie zur Steigerung der RUL

In Kapitel 2 Grundlagen und Stand der Technik werden drei große Bereiche vorgestellt: Zuverlässigkeit, Zahnradschäden und Prognostics and Health Management. Zu allen drei Bereichen existieren umfangreiche Grundlagen- und Forschungsarbeiten. Die Zahnradschäden sind dabei sehr anwendungsbezogen, wohingegen die Methoden und Werkzeuge der Zuverlässigkeitstechnik und des PHM branchenübergreifend Anwendung finden. Durch die Kombination der Bereiche können Vorteile entstehen, welche durch diese Arbeit aufgezeigt werden. Dieser Forschungsbedarf wird in den folgenden Abschnitten näher betrachtet sowie eine Forschungsfrage mit Hypothesen formuliert. Als Resultat dieser Forschungsfrage wird im Anschluss eine adaptive Betriebsstrategie zur Steigerung der nutzbaren Restlebensdauer von Zahnrädern vorgestellt und kritisch diskutiert.

3.1 Forschungsfrage und Hypothesen

Die Zuverlässigkeit beschäftigt sich unter anderem mit dem Ausfallverhalten verschiedener Komponenten und Systeme sowie deren Lebensdauer, beispielsweise auch Zahnrädern. Die Lebensdauer von Zahnrädern kann gemäß aktuellem Stand der Technik zum Beispiel durch eine Änderung der Geometrie, der Bearbeitung oder des Materials gesteigert werden [DIN3990-1; ISO6336-1]. Das heißt es wird direkt der Auslegungsprozess angepasst [SSS11; Sch11; BBL11; Len+19]. Dies ist jedoch oft mit einer Erhöhung des Materialbedarfs und damit dem Gewicht sowie steigenden Kosten verbunden. Zudem handelt es sich vor allem bei dem wichtigen Zahnradschaden

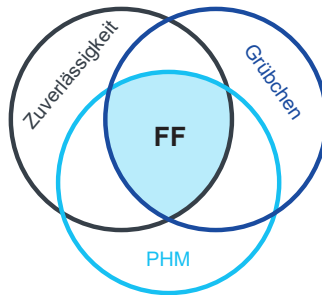


Bild 3.1 Grafische Darstellung der Themengebiete innerhalb der zentralen Forschungsfrage (FF)

Grübchen um einen „soft failure“, welcher sich langsam über der Zeit entwickelt. Bei einsatzgehärteten Zahnrädern tritt dieser Schaden auch nur an einem oder wenigen Zähnen auf [DIN3990-2]. Die anderen Zähne am Umfang sind häufig noch vollkommen intakt und besitzen somit eine höhere Belastbarkeit und damit Lebensdauer-Reserven. Innerhalb der Arbeit soll diese Streuung der Belastbarkeit ausgenutzt werden, um die Lebensdauer von Verzahnungen zu erhöhen. Allerdings zeigen sich diese Lebensdauer-Reserven sowie der schwächste Zahn erst im Betrieb. An dieser Stelle können Methoden aus dem Bereich PHM Anwendung finden, um über die Detektion und Diagnose eine Vorschädigung und damit den schwächsten Zahn zu erkennen. Darüber hinaus kann über das Element „Optimierung“, zum Beispiel über eine adaptive Strategie, in den Betrieb eingegriffen und die nutzbare Restlebensdauer über eine Belastungsvariation in einem gewissen Bereich geregelt werden.

Aus der Synergie der drei Themenstellungen Zuverlässigkeit, Grübchen und PHM, siehe Bild 3.1, stellt sich die folgende zentrale Forschungsfrage:

Wie lässt sich ein adaptiver Betrieb von Zahnrädern realisieren, um den schwächsten Zahn am Umfang des Zahnrades zu schonen und so die Lebensdauer von Getrieben zu steigern?

In dieser zentralen Forschungsfrage sind damit alle drei genannten Bereiche verknüpft. Der adaptive Betrieb ordnet sich in das Prognostics and Health Management ein und über die Lebensdauer von Getrieben wird der Schadensmechanismus Grübchen in Kombination mit der Zuverlässigkeit betrachtet. Zur Beantwortung der Forschungsfrage wird daher eine adaptive Betriebsstrategie entwickelt, welche eine Schonung am schwächsten Zahn vorsieht. Mit dieser Strategie kann anschließend das Potenzial der Lebensdauersteigerung betrachtet werden. Dies erfolgt auf theoretischer Basis über die Betrachtung der Streuung der Belastbarkeit der Einzelzähne

als auch über eine simulative Quantifizierung. Es lassen sich daraus drei Hypothesen ableiten:

1. Am vorgeschädigten Zahn kann durch eine adaptive Betriebsstrategie eine lokale Belastungsreduktion und damit eine Schonung vorgenommen werden.
2. Die Streuung der Belastbarkeit der Einzelzähne ist Treiber für die adaptive Betriebsstrategie.
3. Die Einflussfaktoren auf das Potenzial der adaptiven Betriebsstrategie lassen sich identifizieren und die Effekte sowie die RUL simulativ quantifizieren.

Entsprechend dieser Hypothesen wird in der vorliegenden Arbeit eine adaptive Betriebsstrategie für die Verlängerung der nutzbaren Restlebensdauer von Verzahnungen entwickelt und untersucht. Die Hypothese 1 bezieht sich dabei direkt auf die adaptive Betriebsstrategie selbst und wird in Kapitel 3.3 behandelt. Aus dem Stand der Technik resultiert, dass eine erhebliche Streuung in der Belastbarkeit der Einzelzähne vorhanden ist, welche als Basis für die adaptive Betriebsstrategie herangezogen werden kann. Allerdings wird diese Streuung aktuell nicht quantifiziert, weshalb sich die Hypothese 2 mit diesem Thema beschäftigt. In Kapitel 4 wird daher der Fokus auf die Auswertung von Grübchenversuchen gelegt. Die Verteilung der Einzelzähne einer Beispielverzahnung wird in Bezug auf den Ausfallmechanismus Grübchen untersucht. Mit dieser Verteilung kann im Anschluss die nutzbare Restlebensdauer mit und ohne adaptiver Betriebsstrategie prognostiziert werden und damit sowohl die Machbarkeit als auch die Einflussfaktoren auf das Potenzial der adaptiven Betriebsstrategie untersucht werden. Dies bezieht sich auf die Hypothese 3 und wird in Kapitel 5 behandelt. Hier wird eine Simulationsumgebung aufgebaut und vorgestellt. Damit kann in einem weiteren Schritt eine Parameterstudie zu den Einflussfaktoren auf das theoretische Potenzial der adaptiven Betriebsstrategie vorgenommen werden. Schlussendlich soll eine Aussage möglich sein, unter welcher Voraussetzung eine bestimmte Steigerung der RUL möglich ist. Dies bietet den Vorteil, dass die adaptive Betriebsstrategie nicht ausschließlich bei Neuentwicklungen angewendet werden kann. Es kann auch bei bestehenden Anlagen untersucht werden, welche Steigerung möglich ist. Dies wird über ein Anwendungsbeispiel in Kapitel 6 aufgezeigt.

3.2 Prognostics and Health Management bei Getrieben

Die Forschungshypothese eins bezieht sich auf den Bereich PHM und eine adaptive Betriebsstrategie zur Optimierung der Lebensdauer von Verzahnungen im Betrieb. Um eine solche adaptive Betriebsstrategie entwickeln zu können, wird im ersten

Schritt der Stand der Forschung untersucht und bewertet. Hierfür wird der Fokus auf PHM bei Getrieben gelegt und alle Bereiche aus dem Themengebiet betrachtet, also von der Detektion über die Diagnose und Prognose bis hin zur Optimierung, siehe Bild 2.10. Mit dieser Analyse wird der Forschungsbedarf konkretisiert und es findet eine Abgrenzung zu bereits bestehenden Konzepten statt.

Die **Detektion und Diagnose** von Getriebeschäden wird bereits seit Jahrzehnten untersucht [McF86]. Seither wird auf diesem Gebiet geforscht und die Güte der Diagnose verbessert und automatisiert [MJ18; Fro+16; Bar11; Dec11; LP02; Bad+01; Cho+96a; Cho+96b]. Aus diesem Grund liegen zahlreiche Algorithmen für die Auswertung der Sensordaten vor, wie die Wavelet-Analyse [Ten+16; WMK09] oder die Spektral Kurtosis Analyse [RB12] für die Auswertung von Vibrationsdaten sowie die Auswertung des Drehwegfehlers [Fro+19]. In Sharma [SP16] werden zudem unterschiedliche Health Indikatoren für die Getriebediagnose aufgeführt, klassiert und verglichen. Hierbei wird zwischen zeit-abhängigen, frequenz-abhängigen und zeitfrequenz-abhängigen Methoden unterschieden. Zudem werden vermehrt Methoden der Künstlichen Intelligenz (KI) für die Diagnose von Maschinenelementen eingesetzt und damit Anomalien detektiert [Wan+19; HB19; Ulm+20].

Bei der **Prognose** existieren einige Untersuchungen mit Anwendung am Fahrzeuggetriebe. Foulard et al. [Fou+15a] stellen beispielsweise ein Berechnungsmodell vor, welches auf Basis der anliegenden Drehzahl und des anliegenden Drehmoments eine lineare Schadensakkumulation vornimmt und so einen Rückschluss auf den aktuellen Zustand des Fahrzeuggetriebes zulässt. Mit dieser Berechnung ist auch eine Prognose in die Zukunft möglich. Vietze et al. [VHS20] kombinieren solch einen Berechnungsansatz mit Big Data und KI. Der Algorithmus wird hier innerhalb einer Cloud ausgeführt und lediglich das Ergebnis wieder zum Fahrzeug zurückgespielt. Durch diese Cloud-Lösung ist es möglich, eine gesamte Fahrzeugflotte in die Berechnung einzuschließen und so die Prognose zu verbessern. Beide Ansätze basieren jedoch rein auf dem Eingangsmoment und nicht auf einer direkten Messung der Schädigung. Damit besteht keine Abhängigkeit zu den zuvor genannten Detektions- und Diagnoseverfahren und es sind keine zusätzliche Sensoren notwendig. Allerdings kann hierbei die Streuung der Belastbarkeit nicht exakt berücksichtigt werden. Aus diesem Grund wird in Wang [Wan02] ein dynamisches Getriebemodell vorgestellt, welches mit gemessenen Vibrationsdaten eine Prognose der RUL bei Zahnbruch zulässt. Es wird ein direkter Zusammenhang zwischen der Änderung der Eingriffssteifigkeit und der Risslänge hergestellt und so die Prognose der RUL verbessert. Wang et al. [Wan+15] nutzen ebenfalls Vibrationsdaten für eine frühe Detektion von Getriebeschäden. Zusätzlich wird hier ein Ansatz vorgestellt, um über den Degradationspfad des Schadens eine Prognose der RUL vorzunehmen. Hierfür wird eine Monte Carlo Simulation verwendet, um die Schwankungen in der Belastung abzubilden und schlussendlich eine Verteilung der prognostizierten RUL anzugeben. Mit fortlaufender Betriebszeit wird der Degradationspfad aktualisiert und so die Pro-

gnose verbessert. Nachteil bei beiden Varianten ist allerdings, dass die Prognose erst ab der Rissinitiierung stattfinden kann. Zuvor sind keine Informationen vorhanden, wodurch in diesem frühen Bereich die Ansätze von Foulard und Vietze vorteilhafter sind.

Der Bereich **Optimierung** innerhalb des PHM-Kreises ist am wenigsten erforscht und kann mit unterschiedlichem Fokus angewendet werden. In Nejad et al. [NGM14] wird beispielsweise die Wartung optimiert, indem eine Schadensakkumulation der einzelnen Komponenten im Antriebsstrang einer Windenergieanlage berechnet wird. Das Wartungsteam kann somit direkt die schadhafte Komponente identifizieren, ohne eine genaue Untersuchung aller Komponenten vorzunehmen. Zudem können somit die Ersatzteile besser geplant werden. Einen gesamtgesellschaftlichen Überblick über die möglichen Wartungsstrategien bei einer prognostizierten RUL gibt Yan [Yan15]. Neben der Wartung kann bei der Optimierung im Bereich Fahrzeug und Antriebsstrang auch der Fokus auf der Lebensdauer von Systemen oder Komponenten liegen. Hier können mehrere Ziele bei der Optimierung unterschieden werden:

- Vermeidung von Folgeschäden, z. B. [GAM01; Tri16]
- Pareto-Optimierung, z. B. [Sto+13; Kol16]
- Reduktion von Überdimensionierung, z. B. [Fou+15a]
- gleichmäßige Verteilung des Schadens, z. B. [Uhl19]

In der Gruppe **Vermeidung von Folgeschäden** existieren unter anderem drei Offenlegungsschriften. Grob et al. [GAM01] beschreibt in einer dieser Schriften beispielsweise das Erkennen von Fehlerzuständen in einem Fahrzeug über zusätzliche Sensoren am Rad. Übersteigen die Wirkungsgradverluste im Antriebsstrang einen definierten Grenzwert, wird von einem Fehlerzustand ausgegangen und Maßnahmen wie die Reduktion des Antriebsmoments oder eine Limitierung der maximalen Geschwindigkeit vorgenommen. Eine direkte Lokalisierung des Schadens bzw. die Zuordnung des Schadens zu einer Komponente, wie beispielsweise Kupplung, Lager oder Getriebe, wird jedoch nicht vorgenommen. Die Schriften [Tri16] und [GBW15] dagegen stellen eine Vorgehensweise zur Auswertung vor, um die Schäden im Antriebsstrang zu lokalisieren. Die Vibrationsdaten werden mithilfe von Zeit-Frequenz-Analysen ausgewertet und der Schaden damit einem bestimmten Zahnrad oder Lager zugeordnet. Bei Überschreitung eines Grenzwertes wird ein Fehlersignal ausgelöst und das System außer Betrieb gesetzt, um Folgeschäden zu vermeiden. Zudem kann beim Erkennen eines kleinen Schadens ein Notbetrieb eingeleitet werden und das System beispielsweise verlangsamt weiter betrieben werden. Das endgültige Abschalten erfolgt dann schlagartig, sobald eine Zerstörung des Bauteils erkannt wird.

Bei der **Pareto-Optimierung** werden mehrere Größen betrachtet und ein gemeinsames Optimum gesucht. Sowohl bei Stohrer et al. [Sto+13] als auch bei Koller [Kol16] wird die Lebensdauer hinsichtlich der definierten Zuverlässigkeitsanforderung optimiert, wobei andere Größen mit berücksichtigt werden. Während des

Betriebs wird hierfür eine Online-Schadensakkumulation durchgeführt und so ein mögliches Unterschreiten des Lebensdauerziels erkannt. Stohrer [Sto+13] nutzt diese Information, um Zusatzfunktionen des Systems abzuschalten und damit die Schädigung in der Zukunft zu reduzieren. Durch eine so erzielte Lebensdauer-Reserve können die Grundfunktionen, welche sicherheitskritisch sind oder vom Gesetzgeber gefordert sind, während des gesamten Betriebs aufrecht erhalten und die Zuverlässigkeit des Systems sichergestellt werden. Das Abschalten der Zusatzfunktionen soll dabei nur so gering wie nötig stattfinden, um den Nutzer möglichst wenig in der Funktionalität einzuschränken. Als Anwendungsbeispiel wird ein Lenkgetriebe untersucht.

Bei Koller [Kol16] wird die Pareto-Optimierung hinsichtlich Lebensdauer und Emissionen vorgenommen. Die Lebensdauer eines hybriden Antriebsstranges soll dabei möglichst nahe am Auslegungspunkt liegen und die Emissionen des Fahrzeugs reduziert werden. Fokus ist somit das Auslegungsziel des Antriebsstrangs, welches über eine Online-Schadensakkumulation sowie ein Health-Monitoring überwacht wird. Übersteigt die prognostizierte Lebensdauer die Anforderung, greift eine Optimierungsstrategie, welche die Emissionen über das Rekuperieren möglichst weit reduziert. Dies ist möglich, da die Schadenssumme exponentiell über die rekuperierte Leistung zunimmt. Wird ein Nichterreichen der Lebensdauer erkannt, erfolgt eine Wartung. Innerhalb der Strategie wird damit ein Optimum hinsichtlich Lebensdauer und Emissionen erreicht. Zudem wird die Optimierung in Form von geringerem Kraftstoffverbrauch direkt an den Nutzer weitergegeben.

Eine **Reduktion der Überdimensionierung** von Fahrzeuggetrieben wird von Foulard in [Fou+15a; Fou+15b; FRF16] vorgestellt. Fokus der Veröffentlichungen ist eine Simulationsumgebung für eine online Schädigungsrechnung von Handschalt- sowie Doppelkupplungsgetrieben. Hierfür wird der Fahrer, der Fahrzyklus und der Antriebsstrang von Motor bis zu den Reifen berücksichtigt und damit die Schädigungsrechnung vorgenommen. Die Informationen über die tatsächliche Schädigung der Getriebekomponenten kann zur Minimierung der Überdimensionierung verwendet werden, da die meisten Nutzer die Lebensdauer des Getriebes nicht ausnutzen. Es ist daher möglich, das Getriebe entweder für mehr Moment zuzulassen oder direkt eine kleinere Auslegung bezogen auf den Durchschnittsnutzer vorzunehmen und dadurch Gewicht, Kosten und CO₂ einzusparen. Um bei solch einer Auslegung keine Ausfälle bei den Extremnutzern hervorzurufen, kann zum einen ein Warnhinweis für eine Wartung ausgegeben werden. Zum anderen kann das Motormoment reduziert und im Falle von Automatikgetrieben die Schaltstrategie angepasst werden.

In Uhlending [Uhl19] wird ein Ansatz zur **gleichmäßigen Schädigung** innerhalb eines Windparks mit mehreren Windenergieanlagen (WEA) aufgezeigt. Hierfür wird ein hochauflösender Drehmomentsensor im Antriebsstrang jeder WEA implementiert, welcher die realen Betriebslasten aufzeichnet. Zusätzlich wird ein sogenannter Digitaler Zwilling des Antriebsstrangs aufgebaut, welcher zur Berechnung

Tabelle 3.1 Abgrenzung zum Stand der Forschung. ○: trifft nicht zu/wird nicht betrachtet, ●: trifft zu/wird betrachtet, D: Detektion, S: Online-Schadensakkumulation

Merkmal	[GAM01]	[Tri16]	[GBW15]	[Sto+13]	[Kol16]	[Fou+15a]	[Uh19]	Gretzinger
konstante Leistung	○	○	○	●	●	○	●	●
gleiche Funktionalität	○	○	○	○	●	○	●	●
gleicher Komfort	○	○	○	○	●	○	●	●
Prognosekonzept	D	D	D	S	S + D	S	S	D
Lokalisierung des Schadens	○	●	●	○	●	○	○	●
Streuung der Belastbarkeit	●	●	●	○	●	○	○	●
Streuung innerhalb Komponente	○	○	○	○	○	○	○	●

der individuellen RUL herangezogen wird. Es findet damit eine Online-Schadensakkumulation statt. Mithilfe der berechneten RUL kann eine Optimierung innerhalb des Windparks stattfinden, um eine gleichmäßige Schädigung aller WEA zu erreichen. Ist die berechnete RUL sehr hoch, findet ein Uprating über den Anströmwinkel der Rotorblätter statt. Dadurch wird die Stromausbeute erhöht und gleichzeitig der Antriebsstrang höher belastet. Bei WEA mit geringer RUL wird dagegen ein Downrating vorgenommen, um den Antriebsstrang zu schonen. Hier ist dann allerdings auch die Stromausbeute reduziert. Ziel der Optimierung ist ein gleichzeitiger Ausfall aller WEA im Windpark bei einer Erhöhung des Energieertrags sowie einer Reduktion der Betriebskosten.

Alle vorgestellten Optimierungsmaßnahmen zeigen teilweise erhebliche Nachteile auf. Diese sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst. Die drei Offenlegungsschriften [GAM01; Tri16; GBW15] weisen erhebliche Verluste in der Leistung auf und damit auch in der Funktionalität sowie im Komfort, da nach dem Detektieren eines Schadens lediglich ein Notbetrieb möglich ist. Ein Verlust an Leistung, Funktionalität und Komfort tritt auch bei Foulard [Fou+15a] auf, bei dem das Eingangsmoment reduziert wird und auch die Schaltstrategie angepasst wird. Bei Stohrer [Sto+13] ist die volle Leistung verfügbar, jedoch werden die Funktionalität und der Komfort eingeschränkt, was durch das Abschalten von Zusatzfunktionen realisiert wird. Bei der Betrachtung des Prognosekonzepts wird zwischen einer Detektion von Schäden und einer Online-Schadensakkumulation unterschieden. Wird ein Schaden di-

rekt detektiert und lokalisiert, wird die Streuung der Belastbarkeit der individuellen Komponente berücksichtigt. Eine Prognose der RUL ist jedoch erst ab der Schadensinitiierung möglich, da zuvor keine Informationen vorliegen. Bei der Online-Schadensakkumulation dagegen ist eine Prognose bereits ab der Inbetriebnahme der Komponente möglich. Allerdings kann hier die individuelle Streuung nicht direkt berücksichtigt werden. Eine Kombination beider Varianten wie in Koller [Kol16] ist daher von großem Vorteil.

3.3 Entwicklung einer adaptiven Betriebsstrategie

Aus dem Stand der Forschung existieren bereits einige Ansätze zur Optimierung von Getrieben und Antriebssträngen während des Betriebes. Diese basieren teilweise jedoch auf einem erheblichen Verlust der Leistung im System. Die ursprüngliche Funktionsweise kann daher nicht in vollem Umfang genutzt werden und es entstehen große Verluste hinsichtlich Funktionalität, Kosten und Komfort für den Betreiber des Systems. Zudem ist allen vorgestellten Optimierungen gemein, dass lediglich die Komponenten-Ebene betrachtet wird. Eine Optimierung innerhalb der Streuung einer Komponente und damit eine Ressourcenschonung und Erhöhung der Nachhaltigkeit wird nicht betrachtet, siehe Tabelle 3.1. Eine solche Betrachtung konnte lediglich im Bereich Batterie gefunden werden. Hier werden einzelne Zellen unterschiedlich betrieben, um die Gesamtlebensdauer der Batterie zu optimieren. Dies erfolgt mithilfe des Batteriemanagementsystems (BMS) über das sogenannte Cell Balancing [Rah+13; ML19].

In diesem Abschnitt soll daher eine adaptive Betriebsstrategie (im Folgenden aBS genannt) entwickelt werden, welche die Streuung innerhalb einer Komponente berücksichtigt. Dies soll über eine lokale Belastungsreduktion lediglich am schwächsten Zahn eines Zahnrades erreicht werden, wodurch die Degradationsgeschwindigkeit reduziert und die Lebensdauer gesteigert werden kann. Fokus ist also die Forschungshypothese 1. Zusätzlich sollen mit der aBS die genannten Nachteile aus dem Stand der Forschung behoben werden. Dementsprechend soll eine konstante Leistung im System vorhanden sein sowie die Funktionalität und der Komfort nicht eingeschränkt werden. Zudem soll der Schaden direkt lokalisiert werden, um die Streuung der Belastbarkeit aller Komponenten, aber auch innerhalb einer Komponente berücksichtigen zu können, vgl. Tabelle 3.1. Zusätzlich zur Entwicklung der aBS soll diese ganzheitlich betrachtet und mögliche Herausforderungen aufgezeigt werden. Damit soll zum einen die weiterführende Untersuchung der aBS legitimiert und zum anderen auf zusätzliches Forschungspotenzial hingewiesen werden.

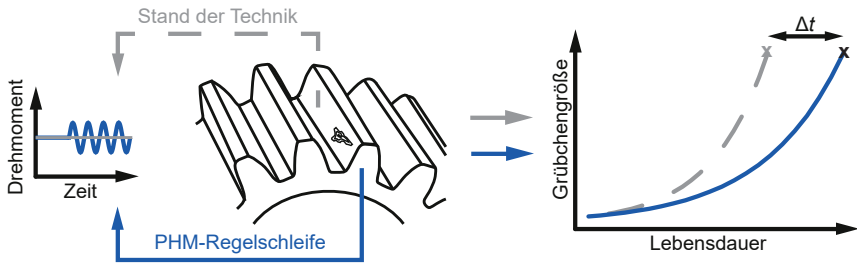


Bild 3.2 Schematische Darstellung der adaptiven Betriebsstrategie (unten) im Vergleich zum Stand der Technik (oben)

3.3.1 Die adaptive Betriebsstrategie

Der zeitliche Verlauf des Drehmoments am Getriebeeingang wird in der Praxis je nach Anwendungsfall und Einsatz durch ein bestimmtes Lastkollektiv abgebildet. Wird jedoch lediglich ein kleines Zeitintervall dt innerhalb des Lastkollektivs betrachtet, welches einer Umdrehung des Zahnrades entspricht, liegt quasi ein konstantes Moment an. Mit diesem Lastkollektiv wird das Getriebe bis zum Systemausfall betrieben. Das bedeutet im Falle von Grübchen bei einsatzgehärteten Zahnradern, dass am schwächsten Zahn ein Grübchen entsteht. Dieses wächst bis zum EOL-Kriterium von 4 % Grübchenfläche bezogen auf die aktive Zahnflanke. Durch die entstehenden Vibrationen wird ein fortschreitendes Grübchen beispielsweise durch Beschleunigungssensoren vor dem EOL zwar erkannt, jedoch wird das Potenzial der intakten Zähne bisher nicht genutzt. Das Getriebe wird ohne Änderungen bis zum EOL weiterbetrieben, was in Bild 3.2 oben unter Stand der Technik dargestellt ist. Zur Steigerung der Lebensdauer im Stand der Technik kann eine Momentenreduktion am gesamten Umfang vorgenommen, wodurch eine Leistungsreduktion am Getriebe resultiert.

Im Gegensatz dazu wird in der entwickelten aBS die Information über das fortschreitende Grübchen genutzt und an die Regelung des Antriebsmoments zurückgespielt. Dieser Fall ist in Bild 3.2 unten abgebildet. Im Rahmen eines PHM-Verfahrens wird eine lokale Belastungsreduktion direkt an der vorgeschädigten Stelle eingeleitet. Hierfür wird eine angepasste periodische Drehmomentvariation am Antrieb erzeugt, welche dahingehend beeinflusst wird, dass das Minimum im Eingriff des schwächsten Zahnes liegt. Durch diese Reduktion der Belastung wird das Wachstum des Grübchens verlangsamt, wodurch eine Steigerung der nutzbaren Restlebensdauer erreicht wird. Gleichzeitig erfolgt eine Erhöhung des Moments an den anderen intakten Zähnen am Umfang des Zahnrades, um eine konstante Leistung im System zu erhalten.

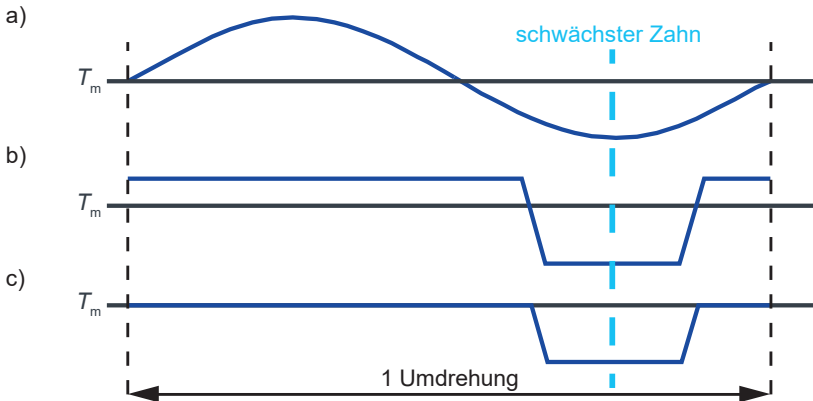


Bild 3.3 mögliche Eingangssignale für die adaptive Betriebsstrategie; a) Sinusfunktion, b) Sprungfunktion mit gleichbleibender Leistung, c) Sprungfunktion mit reduzierter Leistung; T_m : mittleres Moment ohne aBS

Für die aBS sind mehrere Eingangssignale möglich. In Bild 3.3 sind beispielhaft drei Varianten dargestellt. Eine konstante mittlere Leistung über dem Umfang des Zahnrades wird mit der Sinusfunktion automatisch erreicht, wenn das mittlere Moment T_m nicht verändert wird. Bei der Sprungfunktion gibt es zwei Möglichkeiten, siehe Bild 3.3b und c. Zum einen kann eine gleichbleibende Leistung am Umfang erreicht werden, wenn die Belastung an den intakten Zähnen erhöht wird. Der Betrag der Erhöhung richtet sich nach der Breite und Tiefe der Sprungfunktion sowie der Zahnzahl. Zum anderen kann die Sprungfunktion auch ohne Erhöhung an den intakten Zähnen durchgeführt werden, wenn zum Beispiel das maximale Moment anliegt. Hier ist dann eine Reduktion der Leistung vorhanden, welche jedoch deutlich geringer ausfällt als im Stand der Forschung. Der Nachteil Leistungs-, Funktionsverlust kann damit behoben werden.

Gemeinsam haben alle Eingangssignale, dass die Frequenz an die Drehzahl des Zahnrades angepasst wird. Eine Umdrehung des Zahnrades entspricht somit exakt einer Periode der Drehmomentvariation. Die Phasenverschiebung wird so geregelt, dass das Minimum immer am vorgeschädigten Zahn anliegt und dieser dadurch lokal entlastet wird. Die Amplitude der Variation ist frei wählbar und beeinflusst direkt die Steigerung der nutzbaren Restlebensdauer der Einzelzähne.

Die Strategie beruht auf dem Grundsatz, dass die Belastbarkeit der einzelnen Zähne in einem gewissen Bereich streut. Aufgrund der Streuung der Materialeigenschaften und der Fertigung können die stärkeren Zähne die Reduktion am schwächsten Zahn ausgleichen. Der schwächste Zahn am Umfang fällt mit 4 % Grübchenfläche aus und die anderen Zähne sind bezogen auf dieses EOL-Kriterium noch intakt.

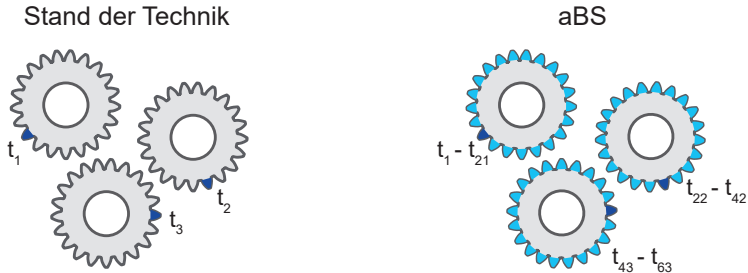


Bild 3.4 Schematische Darstellung der betrachteten Steuerung im Stand der Technik und bei der adaptiven Betriebsstrategie

Intakt bedeutet in diesem Falle, dass die Zähne entweder kein Grübchen aufweisen oder, dass bereits ein kleines Grübchen entstanden ist und der Zahn somit als vorgeschädigt gilt. Diese Zähne können somit höher belastet werden, ohne dass der Systemausfall verfrüht stattfindet, wodurch der Ansatz der adaptiven Lastverschiebung möglich wird. Zudem ist durch diese Lastverschiebung eine gleichmäßigere Schädigung aller Zähne möglich.

Innerhalb der aBS wird also die Steuerung innerhalb einer Komponente berücksichtigt und nicht nur die Steuerung zwischen den einzelnen individuellen Komponenten. Dies ist in Bild 3.4 schematisch dargestellt. Im Stand der Technik ergeben drei Zahnräder drei Ausfallzeiten t_i , da lediglich der schwächste Zahn betrachtet wird. Die Steuerung wird entsprechend zwischen den Komponenten berechnet. Bei der aBS wird jeder Zahn betrachtet und damit auch die Steuerung innerhalb des Zahnrades. Im Beispiel aus Bild 3.4 liegen somit je Zahnrad 21 Ausfallzeiten vor, wodurch sich aus den drei Zahnrädern insgesamt 63 Ausfallzeiten ergeben.

Das übergeordnete Ziel dieser aBS ist, die nutzbare Restlebensdauer von Verzahnungen zu steigern ohne dabei eine Leistungseinbuße im Gesamttriebstrang zu erhalten. Durch die lokale Belastungsreduktion an den vorgeschädigten Zähnen soll eine gleichmäßigere Verteilung der Schädigung am Umfang des Zahnrades erreicht werden, woraus eine Steigerung der RUL resultiert. Mit der Annahme, dass die Lebensdauer der Verzahnung bereits ohne aBS ausreichend dimensioniert ist, sind auch andere Szenarien denkbar. Beispielsweise könnte in diesem Fall auch die Zahnbreite reduziert oder eine geringere Fertigungstoleranz angestrebt werden. Damit ist als Vorteil der Strategie eine Materialeinsparung und damit eine Erhöhung der Nachhaltigkeit oder die Senkung von Fertigungskosten möglich. Der Fokus innerhalb dieser Arbeit liegt auf der Steigerung der nutzbaren Restlebensdauer und das damit verbundene Potenzial der aBS. Die Alternativen können daraus abgeleitet werden.

3.3.2 Herausforderungen der adaptiven Betriebsstrategie

Bei der im vorherigen Abschnitt beschriebenen aBS wird bewusst ein allgemeingültiger Ansatz gewählt, um unabhängig von Branche und Anwendung zu sein. Für die Überführung dieser theoretischen Herangehensweise in die Praxisanwendung müssen noch einige Herausforderungen überwunden werden. Dazu gehören:

- Messtechnik und die Synchronisation mit der Regelungstechnik
- Anwendung mit Möglichkeit zur Momentenregulierung
- Systemdynamik mit Berücksichtigung von Resonanzen und dynamischen Lasten der Arbeitsmaschine und des gesamten Antriebsstrangs

Die **Messtechnik** spielt für die aBS eine entscheidende Rolle. Nur wenn der vorgeschädigte Zahn erkannt und genau lokalisiert wird, kann die lokale Belastungsreduktion zielgerichtet vorgenommen werden. Vorteil bei der aBS mit Sinusfunktion ist hierbei, dass 180° des Zahnrades entlastet und die andere Hälfte mehr belastet wird. Dadurch muss der schwächste Zahn nicht exakt lokalisiert werden. Auch bei den Pulsfunktionen kann die Breite des Sprungs an die Genauigkeit der Messung angepasst werden. Ist es lediglich möglich, einen Bereich zu lokalisieren, wird der Puls dementsprechend breiter ausgeführt und somit der gesamte Bereich entlastet. Die restlichen Zähne müssen dadurch allerdings mehr ausgleichen und werden stärker belastet. Ein weiterer Punkt, der von der Messtechnik abhängt, ist der Start der aBS. Hier ist die Frage relevant, ab welcher Größe das Grübchen eindeutig identifiziert und am Umfang lokalisiert werden kann. Dieser Startzeitpunkt beeinflusst das Potenzial der aBS. Je früher in den Betrieb eingegriffen werden kann, desto höher ist die mögliche Steigerung der nutzbaren Restlebensdauer bezogen auf den schwächsten Zahn.

Die allgemeine Detektion von Zahnschäden wurde bereits in Abschnitt 3.2 diskutiert. Für die entwickelte aBS ist allerdings eine Lokalisierung des Schadens am Umfang des Zahnrades notwendig. Nguyen [Ngu02] stellt hierfür die Drehwinkel-Ordnungsanalyse vor. Mit dieser Methode ist es mit rein simulativen Signalen möglich, einen Schaden am Umfang des Zahnrades zu identifizieren. Das Vibrationssignal wird einer Zeit-Frequenz-Analyse unterzogen und anschließend eine rotorsynchrone Mittelung vorgenommen. Dargestellt über Polarkoordinaten kann ein Schaden direkt einem Winkel am Zahnrad zugeordnet werden.

Für die Lokalisierung von Grübchen im Versuch existieren einige Veröffentlichungen von Fromberger et al. [Fro+16; Fro+17; Fro+19]. Für das Condition Monitoring von Grübchen wird dabei ein Prüfstand mit Beschleunigungssensoren am Getriebegehäuse sowie Inkrementalgebern am Getriebeein- und -ausgang versehen. Dadurch ist eine Messung der Drehwegabweichung unter Last möglich. Sowohl der Drehwinkel als auch die Gehäuseschwingungen werden während des Testlaufs synchron aufgezeichnet. Das Signal des Beschleunigungsaufnehmers kann dann über den Drehwinkel in ein diskontinuierliches Subsignal je Zahneingriff aufgeteilt werden. Über der Testzeit kann somit die relative Signalleistung je Zahn aufgetragen

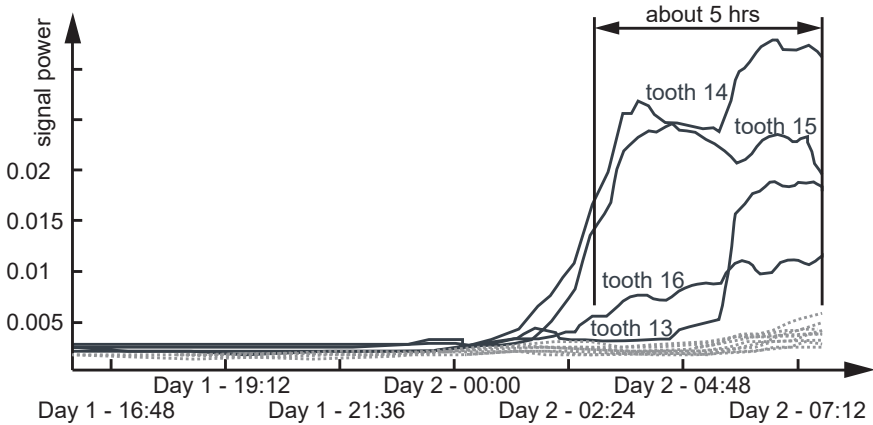


Bild 3.5 relative Signalleistung je Zahn über der Versuchszeit, nach [Fro+16]

werden, siehe Bild 3.5. Die gesteigerte Signalleistung an den Zähnen 13 bis 16 ist deutlich ab Day 2 zu erkennen. Die Kurven steigen steil an und heben sich dadurch gut vom Grundrauschen ab. Eine Validierung nach Versuchsende zeigte sehr große Schäden an Zahn 14. Hier ist der Grübchenschaden über die gesamte Zahnbreite fortgeschritten. Die Zähne 13 und 16 zeigen ebenfalls größere Grübchen, die sich ca. über die halbe Zahnbreite erstrecken. Zahn 15 weist dagegen kein Schaden auf. Als Gründe für die dennoch hohe Signalleistung wird einerseits die Überdeckung der Verzahnung und andererseits der Abgleich zwischen Winkel und Zahn genannt. Durch die Überdeckung beim Zahneingriff sind zeitweise zwei Zähne gleichzeitig im Eingriff, wodurch die erzeugte Schwingung nicht eindeutig zwischen den benachbarten Zähnen getrennt werden kann. Zudem wurde zu Beginn des Versuchs kein exakter Abgleich zwischen Winkel und Zahnposition vorgenommen, da die tatsächliche Zahn-Nummer des beschädigten Zahnes von untergeordneter Rolle war.

Vorteil des Ansatzes nach Fromberger et al. ist die Unabhängigkeit von einem initialen Zustand und damit eine geringe Parametrisierung. Zudem konnte der Ansatz sowohl mit einer high-end als auch mit einer kostengünstigen Sensorvariante im Versuch bestätigt werden. Nachteilig ist jedoch der Einsatz von geradverzahnten Zahnrädern mit großem Modul bei den vorliegenden Versuchen. Durch Schrägverzahnungen und einen kleineren Modul wird das Aufsplitten des Beschleunigungssignals schwieriger. Zudem wurden lediglich sehr große Grübchen detektiert. Der Schaden war dementsprechend bereits weit fortgeschritten. Eine Möglichkeit zur früheren Detektion von Zahnschäden wird zum Beispiel in [SB01] vorgestellt. In einer WEA ist hierfür ein Sensor am Rotorblatt besser geeignet als direkt am Getriebe.

Eine frühzeitige Schadenserkennung an Verzahnungen wird auch von Scheer et

al. [SRB07] vorgestellt. Hier wird im Gegensatz zu dem Ansatz von Fromberger et al. das Schallemissionssignal (engl. Acoustic Emission (AE)) analysiert. Dieses ist sensitiv gegenüber hohen Frequenzen bis in den Ultraschallbereich. Damit lassen sich bereits Gefügeänderungen, wie beispielsweise Rissinitiierung und -fortschritt, detektieren. Der Schaden muss daher nicht so groß sein, dass das Schwingungsverhalten des Systems beeinflusst wird. Ausgewertet werden die sehr kurzzeitigen Impulse über eine Wavelet-Analyse. Für einen Grübchenschaden ergibt sich ein breitbandiges Signal bis ca. 400 kHz, wobei hier der Grübchenschaden an mehreren Zähnen vorlag. Nachteil dieser Detektionsmöglichkeit ist allerdings eine limitierte Drehzahl. Bei Drehzahlen über 1500 min^{-1} steigt der Grundpegel aufgrund dynamischer Einflüsse aus Verzahnung und Lager, wodurch die Schallemission des Schadens überdeckt wird. Es besteht daher weiterer Forschungsbedarf im Bereich Detektion und Lokalisierung von Grübchen am Umfang von Zahnrädern.

Ist ein Schaden am Umfang lokalisiert, muss eine synchrone Regelung des Moments vorgenommen werden. Hier besteht ebenfalls Forschungsbedarf. Am Prüfstand ist es bereits möglich, Drehmomentschwingungen auf Getriebe aufzubringen [Wac13]. Bezüglich des Abgleichs zwischen Messung und Regelung konnten zum aktuellen Zeitpunkt keine Untersuchungen gefunden werden. Ebenso ist die Messung des Drehmoments für die Regelung essentiell. In der Regelstrecke muss ein Abgleich des Drehmomentminimums mit dem Eingriff des vorgeschädigten Zahnes stattfinden. Die Trägheiten des Antriebsstrangs und der Regelstrecke müssen dabei so gering sein, dass die gewünschte Drehmomentvariation technisch möglich ist.

Für eine **Anwendung** der aBS in der Praxis muss eine Momentenregulierung im Betrieb möglich sein. Die Machbarkeit bezieht sich hierbei sowohl auf die Ansteuerung als auch auf den Abtrieb. Für die Ansteuerung von Elektromotoren ist es beispielsweise nicht ausreichend, diese direkt am Netz zu betreiben. Eine Regulierung des Moments ist lediglich über einen Wechselrichter möglich. Zudem muss am Abtrieb eine Drehmomentvariation zugelassen werden können. Ist bei einer Anwendung ein konstantes Drehmoment und eine konstante Drehzahl essentiell für die Funktionalität, kann die vorgestellte aBS nicht angewendet werden. Zudem muss in diesem Zusammenhang das Noise, Vibration, Harshness (NVH)-Verhalten berücksichtigt werden, welches durch die aufgeprägte Schwingung ein vorgegebenes Limit nicht übersteigen darf.

Eine mögliche Anwendung, bei welcher eine Momentenregelung zur Reduzierung von dynamischen Lasten und Lastspitzen ständig vorgenommen wird, sind Windenergieanlagen [Hei05; Mic08]. In Schwarz und Schulz [SS19] wird hierzu ein nichtlineares modelbasiertes prädiktives Regelverfahren vorgestellt, welches das Generatormoment variiert. Optimiert wird die Regelgröße dahingehend, dass möglichst viel Energieausbeute erzielt werden kann bei gleichzeitiger Limitierung der Schädigung. Wird der Fokus lediglich auf die Energieausbeute gelegt, steigen die dynamischen Lasten und damit die Schädigung unverhältnismäßig an.

Die letzte genannte Herausforderung der aBS ist die **Systemdynamik**. Wichtig ist hier ein Betrieb der Arbeitsmaschine und des Antriebsstranges außerhalb von Resonanzen, um ein Aufschwingen und daraus folgende Zerstörung zu verhindern. Ein potentieller Antriebsstrang für die aBS muss daher im Vorfeld umfangreich analysiert und die möglichen Eingangssignale auf die Systemdynamik abgestimmt werden. Zudem muss berücksichtigt werden, dass durch die aBS auch die Belastung weiterer Komponenten im Antriebsstrang, wie Lager und Wellen, variiert werden. Diese Bauteile dürfen durch die zusätzlichen dynamischen Lasten nicht frühzeitig ausfallen. Für schnelldrehende Getriebe muss weiterhin betrachtet werden, dass der Betrieb auch oberhalb der ersten Resonanz stattfinden kann [DIN3990-21]. Hier ist das Aufprägen einer gezielten Schwingung deutlich schwieriger, da sich die Schwingung am Zahnrad und am Antriebsmotor unterscheiden.

Untersuchungen bezüglich der Lebensdauer von Verzahnungen unter Berücksichtigung von Drehungleichförmigkeiten wurden von Wacker [Wac13] durchgeführt. Fokus war dabei die Abbildung von Drehschwingungen eines Verbrennungsmotors auf dem Prüfstand und der Schadensmechanismus Zahnbruch. Ergebnis der Untersuchungen ist eine erheblich kürzere Lebensdauer unter schwingender Belastung im Vergleich zu einem konstanten Drehmoment. Die Verkürzung der Lebensdauer ist dabei von der Amplitude abhängig und steigt mit zunehmender Schwingung. Jedoch ist die Schwingung hier rein vom simulierten Verbrennungsmotor abhängig und nicht auf die Vorschädigung abgestimmt. Aus diesem Grund liegt das Minimum respektive Maximum der Schwingung nicht immer am selben Zahn an sondern variiert. Dadurch wird der vorgeschädigte Zahn mit initiiertem Riss am Zahnfuß teilweise mit höherem Moment belastet, wodurch die Rissgeschwindigkeit steigt und die Verkürzung der Lebensdauer zustande kommt. Bezogen auf die aBS wird hieraus deutlich, dass der exakten Regelung der Momentenvariation eine hohe Bedeutung zukommt.

Bezüglich der Systemdynamik wurde ein einfaches Dynamik-Modell der aBS in Matlab/Simulink aufgebaut [GNB19]. Dieses besteht aus einem einstufigen Getriebe mit Elektromotor am Ein- und Ausgang. Um die Drehmomentvariation am An- und Abtrieb untersuchen zu können, wurden die unterschiedlichen Eingangssignale im Modell abgebildet und der Abtrieb über einen PID-Regler auf eine Drehzahl geregelt. Analysiert wurden die Drehzahl und das Drehmoment am An- und Abtrieb des Getriebes sowie daraus abgeleitet die Leistung. Für alle Eingangssignale zeigt sich die Variation sowohl in Drehmoment als auch in der Drehzahl. Aus diesem Grund weist auch das Signal der Leistung eine Variation auf. Mit angewendeter aBS zeigt sich eine um 0,14 % reduzierte mittlere Leistung bei einer Sinusfunktion mit Amplitude von 10 Nm bei mittlerem Drehmoment von 200 Nm. Damit kann von einer gleichbleibenden Leistung mit und ohne aBS ausgegangen werden, sofern die restlichen Zähne am Umfang die Belastungsreduktion am schwächsten Zahn kompensieren.

3.4 Zwischenfazit zur adaptiven Betriebsstrategie

Der Bereich PHM ist ein stark wachsendes Forschungsfeld, was die Anzahl an Publikationen der letzten Jahre zeigt [ML19]. Hierbei werden alle relevanten Fragestellungen von der Detektion und Diagnose, der Prognose und der Optimierung adressiert. In diesen Kontext gliedert sich auch die vorgestellte aBS ein, welche zudem die Fachbereiche Zuverlässigkeit und Getriebe verknüpft.

Fokus der aBS liegt in der Optimierung der Belastung während des Betriebs. Hierzu existieren bereits einige Ansätze aus dem Stand der Forschung, welche jedoch meistens die Leistung im Antriebsstrang und damit die Funktionalität und den Komfort reduzieren. Zudem wird die Streuung der Belastbarkeit innerhalb einer Komponente nicht berücksichtigt. Innerhalb der vorliegenden Arbeit werden diese Nachteile beseitigt, indem eine optimierte aBS entwickelt wird. Ausschlaggebend ist der schwächste Zahn am Umfang des Zahnrades. Dieser wird lokalisiert und eine Belastungsreduktion bei jeder Umdrehung vorgenommen. Dadurch reduziert sich die Degradationsgeschwindigkeit des Grübchens und es kann eine Lebensdauersteigerung erreicht werden. Wichtig ist hierbei, dass die Belastungsreduktion lediglich lokal vorgenommen wird und die anderen intakten Zähne am Umfang des Zahnrades die Reduktion kompensieren. Diese Kompensation eliminiert den Nachteil der Strategien aus dem Stand der Forschung, da die mittlere Leistung gleich bleibt. Damit wurde eine adaptive Betriebsstrategie zur lokalen Belastungsreduktion am schwächsten Zahn entwickelt. Dies ist gleichbedeutend mit einer Schonung des schwächsten Zahnes. Die erste Forschungshypothese zur adaptiven Betriebsstrategie zur Schonung des schwächsten Zahnes kann damit bestätigt werden.

Als Herausforderung der aBS ist die Messtechnik zu sehen, welche in der Lage sein muss, Grübchen zu detektieren und auch am Umfang zu lokalisieren. Dies muss zudem in einem frühen Stadium der Schädigung erzielt werden. Weiterhin besteht Forschungsbedarf hinsichtlich der Synchronisation von Mess- und Regeltechnik sowie der Systemdynamik im Antriebsstrang, was nicht Teil der vorliegenden Arbeit darstellt. Bevor diese Herausforderungen näher untersucht werden, wird in den nachfolgenden Kapitel das Potenzial der aBS theoretisch analysiert.

Im folgenden Kapitel 4 wird daher die Auswertung von Grübchenversuchen näher untersucht und bezogen auf den Stand der Technik erweitert. Der Ausfallmechanismus Grübchen wird nicht auf den schwächsten Zahn begrenzt, sondern es werden alle Zähne am Umfang analysiert. Hierfür wird eine Beispielverzahnung inkl. Versuchsdaten zu Degradationspfaden von Grübchen herangezogen, um die Verteilung der Einzelzähne zu untersuchen. Es wird die zweite Forschungshypothese adressiert: „Die Streuung der Belastbarkeit der Einzelzähne ist Treiber für die adaptive Betriebsstrategie.“

Kapitel 4

Erweiterte Auswertung von Grübchenversuchen

Die im vorherigen Kapitel 3 entwickelte adaptive Betriebsstrategie basiert auf der Streuung der Belastbarkeit einzelner Zähne. Aus diesem Grund ist eine genaue Kenntnis dieser Belastbarkeitsstreuung von wesentlicher Bedeutung. Nur wenn die Belastbarkeit über den gesamten Umfang des Zahnrades erfasst werden kann, ist eine präzise Untersuchung der möglichen Steigerung der nutzbaren Restlebensdauer möglich. Die klassische Auswertung von Zahnflankenuntersuchungen muss infolgedessen erweitert werden. Es müssen alle Zähne in die Auswertung einbezogen werden anstatt den Fokus ausschließlich auf den Ausfall des Systems Zahnrad und damit lediglich auf den schwächsten Zahn zu legen, wie beispielsweise in Beslic [Bes20] und Stahl [Sta+99]. Innerhalb dieser Arbeit wird daher ein Zahnrad als System definiert und die einzelnen Zähne als Komponenten. Die einzelnen Komponenten müssen hierbei alle intakt sein, um die Funktion zu erfüllen.

Die erweiterte Auswertung von Zahnflankenversuchen wird im Folgenden aufgezeigt. Es werden im ersten Teil der Prüfstand mit Prüfling und Prüfumgebung vorgestellt. Im zweiten Teil wird die Auswertung auf alle Grübchen am Umfang erweitert. Für die Ableitung einer Ausfallverteilung in Teil 4 müssen zudem die Degradationspfade der einzelnen Grübchen in Teil 3 analysiert werden. Damit wird eine Extrapolation auf das EOL-Kriterium erreicht.

Betont werden muss an dieser Stelle, dass die Auswertung der Ausfallverteilungen kein Modell darstellt, welches für Zuverlässigkeits-Prognosen und zur Absicherung verwendet werden kann. Es soll innerhalb dieser Arbeit lediglich das Potenzial aufgezeigt werden, welches in den Einzelzähnen und damit auch in der aBS steckt.

Tabelle 4.1 Technische Daten der Elektromotoren des Prüfstands

	Antriebsmaschine	Abtriebsmaschine
Maximale Leistung	330 kW	460 kW
Nennndrehmoment	704 Nm	1484 Nm
Überlastmoment (60 s)	745 Nm	1780 Nm
Maximaldrehzahl	8000 1/min	8000 1/min
Nennndrehzahl	4475 1/min	2960 1/min
Trägheitsmoment	0,31 kgm ²	1,57 kgm ²

4.1 Prüfstand und Prüfumgebung aus vorherigen Arbeiten

Im Vorfeld dieser Arbeit wurden am Institut für Maschinenelemente (IMA) bereits Versuche zur Lebensdauer von Serienverzahnungen durchgeführt [Bes20]. Der Fokus lag hierbei auf dem Schadensmechanismus Grübchen. Für die Auswertung wurde der Ausfall durch den schwächsten Zahn herangezogen. Diese Versuche sollen einer erweiterten Auswertung unterzogen werden, um das Potenzial der vorgestellten aBS abschätzen zu können. Aus diesem Grund werden der Prüfstand, die Verzahnung sowie die bisherigen Ergebnisse vorgestellt.

4.1.1 Hochdynamischer Verspannungsprüfstand

Mit dem hochdynamischen Verspannungsprüfstand am IMA können Untersuchungen an Fahrzeuggetrieben, einzelnen Verzahnungen und weiteren Komponenten aus dem Antriebsstrang durchgeführt werden. Der Prüfstand besteht aus zwei Asynchronmotoren, welche eine elektrische Verspannungseinheit bilden, siehe Bild 4.1. Auf der linken Seite ist die Antriebsmaschine mit 330 kW Leistung zu erkennen, in der Mitte ist der Prüfling montiert und rechts die Abtriebsmaschine mit 460 kW. Weitere technische Daten der Elektromotoren finden sich in Tabelle 4.1.

Durch das geringe Trägheitsmoment der Elektromotoren kann der Prüfstand für die Untersuchung von Drehschwingungen im Antriebsstrang herangezogen werden. Hierfür können Drehungleichförmigkeiten eines Verbrennungsmotors bis 300 Hz abgebildet werden. Zudem ist es möglich, sowohl konstante Lasthorizonte als auch repräsentative Lastkollektive zu hinterlegen. Für die Prüfung von kompletten Fahrzeuggetrieben können optional ein Schaltroboter und eine Kupplungsbetätigung installiert werden.

Auf dem Maschinenbett sind die Antriebs- und Abtriebsmaschine sowie der Unterbau des Getriebes bequem montierbar und ausrichtbar. Zudem ist das Maschinen-



Bild 4.1 Hochdynamischer Verspannungsprüfstand [Bes20]

bett auf einem niveaugulierten Membran-Luftfedersystem montiert, wodurch die Übertragung von hochfrequenten Schwingungen auf das Gebäude verhindert wird.

4.1.2 Prüfling/Prüfverzahnung

Die im Vorfeld dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen der Zahnflankentragfähigkeit wurden anhand einer Serienverzahnung durchgeführt. Der zweite Gang dieses einstufigen Pkw-Getriebes zeigte sich im Feld als anfällig für Grübchen, weshalb dieses Gangradpaar in einem Prüfgehäuse näher untersucht wurde.

Das Festrad des 2. Ganges ist direkt auf die Eingangswelle des Getriebes geschnitten, das Losrad ist auf der Abtriebswelle angeordnet. Material und Fertigung sind identisch mit der Serie, um möglichst praxisnahe Untersuchungen durchführen zu können. Ohne jegliche Anpassung konnten die Zahnräder jedoch nicht untersucht werden. Zum einen wurden die Ritzel zusätzlich kugelgestrahlt. Hierdurch werden Druckeigenspannungen in das Material eingetragen und die Lebensdauer bezüglich Zahnfußbruch dadurch gesteigert. Somit wird gewährleistet, dass als Ausfallmechanismus der Grübchenschaden eintritt. Zudem wurde die Eingangswelle gekürzt, um

Tabelle 4.2 Verzahnungsdaten 2. Gang

Eigenschaft	Ritzel	Rad
Zähnezahl	21	41
Übersetzung	1,952	
Achsabstand im Gehäuse [mm]	71,0	
Normalmodul [mm]	2,0	
Schrägungswinkel [Grad]	27,0	
Zahnbreite [mm]	15	15
Überdeckende Zahnbreite [mm]	8	8



Bild 4.2 Antriebsritzel und Abtriebsrad

eine direktere und vor allem steifere Anbindung an den Prüfstand zu erreichen. Eine weitere Anpassung ist die überdeckende Zahnbreite. Diese wurde in den Versuchen von 15 mm auf 8 mm reduziert, um die Pressung zu erhöhen und dadurch die Versuchszeit zu reduzieren. Die gekürzte Eingangswelle sowie die angepasste Prüfverzahnung sind in Bild 4.2 dargestellt. Die Verzahnungsdaten können Tabelle 4.2 entnommen werden. Für weiterführende Informationen bezüglich der Verzahnung, aber auch zur Konstruktion des Prüfgehäuses wird auf [Bes20] verwiesen.

4.1.3 Prüfablauf und bisherige Ergebnisse

Ziel der Untersuchungen von Beslic [Bes20] war es zum einen, ein Lebensdauermodell nach Wöhler der Serienverzahnung versuchstechnisch zu ermitteln sowie die Degradationspfade der Grübchen zu analysieren. Hierbei lag der Fokus, wie auch im Stand der Technik [Sta+99], lediglich auf dem Ausfall des Zahnrades und somit dem schwächsten Zahn am Umfang.

Für die Ermittlung der Wöhlerlinie wurden in den Versuchen zwei konstante Lasthorizonte gewählt, 175 Nm und 200 Nm. Das Moment wurde am Getriebeeingang geregelt und lag somit direkt am Ritzel an, welches auch ausschließlich analysiert wurde. Das Rad wurde in den Untersuchungen nicht mitbetrachtet, da durch die deutlich geringere Anzahl an Überrollungen aufgrund der Zähnezahl eine höhere Lebensdauer erwartet wurde. Bei beiden Lasthorizonten wurde die Drehzahl am Getriebeausgang konstant auf 1300 1/min geregelt. Die Öltemperatur betrug 90 °C.

Neben dem Ziel der experimentell ermittelten Wöhlerlinie wurde auch die Entwicklung des Degradationsverlaufs der Grübchen angestrebt. Aus diesem Grund wurden die Dauerlaufversuche nicht direkt bis zum Ausfall durchgeführt, sondern der Test ab einer gewissen Lastwechselanzahl alle 0,25 Mio. Lastwechsel (LW) un-

terbrochen. Das Ritzel wurde dann visuell auf etwaige Grübchen geprüft und entsprechend ein Negativabdruck erstellt. Dieses Vorgehen wurde bereits 1960 von Optiz gewählt, um den Reibverschleiß an der Zahnflanke zu messen und untersuchen [OBK60]. Bei den vorliegenden Versuchen wurde hierfür ein elastischer Kunststoff aus zwei Komponenten von Studenroth/Plastiform verwendet. Diese Abdrücke wurden anschließend unter einem Digitalmikroskop Keyence VHX 1000 vermessen und der Prüflauf beendet, sobald ein Grübchen die 4 %-Marke überschritten hatte. Abdrücke wurden von mehreren Grübchen am Umfang gemacht, da während des Prüflaufs noch nicht abgeschätzt werden konnte, welches Grübchen schlussendlich zum Ausfall führt. Bezüglich der direkten Ergebnisse der Untersuchungen wird an dieser Stelle auf [Bes20] verwiesen. Es wurden lediglich die schwächsten Zähne analysiert, was für die hier vorliegende Arbeit nicht ausreichend ist. Daher werden im Folgenden ausschließlich die Rohdaten der Degradationspfade und die Gangradpaare der Versuche verwendet. Diese dienen als Ausgangsbasis für die hier durchgeführten erweiterten Auswertungen der Grübchenversuche.

4.1.4 Ausgangsbasis der erweiterten Auswertung

Insgesamt wurden 55 Versuche mit der Serienverzahnung durchgeführt und dabei 38 Degradationspfade aufgenommen. Dementsprechend liegen 55 Gangradpaare sowie 38 Degradationspfade mit mehreren Messpunkten der Grübchengröße und dazugehöriger Lastwechselanzahl vor. Dies dient als Ausgangsbasis für die erweiterte Auswertung der Grübchenversuche.

Zuerst wird eine Auswahl der Gangradpaare getroffen, da sowohl Vorversuche als auch die zwei beschriebenen Lashorizonte in den Daten der 55 Wellen enthalten sind. Insgesamt 25 Vorversuche werden daher aussortiert sowie 12 Versuche, bei welchen ein anderer Ausfallmechanismus aufgetreten ist. Vier weitere Versuche werden aufgrund von erhöhten Schwankungen im Moment sowie in der Öltemperatur ausgeschlossen. Übrig bleiben 14 Gangradpaare, sieben je Lashorizont.

Diese verbleibenden 14 Gangradpaare werden anschließend weiter analysiert, um eine effiziente Auswahl für die erweiterte Grübchenauswertung zu erhalten. Hierfür wird im ersten Schritt die Streuung innerhalb des Grübchenwachstums bestimmt, was gleichzeitig die These stützt, dass eine Lastreduktion zu einer Steigerung der nutzbaren Restlebensdauer führt. Im zweiten Schritt werden die Lashorizonte auf den Dauerfestigkeitsbereich bezogen, um die im ersten Schritt untersuchte Streuung bewerten zu können.

Für den ersten Schritt wird untersucht, ob mit einer Lastreduktion am vorgeschädigten Zahn eine Steigerung der nutzbaren Restlebensdauer erreicht wird. Hierfür wird auf den beiden Lashorizonten untersucht, wie lange es vom Erkennen des ersten Grübchens am Umfang bis zum Ende des Prüflaufs dauert. Die gewonnenen Daten sind in Tabelle 4.3 aufgeführt. Für jede Welle ist der Start des ersten Grüb-

Tabelle 4.3 Lastwechselanzahl vom ersten Grübchen bis Prüflaufende für ausgewählte Wellen in Mio. LW

175 Nm	Start	Ende	Δ	200 Nm	Start	Ende	Δ
Welle 42	8,5	11,6	3,1	Welle 27	5,04	10,25	5,21
Welle 44	13	16	3	Welle 28	6,25	11,05	4,8
Welle 45	12,5	43,5	31	Welle 29	6,25	10,375	4,125
Welle 46	15,7	43	27,3	Welle 30	6,5	10,25	3,75
Welle 48	33,5	39,9	6,4	Welle 36	6,25	9,25	3
Welle 54	24,7	27,2	2,5	Welle 38	6,25	8	1,75
Welle 55	26,3	35,5	9,2	Welle 39	6	9,25	3,25
Median			11,79	Median			3,75

chens sowie das Ende des Prüflaufs aufgeführt. Die Differenz zwischen diesen beiden Werten wird in diesem Schritt vereinfacht als Wachstums-Geschwindigkeit der Grübchen angesehen. Die Grübchengrößen müssten für eine genaue Untersuchung ebenfalls betrachtet werden. Diese liegen allerdings nicht in ausreichendem Maße vor.

In den Daten zeigt sich sehr deutlich, dass zum einen die Laufzeit auf dem niedrigen Lasthorizont deutlich länger ist als auf dem höheren. Zum anderen wird über den Median der Differenz deutlich, dass die Wachstums-Geschwindigkeit der Grübchen in der Regel mit der Last zunimmt. Allerdings unterliegen die Wachstums-Geschwindigkeiten auf dem niedrigen Lasthorizont sehr großer Streuung, was auf eine Nähe zum Dauerfestigkeitspunkt hindeutet [Sta+99]. Bei den 200 Nm-Wellen ist die Streuung der Wachstums-Geschwindigkeit dagegen sehr gering. Die Streuung beider Lasthorizonte wird zudem im Box-Plot in Bild 4.3 deutlich.

Im zweiten Schritt werden die Lasthorizonte bezogen auf den Dauerfestigkeitspunkt bewertet. Dieser berechnet sich nach [ISO6336-2] für eine Ausfallwahrscheinlichkeit von 1 % zu 133 Nm. Da der Dauerfestigkeitspunkt in der Praxis durch Unregelmäßigkeiten im Material und der Bearbeitung stark schwankt [ISO6336-5], wird die Ausfallwahrscheinlichkeit mit Joachim [Joa82] und Stahl [Sta+99] umgerechnet. Für eine Ausfallwahrscheinlichkeit von 50 % ergibt sich eine Dauerfestigkeit von 157 Nm. Weitere Ausfallwahrscheinlichkeiten mit den dazugehörigen Spannungen und Momenten sind in Tabelle 4.4 aufgeführt. Der niedrige Lasthorizont mit 175 Nm ist in der Tabelle fett hervorgehoben und liegt bei einer Ausfallwahrscheinlichkeit von etwa 92 % der Dauerfestigkeit. Die im ersten Schritt erkannte hohe Streuung kann damit über die Nähe zur Dauerfestigkeit begründet werden. Aus diesem Grund wird der Fokus für die weitere Betrachtung auf die sieben Gangradpaare des hohen Lasthorizonts gelegt.

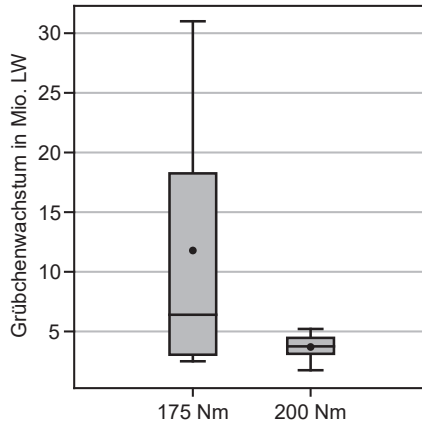


Bild 4.3 Zeit zwischen Grübcheninitiierung und Ende des Prüflaufs bei 175 Nm und 200 Nm

Tabelle 4.4 Dauerfestigkeitspunkt nach DIN3990 bei unterschiedlichen Ausfallwahrscheinlichkeiten

Ausfallwahrscheinlichkeit	σ_{dauer}	T_{dauer}
1 %	1467 N/mm ²	133 Nm
10 %	1523 N/mm ²	144 Nm
50 %	1595 N/mm ²	157 Nm
90 %	1667 N/mm ²	172 Nm
92 %	1683 N/mm²	175 Nm
99 %	1714 N/mm ²	182 Nm

Die vorhandenen Degradationspfade werden ebenfalls eingehend untersucht und die Anzahl für die weitere Analyse auf 13 reduziert. Ausgewählt werden lediglich Degradationspfade, welche zu den sieben 200 Nm–Wellen gehören und zudem mehr als drei Messpunkte aufweisen. Die einzelnen Messpunkte der Grübchenabdrücke sind in den Tabellen im Anhang 8.1 und 8.2 zu finden.

Zusammengefasst ist die Auswahl der Versuche in Bild 4.4. Aus den ursprünglich 55 Versuchszahnrädern werden sieben ausgesucht. Pro Prüfling liegen unterschiedlich viele Grübchen und verwertbare Degradationspfade vor. Die jeweilige Anzahl ist ebenfalls im Bild aufgeführt. Insgesamt sind für die erweiterte Auswertung der Grübchenversuche 42 Grübchen und 13 Degradationspfade vorhanden. Hier werden zuerst alle Grübchen am Zahnrad in die Auswertung einbezogen und die Lage am

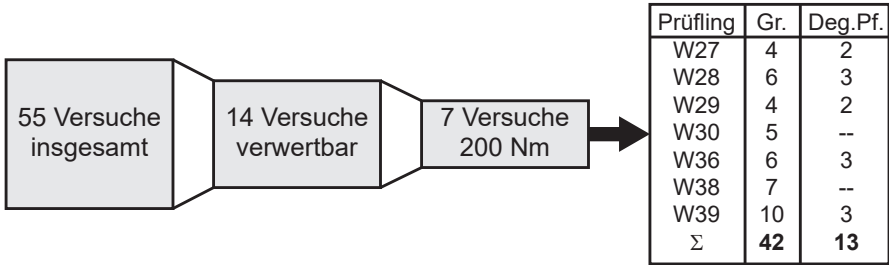


Bild 4.4 Übersicht der Versuchsauswahl für die erweiterte Auswertung inkl. Prüflingsnummer, Anzahl der Grübchen je Prüfling (Gr) und Anzahl der Degradationspfade (Deg.Pf.)

Umfang analysiert. Im Nachgang werden die Degradationspfade sowohl von Ausfallgrübchen als auch von weiteren Grübchen am Umfang betrachtet und für die Auswertung hinsichtlich des EOL-Kriteriums herangezogen.

4.2 Lage der Grübchen am Umfang

In den vorausgegangenen Untersuchungen lag der Fokus auf den Ausfallgrübchen, weshalb nicht von allen Grübchen am Zahnrad ein Degradationspfad und auch Abdrücke zum Ende des Prüflaufs vorlagen. Aus diesem Grund werden innerhalb dieser Arbeit von allen Grübchen am Umfang der sieben Ritzel Abdrücke genommen und mit einem Keyence Lasermikroskop VK-9710 mit 20-facher Vergrößerung vermessen. Da Grübchen hauptsächlich am Ritzel auftreten [KBK76], wird in den folgenden Untersuchungen der Fokus auf das Ritzel gelegt. Ein beispielhafter Abdruck ist in Bild 4.5 abgebildet. Die Außenkontur des Grübchens ist sehr deutlich erkennbar, wodurch eine hohe Messgenauigkeit erreicht wird. Das Messmittel wurde zudem über mehrere Replikationen qualifiziert, sodass die Größe der Grübchen exakt bestimmt werden kann. Dies wird mit dem VK Analyse-Modul Plus von Keyence vorgenommen. Zudem bestätigt die Gestalt des Grübchens die in der Literatur beschriebenen muschelförmigen Ausbrüche [Bar99; Bre+17].

Zusammengefasst sind die Ergebnisse der 42 Grübchen in Tabelle 4.4. Auf einem Ritzel sind zwischen vier und zehn Grübchen, welche sich von der Größe sehr stark unterscheiden. Das kleinste Grübchen hat eine Fläche von 0,58 % bezogen auf eine aktive Zahnflanke, welche in dem vorliegenden Fall laut CAD-Daten 71,177 mm² beträgt. Am größten ist auf Welle 36 das Grübchen 1 mit 8,88 %, was deutlich über dem genormten EOL-Kriterium von 4 % Grübchenfläche liegt. Dies liegt daran, dass der Prüfstand alle 0,25 Mio LW automatisch abgestellt wurde, um die Grübchenflächen zu bestimmen. In diesem Zeitintervall kann das Grübchen über das genormte EOL-Kriterium anwachsen. In Tabelle 4.5 ist zudem gekennzeichnet, von welchen

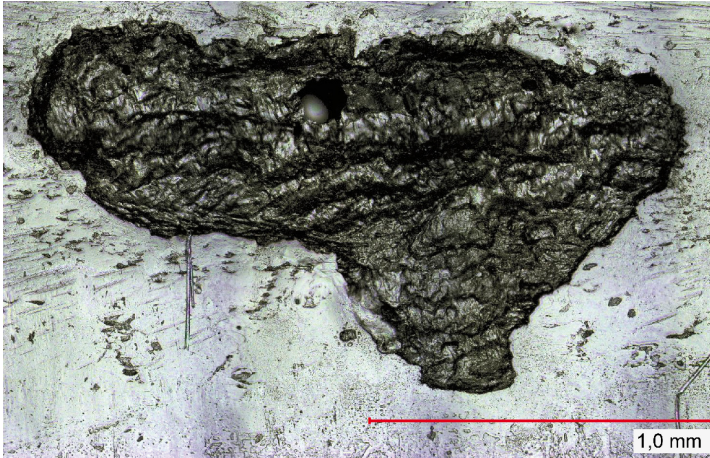


Bild 4.5 Abdruck von Grübchen 4, Welle 27

Tabelle 4.5 Grübchengrößen in % der sieben Ritzel. Unterstrichen sind Grübchen mit vorhandenem Degradationspfad

	Mio. LW	Gr1	Gr2	Gr3	Gr4	Gr5	Gr6	Gr7	Gr8	Gr9	Gr10
W27	10,25	<u>6,02</u>	3,20	<u>3,13</u>	1,71						
W28	11,05	<u>6,90</u>	0,87	1,43	<u>1,33</u>	<u>1,63</u>	0,89				
W29	10,375	<u>6,44</u>	<u>1,18</u>	2,28	0,62						
W30	10,25	6,06	0,58	1,48	1,13	0,77					
W36	9,25	<u>8,88</u>	<u>3,59</u>	<u>0,91</u>	1,76	1,83	1,45				
W38	8,00	6,45	1,28	1,17	1,30	1,43	3,96	0,69			
W39	9,25	<u>5,44</u>	1,40	<u>2,75</u>	2,37	1,94	2,12	0,62	1,10	1,93	<u>1,37</u>
Legende:		> 4 %		1 %...4 %		< 1 %					

Grübchen ein Degradationspfad vorliegt. In diesem Fall sind die Grübchengrößen unterstrichen.

In der bisherigen Auflistung sind die Grübchen der Reihe nach durchnummeriert. Start ist an jedem Ritzel das größte Grübchen am Umfang, also das Grübchen am Ausfallzahn. Um zusätzlich zur Anzahl und Größe der Grübchen die Lage am Umfang des Zahnrades zu untersuchen, werden Spinnennetzdiagramme der einzelnen Wellen und von allen Wellen zusammen erstellt. Beispielhaft ist in Bild 4.6 die Welle 27 und das Diagramm mit allen Wellen zusammen dargestellt. Die Diagramme der restlichen Wellen sind im Anhang 8.1 zu finden. Als Zahn 1 ist hierbei jeweils der Ausfallzahn definiert und die anderen Grübchen sind dementsprechend im Uhrzei-

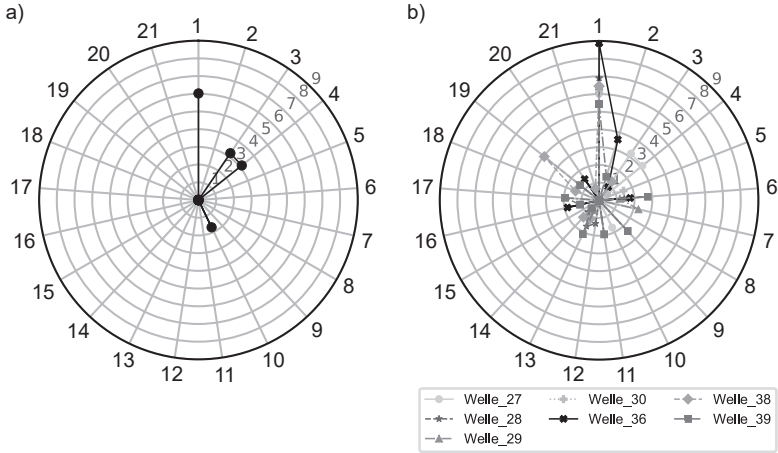


Bild 4.6 Netzdiagramm der Verteilung der Grübchengrößen am Umfang des Zahnrades. a) Welle 27 b) alle sieben Wellen

gersinn am Umfang auf den restlichen Zähnen angeordnet, die Achse gibt die Größe der Grübchen an.

Wie in unterschiedlichen Literaturstellen aufgeführt, treten Grübchen bei einsatzgehärteten Zahnrädern an einzelnen Zähnen auf [Sta+99], [DIN3990-2], [ISO6336-2]. Ein Zahn ist schlussendlich laut Definition für den Ausfall des gesamten Zahnrades verantwortlich, sobald das 4 % Kriterium erreicht ist. Am dargestellten Netzdiagramm von Welle 27 wird zudem deutlich, dass zwei Grübchen an benachbarten Zähnen auftreten. Dieses Phänomen tritt auch bei anderen Wellen auf, siehe Anhang 8.1. Zudem wird im Gesamt-Diagramm in Bild 4.6b deutlich, dass bei einer Betrachtung aller Zahnräder in Summe, theoretisch an allen Zähnen Grübchen auftreten. Lediglich an zwei Zähnen wurde kein Grübchen beobachtet.

An jedem Ritzel ist mindestens an einer Stelle ein Grübchen an einer benachbarten Zahnflanke vorhanden. Auch in Fromberger et al. [Fro+16] treten Grübchen an benachbarten Zahnflanken auf, welche jedoch in der Auswertung keine Berücksichtigung finden. Dieses Phänomen wird im Folgenden innerhalb der erweiterten Grübchenauswertung näher analysiert. Insgesamt werden 147 Zähne betrachtet, die 7 Ritzel mit je 21 Zähnen. Davon haben über 71 % keine Grübchen, wodurch sich ein enormes Potenzial für die aBS bietet. Diese intakten Zähne können eine höhere Belastung ertragen, ohne den Ausfallzeitpunkt des Zahnrades negativ zu beeinflussen. Zusätzlich werden zehn Paare von Grübchen erkannt sowie zwei Dreiergruppen. Grübchen, die alleine an einem Einzelzahn stehen, gibt es 16-mal. Folglich ist mit 17,7 % die Wahrscheinlichkeit für Grübchen an benachbarten Zähnen höher als an Einzelzähnen mit 10,9 %. Werden die intakten Zähne ohne Grübchen aus der Be-

trachtung ausgeschlossen und der Fokus lediglich auf die 42 Zähne mit Grübchen gelegt, zeigt sich die Abhängigkeit der Grübchen noch deutlicher. Fast 62 % der Grübchen haben eine benachbarte Flanke, die ebenfalls einen Grübchenschaden aufweisen. Nur 38 % zeigen keinen Schaden an den benachbarten zwei Flanken. Dieses Phänomen ist nicht nur bei den vorliegenden beschleunigten Prüfstandsversuchen zu erkennen. In Gretzinger et al. [Gre+21] wird diese Auswertung auf Serienverzahnungen eines Automatgetriebes im Feldversuch angewendet und ebenfalls eine hohe Abhängigkeit des Schadensmechanismus erkannt. Jedoch sind hier Grauflecken auf den Flanken anstatt der Grübchen bei der Versuchsverzahnung vorhanden. Daraus wird statistisch geschlossen, dass innerhalb des Ausfallmechanismus Grübchen eine Abhängigkeit vorhanden ist und die Grübchen nicht gleichmäßig am Umfang verteilt auftreten. Dies kann mehrere Gründe haben, welche der Streuung in der Belastbarkeit aber auch der Belastung der einzelnen Zähne zugeordnet werden können. Eine mögliche Ursache können die Fertigung und Materialstreuung sein, welche zu einer unterschiedlichen Belastbarkeit führen [BL04]. Hier ist allerdings auch die Begründung für die Streuung der Zähne an sich zu sehen. Weiterhin kann durch Rundlauf- und Teilungsfehler im Zahnrad die Belastung am Umfang variieren, was die Abhängigkeit begünstigen würde. Auch kommt es durch Grübchen zu einer Änderung der Zahnsteifigkeit und damit zu Schwingungen im System [Ngu02; Ran11]. Dies könnte ebenfalls dazu führen, dass die benachbarten Zähne stärker belastet werden. Da es sich bei der Prüfverzahnung um eine Serienverzahnung aus einem Pkw handelt, liegt zudem eine Schrägverzahnung mit hoher Überdeckung vor. Diese beträgt im vorliegenden Beispiel bei der Zahnbreite von 15 mm 2,7. Durch die reduzierte Zahnbreite verringert sich die Sprungüberdeckung. Es resultiert eine Gesamtüberdeckung von 2,23, wodurch immer zwei bis drei Zähne gleichzeitig im Eingriff sind. Eine Annahme ist daher, dass sich bei einem Grübchen an einer Zahnflanke die Belastung auf die benachbarten Zähne verlagert und diese somit höher belastet sind. Dies begünstigt die Bildung von Grübchen an benachbarten Flanken.

Um diese These genauer analysieren und verifizieren zu können, wird eine FEM Simulation mit ANSYS durchgeführt. Die FEM Simulation ist ein geeignetes Werkzeug, um struktur-mechanische Problemstellungen zu untersuchen und einen Vergleich von Spannungen vorzunehmen. Von der Versuchsverzahnung wird daher ein Modell aus drei Zähnen erstellt und die Spannungen auf der Zahnflanke bei einem Abrollvorgang bei 200 Nm berechnet. Nach dieser Simulation mit drei intakten Zähnen wird am mittleren Zahn ein Grübchen im CAD Modell integriert. Die Form und Tiefe des Grübchens wird aus dem Abdruck aus Bild 4.5 abgeleitet, um möglichst realitätsnahe Ergebnisse zu erreichen. Die Skalierung wird so gewählt, dass ein sehr großes Grübchen mit 10 % Grübchenfläche entsteht, um den Einfluss auf die benachbarten Flanken deutlich erkennen zu können. Das Modell ist in Bild 4.7 dargestellt.

Ausgewertet werden in der Simulation lediglich die Vergleichsspannungen und Druckspannungen in der Eingriffslinie der benachbarten Zähne über den gesamten

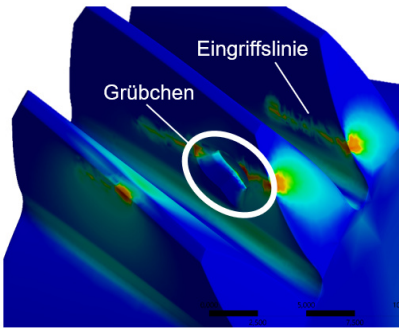


Bild 4.7 FEM Modell von drei Zähnen mit integriertem Grübchen

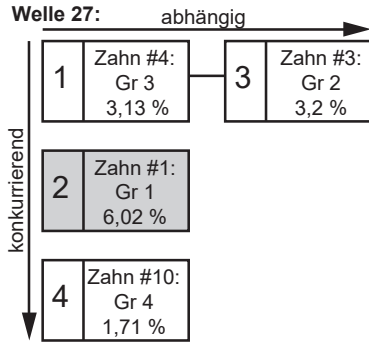


Bild 4.8 Abhängigkeitsschaubild am Beispiel der Welle 27

Abrollvorgang. Beim Vergleich der Spannungen mit und ohne Grübchen zeigte sich eine Erhöhung der Vergleichsspannung um 2,5 % und der Druckspannung um 3,1 %. Bei einem kleineren Grübchen mit nur 2 % Grübchenfläche fällt die Erhöhung der Spannungen wie erwartet nur geringer aus. Diese liegt hier bei 0,75 % für die Vergleichsspannung und 0,64 % für die Druckspannung. Mit diesen drei vergleichenden Simulationen wird die Abhängigkeit des Ausfallmechanismus Grübchen bei der Versuchsverzahnung auch physikalisch gezeigt.

Für die Anwendung der aBS zur Lebensdauersteigerung ist die Abhängigkeit der Grübchen von Vorteil. Sowohl bei der Sinusfunktion als auch bei der Sprungfunktion am Getriebeeingang werden benachbarte Zähne des vorgeschädigten Zahnes direkt mit entlastet. Die Abhängigkeit ist somit für die Anwendung der aBS weniger von Bedeutung als die Einzelgrübchen, die zufällig am Umfang verteilt sind. Bei den Grübchen muss daher zwischen abhängigem Ausfallmechanismus und konkurrierendem Ausfallmechanismus unterschieden werden. Als abhängig werden alle Grübchen definiert, welche mindestens ein benachbartes Grübchen haben. Konkurrierend bedeutet, dass dieses Grübchen zufällig am Umfang und ohne benachbarte Grübchen auftritt. Durch diese Unterscheidung darf das Unabhängigkeitsprinzip aus der Booleschen Systemtheorie nicht mehr angewendet werden, wodurch die Systemzuverlässigkeit nicht durch Multiplikation bestimmt werden kann [BL04]. Innerhalb dieser Arbeit erfolgt ohnehin kein Zuverlässigkeitsnachweis, weshalb die Betrachtung der Ausfallzeiten der Einzelzähne innerhalb des Systems Zahnrad weiterhin erfolgen kann.

Neben den Ausfallzeiten ist bedeutend, wann die Grübchen am Umfang auftreten. Diese Information wird für die Regelung der aBS benötigt. Aus diesem Grund werden die sieben Ritzel eingehender untersucht und das zeitliche Erscheinen sowie der Vergleich zwischen abhängigem und konkurrierendem Ausfallmechanismen

analysiert. Dies wird anhand von einem Abhängigkeitsschaubild vorgenommen. Ein beispielhaftes Ritzel ist in Bild 4.8 dargestellt. Die abhängigen Grübchen werden horizontal aufgetragen, die konkurrierenden vertikal. Die Erscheinungsnummer ist groß dargestellt und zusätzlich die Zahn-Nummer sowie die Grübchen-Nummer und -Größe aus Tabelle 4.5 ergänzt. Das Ausfallgrübchen ist grau hervorgehoben. Beim Erzeugen dieser Abhängigkeitsschaubilder muss die Gesamtüberdeckung der Verzahnung berücksichtigt werden. Liegt eine Gesamtüberdeckung von größer drei vor, sind auch Grübchen mit einem Abstand von zwei Zähnen noch als abhängig zu betrachten. Im vorliegenden Beispiel ist die Gesamtüberdeckung kleiner drei, weshalb lediglich direkte Nachbar-Flanken als abhängig gelten.

Am Beispiel der Welle 27 ist das Grübchen 3 zeitlich als erstes entstanden. Mit der Definition, dass der Ausfallzahn die Nummer 1 ist, liegt dieses Grübchen an Zahn-Nummer 4. Danach ist Grübchen 1 an Zahn 1 entstanden. Da hier zwei Zähne dazwischen liegen, handelt es sich um einen konkurrierenden Ausfallmechanismus und das Grübchen wird vertikal aufgetragen. Grübchen 2 folgt an Zahn 3, wodurch es ein direkter Nachbar zu Grübchen 3 ist. Daher liegt eine Abhängigkeit zwischen Grübchen zwei und drei vor, was durch die horizontale Anordnung ersichtlich ist. Das Grübchen 4 tritt als letztes auf und ist an Zahn 10 und damit wieder konkurrierend. Für die restlichen sechs Wellen wird entsprechend vorgegangen. Die Abhängigkeitsschaubilder der anderen Ritzel sind im Anhang 8.2 und 8.3 zu finden.

4.3 Degradationspfade

Um das Potenzial der aBS untersuchen zu können, ist von wesentlicher Bedeutung, wie groß die Streuung der Belastbarkeit der einzelnen Zähne ist und vor allem auch, wie schnell die Grübchen wachsen und das EOL-Kriterium von 4 % Grübchengröße bezogen auf die aktive Zahnflanke erreichen. Die Wachstums-Geschwindigkeit der Grübchen wird in diesem Teilkapitel fokussiert und ebenfalls eine Ausweitung für alle Grübchen vorgenommen. Hier wird auch die Unterscheidung zwischen konkurrierendem und abhängigem Ausfallmechanismus aus dem vorherigen Abschnitt 4.2 wieder aufgegriffen.

Laut Literatur wachsen die Grübchen hauptsächlich exponentiell [MMS18; Bes20; DIN3990-2], es ist aber auch von linearem Wachstum die Rede [DIN3990-2; NW03; KB17]. Da teilweise nur wenige Messpunkte pro Pfad vorliegen, sind die Parameter bei einer Regression mit Exponentialfunktion nur schwer bestimmbar. Aus diesem Grund wird die Analyse der Degradationspfade in einem doppelt-logarithmischen Diagramm vorgenommen. Somit wird aus dem exponentiellen Wachstum eine Gerade, welche durch eine einfache Geradengleichung dargestellt werden kann.

Ziel der Analyse der Degradationspfade ist die Ermittlung einer mittleren Steigung, welche im Anschluss für die Auswertung der Ausfallverteilung über alle Zähne herangezogen wird. Aus diesem Grund wird im ersten Schritt versucht, alle Einzel-

Messpunkte gemeinsam auszuwerten und dadurch eine mittlere Steigung zu erhalten. Hierfür wird eine Regression mit exponentieller Grundgleichung im linearen Diagramm und eine Regression mit Geradengleichung im doppelt-logarithmischen Diagramm erstellt. Für die Untersuchung der Güte der Regression gibt es mehrere Kennzahlen und Tests, wie zum Beispiel das Bestimmtheitsmaß R^2 , das korrigierte Bestimmtheitsmaß \bar{R}^2 , die Residuenquadratsumme (engl. sum of squared error) SSE oder die Quadratwurzel des mittleren quadratischen Fehlers (engl. root-mean-square error) RMSE [FKL07; Law03]. Im Folgenden werden die zwei üblichen Kennzahlen \bar{R}^2 und RMSE für die Analyse der Anpassungsgüte der Regression mit den nachfolgenden Gleichungen 4.1 und 4.3 herangezogen. Beim korrigierten Bestimmtheitsmaß ist n der Stichprobenumfang und p die Anzahl der Parameter im Modell. Mit y werden die real gemessenen Daten, mit \bar{y} die gemittelten Messwerte und mit \hat{y} die geschätzten Werte in den Gleichungen berücksichtigt.

$$\bar{R}^2 = 1 - \frac{n-1}{n-p}(1-R^2) \tag{4.1}$$

mit

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \tag{4.2}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \tag{4.3}$$

Das korrigierte Bestimmtheitsmaß nimmt Werte zwischen Null und eins an. Eine gute Anpassung der Regression an die Daten liegt vor, wenn die mittlere Abweichungsquadrate klein sind und \bar{R}^2 damit nahe eins liegt. Beim RMSE dagegen liegt eine gute Anpassung vor, wenn der Wert nahe Null liegt, da der Fehler direkt über die Quadratwurzel betrachtet wird. Angewendet auf die Beispielverzahnung mit allen Einzel-Messpunkten ergibt sich Folgendes. Die Anpassungsgüte der linearen Fit-Funktion ist mit einem \bar{R}^2 von 0,2018 und einem RMSE von 0,3073 besser als bei der exponentiellen Fit-Funktion mit \bar{R}^2 von 0,1439 und RMSE von 1,4981. Somit wird die Annahme einer besseren linearen Regression im doppelt-logarithmischen Diagramm bestätigt. Jedoch wird bei der Betrachtung aller Messpunkte zusammen trotz der Linearisierung keine gute Anpassungsgüte erreicht, siehe Bild 4.9. Im Folgenden werden daher die Grübchen einzeln ausgewertet. Beispielhaft wird die Regression anhand Welle 36 aufgeführt. An diesem Ritzel sind insgesamt drei Degradationspfade vorhanden, welche alle in Bild 4.10 in einem Diagramm dargestellt sind. Die Diagramme der anderen Wellen sind im Anhang 8.4 bis 8.7 sowie die Regressionsparameter in der Tabelle 8.3 zu finden.

Die Anpassungsgüten aller drei Degradationspfade von Welle 36 sind sehr gut. Die \bar{R}^2 Werte liegen bei 0,93, 0,92 und 0,72 und der RMSE bei 0,04, 0,07 und 0,06.

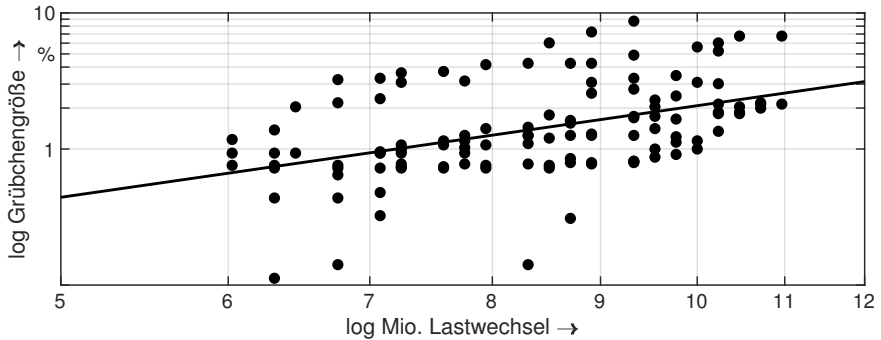


Bild 4.9 lineare Regression im doppelt-logarithmischen Diagramm: alle Messpunkte zusammen

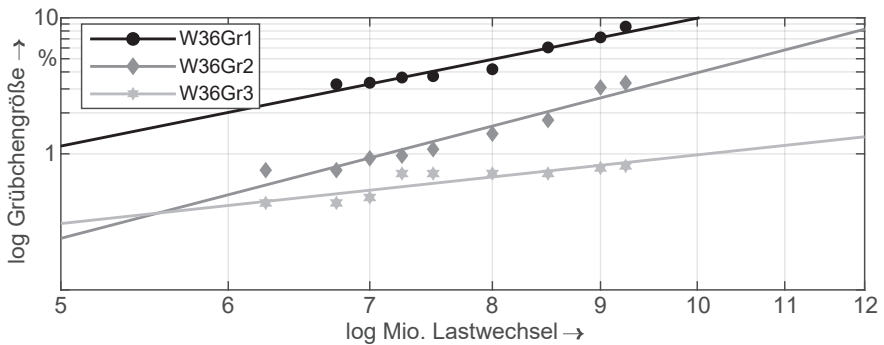


Bild 4.10 lineare Regression im doppelt-logarithmischen Diagramm: Degradationspfade der Grübchen auf Welle 36

In der Tabelle 8.3 im Anhang sind die Anpassungsgüten von allen 13 Degradationspfaden aufgeführt. Hier sind zusätzlich zu \bar{R}^2 und RMSE auch noch der SSE und das R^2 zu finden. Zusätzlich zu den einzelnen Anpassungsgüten wird für eine Gesamteinschätzung der Median über alle 13 Anpassungsgüten gebildet. Als Median der 13 Degradationspfade ergibt sich 0,8394 für \bar{R}^2 und 0,0704 für RMSE. Somit ist die Anpassungsgüte deutlich höher als bei der Regression über alle Einzelmesspunkte zusammen. Zudem ist auch bei der Regression der einzelnen Grübchen die Anpassungsgüte der Gerade im doppelt-logarithmischen Diagramm besser als bei der Exponentialfunktion im linearen Diagramm. Im Folgenden wird daher der Fokus auf diese Auswertung gelegt.

Bei der Betrachtung der einzelnen Degradationspfade fällt auf, dass einige Grübchen sehr gleichmäßig wachsen und daraus eine sehr gute Anpassung mit \bar{R}^2 Werten über 0,9 resultieren. Andere jedoch weisen zwischen zwei Messpunkten einen

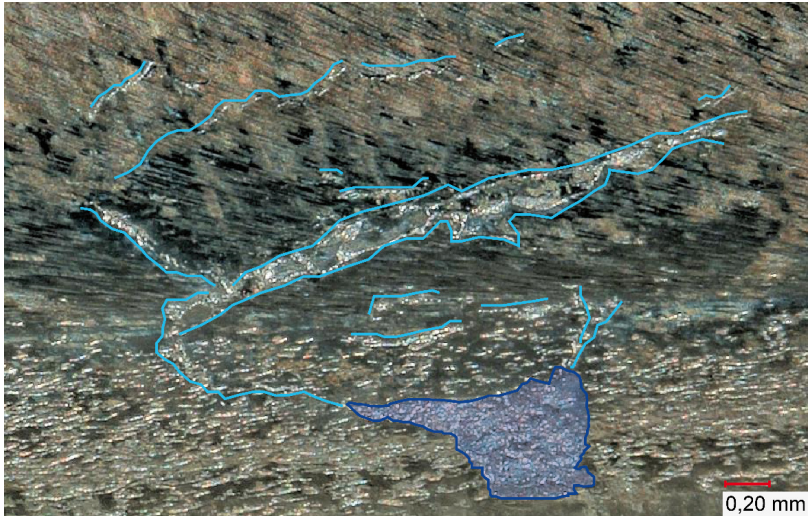


Bild 4.11 Mikroskopaufnahme von Grübchen mit angrenzenden Rissen

extrem großen Sprung auf, wodurch ein \bar{R}^2 von 0,38 resultiert. Dieses Phänomen kann damit erklärt werden, dass nach dem initialen Ausbruch eines Grübchens teilweise sehr regelmäßig kleinere Teilchen am Rand des Grübchens ausbrechen und somit ein sehr glatter Verlauf der Grübchenfläche über der Zeit resultiert. Bei anderen Grübchen dagegen wächst ein Riss von der Kante des Grübchens über viele Lastwechsel, wodurch sich die Fläche des Grübchens nur wenig verändert. Schlussendlich bricht durch den Riss ein großes Materialstück aus der Flanke heraus und der Verlauf zeigt einen Sprung. Bei einer Welle konnte dieses Phänomen am Ende des Prüflaufs festgestellt werden. Es existiert ein initiales Grübchen, von welchem Risse ausgehen, die Flanke aber nicht weiter ausgebrochen ist. Eine Mikroskopaufnahme dieses Grübchens ist in Bild 4.11 zu sehen. In dunkelblau ist das Grübchen hervorgehoben, die Risse sind mit hellblauen Linien angedeutet. Dieses Phänomen des plötzlichen Herausbrechens wird auch in Krüger et al. [KBK76] beschrieben. Da sowohl der gleichmäßige, als auch der sprungförmige Verlauf in der Praxis vorkommen, werden alle Degradationspfade für die weitere Analyse verwendet und keine Einschränkungen vorgenommen.

Im Anschluss an die Analyse der Einzelregressionen werden diese gemeinsam in einem Diagramm betrachtet. Hierbei wird der Fokus auf den Vergleich der Steigungen gelegt und unterschiedliche Gruppen von Grübchen betrachtet. In dem Diagramm in Bild 4.12 sind die Degradationspfade der Ausfallgrübchen mit schwarzen Linien dargestellt, die restlichen Grübchen mit grauen Linien. Zusätzlich wird eine Unterscheidung von abhängigen und konkurrierenden Grübchen vorgenommen. Die

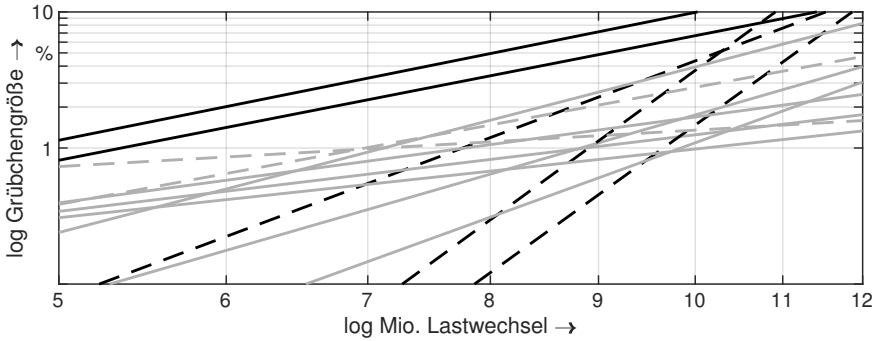


Bild 4.12 Regression aller Degradationspfade; schwarz: Ausfallgröbchen, grau: restliche Gröbchen, durchgezogene Linie: abhängige Gröbchen, gestrichelte Linie: konkurrierende Gröbchen

abhängigen Gröbchen sind mit durchgezogenen Linien und die konkurrierenden mit gestrichelten Linien abgebildet.

In dem Diagramm ist ersichtlich, dass die Ausfallgröbchen sowohl als abhängige als auch als konkurrierende Gröbchen auftreten. Von den insgesamt fünf Wellen mit Degradationspfaden haben zwei Ausfallgröbchen an einer benachbarten Flanke ebenfalls ein Gröbchen und gelten somit als abhängige Ausfallmechanismen. Bei drei der Ausfallgröbchen liegt kein Gröbchen an einer benachbarten Flanke vor, wodurch ein konkurrierender Ausfallmechanismus vorliegt. Zudem ist ersichtlich, dass die Steigungen in einem gewissen Bereich streuen. Aus diesem Grund wird für die Steigungen eine statistische Auswertung über Hypothesentests vorgenommen. Für die Auswahl des richtigen Hypothesentests wird im ersten Schritt eine Prüfung auf Normalverteilung durchgeführt. Da die Streuung der Steigungen keiner Normalverteilung folgen, fällt die Wahl auf einen nicht-parametrischen Test, den Mood-Median-Test. Hiermit wird überprüft, ob sich die Mediane der zwei Gruppen signifikant unterscheiden. Vorteil bei diesem Test ist, dass die Verteilungen der zwei Gruppen nicht gleich sein müssen und auch die Anzahl der vorliegenden Daten kann geringer ausfallen. Nach Hedderich und Sachs [HS18] sind bei Stichproben < 20 die verteilungsfreien Hypothesentests oft wirksamer, was im vorliegenden Fall zutrifft. Geprüft werden sowohl die Gruppen Ausfallgröbchen und restliche Gröbchen am Umfang sowie in einem weiteren Test die Gruppen abhängige und konkurrierende Gröbchen. Bei beiden Hypothesentests wird eine Irrtumswahrscheinlichkeit von ca. 43% berechnet. Somit bleibt die Nullhypothese erhalten und es liegt kein signifikanter Unterschied in den Steigungen vor. Untermuert wird dieses Ergebnis durch Box-Plot Diagramme, siehe Bild 4.13. Links im Bild zeigt sich eine deutlich größere Streuung der Steigungen der Ausfallgröbchen im Vergleich zu den Steigungen der restlichen Gröbchen. Jedoch ist eine Überlappung der Gruppen vorhanden. Für die

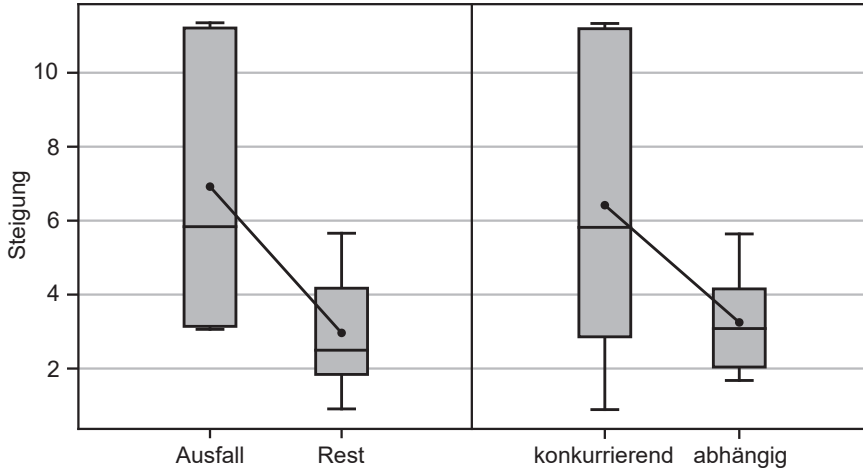


Bild 4.13 Boxplot der Steigungen; links Ausfallgrübchen vs. restliche Grübchen; rechts konkurrierende Grübchen vs. abhängige Grübchen

Unterscheidung zwischen abhängigen und konkurrierenden Grübchen in Bild 4.13 rechts ist ersichtlich, dass die Steigungen der abhängigen Grübchen vollumfänglich in dem Bereich der konkurrierenden Steigungen enthalten sind. Wiederum ist die Verteilung einer Gruppe deutlich breiter, in diesem Fall die Gruppe der konkurrierenden Grübchen. Beide Vergleiche zeigen daher, dass kein signifikanter Unterschied innerhalb der Steigung der Grübchendegradationspfade vorhanden ist. Jedoch muss an dieser Stelle betont werden, dass die Datenbasis für den Vergleich der Steigungen sehr gering ist. Die vorhandenen 13 Degradationspfade werden hierfür in 2 Gruppen eingeteilt, wodurch lediglich 5 Ausfallgrübchen mit 8 restlichen Grübchen bzw. 5 konkurrierende mit 8 abhängigen Grübchen verglichen werden. Durch die geringe Datenbasis ist zudem keine physikalische Interpretation möglich. Für eine genauere Auswertung sollten in Zukunft weitere Versuche durchgeführt werden. Innerhalb der Arbeit werden daher für die weiterführenden Untersuchungen alle 13 Steigungen gemeinsam betrachtet.

Für die Prognose der nutzbaren Restlebensdauer von Verzahnungen zum Zeitpunkt einer Vorschädigung ist es von essentieller Bedeutung, die Steigung des Grübchen-Wachstums zu kennen. Hierfür wird eine Verteilungsidentifikation durchgeführt und die Verteilung der Steigungen im Wahrscheinlichkeitsnetz näher betrachtet. In Bild 4.14 ist dieses Wahrscheinlichkeitsnetz für die Steigung dargestellt. Die Verteilungsidentifikation mit der Software Minitab 18.1 ergibt eine Lognormalverteilung. Der Median der Verteilung liegt bei 3,5. Dieser Wert wird für die weitere Untersuchung der Verteilung im nachfolgenden Abschnitt 4.4 herangezogen.

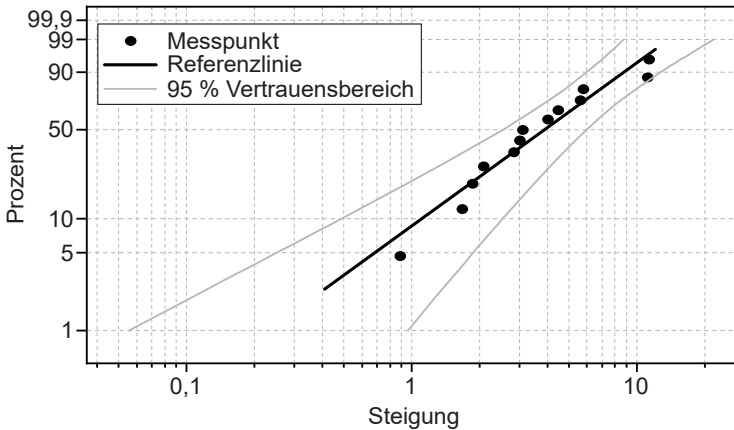


Bild 4.14 Wahrscheinlichkeitsnetz der Steigungen

Ergebnis dieses Teilkapitels ist somit die statistische Beschreibung der Degradationspfade der Beispielverzahnung. Die Pfade der einzelnen Grübchen folgen einem linearen Verlauf im doppelt-logarithmischen Diagramm. Der Verlauf der Messpunkte ist hierbei jedoch nicht stetig, sondern es können Sprünge aufgrund von Rissen auf der Zahnflanke entstehen. Zudem liegt kein signifikanter Unterschied in der Steigung der Degradationspfade vor. Die Wachstumsgeschwindigkeit der Ausfallgrübchen als auch der restlichen Grübchen am Umfang des Zahnrades kann somit über eine Verteilung angegeben werden. Diese Information der Steigungen wird im Folgenden dazu genutzt, die einzelnen Grübchen auf das EOL-Kriterium 4 % Grübchenfläche bezogen auf eine aktive Zahnflanke zu extrapolieren.

4.4 Verteilung für alle Zähne

In diesem Teilkapitel werden mit Hilfe der MLE unterschiedliche Verteilungen über alle Zähne bestimmt. Zum einen wird die Ausfallverteilung n_{EOL} der Zähne betrachtet und mit dem Stand der Technik verglichen. Hierbei werden die Messpunkte aus Kapitel 4.1.4 mit dem Median der Steigungen aus Kapitel 4.3 kombiniert und alle Grübchen auf das EOL-Kriterium von 4 % Grübchenfläche extrapoliert. Dies ist schematisch in Bild 4.15a dargestellt. In Bild 4.15b sind die extrapolierten Daten über Kreuze dargestellt, welche dann zur Bestimmung der Ausfallverteilung herangezogen werden. Zum anderen werden weitere Verteilungen der Zähne betrachtet, wie beispielsweise die Verteilung der initialen Grübchengröße a_0 und des Erscheinungszeitpunktes der Grübchen n_0 , siehe Bild 4.15b. Über diese Information zur

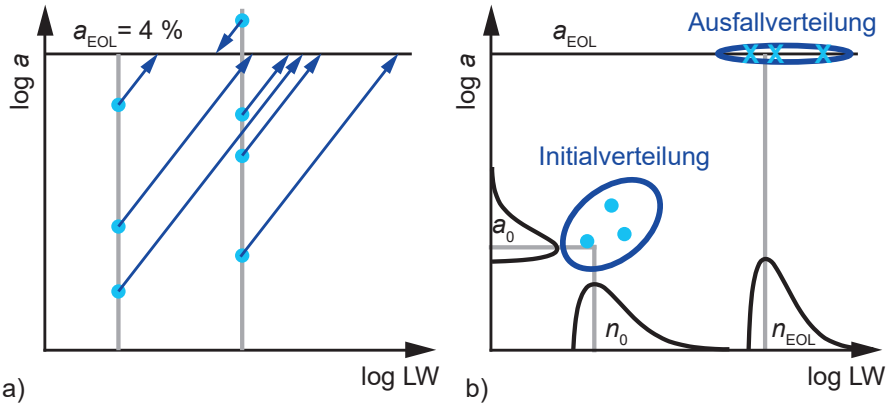


Bild 4.15 Schematische Darstellung der Verteilungen für alle Zähne. a) Extrapolation auf EOL-Kriterium
 b) Initial- und Ausfallverteilung

Grübcheninitiierung kann eine Aussage über den möglichen Start der aBS getroffen werden. In den vorliegenden Versuchen wurden die Grübchen visuell früher entdeckt als mit der Messtechnik, woraus deutlich wird, dass die Messtechnik eine Herausforderung für die Anwendung der aBS in der Praxis darstellt. Ausgewertet wird diese Grübcheninitiierung über die ersten Messpunkte aus den Degradationspfaden. Da in dieser Arbeit bereits vorhandene Grübchenversuche auf Systemebene neu und erweitert ausgewertet werden, ist die Datenbasis lediglich für eine erste Analyse ausreichend. Für genauere Untersuchungen zur Ausfallverteilung aller Zähne müsste bereits an den Versuchen angegriffen und umfassender geprüft werden. Dieser Aspekt wird im letzten Teilkapitel aufgegriffen und analysiert.

4.4.1 Extrapolation auf EOL-Kriterium und Ausfallverteilung

Ziel der erweiterten Auswertung der Grübchenversuche ist es, eine Aussage über die Ausfallverteilung aller Zähne am Umfang eines Zahnrades zu treffen. Nur wenn die restlichen Zähne am Umfang des Zahnrades eine höhere Belastbarkeit als der Ausfallzahn aufweisen, ist die Variation der Belastung am Umfang und damit die Anwendung der vorgestellten aBS zur Steigerung der nutzbaren Restlebensdauer möglich. Ausgangsbasis für diese Analyse sind die Messpunkte der Grübchen am Ende der Prüfläufe der sieben Ritzel. Hier liegen jeweils die Grübchengröße und die dazugehörige Lastwechselanzahl vor. In Bild 4.15a sind diese Punkte über die hellblauen Kreise verdeutlicht. Beispielhaft sind zwei Wellen dargestellt. Die grauen vertikalen Linien geben die Lastwechselzahl beim Ende des Prüflaufs an. Zu diesem Zeitpunkt sind mehrere Grübchen am Umfang des Zahnrades vorhanden, welche un-

terschiedliche Größen aufweisen. Es resultieren daher auf der vertikalen Linie verteilte hellblaue Kreise. Für eine Aussage über den Ausfall aller Zähne müssen diese Messpunkte auf das EOL-Kriterium 4 % Grübchenfläche extrapoliert werden. Beim exponentiellen Wachstum der Grübchen ist dies mit lediglich einem Messpunkt nicht möglich. Dies ist unter anderem ein Grund, warum die Degradationspfade im vorherigen Teilkapitel im doppelt-logarithmischen Diagramm untersucht werden. Die Extrapolation wird dadurch deutlich vereinfacht, da für den linearen Verlauf lediglich ein Punkt sowie die Steigung der Gerade notwendig sind. Bezogen auf das Bild 4.15a bedeutet dies, dass alle hellblauen Kreise mit einer definierten Steigung parallel auf das EOL-Kriterium verschoben werden können. Dies ist über die dunkelblauen Pfeile angedeutet. Für die Auswertung der Ausfallverteilung der Beispielverzahnung können damit alle 42 Grübchen an den sieben Ritzeln verwendet werden.

Mit den 42 vorliegenden Messpunkten wird eine Extrapolation durchgeführt. Die Streuung der Degradationspfade wird über die unterschiedlichen Messpunkte, welche als Ausgangsbasis für die lineare Extrapolation verwendet werden, berücksichtigt. Auf eine zusätzliche Variation der Steigung wird verzichtet, um die Streuung nicht doppelt abzubilden. Als Steigung wird daher immer der Gesamt-Median von 3,5 verwendet, da sich im vorherigen Teilkapitel kein signifikanter Unterschied der Steigungen innerhalb der Grübchen-Gruppen gezeigt hat, vgl. Bild 4.13. Dies ist auch von Vorteil für die Prognose der nutzbaren Restlebensdauer im Betrieb. Wird hier ein initiales Grübchen erkannt und lokalisiert, ist nicht bekannt, ob es sich um ein Ausfallgrübchen handelt oder nicht. Aus diesem Grund kann lediglich der aktuelle Messpunkt über die Steigung in das EOL-Kriterium verschoben werden.

In Bild 4.16 ist die zugehörige Ausfallverteilung aller Grübchen im Vergleich zur Auswertung nach dem Stand der Technik, also nur mit den Ausfallgrübchen aufgeführt. Für beide Auswertungen wird der berechnete Median aus dem vorherigen Abschnitt verwendet, um die Messpunkte am Ende des Prüflaufs auf das EOL-Kriterium von 4 % Grübchenfläche zu beziehen. Dies muss auch für die Auswertung nach dem Stand der Technik vorgenommen werden, da mit dem Versuchsende nie exakt die 4 % Grübchenfläche getroffen wird. Die Extrapolation wird daher für alle Grübchen der sieben Ritzel vorgenommen. Für die Auswertung nach dem Stand der Technik wird lediglich die Extrapolation der sieben Ausfallgrübchen betrachtet und für die erweiterte Auswertung alle Grübchen am Umfang in die Verteilung aufgenommen. Die dazugehörigen Verteilungsparameter sind in Tabelle 4.6 aufgeführt. Die Verteilungsidentifikation ergab die Weibull-Verteilung, was auch mit der Literatur übereinstimmt [Sta+99; Bes20]. Die Daten der Extrapolation sind in Anhang 8.4 zu finden, wobei die Ausfallgrübchen fett hervorgehoben sind.

Die Verteilung der Ausfallgrübchen entspricht dem Systemausfall des Zahnrades und somit der Auswertung nach dem Stand der Technik. Der Formparameter b ist mit 13,2 allerdings deutlich höher als in der Literatur, wo Werte von 3,2 [Sta+99] und 1,1 bis 1,5 für eine dreiparametrische Weibullverteilung [BL04] genannt sind. Bei

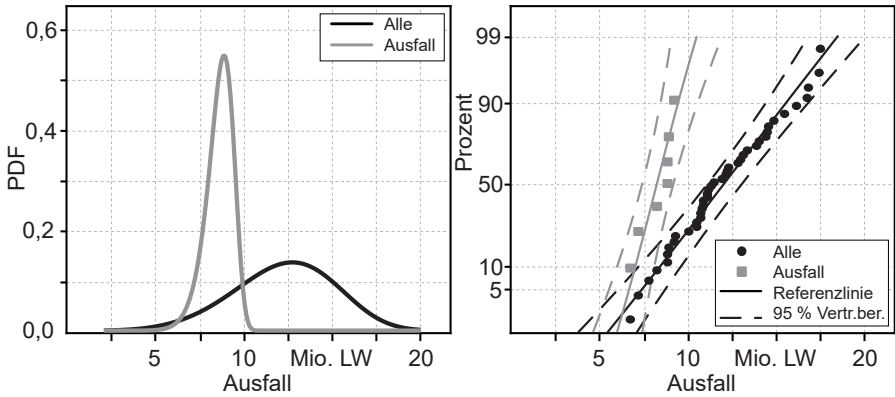


Bild 4.16 Dichtefunktion und Wahrscheinlichkeitsnetz der extrapolierten Daten; Vergleich Ausfallgrübchen (grau) mit allen Grübchen am Umfang (schwarz)

Tabelle 4.6 Weibull-Verteilungsparameter der Ausfallverteilungen

Datenbasis	Formparameter b	Charakteristische Lebensdauer T
Alle Grübchen mit Steigung 3,5	4,8	13,3e6
Ausfallgrübchen mit Steigung 3,5	13,2	8,9e6

Stahl [Sta+99] liegt eine extrem hohe Datenbasis zugrunde, jedoch werden Testverzahnungen verwendet, welche explizit für den Grübchenausfall optimiert sind und keinen ausgeprägten Degradationsverlauf zeigen. Die vorliegenden Versuche wurden dagegen mit einer Serienverzahnung durchgeführt, die ein ausgeprägtes Degradationsverhalten zeigt. Dies kann ein Grund für die Differenz im Formparameter darstellen. Zudem wurden bei den vorliegenden Versuchen eine Beschleunigung durch die axiale Verschiebung der Flanken vorgenommen. Hierdurch wird die Pressung auf der Zahnflanke erhöht, was möglicherweise zu einer geringeren Streuung und damit einem höheren Formparameter führt. Auch führt eine kleine Stichprobe bei der MLE zu einer Überschätzung des Formparameters, was in diesem Fall der lediglich sieben Ritzel zutreffen kann [CZC17]. Um die Aussagekraft der Verteilung zu steigern, sollten in Zukunft weitere Versuche mit der Serienverzahnung vorgenommen werden und auch ein Fokus auf die Auswirkungen der Test-Beschleunigung gelegt werden. Bei den Versuchen wurde keine Anpassung der Mikrogeometrie der Verzahnung vorgenommen und damit auch die Verzahnungskorrekturen wie Breitenballigkeit bei der axialen Verschiebung nicht berücksichtigt. Vor den Versuchen wurde jedoch das Tragbild mittels Tragbildlack analysiert und die Verschiebung damit le-

gitimiert. In der vorliegenden Arbeit soll lediglich eine erste erweiterte Auswertung unternommen werden, um die Realisierbarkeit der aBS zu analysieren. Hierfür ist die vorhandene Datenbasis ausreichend.

Die Verteilung aller Grübchen am Umfang liegt deutlich weiter rechts und somit bei höheren charakteristischen Lebensdauern. Zudem ist der Formparameter deutlich kleiner, woraus eine flachere Verteilung resultiert. Diese flachere Verteilung und höhere charakteristische Lebensdauer ist von Vorteil für die aBS. Durch dieses Ergebnis wird bestätigt, dass die anderen Zähne am Umfang eine höhere Belastbarkeit aufweisen. Zudem muss beachtet werden, dass in der Verteilung lediglich alle vorgeschädigten Zähne enthalten sind. Über die sieben untersuchten Ritzel existieren noch 105 weitere Zähne, die vollkommen intakt sind und somit keine Grübchen aufweisen. Mit der vorliegenden Datenbasis ist keine Aussage über das Erscheinen von Grübchen an diesen Zähnen oder das Wachstum dieser möglich. Es kann lediglich daraus geschlossen werden, dass die Verteilung noch flacher wird und die charakteristische Lebensdauer weiter nach rechts verschoben wird.

Zusammenfassend wird die Hypothese, dass die einzelnen Zähne einer erheblichen Streuung unterliegen und dadurch unterschiedliche Belastbarkeiten aufweisen, bestätigt. Die Ausfallverteilungen zeigen deutlich, dass durch die erweiterte Auswertung mit allen Grübchen am Umfang höhere charakteristische Lebensdauern bestimmt werden können und die Verteilung flacher wird. Damit ist der Grundstein für die aBS und die damit verbundene Belastungsvariation am Umfang gelegt.

4.4.2 Verteilungen über die initiale Grübchengröße und den Erscheinungszeitpunkt

Die Bestimmung der Ausfallverteilung ist in der Zuverlässigkeitstechnik eine gängige Vorgehensweise. Für die vorgestellte aBS ist allerdings nicht nur von Bedeutung, wann die einzelnen Zähne ausfallen, sondern auch, wann die Grübchen auftreten und mit welcher Größe. Dies wird nachfolgend anhand des Streudiagramms in Bild 4.17 untersucht. Aufgetragen sind von den 13 Grübchen mit Degradationspfad jeweils die ersten Messpunkte über der Lastwechselzahl in Millionen. Die fünf Ausfallgrübchen sind als Kreise dargestellt und die restlichen Grübchen am Umfang durch Rauten. Hierbei muss jedoch beachtet werden, dass die Messwerte lediglich alle 0,25 Millionen Lastwechsel erzeugt wurden. Die exakte Initiierung der Grübchen ist daher nicht bekannt.

Bereits bei der Analyse der Grübchen am Umfang hat sich gezeigt, dass das initiale Grübchen meist nicht zum Ausfall führt, sondern ein Grübchen, welches zu einem späteren Zeitpunkt erscheint. Dies wird in dem Streudiagramm ebenfalls deutlich. Die Ausfallgrübchen entstehen tendenziell etwas später. Zusätzlich zeigt sich, dass die initiale Grübchengröße in der Regel kleiner 1,2 % ist. Lediglich ein Ausfallgrübchen zeigt als initialen Wert 3,25 % und wird daher als Ausreißer angesehen.

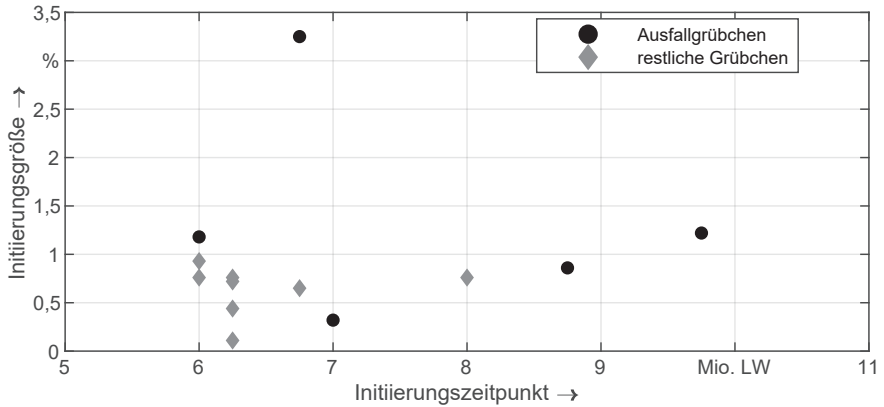


Bild 4.17 Streudiagramm der initialen Grübchen. Grübchengröße über der Lastwechselzahl

Tabelle 4.7 Weibull-Verteilungsparameter der initialen Grübchen: Erscheinungszeitpunkt (n_0) und Grübchengröße (a_0)

Gruppe	Skala n_0	Formparameter n_0	Skala a_0	Formparameter a_0
Alle Grübchen	7,4	5,7	1,0	1,4
Ausfallgrübchen	8,2	6,0	1,5	1,5
Restliche Grübchen	6,8	8,9	0,7	3,0

Hier ist nicht mehr nachvollziehbar, ob sich das Grübchen durch einen ausgeprägten Riss früher angebahnt hat, vgl. Bild 4.11, aber der erste Ausbruch erst später stattgefunden hat.

Sowohl für die initiale Grübchengröße a_0 als auch für den Erscheinungszeitpunkt n_0 werden Verteilungen erstellt. Es werden alle Grübchen zusammen betrachtet, sowie eine Unterscheidung zwischen Ausfallgrübchen und den restlichen Grübchen am Umfang getroffen. Die Verteilungsidentifikation für die initiale Grübchengröße ergab eine Weibull-Verteilung. Bei der initialen Lastwechselzahl ist die Identifikation nicht eindeutig. Bei den Gruppen Ausfallgrübchen und restliche Grübchen ist die Anpassungsgüte zwischen Weibull- und Lognormalverteilung identisch. Bei allen Grübchen ist die Anpassung an eine Lognormalverteilung geringfügig besser als für die Weibullverteilung. Es wird jedoch von keiner praktischen Relevanz ausgegangen. Für eine bessere Vergleichbarkeit wird auch hier die Weibullverteilung gewählt. Die Verteilungsparameter der drei Gruppen und jeweils für Erscheinungszeitpunkt und Grübchengröße sind in Tabelle 4.7 zusammengefasst.

Die Dichtefunktionen der Lastwechselanzahl sowie der Grübchengrößen beim

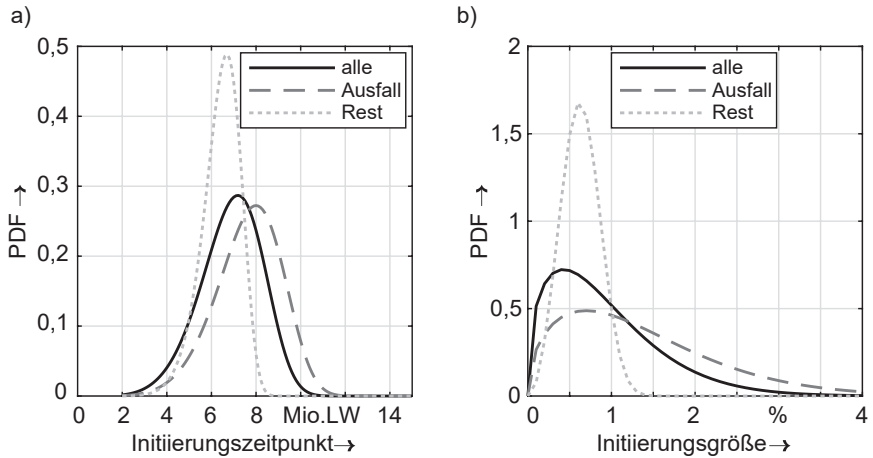


Bild 4.18 Dichtefunktion der Grübchen-Initialisierung. a) Lastwechselanzahl bei initialem Grübchenausbruch. b) Grübchengröße bei initialem Ausbruch

initialen Ausbruch sind in Bild 4.18 dargestellt. In Teil a) ist das Diagramm für die Lastwechselanzahl der drei beschriebenen Gruppen enthalten. Hier ist wiederum ersichtlich, dass die Ausfallgrübchen tendenziell später auftreten. Entsprechend muss hier eine etwas größere Steigung des Degradationspfades vorliegen oder der initiale Ausbruch eine größere Fläche aufweisen. In Kapitel 4.3 konnte gezeigt werden, dass die Steigung der Degradationspfade der Ausfallgrübchen nicht signifikant höher ist als die Steigung der restlichen Grübchen am Umfang. Daher liegt die zweite Vermutung nahe, dass die initialen Ausbrüche bei den Ausfallgrübchen größer sind.

In Bild 4.18b zeigt sich für die initiale Größe der Ausfallgrübchen eine deutlich flachere Verteilung. Zudem liegt der Median bei größeren Ausbrüchen. Aus diesem Grund wird auch hier ein Hypothesentest durchgeführt. Da wiederum keine Normalverteilung vorliegt, wird der Mood-Median-Test durchgeführt. Dieser ergibt einen p -Wert von 0,015, weshalb die Nullhypothese abgelehnt wird. Es liegt ein signifikanter Unterschied zwischen den Ausbrüchen der Ausfallgrübchen und den restlichen Grübchen am Umfang vor.

Für die initiale Lastwechselanzahl wird ebenfalls ein Mood-Median-Test durchgeführt. Auch hier wird die Nullhypothese mit einem p -Wert von 0,053 abgelehnt. Dementsprechend ist der initiale Ausbruch der Ausfallgrübchen sowohl signifikant später als auch signifikant größer als die Ausbrüche der restlichen Grübchen am Umfang.

Auch bei dieser Betrachtung werden lediglich die Daten von bereits vorgeschädigten oder ausgefallenen Zähnen berücksichtigt. Für eine ganzheitliche Untersu-

chung der Einzelzähne müssten die vollkommen intakten Zähne mit in die Analyse aufgenommen werden. Hierzu liegen allerdings zum jetzigen Zeitpunkt keine gestützten Daten vor, wodurch die Analyse nur für die vorgeschädigten Zähne vorgenommen wird. Für genauere Aussagen über alle Zähne muss bereits an der Prüfplanung angesetzt und der Fokus dahingehend gelegt werden. Dies soll im folgenden Abschnitt in Ansätzen vorgestellt werden.

4.4.3 Notwendige Untersuchungen zur Erfassung der Gesamtverteilung

Mit den aktuell vorliegenden Daten ist eine aussagekräftige Beurteilung der Gesamtverteilung aller Zähne bezüglich der Flankenermüdung Grübchen nicht möglich. Die Anzahl der vollkommen intakten Zähne ist sehr hoch und in der Ausfallverteilung noch nicht berücksichtigt. Um das Potenzial der aBS jedoch ganzheitlich betrachten zu können, ist die Gesamtverteilung essentiell, weshalb hier weitere Untersuchungen anzustreben sind. Im Folgenden werden daher einige Anforderungen aufgeführt, welche für die Untersuchungen zur Erfassung der Gesamtverteilung notwendig sind.

Bei den Versuchen auf einem Lastprüfstand sollte der Fokus direkt auf alle Grübchen am Umfang gelegt werden und daher Abdrücke von allen Grübchen an Rad und Ritzel im Intervall von 0,25 Mio. LW genommen werden. Zudem wird für zukünftige Versuchsreihen vorgeschlagen, die Versuche nicht beim Erreichen des 4 % Kriteriums zu beenden. Es sollte bis nahe an den Totalausfall getestet werden, bei welchem Flankenbrüche aus den Grübchen resultieren und ein weiterer Betrieb nicht möglich ist. Durch diese Maßnahme können von den restlichen Grübchen am Umfang deutlich mehr Daten aufgenommen werden und auch die Anzahl der Grübchen am Umfang wird deutlich steigen. Möglicherweise erreicht somit sogar ein zweites Grübchen am Umfang das genormte EOL-Kriterium von 4 % Grübchenfläche.

Ziel dieser Untersuchungen sollen deutlich mehr und genauere Degradationsverläufe der unterschiedlichen Grübchen sein. Zudem ist eine präzisere Aussage über die Entstehungszeit und -größe der Grübchen möglich sowie über die Steigung und die Ausfallwahrscheinlichkeit.

Alternativ wäre auch denkbar, Versuche am Einzelzahn durchzuführen. Für die Schadensart Zahnbruch wird dies bereits an Pulsator-Prüfständen durchgeführt. Hierbei werden je Versuch zwei Zähne des Zahnrad eingespant und auf Biegung belastet bis der schwächere der beiden Zähne bricht. Somit können aus einem Zahnrad deutlich mehr Zähne geprüft werden und eine genauere Aussage über die Gesamtstreuung getroffen werden. Bei diesen Versuchen zum Zahnbruch hat sich gezeigt, dass die Ausfallzeiten der Pulsator-Versuche im Vergleich zu Laufversuchen, bei welchen immer der schwächste Zahn des Zahnrades bricht, um 10 % höher liegen [Sta+99]. Diese 10 % können jedoch nicht direkt der Streuung der Belastbarkeit angerechnet werden, da systematische Unterschiede zwischen Pulsator und Laufver-

such vorliegen, wie beispielsweise die Änderung des Kraftangriffspunkts und der dynamischen Zusatzkräfte. Soll ein vergleichbarer Einzelzahnprüfstand für Grübchen eingesetzt werden, muss die Abhängigkeit der Grübchen, siehe Abschnitt 4.2, sowie die für die Schädigung erforderliche Abrollbewegung und das Vorhandensein von Öl berücksichtigt werden. Eine mögliche Umsetzung kann durch das Heilen von vorgeschädigten Zähnen innerhalb eines Laufversuchs erreicht werden. Hierfür könnte beispielsweise ein Zahnrad mit Wechselzähnen verwendet werden, wobei ein Zahn ausgetauscht wird, sobald ein kleines Grübchen erkannt wird. Die Idee eines solchen Zahnrades ist jedoch durch ein Patent geschützt [ERM12].

4.5 Zwischenfazit zur Grübchenauswertung

Die Auswertung von Grübchenversuchen nach dem Stand der Technik berücksichtigt lediglich die Streuung der schwächsten Zähne von unterschiedlichen Zahnrädern. Für die vorgestellte adaptive Betriebsstrategie ist jedoch eine genauere Kenntnis der Streuung der individuellen Zähne notwendig, welche in diesem Kapitel betrachtet wird. Durch eine Erweiterung der Auswertung auf alle Zähne am Umfang des Zahnrades wird diese Streuung aufgezeigt und damit das große Potenzial für die aBS belegt.

Aufgezeigt wird das Potenzial bei der Betrachtung der Anzahl und Lage der Grübchen am Umfang des Zahnrades. Über 70 % der Zähne weisen am Ende der Prüfzeit keine Grübchen auf und sind somit vollkommen intakt. Diese Zähne können daher das Drehmoment kompensieren und für eine gleichbleibende mittlere Leistung am Antriebsstrang sorgen. Zudem liegen die 4 bis 10 Grübchen an den 7 untersuchten Wellen mit hoher Wahrscheinlichkeit an benachbarten Flanken. Es liegt damit eine Abhängigkeit des Ausfallmechanismus vor, was bezogen auf die aBS einen weiteren Vorteil bietet. Liegen Grübchen am Umfang lokal beieinander, werden diese je nach Eingangssignal der aBS automatisch geringer belastet.

Die Analyse der Degradationspfade der Grübchen zeigt einen exponentiellen Verlauf, welcher im doppelt-logarithmischen Diagramm eine Gerade ergibt. Ein Unterschied zwischen der Steigung von Ausfallgrübchen und kleineren Grübchen am Umfang des Zahnrades konnte hierbei nicht festgestellt werden. Dies unterstreicht das große Potenzial der aBS, da die vollkommen intakten Zähne am Umfang des Zahnrades zuerst die Schritte Grübcheninitiierung sowie Degradation durchlaufen müssen, bis diese ebenfalls ausfallen. Damit ist die Belastbarkeit dieser Zähne mutmaßlich deutlich höher als die der Ausfallzähne.

Mit der Größe der Grübchen am Ende der Versuche in Kombination mit der mittleren Steigung des Degradationspfades wird eine Ausfallverteilung aller Grübchen berechnet. Diese zeigt eine deutlich größere Streuung als die Auswertung nach dem Stand der Technik. Zudem werden weitere Verteilungen für die Initiierung der Grübchen aufgestellt, welche sowohl die Grübchengröße als auch den Zeitpunkt der

Initiierung berücksichtigen. Hier wird ein signifikanter Unterschied zwischen den Ausfallgrübchen und den restlichen Grübchen am Umfang des Zahnrades deutlich. Die Ausfallgrübchen werden später initiiert und haben eine größere Initiierungsfläche.

Bei der Analyse der Verteilungen werden lediglich die vorhandenen Grübchen am Umfang der Zahnräder berücksichtigt. Zu den vollkommen intakten Zähnen liegen keine Informationen hinsichtlich der Grübcheninitiierung vor, weshalb hier keine Prognose möglich ist. Aus diesem Grund besteht weiterer Forschungsbedarf bezüglich des Schadensmechanismus Grübchen, um die Streuung der Grundgesamtheit der Einzelzähne besser zu verstehen.

Nichtsdestotrotz wird mit der berechneten Verteilung über alle Grübchen am Zahnrad sowie der erkannten Abhängigkeit im Anschluss die nutzbare Restlebensdauer mit und ohne aBS prognostiziert. Hierfür wird zuerst eine Simulationsumgebung aufgebaut, mit welcher im Anschluss eine Parameterstudie zu den Einflussfaktoren durchgeführt wird. Damit ist es möglich, das theoretische Potenzial der aBS zu bestimmen und zu optimieren. Das nächste Kapitel widmet sich daher Forschungsfrage drei: „Die Einflussfaktoren auf das Potenzial der adaptiven Betriebsstrategie lassen sich identifizieren und die Effekte sowie die RUL simulativ quantifizieren.“

Kapitel 5

Ermittlung der möglichen Lebensdauersteigerung

Die erweiterte Auswertung von Grübchenversuchen zeigt ein sehr großes Potenzial für die entwickelte adaptive Betriebsstrategie (aBS) auf. Aus diesem Grund soll im Folgenden die mögliche Steigerung der nutzbaren Restlebensdauer eingehender untersucht und quantifiziert werden. Die Steigerung durch die Anwendung der aBS kann durch unterschiedliche Herangehensweisen untersucht werden. Zum einen kann das Potenzial über Lebensdauerexperimente an Verzahnungen mit und ohne der Strategie ermittelt werden und zum anderen kann ein simulativer Ansatz gewählt werden. Nachteilig bei den Versuchen ist die sehr lange Versuchsdauer, welche durch die aBS sogar noch verlängert wird. Zudem sind für eine statistische Auswertung der Ergebnisse viele Prüflinge auf unterschiedlichen Lasthorizonten notwendig und das jeweils mit und ohne der aBS. Dadurch entsteht ein sehr großer Versuchsaufwand mit hohen Kosten und Testzeiten. Zusätzlich können damit lediglich Aussagen über dieses spezielle getestete System getroffen werden und keine allgemeingültigen Aussagen über die Machbarkeit der aBS. Bei diesen genannten Nachteilen wird zudem die versuchstechnische Realisierbarkeit nicht berücksichtigt. Im Versuch müssen die Grübchen detektiert, am Umfang lokalisiert und das Drehmoment entsprechend geregelt werden. Diese genaue Messung und Abstimmung mit der Regelung sind mit dem aktuellen Stand der Technik nicht möglich. Aus diesem Grund wird in der vorliegenden Arbeit auf eine simulative Untersuchung zurückgegriffen. Innerhalb der Simulation können zahlreiche Parameterkombinationen bei geringerem zeitlichen Aufwand untersucht werden. Zudem wird über eine Simulation eine erste Quantifizierung des Potenzials möglich, was als Basis für nachfolgende Versuche dient und

den Aufwand legitimieren soll. Ziel der Simulation ist, eine Aussage über die Einflussfaktoren auf die Steigerung der RUL durch die aBS treffen zu können, sowie vorhandene Anwendungsbeispiele auf eine mögliche Anwendung hin untersuchen zu können. Werden neue Projekte geplant, können zudem die Informationen aus der simulativen Studie verwendet werden, um mögliche Eingangsparameter gezielt zu wählen und somit eine Lebensdauersteigerung zu erreichen. Aus diesem Grund wird das Simulationsmodell generisch aufgebaut und basiert nicht auf den Ergebnissen aus Kapitel 4. Die Untersuchung des Anwendungsbeispiels innerhalb des Simulationsmodells wird gesondert in Kapitel 6 vorgenommen.

Im vorliegenden Kapitel wird im ersten Abschnitt 5.1 das Simulationsmodell zusammen mit den definierten Randbedingungen und Annahmen erläutert. Der zweite Abschnitt 5.2 zeigt die unterschiedlichen Eingangsparameter des Modells auf. Für die Plausibilisierung der Simulation werden die Zusammenhänge der unterschiedlichen Eingangsparameter verdeutlicht und untersucht. Dies erfolgt im dritten Abschnitt 5.3. Abschließend folgt in Abschnitt 5.4 eine Parameterstudie, um die Einflüsse auf das Potenzial der aBS in einer Sensitivitätsanalyse zu untersuchen.

5.1 Simulationsmodell

Mit dem Simulationsmodell soll das Potenzial der adaptiven Betriebsstrategie und damit die mögliche Steigerung der nutzbaren Restlebensdauer von Zahnrädern quantifiziert werden. Der wesentliche Unterschied zum Stand der Technik liegt somit in der Berücksichtigung aller Zähne am Umfang des Zahnrades. Nur damit können die unterschiedlichen Momente an den individuellen Zähnen am Umfang des Zahnrades abgebildet werden. Über das Lebensdauermodell nach Wöhler wird dementsprechend nicht die Lebensdauer vom Zahnrad, sondern von jedem einzelnen Zahn berechnet. Das System Zahnrad fällt folglich aus, sobald ein Zahn das EOL-Kriterium von 4 % Grübchenfläche erreicht hat. Über diese Herangehensweise ist ein Vergleich mit und ohne aBS einfach umsetzbar und die Quantifizierung des Potenzials möglich. Da es sich um eine erste Potenzialabschätzung der aBS handelt, wird innerhalb der Simulation lediglich eine Laststufe am Getriebeeingang betrachtet.

Für die analytische Berechnung der Lebensdauersteigerung durch die aBS sind drei Blöcke notwendig, Block I: Initialisierung, Block II: Monte Carlo Simulation, Block III: Auswertung. Diese Blöcke werden innerhalb vom Simulationsmodell zudem in mehrere Schritte unterteilt, wie in dem Ablaufschema in Bild 5.1 ersichtlich ist. An dieser Stelle soll ein kurzer Überblick über die einzelnen Schritte gegeben werden. In den nachfolgenden Abschnitten werden die Schritte detailliert diskutiert und die Randbedingungen und Annahmen erläutert.

Im Block I wird das Simulationsmodell initialisiert. Hier werden im Schritt I.1 die Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Grübchen definiert. Wichtig sind hierbei die Initiierung der Grübchen, was mit einer initialen Größe a_0 und einem Initiierungs-

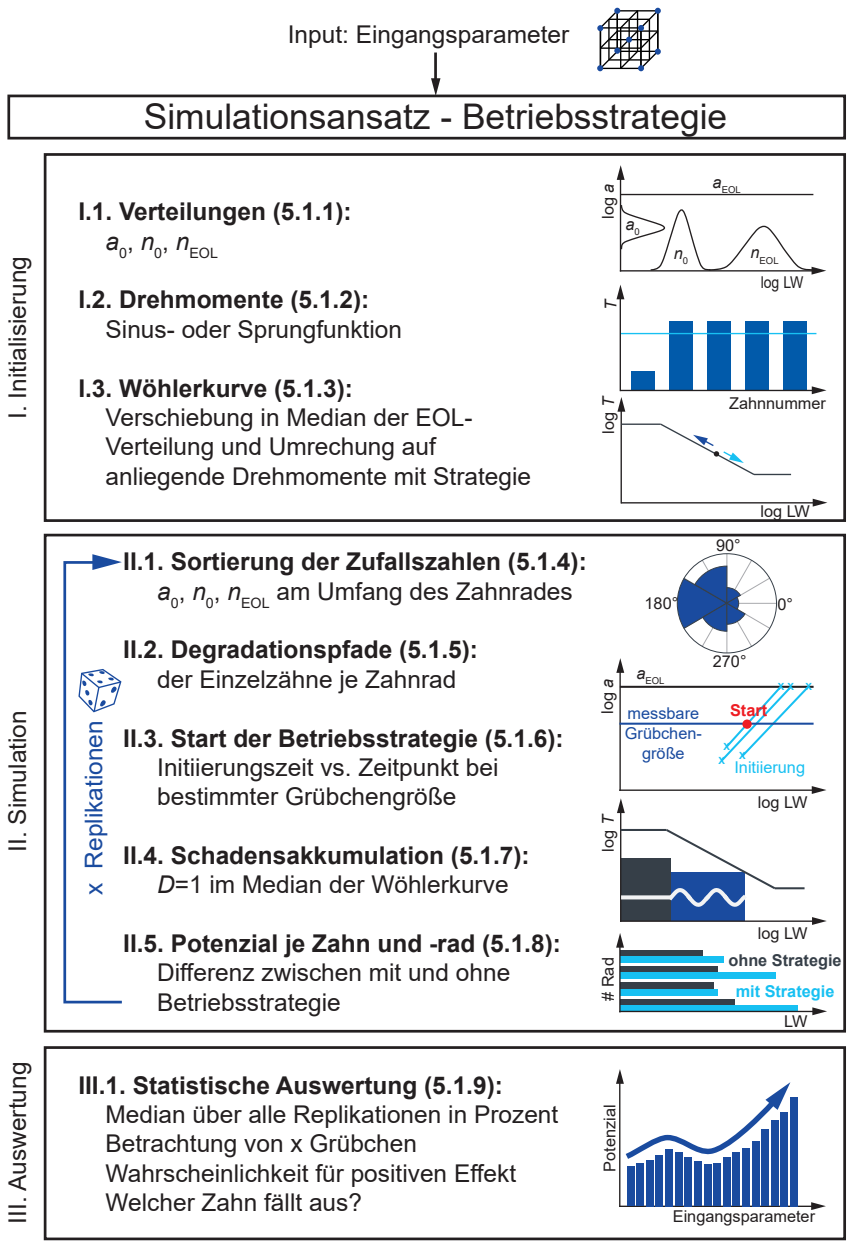


Bild 5.1 Ablauf der Simulation

zeitpunkt n_0 definiert wird, sowie der Ausfall der Zähne bei einer Grübchengröße von $a_{EOL} = 4\%$ und der Ausfallzeit n_{EOL} . Der Schritt I.2 wendet die aBS auf das Zahnrad an, indem das Drehmoment für jeden individuellen Zahn am Umfang des Zahnrades berechnet wird. Dies kann mit unterschiedlichen Eingangssignalen erfolgen, zum Beispiel einer Sprung- oder einer Sinusfunktion. Im Schritt I.3 werden diese Drehmomente über eine Wöhlerkurve in ertragbare Lastwechselzahlen umgerechnet. Die Wöhlerkurve wird hierfür in den Median der Ausfallverteilung verschoben.

Der Block II beinhaltet die eigentliche Simulation der Ausfallzeiten mit und ohne aBS und damit die Steigerung der RUL. Aufgeteilt ist diese Simulation in fünf integrierte Schritte. Im ersten Schritt II.1 werden aus den zuvor definierten Weibull-Verteilungen Pseudo-Zufallszahlen gezogen und am Umfang des Zahnrades angeordnet. Jedem individuellen Zahn werden also drei Parameter zugeordnet, die Initiierungsgröße a_0 , der Initiierungszeitpunkt n_0 und der Ausfallzeitpunkt n_{EOL} . Diese Parameterwerte werden der Größe nach sortiert und am Umfang des Zahnrades angeordnet. Hierbei wird die Unterscheidung zwischen abhängigen und konkurrierenden Grübchen aus Kapitel 4.2 berücksichtigt. In Schritt II.2 werden aus den gezogenen Zufallszahlen Degradationspfade für die einzelnen Zähne erzeugt, indem im doppelt-logarithmischen Diagramm eine Gerade zwischen dem Initiierungspunkt und dem Ausfallpunkt erzeugt wird. Diese Degradationspfade entsprechen demnach dem Verlauf ohne aBS. Die Degradationspfade der Einzelzähne sind wichtig, um im Schritt II.3 den Start der aBS zu definieren. Dieser ist abhängig von der messbaren Grübchengröße a_{mess} und dem Initiierungszeitpunkt n_0 des Grübchens. Ist die Lastwechselanzahl des Starts der aBS bekannt, wird im Schritt II.4 für jeden Zahn eine Schadensakkumulation vorgenommen. Der theoretische Ausfall von $D = 1$ wird hierbei im Median der Wöhlerkurve definiert, sodass jeder Zahn bei einem individuellen D ausfällt. Mit diesem Vorgehen wird die Streuung der Belastbarkeit in der Simulation berücksichtigt. Im Schritt II.5 wird für jeden Zahn und auch für jedes Zahnrad die Veränderung der Lebensdauer mit und ohne aBS berechnet. An dieser Stelle ist damit der Simulationsdurchlauf eines Zahnrades abgeschlossen und das Potenzial der aBS über die Steigerung der nutzbaren Restlebensdauer quantifiziert. Das Ergebnis basiert allerdings auf Pseudo-Zufallszahlen aus den drei Verteilungen, weshalb die Simulation mehrfach durchlaufen werden muss. Durch diese Replikation der Simulation kann über das Gesetz der Großen Zahlen eine präzise Aussage über das Potenzial der aBS mit einem geringen numerischen Fehler erreicht werden. Aus diesem Grund wurde eine Monte Carlo Simulation (MCS) innerhalb von Block II durchgeführt und die Anzahl der Replikationen auf 100.000 gesetzt, wodurch im Ergebnis der Simulation keine Abweichung aufgrund der Pseudo-Zufallszahlen erwartet wird.

In Block III erfolgt die statistische Auswertung der MCS mit allen Replikationen. Hier wird unter anderem der Median über alle Replikationen gebildet und so die

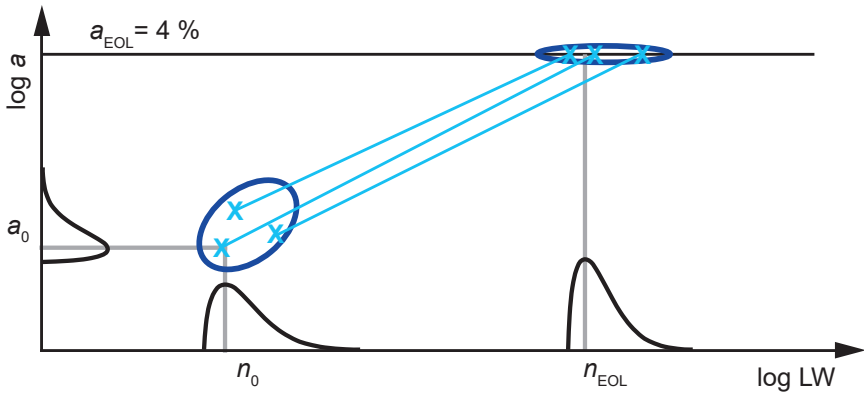


Bild 5.2 Notwendige Verteilungen innerhalb der Simulation

prozentuale Steigerung der nutzbaren Restlebensdauer durch die aBS untersucht. Da für alle Zähne am Umfang des Zahnrades ein initiales Grübchen definiert wird, liegt eine konservative Auswertung vor. Aus diesem Grund wird zusätzlich eine Auswertung mit lediglich zwischen einem und 13 Grübchen am Umfang durchgeführt. Des Weiteren wird die Wahrscheinlichkeit betrachtet, mit welcher eine positive Veränderung auf die Lebensdauer aus der aBS resultiert und auch, welcher Zahn zum Ausfall führt.

5.1.1 Initial- und Ausfallverteilung

Im ersten Schritt des Simulationsansatzes (I.1) müssen drei Verteilungen definiert werden. Diese sind in Bild 5.2 aufgezeigt und betreffen zum einen die Initiierung der Grübchen und den Ausfall. Bei der Initiierung sind zwei Verteilungen notwendig, da die Initiierungsgröße a_0 sowie der Initiierungszeitpunkt n_0 für jeden Zahn bestimmt werden muss. Aus diesen beiden Verteilungen resultiert ein Initiierungsbereich, welcher über die blaue Ellipse angedeutet ist. Für den Ausfall ist mit n_{EOL} eine Verteilung ausreichend, da die Grübchengröße dort laut [ISO6336-5] mit $a_{EOL} = 4\%$ festgelegt ist.

Das Bild 5.2 zeigt schematisch die drei Verteilungen auf. Innerhalb der Simulation wird die Weibullverteilung verwendet, da diese sehr flexibel ist und unterschiedliche Formen annehmen kann [BL04]. Die Parameter der 2-parametrischen Weibullverteilung dienen als Eingangsparameter für die Simulationsstudie, um die Einflüsse der Lage und Streuung der einzelnen Verteilung abdecken zu können. Wichtig ist hierbei, dass die Lage der n_0 -Verteilung in Abhängigkeit der Lage der n_{EOL} -Verteilung

definiert wird. Dies wird über $n_{0,Faktor}$ und die folgende Normierung realisiert:

$$n_{0,Faktor} = \frac{T_{n0}}{T_{nEOOL}} \quad (5.1)$$

Dieser Schritt wird eingeführt, um bei der späteren Parameter-Kombinatorik in der Sensitivitätsanalyse zu vermeiden, dass die Lage der n_0 -Verteilung größer als die Lage der n_{EOOL} -Verteilung wird und dadurch negative Degradationspfade resultieren. Eine Überlappung der beiden Verteilungen wird dadurch allerdings nicht ausgeschlossen. Der $n_{0,Faktor}$ ist ein Maß für die Wachstumsgeschwindigkeit der Grübchen, wenn gleichzeitig die Initialisierungsgröße a_0 berücksichtigt wird. Jeweils eine Zufallszahl aus der n_0 und a_0 -Verteilung ergibt den Initiierungspunkt des Grübchens, welcher zusammen mit dem Ausfallzeitpunkt bei $a_{EOOL} = 4\%$ eine Gerade im doppellogarithmischen Diagramm ergibt, siehe Bild 5.2. Es ergibt sich somit eine Wolke an Initiierungspunkten, welche über die charakteristische Lebensdauer T und den Formparameter b beeinflusst wird. Als **Annahmen und Randbedingungen** in Schritt 1 Initial- und Ausfallverteilung ergeben sich daraus die folgenden Punkte:

- **Es werden ausschließlich fortschreitende Grübchen am Ritzel betrachtet.**
Grübchen treten hauptsächlich am Ritzel auf, da eine höhere Drehzahl und damit eine höhere Lastwechselanzahl als am Rad vorliegt [SHS18; KBK76]. In der Simulation wird daher ausschließlich ein Zahnrad betrachtet und nicht ein gesamtes Zahnradpaar. Zudem werden durch die Initialisierung der Grübchen nur fortschreitende Grübchen abgedeckt. Einlaufgrübchen mit einem degresiven Verlauf des Wachstums werden nicht berücksichtigt.
- **Die Grundgesamtheit aller Zähne folgt einer Weibullverteilung.**
Aus der Literatur sind lediglich Ausfallverteilungen für den schwächsten Zahn bekannt [Sta+99], welche weibullverteilt sind. Die erweiterte Auswertung der Grübchenversuche in Kapitel 4 hat für die Grübcheninitiierung und den Ausfall ebenfalls eine Weibullverteilung aufgezeigt. Allerdings sind hier in die Auswertung zusätzlich zum schwächsten Zahn lediglich wenige weitere kleinere Grübchen am Umfang mit einbezogen. Eine Aussage über die Grundgesamtheit der Zähne kann nur beschränkt getroffen werden. Es wird daher angenommen, dass alle Zähne am Umfang des Zahnrades einer Weibullverteilung folgen und zwar für die Initiierung und auch den Ausfall. Die Verteilungsparameter werden für die Simulation abgeschätzt und eine zusätzliche Veränderung der Verteilung aufgrund von Geometrie, Werkstoff und Bearbeitungs-zustand über die Variation der Parameter in die Simulation integriert.
- **Jedem Zahn wird eine Initiierung und ein Ausfall zugeordnet.**
Da die Grundgesamtheit der Zähne nicht bekannt ist, kann aktuell keine Aussage getroffen werden, wann mit zusätzlichen Grübchen durch die Erhöhung

des Moments gerechnet werden muss. Aus diesem Grund wird eine konservative Abschätzung vorgenommen und jedem Zahn am Umfang des Zahnrades eine Initiierung und ein Ausfall zugeordnet. Je nach Größe von $n_{0,Faktor}$ ist damit beim Ausfall des Zahnrades an jedem Zahn ein Grübchen initiiert.

- **Der Initiierungszeitpunkt des Grübchens muss vor dem Ausfall liegen.**

Durch die Variation von $n_{0,Faktor}$ werden die Initial- und Ausfallverteilung zusammen oder auseinander geschoben. Liegen sie sehr nahe beieinander, existiert eine Überlappung und die Zufallszahl der n_0 -Verteilung kann größer sein als die Zufallszahl der n_{EOL} -Verteilung. Dies wird innerhalb von Schritt 5 der Simulation berücksichtigt (5.1.5).

5.1.2 Variation des Drehmoments

Der nächste Schritt innerhalb der Simulation (I.2) bezieht sich auf die Variation des Drehmoments innerhalb der aBS. Hierfür werden unterschiedliche Eingangssignale ES implementiert, welche für die erste Quantifizierung des Potentials einer Sprungfunktion bzw. einem Sinus folgen. Wichtig ist an dieser Stelle, dass die Zählung der Zähne am Umfang des Zahnrades immer beim schwächsten Zahn begonnen wird und die Nummerierung dann aufsteigt. Das Minimum der Drehmomentvariation liegt damit immer an Zahn 1 an.

Bei der Sinusfunktion wird die Periode genau auf eine Umdrehung des Zahnrads gelegt, damit das Minimum immer exakt beim Eingriff des schwächsten Zahnes anliegt. Das Moment je Zahn j berechnet sich damit über folgende Gleichung:

$$T_{sin} = -A \cdot \cos(2\pi/z \cdot (j - 1)) + T_m \quad (5.2)$$

Da der schwächste Zahn als Nummer eins definiert ist, muss das Minimum an dieser Stelle anliegen, was durch den $-\cos$ erreicht wird. Dann wird eine Schwingung mit Amplitude A dem mittleren Moment ohne aBS T_m überlagert. Für ein mittleres Moment von 200 Nm, eine Amplitude von 20 Nm und eine Zähnezahl z von 21 ist das anliegende Drehmoment je Zahn in Bild 5.3 dargestellt.

In diesem Diagramm wurde das Moment über jeden Zahn gemittelt. Es fällt jedoch auf, dass vor allem im Bereich der großen Gradienten, also am Durchgang von T_m , ein sehr großer Drehmoment-Bereich in einem Zahneingriff abgedeckt wird. Aus diesem Grund wurde innerhalb der Simulation nicht das Moment über den Zahneingriff gemittelt, sondern jeder Zahneingriff in fünf Zeitschritte unterteilt und anschließend die Schädigungssumme für einen Zahneingriff gebildet. Diese Mittelung stellt eine erste Abschätzung der Drehmomentbelastung je Zahn dar. In der Praxis muss jedoch die Profil- und Sprungüberdeckung der Verzahnung beachtet werden und der beim Abwälzen durchlaufene Drehmomentbereich. Zudem ist für eine genauere Betrachtung die Verknüpfung zwischen dem Zeitschritt des Drehmoment und

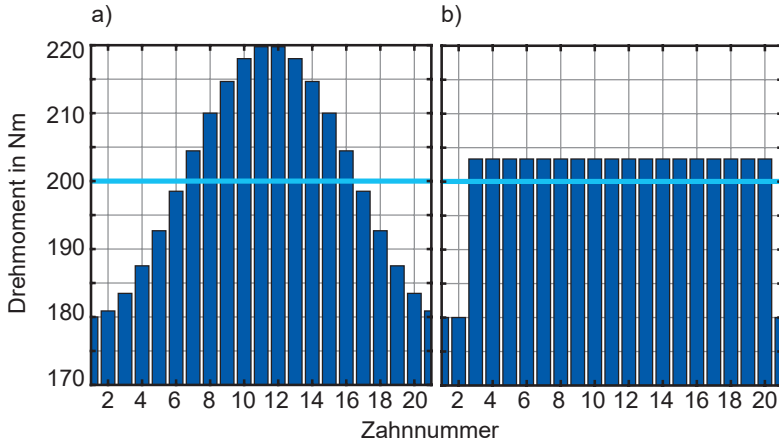


Bild 5.3 Drehmomente mit adaptiver Betriebsstrategie. a) Sinusfunktion b) Sprungfunktion mit 3 reduzierten Zähnen und Erhöhung der anderen Zähne

dem Bereich auf der Flanke notwendig. Damit wäre eine lokale Schadensakkumulation innerhalb der Zahnflanke möglich, wodurch zusätzlich die kritischen Flankenbereiche analysiert werden könnten.

Für die Sprungfunktion ergeben sich verschiedene Varianten. Gestartet wird mit einem idealen Sprung, welcher ausschließlich den schwächsten Zahn entlastet und alle anderen Zähne nur minimal höher belastet. Im weiteren wird die Breite dieses idealen Sprungs vergrößert, so dass bis zu fünf Zähne gleichzeitig entlastet werden. Dies wird durch die folgenden zwei Gleichungen erreicht:

$$T_l = T_m - A \quad (5.3)$$

$$T_h = \frac{(T_m \cdot z - S \cdot T_l)}{(z - S)} \quad (5.4)$$

T_l ist dabei das um die Amplitude A reduzierte Moment und T_h das an den anderen Zähnen erhöhte Moment. Diese Erhöhung ist abhängig von der Anzahl an Zähnen S , welche durch den Sprung reduziert werden. T_m ist das mittlere Moment, bzw. das Moment ohne aBS und z die Zähnezahl des Ritzels. Diese Verbreiterung der Sprungfunktion spielt für die Praxis eine bedeutende Rolle, da die Messung des schwächsten Zahnes und die Regelung der aBS hier weniger genau sein müssen. Innerhalb der Simulation wird der Sprung bis maximal fünf Zähne vorgenommen.

In Bild 5.3 ist die Sprungfunktion mit drei reduzierten Zähnen abgebildet. Der schwächste Zahn liegt hierbei, wenn möglich, in der Mitte des Sprungs. Im vorliegenden Fall bei 21 Zähnen bedeutet dies, dass die Zähne eins, zwei und 21 reduziert

werden. Zudem ist im Diagramm ersichtlich, dass die anderen Zähne am Umfang deutlich weniger Moment aufnehmen müssen als bei der Sinusfunktion. Dies liegt an der gleichmäßigen Verteilung. Beim Sinus wird eine Hälfte des Zahnrades entlastet und dafür die andere Hälfte deutlich höher belastet.

Ist eine Erhöhung des Moments in der Praxis nicht möglich, kann auch lediglich am schwächsten Zahn das Moment reduziert werden. Dies kann unter anderem der Fall sein, wenn durch die Erhöhung des Moments nicht mehr derselbe Ausfallmechanismus auftritt, oder der Betrieb unter Volllast stattfindet. Da die anderen Zähne die Reduktion dann nicht ausgleichen, verringert sich die Leistung im System. Allerdings muss an dieser Stelle gesagt werden, dass die Leistungsreduktion deutlich geringer ausfällt als aktuell im Stand der Technik. Hier wird das Moment am gesamten Umfang des Zahnrades reduziert [Fou+15a] und nicht lediglich lokal am schwächsten Zahn. Am Beispiel der Verzahnung aus Kapitel 4 mit 21 Zähnen bedeutet dies, dass bei einem Sprung mit drei reduzierten Zähnen die Leistungsreduktion gegenüber dem Stand der Technik um 85 % verringert wird.

Bei der Variation des Drehmoments über die aBS ergeben sich die folgenden **Annahmen und Randbedingungen**:

- **Ideale Variation der Momente beim Zahneingriff**

In der Simulation wird von ideal steilen Flanken bei der Momentenänderung ausgegangen. Jeder Zahn bekommt genau das vorgegebene Drehmoment. Eine Überdeckung wird nicht berücksichtigt.

- **Ideale Regelung und Messung**

Die Messtechnik kann das Grübchen exakt lokalisieren und die Regelung die Momentenvariation exakt an dem vorgegebenen Zahn ausführen. Die Dynamik des Antriebsstrangs lässt diese ideale Momentenvariation zu und es liegen keine Resonanzen in dem betrachteten Bereich vor.

- **aBS wird für den schwächsten Zahn vorgenommen.**

Die Reduktion des Moments wird lediglich für den schwächsten Zahn und in Abhängigkeit der Eingangsstrategie vorgenommen. Eine Anpassung auf mehrere Grübchen am Umfang wird nicht vorgenommen, da hier lediglich eine erste Abschätzung der Steigerung der RUL durch die aBS vorgenommen werden soll. Eine zusätzliche Reduktion an weiteren Zähnen muss zudem über die Regelung und Messtechnik möglich sein.

5.1.3 Wöhlerkurve

Als Lebensdauermodell wird im Schritt I.3 der Simulation die Wöhlerkurve zugrunde gelegt. Diese wird wie im Getriebebereich üblich mit dem anliegenden Drehmoment anstatt der Spannung aufgetragen [Nau+19]. Mit dieser Darstellung ist eine einfache Verknüpfung von Drehmoment und Lastwechselzahl möglich. Um viele

unterschiedliche Werkstoffe, Bearbeitungszustände und Geometrien in der Simulation abdecken zu können, wird der Wöhlerexponent k_T variiert. Zudem wird über die Lage der n_{EOL} -Verteilung eine horizontale Verschiebung der Wöhlerkurve vorgenommen, sodass diese immer im Median der Ausfallverteilung liegt. Hierzu wird die Gleichung der Ausfallwahrscheinlichkeit auf 50 % gesetzt und nach der Zeit aufgelöst. Es ergibt sich folgende Gleichung für die ertragbare Lastwechselzahl N_m bei mittlerem Drehmoment und damit ohne aBS in Abhängigkeit der Weibullparameter T_{nEOL} und b_{nEOL} :

$$N_m = b_{nEOL} \sqrt{-\ln 0,5} \cdot T_{nEOL} \tag{5.5}$$

Mit dieser Lastwechselzahl und dem Wöhlerexponent k_T können im Anschluss die ertragbaren Lastwechsel N_j mit den jeweiligen Drehmomenten der aBS T_j für ein einstufiges Kollektiv berechnet werden. Hierfür gilt die nachfolgende Gleichung nach Wöhler:

$$N_j = N_m \cdot \left(\frac{T_m}{T_j} \right)^{k_T} \tag{5.6}$$

Die **Annahmen und Randbedingungen** für diesen Schritt lauten:

- **Betrachtungen gelten ausschließlich für Zeitfestigkeitsbereich**

In der Wöhlerkurve wird lediglich der Zeitfestigkeitsbereich betrachtet. Es wird daher angenommen, dass durch die Momentenvariation weder der Bereich der statischen Festigkeit noch der Dauerfestigkeit erreicht wird. Somit liegt eine konservative Abschätzung vor. Eine Reduktion bis in den Dauerfestigkeitsbereich steigert das Potenzial des schwächsten Zahnes zusätzlich.

- **Ausfallverteilung ist lastunabhängig**

Die Ausfallverteilung aller Zähne, d.h. der Grundgesamtheit, wird als konstant und damit unabhängig von der Last vorausgesetzt. Damit ist der Formparameter der Weibullverteilung konstant und eine Parallelverschiebung für die unterschiedlichen Drehmomente entlang der Wöhlerkurve möglich. In der Praxis ändert sich der Formparameter mit der Last [Jus17]. Im vorliegenden Fall wird das Moment über die Amplitude nur in einem begrenzten Bereich variiert. Es werden daher lediglich kleine Änderungen des Formparameters erwartet und der Einfluss für die erste Näherungsbetrachtung vernachlässigt.

- **Einzelzähne folgen der Wöhlerkurve des Systems**

Die experimentelle Ermittlung der Wöhlerkurven wird im aktuellen Stand der Technik für den Grübchenschaden am gesamten Zahnrad vorgenommen. Wöhlerkurven für Einzelzähne liegen nicht vor. Es wird daher angenommen, dass die Wöhlerkurve vom System Zahnrad auf die Komponente Einzelzahn

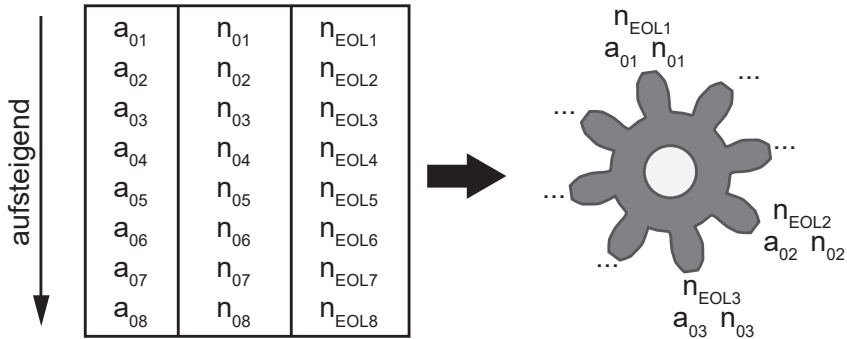


Bild 5.4 Schematische Darstellung der Sortierung

übertragen werden kann, da es sich bei beiden Ausfällen um Ermüdung handelt. Zudem wird eine Wöhlerkurve sowohl für die konkurrierenden als auch für die abhängigen Ausfälle angenommen.

- **Unabhängigkeit der Wöhlerkurve**

Ist ein Grübchen am Umfang des Zahnrades vorhanden, werden die Wöhlerkurven der anderen Zähne dadurch nicht beeinflusst. Es wird also von unabhängigen Wöhlerkurven ausgegangen, da die aktuelle Datenlage keine Aussage über eine Abhängigkeit der Wöhlerkurven zulässt. Eine Beeinflussung der anderen Zahnflanken, z. B. durch eine Änderung der Steifigkeit und des dynamischen Verhaltens, wird jedoch über den Parameter Abhängigkeit in der Simulation berücksichtigt.

- **Keine Betrachtung der Drehzahl**

Die am Getriebe anliegende Drehzahl wird in der Simulation nicht betrachtet, sondern lediglich die Lastwechselzahl der Zähne. Da jeder Zahn einen Lastwechsel pro Umdrehung erfährt, kann mit Hilfe der Drehzahl auf die Testzeit geschlossen werden, was in der vorliegenden Simulation jedoch keine Bedeutung hat. Zusätzlich ändern sich die Gleiteigenschaften im Zahneingriff durch unterschiedliche Drehzahlen. Diese Änderung wird ebenfalls nicht direkt berücksichtigt. Jedoch ändert sich durch diese Gleiteigenschaften auch das Lebensdauermodell, welches in der Simulation variiert wird. Aus diesem Grund kann von einer indirekten Berücksichtigung gesprochen werden.

5.1.4 Sortierung der Zufallszahlen am Umfang des Zahnrads

Für die aBS spielt es eine wesentliche Rolle, wo am Umfang verteilt die nächsten Grübchen entstehen, d.h. die nächst-schwächsten Zähne liegen. Sind diese abhän-

gig vom schwächsten Zahn, also benachbart, wird das Moment an diesen Zähnen je nach Eingangssignal direkt mit reduziert und es kann eine höhere Lebensdauer erzielt werden. Aus diesem Grund ist die Sortierung der Pseudo-Zufallszahlen am Umfang des Zahnrades von großer Bedeutung. Hierfür werden im Schritt II.1 zuerst die Zufallszahlen der drei Verteilungen zueinander sortiert, in diesem Fall aufsteigend, und im Anschluss auf den Umfang des Zahnrades verteilt. Dieser Vorgang ist in Bild 5.4 schematisch an einem Zahnrad mit acht Zähnen aufgezeigt. Die drei Parameter a_0 , n_0 und n_{EOL} werden jeweils acht mal aus den vorgegebenen Verteilungen erzeugt und aufsteigend sortiert. Diese so erzeugten Kombinationen der drei Parameter entsprechen jeweils einem Grübchen und werden anschließend am Umfang des Zahnrades angeordnet. Bei dieser Anordnung wird die Unterscheidung zwischen konkurrierendem und abhängigem Grübchen berücksichtigt. Im Beispiel liegt demnach eine Abhängigkeit zwischen zweit- und dritt-schwächstem Zahn vor.

Der Ablaufplan der Sortierung der Zufallszahlen am Umfang des Zahnrades ist in Bild 5.5 dargestellt. Da immer am schwächsten Zahn mit der Nummerierung begonnen wird, steht dieser Zahn bereits fest. Danach werden iterativ die nächst-schwächsten Zähne am Umfang verteilt. Die erste Entscheidung ist die Abhängigkeit, welche als Eingangsgröße definiert ist. Wird der nächst-schwächste Zahn als abhängig definiert, werden alle Grübchen am Umfang gesucht, zufällig eines ausgewählt und das Grübchen dann links oder rechts daneben platziert. Liegt keine Abhängigkeit vor, werden alle Zähne ohne Grübchen gesucht und zufällig eine Position ausgewählt. Dieser Vorgang wird wiederholt bis der z -te Zahn, also der stärkste am Umfang, definiert wurde.

Für eine beispielhafte Abhängigkeit von $ab = 70\%$ sind zwei Radarplots in Bild 5.6 dargestellt. Der kleinste Balken definiert den schwächsten Zahn am Umfang des Zahnrades und der Größte den Stärksten. Es ist ersichtlich, dass bei dieser Abhängigkeit zwei grundsätzlich unterschiedliche Formen entstehen können. In der Variante a) wurde der zweitschwächste Zahn als konkurrierend definiert und ca. 180° versetzt zum schwächsten Zahn angeordnet. Die meisten nachfolgenden Zähne wurden als abhängig definiert und dementsprechend links und rechts der beiden schwächsten Zähne angeordnet. In Beispiel b) liegt ein konkurrierendes Grübchen nur vier Zähne vom schwächsten Zahn entfernt und dadurch die Zähne von links nach rechts im Plot aufgebaut. Die Plots zu weiteren Abhängigkeiten sind im Anhang 9.1 zu finden.

Für den Schritt der Sortierung können folgende **Annahmen und Randbedingungen** definiert werden:

- **keine kreuzenden Degradationspfade**

Die Zufallszahlen der drei Verteilungen werden jeweils aufsteigend sortiert und dann gemeinsam am Umfang des Zahnrades angeordnet. Damit werden keine kreuzenden Degradationspfade zugelassen und das erste initiierte Grübchen führt ohne aBS auch zum Ausfall. Zudem sind Grübchen, die früh initiiert werden, gleichzeitig kleiner als Grübchen, die spät initiiert werden. Die erwei-

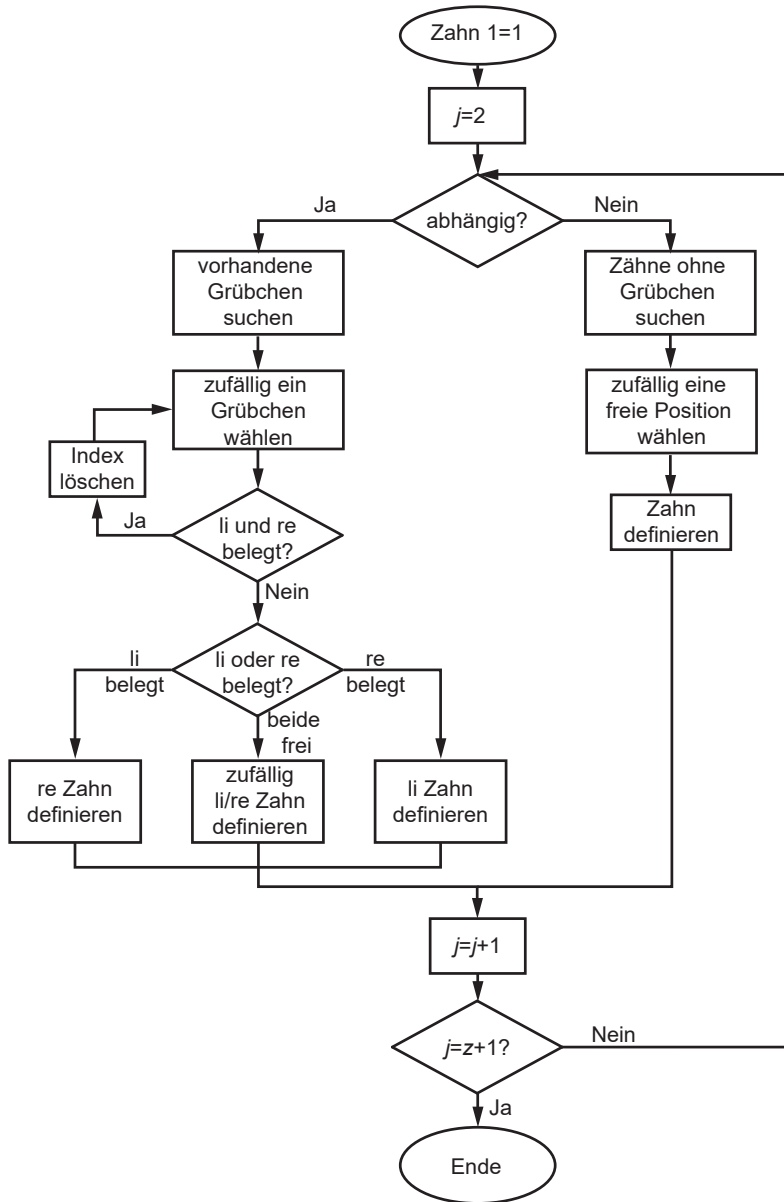


Bild 5.5 Ablaufplan zur Sortierung der Zufallszahlen am Umfang des Zahnrades

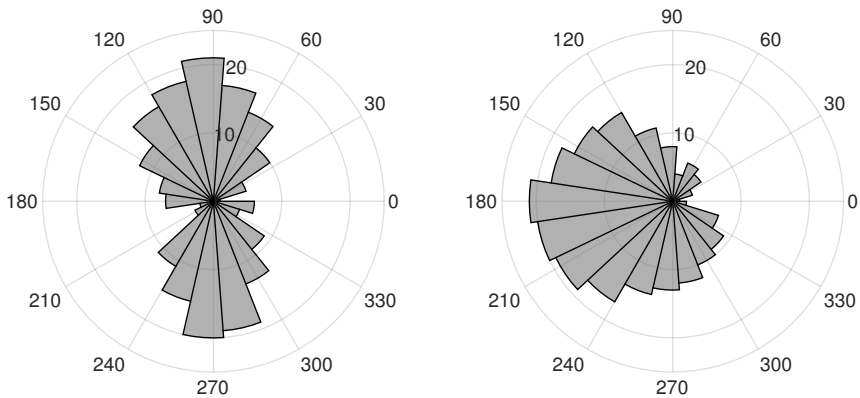


Bild 5.6 Unterschiedliche Anordnung der Zufallszahlen bei $ab = 70\%$. Gradzahlen entsprechen dem Umfang des Zahnrades, Länge der Strahlen geben die Höhe der Belastbarkeit der Zähne an.

terte Grübchenauswertung hat jedoch gezeigt, dass oft das Ausfallgrübchen nicht als erstes initiiert wurde. Zudem konnte kein direkter Zusammenhang zwischen Initiierungsgröße und -zeitpunkt festgestellt werden. Die Annahme stützt sich daher auf Bartz [BK71], da hier dieser Zusammenhang zwischen Initiierungsgröße und -zeitpunkt aufgezeigt wurde. Kreuzende Degradationspfade werden in der Simulation nicht zugelassen, da ansonsten extreme Pfade entstehen würden. Zum Beispiel könnte die kleinste Initiierungszeit mit einer sehr großen Ausfallzeit kombiniert werden, was zu einem extrem flachen Degradationsverlauf führt. Dieser Fall kann mit Einlaufgrübchen gleichgesetzt werden, welche früh initiiert werden, aber nicht merklich wachsen. Da diese Einlaufgrübchen zu einer gleichmäßigeren Flächenpressung auf der Flanke führen und nicht ausfallkritisch sind, werden diese innerhalb der Simulation nicht berücksichtigt. Somit werden insgesamt die kreuzenden Degradationspfade ausgeschlossen, da zu wenig Informationen für die Definition vorliegen.

- **Wahrscheinlichkeit der Abhängigkeit**

Es besteht eine Wahrscheinlichkeit, dass der zweit-schwächste Zahn auch ohne Abhängigkeit neben dem schwächsten Zahn angeordnet wird. Diese Wahrscheinlichkeit liegt sowohl in der Realität als auch in der vorliegenden Simulation gleichermaßen vor und muss daher nicht gesondert berücksichtigt werden. Die Anordnung der Zähne am Umfang erfolgt über eine vorgegebene Wahrscheinlichkeit für die Abhängigkeit.

5.1.5 Degradationspfade der Einzelzähne

Sind die Zufallszahlen am Umfang des Zahnrades sortiert, können die Degradationspfade der Einzelzähne bestimmt werden und so jeder Grübchengröße eine Lastwechselanzahl zugeordnet werden. Wie in der erweiterten Auswertung in Abschnitt 4.3 gezeigt, wird ein Degradationspfad im doppellogarithmischen Diagramm als Gerade modelliert. Damit wird der Verlauf mit nachfolgender Formel aus der Initiierung und dem Ausfall definiert. a_x beschreibt hierbei eine variable Grübchengröße.

$$f(a_x) = \frac{(\log a_{EOL} - \log a_0)}{(\log n_{EOL} - \log n_0)} \cdot (a_x - a_{EOL}) + \log a_{EOL} \quad (5.7)$$

a_0 und n_0 legen die Initiierung des Grübchens fest und a_{EOL} und n_{EOL} den Ausfall. Die Steigung der Degradation wird damit hauptsächlich über die Differenz zwischen n_0 und n_{EOL} -Verteilung beeinflusst. Liegen die beiden Verteilungen weit auseinander, resultieren flache Degradationsverläufe. Mit zunehmender Nähe ergeben sich steilere Verläufe und die Verteilungen überlappen sich. Hieraus können negative Degradationspfade resultieren, wenn an einem Zahn die Pseudo-Zufallszahl der n_0 -Verteilung größer als die der n_{EOL} -Verteilung ist. Ein Ausfall vor der Initiierung eines Grübchens ist jedoch nicht möglich, weshalb an dieser Stelle ein konservativer Ansatz gewählt wird und die Initiierungszeit gleich der Ausfallzeit gesetzt wird. Dieser Fall ist auch in der Praxis möglich, da die Degradationsverläufe nicht stetig sind, sondern erst weitreichende Risse entstehen können, die später zum endgültigen Ausbruch führen, vgl. Bild 4.11. Ohne ausgeprägtes Degradationsverhalten ist eine zielführende Anwendung der aBS jedoch nicht möglich, was über diesen konservativen Ansatz in der Simulation mit abgebildet wird.

Als **Annahmen und Randbedingungen** ergeben sich folgende Punkte:

- **exponentieller Verlauf der Degradationspfade**

Der exponentielle Verlauf der Grübchendegradation des schwächsten Zahnes ist in zahlreichen Literaturstellen zu finden [NW03; MMS18; Bes20]. Diese Angabe wird in der Simulation für alle Zähne am Umfangs des Zahnrades angewendet. Eine Aussage über das Verhalten der stärkeren Zähne am Umfang ist zu diesem Zeitpunkt nicht möglich. Für die kleineren Grübchen am Umfang konnte der exponentielle Verlauf jedoch in der erweiterten Auswertung bestätigt werden. Zudem wird angenommen, dass der progressive Verlauf im doppellogarithmischen Diagramm als Gerade modelliert werden kann, siehe Abschnitt 4.3.

- **Ausfallkriterium 4% auf einer Flanke ist gültig**

In der Norm [ISO6336-5] werden für einsatzgehärtete Zahnräder zwei unterschiedliche Ausfallkriterien angegeben, entweder 0,5% Grübchenfläche über alle Zähne oder 4% an einer Zahnflanke. In der Praxis ist jedoch das 4%-

Kriterium an einer einzelnen Zahnflanke wahrscheinlicher. Dies wurde in der erweiterten Auswertung bestätigt. Für die Simulation wird daher angenommen, dass ausschließlich dieses Ausfallkriterium zutrifft. Diese wird über die n_{EOL} -Verteilung zudem auf alle Zähne am Umfang des Zahnrades angewendet.

- **Testbedingungen werden angenommen**

Für die Praxisanwendung können je nach Anwendungsfall unterschiedliche Grübchengrößen bis zum Ausfall zugelassen werden. Die Norm [ISO6336-5] setzt die 4 % lediglich für Testzwecke fest, um eine Vergleichbarkeit zu schaffen. Auf eine Änderung des a_{EOL} -Kriteriums wird jedoch verzichtet, da dies lediglich in einer Verschiebung der Wöhlerlinie resultieren würde. Dies wird ohnehin über den Eingangsparameter der n_{EOL} -Verteilung untersucht.

- **keine negative Degradationspfade**

Ergeben sich in der Simulation negative Degradationspfade, wird die Initiierungszeit und -größe vernachlässigt und ein direkter Ausfall des Zahnes angenommen. Dadurch wird eine konservative Abschätzung der Steigerung der RUL erreicht.

5.1.6 Start der adaptiven Betriebsstrategie

Der Start der aBS spielt eine wesentliche Rolle für die Steigerung der RUL und wird hauptsächlich von der Genauigkeit der verwendeten Sensoren beeinflusst. Die Reduktion des Moments am schwächsten Zahn kann nur erfolgen, wenn eine Grübcheninitiierung stattgefunden hat und das Grübchen auch erkannt werden kann. Aus diesem Grund erfolgt in diesem Schritt eine Abfrage der Initiierungszeit des schwächsten Zahnes und des Zeitpunkts, wann dieses Grübchen bei einer vorgegebenen Messgenauigkeit a_{mess} lokalisiert werden kann. Dies wird über die Degradationspfade aus dem vorherigen Schritt erreicht. Da für den Start der aBS beide Bedingungen erfüllt sein müssen, wird das Maximum aus Initiierungszeitpunkt und Detektionszeitpunkt festgelegt.

Beim Start der aBS ergeben sich folgende **Annahmen und Randbedingungen**:

- **schwächster Zahn entscheidet über Start**

Der schwächste Zahn am Umfang des Zahnrades wird in der Simulation als erstes initiiert und fällt ohne aBS auch als erstes aus. Daher wird auch dieses Grübchen als erstes messtechnisch erfasst und die aBS darauf angewendet.

- **ideale Lokalisierung**

Es wird eine ideale Lokalisierung angenommen. Die Messtechnik ist damit in der Lage, Grübchen zu detektieren und präzise am Umfang zu lokalisieren.

Ungenauigkeiten werden über den Eingangsparameter der messbaren Grübchengröße untersucht, wodurch auch eine Aussage über die Messgenauigkeit für die Anwendung der aBS getroffen werden kann.

- **Messung erfolgt nur nach initialem Grübchenausbruch**

Die Messtechnik ist nicht in der Lage, Vorstufen von Grübchen wie zum Beispiel Risse zu detektieren und lokalisieren. Der Start der aBS kann damit erst nach der Grübcheninitiierung erfolgen.

5.1.7 Schadensakkumulation je Zahn

Mit der Anwendung der aBS liegt für jeden individuellen Zahn ein Lastkollektiv mit zwei Stufen vor. Die erste Stufe ist für alle Zähne gleich und bezieht sich auf die konstante Belastung vor dem Start der aBS. Nach dem Start ändert sich die Last je Zahn und es beginnt die zweite Stufe des Kollektivs. Der Ausfall je Zahn mit aBS $n_{EOL,BS,j}$ wird damit über die lineare Schadensakkumulation berechnet. Die wesentlichen Formeln sind hierbei:

$$D_{EOL,j} = \frac{n_{Start,BS}}{N_m} + \frac{n_j}{N_j} \quad (5.8)$$

$$n_{EOL,BS,j} = n_{Start,BS} + n_j \quad (5.9)$$

Mit $D_{EOL,j}$ wird der individuelle Schädigungswert jedes Einzelzahn definiert, bei welchem der Ausfall vorliegt. $n_{Start,BS}$ sind die Lastwechsel beim Start der aBS. Die ertragbaren Lastwechsel auf einem konstanten Lastniveau werden mit N definiert und die während dem Betrieb ertragenen Lastwechsel mit n . Hierbei gibt der Index m jeweils die mittlere Last ohne aBS an und der Index j den Lastfall nach Start der aBS.

Daraus ergeben sich folgende **Annahmen und Randbedingungen**:

- **Lineare Schadensakkumulation**

Es wird eine lineare Schadensakkumulation für jeden individuellen Zahn angenommen. Für den schwächsten Zahn und damit das System Zahnrad ist dies gängige Praxis. Bezüglich allen Zähnen am Umfang liegen zum aktuellen Zeitpunkt keine Informationen vor, weshalb die SAH auf den Umfang ausgeweitet wird.

- **Unabhängigkeit der Einzelzähne**

Die Einzelzähne werden als unabhängig angesehen. Damit liegt keine Beeinflussung der SAH auf andere Zähne vor. Die Abhängigkeit wird jedoch innerhalb der Sortierung der Zufallszahlen berücksichtigt.

- **$D = 1$ liegt im Median der Wöhlerlinie**

Die unterschiedliche Belastbarkeit der Einzelzähne spiegelt sich in den Schädigungswerten wider. Die theoretische Schädigungssumme beim Ausfall von $D = 1$ wird hierfür in den Median der Wöhlerlinie gelegt und die Streuung der Belastbarkeit der individuellen Zähne im individuellen Schädigungswert berücksichtigt. Ist die Ausfallzeit eines Zahnes kleiner als der Median der Ausfallverteilung resultiert damit eine Schädigungssumme beim Ausfall von $D < 1$ und dementsprechend bei größeren Ausfallzeiten ein $D > 1$.

- **selber Schädigungswert beim Start der aBS**

Beim Start der aBS haben alle Zähne den selben Schädigungswert $D_{Start,BS}$. Die verbleibende Schädigungssumme bis zum Ausfall variiert jedoch aufgrund der unterschiedlichen Belastbarkeit der Einzelzähne. Diese Differenz aus dem Schädigungswert beim Ausfall des Einzelzahnes $D_{EOL,j}$ und des Schädigungswertes beim Start der aBS $D_{Start,BS}$ stellt die zweite Stufe des Kollektivs dar, auf welcher das veränderte Moment anliegt.

- **Mittelung der Schädigung über einen Abwälzvorgang**

Bei der Verwendung eines Sinus als Eingangssignal der aBS ändert sich die Last auch über einen Abwälzvorgang. Um vor allem an den Wendepunkten des Sinus keine großen Fehler aus der Mittelung des Moments zu erhalten, wird innerhalb der SAH die Mittelung über den Schädigungswert vorgenommen, vgl. 5.1.2.

5.1.8 Potenzial je Zahn und Zahnrad

Über die Schadensakkumulation wird die Lebensdauer für jeden Einzelzahn mit aBS $n_{EOL,BS,j}$ berechnet. Damit wird zusammen mit der Lebensdauer ohne aBS $n_{EOL,m,j}$ die Veränderung jedes Einzelzahnes Δn_j berechnet. Diese ergibt sich wie folgt:

$$\Delta n_j = n_{EOL,BS,j} - n_{EOL,m,j} \quad (5.10)$$

An den Zähnen mit reduziertem Moment ergibt sich eine positive Veränderung und an den Zähnen mit erhöhtem Moment eine negative Veränderung der Lebensdauer. Um die Steigerung der RUL durch die aBS über das gesamte Zahnrad Δn_{Rad} zu betrachten, muss der schlechteste Zahn mit und ohne aBS ermittelt und hiervon die Differenz gebildet werden.

$$\Delta n_{Rad} = \min(n_{EOL,BS}) - \min(n_{EOL,m}) \quad (5.11)$$

Als **Annahmen und Randbedingungen** im letzten Schritt der Monte Carlo Simulation ergeben sich daraus die folgenden Punkte:

- **Ausfall des Zahnrades sobald $a_{EOL} = 4\%$ erreicht**

Jeder Einzelzahn fällt aus, sobald die Grübchenfläche 4% bezogen auf die aktive Zahnflanke erreicht. Bezogen auf das gesamte Zahnrad bedeutet dies, dass ein Ausfall vorliegt, sobald ein Grübchen die 4% Marke erreicht hat. Dies ist unabhängig von der Zahn-Nummer.

- **Gesetz der Großen Zahlen**

Das Potenzial des Zahnrades ist abhängig von dem Abstand der kleinsten Pseudo-Zufallszahlen. Aus diesem Grund wird das Potenzial der aBS nicht nur über wenige Zahnräder beschrieben, sondern 100.000 Replikationen und damit 100.000 unterschiedliche Zahnräder betrachtet. Über das Gesetz der Großen Zahlen kann somit der Einfluss der Zufallszahlen minimiert werden.

5.1.9 Statistische Auswertung

Ist die Steigerung der RUL der einzelnen Zahnräder bestimmt, wird im letzten Block des Simulationsansatzes die statistische Auswertung vorgenommen. Als Potenzial der aBS wird hier vor allem der Median der Lebensdauerveränderung (im Folgenden auch kurz Median genannt) je Zahnrad über alle Replikationen ausgewertet. Durch die Annahme, dass an jeder Zahnflanke ein Grübchen entsteht, handelt es sich bei dieser Auswertung um eine sehr konservative Abschätzung. Aus diesem Grund wird innerhalb einer weiteren Auswertung der Median nur über eine bestimmte Anzahl an Grübchen gebildet. In der erweiterten Auswertung lagen an den untersuchten sieben Ritzeln zwischen vier und zehn Grübchen vor, vgl. Tabelle 4.5. Die Informationslage ist jedoch nicht ausreichend, um eine aussagekräftige Verteilung der Grübchenanzahl am Umfang des Zahnrades festzulegen. Aus diesem Grund wurde der Bereich aus den Versuchen sowohl nach oben als auch nach unten um je drei Grübchen erweitert. Somit ergibt sich eine Gleichverteilung zwischen einem und 13 Grübchen am Umfang des Zahnrades. Alle anderen Zähne werden bei dieser Auswertung nicht berücksichtigt und als intakt angenommen.

Bei sehr steilen Degradationspfaden oder eng beieinander liegenden Zufallszahlen kann die Steigerung der RUL eines Zahnrades durch die aBS auch negativ ausfallen. Dies ist zum Beispiel der Fall, wenn der zweit-schwächste Zahn genau gegenüber dem schwächsten Zahn liegt und ein Sinussignal als Eingang für die aBS gewählt wird. Der zweit-schwächste Zahn wird somit deutlich höher belastet und die Ausfallzeit verschiebt sich sehr weit nach links, sodass dieser Zahn schlussendlich früher ausfällt als der schwächste Zahn ohne aBS. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, wird zusätzlich zum Median über alle Replikationen auch die Wahrscheinlichkeit für einen positiven Effekt ausgewertet.

Beispielhaft ist die Auswertung von Median und positivem Effekt in Bild 5.7 für zwei Parameterkombinationen dargestellt. Die Steigerung der RUL für alle 100.000 Replikationen ist hierfür anhand eines Histogramms aufgetragen. Der Median über

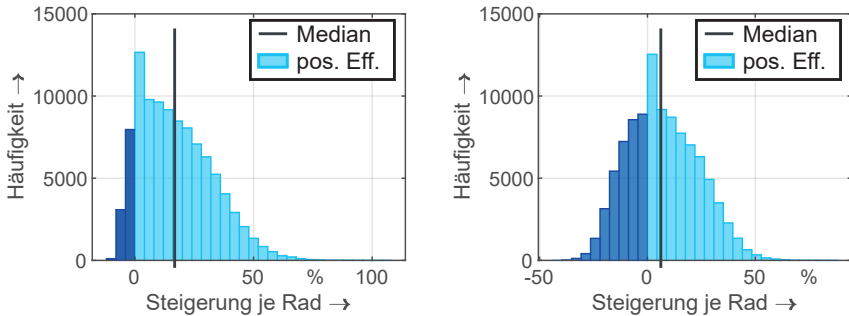


Bild 5.7 Statistische Auswertung der 100.000 Replikationen bei $A = 20 \text{ Nm}$ und $ab = 70 \%$. a) Sprungfunktion mit drei reduzierten Zähnen ($ES = 3$). b) Sinusfunktion ($ES = 6$)

alle Replikationen ist über die vertikale Linie dargestellt. Für den positiven Effekt werden alle Zahnräder betrachtet, welche durch die aBS eine Verlängerung der RUL erfahren. Diese sind im Histogramm hellblau hervorgehoben. Die Anzahl dieser Zahnräder wird in Relation zu allen Replikationen gesetzt, was dem positiven Effekt in Prozent entspricht. In Bild 5.7a ist beispielhaft ein großer positiver Effekt abgebildet mit hohem Median der Lebensdauersteigerung. Bild 5.7b zeigt dagegen einen niedrigeren positiven Effekt und Median.

Als letztes wird ausgewertet, welcher Zahn mit aBS zum Ausfall des Zahnrades führt. Hierüber wird eine Aussage über den Ausnutzungsgrad der aBS getroffen. Fällt trotz aBS Zahn Nummer 1 aus, ist das Potenzial nicht vollkommen ausgenutzt und die Amplitude kann weiter gesteigert werden.

Bei der statistischen Auswertung ergeben sich folgende **Annahmen und Randbedingungen**:

- **Konservative Abschätzung des Potenzials**

Die Auswertung des Potenzials ist nur für die vorgenannten Annahmen und Randbedingungen gültig. Beim Median handelt es sich um die Auswertung über alle Zähne und damit einer 100%-igen Anwesenheit von Grübchen auf allen Zahnflanken.

- **Vorgabe einer konstanten Amplitude**

Theoretisch existiert für jedes Zahnrad eine optimale Amplitude, bei welcher zwei Zähne gleichzeitig ausfallen. Die Ausfallzeiten des schwächsten Zahnes mit reduziertem Moment und des schwächsten Zahn mit erhöhtem Moment fallen somit zusammen. Für die praktische Anwendung ist dies jedoch nicht von Bedeutung, da beim Start der aBS nicht bekannt ist, welche Belastbarkeit die anderen Zähne am Umfang des Zahnrades haben und daher die optimale

Amplitude nicht bekannt ist. Für die Auswertung der Simulation wird diese optimale Amplitude daher nicht berücksichtigt und eine konstante Amplitude als Eingangsparameter vorgegeben.

5.2 Einflussfaktoren für die Parameterstudie

Als Eingangsparameter für die Simulation dienen insgesamt 13 Variablen. Diese sind in Tabelle 5.1 inkl. Wertebereich und Wert für das Referenzsystem sowie die Anwendung der erweiterten Auswertung in alphabetischer Reihenfolge aufgeführt. Die Amplitude A wird bis maximal 50 Nm betrachtet. Hier sind bereits starke Schwingungen im Antriebsstrang vorhanden und je nach Systemverhalten des Antriebsstranges ergeben sich große Beschleunigungen für die aBS. Daher wird davon ausgegangen, dass hauptsächlich die Amplituden kleiner 50 Nm für die Anwendung relevant sind, da das mittlere Drehmoment T_m im Bereich von 100 bis 300 Nm liegt. Bei der Abhängigkeit ab wird der gesamte Bereich abgedeckt von 0 % bis 100 % Abhängigkeit, um alle möglichen Szenarien betrachten zu können. 0 % bedeutet, dass die Grübchen willkürlich am Umfang verteilt werden und bei 100 % Abhängigkeit treten die Grübchen links und rechts um den schwächsten Zahn auf. Für die messbare Grübchengröße a_{mess} spielt die Genauigkeit der Messtechnik eine große Rolle. Ab welcher Grübchengröße ist es möglich, den Schaden zu detektieren und zusätzlich am Umfang zu lokalisieren. Um hier ebenfalls den gesamten Bereich abbilden zu können, wird für eine direkte Lokalisierung bei der Grübcheninitiierung ein Wert von 0,01 % hinterlegt. Ein Start bei Null ist hier nicht möglich, da der Logarithmus von Null nicht definiert ist. Maximal wird ein Wert von 3 % für die Parameterstudie vorgegeben, um genügend Abstand zum EOL-Kriterium zu halten. Die Formparameter b aller Verteilungen werden von 1,0 bis 20 variiert. Bei einem Formparameter von 1,0 liegen Zufallsausfälle anstatt den Ermüdungsausfällen vor und die Weibullverteilung entspricht der Exponentialverteilung [BL04]. Nichtsdestotrotz wird dieser Wert als Minimum gewählt, da die Streuung der individuellen Zähne nicht bekannt ist und keine Einschränkung durch die geringe Datenbasis in Kapitel 4 vorgenommen wird. Das Maximum wird daher mit 20 ebenfalls sehr groß gewählt, jedoch liegt bei der untersuchten Serienverzahnung der Formparameter der Ausfallverteilung der schwächsten Zähne bei ca. 13. Für das Eingangssignal ES werden unterschiedliche Sprungfunktionen sowie eine Sinusfunktion abgebildet. Bei der Sprungfunktion wird zum einen ein idealer Sprung ohne Erhöhung des Moments an den anderen Zähnen ($ES = 0$) untersucht. Hiermit ist jedoch eine Reduktion der Leistung verbunden. Zum anderen werden Sprungfunktionen ohne Reduktion der Leistung untersucht und hier zudem die Breite des Sprungs variiert ($ES = 1$ bis $ES = 5$). Schlussendlich wird mit $ES = 6$ eine Sinusfunktion abgebildet. Der Bereich des Wöhlerexponenten k_T wird ebenfalls groß im Bereich von 1 bis 20 gewählt. Die Steigung der Wöhlerlinie der untersuchten Verzahnung wird somit verdoppelt und daher als ausrei-

Tabelle 5.1 Eingangsparameter für das Simulationsmodell: Wertebereich, Referenz und Anwendung der Serienverzahnung aus Kapitel 4

Parameter	Einheit	Min	Max	Referenz	Anwendung
A	Nm	5	50	20	-
ab	%	0	100	50	62
a_{mess}	%	0,01	3	1	0,749
b_{a0}	-	1	20	5	1,41157
b_{n0}	-	1	20	5	5,70167
b_{nEOL}	-	1	20	5	4,8086
ES	-	0	6	0;1;3;6	-
k_T	-	1	20	10	10,5
$n_{0,Faktor}$	-	0,1	0,9	0,5	0,557
T_{a0}	%	0,01	2	0,5	1,01721
T_m	Nm	100	300	200	200
T_{nEOL}	LW	5e6	20e6	15e6	13,3438e6
z	-	15	50	20	21

chend angesehen. Für den $n_{0,Faktor}$, welcher das Verhältnis zwischen Initiierungs- und Ausfallverteilung darstellt, wird der Bereich von 10 bis 90 % der Ausfallverteilung betrachtet und somit der gesamte Bereich untersucht. Die Initiierungsgröße der Grübchen T_{a0} wird bis 2 % betrachtet. Die charakteristische Lebensdauer des Grübchenausfalls T_{nEOL} wird zwischen 5 und 20 Millionen Lastwechsel variiert und die Zähnezahl z zwischen 15 und 50. Zusätzlich zu dem Parameterraum wird ein Referenzsystem definiert, welches für die Plausibilisierung der Simulation herangezogen wird. Dieses wird von der Beispielverzahnung aus Kapitel 4 abgeleitet, weshalb die Parameter in der Regel möglichst nahe an dieser Anwendung liegen. Lediglich beim Formparameter der initialen Grübchengröße b_{a0} weicht der Referenzwert stärker von dieser Anwendung ab, da für alle drei Verteilungen ein konstanter Formparameter für die Referenz gewählt wurde.

Zusätzlich zu den genannten Parametern existiert eine Konstante, das End-of-Life Kriterium $a_{EOL} = 4\%$. In der Praxis können zwar unterschiedliche EOL-Kriterien bezüglich dem Ausfallmechanismus Grübchen zulässig sein [ISO6336-2], jedoch wird dadurch lediglich die Wöhlerkurve auf der x-Achse verschoben. Diese Verschiebung wird im Modell über den Parameter T_{nEOL} bereits abgedeckt.

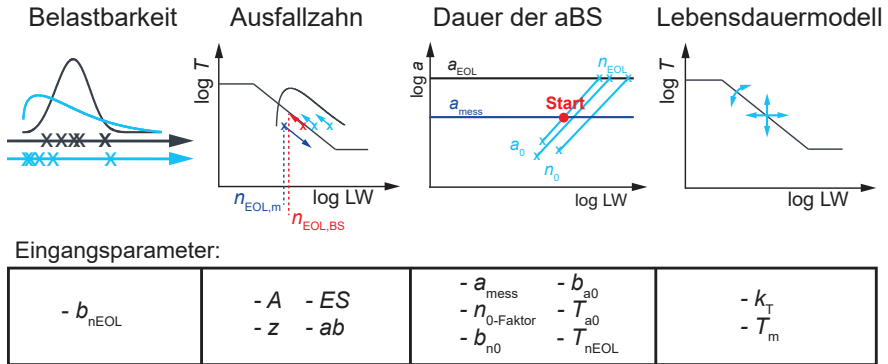


Bild 5.8 Übersicht der Eingangsparameter und Klassifikation in vier Einfluss-Gruppen

5.3 Plausibilisierung der Simulation

Bei der simulativen Studie handelt es sich um eine erste Abschätzung des Potenzials der adaptiven Betriebsstrategie. Aus diesem Grund liegen keine Versuchsergebnisse vor, mit welchen die Simulation validiert werden kann. Um dennoch eine Plausibilisierung vornehmen zu können, werden im Folgenden die grundlegenden Zusammenhänge der Eingangsparameter eingehend untersucht und diskutiert. Es werden Arbeitshypothesen aufgestellt, welche im Anschluss dazu verwendet werden, die Simulationsergebnisse zu analysieren und plausibilisieren.

Die Eingangsparameter aus Abschnitt 5.2 können in vier Gruppen untergliedert werden, siehe Bild 5.8. Gruppe 1 ist die Streuung der Belastbarkeit der Einzelzähne. In Gruppe 2 ist der Ausfallzahn ausschlaggebend, also ob der schwächste Zahn oder ein anderer Zahn am Umfang ausfällt. Die Dauer der aBS wird in Gruppe 3 näher untersucht, was unter anderem durch den Start der Momentenvariation beeinflusst wird. In der letzten Gruppe ist das hinterlegte Lebensdauermodell aufgeführt.

Innerhalb der vier vorgestellten Gruppen werden die Einflüsse der unterschiedlichen Eingangsparameter analysiert und schematisch aufgezeigt. Diese so erzeugten Arbeitshypothesen werden im Anschluss mit den Simulationsergebnissen in Verbindung gebracht und abgeglichen. Dies erfolgt, wenn nicht anderweitig gekennzeichnet, mithilfe des Referenzparametersatzes aus Tabelle 5.1. Für die unterschiedlichen Eingangssignale wird jeweils ein Parameter variiert und die unterschiedlichen Auswertungen, wie Median oder positiver Effekt der aBS, betrachtet. Die Plausibilisierung erfolgt mit unterschiedlichen Diagrammen, wobei auf der x-Achse der untersuchte Einflussparameter dargestellt ist und auf der y-Achse die verschiedenen Simulationsergebnisse. Die Kurven innerhalb der Diagramme zeigen den unterschiedlichen Verlauf der Amplituden. Als Eingangssignal werden der ideale Sprung

ohne Erhöhung der Belastung ($ES = 0$), der ideale Sprung mit Erhöhung der Belastung an den anderen Zähnen ($ES = 1$), ein Sprung mit drei reduzierten Zähnen ($ES = 3$) und das Sinussignal ($ES = 6$) analysiert.

5.3.1 Einfluss der Streuung der Belastbarkeit

Ein wesentlicher Faktor in dem Simulationsansatz sind die Pseudo-Zufallszahlen aus der n_{EOL} -Verteilung, d.h. die Streuung der Belastbarkeit der Einzelzähne. Die Belastbarkeit der anderen Zähne am Umfang des Zahnrades beeinflussen in sehr großem Maße die Steigerung der RUL durch die aBS, da diese höher belastet werden und damit die Schädigung beschleunigt wird. Schematisch ist dieser Einfluss in Bild 5.9 dargestellt. In dem Diagramm werden beispielhaft zwei Formparameter verglichen, indem die Ausfallzeiten der einzelnen Zähne sowie die Verschiebung mit dem variierten Moment im Wöhlerdiagramm eingezeichnet sind. Der schwächste Zahn ist in rot dargestellt und ist für beide Formparameter identisch. Für beide Formparameter werden beispielhaft drei weitere Ausfallzeiten der individuellen Zähne eingezeichnet. Auffällig ist, dass der Abstand zwischen schwächstem und zweit-schwächstem Zahn variiert. Da in der Simulation Weibull-Verteilungen hinterlegt sind, ergeben sich bei kleinen Formparametern rechtsschiefe Verteilungen und die erzeugten Ausfallzeiten liegen häufiger im Bereich kleiner Lebensdauer und dort enger beieinander. Durch eine Vergrößerung des Formparameters resultiert ein größerer Abstand zwischen den kleinsten Ausfallzeiten. Bei einer weiteren Vergrößerung des Formparameters rücken die Ausfallzeiten jedoch wieder weiter zusammen, da die Verteilung schmaler wird. Dieser Abstand zwischen schwächstem und zweit-schwächstem Zahn ist direkt mit der möglichen Steigerung der RUL innerhalb der aBS verbunden. Im Beispieldiagramm in Bild 5.9 wird der schwächste Zahn über einen idealen Sprung entlastet und parallel zur Wöhlerlinie nach rechts unten verschoben. Alle anderen Zähne werden entsprechend etwas höher belastet und nach links oben verschoben. Dies ist im Bild lediglich an den zweit-schwächsten Zähne der jeweiligen Verteilung angedeutet. Es resultiert jeweils der Ausfall für das gesamte Zahnrad. Die rot gestrichelte Linie stellt den Ausfall ohne aBS dar und die blauen gestrichelten Linien den Ausfall mit angewendeter aBS bei den jeweiligen Formparametern. Es wird deutlich, dass die Ausfallzeit mit aBS auch geringer ausfallen kann als ohne aBS. Dies ist der Fall, wenn die Streuung der Belastbarkeit zu gering ist. Die erhöhte Belastung des zweit-schwächsten Zahnes hat demnach eine extreme Steigerung der Degradation zur Folge und führt daher zu einem sehr frühen Ausfall des gesamten Zahnrads. Anhand dieses einfachen schematischen Beispiels wird daher die enorme Bedeutung der Streuung der Belastbarkeit und damit der Verteilung deutlich.

Im Folgenden wird mit diesem Zusammenhang das Simulationsmodell plausibilisiert. Hierfür wird der Formparameter der Ausfallverteilung b_{nEOL} variiert. Für

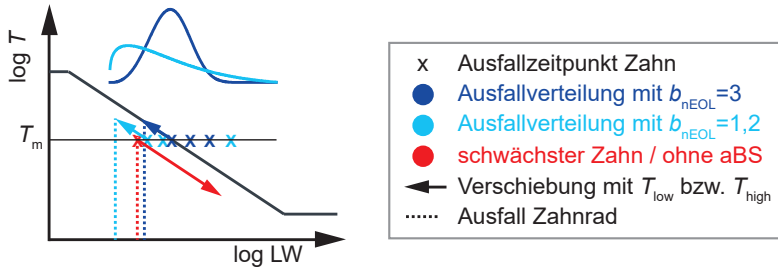


Bild 5.9 Schematische Darstellung des Einflusses der Streuung der Belastbarkeit

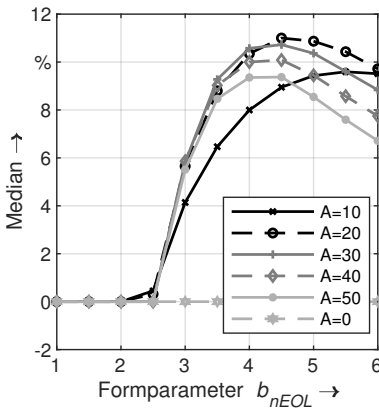


Bild 5.10 Median der Lebensdauersteigerung: Einfluss der Streuung der Belastbarkeit b_{nEOL} mit kleinen Formparametern bei $ES = 1$

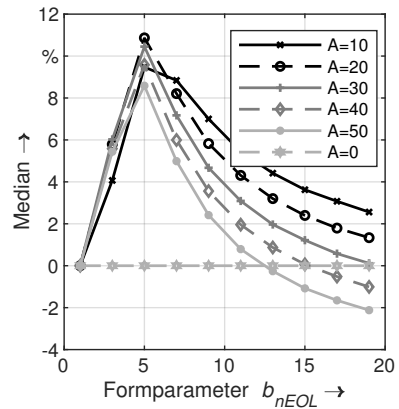


Bild 5.11 Median der Lebensdauersteigerung: Einfluss der Streuung der Belastbarkeit b_{nEOL} mit großen Formparametern bei $ES = 1$

Formparameter kleiner 2 kann die aBS mit idealem Sprung nicht zielführend angewendet werden. Der Median der Lebensdauersteigerung liegt bei 0%, siehe Bild 5.10. Hier ist der Abstand zwischen den kleinsten zwei Pseudo-Zufallszahlen durch die rechtsschiefe Verteilung sehr klein, sodass im Median keine Steigerung erreicht wird. Mit der Vergrößerung des Formparameters steigt die Steigerung der RUL bis zu einem Maximum an, welches in diesem Beispiel für Amplituden ab 20 Nm zwischen $b = 4$ und $b = 5$ liegt. Danach fällt die Steigerung der RUL wieder ab, wenn die Verteilung durch den großen Formparameter wieder schmaler wird. In Bild 5.11 ist der Bereich des Formparameters bis 20 erweitert und es ergeben sich negative Werte für den Median bei Amplituden größer 30 Nm. Je höher die Amplitude, desto kleiner ist der Formparameter, ab welchem eine Verringerung der RUL resultiert. Bei 50 Nm ist der erste negative Wert bei einem Formparameter von $b = 13$ und die Amplitude

von 30 Nm erzielt ab einem Formparameter von $b = 19$ keine Steigerung der RUL mehr. Die Amplitude 40 Nm liegt dementsprechend dazwischen bei ca. $b = 15$.

Nach dem Stand der Technik gilt für den Ausfall des Zahnrades ein Formparameter von 3,2 [Sta+99]. Somit liegt hier eine Steigerung von ca. 6 % der RUL vor. Jedoch sind im Stand der Technik lediglich die Ausfallzähne berücksichtigt und in der vorliegenden Simulation wird die Verteilung als Grundgesamtheit über alle Zähne am Umfang des Zahnrades angesehen und damit auch Grübchen an allen Zahnflanken initiiert. Aus diesem Grund handelt es sich hierbei lediglich um eine konservative erste Abschätzung der Steigerung der RUL, welche jedoch aktualisiert und korrigiert werden kann, sobald genauere Daten bezüglich der Grundgesamtheit vorliegen. Aus der erweiterten Auswertung der Grübchenversuche in Abschnitt 4.4.1 wurde ein Formparameter von 4,8 für alle Grübchen am Umfang der Serienverzahnung berechnet, was direkt in das Maximum der Steigerung der RUL fällt. Somit ist eine Lebensdauersteigerung von ca. 11 % möglich. Für die Ausfallverteilung nach dem Stand der Technik und damit lediglich dem schwächsten Zahn eines Zahnrades ergab sich dagegen ein Formparameter von 13,2 (vgl. Tabelle 4.6). Hier sinkt der Median bereits stark, sodass bei der kleinen Amplitude von 10 Nm noch eine Steigerung von 4 % möglich ist.

5.3.2 Einfluss des Ausfallzahnes

Ein weiterer wichtiger Einfluss auf die Steigerung der RUL durch die aBS ist der Ausfallzahn, d.h. welcher Zahn mit angewendeter aBS ausfällt. Ohne aBS fällt immer Zahn-Nummer 1 aus, da die Nummerierung der Zähne immer bei der kleinsten Zufallszahl am Umfang gestartet wird. Mit aBS hängt die Nummer des Ausfallzahnes von vier Faktoren ab, der Amplitude A , der Zähnezah z , dem Eingangssignal ES und der Abhängigkeit ab .

Die Amplitude reduziert zum einen die Belastung auf den schwächsten Zahn und verlängert damit die nutzbare Restlebensdauer. Jedoch werden abhängig von der Amplitude die anderen Zähne am Umfang auch entsprechend höher belastet und fallen möglicherweise früher aus. Es gibt daher zwei Szenarien bezogen auf die Amplitude. Ist die Amplitude klein, fällt trotz aBS Zahn Nummer 1 aus und das volle Potenzial der aBS wird nicht genutzt. Ab einer bestimmten Amplitude wird dann die Lebensdauer des schwächsten Zahnes so weit gesteigert, dass andere Zähne am Umfang früher ausfallen und keine weitere Steigerung der RUL möglich ist. Im Extremfall wird die Lebensdauer des zweit-schwächsten Zahnes sogar so weit reduziert, dass durch die aBS keine Steigerung der RUL möglich ist (vgl. Bild 5.9).

Bei der Betrachtung des Ausfallzahnes spielt zusätzlich zur Amplitude auch die Zähnezah und das Eingangssignal eine entscheidende Rolle. Hiervon hängt ab, wie hoch die restlichen Zähne belastet werden müssen, um die Leistung zu erhalten. Beispielfhaft zeigt Bild 5.12 für $z = 20$ und $T_m = 200$ Nm die Erhöhung an den anderen

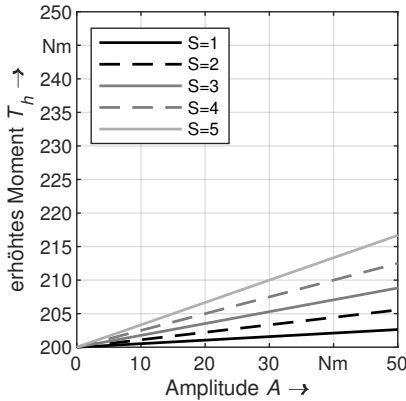


Bild 5.12 Erhöhtes Moment T_h an den anderen Zähnen bei unterschiedlich breiter Sprungfunktion S und Amplitude A , Zähnezahl $z = 20$

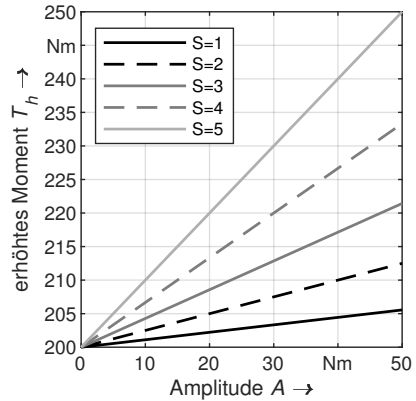


Bild 5.13 Erhöhtes Moment T_h an den anderen Zähnen bei unterschiedlich breiter Sprungfunktion S und Amplitude A , Zähnezahl $z = 10$

Zähnen bei unterschiedlichen Amplituden A und einer Sprungfunktion mit S reduzierten Zähnen auf. Bei einem idealen Sprung und einer Amplitude von lediglich 10 Nm ist die Erhöhung an den restlichen Zähnen mit 0,5 Nm sehr gering. Durch die Steigerung der Amplitude und der Breite des Sprungs erhöht sich im vorliegenden Beispiel die Belastung jedoch auf bis zu 216,7 Nm.

Die Zähnezahl ist hierbei von wesentlicher Bedeutung, siehe Bild 5.13. In diesem Diagramm ist wiederum das erhöhte Moment an den anderen Zähnen bei mittlerem Moment von $T_m = 200 Nm$ aufgetragen, wobei die Sprungfunktion und Amplitude entsprechend Bild 5.12 gewählt ist. Unterschied ist lediglich die Zähnezahl, welche in diesem Beispiel $z = 10$ beträgt. Das erhöhte Moment steigt stark an im Vergleich zur höheren Zähnezahl. Je weniger Zähne vorhanden sind, umso mehr muss jeder einzelne Zahn zusätzlich belastet werden, um die Reduktion zu kompensieren. Das Moment steigt hier auf 250 Nm an, siehe Bild 5.13. Damit steigt die Wahrscheinlichkeit, dass ein höher belasteter Zahn ausfällt und die Steigerung der RUL sinkt.

Die Kompensation wird bei den Sprung-Funktionen gleichmäßig über alle Zähne verteilt und fällt daher deutlich geringer aus als beim Sinussignal. Hier ist einerseits die Reduzierung deutlich höher, da eine Hälfte des Zahnrades reduziert wird. Andererseits werden die gegenüberliegenden Zähne deutlich höher belastet. Die Belastung am Zahn gegenüber dem schwächsten ist um die gesamte Amplitude erhöht, um die Kompensation zu erreichen. Damit ist die Wahrscheinlichkeit sehr hoch, dass die Zähne mit der maximalen Belastung deutlich früher ausfallen und dadurch lediglich eine geringe oder sogar keine Steigerung möglich ist. Hier resultiert demnach eine Reduktion der RUL durch die aBS, was der Randbedingung geschuldet

ist, dass keine Anpassung des Eingangssignals während des Betriebs vorgenommen wird. Durch eine online Anpassung des Eingangssignals könnte beispielsweise ein zweiter Sprung am Umfang des Zahnrades eingefügt werden und so auch der zweit-schwächste Zahn entlastet werden. Bezogen auf den Sinus könnte die Frequenz verdoppelt werden, um auch die gegenüberliegende Hälfte zu reduzieren.

Bei der Abhängigkeit spielt gleichzeitig das Eingangssignal eine wesentliche Rolle. Liegt ein idealer Sprung vor, hat die Abhängigkeit keinen Einfluss, da je nach Amplitude entweder der schwächste oder zweit-schwächste Zahn ausfällt. Hierbei ist es egal, an welcher Position am Umfang des Zahnrades der zweit-schwächste Zahn angeordnet ist. Wird die Belastung jedoch an mehreren Zähnen am Umfang reduziert, ist die Abhängigkeit von entscheidender Bedeutung. Bei einer hohen Abhängigkeit ist die Wahrscheinlichkeit sehr hoch, dass der zweit-schwächste Zahn ebenfalls reduziert wird und somit nicht zum Ausfall führt. Der Ausfall wird demnach durch einen Zahn mit höherer Belastbarkeit verursacht, wodurch eine größere Steigerung der RUL möglich ist. Dies steht in direkter Verbindung zur Streuung der Belastbarkeit (vgl. Abschnitt 5.3.2) und ist schematisch in Bild 5.14 verdeutlicht. In Bild 5.14a ist die Differenz unterschiedlicher Ausfallzeiten dargestellt. Der schwächste Zahn wird durch die aBS immer entlastet. Das Potential der aBS hängt demnach von der dargestellten Differenz der Ausfallzeiten ab. Beim idealen Sprung fällt der zweit-schwächste Zahn aus und für die Steigerung der RUL ist die Differenz $\Delta 2$ ZZ ausschlaggebend. Wird durch die Abhängigkeit auch der zweit-schwächste Zahn entlastet, vergrößert sich die Steigerung der RUL, da die Differenz $\Delta 3$ ZZ relevant ist usw. Im Schema ist lediglich ein beispielhaftes Zahnrad aufgeführt. Da dieses Beispiel auf Pseudo-Zufallszahlen basiert, werden die Differenzen für 100.000 Replikationen berechnet. Das Ergebnis dieser Differenzen zwischen den unterschiedlichen Ausfallzeiten ist im Histogramm in Bild 5.15 verdeutlicht. Allen drei Differenzen liegt eine Weibull-Verteilung mit einer charakteristischen Lebensdauer von 15 Mio. LW und einem Formparameter von 5 zugrunde. Die zwei kleinsten Zufallszahlen liegen meistens sehr eng beisammen, sodass die Differenz $\Delta 2$ ZZ gering ist. Jedoch kommen durchaus auch sehr große Differenzen vor, was sich sehr positiv auf die Steigerung der RUL auswirkt. Wird der zweit-schwächste Zahn ebenfalls entlastet, ist die Differenz zum dritt-schwächsten Zahn $\Delta 3$ ZZ relevant. Hier sind die Differenzen deutlich größer und das Histogramm liegt weiter rechts. Daraus resultiert direkt eine größere Steigerung der RUL durch die aBS. Fällt ein Zahn mit noch höherer Belastbarkeit aus, wird die Differenz weiter erhöht und die Steigerung der RUL steigt an. Für eine effiziente Anwendung der aBS ist damit der Ausfallzahn und dessen Belastbarkeit von großer Bedeutung.

Die Differenz zwischen den Ausfallzeiten wird zudem vom Formparameter der Ausfallverteilung beeinflusst. Dies ist in Bild 5.14b dargestellt. Sowohl bei kleinen als auch bei sehr großen Formparametern ist die Differenz zwischen den zwei kleinsten Ausfallzeiten sehr gering und die Steigerung der RUL durch die aBS dadurch

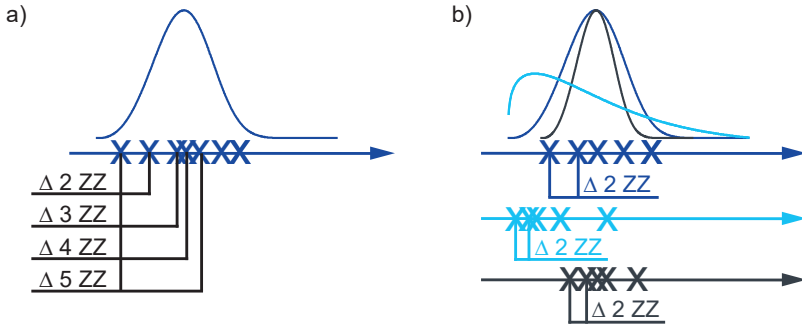


Bild 5.14 Schematische Darstellung der Ausfallzeiten unterschiedlicher Zähne. a) Abstand der kleinsten Zufallszahlen (ZZ) b) Vergleich unterschiedlicher Verteilungen

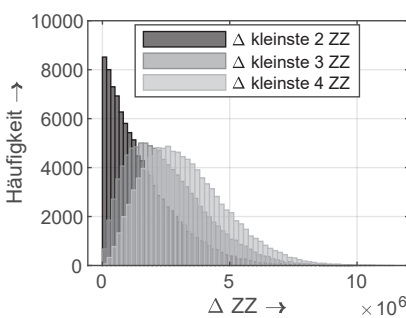


Bild 5.15 Histogramm der Differenz zwischen zwei Zufallszahlen (ZZ): kleinste 2 ZZ, kleinste und dritt kleinste ZZ, kleinste und viert kleinste ZZ

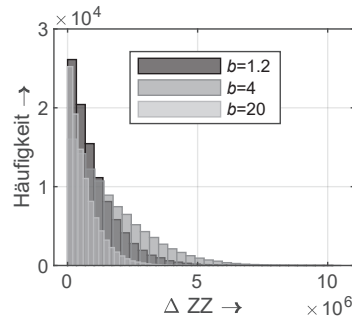


Bild 5.16 Histogramm der Differenz zwischen den zwei kleinsten Zufallszahlen (ZZ) bei unterschiedlichen Formparametern

geringer. Jedoch ändert sich die Differenz bei unterschiedlichem Formparameter weniger als bei unterschiedlichem Ausfallzahn, was durch das Histogramm in Bild 5.16 deutlich wird. Zusätzlich zum Formparameter beeinflusst die Zähnezahl den Abstand der Ausfallzeiten am Zahnrad. Werden beispielsweise nur zehn Ausfallzeiten gezogen, liegend diese weiter auseinander als bei einer höheren Anzahl.

Im Folgenden werden die Effekte dieser Einflussfaktoren innerhalb der Simulationsergebnisse betrachtet und das Modell damit weiter plausibilisiert. Zunächst wird der Einfluss der Zähnezahl z betrachtet, welche zum einen die Erhöhung des Moments an den restlichen Zähnen beeinflusst und zum anderen die Differenz der Zufallszahlen. Dieser Einfluss ist in Bild 5.17 für den Median des idealen Sprungs zu erkennen. Bei kleinen Zähnezahlen ist die Steigerung der RUL deutlich geringer als bei großen Zähnezahlen. Dies gilt für Amplituden ab 20 Nm, wobei sich die Steige-

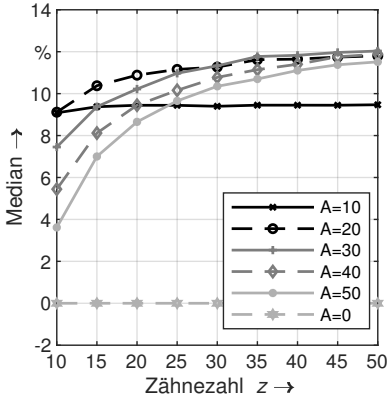


Bild 5.17 Median der Lebensdauersteigerung: Einfluss der Zähnezahl z bei $ES = 1$

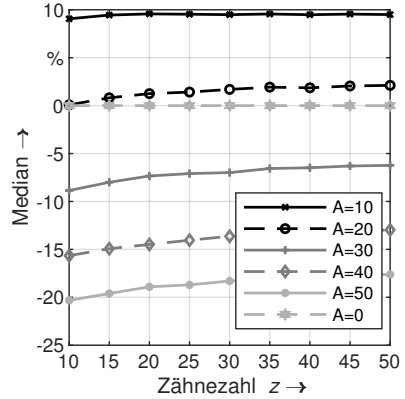


Bild 5.18 Median der Lebensdauersteigerung: Einfluss der Zähnezahl z bei $ES = 6$

rung der RUL bei kleinen Zähnezahlen im Bereich zwischen 4 und 9 % bewegt und für große Zähnezahlen pendeln sich die Kurven bei ca. 12 % ein. Einen grundsätzlich anderen Verlauf zeigt die Amplitude von 10 Nm. Hier ist ein konstanter Verlauf über der Zähnezahl vorhanden. Dies liegt daran, dass bei dieser kleinen Amplitude das Potenzial der aBS nicht voll ausgenutzt wird und trotz Momentenvariation der schwächste Zahn ausfällt.

Der Verlauf des Medians der Steigerung der RUL für den Sinus als Eingangssignal sieht grundsätzlich anders aus als für den Sprung, siehe Bild 5.18. Hier verlaufen alle Kurven nahezu konstant über den Zähnezahlen. Dies wird damit begründet, dass beim Sinus die gegenüberliegenden Zähne deutlich stärker belastet werden und daher immer der gegenüberliegende Zahn ausfällt. Zudem erhält der Zahn 180° versetzt zum schwächsten Zahn immer die volle Amplitude. Daher spielt die Zähnezahl für die Kompensation keine Rolle. Die Diagramme der anderen Eingangssignale sind im Anhang 9.3 zu finden.

Nach der Analyse der Zähnezahlen wird der Fokus auf die Abhängigkeit bei unterschiedlichen Eingangssignalen gelegt. In Bild 5.19 ist der Median für unterschiedliche Amplituden bei einem idealen Sprung ohne Erhöhung der Belastung an den anderen Zähnen aufgetragen ($ES = 0$). Für alle untersuchten Amplituden zeigt sich ein konstanter Verlauf über der Abhängigkeit, wodurch das Ergebnis plausibel ist. Wird durch das Eingangssignal lediglich das Moment an einem Zahn reduziert, spielt die Abhängigkeit keine Rolle. Zudem ist ersichtlich, dass eine Amplitude von 0 Nm keine Steigerung der RUL hervorruft und damit lediglich den Fall ohne aBS abbildet. Bei einer Amplitude von 10 Nm ergibt sich eine Steigerung der RUL von 10 % und bei höherer Amplitude streben alle Mediane zu ca. 14 %. Hierdurch wird

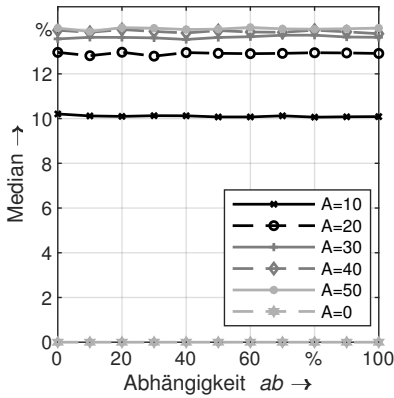


Bild 5.19 Median der Lebensdauersteigerung: Einfluss der Abhängigkeit bei $ES = 0$

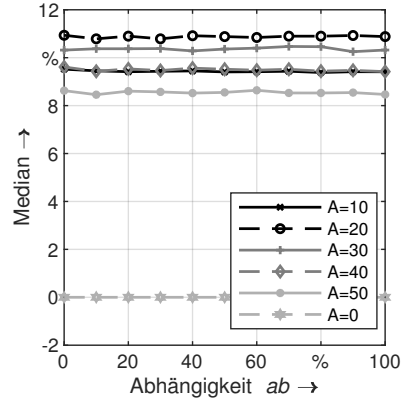


Bild 5.20 Median der Lebensdauersteigerung: Einfluss der Abhängigkeit bei $ES = 1$

sehr deutlich, dass bei einer Amplitude von 10 Nm nicht das volle Potenzial der aBS ausgeschöpft wird und Zahn-Nummer 1 auch mit Strategie ausfällt. Wird die Amplitude erhöht, fällt Zahn-Nummer 2 aus. Die Ausfallzeit von Zahn-Nummer 1 liegt weiter in der Zukunft. Eine weitere Erhöhung der Amplitude verschiebt lediglich diese Ausfallzeit von Zahn-Nummer 1 weiter in die Zukunft, ändert jedoch nichts an der Ausfallzeit von Zahn-Nummer 2 und damit der Lebensdauer des gesamten Zahnrades.

Für den idealen Sprung als Eingangssignal ($ES = 1$) verlaufen die Kurven ebenfalls konstant über der Abhängigkeit, da die Position des zweit-schwächsten Zahnes am Umfang keine Rolle spielt, siehe Bild 5.20. Die Höhe der Kurven unterscheidet sich jedoch grundlegend, da in diesem Fall durch die Amplitude die Ausfallzeiten von allen anderen Zähnen verkleinert werden. Die maximale Steigerung der RUL zeigt sich daher bei einer Amplitude von 20 Nm mit ca. 11 %. Durch die Erhöhung der Amplitude fallen die anderen Zähne am Umfang deutlich früher aus und die mögliche Steigerung der RUL sinkt. Bei der Amplitude von 10 Nm wird wiederum nicht das volle Potenzial genutzt und der Median liegt bei ca. 9 %.

Die Bilder 5.21 und 5.22 zeigen die Ergebnisse für einen Sprung mit drei reduzierten Zähnen ($ES = 3$). Für den Median in Bild 5.21 ist der Verlauf der Kurven monoton steigend über der Abhängigkeit. Dadurch wird bestätigt, dass mit höherer Abhängigkeit die Wahrscheinlichkeit größer ist, dass der zweit- und sogar der dritt-schwächste Zahn ebenfalls im reduzierten Bereich liegt und damit je nach Amplitude der dritt- oder viert-schwächste Zahn ausfällt. Dadurch kann die RUL durch die aBS deutlich auf ca. 19 % bei einer Amplitude von 20 Nm gesteigert werden. Auffällig ist wiederum die Amplitude von 10 Nm. Diese besitzt eine flachere Stei-

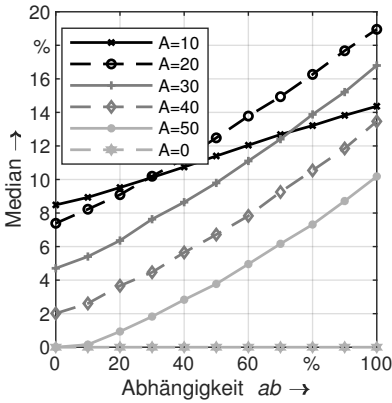


Bild 5.21 Median der Lebensdauersteigerung: Einfluss der Abhängigkeit bei $ES = 3$

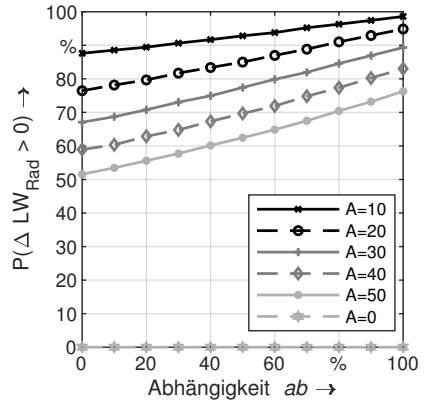


Bild 5.22 Wahrscheinlichkeit für positiven Effekt: Einfluss der Abhängigkeit bei $ES = 3$

gung als die restlichen Kurven, da bei dieser Amplitude die Wahrscheinlichkeit mit 40 bis 60 % sehr groß ist, dass trotz der aBS der schwächste Zahn ausfällt und damit die Abhängigkeit keine Bedeutung hat. Bei den größeren Amplituden ist diese Wahrscheinlichkeit kleiner als 25 %.

In Bild 5.22 ist anstatt des Medians die Wahrscheinlichkeit für einen positiven Effekt auf der y-Achse aufgetragen. Bei einer Amplitude von 10 Nm wird in über 85 % der Fälle ein positiver Effekt erzielt, was bei einer Abhängigkeit von 100 % sogar auf über 95 % erhöht wird. Bei den höheren Amplituden zeigt sich ein Offset hin zu geringeren Wahrscheinlichkeiten für den positiven Effekt, da die anderen Zähne am Umfang durch die größere Belastung früher ausfallen. Für alle Amplituden und Abhängigkeiten ist die Wahrscheinlichkeit für einen positiven Effekt jedoch größer als 50 %. Das Diagramm zeigt allerdings auch auf, dass bei allen Amplituden zu einem bestimmten Prozentsatz keine Steigerung der Lebensdauer erreicht wird. Dies ist vor allem bei hohen Amplituden und breiten Sprungfunktionen der Fall, wenn die anderen Zähne deutlich mehr belastet werden, vgl. Bild 5.12 und 5.13.

Für die Sinusfunktion als Eingangssignal ($ES = 6$) wird beispielhaft die gesamte statistische Auswertung der Simulation aufgezeigt. In Bild 5.23 ist der Median der konservativen Auswertung dargestellt, d.h. es wird an jedem Zahn ein Grübchen initiiert. Wiederum wurden jeweils unterschiedliche Amplituden untersucht und über der Abhängigkeit aufgetragen. Der konservative Fall zeigt in den meisten Fällen eine negative Steigerung der RUL durch die aBS auf. Nur eine sehr kleine Amplitude von 10 Nm ergibt einen durchweg positiven Verlauf. Es zeigt sich daher sehr deutlich der Einfluss der extrem hohen Belastung auf der gegenüberliegenden Seite des Zahnrades. Die Amplitude von 20 Nm ist ab einer Abhängigkeit von 40 % im positi-

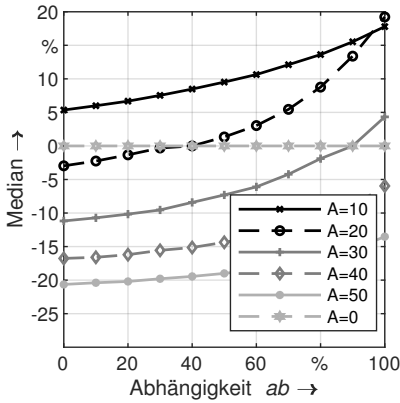


Bild 5.23 Median der Lebensdauersteigerung: Einfluss der Abhängigkeit bei $ES = 6$

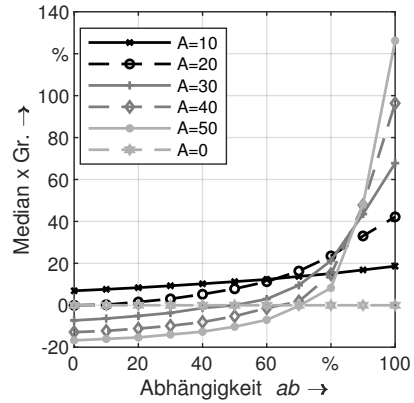


Bild 5.24 Median der Lebensdauersteigerung bei x Grübchen: Einfluss der Abhängigkeit bei $ES = 6$

ven Bereich und erreicht ein Maximum von ca. 20 %. Selbst eine Abhängigkeit von 100 % erzielt lediglich bei Amplituden kleiner als 35 Nm einen Median über Null.

Im Gegensatz dazu zeigt Bild 5.24 den Verlauf für die Auswertung des Medians bei einer Betrachtung von lediglich x Grübchen am Umfang. Die Anzahl x der betrachteten Grübchen unterscheidet sich hierbei für jedes simulierte Zahnrad und liegt zwischen eins und 13, siehe Abschnitt 5.1.9. Es zeigen sich vor allem im Bereich großer Abhängigkeiten sehr große Unterschiede im Verlauf, da die schwächsten Zähne im reduzierten Bereich angeordnet sind. Bei kleinen Abhängigkeiten ist der Unterschied zwischen den beiden Auswertungen marginal. Jedoch steigen die Kurven deutlich früher und steiler über der Abhängigkeit, sodass bereits bei einer Abhängigkeit von 50 % die 30 Nm Kurve den Nulldurchgang zeigt. Bei der konservativen Auswertung ist dies erst bei einer Abhängigkeit von 90 % der Fall. Zudem liegen alle Kurven ab einer Abhängigkeit von 70 % oberhalb von Null und erreichen teilweise extreme Lebensdauersteigerungen mit über 120 %. Dies resultiert aus der hohen Abhängigkeit, wodurch alle Zähne mit Grübchen in der Hälfte mit reduziertem Moment liegen. Die andere Hälfte mit erhöhtem Moment wird in dieser Betrachtung nicht berücksichtigt und die Zähne erhalten trotz erhöhtem Moment keinen Grübchenschaden. Dadurch ist diese Auswertung für die hohen Abhängigkeiten beim Sinus deutlich zu positiv. Allerdings tritt diese Überschätzung der Steigerung der RUL durch die aBS lediglich bei der Sinusfunktion auf. Beim Sprung fällt immer einer der schwächsten fünf Zähne aus, welche auch in dieser Berechnung in den meisten Fällen enthalten sind. Aus diesem Grund wird diese Auswertung im Folgenden nicht weiter betrachtet und der Fokus auf die konservative Auswertung mit Grübchen an allen Zähnen gelegt.

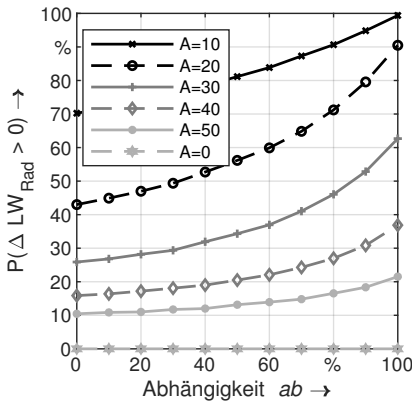


Bild 5.25 Wahrscheinlichkeit für positiven Effekt der aBS: Einfluss der Abhängigkeit bei $ES = 6$

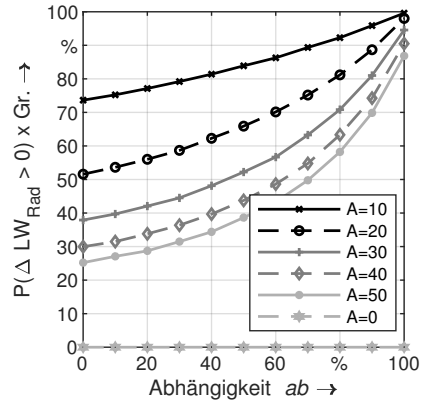


Bild 5.26 Wahrscheinlichkeit für positiven Effekt der aBS bei x Grübchen: Einfluss der Abhängigkeit bei $ES = 6$

Neben dem Median der RUL-Steigerung werden für alle Simulationen weitere Auswertungen vorgenommen, wie die Wahrscheinlichkeit für einen positiven Effekt sowie eine Analyse des Ausfallzahnes. Diese werden im Folgenden beispielhaft anhand der Sinusfunktion beschrieben. Die Wahrscheinlichkeit für einen positiven Effekt wird wiederum für die konservative Auswertung und die Auswertung mit nur x Grübchen am Umfang ausgewertet. Diese Diagramme sind in den Bildern 5.25 und 5.26 dargestellt. Trotz des negativen Medians bei höheren Amplituden zeigt sich ein gewisser Prozentsatz mit positivem Effekt. D.h. auch mit hoher Amplitude kann teilweise ein positives Resultat erreicht werden. Bei einer Amplitude von 10 Nm und einer Abhängigkeit von 100 % ergibt sich sogar eine Wahrscheinlichkeit von 100 % bei der konservativen Auswertung. Für die Auswertung mit lediglich x Grübchen sind die Kurven insgesamt deutlich höher angeordnet und steigen bei hohen Abhängigkeiten auch steil an, sodass hier auch bei einer Amplitude von 50 Nm eine 85%ige Wahrscheinlichkeit für einen positiven Effekt besteht.

Zuletzt wurde ausgewertet, welcher Zahn mit aBS zum Ausfall des gesamten Zahnrades führt. Hierfür wurde die Wahrscheinlichkeit für den Ausfall von Zahn-Nummer 1 in Bild 5.27 aufgetragen. Vor allem bei einer kleinen Amplitude von 10 Nm ist die Wahrscheinlichkeit, dass Zahn-Nummer 1 für den Ausfall verantwortlich ist sehr hoch. Demnach wird hier nicht das volle Potenzial der aBS genutzt. Des Weiteren wird bei der Simulation ausgegeben, welcher Zahn schlussendlich für den Ausfall verantwortlich ist. Dies ist über alle Amplituden und Abhängigkeiten zusammen in Bild 5.28 dargestellt. Hier ist ebenfalls der hohe Anteil von Zahn-Nummer 1 zu erkennen. Zudem führen in den allermeisten Fällen die Zähne gegenüber des

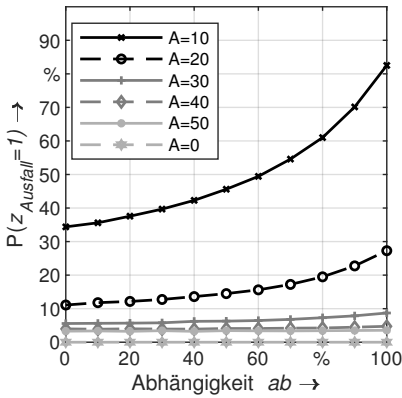


Bild 5.27 Wahrscheinlichkeit, dass Zahn 1 ausfällt: Einfluss der Abhängigkeit bei $ES = 6$

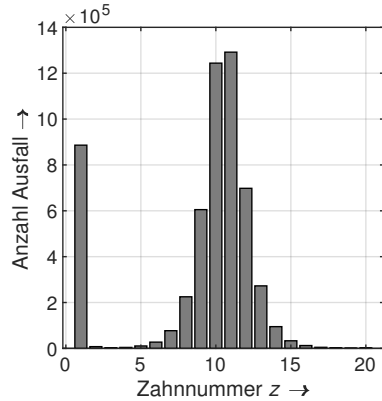


Bild 5.28 Histogramm der Ausfallzähne über alle Simulationen bei $ES = 6$

schwächsten Zahnes, also im Bereich des Schwingungsmaximums zum Ausfall des Zahnrades. Der zweit-schwächste Zahn am Umfang des Zahnrades spielt daher für die Sinusfunktion lediglich eine untergeordnete Rolle. Aus diesem Grund kann die erste Annäherung des Drehmoments über fünf Zeitschritte als ausreichend erachtet werden, vgl. Abschnitt 5.1.2. Die gegenüberliegenden Zähne, welche häufig zum Ausfall führen, durchlaufen im Schwingungsmaximum einen annähernd konstanten Drehmomentbereich, wodurch eine zusätzliche Aufteilung in die unterschiedlichen Flankenbereiche vernachlässigt werden kann. Der Simulationsaufwand wird daher bezüglich Genauigkeit nicht weiter erhöht.

5.3.3 Einfluss der Dauer der adaptiven Betriebsstrategie

Der Start der adaptiven Betriebsstrategie beeinflusst in großem Maße die Dauer der Momentenvariaton am Umfang des Zahnrades und damit die Steigerung der RUL durch die aBS. Damit wird gleichzeitig beeinflusst, in welchem Maße das volle Potenzial der aBS ausgeschöpft wird. Je später mit der aBS gestartet wird, desto weniger lang wird die Last am schwächsten Zahn reduziert. Allerdings kommt es je nach Eingangssignal und anliegender Amplitude zu zwei gegenläufigen Effekten:

1. Die **Steigerung der RUL sinkt** mit späterem Start, da der schwächste Zahn nicht so lange entlastet wird.
2. Die **Steigerung der RUL wächst** mit späterem Start, da die restlichen Zähne kürzer mit hohem Moment belastet werden.

der Strategie gestartet werden (dunkelblaue Kurven). Schlussendlich wird die messbare Grübchengröße a_{mess} reduziert, was den Startzeitpunkt verkleinert (hellblaue Kurven). Bei der Kombination des großen Initiierungszeitpunkts (dunkelblau) und der kleineren messbaren Grübchengröße (hellblau) wird deutlich, dass der Startzeitpunkt in diesem Fall nicht mehr von der messbaren Grübchengröße abhängt, sondern alleine von der Grübcheninitiierung. Dieser Zusammenhang muss bei der Betrachtung der Simulationsergebnisse beachtet werden, da eine weitere Reduzierung der messbaren Grübchengröße keinen Effekt mehr zeigt und die Dauer der aBS dadurch nicht mehr gesteigert werden kann.

Die in Bild 5.29 aufgezeigten Zusammenhänge werden im Folgenden anhand der Simulationsergebnisse plausibilisiert. In Bild 5.30 wird die messbare Grübchengröße von 0,2 bis 3,8 % variiert und jeweils der Verlauf des Medians der Lebensdauererlängerung bei Amplituden zwischen 10 und 50 Nm ausgewertet. Der Verlauf der unterschiedlichen Amplituden zeigt deutlich die beiden oben beschriebenen Effekte. Bei einer Amplitude von 10 Nm resultiert ein monoton fallender Verlauf über der messbaren Grübchengröße. Damit dominiert hier Effekt 1 und ein späterer Startzeitpunkt ergibt eine Reduzierung der Steigerung der RUL, da der schwächste Zahn weniger lang entlastet wird. Bei den höheren Amplituden ergeben sich ausgeprägte Maxima, was durch die Kombination beider Effekte erreicht wird. Bei einem frühen Start und damit kleinen messbaren Grübchengrößen dominiert Effekt 2 und die Steigerung der RUL wird durch die anderen höher belasteten Zähne am Umfang beeinflusst. Wird die messbare Grübchengröße erhöht und damit später gestartet, dominiert Effekt 1. Zudem variieren die Maxima der unterschiedlichen Amplituden. Je höher die Amplitude, desto größer die messbare Grübchengröße am Maximum der Kurve. Über dieses Diagramm wird damit eine Aussage getroffen, welche Amplitude bei einer vorgegebenen messbaren Grübchengröße optimal ist. Des Weiteren wird bei den vorliegenden Simulationsergebnissen davon ausgegangen, dass der Zeitpunkt beim Erreichen der messbaren Grübchengröße für den Start der aBS verantwortlich ist und nicht die Grübcheninitiierung. Die charakteristische Lebensdauer der Initiierungsgröße T_{a0} ist im Referenzsystem mit 0,5 % sehr klein bezogen auf den Bereich der messbaren Grübchengröße, wodurch kein Vermischen der beiden Effekte zu erwarten ist.

Bild 5.31 stellt ebenfalls den Einfluss der messbaren Grübchengröße dar, jedoch wird hier der Fokus auf kleine Amplituden zwischen 4 und 20 Nm gelegt. Bis zu einer Amplitude von 8 Nm ist ausschließlich Effekt 1 vorhanden und die Steigerung der RUL sinkt bei $A = 4$ Nm konvex und bei $A = 8$ Nm linear über der messbaren Grübchengröße. Ist die Amplitude größer als 8 Nm wird der Verlauf immer konkav bis dann ab 20 Nm ein Maximum vorhanden ist.

Die Diagramme zu den Eingangssignalen $ES = 3$ und $ES = 6$ sind im Anhang 9.4 zu finden. Bei $ES = 3$ sind die Maxima deutlich ausgeprägter, da Effekt 2 durch die stärkere Lasterhöhung der restlichen Zähne am Umfang überwiegt. Bei

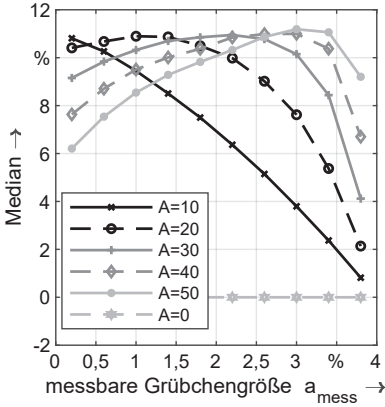


Bild 5.30 Median der Lebensdauersteigerung: Einfluss der messbaren Grübchengröße bei $ES = 1$

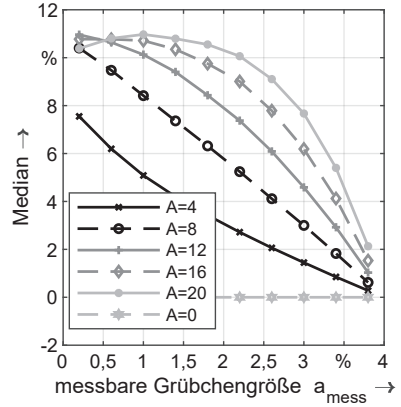


Bild 5.31 Median der Lebensdauersteigerung: Einfluss der messbaren Grübchengröße bei kleinen Amplituden und $ES = 1$

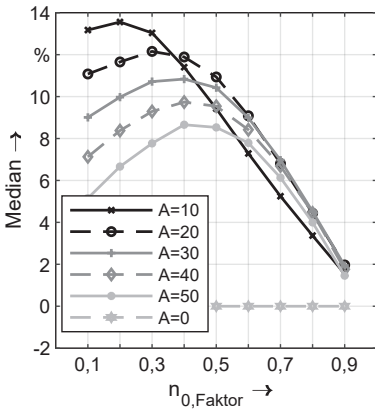


Bild 5.32 Median der Lebensdauersteigerung: Einfluss von $n_{0,Faktor}$ bei $ES = 1$

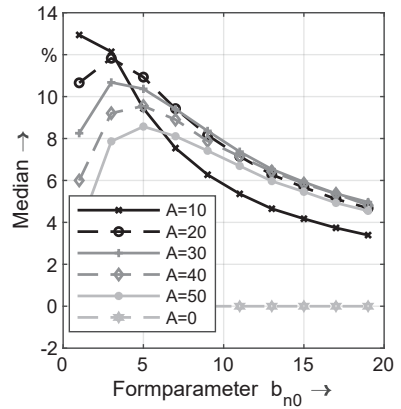


Bild 5.33 Median der Lebensdauersteigerung: Einfluss des Formparameters des Initiierungszeitpunkts b_{n0} bei $ES = 1$

$ES = 6$ starten die Kurven im negativen Bereich, das Maximum ist allerdings positiv. Zudem kommt es bei hohen Amplituden nicht mehr zu einem ausgeprägten Hochpunkt, sondern der Verlauf ist monoton steigend, sodass ein später Start zur maximalen Steigerung der RUL führt. Dies wird mit den deutlich erhöhten Lasten 180° versetzt zum schwächsten Zahn erklärt, vgl. Bild 5.28.

Der Einfluss von $n_{0,Faktor}$ auf die Steigerung der RUL durch die aBS zeigt Bild 5.32. Hier ist für $ES = 1$ der Bereich von 0,1 bis 0,9 für unterschiedliche Amplituden abgebildet. Wiederum zeigen sich die beiden Effekte sehr deutlich und es resultieren Maxima der Kurven. Bei einem kleinen $n_{0,Faktor}$ dominiert Effekt 2 und damit die restlichen Zähne am Umfang und bei einem großen $n_{0,Faktor}$ Effekt 1. Der Unterschied zur messbaren Grübchengröße liegt darin, dass hier alle Kurven bei einem großen $n_{0,Faktor}$ zu einer Steigerung von Null streben. Einerseits gilt wiederum, dass weniger Steigerung der RUL erreicht wird, je später gestartet wird. Andererseits werden über den $n_{0,Faktor}$ die Initial- und Ausfallverteilung zusammen geschoben und überlappen sich dadurch stark. Dadurch können die pseudo-zufälligen Ausfallzeitpunkte kleiner als die Initialisierungszeitpunkte werden. In diesem Fall resultiert für diesen Zahn direkt der Ausfall, wodurch das Potenzial zu Null wird. Dieser Zusammenhang gilt auch für die Eingangssignale $ES = 3$ und $ES = 6$, siehe Anhang 9.5.

Denselben Effekt zeigt der Formparameter der Grübcheninitiierung b_{n0} , siehe Bild 5.33. Ist dieser klein, wird früher mit der aBS gestartet, als bei größerem Formparameter. Hierdurch entstehen für die einzelnen Amplituden wieder Verläufe mit einem Maximum. Dieses liegt bei Formparametern von ca. 3 bis 5. Links und rechts davon fällt der Median wegen den zwei beschriebenen Effekten bezogen auf die Dauer der aBS ab. Lediglich die Amplitude 10Nm weicht von diesem Verlauf ab und zeigt das Maximum beim kleinsten Formparameter.

Abschnitt 4.4.1 der erweiterten Grübchenauswertung hat gezeigt, dass die charakteristische Lebensdauer durch die Betrachtung aller Grübchen am Umfang von 8,8 auf 13,3 Mio. LW erhöht wird, vgl. Tabelle 4.6. Bezogen auf die Steigerung der RUL durch die aBS kann durch diese Verschiebung auf der x-Achse des Wöhlerdiagramms allerdings kein Einfluss erkannt werden. Die Kurven in Bild 5.34 sind alle konstant über die unterschiedlichen charakteristischen Lebensdauern der Ausfallverteilung T_{nEOL} . Grund hierfür ist die Betrachtung der relativen Werte. Die absoluten Werte der Lebensdauer mit und ohne aBS spielen daher keine Rolle. Die maximale Steigerung der RUL wird über eine Amplitude von 20Nm erreicht und liegt bei ca. 11%. Mit der Steigerung der Amplitude auf 50Nm reduziert sich der Median auf etwa 8,5%.

Der schematische Zusammenhang aus Bild 5.29 zeigt einen Einfluss der Initiierungsgröße auf, da bei großer Initiierung bereits früh die messbare Grübchengröße erreicht wird und damit auch früh mit der aBS gestartet werden kann. Dementsprechend ergeben sich gegenläufige Kurven zu den vorherigen Diagrammen der messbaren Grübchengröße und $n_{0,Faktor}$. Für kleine Amplituden steigt der Median mit T_{a0} und bei höheren Amplituden sinkt der Median, siehe Bild 5.35. Dies lässt sich wiederum den beiden Effekten, kurze Reduzierung des schwächsten Zahnes, bzw. lange Erhöhung der anderen Zähne, zuordnen. In Bild 5.35 ist der Einfluss der Initiierungsgröße T_{a0} für das Eingangssignal $ES = 1$ dargestellt. Die Diagramme der

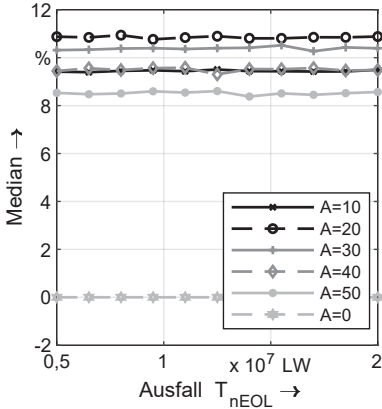


Bild 5.34 Median der Lebensdauersteigerung: Einfluss des Ausfallzeitpunkts T_{nEOL} bei $ES = 1$

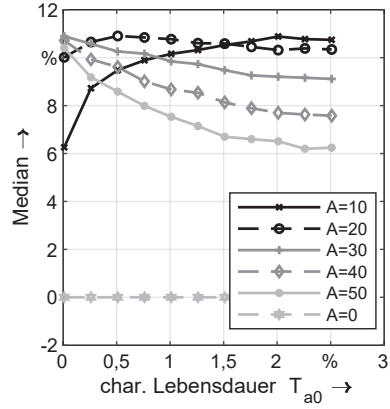


Bild 5.35 Median der Lebensdauersteigerung: Einfluss der Initiierungsgröße T_{a0} bei $ES = 1$

anderen Eingangssignale zeigen einen ähnlichen Verlauf und sind im Anhang 9.8 beigefügt.

Im Referenzsystem aus Tabelle 5.1 ist eine messbare Grübchengröße von 1 % hinterlegt, wodurch der Start der aBS teilweise nicht direkt bei der Initiierung ist. Eine hohe Initiierungsgröße ist damit direkt mit einem frühen Startzeitpunkt und einer hohen Dauer der aBS verbunden. Bei kleinen Initiierungsgrößen dagegen wird erst zeitverzögert mit der aBS gestartet. Um dies separat zu untersuchen, wurde die messbare Grübchengröße in der Simulation auf 0,01 % gesetzt. Dadurch ist gewährleistet, dass in jedem Fall direkt bei der Initiierung mit der aBS gestartet wird. Das Ergebnis dieser Untersuchung ist in Bild 5.36 dargestellt. Es ergibt sich für jede Amplitude ein konstanter Verlauf über der Initiierungsgröße. Der Start der aBS und damit die Dauer der Momentenvariation wird hier nicht mehr durch die Initiierungsgröße beeinflusst. Ausschlaggebend ist alleine der Initiierungszeitpunkt n_0 .

Für den Formparameter der initialen Grübchengröße b_{a0} verhält es sich gleich wie bei der charakteristischen Lebensdauer T_{a0} . Für eine messbare Grübchengröße von 0,01 % und damit einem direkten Start der Strategie bei der Initiierung ergeben sich konstante Verläufe über dem Formparameter b_{a0} . Für das Referenzsystem mit $a_{mess} = 1$ zeigen sich dagegen unterschiedliche Verläufe bei der Variation der Amplitude, siehe Bild 5.37. Ein kleiner Formparameter bedeutet durch die links-schiefe Weibullverteilung eine kleine Initiierungsgröße am schwächsten Zahn und damit ein später Start der aBS und umgekehrt. Aus diesem Grund steigt die Kurve der 10 Nm Amplitude, da ein früher Start, also großer Formparameter, die Dauer der aBS erhöht. Bei einer Amplitude von 20 Nm zeigt sich ein nahezu konstanter Verlauf. Die Kurven der anderen Amplituden verlaufen dagegen fallend, da hier bei einem späten

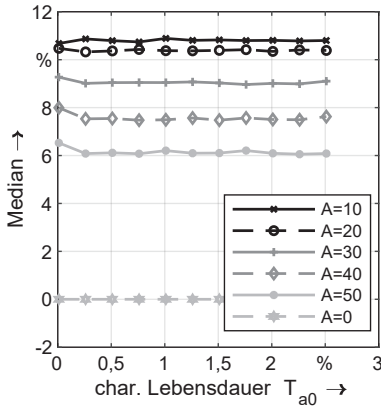


Bild 5.36 Median der Lebensdauersteigerung: Einfluss der Initiierungsgröße T_{a0} bei $ES = 1$ und $a_{mess} = 0,01\%$

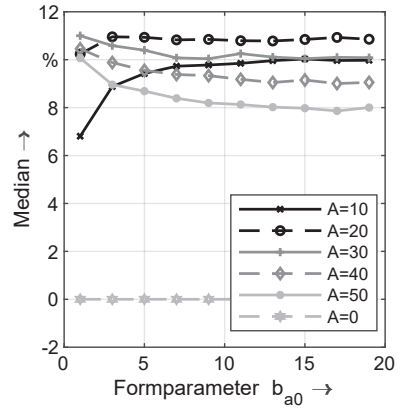


Bild 5.37 Median der Lebensdauersteigerung: Einfluss des Formparameters der Initiierungsgröße b_{a0} bei $ES = 1$

Start, also kleinen Formparametern, die anderen Zähne am Umfang weniger lange mit dem erhöhten Moment belastet werden. Die Kurvenverläufe sowie die Zusammenhänge entsprechen daher denen von T_{a0} .

5.3.4 Einfluss des Lebensdauermodells

Als Lebensdauermodell ist in der Simulation eine Wöhlerkurve hinterlegt. Sowohl die Steigung der Geraden im doppellogarithmischen Diagramm, also der Wöhlerexponent k_T , als auch die Lage bezogen auf die x-Achse ist variabel, sodass der Einfluss dieser Lebensdauerparameter auf die Steigerung der RUL durch die aBS untersucht werden kann. Den Zusammenhang zwischen dem Wöhlerexponenten k_T und der Verschiebung der Lastwechsel bei einer vorgegebenen Amplitude ist in Bild 5.38a dargestellt. Ein kleiner Wöhlerexponent ergibt eine steilere Kurve und dementsprechend ergibt ein größerer Wöhlerexponent eine flachere Kurve. Das mittlere Moment T_m dient als Basis und bei einer Erhöhung auf T_h ergibt sich je nach Wöhlerexponent eine unterschiedlich große Verschiebung auf der x-Achse. Je flacher die Kurve ist, desto früher fallen demnach die Zähne mit erhöhtem Moment aus. Jedoch ist hier gleichzeitig auch die Verlängerung des schwächsten Zahnes durch das reduzierte Moment größer. Daraus wird geschlossen, dass für kleine Amplituden, also wenn trotz aBS der schwächste Zahn ausfällt, eine flache Kurve der möglichen RUL-Steigerung resultiert. Fällt jedoch durch eine höhere Amplitude ein anderer Zahn am Umfang aus, führt die steile Wöhlerkurve zu einem besseren Resultat der aBS. Ein Dauerfestigkeitsbereich wird an dieser Stelle nicht berücksichtigt, da in der Simula-

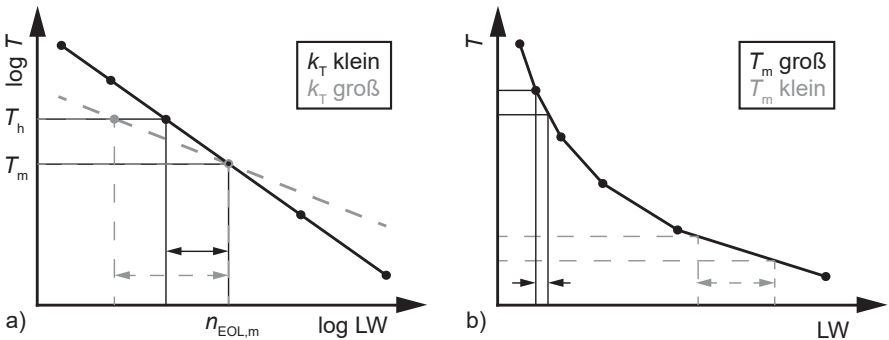


Bild 5.38 Schematische Darstellung der Wöhlerkurve. a) doppellogarithmische Achsen mit Einfluss des Wöhlerexponenten k_T auf die Lebensdauer b) lineare Achsen mit Einfluss des Moments T_m auf die Lebensdauer

tion der konservative Ansatz Miner elementar verwendet wird.

Das anliegende mittlere Moment T_m wird anhand der linearen Darstellung des Lebensdauermodells analysiert, da durch die Gerade im doppelt-logarithmischen Diagramm der Einfluss schwer abzuschätzen ist. Hierfür werden sechs Punkte aus der Wöhlergeraden in Bild 5.38a in ein lineares Diagramm übertragen, siehe Bild 5.38b. Die Gerade wird dadurch zu einem exponentiellen Zerfall. Beispielhaft sind zwei Drehmomente herausgegriffen. Beim hohen Moment resultiert durch das aufbringen einer Amplitude nur eine sehr geringe Änderung der Lastwechselzahl. Bei kleinen Momenten dagegen verursacht dieselbe Amplitude eine enorme Änderung der Lastwechsel. Dies beeinflusst die Steigerung der RUL durch die aBS wiederum in zweierlei Hinsicht. Fällt ein Zahn durch die Momentenerhöhung aus, ist ein hohes mittleres Moment besser, da der Effekt auf die Lebensdauer geringer ist. Bezogen auf den schwächsten Zahn am Umfang ist ein niedriges mittleres Moment besser, da hier durch eine kleine Änderung des Moments bereits eine große Lebensdauersteigerung erreicht wird. Dieser Zusammenhang gilt auch für die prozentuale Steigerung der RUL, sofern die Amplitude konstant gehalten wird. Wird die Amplitude mit dem mittleren Moment skaliert, ist jedoch kein Effekt erkennbar.

Über den aufgezeigten Zusammenhang wird im Folgenden die Simulation plausibilisiert, siehe Bild 5.39. Für die kleine Amplitude von 10 Nm ergibt sich ein monoton steigender Verlauf der Lebensdauersteigerung über dem Wöhlerexponenten, da sich hier der größere Effekt auf den schwächsten Zahn positiv auswirkt. Durch das Aufbringen von höheren Amplituden fällt nicht mehr Zahn-Nummer 1 hauptsächlich aus, wodurch sich der Verlauf der RUL-Steigerung ändert. Nach einem steilen Anstieg bei kleinen Wöhlerexponenten fällt der Median der Lebensdauersteigerung mit größeren Exponenten wieder ab. Eine flache Wöhlerkurve reduziert in diesem Fall

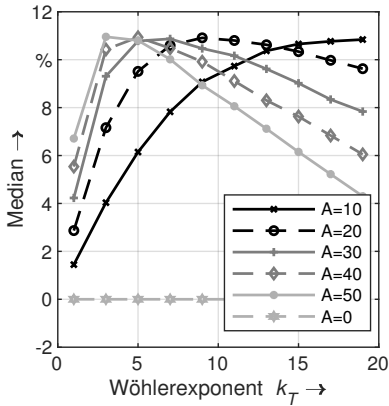


Bild 5.39 Median der Lebensdauersteigerung: Einfluss des Wählerexponenten k_T bei $ES = 1$

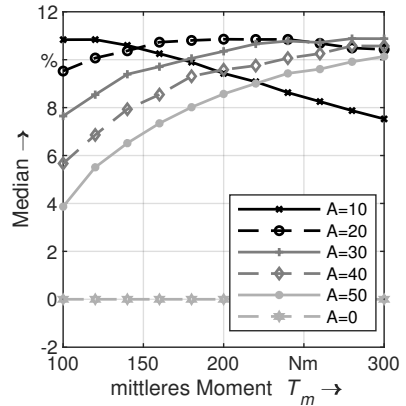


Bild 5.40 Median der Lebensdauersteigerung: Einfluss des mittleren Moments T_m bei $ES = 1$

die Ausfallzeiten der Zähne mit erhöhtem Moment deutlich stärker, als bei steilen Kurven. Zusätzlich sinkt der Median wiederum bei niedrigen Wählerexponenten, da hier der Effekt am schwächsten Zahn geringer ausfällt. Die Kurven zeigen daher ein Maximum zwischen $k_T = 2$ und 8 auf. Dieser Zusammenhang wird in Bild 5.39 für den idealen Sprung sehr deutlich. Die Diagramme für $ES = 3$ und $ES = 6$ sind in Anhang 9.10 zu finden. Unterschiedlich ist hauptsächlich der Verlauf der 10Nm -Kurve. Bei den anderen Eingangssignalen überwiegt der Ausfall von anderen Zähnen am Umfang, wodurch flache Wöhlerkurven nicht mehr zur maximalen Steigerung der RUL führen. Zusätzlich liegen die Kurven wieder deutlich tiefer, bzw. im negativen Bereich, da die höhere Belastung der anderen Zähne den Ausfall des Zahnrades dominiert.

Die Wöhlerkurve wird im doppelt-logarithmischen Diagramm zu einer Gerade. Hier sind jedoch die kleinen Lastwechselzahlen gestreckt und die großen gestaucht. Der Einfluss des Moments wird daher erst im linearen Diagramm des Lebensdauermodells ersichtlich, vgl. Bild 5.38b. Durch eine kleine Änderung bei hohem Moment resultiert lediglich eine kleine Änderung der Lastwechselzahl wohingegen bei niedrigem Moment große Änderungen erzielt werden. Dieser Zusammenhang wird in Bild 5.40 deutlich. Für hohe Amplituden ist es wiederum effizienter, wenn eine Änderung in der Belastung lediglich eine kleine Änderung bezogen auf die Lastwechselzahl ergibt. Somit sind die Kurven monoton steigen. Die Kurve bei $A = 10\text{ Nm}$ verläuft dagegen fallend, da hier wieder der zweite Effekt hinzukommt und für den schwächsten Zahn bei niedrigem Moment eine höhere Lebensdauersteigerung erzielt wird. Für das Eingangssignal $ES = 6$ ändert sich dies wiederum, sodass auch bei der kleinen Amplitude ein steigender Verlauf zu erkennen ist, siehe Anhang 9.11.

Wichtig ist an dieser Stelle, dass die Berechnung innerhalb des Simulationsansatzes lediglich die Zeitfestigkeitsgerade der Wöhlerkurve berücksichtigt. Es ist kein statischer oder dauerfester Bereich integriert. Bei hohen Amplituden von 50 Nm liegt für das mittlere Moment von 100 Nm lediglich 50 Nm am schwächsten Zahn an, was in vielen Anwendungen bereits in den Dauerfestigkeitsbereich fällt. Da hier jedoch keine Geometrien und Werkstoffe betrachtet werden, wird hierauf nicht näher eingegangen.

5.4 Sensitivitätsanalyse

Im vorherigen Abschnitt wurde das Simulationsmodell über eine OFAT (one-factor-at-a-time) Analyse plausibilisiert. Die grundlegenden Zusammenhänge wurden dabei aufgezeigt sowie in den Simulationsergebnissen identifiziert. Der Parameterraum dieser OFAT Analyse ist jedoch sehr eng gefasst, da alle Parameter über das Referenzsystem fixiert sind. Aus diesem Grund können hier keine Wechselwirkungen zwischen Eingangsparametern aufgezeigt werden [Czi99]. Über diese Methode ist daher nur eine lokale Aussage über die Sensitivität der Einflussparameter möglich [Sal+08]. Das Ziel der simulativen Studie ist jedoch eine globale Aussage über die Einflüsse der Inputparameter aufzuzeigen. Aus diesem Grund wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Unter einer Sensitivitätsanalyse wird eine Untersuchung verstanden, welche die Unsicherheiten im Ergebnis der Simulation qualitativ oder quantitativ auf die verschiedenen Eingangsparameter zurückführt [Sal+08]. Diese wird mit Hilfe von OptiSLang[®] von Dynardo GmbH umgesetzt und die folgenden fünf Schritte angewendet [Dyn20]:

1. Definition von Input- und Outputgrößen
2. Aufstellen eines Versuchsplans
3. Lösung des Simulationsmodells für den Versuchsplan
4. Erzeugung eines Meta-Modells
5. Analyse der varianz-basierten Sensitivitäten

Die Inputgrößen wurden bereits in Abschnitt 5.2 und Tabelle 5.1 beschrieben und definiert. Als Output wird der Median sowie der positive Effekt gewählt. Die Auswertung mit lediglich x Grübchen am Umfang wird in diesem Abschnitt nicht betrachtet, da es sich im vorherigen Abschnitt 5.3 vor allem beim Sinus mit großen Abhängigkeiten als zu optimistisch herausgestellt hat (vgl. Bild 5.24). Es liegen daher 13 Inputgrößen und zwei Outputgrößen für die Sensitivitätsanalyse vor.

Im zweiten Schritt wird der Parameterraum aufgespannt. Hierfür eignen sich mehrere Methoden, welche unter anderem in [SBH10; MBC00; Man00; Dyn20] beschrieben sind. Es wird auf das advanced Latin Hypercube Sampling (LHS) zurückgegriffen, welches den Aufwand bezogen auf das Monte-Carlo-Verfahren um ca. 50 % reduziert, ohne dabei die Vorteile wie beispielsweise die Gefahr eines Overfittings zu verlieren [SBH10]. Beim LHS wird der Parameterraum jedes einzelnen Inputparameters in Schichten mit gleicher Grenzwahrscheinlichkeit $1/N$ aufgeteilt und aus jeder dieser Schichten zufällig ein Parameter gezogen [MBC00]. Diese Parameter werden dann zufällig mit den anderen Inputparametern gemischt und so der Versuchsplan aufgespannt. Innerhalb der vorliegenden Arbeit wird dieser Prozessschritt in OptiSLang[®] durchgeführt.

Der Parametersatz aus dem LHS wird im dritten Schritt über das Simulationsmodell aus Abschnitt 5.1 gelöst. Für jeden Parametersatz werden so die zwei Outputgrößen Median der RUL-Steigerung und positiver Effekt erzeugt. Im vorliegenden Fall wurden 2000 Parameterkombinationen über das LHS erzeugt und in Matlab simuliert.

Die Kombinationen aus Input- und Outputgrößen werden in Schritt vier für den Aufbau eines Meta-Modells herangezogen, um die Varianzen der Inputgrößen genau analysieren zu können [Dyn20]. Hierfür gibt es mehrere Methoden. Aufgrund der Flexibilität und der Eignung für deterministische Modelle wurde Kriging als Ersatzmodell gewählt [RMW07]. Nachteil ist jedoch, dass die Qualität des Modells mit der Anzahl der Inputparametern abnimmt. Die Qualität bzw. Prognosegüte des Modells wird über den sogenannten coefficient of prognosis (CoP) ausgedrückt und ergibt sich aus dem Erwartungswert von realen und geschätzten Testdaten geteilt durch das Produkt der Standardabweichungen [MW08]:

$$CoP = \left(\frac{E[Y_{Test} \cdot \hat{Y}_{Test}]}{\sigma_{Y_{Test}} \sigma_{\hat{Y}_{Test}}} \right)^2 \quad (5.12)$$

Hier wird ein zusätzlicher Testdatensatz verwendet und die Übereinstimmung zwischen realen Testdaten und der Schätzung des Meta-Modells untersucht. Der CoP liegt hierbei zwischen 0 und 1 und wird automatisch skaliert. Somit kann vom CoP -Wert direkt die Vorhersagequalität des Meta-Modells in % abgeleitet werden [MW08]. Um diese Prognosegüte zu steigern, werden beispielsweise Ausreißer eliminiert sowie die Anzahl der Inputparameter über einen Signifikanz-Filter reduziert [RMW07].

Angewendet auf das vorliegende Simulationsmodell bedeutet dies, dass zum einen die Eingangssignale $ES = 0$ und $ES = 6$ aus dem Datensatz ausgeschlossen und zum anderen die Eingangsparameter reduziert wurden. Die Ergebnisse der Sprungfunktion ohne Erhöhung des Moments an den anderen Zähnen ($ES = 0$) sowie der Sinusfunktion ($ES = 6$) unterscheiden sich grundlegend von den Ergeb-

nissen der Sprungfunktion mit unterschiedlicher Breite. Über alle sieben Eingangssignale konnte keine ausreichende Prognosegüte erreicht werden. Der Datensatz der 2000 Parameterkombinationen wurde daher um $ES = 0$ und $ES = 6$ reduziert. Das Meta-Modell wurde schlussendlich nur mit den verbleibenden 1428 Parameterkombinationen erstellt und eine Prognosegüte von 88 % erreicht. Um diese weiter zu steigern, wurde zudem die Anzahl der Inputparameter verringert und Parameter mit einem Einfluss kleiner 3 % ausgeschlossen, was zudem eine Reduktion der Rechenzeit für die anschließenden Prozessschritte bewirkt. Im vorliegenden Beispiel wurden die Parameter T_{nEOOL} , b_{a0} und ab reduziert. Bezogen auf den Median der RUL-Steigerung als Outputgröße wurde mit diesen Maßnahmen eine Prognosegüte von 91 % und bezogen auf den positiven Effekt von 93 % erreicht. Die simulierten 2000 Parameterkombinationen sind somit für eine hohe Genauigkeit des Modells ausreichend.

Das Meta-Modell wird im letzten Schritt für die Analyse der varianz-basierten Sensitivitäten herangezogen. Hierbei wird zwischen dem Haupteinfluss S_i (engl. first order sensitivity index) und dem Gesamteffekt inklusive Wechselwirkungen S_{T_i} (engl. total sensitivity index) unterschieden, welche wie folgt definiert sind [Sal+08; Dyn20]:

$$S_i = \frac{V(Y|X_i)}{V(Y)} \quad (5.13)$$

$$S_{T_i} = 1 - \frac{V(Y|X_{\sim i})}{V(Y)} \quad (5.14)$$

$V(Y)$ ist dabei die bedingungslose Varianz der Outputgröße und $V(Y|X_i)$ die Varianz, die ausschließlich durch die Variation von X_i hervorgerufen wird. Beim Gesamteffekt wird der Einfluss auf Y von aller Eingangsparameter ohne X_i berücksichtigt.

Das Ergebnis dieser varianz-basierten Sensitivitätsanalyse bezogen auf den Outputparameter Median der Lebensdauersteigerung ist in Bild 5.41 dargestellt. Mit insgesamt 41 % hat das Eingangssignal ES den größten Einfluss auf die Varianz der Lebensdauersteigerung. Der Wöhlerexponent k_T hat mit 25 % den zweitgrößten und die Amplitude A mit 23 % den drittgrößten Effekt. Alle weiteren Eingangsparameter liegen unter 20 %. Das Ergebnis für den zweiten Outputparameter ist in Bild 5.42 aufgeführt. Für den positiven Effekt der aBS zeigt sich wiederum das Eingangssignal ES als größter Einflussparameter mit 35 %. Im Gegensatz zum Median der Lebensdauersteigerung ist hier allerdings als zweitgrößter Effekt die Streuung der Belastbarkeit b_{nEOOL} mit 24 % zu nennen. Die Parameter k_T und A sowie die restlichen Inputparameter liegen hier unter 20 %.

Durch die Sensitivitätsanalyse wird der große Einfluss von ES , b_{nEOOL} und A bestätigt und zusätzlich ein großer Einfluss von k_T aufgezeigt. Damit kommt dem

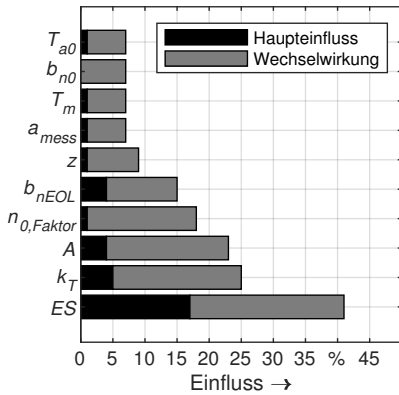


Bild 5.41 Sensitivitätsanalyse bezogen auf den Median der RUL-Steigerung

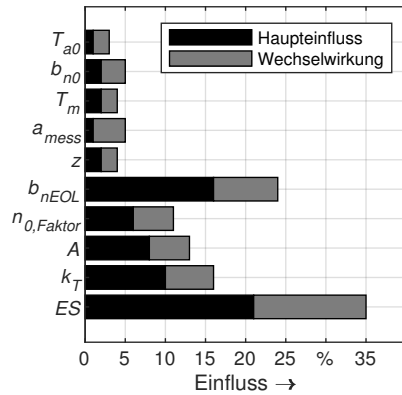


Bild 5.42 Sensitivitätsanalyse bezogen auf den positiven Effekt

verwendeten Werkstoff eine große Bedeutung zu sowie den Parametern aus der aBS. Die Abhängigkeit ab der Grübchen am Umfang des Zahnrades wurde dagegen zur Steigerung der Prognosegüte aus dem Meta-Modell eliminiert. Dies steht im Gegensatz zu den Vermutungen aus dem vorherigen Abschnitt. Allerdings muss an dieser Stelle betont werden, dass die Sensitivitätsanalyse lediglich für die Sprungfunktion vorgenommen wurde. Für alle sieben Eingangssignale konnte kein Meta-Modell mit ausreichender Genauigkeit erreicht werden. Bei der Sinusfunktion und hier besonders für die weniger konservative Auswertung wurde in den Bildern 5.23 und 5.24 ein großer Einfluss der Abhängigkeit aufgezeigt. Dies ist allerdings im Meta-Modell nicht enthalten. Im Gegensatz dazu ist bei einem idealen Sprung kein Einfluss der Abhängigkeit vorhanden, da lediglich der schwächste Zahn ein reduziertes Drehmoment erhält. Der geringe Einfluss im Meta-Modell ist somit nachvollziehbar.

Im Anschluss an die Sensitivitätsanalyse wurde eine Optimierung innerhalb des Meta-Modells vorgenommen, um die beste Parameterkombination zu extrahieren. Für diese Optimierung wurden drei weitere Schritte durchgeführt:

6. Zielgrößen-Optimierung mit OptiSLang®
7. Validierung der Ergebnisse mit Matlab
8. Analyse der Robustheit der Ergebnisse

Der Fokus der Optimierung wird auf den Median der RUL-Steigerung gelegt, weshalb eine Ein-Ziel Optimierung (in OptiSLang® Single-Objective-Optimization) vorgenommen wird. Der evolutionäre Algorithmus [Dyn20] hat sich bei der anschlie-

Tabelle 5.2 Optimale Eingangsparameter für Sprungfunktion. EA: Evolutionärer Algorithmus, Platz 1 bis 3 der 1.428 Parameterkombinationen mit Sprungfunktion, Top10: Median der besten 10 Parameterkombinationen

Parameter	Einheit	EA	Platz 1	Platz 2	Platz 3	Top10
A	Nm	6,77	46,01	14,87	11,65	28,09
ab	%	66,15	64,88	65,73	39,28	79,70
a_{mess}	%	0,01	1,86	0,46	1,28	1,33
b_{a0}	-	5,30	13,71	19,54	17,36	12,14
b_{n0}	-	1,01	1,20	3,20	1,47	3,44
b_{nEOL}	-	1,01	1,70	2,89	1,58	2,91
ES	-	3	4	5	1	4
k_T	-	15,64	5,49	12,45	10,15	9,75
$n_{0,Faktor}$	-	0,10	0,62	0,14	0,14	0,18
T_{a0}	%	0,51	0,47	0,43	1,00	1,15
T_m	Nm	283,64	135,45	243,65	282,25	211,70
T_{nEOL}	LW	1,13e7	1,04e7	7,39e6	1,22e7	9,63e6
z	-	24	30	24	22	29
Median	%	37,00	43,56	35,51	29,30	25,50
pos. Eff.	%	99,99	92,53	85,09	97,54	94,54

Benden Validierung mit den Ergebnissen aus der Matlab-Simulation als am genauesten herausgestellt. Das Ergebnis ist in Tabelle 5.2 aufgeführt. Die Optimierung des Meta-Modells ergibt ein maximales Potenzial der Lebensdauersteigerung von 37 % bei einem positiven Effekt der aBS von 99,99 %. Die Validierung dieser Parameterkombination in Matlab zeigte für die Lebensdauersteigerung ein Potenzial von 38,25 % und einen positiven Effekt von 97,8 % auf. Damit ist der Fehler für diese Kombination kleiner 4 % und das Modell wird als validiert angesehen.

Im letzten Schritt wird die Robustheit der Ergebnisse betrachtet. Hierfür sind zusätzlich zu der Optimierung in OptiSLang[®] die besten drei Parameterkombinationen aus den 1428 Kombinationen der Sprungfunktionen in der Tabelle 5.2 aufgeführt. Hier ergibt sich ein Maximum von 43 % bei einem positiven Effekt von 92,53 %. Schlussendlich ist jeweils der Median der besten zehn Parameterkombinationen aufgeführt. Die Top10 ergeben immer noch eine Lebensdauersteigerung von über 25 %

bei einem positiven Effekt von nahezu 95 %. Aus der Tabelle 5.2 wird allerdings auch ersichtlich, dass die Werte innerhalb der einzelnen Parameter stark streuen. Für die Amplitude A ist beispielsweise sowohl ein Wert von 6,77 Nm als auch von 46,01 Nm in den besten Parameterkombinationen aufgeführt. Bei den Eingangssignalen sind unter den Top10 Sprünge von jeder Breite. Es kann daher nicht von einer optimalen Parameterkombination gesprochen werden und es ergibt sich kein robustes Maximum der Lebensdauersteigerung. Dies wird ebenfalls im Scatterplot deutlich, welcher im Anhang 9.12 für die 1428 Kombinationen der Sprungfunktion dargestellt ist. In dem Diagramm ist die beste Parameterkombination über ein X in der Punktwolke hervorgehoben. Links und rechts daneben sinkt der Median der Lebensdauersteigerung stark ab. Allerdings spricht dies für eine breite Anwendbarkeit, da sich mit vielen Parameterkombinationen gute Ergebnisse erzielen lassen.

Innerhalb dieser Sensitivitätsanalyse inkl. Optimierung der Eingangsparameter muss beachtet werden, dass alle 13 Inputparameter des Simulationsmodells variiert werden. Einige dieser Parameter sind jedoch bereits durch die Physik festgelegt, wie beispielsweise die Formparameter und Lage der Verteilungen von a_0 , n_0 und n_{EOL} . Aus diesem Grund wird im nächsten Kapitel 6 der Fokus auf eine Beispielverzahnung gelegt und lediglich die noch möglichen Parameter variiert. Durch den Anwender der aBS sind der Start der aBS, die Amplitude und das Eingangssignal frei wählbar.

5.5 Zwischenfazit zur Lebensdauersteigerung

Aus dem Stand der Technik sowie der erweiterten Auswertung der Grübchenversuche wird ein großes Potenzial für die aBS deutlich, da lediglich ein Zahn für den Ausfall des gesamten Zahnrades verantwortlich ist und die restlichen Zähne damit Lebensdauer-Reserven besitzen. Innerhalb dieses Kapitels wird das Potenzial der aBS erstmals simulativ quantifiziert.

Die Quantifizierung basiert auf einem entwickelten Simulationsmodell, welches die Belastbarkeitsstreuung aller Zähne berücksichtigt und damit eine Untersuchung der aBS zulässt. Die wichtigsten Randbedingungen der Simulation sind Folgende:

- Eine Messung und Lokalisierung der Grübchen am Umfang ist ideal möglich.
- Die Regelung des Antriebsstrangs ist ideal und kann beliebige Eingangssignale der aBS realisieren.
- Die Reduktion des Drehmoments basiert lediglich auf dem schwächsten Zahn. Es erfolgt keine Adaption des Eingangssignals während des Betriebs.
- Grübchen aller Zähne folgen einem exponentiellen Degradationspfad.

- Es wird eine lineare Schadensakkumulation angewendet und ausschließlich die Zeitfestigkeitsgerade der Wöhlerkurve berücksichtigt, was dem konservativen Ansatz nach Miner elementar entspricht.
- Die Abschätzung ist konservativ anzusehen, da alle Zähne am Umfang ein initiales Grübchen erhalten.

Für die Validierung des Simulationsmodells werden generelle Zusammenhänge und Einflüsse auf die Lebensdauersteigerung durch die aBS aufgezeigt. Wichtig ist hier vor allem die Streuung der Belastbarkeit, sowie die Drehmomenterhöhung an den restlichen Zähnen, welche durch das Eingangssignal, die Amplitude, aber auch durch die Zähnezahzahl beeinflusst wird. Je geringer die Belastung an den anderen Zähnen ist und je größer die Belastbarkeitsstreuung, desto größer fällt die Lebensdauersteigerung aus. Weiterhin ist die Dauer der aBS von essentieller Bedeutung. Hier treffen zwei gegenläufige Effekte aufeinander. Ein früher Start erhöht die Lebensdauer des schwächsten Zahnes sehr stark, jedoch wird gleichzeitig die Lebensdauer der restlichen Zähne durch die lange Belastung mit erhöhtem Moment deutlich reduziert. Für einen späten Start dreht sich die Situation um und die Steigerung der Lebensdauer am schwächsten Zahn ist begrenzt. Diese Zusammenhänge wurden in den Simulationsergebnissen bestätigt, wodurch das Modell als validiert angesehen wird.

Schlussendlich werden die Unsicherheiten in den insgesamt 13 Eingangsparametern der Simulation über eine Sensitivitätsanalyse untersucht. Als Ergebnis wird hier der Median der Lebensdauersteigerung sowie die Wahrscheinlichkeit für einen positiven Effekt der Strategie ausgegeben und analysiert. Als wichtigster Eingangsparameter ergibt sich mit 37 % das Eingangssignal ES , gefolgt vom Wöhlerexponenten k_T und der Amplitude A sowie der Streuung der Belastbarkeit b_{nEOL} . Die Analyse der Einflussfaktoren wird anschließend verwendet, um die Eingangsparameter zu optimieren. Es ergibt sich ein **maximales Potenzial der aBS von 43,56 %**, wenn alle 13 Inputparameter variabel sind.

Innerhalb dieses Kapitels wird die dritte Hypothese dieser Arbeit bestätigt. Es ist möglich, die Einflussfaktoren auf das Potenzial der aBS zu identifizieren und zudem die Effekte quantitativ darzulegen. Zusätzlich ist an dieser Stelle die Forschungsfrage beantwortet. Ein adaptiver Betrieb von Zahnradern zur Schonung des schwächsten Zahnes ist möglich, wodurch bei gleichbleibender mittlerer Leistung eine erhebliche Steigerung der Lebensdauer erreicht wird.

Im folgenden Kapitel wird die adaptive Betriebsstrategie final am Beispiel der Verzahnung aus Kapitel 4 angewendet. An dieser Stelle sind somit einige Inputparameter durch die Physik bzw. Material und Geometrie bereits fixiert und es findet lediglich eine Variation der frei wählbaren Parameter statt. Hiermit soll gezeigt werden, dass die adaptive Betriebsstrategie sowohl für Neuentwicklungen als auch für bestehende Getriebe gewinnbringend angewendet werden kann.

Kapitel 6

Anwendungsbeispiel

Die Sensitivitätsanalyse hat gezeigt, dass das Eingangssignal ES , die Steigung der Wöhlerkurve k_T , die Streuung der Belastbarkeit b_{nEOL} sowie die Amplitude A den größten Einfluss auf die Varianz der Lebensdauersteigerung haben. Für eine Neuentwicklung können viele dieser Parameter über beispielsweise die Geometrie, das Material und auch die adaptive Betriebsstrategie selbst beeinflusst werden. Allerdings steht dem Optimum bezüglich der aBS die tatsächliche Festigkeit des Materials, die Bearbeitbarkeit sowie der Preis entgegen. Bei der Auslegung einer Verzahnung muss hier ein Kompromiss eingegangen werden, welcher je nach Anwendungsfeld unterschiedlich ausfallen kann. Im Gegensatz zu Neuentwicklungen ist es auch möglich, die adaptive Betriebsstrategie an bestehenden Getrieben anzuwenden. Hier ist allerdings die Beeinflussung vieler Eingangsparameter nicht mehr möglich, da Geometrie und Material bereits festgelegt sind. Um diesen Fall zu untersuchen, wird im Folgenden die Beispielverzahnung aus der erweiterten Grübchenauswertung aus Kapitel 4 näher betrachtet.

Bei der Beispielverzahnung sind alle Eingangsparameter außer das Eingangssignal ES und die Amplitude A fest vorgegeben, siehe Tabelle 5.1. Es können daher lediglich die für die aBS spezifischen Parameter variiert werden. Das Ergebnis der Lebensdauersteigerung bei Variation dieser beiden Eingangsparameter ist in Bild 6.1 dargestellt. Für die Untersuchung wurde auf der x-Achse die Amplitude der aBS zwischen 0 und 50 Nm variiert und die Kurven geben die unterschiedlichen Eingangssignale an. Bei der Amplitude 0 Nm ist die Steigerung der RUL für alle Eingangssignale bei Null. Dies entspricht dem Fall ohne aBS. Bei Erhöhung der Amplitude steigen alle Kurven bis zu einem Maximum im Bereich zwischen 15 und 30 Nm an. Danach fallen die Kurven wieder ab. Im Falle der Sinus-Funktion sogar auf ca. -10 %. Die Kurve für den Sprung ohne Erhöhung des Moments an den anderen Zäh-

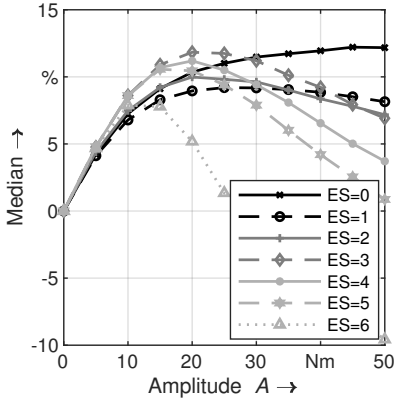


Bild 6.1 Median der Lebensdauersteigerung: Anwendungsbeispiel

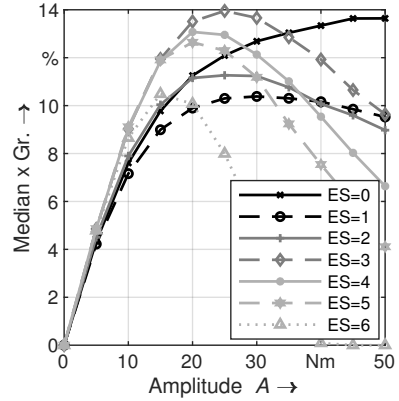


Bild 6.2 Median der Lebensdauersteigerung bei x ausgewerteten Grübchen: Anwendungsbeispiel

nen ($ES = 0$) steigt stetig und der Median pendelt sich bei ca. 12 % ein. Hier wirkt sich die Amplitude nicht auf den Ausfall der restlichen Zähne am Umfang aus. Mit steigender Amplitude wird daher die Lebensdauer des schwächsten Zahnes verlängert, bis der zweit-schwächste Zahn ausfällt. Bei einer Amplitude von 20 Nm fällt bereits zu 70 % der zweit-schwächste Zahn aus. Eine weitere Erhöhung der Amplitude zeigt dann keinen Erfolg mehr, bzw. reduziert lediglich die Leistung unnötig.

In Bild 6.2 ist dasselbe Diagramm für die weniger konservative Auswertung aufgezeigt, bei welcher lediglich zwischen einem und 13 Grübchen am Umfang betrachtet werden und die restlichen Zähne am Umfang als ideal bezüglich der Belastbarkeit angesehen werden. Hier steigt das Maximum von den vorhin ca. 12 % auf jetzt ca. 14 % an. Das Maximum der einzelnen Eingangssignale liegt im selben Bereich, jedoch ist es ausgeprägter. Die Sinus-Funktion sinkt hier nicht auf einen negativen Wert ab, wenn die Amplitude auf 50 Nm erhöht wird.

Die Wahrscheinlichkeit, dass die aBS erfolgreich angewendet werden kann, ist in Bild 6.3 dargestellt. Für den Sprung ohne Erhöhung des Moments liegt dieses immer bei 100 %. Es ist hier nicht möglich, dass das Zahnrad früher ausfällt als ohne aBS, da lediglich die Lebensdauer des schwächsten Zahnes verlängert wird. Die restlichen Eingangssignale starten ebenfalls bei 100 % für die Amplitude 0 Nm und fallen dann aber mit steigender Amplitude unterschiedliche stark ab. Die Sprungfunktionen liegen auch bei der hohen Amplitude von 50 Nm über 60 % Wahrscheinlichkeit. Die Sinus-Funktion ($ES = 6$), fällt dagegen deutlich steiler ab und endet bei einer Wahrscheinlichkeit von knapp über 25 %. In diesem Bereich zeigt die aBS allerdings für den Median der Lebensdauersteigerung bereits einen negativen Wert auf. Damit wird deutlich, dass trotz eines negativen Medians ca. ein Viertel der Zahnräder trotzdem

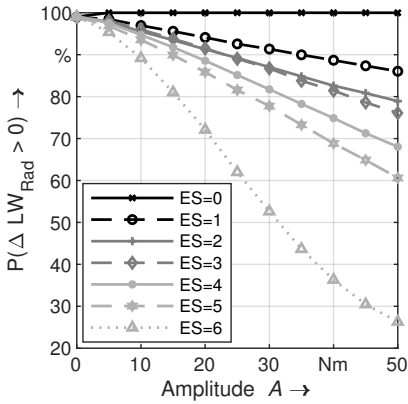


Bild 6.3 Wahrscheinlichkeit für positiven Effekt: Anwendungsbeispiel

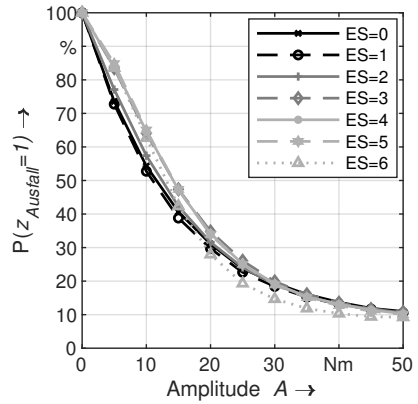


Bild 6.4 Wahrscheinlichkeit, dass Zahn 1 ausfällt: Anwendungsbeispiel

eine Lebensdauersteigerung durch die aBS erfahren.

In Bild 6.4 ist die Wahrscheinlichkeit aufgetragen, dass der schwächste Zahn trotz aBS ausfällt. Alle Kurven starten wiederum bei 100 %, da für eine Amplitude von 0 Nm immer der schwächste Zahn für den Ausfall verantwortlich ist. In diesem Diagramm liegen alle Eingangssignale sehr eng beieinander. Die Kurven sinken zu Beginn stark ab und nähern sich mit steigender Amplitude einer Wahrscheinlichkeit von 0 % an. Im Falle der höchsten Amplitude von 50 Nm liegt die Wahrscheinlichkeit dennoch bei 10 %. Zudem wird nochmals deutlich, dass bei einer Amplitude von 10 Nm die Wahrscheinlichkeit bei ca. 60 % liegt und damit der Ausfall trotz aBS vom schwächsten Zahn dominiert wird. Dieser Effekt wurde in zahlreichen Diagrammen in Abschnitt 5.3 deutlich.

Die Detektion und Lokalisierung der Grübchen am Umfang des Zahnrades war bei den Versuchen der Beispielverzahnung nicht automatisiert möglich. Der Prüflauf wurde regelmäßig unterbrochen und die Zahnräder visuell befundet. Die messbare Grübchengröße a_{mess} von 0,749 % ist daher für das Anwendungsbeispiel lediglich als mittlere Größe bei der visuellen Befundung zu sehen. Diese Größe wird im Folgenden auch für eine automatisierte Detektion und Lokalisierung vorausgesetzt. Damit ist diese messbare Grübchengröße der frühest mögliche Startzeitpunkt der aBS. Es ist allerdings auch möglich, später mit der aBS zu starten. Aus diesem Grund wird eine weitere Größe, die Grübchengröße beim Start der aBS a_{Start} , eingeführt. Diese wird in den folgenden zwei Diagrammen variiert. Bild 6.5 zeigt den Median der Lebensdauersteigerung bei Variation von a_{Start} für das Eingangssignal Sprung mit drei reduzierten Zähnen ($ES = 3$) auf. Es zeigt sich wiederum der typische Verlauf der Amplituden für einen unterschiedlichen Start der aBS. Bei frühem Start ist

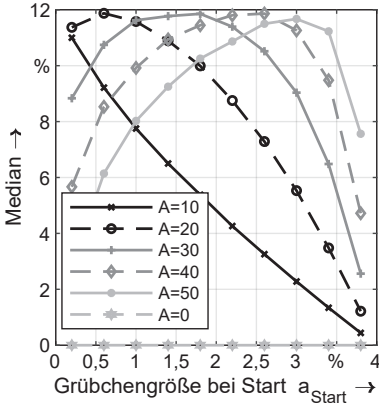


Bild 6.5 Median der Lebensdauersteigerung bei $ES = 3$ und Variation von a_{Start} : Anwendungsbeispiel

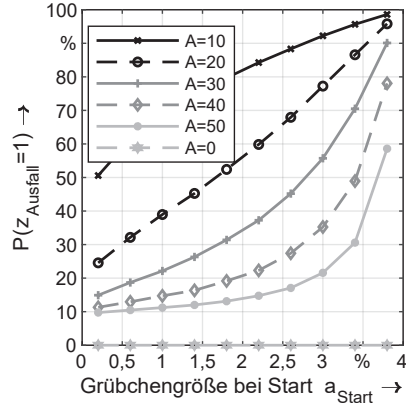


Bild 6.6 Wahrscheinlichkeit, dass Zahn 1 ausfällt bei $ES = 3$ und Variation von a_{Start} : Anwendungsbeispiel

die Steigerung der RUL gering, weil die anderen Zähne lange mit dem hohen Moment belastet werden und bei spätem Start sinkt die Steigerung der RUL, weil der schwächste Zahn wenig entlastet wird. Zudem wird in diesem Diagramm deutlich, dass je nach Amplitude das Maximum bei einem anderen Start liegt. Jedoch wird das Maximum von ca. 12 Nm sowohl für $A = 20$ Nm als auch für $A = 30$ Nm und $A = 40$ Nm erreicht. Für die kleineren Amplituden wird dabei deutlich früher das Maximum erreicht als für größere Amplituden.

Das Diagramm in Bild 6.6 zeigt ebenfalls die beiden Effekte für den Start der aBS auf. Hier ist die Wahrscheinlichkeit, dass der schwächste Zahn zum Ausfall führt, am Beispiel von $ES = 3$ aufgetragen. Alle Kurven sind monoton steigend über der Grübchengröße beim Start der aBS. Auch in diesem Diagramm wird damit deutlich, dass bei frühem Start die anderen Zähne am Umfang den Ausfall dominieren und bei spätem Start der schwächste Zahn. Für einen Start bei einer Grübchengröße von $a_{Start} = 1\%$ liegt die Wahrscheinlichkeit für einen Ausfall des schwächsten Zahnes bei unter 40 % für Amplituden größer 20 Nm. Würde erst bei einer Größe von 3,5 % gestartet werden, steigt die Wahrscheinlichkeit für alle Amplituden auf über 40 % und für Amplituden kleiner 30 Nm sogar auf über 75 % an.

Werden alle Diagramme in diesem Abschnitt betrachtet, stellt sich die Frage nach der optimalen Parameterkombination für die aBS. Aus diesem Grund wurde auch für das Anwendungsbeispiel ein Latin Hypercube Sampling mit 2000 Kombinationen durchgeführt und folgende drei Eingangsparameter variiert: das Eingangssignal ES , die Amplitude A und die Grübchengröße beim Start der aBS a_{Start} . Das Minimum für den Eingangsparameter a_{Start} wurde dabei gleich a_{mess} gesetzt. Damit ist ga-

Tabelle 6.1 Optimale Eingangsparameter des Anwendungsbeispiels bei 2.000 Parameterkombinationen inkl. Median der Top10 mit und ohne $ES = 0$

	A in Nm	a_{Start} in %	ES	Median in %	pos. Eff. in %
Platz 1	49,17	0,76	0	12,32	100
Platz 2	43,82	1,03	0	12,10	100
Platz 3	49,36	1,62	0	12,09	100
...
Platz 7	31,62	1,49	3	11,98	90,98
Platz 8	35,26	1,95	3	11,97	92,60
Platz 9	29,73	1,27	3	11,94	90,55
...
Platz 120	22,28	0,92	4	11,23	88,58
...
Top10 mit $ES = 0$	41,78	1,30	0	11,98	100
Top10 ohne $ES = 0$	30,19	1,38	3	11,92	91,62

rantiert, dass die Grübchen beim Start der Strategie bereits detektiert und lokalisiert werden können. Die maximale Steigerung der Lebensdauer wird für das Eingangssignal ohne Erhöhung des Moments ($ES = 0$) mit 12,32 % erreicht. Die beste Kombination ohne Reduktion der Leistung kommt auf Platz 7 mit 11,98 % Steigerung der Lebensdauer bei einem Sprung mit drei reduzierten Zähnen.

In Tabelle 6.1 sind die besten Parameterkombinationen der Untersuchung aufgeführt. Da die besten drei Parameterkombinationen durch das Eingangssignal $ES = 0$ erreicht werden, sind zudem die besten drei Kombinationen ohne $ES = 0$ aufgeführt. Diese belegen die Plätze 7 bis 9 mit $ES = 3$. $ES = 0$ und $ES = 3$ wechseln sich in der Rangordnung der besten Parameterkombinationen ab, bis auf Platz 120 das erste mal ein Sprung mit vier reduzierten Zähnen auftaucht. Abschließend ist der Median aus den besten zehn Parameterkombinationen mit und ohne $ES = 0$ aufgeführt. Die beste Parameterkombination mit Sinussignal liegt bei einer Steigerung der RUL von ca. 8 %.

Die Untersuchung zeigt eine maximale Steigerung der Lebensdauer von ca. 12 %. Dies wird sowohl mit als auch ohne Reduktion der Leistung erreicht, was einen sehr großen Vorteil der aBS aufzeigt. Zudem sind hier die Streuungen innerhalb der Parameter der besten Kombinationen weniger ausgeprägt. Das Ergebnis wird daher als robuster angesehen als bei der Optimierung über alle Inputgrößen in Abschnitt 5.4.

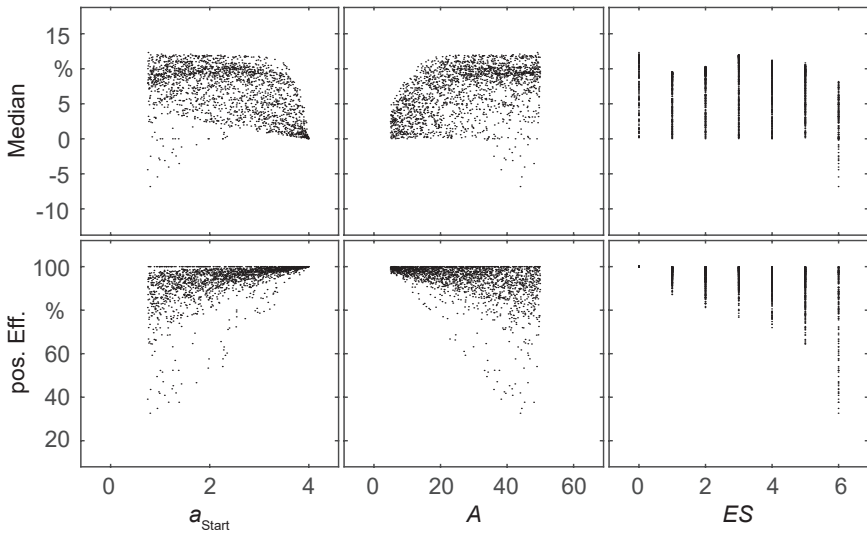


Bild 6.7 Scatterplot des Anwendungsbeispiels

Im Scatterplot über alle 2000 Parameterkombinationen ist hier auch vor allem für den positiven Effekt ein deutlicher Einfluss der Inputgrößen zu erkennen, siehe Bild 6.7. Der positive Effekt steigt stark an, wenn spät mit der aBS gestartet wird und die Amplituden gering sind. Zudem sind Sprünge mit wenig reduzierten Zähnen vorteilhaft. Bezogen auf den Median der Lebensdauersteigerung ist der Trend nicht so eindeutig. Die Punktwolke fällt über dem Start der aBS ab und steigt über der Amplitude. Damit ergeben sich gegenläufige Trends für die zwei Outputgrößen. Hier gilt es daher, einen Kompromiss zu finden. Wird jedoch der Median über alle 2000 Parameterkombinationen betrachtet, ergibt sich eine Steigerung der Lebensdauer von 7,75 % bei einem positiven Effekt von 96,53 %.

Für das Anwendungsbeispiel ist die mögliche Steigerung der nutzbaren Restlebensdauer innerhalb der vorgestellten Simulation deutlich geringer, da einige Eingangsparameter bereits fixiert sind. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle eine weitere vereinfachte Simulation durchgeführt, um Optimierungspotenziale aufzuzeigen und einen Ausblick zu geben. Hierzu wird zum einen eine Abhängigkeit von 100 % untersucht und zum anderen eine zeitlich adaptierte Strategie mit drei Zähnen. Die Variante mit zeitlicher Adaption stellt die Vision der Betriebsstrategie dar, bei welcher eine kontinuierliche Anpassung der Drehmomentvariation im Betrieb vorgenommen werden kann.

Bei der Abhängigkeit von 100 % wird angenommen, dass die zwei ($ES = 2$)

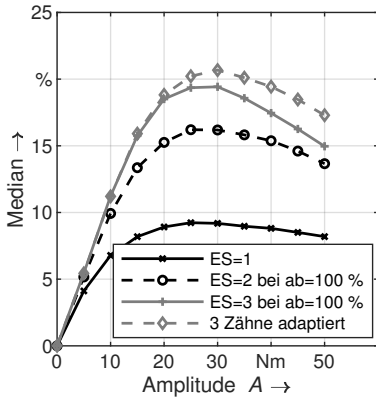


Bild 6.8 Median der Lebensdauersteigerung: weiteres Optimierungspotenzial

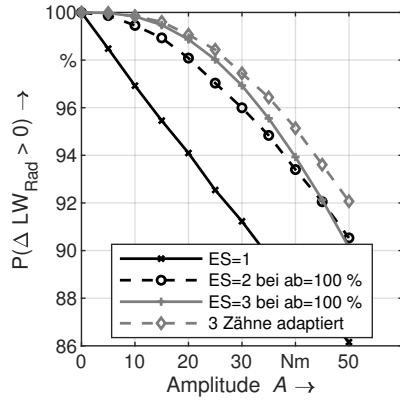


Bild 6.9 Wahrscheinlichkeit für positiven Effekt: weiteres Optimierungspotenzial

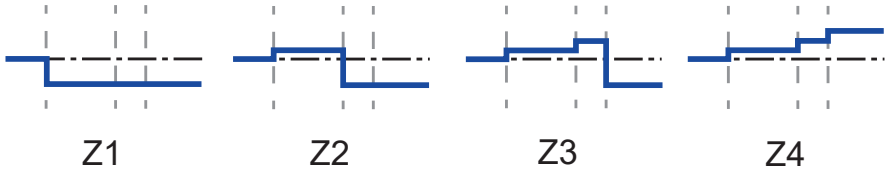


Bild 6.10 Lastkollektive der schwächsten vier Zähne bei zeitlich adaptierter Strategie

oder drei ($ES = 3$) schwächsten Zähne direkt erkannt und das Moment reduziert wird. Es erfolgt dadurch lediglich eine Adaption des Drehmoments, wobei die Belastung bei den entsprechenden Zähnen reduziert und bei allen anderen erhöht wird. Der Median der Lebensdauersteigerung kann damit auf 16 bzw. 19% gesteigert werden, siehe Bild 6.8. Damit ist hier eine deutliche Steigerung gegenüber dem idealen Sprung ($ES = 1$) mit lediglich 9% vorhanden. Auch die Wahrscheinlichkeit, dass mit der aBS die Lebensdauer gesteigert werden kann, steigt deutlich an und liegt bei einer Amplitude von 50Nm noch bei ca. 90%, siehe Bild 6.9.

In einem letzten Schritt wird die Adaption des Drehmoments zeitlich versetzt vorgenommen. Die Belastung an den schwächsten drei Zähnen wird hier immer dann reduziert, wenn an dem entsprechenden Zahn ein Grübchen vorhanden und auch gemessen werden kann. Daraus ergibt sich ein vierstufiges Lastkollektiv, siehe Bild 6.10. Am schwächsten Zahn (Z1) wird direkt beim Erkennen des Grübchens die Last reduziert. Das Moment an allen anderen Zähnen wird zu diesem Zeitpunkt erhöht. Sobald am zweit-schwächsten Zahn (Z2) ein Grübchen erkannt wird, reduziert sich

auch an diesem Zahn die Belastung und die anderen Zähne müssen entsprechend mehr kompensieren. Dasselbe erfolgt auch bei dem dritt-schwächsten Zahn (Z3). Für diese mehrstufige Adaption ergibt sich im Median eine Steigerung der nutzbaren Restlebensdauer von 22 % für die Amplitude von 30 Nm, siehe Bild 6.8. Der positive Effekt der aBS kann über alle untersuchten Amplituden auf über 92 % angehoben werden, siehe Bild 6.9. Bei dieser Betrachtung müssen jedoch folgende zusätzliche Annahmen und Randbedingungen beachtet werden:

- In der Simulation sind lediglich die schwächsten vier Zähne berücksichtigt.
- Die Messung der Grübchen erfolgt ideal über der gesamten Laufzeit.
- Die Regelung ist ideal und kann beliebig oft über der Laufzeit adaptiert werden.
- Die Grübchengröße hängt direkt vom Schädigungswert ab, wodurch die Grübchengröße bei unterschiedlichen Belastungen berechnet werden kann.
- Die Belastung an den schwächsten Zähnen wird jeweils mit einem idealen Sprung reduziert, wodurch die Abhängigkeit der Grübchen und damit auch die Lage am Umfang irrelevant ist.

Zusammenfassend zeigt das Anwendungsbeispiel, dass die adaptive Betriebsstrategie gewinnbringend an vorhandenen Getrieben angewendet werden kann, wodurch die Beantwortung der Forschungsfrage bestätigt wird. Die Lebensdauer von Getrieben bzw. Zahnrädern lässt sich durch einen adaptiven Betrieb steigern, indem der schwächste Zahn am Umfang des Zahnrades über eine lokale Belastungsreduktion geschont wird. Die Steigerung der nutzbaren Restlebensdauer ist bei dieser Beispielverzahnung zwar nicht so groß wie im vorherigen Kapitel 5. Jedoch sind bei der Anwendung von vorhandenen Getrieben auch viele Parameter bereits fixiert, wodurch das Optimum der aBS eingeschränkt wird. An dieser Stelle soll auch noch einmal betont werden, dass in der ersten simulativen Studie, vgl. Kapitel 5, lediglich der Fokus auf dem schwächsten Zahn am Umfang liegt und keine zeitliche Adaption vorgenommen wird. Dies könnte beispielsweise der Fall sein, wenn lediglich bei einer einmaligen Wartung über eine visuelle Befundung ein Grübchen erkannt wird. Ist in Zukunft eine kontinuierliche Messung und Regelung möglich, kann die adaptive Betriebsstrategie während des Betriebs angepasst und das Moment auch an den nächst-schwächsten Zähnen reduziert werden. Dadurch ist eine deutliche Steigerung möglich, wie die vereinfachte Simulation aus Bild 6.8 zeigt. Theoretisch ist es auch denkbar, jedem individuellen Zahn die optimale Belastung zuzuweisen, sodass sich eine konstante Schädigung über alle Zähne einstellt. Hierfür bietet sich der Einsatz von Künstlicher Intelligenz an. Über einen Reinforcement Learning Algorithmus

können vorgeschädigte Zähne am Umfang erkannt und das Drehmoment dahingehend optimiert werden. Erste Ansätze hierzu sind bereits vorhanden und werden in Zukunft weiter ausgebaut.

Kapitel 7

Zusammenfassung und Ausblick

Zahnräder sind weit verbreitete Maschinenelemente, die in allen Branchen zur Anwendung kommen. Einer der wichtigsten Schadensmechanismen bei Verzahnungen ist Grübchenbildung. Bei einsatzgehärteten Zahnrädern ist der Schaden am Umfang lokalisiert, sodass lediglich der schwächste Zahn für den Ausfall des Zahnrades verantwortlich ist. Häufig sind die anderen Zähne am Umfang am Lebensdauerende noch intakt und besitzen Lebensdauer-Reserven. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Nutzung dieser Reserven zur Steigerung der nutzbaren Restlebensdauer der Verzahnung. Dies erfolgt durch eine Schonung des schwächsten Zahnes während des Betriebes, wodurch die Degradationsgeschwindigkeit des Grübchens reduziert und damit eine Lebensdauersteigerung erreicht wird.

Für die Schonung des schwächsten Zahnes am Umfang des Zahnrades wurde eine adaptive Betriebsstrategie entwickelt. Voraussetzung ist eine Erkennung des lokalen Grübchenschadens während des Betriebs. Diese Information wird innerhalb der adaptiven Betriebsstrategie über eine PHM-Schleife zur Regelung des Getriebeeingangs zurückgeführt. Am Eingang wird daraufhin eine angepasste periodische Drehmomentvariation aufgebracht, welche in der Periodenlänge exakt auf eine Umdrehung des Zahnrades angepasst ist. Die Phasenlage der Variation wird dann auf den schwächsten Zahn adaptiert, sodass dieser bei jedem Eingriff das minimale Drehmoment erhält. Durch diese Reduktion der Belastung sinkt die Degradationsgeschwindigkeit des Grübchens und eine Lebensdauersteigerung wird erreicht. Andere Zähne am Umfang des Zahnrades sind zu diesem Zeitpunkt intakt, sodass diese eine erhöhte Belastung ertragen können. Somit kompensieren die anderen Zähne am Umfang

die Reduktion am schwächsten Zahn und die Leistung über den Umfang betrachtet bleibt konstant. Mit dieser adaptiven Betriebsstrategie wurden die Nachteile aus dem Stand der Forschung eliminiert, da hier meistens eine Leistungsreduktion vorgenommen wird und zudem keine Betrachtung der Streuung innerhalb der Komponente erfolgt.

Treiber der vorgestellten adaptiven Betriebsstrategie ist die Streuung der Belastbarkeit der Einzelzähne. Nur wenn die anderen Zähne am Umfang eine höhere Belastbarkeit besitzen, können sie die Drehmomentreduktion am schwächsten Zahn ausgleichen. Um dies genauer zu untersuchen, wurden vorhandene Versuche zum Degradationsverhalten von Grübchen herangezogen und eine erweiterte Auswertung durchgeführt. Ursprünglich lag der Fokus wie im Stand der Technik lediglich auf dem schwächsten Zahn und damit dem Ausfall der Verzahnung. Für die adaptive Betriebsstrategie ist allerdings wichtig, auch die Belastbarkeit der anderen Zähne am Umfang zu kennen, weshalb die Auswertung auf alle Zähne ausgeweitet wurde. Insgesamt wurden sieben Ritzel mit je 21 Zähnen untersucht. Es zeigte sich, dass über 70 % der Zähne bei Versuchsende kein Grübchen aufweisen, wodurch die höhere Belastbarkeit bestätigt wurde. Bei der Betrachtung der insgesamt 42 Grübchen fallen häufig Grübchen an benachbarten Zahnflanken auf. Es wurde daher von einer Abhängigkeit aufgrund der Überdeckung ausgegangen. Die Wahrscheinlichkeit für Grübchen an benachbarten Zahnflanken ist dabei höher als die Wahrscheinlichkeit für Grübchen ohne Nachbarn. Zusätzlich zur Lage am Umfang wurden insgesamt 13 Degradationspfade der Grübchen näher untersucht. Der erkannte exponentielle Verlauf konnte im doppelt-logarithmischen Diagramm als Gerade dargestellt werden. Die mittlere Steigung dieser Geraden erlaubt eine einfache Extrapolation aller 42 Grübchen auf das EOL-Kriterium 4 % Grübchenfläche. Mit diesen Daten wurde schlussendlich eine Ausfallverteilung aller Grübchen erstellt, welche die Streuung der individuellen Zähne deutlich besser abbildet als der Stand der Technik. Allerdings sind in dieser Verteilung lediglich alle Grübchen am Umfang enthalten. Die vollkommen intakten Zähne, welche den größten Teil ausmachen, wurden nicht berücksichtigt, da hierzu keine Informationen vorliegen. Es wird jedoch von einer erheblich größeren Belastbarkeit ausgegangen, da das Grübchen erst initiiert werden muss und dann die Degradation auf das EOL-Kriterium erfolgt. Aus diesem Grund wird mit der erweiterten Grübchenauswertung das große Potenzial der entwickelten adaptiven Betriebsstrategie verdeutlicht.

Diese erweiterte Grübchenauswertung zeigt das Potenzial der adaptiven Betriebsstrategie lediglich theoretisch auf. Um eine Quantifizierung vorzunehmen, wurde daher ein Simulationsmodell aufgebaut, welches die Streuung der individuellen Zähne berücksichtigt. Das Modell basiert auf dem Lebensdauermodell nach Wöhler und einer linearen Schadensakkumulation für jeden einzelnen Zahn. Damit ist es möglich, die Variation des Drehmoments durch die adaptive Betriebsstrategie abzubilden und mit der Referenz ohne adaptive Betriebsstrategie zu vergleichen. Untersucht wurden

als Eingangssignale eine Sinusfunktion sowie diverse Sprungfunktionen. Als Ergebnis liegt direkt die Steigerung der RUL vor. Wichtig ist an dieser Stelle, dass hier eine konservative Abschätzung vorgenommen wurde, da an jedem Zahn ein Grübchen initiiert wurde. Zudem wurde von einer idealen Messung und Regelung ausgegangen. Aktuell liegt ein sehr frühes Stadium der Forschung bezüglich der adaptiven Betriebsstrategie vor, weshalb keine Prüfstandsversuche zur Validierung vorliegen. Aus diesem Grund wurden die Simulationsergebnisse mit grundlegenden Zusammenhängen verglichen und plausibilisiert. Ein wesentlicher Zusammenhang ist die Dauer der adaptiven Betriebsstrategie. Hier wurden zwei gegenläufige Effekte identifiziert. Durch einen frühen Start fallen die höherbelasteten Zähne früher aus und bei einem späten Start ist die Reduktion am schwächsten Zahn limitiert. Im Anschluss wurde eine Sensitivitätsanalyse der Eingangsparameter durchgeführt, um die Voraussetzungen für die Anwendung der adaptiven Betriebsstrategie zu untersuchen. Als wichtigster Eingangsparameter zeigte sich das angewendete Eingangssignal. Hier von hängt, zusammen mit der vorgegebenen Amplitude, entscheidend ab, wie stark die anderen Zähne belastet werden. Zudem wurde als zweit-wichtigster Eingangsparameter der Wöhlerexponent identifiziert. Durch die Steigung der Wöhlerkurve entscheidet sich, wie stark die Auswirkungen einer Drehmomentvariation auf die Lebensdauer des Einzelzahnes ist. Zudem spielt die Streuung der Belastbarkeit eine wesentliche Rolle, da hiervon der Ausfall des zweit-schwächsten Zahnes am Umfang abhängt. Alle anderen untersuchten Eingangsparameter zeigten einen untergeordneten Einfluss. Nach dieser Sensitivitätsanalyse wurde die optimale Parameterkombination der adaptiven Betriebsstrategie analysiert. Für eine Sprungfunktion mit vier reduzierten Zähnen ergab sich ein maximales Potenzial von 43,56 %. Abgerundet wurde die simulative Studie durch die Anwendung der adaptiven Betriebsstrategie auf eine Beispielverzahnung. Hier ist im Median eine maximale Steigerung von 12 % durch die adaptive Betriebsstrategie möglich. Als Ausblick wurde hier ebenfalls untersucht, wie sich eine zeitliche Adaption der drei schwächsten Zähne auswirkt. Bei einer Amplitude von 30 Nm ist im Median eine maximale Steigerung der RUL von 22 % möglich und damit deutlich mehr als über die einfache Adaption.

Die erweiterte Grübchenauswertung wie auch die simulative Ermittlung der Lebensdauersteigerung zeigen enormes Potenzial der entwickelten adaptiven Betriebsstrategie auf, weshalb die Forschung auf diesem Themengebiet intensiviert werden sollte. Für das Simulationsmodell bedeutet dies, dass eine Validierung mit Versuchen angestrebt werden sollte. Zudem sollten weitere Eingangssignale für die adaptive Betriebsstrategie ergänzt werden und hier ebenfalls mehrere Reduktionen am Umfang implementiert werden. Damit ist es möglich, auch den zweit-schwächsten Zahn am Umfang zu reduzieren und das Potenzial weiter zu erhöhen. Diese zusätzliche Entlastung kann für das Sinussignal über eine Verschiebung der Phasenlage und auch über eine Verdoppelung der Frequenz erreicht werden. Bezogen auf die Sprungfunktion können mehrere Sprünge am Umfang erzeugt oder die Breite des Sprungs angepasst

werden. Für das Anwendungsbeispiel wurde dies vereinfacht bereits vorgenommen. Hier ist jedoch eine Ausweitung auf die allgemeine Simulation notwendig sowie eine Erweiterung auf alle Eingangsparameter.

Die Ansätze der erweiterten Grübchenauswertung sollten für weitere Untersuchungen der Grundgesamtheit der Grübchen herangezogen werden. In der Arbeit wurde lediglich eine beispielhafte Verzahnung analysiert, welche durch eine axiale Verschiebung der Verzahnung im Versuch zudem stark gerafft wurde. Aus diesem Grund sollten zum einen die Auswertung auf andere Verzahnungen ausgeweitet sowie der Effekt der Raffung näher untersucht werden. Zum anderen sollten prinzipielle Untersuchungen zur erkannten Abhängigkeit der Grübchen angestellt werden, da durch die geringe Datenbasis keine ausreichende physikalische Beschreibung möglich war. Randeffekte könnten hier unter anderem auch eine größere Produktionsstreuung bei kleinen Stückzahlen, sowie eine größere Materialstreuung bei großen Zahnrädern spielen. Beide Effekte wirken sich positiv auf die adaptive Betriebsstrategie aus und sollten daher näher untersucht werden.

Bezogen auf die adaptive Betriebsstrategie selbst sollten die Schwingungen im Antriebsstrang näher untersucht werden. Es ist essentiell, dass durch die überlagerte Drehmomentvariation keine Resonanz getroffen wird. Zudem sollten an dieser Stelle die weiteren Bauteile im Antriebsstrang wie Wellen und Lager mitberücksichtigt werden, um eine vorzeitige Schädigung auszuschließen. Allerdings ist die adaptive Betriebsstrategie auch auf andere Maschinenelemente und Schadensmechanismen anwendbar. Liegt beispielsweise ein Grübchen an einem Lagerinnenring vor, kann die Last im Zahneingriff reduziert werden, wenn die vorgeschädigte Stelle des Innenrings den hochbelasteten Bereich durchläuft. Wichtig ist an dieser Stelle, ebenso wie bei der Anwendung auf Grübchen bei Zahnrädern, die Detektion und Lokalisierung des Schadens. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf, um die Schäden frühzeitig und lokal am Umfang erkennen zu können. Möglichkeiten könnten hier unter anderem neuartige faser-optische Sensoren bieten, welche Frequenzen bis in den Ultraschall aufzeichnen können bei gleichzeitig hoher Amplituden-Sensitivität. Für eine Anwendung in der Praxis sind Themenstellungen zum Umgang mit Lastkollektiven notwendig sowie die Anwendung auf mehrstufige und mehrgängige Getriebe und auch Planetengetriebe. Um die Regelung in der Praxisanwendung möglichst automatisiert vornehmen zu können, bieten sich Methoden der Künstlichen Intelligenz und hierbei besonders das Reinforcement Learning an.

Literatur

- [Abe96] Robert B. Abernethy. *The new Weibull handbook: Reliability & statistical analysis for predicting life, safety, survivability, risk, cost and warranty claims*. 4. Auflage. R.B. Abernethy, 1996. ISBN: 0965306216.
- [Bad+01] M. El Badaoui, V. Cahouet, F. Guillet, J. Danière und P. Velex. „Modeling and Detection of Localized Tooth Defects in Gearing Systems“. In: *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME* 123 (2001), S. 422–430.
- [BZ20] Adrian Barbu und Song-Chun Zhu. *Monte Carlo Methods*. Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2020.
- [Bar11] Walter Bartelmus. „Gearbox damage process“. In: *Journal of Physics: Conference Series* 305 (2011).
- [BK71] W.J. Bartz und W. Käser. „Untersuchungen des Einflusses moderner Schmierstoffe auf die Pittingbildung bei Wälz- und Gleitbeanspruchung - Literaturrecherche und Auswertung“. In: *FVA-Berichte* Heft 2, Nr. 2 (1971).
- [Bar99] Wilfried J. Bartz. *Schäden an geschmierten Maschinenelementen*. 3. Auflage. expert verlag, 1999.
- [BLC11] Andrew W. Batchelor, Loh Nee Lam und Margam Chandrasekaran. *Materials Degradation and its Control by Surface Engineering*. 3. Auflage. Imperial College Press, 2011.
- [Bay00] Isabel Bayerdörfer. *Einfluß von betriebsbedingten Schmierstoffveränderungen auf die Flankentragfähigkeit einsatzgehärteter Stirnräder*. Dissertation. TU München, 2000.
- [BL04] Bernd Bertsche und Gisbert Lechner. *Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau: Ermittlung von Bauteil- und System-Zuverlässigkeiten*. 3. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004.

- [Bes20] Zeljana Beslic. *Modellierung der Schadensdegradation Zahnradgrübchen bei Fahrzeuggetrieben*. Dissertation. Universität Stuttgart, 2020.
- [Bot18] Mathias Botzler. *Präventive Diagnose abnutzungsabhängiger Komponentenausfälle*. Dissertation. Universität Stuttgart, 2018.
- [BBL11] C. Brecher, M. Brumm und C. Löpenhaus. „Lokale spannungsmechanische Beschreibung grübchenkritischer Zahnflankenbeanspruchungen“. In: *Dresdner Maschinenelemente Kolloquium (DMK)* (2011).
- [Bre+17] C. Brecher, C. Löpenhaus, F. Goergen und D. Mevissen. „Erweiterte Schadensanalyse von Grübchenausbrüchen an einsatzgehärteten Zahnradern“. In: *Forschung im Ingenieurwesen* 81 (2-3 2017), S. 221–232.
- [Bru06] Stefan Bruckmeier. *Flankenbruch bei Stirnradgetrieben*. Dissertation. TU München, 2006.
- [CNV17] Brigitte Chebel-Morello, Jean-Marc Nicod und Christophe Varnier. *From Prognostics and Health Systems Management to Predictive Maintenance 2 - Volume 7: Knowledge, Reliability and Decision*. ISTE Ltd und John Wiley & Sons, Inc., 2017. ISBN: 9781848219380.
- [CZC17] Man Chen, Zheng Zhang und Cen Cui. „On the Bias of the Maximum Likelihood Estimators of Parameters of the Weibull Distribution“. In: *Mathematical and Computational Applications* 22 (19 2017).
- [Cho+96a] F. K. Choy, S. Huang, J. J. Zakrajsek, R. F. Handschuh und D. P. Townsend. „Vibration signature analysis of a faulted gear transmission system“. In: *Journal of Propulsion and Power* 12 (2 1996), S. 289–295.
- [Cho+96b] F.K. Choy, V. Polyshchuk, J.J. Zakrajsek, R.F. Handschuh und D.P. Townsend. „Analysis of the effects of surface pitting and wear on the vibration of a gear transmission system“. In: *Tribology International* 29 (1 1996), S. 71–83.
- [Czi99] Veronica Czitrom. „One-Factor-at-a-Time versus Designed Experiments“. In: *The American Statistician* 53 (2 1999).
- [DKC19] Cuong Dao, Behzad Kazemtabrizi und Christopher Crabtree. „Wind turbine reliability data review and impacts on levelised cost of energy“. In: *Wind Energy* (22 2019).
- [Dec11] Joerg Deckers. „Kann man den idealen Instandsetzungszeitpunkt für Maschinenelemente in Industriegetrieben prognostizieren?“ In: *Dresdner Maschinenelemente Kolloquium (DMK)* (2011).

- [Dec19] Joerg Deckers. „Restlebensdauerabschätzung von Lagern und Verzahnungen in Industriegetrieben auf Basis von Trendanalysen“. In: *Dresdner Maschinenelemente Kolloquium (DMK)* (2019).
- [Dec21] Joerg Deckers. „How long can I still run my gear unit? Insights in Predictive Maintenance field experiences“. In: *Antriebstechnisches Kolloquium (ATK)* (2021).
- [Dhi83] Balbir S. Dhillon. *Reliability Engineering in Systems Design and Operation*. 1. Auflage. Van Nostrand Reinhold Company Inc., 1983.
- [DIN3979] *DIN 3979:1979 Zahnschäden an Zahnradgetrieben - Bezeichnung, Merkmale, Ursachen*. Deutsches Institut für Normung, 1979.
- [DIN3990-1] *DIN 3990-1:1987 Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern - Einführung und allgemeine Einflußfaktoren*. Deutsches Institut für Normung, 1987.
- [DIN3990-2] *DIN 3990-2:1987 Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern - Berechnung der Grübchentragfähigkeit*. Deutsches Institut für Normung, 1987.
- [DIN3990-21] *DIN 3990-21:1989 Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern - Anwendungsnorm für Schnellaufgetriebe und Getriebe ähnlicher Anforderungen*. Deutsches Institut für Normung, 1989.
- [DIN3990-5] *DIN 3990-5:1987 Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern - Dauerfestigkeitswerte und Werkstoffqualitäten*. Deutsches Institut für Normung, 1987.
- [DIN13306] *DIN EN 13306:2018 Instandhaltung - Begriffe der Instandhaltung*. Deutsches Institut für Normung, 2018.
- [DIN50100] *DIN50100:2016 Schwingfestigkeitsversuch - Durchführung und Auswertung von zyklischen Versuchen mit konstanter Lastamplitude für metallische Werkstoffproben und Bauteile*. Deutsches Institut für Normung, 2016.
- [DG09] Yan Ding und J.A. Gear. „Spalling depth prediction model“. In: *Wear* 267 (2009), S. 1181–1190.
- [DJK96] Yan Ding, Rhys Jones und Bruce T. Kuhnell. „Elastic-plastic finite element analysis of spall formation in gears“. In: *Wear* 197 (1996), S. 197–205.
- [DR03] Yan Ding und Neville F. Rieger. „Spalling formation mechanism for gears“. In: *Wear* 254 (2003), S. 1307–1317.
- [Döb98] R. Döbereiner. „Tragfähigkeit von Hochverzahnungen geringer Schwingungsanregung“. In: *FVA-Berichte* Heft 571, Nr. 257 (1998).

- [Dyn20] Dynardo GmbH. *Methods for multi-disciplinary optimization and robustness analysis (Handbook)*. 2020.
- [Ebe95] Chr. Eberspächer. *Reihenfolgeeffekte bei der Grübchen-Betriebsfestigkeit einsatzgehärteter Zahnräder*. Dissertation. TU München, 1995.
- [ERM12] Thomas Ehben, Jan-Dirk Reimers und Daniel Oliver Maier. „EP 2 495 474 A1: Getriebezahnrad mit Wechselverzahnung – Europäische Patentanmeldung“. 2012.
- [EGA17] Stephen Ekwaro-Osire, Aparecido Carlos Gonçalves und Fisseha M. Alemayehu. *Probabilistic Prognostics and Health Management of Energy Systems*. Springer International Publishing, 2017. ISBN: 9783319558516.
- [Els93] Marc-Gregory Elstorpf. *Einflüsse auf die Grübchentragsfähigkeit einsatzgehärteter Zahnräder bis in das höchste Zeitfestigkeitsgebiet*. Dissertation. TU München, 1993.
- [Emm94] Siegfried Emmert. *Untersuchungen zur Zahnflankenermüdung (Graufleckigkeit, Grübchenbildung) schnellaufender Stirnradgetriebe*. Dissertation. TU München, 1994.
- [Eng19] Christian Michael Engelhardt. *Einfluss von Wasser in Getriebeölen auf die Zahnflankentragsfähigkeit einsatzgehärteter Stirnräder*. Dissertation. TU München, 2019.
- [Fah+16] Ludwig Fahrmeir, Christian Heumann, Rita Künstler, Iris Pigeot und Gerhard Tutz. *Statistik - Der Weg zur Datenanalyse*. 8. Auflage. Springer Spektrum, 2016.
- [FKL07] Ludwig Fahrmeir, Thomas Kneib und Stefan Lang. *Regression: Modelle, Methoden und Anwendungen*. 2. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. ISBN: 9783540339328.
- [FY98] A. Fatemi und L. Yang. „Cumulative fatigue damage and life prediction theories: a survey of the state of the art for homogeneous materials“. In: *International Journal of Fatigue* 20 (1 1998).
- [FHT10] S. Faulstich, B. Hahn und P.J. Tavner. „Wind turbine downtime and its importance for offshore deployment“. In: *Wind Energy* (2010).
- [Fel16] Michael Felbermaier. *Untersuchungen zur Graufleckenbildung und deren Einfluss auf die Grübchentragsfähigkeit einsatzgehärteter Stirnräder*. Dissertation. TU München, 2016.

- [Fou+15a] S. Foulard, M. Ichchou, S. Rinderknecht und J. Perret-Liaudet. „Online and real-time monitoring system for remaining service life estimation of automotive transmissions - Application to a manual transmission“. In: *Mechatronics* 30 (2015), S. 140–157.
- [Fou+15b] S. Foulard, S. Rinderknecht, M. Ichchou und J. Perret-Liaudet. „Automotive drivetrain model for transmission damage prediction“. In: *Mechatronics* 30 (2015), S. 27–54.
- [FRF16] Stéphane Foulard, Stephan Rinderknecht und Rafael Fietzke. „Leichtbau von Fahrzeuggetrieben durch Online- und Echtzeit-Lebensdauerüberwachung“. In: *Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ)* 03 (118. Jahrgang 2016).
- [Fro+19] M. Fromberger, S. Sendlbeck, M. Rothmund, J. Götz, M. Otto und K. Stahl. „Comparing Data Sources for Condition Monitoring Suitability“. In: *Forschung im Ingenieurwesen/Engineering Research* 83 (2019), S. 521–527.
- [Fro+16] Max Fromberger, Uwe Weinberger, Bernhard Kohn, Thanak Utakapan, Michael Otto und Karsten Stahl. „Condition Monitoring by Position Encoders“. In: *inter.noise* (2016).
- [Fro+17] Max Fromberger, Uwe Weinberger, Bernhard Kohn, Thanak Utakapan, Michael Otto und Karsten Stahl. „Evaluating Signal Processing Methods for Use in Gearbox Condition Monitoring“. In: *24th International Congress on Sound and Vibration (ICSV24)* (2017).
- [Gap62] M. Gappisch. *Über die Grübchenbildung an Evolventen-Stirnradgetrieben*. Dissertation. RWTH Aachen, 1962.
- [GBW15] Sebastian Glatt, Florian Becker und Mark Walz. „DE 10 2015 210 911 A1: Verfahren und Vorrichtung zum Erkennen von Veränderungen in einem elektrisch betriebenen Antrieb – Offenlegungsschrift“. 2015.
- [GMZ16] Rafael Gouriveau, Kamal Medjaher und Noureddine Zerhouni. *From Prognostics and Health Systems Management to Predictive Maintenance I - Volume 4: Monitoring and Prognostics*. ISTE Ltd und John Wiley & Sons, Inc., 2016. ISBN: 9781848219373.
- [Gre+21] Yvonne Gretzinger, Andreas Kroner, Mark Henß, Martin Dazer und Bernd Bertsche. „Extended Evaluation of Pitting Degradation Tests to Increase the Remaining Useful Life of Gear Wheels“. In: *Antriebstechnisches Kolloquium (ATK)* (2021).

- [GNB19] Yvonne Gretzinger, Jonathan-Lee Nosch und Bernd Bertsche. „Beeinflussung von Antriebsstrangschwingungen zur Lebensdauererweiterung von Zahnradgetrieben“. In: 2. *VDI Fachtagung Schwingungen* (2019).
- [GAM01] Ferdinand Grob, Dietmar Arndt und Rolf Maier-Landgrebe. „DE 101 02 773 A1: Triebstrangüberwachung – Offenlegungsschrift“. 2001.
- [Hai06] Erwin Haibach. *Betriebsfestigkeit - Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung*. 3. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [HH79] J.M. Hammersley und D.C. Handscomb. *Monte Carlo Methods*. Chapman und Hall Ltd., 1979.
- [Has91] Karl Haslinger. *Untersuchung zur Grübchentragsfähigkeit profilkorrigierter Zahnräder*. Dissertation. TU München, 1991.
- [HS18] Jürgen Hedderich und Lothar Sachs. *Angewandte Statistik Methodensammlung mit R*. 16. Auflage. Springer Spektrum, 2018. ISBN: 9783662566572.
- [Hei05] Siegfried Heier. *Windkraftanlagen - Systemauslegung, Netzintegration und Regelung*. 4. Auflage. B. G. Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2005. ISBN: 9783322940889.
- [Hei+18] Michael Hein, Michael Geitner, Thomas Tobie, Karsten Stahl und Burkhard Pinnekamp. „Reliability of Gears - Determination of Statistically Validated Material Strength Numbers“. In: *AGMA Technical Paper 18FTM26* (2018).
- [Hei90] W. Heine. *Technische und wirtschaftliche Vorteile synthetischer Getriebschmierung*. Getriebschmierung in der Antriebstechnik. Expert Verlag, 1990.
- [HB19] Mark Henß und Bernd Bertsche. „AutoEncoder basierte automatisierte Zustandsdiagnose von Wälzlagern“. In: 29. *VDI Fachtagung Technische Zuverlässigkeit (TTZ)* (2019).
- [Hen21] Mark Stefan Henß. *Methodik zur Konzeption, Analyse und Modellierung von Lösungen im Prognostics and Health Management (PHM)*. Dissertation. Universität Stuttgart, 2021.
- [Her03] Tobias Hertter. *Rechnerischer Festigkeitsnachweis der Ermüdungstragsfähigkeit vergüteter und einsatzgehärteter Stirnräder*. Dissertation. TU München, 2003.

-
- [Hir90] M. Hirt. *Auslegung von Großgetrieben unter Berücksichtigung tribo-technischer Beanspruchungen und der Schmierstoffe*. Getriebeschmierung in der Antriebstechnik. Expert Verlag, 1990.
- [Hoc11] Michael Hochmann. *Zahnradtragfähigkeit bei Schmierung mit Getriebefließfetten*. Dissertation. TU München, 2011.
- [HH86] W. Hwang und K.S. Han. „Cumulative Damage Models and Multi-Stress Fatigue Life Prediction“. In: *Journal of Composite Materials* 20 (1986).
- [Ise97] R. Isermann. „Supervision, Fault-Detection and Fault-Diagnosis Methods - An Introduction“. In: *Control Engineering Practice* 5 (5 1997).
- [ISO6336-1] *ISO 6336-1:2019 Calculation of load capacity of spur and helical gears - Part 1: Basic principles, introduction and general influence factors*. International Standard, 2019.
- [ISO6336-2] *ISO 6336-2:2019 Calculation of load capacity of spur and helical gears - Part 2: Calculation of surface durability (pitting)*. International Standard, 2019.
- [ISO6336-5] *ISO 6336-5:2016 Calculation of load capacity of spur and helical gears - Part 5: Strength and quality of materials*. International Standard, 2016.
- [Joa82] F.J. Joachim. „Streuungen der Grübchentrugfähigkeit“. In: *Antriebstechnik* 21 (4 1982), S. 156–159.
- [Joh+11] Stephen B. Johnson, Thomas Gormley, Seth Kessler, Charles Mott, Ann Patterson-Hine, Karl Reichard und Philip Jr. Scandura. *System Health Management: with Aerospace Applications*. John Wiley & Sons, Inc., 2011. ISBN: 9780470741337.
- [Jus17] Jochen Juskowiak. *Beanspruchungsgerechte Bestimmung des Weibull-Formparameters für Zuverlässigkeitsprognosen*. Dissertation. Universität Stuttgart, 2017. ISBN: 9783936100747.
- [KL77] K.C. Kapur und L.R. Lamberson. *Reliability in Engineering Design*. 1. Auflage. John Wiley & Sons, 1977.
- [KAC17] Nam-Ho Kim, Dawn An und Joo-Ho Choi. *Prognostics and Health Management of Engineering Systems - An Introduction*. Springer International Publishing Switzerland, 2017.
- [KB17] Fritz Klocke und Christian Brecher. *Zahnrad- und Getriebetechnik – Auslegung, Herstellung, Untersuchung, Simulation*. 1. Auflage. Carl Hanser Verlag München, 2017.
-

- [Kna88] Gerhard Knauer. *Zur Grübchentragfähigkeit einsatzgehärteter Zahnräder – Einfluss von Werkstoff, Schmierstoff und Betriebstemperatur*. Dissertation. TU München, 1988.
- [Köc96] J.J. Köcher. *Erhöhung der Zahnflankentragfähigkeit einsatzgehärteter Zylinderräder durch Kugelstrahlen*. Dissertation. RWTH Aachen, 1996.
- [Kol16] Oliver Koller. *Zuverlässigkeit von Leistungsmodulen im elektrischen Antriebsstrang*. Dissertation. Universität Stuttgart, 2016.
- [Kol13] Peter Josef Koller. *Steigerung der Zahnflankentragfähigkeit durch Optimierung von Eigenspannungs- und Oberflächenzustand*. Dissertation. TU München, 2013.
- [KBK76] V. Krüger, W.J. Bartz und W. Käser. „Untersuchungen des Einflusses moderner Schmierstoffe auf die Pittingbildung bei Wälz- und Gleitwälzbeanspruchung“. In: *FVA-Berichte* Heft 39, Nr. 2 (1976).
- [Läp16] Volker Läßle. *Einführung in die Festigkeitslehre – Lehr- und Arbeitsbuch*. 4. Auflage. Springer Vieweg, 2016.
- [Law03] Jerald F. Lawless. *Statistical Models and Methods for Lifetime Data*. 2. Auflage. Wiley Series in Probability and Statistics. John Wiley & Sons. Inc., 2003.
- [Len+19] Stefan Lenssen, Marcel Indenbirken, Tobias Nuißl und Stefan Schemmert. „Untersuchungen zur Verzahnungsoptimierung mit BEARINX“. In: *Dresdner Maschinenelemente Kolloquium (DMK)* (2019).
- [Lin10] Heinz Linke. *Stirnradverzahnung – Berechnung, Werkstoffe, Fertigung*. 2. Auflage. Carl Hanser Verlag München Wien, 2010.
- [LSD67] Charles Lipson, Narendra J. Sheth und Ralph L. Disney. *Reliability Prediction – Mechanical Stress/Strength Interference*. Rome Air Development Center, Research und Technology Division, Air Force Systems Command, Griffis Air Force Base, 1967.
- [LP02] Lin Liu und Darryll J. Pines. „The Influence of Gear Design Parameters on Gear Tooth Damage Detection Sensitivity“. In: *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME* 124 (2002), S. 794–804.
- [LM93] C. Joseph Lu und William Q. Meeker. „Using Degradation Measures to Estimate a Time-to-Failure Distribution“. In: *Technometrics* 35 (2 1993), S. 161–174.
- [MJ18] Jędrzej Maćzak und Marcin Jasiński. „Model-based detection of local defects in gears“. In: *Archive of Applied Mechanics* 88 (2018), S. 215–231.

-
- [Man00] Randall D. Manteufel. „Evaluating the Convergence of Latin Hypercube Sampling“. In: *Proceedings of the 41st Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference and Exhibit* (2000).
- [MZ99] Heiko Mauch und H. Zenner. „Lebensdauerstatistik – Statistische Methoden zur Beurteilung von Bauteillebensdauer und Zuverlässigkeit und ihre beispielhafte Anwendung auf Zahnräder“. In: *FVA-Berichte* Heft 591, Nr. 304 (1999).
- [McF86] P. D. McFadden. „Detecting Fatigue Cracks in Gears by Amplitude and Phase Demodulation of the Meshing Vibration“. In: *Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design* 108 (165 1986).
- [MBC00] M.D. Mckay, R.J. Beckman und W.J. Conover. „A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output From a Computer Code“. In: *Technometrics* 42 (1 2000).
- [ME98] William Q. Meeker und Luis A. Escobar. *Statistical Methods for Reliability Data*. Wiley Series in Probability und Statistics, 1998.
- [ML19] Huixing Meng und Yan-Fu Li. „A review on prognostics and health management (PHM) methods of lithium-ion batteries“. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 116 (2019).
- [Mic08] Gabriele Michalke. *Variable Speed Wind Turbines – Modelling, Control, and Impact on Power Systems*. Dissertation. TU Darmstadt, 2008.
- [Min45] M.A. Miner. „Cumulative damage in fatigue“. In: *Journal of Applied Mechanics, Trans. ASME* (12 1945).
- [MW08] Thomas Most und Johannes Will. „Meta-model of Optimal Prognosis – An automatic approach for variable reduction and optimal meta-model selection“. In: *Weimar Optimization and Stochastic Days 5.0* (2008).
- [MMS18] F. Müller, M. Merder und B. Schlecht. „BECAL - Schädigungsfortschritt Zahnflanke“. In: *FVA-Berichte* Heft 1277, Nr. 223/XII (2018).
- [Nau+19] Harald Naunheimer, Bernd Bertsche, Joachim Ryborz, Wolfgang Novak, Peter Fietkau und in Zusammenarbeit mit Yvonne Gretzinger. *Fahrzeuggetriebe – Grundlagen, Auswahl, Auslegung und Konstruktion*. 3. Auflage. Springer Vieweg, 2019.
-

- [NGM14] Amir Rasekhi Nejad, Zhen Gao und Torgeir Moan. „Fatigue reliability-based inspection and maintenance planning of gearbox components in wind turbine drivetrains“. In: *Energy Procedia - EERA DeepWind* 53 (2014), S. 248–257.
- [Nel04a] Wayne B. Nelson. *Accelerated Testing: Statistical Models, Test Plans and Data Analysis*. 2. Auflage. Wiley Series in Probability and Statistics, 2004. ISBN: 0471697362.
- [Nel04b] Wayne B. Nelson. *Applied life data analysis*. John Wiley & Sons, Inc., 2004.
- [Ngu02] Phong Dien Nguyen. *Beitrag zur Diagnostik der Verzahnungen in Getrieben mittels Zeit-Frequenz-Analyse*. Dissertation. TU Chemnitz, 2002.
- [NW03] G. Niemann und H. Winter. *Maschinenelemente Band 2: Getriebe allgemein, Zahnradgetriebe – Grundlagen, Stirnradgetriebe*. 2. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2003.
- [NB21] Dennis Nordmark und Joris Boeye. „Service optimization of Wind Turbine Drivetrains through digital solutions“. In: *Antriebstechnisches Kolloquium (ATK)* (2021).
- [OBK60] Herwart Opitz, Johannes Bielefeld und Werner Kalkert. *Lebensdauerprüfung von Zahnradgetrieben*. Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen. Westdeutscher Verlag, Köln, 1960.
- [Ott09] Michael Otto. *Lastverteilung und Zahnradtragfähigkeit von schrägverzahnten Stirnrädern*. Dissertation. TU München, 2009.
- [Pal24] A. Palmgren. „Die Lebensdauer von Kugellagern“. In: *VDI-Zeitschrift* (68 1924).
- [PHS13] A. N. Patowary, J. Hazarika und G.L. Sriwastav. „Interference theory of reliability: a review“. In: *International Journal of System Assurance and Engineering Management* 4 (2 2013).
- [IZP09] Ingenieuresellschaft Zuverlässigkeit und Prozessmodellierung (IZP). „Abschlussbericht für das Verbundprojekt: Erhöhung der Verfügbarkeit von Windkraftanlagen“. In: *Verbundprojekt EVW* (2009).
- [RV07] Dieter Radaj und Michael Vormwald. *Ermüdungsfestigkeit – Grundlagen für Ingenieure*. 3. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- [Rad05] Todor Radev. *Einfluss des Schmierstoffes auf die Grübchentragfähigkeit einsatzgehärteter Zahnräder*. Dissertation. TU München, 2005.

-
- [Rah+13] Habiballah Rahimi-Eichi, Unnati Ojha, Frederico Baronti und Mo-Yuen Chow. „Battery Management System – An Overview of its Application in the Smart Grid and Electric Vehicles“. In: *IEEE Industrial Electronics Magazine* (2013).
- [RB12] Chemseddine Rahmoune und Djamel Benazzouz. „Early detection of pitting failure in gears using a spectral kurtosis analysis“. In: *Mechanics and Industry* 13 (2012), S. 245–254.
- [Ran11] Robert Bond Randall. *Vibration-based Condition Monitoring*. 1. Auflage. John Wiley & Sons Ltd., 2011.
- [Raz67] C. Razim. *Einfluss von Restaustenit und netzförmigen Karbiden auf die Neigung zur Grübchenbildung in einsatzgehärteten Zahnradern*. Dissertation. Universität Stuttgart, 1967.
- [RMW07] Dirk Roos, Thomas Most und Johannes Will. „Advanced surrogate models within the robustness evaluation“. In: *Weimar Optimization and Stochastic Days 4.0* (2007).
- [Sal+08] Andrea Saltelli, Marco Ratto, Terry Andres, Francesca Campolongo, Jessica Cariboni, Debora Gatelli, Michaela Saisana und Stefano Tarantola. *Global Sensitivity Analysis. The Primer*. John Wiley & Sons, Ltd., 2008. ISBN: 9780470059975.
- [San18] Manuela Sander. *Sicherheit und Betriebsfestigkeit von Maschinen und Anlagen Konzepte und Methoden zur Lebensdauervorhersage*. 2. Auflage. Springer Vieweg, 2018. ISBN: 9783662544433.
- [Sch90] Karl Viktor Schaller. *Betriebsfestigkeitsuntersuchungen zur Grübchenbildung an einsatzgehärteten Stirnradflanken*. Dissertation. TU München, 1990.
- [SRB07] Christian Scheer, Wilfried Reimche und Friedrich-Wilhelm Bach. „Schallemissions- und Waveletanalysen zur frühzeitigen Schadenserkenkung an hochbelasteten rotierenden Bauteilen“. In: *DGZfP-Jahrestagung 2007* (2007).
- [SSM19] Berthold Schlecht, Stefan Schumann und Felix Müller. „Die Ermittlung der Grübchenbetriebsfestigkeit auf Basis lokaler Schadensanalysen“. In: *Dresdner Maschinenelemente Kolloquium (DMK)* (2019).
- [SSS11] Berthold Schlecht, Michael Senf und Tobias Schulze. „Detaillierte Beanspruchungsanalyse in Getrieben“. In: *Antriebsstränge in Windenergieanlagen* (2011).
-

- [SS16] Dietrich Schlottmann und Henrik Schnegas. *Auslegung von Konstruktionselementen*. 3. Auflage. Springer Vieweg, 2016. ISBN: 9783662488065.
- [SB01] Dirk Schollbach und Daniel Brenner. „DE 10 2011 117 468 A1: Verfahren, Recheneinheit und Einrichtung zur Überwachung eines Antriebstrangs – Offenlegungsschrift“. 2001.
- [Sch10] Jürgen Schudy. *Untersuchungen zur Flankentragfähigkeit von Außen- und Innenverzahnungen – Einflüsse auf das Grübchen-, Grauflecken- und Verschleißverhalten, insbesondere bei langsam laufenden Getriebestufen*. Dissertation. TU München, 2010.
- [Sch11] Tobias Schulze. „Effektives Getriebedesign mehrstufiger Getriebe – Ausschöpfung des gesamten Potenzials“. In: *Dresdner Maschinenelemente Kolloquium (DMK)* (2011).
- [SZ73] W. Schütz und H. Zenner. „Schadensakkumulationshypothesen zur Lebensdauervorhersage bei schwingender Beanspruchung — Ein kritischer Überblick“. In: *Zeitschrift für Werkstofftechnik* 4. Jahrgang, Nr. 1+2 (1973).
- [SS19] Colin Schwarz und Carsten Schulz. „Moderne, schädigungsreduzierende Ansätze zur Regelung einer Windenergieanlage in einem breiten Lastspektrum“. In: *Dresdner Maschinenelemente Kolloquium (DMK)* (2019).
- [Sch07] Simon Schwienbacher. *Einfluss von Schleifbrand auf die Flankentragfähigkeit einsatzgehärteter Zahnräder*. Dissertation. TU München, 2007.
- [SP16] Vikas Sharma und Anand Parey. „A Review of Gear Fault Diagnosis Using Various Condition Indicators“. In: *Procedia Engineering – 12th International Conference on Vibration Problems (ICOVP 2015)* 144 (2016), S. 253–263.
- [SBH10] Karl Siebertz, David Theo van Bebber und Thomas Hochkirchen. *Statistische Versuchsplanung: Design of Experiments (DOE)*. 1. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
- [Sie06] Axel Siemon. *Qualitative und quantitative Analysen der linearen und nichtlinearen Schadensakkumulationshypothesen unter Einbeziehung der statistischen Versuchsplanung*. Dissertation. Universität Kassel, 2006.
- [Sim84] M. Simon. *Messung von elasto-hydrodynamischen Parametern und ihre Auswirkung auf die Grübchentragfähigkeit vergüteter Scheiben und Zahnräder*. Dissertation. TU München, 1984.

-
- [SHS18] Karl Sommer, Rudolf Heinz und Jörg Schöfer. *Verschleiß metallischer Werkstoffe – Erscheinungsformen sicher beurteilen*. 3. Auflage. Springer Vieweg, 2018.
- [Sta+99] K. Stahl, K. Michaelis, B.-R. Höhn und H. Winter. „Lebensdauerstatistik“. In: *FVA-Berichte* Heft 580, Nr. 304 (1999).
- [Sta01] Karsten Stahl. *Grübchentragsfähigkeit einsatzgehärteter Gerad- und Schrägverzahnungen unter besonderer Berücksichtigung der Presungsverteilung*. Dissertation. TU München, 2001.
- [Sta17] Statista. „Welche dieser Aspekte sind Ihnen beim Autokauf besonders wichtig?“ In: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/715597/umfrage/umfrage-zu-den-wichtigsten-kaufkriterien-beim-autokauf-in-deutschland/> (abgerufen am 25.03.2021) (2017).
- [Ste07] Gregor Steinberger. *Optimale Grübchentragsfähigkeit von Schrägverzahnungen*. Dissertation. TU München, 2007.
- [Sto+13] Matthias Stohrer, Stefan Kemmler, Oliver Koller, Peter Zeiler und Bernd Bertsche. „Zuverlässigkeitsorientierte Online-Optimierung von Betriebsstrategien mechatronischer Produkte“. In: *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung (SSP)* (2013).
- [Sun95] Raj Sundararajan. *Probabilistic Structural Mechanics Handbook – Theorie and Industrial Applications*. 1. Auflage. Chapman & Hall, 1995.
- [Ten+16] Wei Teng, Xian Ding, Xiaolong Zhang, Yibing Liu und Zhiyong Ma. „Multi-fault detection and failure analysis of wind turbine gearbox using complex wavelet transform“. In: *Renewable Energy* 93 (2016), S. 591–598.
- [Tob01] Thomas Tobie. *Zur Grübchen- und Zahnfußtragsfähigkeit einsatzgehärteter Zahnräder*. Dissertation. TU München, 2001.
- [Tri16] Carsten Trimborn. „DE 10 2016 222 660 A1: Verfahren und Vorrichtung zum Erkennen von Veränderungen in einem elektrisch betriebenen Antrieb – Offenlegungsschrift“. 2016.
- [Uhl19] Markus Uhending. „Optimierung der LCoE von Windparks: Wie können Digitale Getriebe die Energieerzeugung maximieren und Betriebskosten minimieren?“ In: *Dresdner Maschinenelemente Kolloquium (DMK)* (2019).
-

- [Ulm+20] Markus Ulmer, Eskil Jarlskog, Gianmarco Pizza, Jaakko Manninen und Lilach Goren Huber. „Early Fault Detection Based on Wind Turbine SCADA Data Using Convolutional Neural Networks“. In: *European Conference of the Prognostics and Health Management Society* (2020).
- [VDA32] *VDA 32 - Zuverlässigkeitssicherung bei Automobilherstellern und Lieferanten*. Verband der Automobilindustrie (VDA), 2016.
- [VHS20] Daniel Vietze, Michael Hein und Karsten Stahl. „Method for a cloud based remaining-service-life-prediction for vehicle-gearboxes based on big-data-analysis and machine learning“. In: *Forschung Ingenieurwesen* 84 (2020), S. 305–314.
- [Wac13] Michael Wacker. *Einfluss von Drehungleichförmigkeiten auf die Zahnradlebensdauer in Fahrzeuggetrieben*. Dissertation. Universität Stuttgart, 2013. ISBN: 9783936100457.
- [WMK09] Dong Wang, Qiang Miao und Rui Kang. „Robust health evaluation of gearbox subject to tooth failure with wavelet decomposition“. In: *Journal of Sound and Vibration* 324 (3-5 2009), S. 1141–1157.
- [Wan+15] Dong Wang, Qiang Miao, Qinghua Zhou und Guangwu Zhou. „An intelligent prognostic system for gear performance degradation assessment and remaining useful life estimation“. In: *Journal of Vibration and Acoustics* 137 (2015).
- [Wan+19] Jianyu Wang, Zhenling Mo, Heng Zhang und Qiang Miao. „A deep learning method for bearing fault diagnosis based on time-frequency image“. In: *IEEE Access* 7 (2019), S. 42373–42383.
- [Wan02] Wenyi Wang. „Toward dynamic model-based prognostics for transmission gears“. In: *Component and Systems Diagnostics, Prognostics, and Health Management II* 4733 (2002), S. 157–167.
- [Wit12] Jochen Witzig. *Flankenbruch – Eine Grenze der Zahnradtragfähigkeit in der Werkstofftiefe*. Dissertation. TU München, 2012.
- [Yan15] Jihong Yan. *Machinery prognostics and prognosis oriented maintenance management*. John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., 2015. ISBN: 9781118638729.
- [Yan07] Guangbin Yang. *Life cycle reliability engineering*. John Wiley & Sons, Inc., 2007. ISBN: 9780471715290.
- [ZTZ17] Fuqiong Zhao, Zhigang Tian und Yong Zeng. „Overview on Gear Health Prognostics“. In: *Probabilistic Prognostics und Health Management of Energy Systems*. Springer International Publishing, 2017, S. 49–65. ISBN: 9783319558523.

- [Zio13] Enrico Zio. *The Monte Carlo Simulation Method for System Reliability and Risk Analysis*. 1. Auflage. Springer Verlag London, 2013.

Unveröffentlichte studentische Arbeiten am IMA

- [Ehn17] Steffen Ehnert. „Vorbereitung einer Prüfkonfiguration und Parametermittlung für Dauerlaufversuche zum Thema Grübchenbildung an Stirnrädern“. Bachelorarbeit. 2017.
- [Ehn18] Steffen Ehnert. „Simulation der Grübchendegradation unter elasto-hydrodynamischen Kontaktbedingungen“. Studienarbeit. 2018.

Im Zusammenhang mit dieser Promotion entstandene unveröffentlichte studentische Arbeiten

- [Bah19] Soulmaz Bahaloo Horeh. „Untersuchungen zur Verteilungsfunktion der Grundgesamtheit von Zahnradgrübchen“. Studienarbeit. 2019.
- [Mir19] Eduardo Miranda. „Theoretische Untersuchungen zu Lagerschäden bei Getrieben“. Bachelorarbeit. 2019.
- [Nie19] Jan Niesporek. „Erstellung eines Verschleißmodells für Zahnradgrübchen“. Studienarbeit. 2019.
- [Nos18] Jonathan-Lee Nosch. „Modellierung eines Getriebes mit Matlab-Simulink“. Studienarbeit. 2018.
- [Pos20] Maximilian Posner. „Entwicklung eines Reinforcement Learning Algorithmus zur Lebensdauerverlängerung von Zahnradern“. Bachelorarbeit. 2020.
- [Sch19] Hannes Schöller. „Analyse der Systemvoraussetzungen zur Beeinflussung von Schwingungen“. Studienarbeit. 2019.
- [Vol20] Philipp Volz. „Entwicklung eines Prüfkonzpts zur Untersuchung von Grübchen an Zahnflanken“. Masterarbeit. 2020.

Kapitel 8

Anhang: Erweiterte Grübchenauswertung

Tabelle 8.1 Messpunkte der Grübchenabdrücke (Teil 1). Grübchengröße in % bezogen auf eine aktive Zahnflanke. W: Welle, Gr: Grübchen-Nummer

Mio. LW	W27Gr1	W27Gr3	W28Gr1	W28Gr4	W28Gr5	W29Gr1	W29Gr2
6,25			-	0,72	-	-	0,11
6,75	-	0,65	-	0,72	-	-	0,14
7	0,32	0,72	-	-	-	-	-
7,25	1,0	0,74	-	0,77	-	-	-
7,5	1,15	0,74	-	-	-	-	-
7,75	1,15	0,77	-	1,03	-	-	-
8	-	-	-	1,06	0,76	-	-
8,25	1,46	0,77	-	1,09	-	-	0,14
8,5	-	-	-	1,19	0,76	-	-
8,75	1,53	0,8	-	-	-	0,86	0,31
9	-	-	-	1,28	0,77	-	-
9,25	1,74	0,8	-	-	-	1,7	0,81
9,5	-	-	-	1,42	1,74	2,05	0,87
9,625	-	-	-	-	-	2,3	1,01
9,75	3,5	0,91	1,22	1,67	-	2,44	1,11
10	5,58	1,0	-	-	-	3,06	1,15
10,125	-	-	1,88	1,84	2,15	-	-
10,25	6,08	2,99	-	-	-	5,2	1,35
10,375			-	-	-	6,79	1,81
10,5			2,04	1,85	-		
10,75			2,15	2,0	2,21		
11			6,74	2,15	-		

Tabelle 8.2 Messpunkte der Grübchenabdrücke (Teil 2). Grübchengröße in % bezogen auf eine aktive Zahnflanke. W: Welle, Gr: Grübchen-Nummer

Mio. LW	W36Gr1	W36Gr2	W36Gr3	W39Gr1	W39Gr3	W39Gr10
6				1,18	0,76	0,93
6,25	-	0,76	0,44	1,38	-	0,93
6,5	-	-	-	2,02	-	0,93
6,75	3,25	0,76	0,44	2,18	-	-
7	3,33	0,93	0,48	2,36	0,96	0,93
7,25	3,64	0,97	0,72	3,08	1,08	0,93
7,5	3,72	1,08	0,72	-	-	-
7,75	-	-	-	3,18	1,25	0,93
8	4,19	1,4	0,72	-	-	-
8,25	-	-	-	4,24	1,25	1,26
8,5	6,06	1,77	0,72	-	-	-
8,75	-	-	-	4,24	1,62	1,26
9	7,18	3,08	0,79	4,24	2,57	1,26
9,25	8,61	3,32	0,81	4,9	2,74	1,26

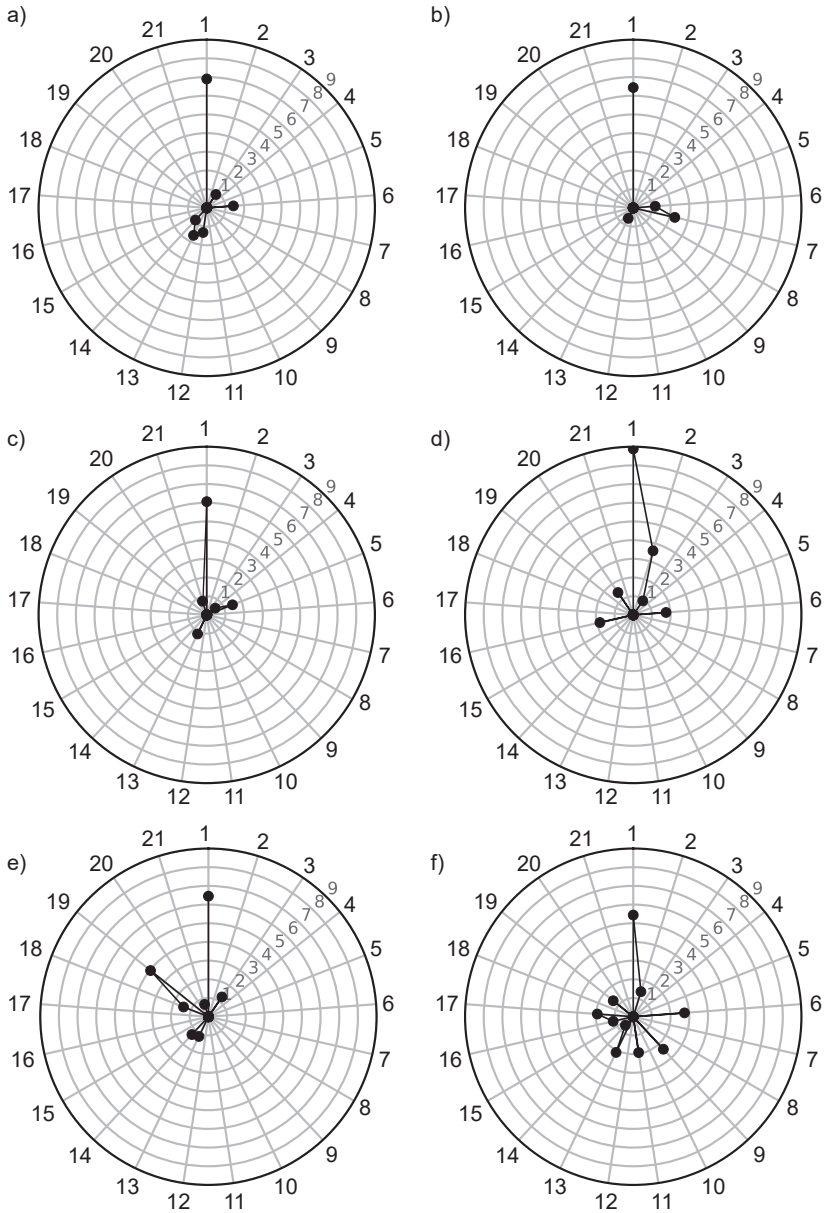


Bild 8.1 Netzdiagramme der Grübchengröße am Umfang. a) Welle 28 b) Welle 29 c) Welle 30 d) Welle 36 e) Welle 38 f) Welle 39

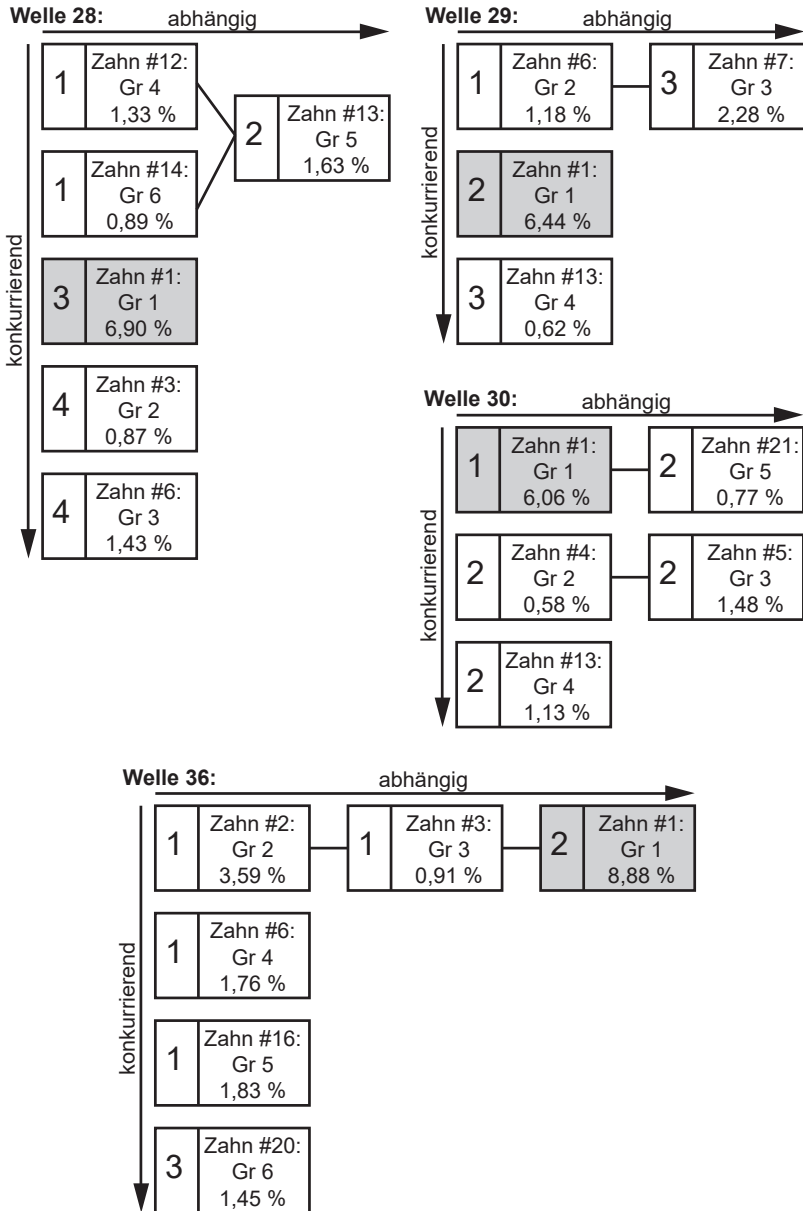


Bild 8.2 Abhängigkeitsschaubilder Teil 1

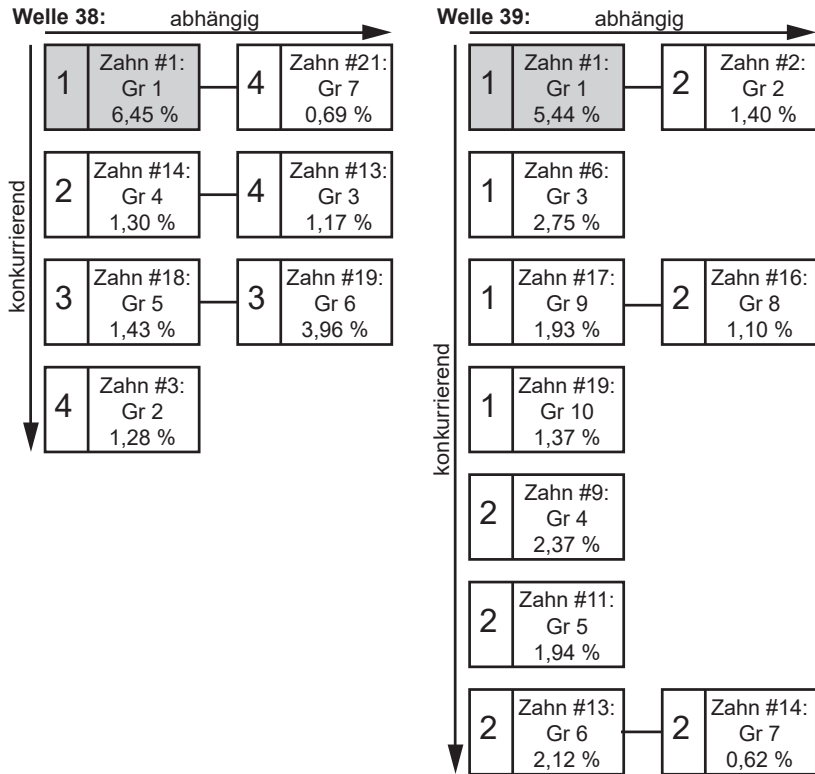


Bild 8.3 Abhängigkeitsschaubilder Teil 2

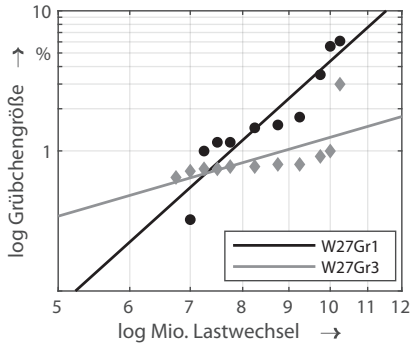


Bild 8.4 Degradationspfad und Regression im doppelt logarithmischen Diagramm: Welle 27

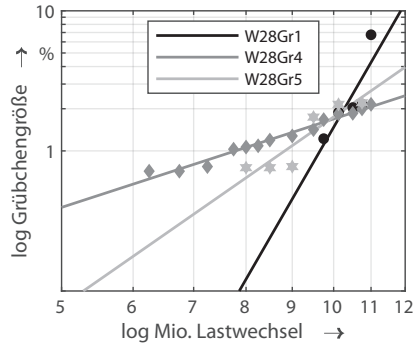


Bild 8.5 Degradationspfad und Regression im doppelt logarithmischen Diagramm: Welle 28

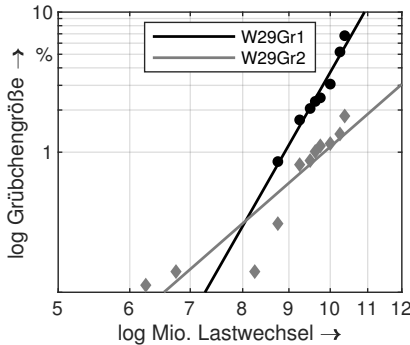


Bild 8.6 Degradationspfad und Regression im doppelt logarithmischen Diagramm: Welle 29

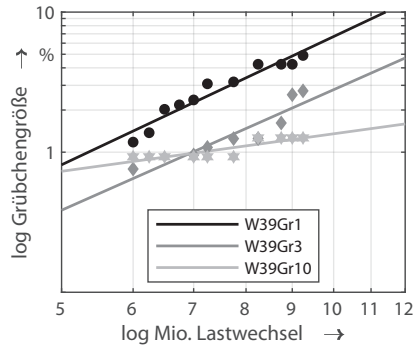


Bild 8.7 Degradationspfad und Regression im doppelt logarithmischen Diagramm: Welle 39

Tabelle 8.3 Regressionskoeffizienten und Anpassungsgüten der Degradationspfade

Welle	m	c	SSE	R^2	\bar{R}^2	RMSE
W27Gr1	5,818397389	-5,17803725	0,182080501	0,860815502	0,84341744	0,150864385
W27Gr3	1,870295675	-1,773240639	0,183604351	0,446694925	0,385216584	0,142830261
W28Gr1	11,19112454	-11,02251619	0,087266138	0,71361811	0,61815748	0,170554134
W28Gr4	2,0973126	-1,869182385	0,008896813	0,974560358	0,972440388	0,027228682
W28Gr5	4,487453335	-4,244640292	0,045190402	0,83548993	0,794362412	0,106290172
W29Gr1	11,33249704	-10,76211061	0,0201278	0,963347833	0,957239139	0,057919197
W29Gr2	5,640325899	-5,602032022	0,288386203	0,855499286	0,839443651	0,179005339
W36Gr1	3,122232357	-2,125354034	0,010827201	0,942559089	0,932985603	0,042479802
W36Gr2	4,042552716	-3,446735017	0,034687724	0,927160142	0,916754448	0,070394525
W36Gr3	1,677271041	-1,684849356	0,024131913	0,759016889	0,72459073	0,058714701
W39Gr1	3,04122496	-2,215787859	0,030239945	0,930210017	0,922455575	0,057965455
W39Gr3	2,857801605	-2,411700118	0,040531184	0,852178744	0,827541868	0,082190008
W39Gr10	0,889431135	-0,758105006	0,010642243	0,755602961	0,725053331	0,036473009

Tabelle 8.4 Grübchengrößen (a_{Gr}) am Ende der Testzeit (LW Ende) inkl. Extrapolation auf EOL

Grübchen	LW Ende in Mio.	a_{Gr} in %	EOL in Mio. LW
W27Gr1	10,25	6,02	9,12
W27Gr2	10,25	3,20	10,92
W27Gr3	10,25	3,13	10,99
W27Gr4	10,25	1,71	13,07
W28Gr1	11,05	6,90	9,46
W28Gr2	11,05	0,87	17,09
W28Gr3	11,05	1,43	14,83
W28Gr4	11,05	1,33	15,14
W28Gr5	11,05	1,63	14,28
W28Gr6	11,05	0,89	16,98
W29Gr1	10,375	6,44	9,06
W29Gr2	10,375	1,18	14,71
W29Gr3	10,375	2,28	12,18
W29Gr4	10,375	0,62	17,67
W30Gr1	10,25	6,06	9,10
W30Gr2	10,25	0,58	17,80
W30Gr3	10,25	1,48	13,62
W30Gr4	10,25	1,13	14,71
W30Gr5	10,25	0,77	16,41
W36Gr1	9,25	8,88	7,37
W36Gr2	9,25	3,59	9,54
W36Gr3	9,25	0,91	14,12
W36Gr4	9,25	1,76	11,70
W36Gr5	9,25	1,83	11,57
W36Gr6	9,25	1,45	12,36
W38Gr1	8,00	6,45	6,98
W38Gr2	8,00	1,28	11,08
W38Gr3	8,00	1,17	11,37
W38Gr4	8,00	1,30	11,03
W38Gr5	8,00	1,43	10,73
W38Gr6	8,00	3,96	8,02
W38Gr7	8,00	0,69	13,22
W39Gr1	9,25	5,44	8,47
W39Gr2	9,25	1,40	12,49
W39Gr3	9,25	2,75	10,30
W39Gr4	9,25	2,37	10,74
W39Gr5	9,25	1,94	11,37
W39Gr6	9,25	2,12	11,09
W39Gr7	9,25	0,62	15,76
W39Gr8	9,25	1,10	13,38
W39Gr9	9,25	1,93	11,39
W39Gr10	9,25	1,37	12,56

Kapitel 9

Anhang: Simulative Studie

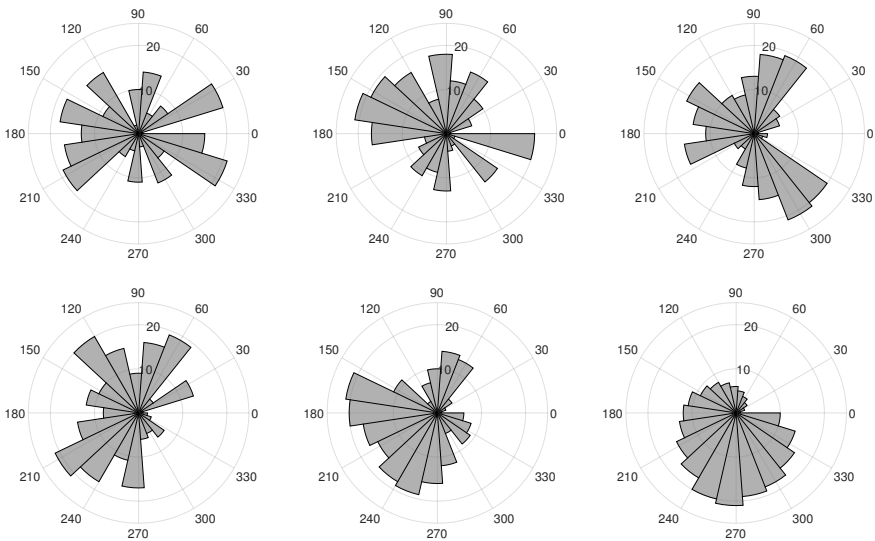


Bild 9.1 Beispielhafte Sortierung der Zufallszahlen bei unterschiedlicher Abhängigkeit. Gradzahlen entsprechen dem Umfang des Zahnrades, Länge der Strahlen geben die Höhe der Belastbarkeit der Zähne an. Von links oben nach rechts unten: 0 %, 20 %, 40 %, 60 %, 80 %, 100 % Abhängigkeit

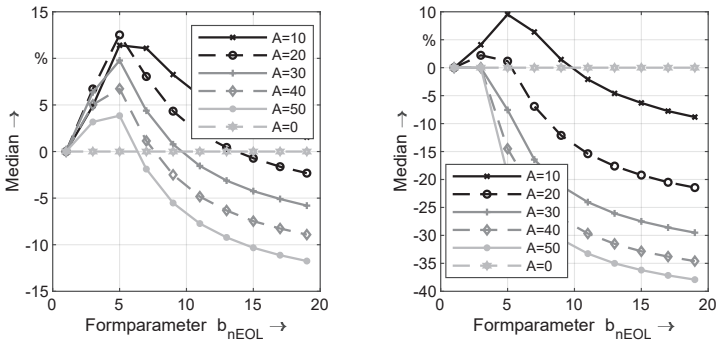


Bild 9.2 Einfluss der Streuung der Belastbarkeit b_{nEOL} . links $ES = 3$ rechts $ES = 6$

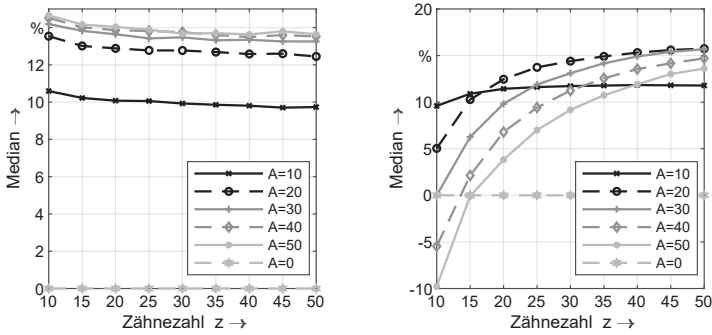


Bild 9.3 Einfluss der Zähnezahl z . links $ES = 0$ rechts $ES = 3$

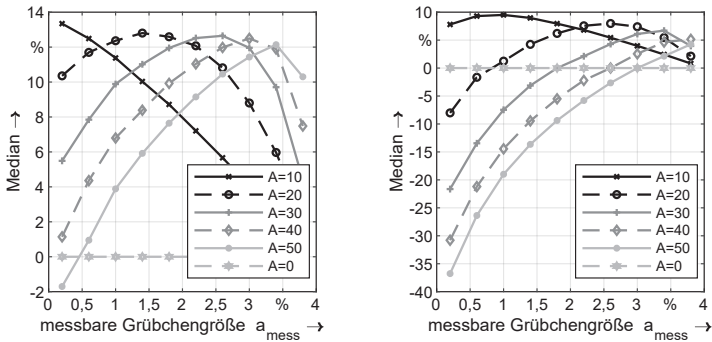


Bild 9.4 Einfluss der messbaren Grübchengröße a_{mess} . links $ES = 3$ rechts $ES = 6$

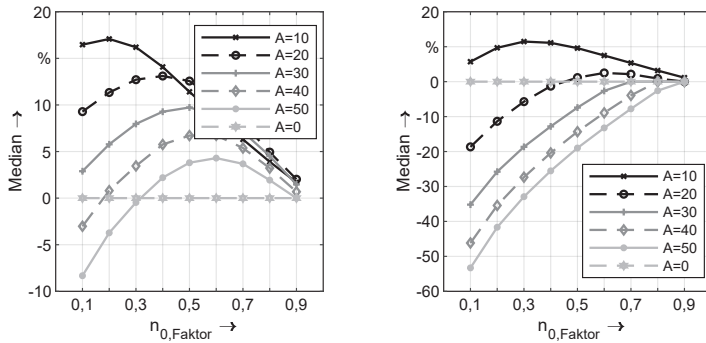


Bild 9.5 Einfluss von $n_{0,Faktor}$. links $ES = 3$ rechts $ES = 6$

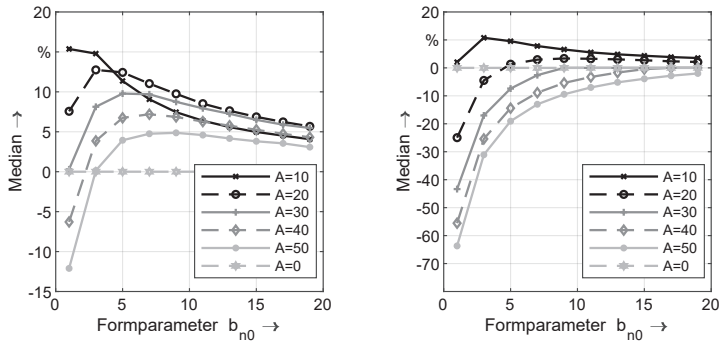


Bild 9.6 Einfluss des Initiierungszeitpunkts b_{n0} . links $ES = 3$ rechts $ES = 6$

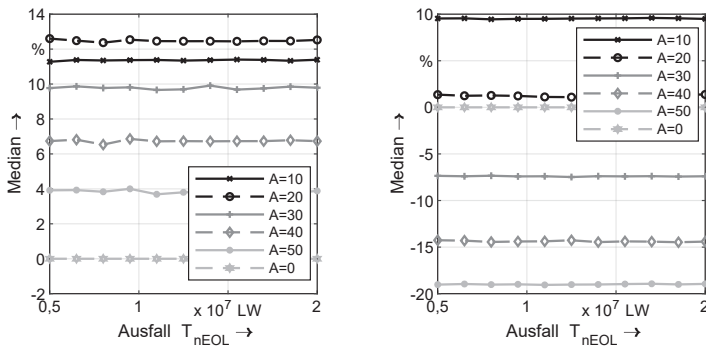


Bild 9.7 Einfluss des Ausfallzeitpunkts T_{nEOL} . links $ES = 3$ rechts $ES = 6$

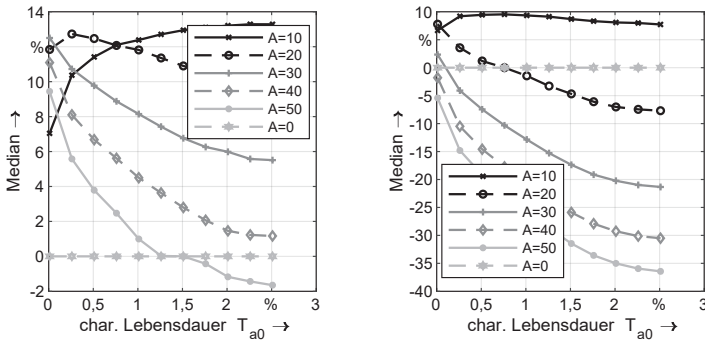


Bild 9.8 Einfluss der Initiierungsgröße T_{a0} . links $ES = 3$ rechts $ES = 6$

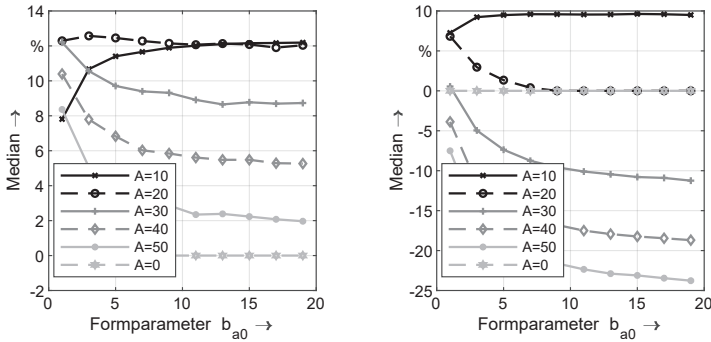


Bild 9.9 Einfluss des Formparameters der Initiierungsgröße b_{a0} . links $ES = 3$ rechts $ES = 6$

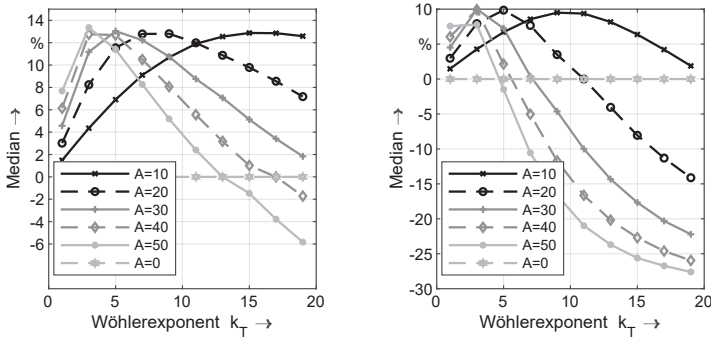


Bild 9.10 Einfluss des Wählerexponenten k_T . links $ES = 3$ rechts $ES = 6$

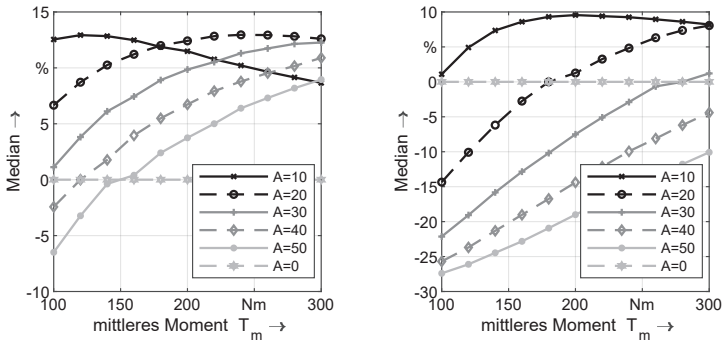


Bild 9.11 Einfluss des mittleren Moments T_m . links $ES = 3$ rechts $ES = 6$

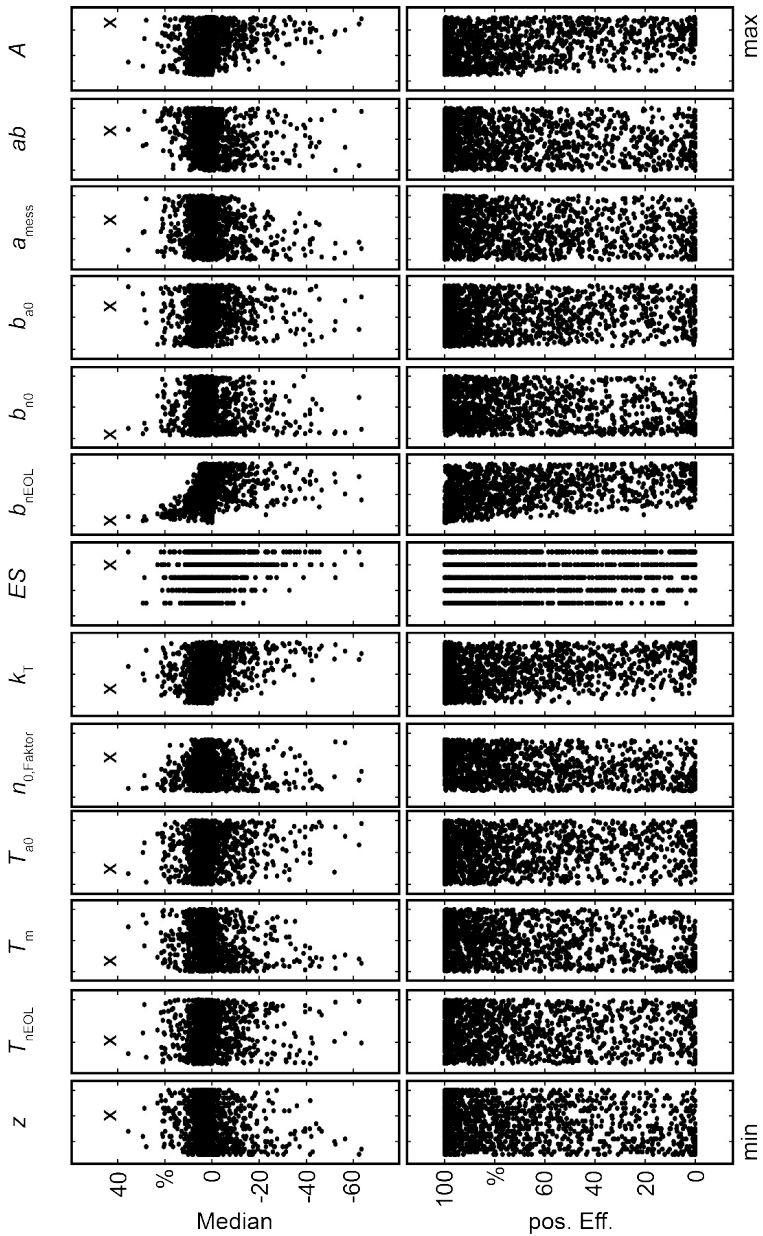


Bild 9.12 Scatterplot aller 1428 Designs der Sprungfunktionen

Liste der bisher erschienenen Berichte aus dem IMA:

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

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

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

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

Nr.	Verfasser	Titel
180	B. Heumesser	Optimierung des Klapper- und Rasselgeräuschverhaltens bei Doppelkupplungsgetrieben
181	A. Eipper	Einfluss transienter Betriebsbedingungen auf den RWDR im System Radial-Wellendichtung
182	Alexander Buck	Einfluss der Oberflächenrauheit auf den Verschleiß an Hydraulikstangendichtungen
183	Andrea Buck	Simulation und Optimierung der Instandhaltung unter Berücksichtigung sich ändernder Belastungen mittels Petrinetzen
184	St. Kemmler	Integrale Methodik zur Entwicklung von robusten, zuverlässigen Produkten
185	T. Rieker	Modellierung der Zuverlässigkeit technischer Systeme mit stochastischen Netzverfahren
186	M. Bartholdt	Kunden- und kostenorientierte Zuverlässigkeitszielermittlung
187	V. Warth	Systematische Synthese und Bewertung von Stufenlosgetrieben
188	N. Nowizki	Funktionale Sicherheit und Zuverlässigkeit in frühen Phasen der Produktentwicklung
189	F. Schiefer	Additive Fertigung von Radial-Wellendichtungen
190	M. Dazer	Zuverlässigkeitstestplanung mit Berücksichtigung von Vorwissen aus stochastischen Lebensdauerberechnungen
191	J. Totz	Funktionsuntersuchungen an Dichtsystemen mit weichgeschliffenen Dichtungsgegenauflächen und Radial-Wellendichtungen aus NBR
192	M. Stoll	Entwicklung und Funktionsanalyse rückenstrukturierter Manschettendichtringe aus PTFE-Compound
193	N. Dakov	Elastohydrodynamische Simulation von Wellendichtungen am Beispiel der PTFE-Manschettendichtung mit Rückförderstrukturen
194	Z. Beslic	Modellierung der Schadensdegradation Zahnradgrübchen bei Fahrzeuggetrieben
195	St. Jetter	Zuverlässigkeitsprognose mechanischer Komponenten auf Basis simulierter Betriebsfestigkeit
196	O. R. Orozco	Availability of Particle Accelerators: requirements, prediction methods and optimization
197	V. Schramm	Dependable System Development Methodology and Case Study for the LHC Beam Loss Monitoring System at CERN
198	J. Gröber	Zuverlässigkeitsanalyse neuartiger mechatronischer Systeme
199	K. Lucan	Methodische Ermittlung von repräsentativen Lastkollektiven am Beispiel der Nutzfahrzeugbremse
200	F. Müller	Realitätsnahe Modellierung, Simulation und Analyse der operativen Zuverlässigkeits- und Verfügbarkeitskennwerte technischer Systeme mit Vertrauensbereich
201	A. Ostertag	Zuverlässigkeit, Sicherheit und Nachhaltigkeit adaptiver Tragwerke
202	A. Kremer	Statistische Versuchsplanung in der Lebensdauererprobung mit Vertrauensintervallen
203	T. Herzig	Anforderungsgerechte Produktauslegung durch Planung effizienter beschleunigter Zuverlässigkeitstests
204	M. Henß	Methodik zur Konzeption, Analyse und Modellierung von Lösungen im Prognostics Health Management (PHM)