



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

# Ein Beitrag zur Beschreibung des Fortschrittes elektrischer Schädigung in Wälzlagern

Vom Fachbereich Maschinenbau  
an der Technischen Universität Darmstadt  
zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte

DISSERTATION

vorgelegt von

André Harder, M.Sc.

aus Dsheskasgan

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Eckhard Kirchner
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Gerhard Poll
Tag der Einreichung:	18.04.2023
Tag der mündlichen Prüfung:	04.07.2023

Darmstadt 2023

D17

Ein Beitrag zur Beschreibung des Fortschrittes elektrischer Schädigung in Wälzlagern

Genehmigte Dissertation von André Harder, M.Sc. aus Dsheskasgan

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Eckhard Kirchner

Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Gerhard Poll

Tag der Einreichung: 18.04.2023

Tag der mündlichen Prüfung: 04.07.2023

Technische Universität Darmstadt

Darmstadt 2023 – D17

Bitte zitieren Sie dieses Dokument als:

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-243607

URL: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/24360>

Dieses Dokument wird bereitgestellt von TUprints,

E-Publishing-Service der TU Darmstadt

<http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de>

[tuprints@ulb.tu-darmstadt.de](mailto:tuprints@ulb.tu-darmstadt.de)

Die Veröffentlichung steht unter folgender Creative Commons Lizenz:

CC BY 4.0



<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

---

## Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit, abgesehen von den in ihr ausdrücklich genannten Hilfen, selbstständig verfasst habe.

Darmstadt, den 18.04.2023



---

André Harder



---

## Vorwort

Die folgende Arbeit entstand während meiner vierjährigen Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet für Produktentwicklung und Maschinenelemente (pmd) der Technischen Universität Darmstadt.

An dieser Stelle möchte ich mich zuerst bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Eckhard Kirchner bedanken. Beginnend bei meinem Einstellungsgespräch war die Zusammenarbeit mit Ihnen immer geprägt von einem offenen Austausch sowie von einem mir entgegengebrachten Vertrauen und der daraus resultierenden Freiheit, die mir während meiner Arbeit gewährt wurde. Daran konnten weder der eine oder andere geschlagene Haken bei der Wahl meines Forschungsthemas noch eine zerstörte Prüfkammer etwas ändern. Die gemeinsame Arbeit mit Ihnen hat zu meiner fachlichen und persönlichen Weiterentwicklung beigetragen.

Herr Prof. Dr.-Ing. Gerhard Poll, Leiter des Instituts für Maschinenkonstruktion und Tribologie (IMKT) an der Leibniz Universität Hannover, danke ich für die Bereitschaft zur Übernahme meines Korreferates. Der fachliche Austausch mit Ihnen während der STLE 2022 in Orlando hat mir bei der inhaltlichen Schärfung meiner Arbeit geholfen.

Ein großes Dankeschön gilt allen aktuellen und ehemaligen Kolleginnen und Kollegen, mit denen ich in meiner Zeit am pmd zusammenarbeiten durfte. Danke für die spannenden fachlichen Diskussionen, für eure Anregungen und Anmerkungen und Hilfe - aber auch Danke für jedes Freitagsfrühstück, für jedes Teamevent und für jede Apfel- und Kaffeepause. Ein besonderer Dank gilt dabei meinem langjährigen Bürokollegen und gutem Freund Herrn Dr.-Ing. Marcel Neu. Vom ersten Arbeitstag bis zum letzten Korrekturlesen warst du immer für mich und meine großen und kleinen Probleme da und hast mir immer geholfen, eine Lösung für diese zu finden. Es war mir eine Freude mit dir und mit euch allen zusammenzuarbeiten.

Während meiner Zeit am pmd durfte ich mehrere Studierende im Rahmen von Abschlussarbeiten sowie als HiWis betreuen. Stellvertretend dafür möchte ich den Herren Lukas Piske und Quentin Koplin danken, eure Unterstützung hat einen wichtigen Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Stellvertretend danke ich Herrn Alexander Terwort für die Korrektur dieser Arbeit.

Meiner Familie und meinen Freunden danke ich für die Unterstützung, den Rückhalt und die Ermutigung. Mein größter und wichtigster Dank gilt meiner Freundin Christine. Du hast mir immer Kraft gegeben, mich ermuntert und Nachsicht mit mir gehabt. Danke für deine unglaubliche Unterstützung.

Darmstadt, April 2023

André Harder



---

## Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	XVI
Abstract.....	XVII
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation .....	1
1.2 Ziel der Arbeit.....	3
1.3 Aufbau der Arbeit .....	3
<b>2 Stand der Forschung .....</b>	<b>5</b>
2.1 Grundlagen elektrischer Lagerschädigung .....	5
2.1.1 Lagerströme in elektrischen Antriebsmaschinen.....	5
2.1.2 Elektrische Eigenschaften von Wälzlagern .....	7
2.1.3 Elektrische Schmierstoffeigenschaften .....	10
2.1.4 Abhilfemaßnahmen.....	10
2.2 Analyse elektrischer Lagerschädigung.....	11
2.2.1 Charakterisierung elektrischer Lagerschäden .....	12
2.2.2 Beschreibung der Auftretenswahrscheinlichkeit elektrischer Lagerschäden .....	13
2.3 Methoden der Zustandsüberwachung von Wälzlagern.....	17
2.3.1 Vibrationsmessung.....	17
2.3.2 Charakteristische Kenngrößen der Zustandsüberwachung .....	19
2.3.3 Maschinelles Lernen in der Zustandsüberwachung von Wälzlagern ....	19
2.3.4 Messung der elektrischen Impedanz.....	20
2.4 Forschungsbedarf.....	21
<b>3 Forschungsdesign .....</b>	<b>23</b>
3.1 Zielsetzung .....	23
3.2 Forschungsfragen.....	24
<b>4 Werkzeuge und Methoden der Versuchsdurchführung und Datenauswertung</b>	<b>27</b>
4.1 Wälzlagerprüfstand.....	27
4.1.1 Funktionsweise .....	28
4.1.2 Elektrischer Prüfstandsaufbau.....	29
4.2 Weißlichtinterferometer.....	32
4.3 Statistische Grundlagen .....	33
4.3.1 Skalenniveaus .....	34
4.3.2 Lagemaße .....	35
4.3.3 Streuungs- und Schiefemaße.....	37
4.4 Methoden der Versuchsplanung und Datenauswertung .....	39
4.4.1 Korrelationsanalyse.....	39
4.4.2 Hauptkomponentenanalyse.....	41

---

4.4.3	Statistische Versuchsplanung und Effektanalyse .....	42
4.4.4	Varianzanalyse .....	43
4.5	Grundlagen der Oberflächenanalyse .....	45
4.5.1	Ordnung der Formabweichung .....	45
4.5.2	Bezeichnung der verwendeten Oberflächeneigenschaften .....	47
<b>5</b>	<b>Experimentelle Untersuchungen .....</b>	<b>49</b>
5.1	Versuchsplanung .....	49
5.1.1	Definition der Versuchsfaktoren und Versuchsparameter .....	49
5.1.2	Versuchsplanung .....	52
5.1.3	Versuchsablauf .....	53
5.2	Versuchsergebnisse .....	55
<b>6</b>	<b>Identifikation geeigneter Laufbahneigenschaften zur Quantifizierung elektrischer Lagerschäden .....</b>	<b>63</b>
6.1	Studie zur Charakterisierung des Oberflächenzustandes .....	63
6.1.1	Aufbau und Durchführung der Studie .....	63
6.1.2	Studienergebnisse .....	65
6.2	Anforderungsermittlung .....	72
6.3	Untersuchung der Oberflächeneigenschaften elektrisch geschädigter Wälzlagerlaufbahnen .....	74
6.3.1	Untersuchung von Verteilung und Ausreißern in den ermittelten Eigenschaften .....	74
6.3.2	Untersuchung der Korrelation der Oberflächeneigenschaften mit der bewerteten Schädigung .....	76
6.3.3	Untersuchung der Identifikation von Riffeln .....	77
6.3.4	Untersuchung der Schwankung der Oberflächeneigenschaften .....	79
6.3.5	Untersuchung der Korrelation zwischen Betrag und Schwankung der Oberflächeneigenschaft .....	81
6.3.6	Bewertung der Anforderungserfüllung und Definition von kritischen Grenzwerten .....	83
6.4	Diskussion .....	88
6.4.1	Diskussion der Eignung unterschiedlicher Oberflächeneigenschaften ..	88
6.4.2	Diskussion des Vergleichs mit Literaturwerten .....	90
6.4.3	Bewertung der Ergebnisse .....	91
<b>7</b>	<b>Untersuchung des Fortschritts elektrischer Lagerschädigung infolge der wirkenden mechanischen und elektrischen Lasten .....</b>	<b>93</b>
7.1	Definition der zeitlichen Änderung der Schädigung .....	93
7.1.1	Hauptkomponentenanalyse .....	93
7.1.2	Beschreibung der zeitlichen Änderungsrate .....	95



---

7.2	Der Effekt der untersuchten Faktoren auf die zeitliche Änderung der Oberflächenschädigung.....	98
7.2.1	Effektanalyse.....	99
7.2.2	Varianzanalyse.....	102
7.2.3	Modellverifizierung.....	105
7.3	Untersuchung der zweiten Hauptkomponente .....	109
7.4	Untersuchung der Wechselwirkung der Schädigungsrate mit den elektrischen Betriebsgrößen im Wälzlager .....	110
7.4.1	Wechselwirkung der Schädigungsrate mit der Spannung und dem Strom am Wälzlager.....	111
7.4.2	Wechselwirkung der Schädigungsrate mit den Kenngrößen elektrischer Lagerschädigung .....	114
7.4.3	Wechselwirkung der Schädigungsrate mit der Lagerimpedanz.....	116
7.5	Diskussion.....	117
7.5.1	Diskussion der Definition der Schädigungsrate .....	117
7.5.2	Diskussion des Effektes der Betriebsparameter auf die Schädigungsrate .....	118
7.5.3	Bewertung der Ergebnisse.....	119
<b>8</b>	<b>Zustandsüberwachung der elektrischen Lagerschädigung mithilfe hochfrequenter Vibrationsmessung.....</b>	<b>121</b>
8.1	Definition der untersuchten Features der Vibrationsmessung .....	121
8.1.1	Beschreibung der verwendeten Versuchsdaten.....	121
8.1.2	Kenngrößen im Zeitbereich.....	121
8.1.3	Kenngrößen im Frequenzbereich .....	122
8.1.4	Kenngrößen der Hüllkurve.....	123
8.1.5	Kenngrößen innerhalb einzelner Frequenzbänder.....	124
8.2	Featureauswahl.....	124
8.2.1	Identifikation und Zusammenfassung redundanter Feature .....	125
8.2.2	Analyse der Korrelation zwischen den Features und der mittleren arithmetischen Rauheit .....	126
8.2.3	Hauptkomponentenanalyse der Vibrationsfeatures .....	127
8.2.4	Identifikation der relevanten Features mithilfe des “RreliefF” Algorithmus .....	130
8.3	Modellierung der elektrischen Lagerschädigung in Abhängigkeit der Kenngrößen der Vibrationsmessung mittels künstlicher neuronaler Netze ....	132
8.3.1	Aufbau des künstlichen neuronalen Netzes .....	132
8.3.2	Ergebnisse.....	134
8.4	Diskussion und Bewertung der Ergebnisse .....	136

---

<b>9 Zusammenfassung &amp; Ausblick</b> .....	<b>139</b>
9.1 Zusammenfassung .....	139
9.2 Ausblick .....	140
<b>Anhang</b> .....	<b>XVII</b>
A1 Charakteristische Kenngrößen (Features) im Zeitbereich.....	XVII
A2 Charakteristische Kenngrößen (Features) im Frequenzbereich .....	XXI
A3 Daten Axialrillenkugellager 51305.....	XXIII
A4 Daten FVA Versuchsöl Nr.3 .....	XXIV
A5 Definierte Oberflächeneigenschaften .....	XXV
A6 Kennwerte des Axialrillenkugellagers 51305 im Betrieb .....	XXVII
A7 Versuchsplan.....	XXVIII
A8 Ergebnisse der Studie zur Bewertung der elektrischen Lagerschäden auf der Wälzlagerlaufbahnoberfläche.....	XXIX
A9 Unabhängige Features .....	XXXII
A10 Trainiertes Künstliches Neuronales Netz .....	XXXV
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>XLI</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>XLV</b>
<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>XLVI</b>
<b>Eigene Veröffentlichungen</b> .....	<b>LVII</b>
<b>Betreute studentische Arbeiten</b> .....	<b>LIX</b>

---

## Abkürzungsverzeichnis

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
ANOVA	Analysis of Variance (Varianzanalyse)
CCD	Charged Coupled Device
CM	Common Mode
DIN	Deutsches Institut für Normung
EDM	electric discharge machining
EHD	Elasto-hydrodynamisch
EN	Europäische Norm
FVA	Forschungsvereinigung Antriebstechnik
ISO	Internationale Organisation für Normung
KNN	Künstliches neuronales Netz
max	Maximum
min	Minimum
Pkw	Personenkraftwagen
pk-pk	Peak to peak (Spannweite)
pmd	Fachgebiet für Produktentwicklung und Maschinenelemente
RMS	Root-Mean-Square (Effektivwert)
WLI	Weißlichtinterferometer

---

## Symbolverzeichnis

### Basissystem

Die erste Spalte der folgenden Liste zeigt die im Text verwendeten Symbole für die auftretenden physikalischen und mathematischen Größen. In der zweiten Zeile wird die Bedeutung des Symbols beschrieben. Die Dimensionsformel jeder Größe ist als Potenzprodukt der Basisgrößen Länge (L), Masse (M), Zeit (T), Temperatur ( $\Theta$ ), Stoffmenge (N), Strom (I) und Lichtstärke (J) in der dritten Spalte angegeben.

Der Übersicht halber werden die genutzten Oberflächeneigenschaften und Features der Vibrationsmessung nicht im Symbolverzeichnis aufgeführt. Diese können in Anhang A1, A2 und A5 nachgeschlagen werden.

### Lateinische Symbole

Symbol	Bedeutung	Dimension
$A_{\text{Hz}}$	Hertz'sche Kontaktfläche	$L^2$
$a_1$	Faktor für Ausfallwahrscheinlichkeit	1
$a_{\text{ax}}$	Axiale Beschleunigung	$L \cdot T^{-2}$
$a_{\text{ISO}}$	Kombinierter Faktor der Lagerlebensdauer	1
$a_{\text{rad}}$	Radiale Beschleunigung	$L \cdot T^{-2}$
$C$	Dynamische Tragfähigkeit	$L \cdot M \cdot T^{-2}$
$C_{\text{Hz}}$	Elektrische Kapazität der Hertz'schen Kontaktfläche	$L^{-2} \cdot M^{-1} \cdot T^4 \cdot I^2$
$C_L$	Elektrische Kapazität des Wälzlagers	$L^{-2} \cdot M^{-1} \cdot T^4 \cdot I^2$
$C_{\text{RS}}$	Elektrische Kapazität zwischen Rotor und Stator	$L^{-2} \cdot M^{-1} \cdot T^4 \cdot I^2$
$C_{\text{WR}}$	Elektrische Kapazität zwischen Wicklung und Rotor	$L^{-2} \cdot M^{-1} \cdot T^4 \cdot I^2$
$C_{\text{WS}}$	Elektrische Kapazität zwischen Wicklung und Stator	$L^{-2} \cdot M^{-1} \cdot T^4 \cdot I^2$
$D_i$	Cook-Abstand	1
$DF$	Anzahl der Freiheitsgrade	1
$d_e$	Energie eines Durchschlags	$L^2 \cdot M \cdot T^{-2}$
$E_x$	Effekt von x	$L \cdot T^{-1}$
$E_{\text{Krit}}$	Elektrische Durchschlagsfestigkeit	$L \cdot M \cdot T^{-3} \cdot I^{-1}$
$F$	Beispielhafter Faktor	1
$\tilde{F}$	Beispielhafter dimensionsloser Faktor	1

---

$F_{Ax}$	Axiale Last	$L \cdot M \cdot T^{-2}$
$F_{Rad}$	Radiale Last	$L \cdot M \cdot T^{-2}$
$f$	$f$ -Quotient	1
$f_{el}$	Frequenz elektrische Wechselspannung	$T^{-1}$
$f_{mess}$	Messfrequenz Vibrationsmessung	$T^{-1}$
$f_s$	Schaltfrequenz	$T^{-1}$
$HK_j$	$j$ -te Hauptkomponente Oberflächeneigenschaften	1
$h(x)$	Verteilungsfunktion von $x$	1
$h_0$	Mittlere Schmierfilmhöhe	L
$h_{min}$	Minimale Schmierfilmhöhe	L
$I_L$	Lagerstrom	I
$\hat{J}_L$	Elektrische Lagerstromdichte	$L^{-2} \cdot I$
$k_x$	Kurtosis von $x$	1
$L_{EDM,d}$	Elektrische Lagerlebensdauer	T
$L_{el}$	Elektrische Lagerlebensdauer	1
$L_{na}$	Erweiterte Lagerlebensdauer	1
$MS$	Verhältnis von Varianz zu Freiheitsgraden	1
$m_E$	Anzahl Neuronen pro Ebene des KNN	1
$N$	Zählvariable	1
$N_{Aus}$	Element der Auswertereihenfolge	1
$N_{EDM}$	Anzahl elektrischer Durchschläge	1
$N_{WK}$	Anzahl Wälzkörper	1
$n$	Wellendrehzahl	$T^{-1}$
$n_i$	Drehzahl Wellenring	$T^{-1}$
$n_m$	Drehzahl Käfig	$T^{-1}$
$n_o$	Drehzahl Gehäuse ring	$T^{-1}$
$P$	Dynamische Lagerbelastung	$L \cdot M \cdot T^{-2}$
$P( )$	Wahrscheinlichkeit	1
$p$	Exponent der Lebensdauergleichung	1
$Q_\psi$	Wälzkörperlast	$L \cdot M \cdot T^{-2}$

---

$q_x$	Quartilsabstand von $x$	1
$R$	Elektrischer Widerstand	$L^2 \cdot M \cdot T^{-3} \cdot I^{-2}$
$R_L$	Elektrischer Widerstand des Lagers	$L^2 \cdot M \cdot T^{-3} \cdot I^{-2}$
$RMSE$	Approximationsfehler	L
$RMSE_\sigma$	Quadratischer Mittelwert des Messfehlers	L
$r_{x,y}$	Korrelationskoeffizient zwischen $x$ und $y$	1
$s_x$	Schiefe von $x$	1
$\hat{S}_L$	Scheinbare Lagerleistung	$L^2 \cdot M \cdot T^{-3}$
$SK$	Schadensklasse	1
$SSB_i$	Varianz verursacht durch Faktor $i$	1
$SSW$	Restvarianz	1
$\hat{s}_L$	Scheinbare Lagerleistungsdichte	$M \cdot T^{-3}$
$s_x$	Schwankung von $x$	1
$T$	Antriebsdrehmoment	$L^2 \cdot M \cdot T^{-2}$
$TSS$	Gesamtvarianz (Total Sum of Squares)	1
$t$	Zeit	T
$t_{\text{dam}}$	Schädigungsdauer	T
$\hat{U}$	Amplitude der elektrischen Spannung	$L^2 \cdot M \cdot T^{-3} \cdot I^{-1}$
$U_{\text{CM}}$	Common-Mode-Spannung	$L^2 \cdot M \cdot T^{-3} \cdot I^{-1}$
$U_{\text{Krit}}$	Durchschlagsspannung	$L^2 \cdot M \cdot T^{-3} \cdot I^{-1}$
$U_L$	Lagerspannung	$L^2 \cdot M \cdot T^{-3} \cdot I^{-1}$
$VK_j$	$j$ -te Hauptkomponente Vibration	1
$x$	Skalare Größe	1
$x_S$	Standardisierte Skalare Größe	1
$Z_{\text{Iso}}$	Elektrische Impedanz der Isolation	$L^2 \cdot M \cdot T^{-3} \cdot I^{-2}$
$Z_L$	Elektrische Impedanz des Lagers	$L^2 \cdot M \cdot T^{-3} \cdot I^{-2}$

---

## Griechische Buchstaben

Symbol	Bedeutung	Dimension
$\alpha_T$	Korrekturfaktor Temperatur	1
$\varepsilon$	Elektrische Permittivität	$L^3 \cdot M^{-1} \cdot T^{-4} \cdot I^2$
$\vartheta$	Temperatur	T
$\lambda$	Eigenwert	1
$\lambda_c$	Filter Übergang Welligkeit-Rauheit	L
$\lambda_f$	Filter Welligkeit zu längeren Wellenlängen	L
$\lambda_{\text{Krit}}$	Kritischer Eigenwert	1
$\lambda_s$	Filter Rauheit zu kürzeren Wellenlängen	L
$\rho$	spezifischer elektrischer Widerstand	$L^3 \cdot M \cdot T^{-3} \cdot I^{-2}$
$\sigma_x$	Standardabweichung von $x$	1

---

## Kurzfassung

Elektrische Schäden in Wälzlagern sind eine häufige Ausfallursache elektrischer Antriebsmaschinen. Sie entstehen infolge von Potentialdifferenzen zwischen den stehenden und rotierenden Elementen des Lagers. Diese führen zu elektrischen Entladungen im Wälzkontakt, welche die Oberflächen der Wälzelemente sowie den Schmierstoff dazwischen schädigen und somit einen frühzeitigen Lagerausfall verursachen können. Obwohl das Phänomen seit Beginn des 20. Jahrhunderts bekannt ist, gibt es bisher keine ganzheitliche Beschreibung der Lebensdauer von Lagern bei elektrischer Last.

Der in dieser Arbeit verfolgte Ansatz, einer solchen Beschreibung näher zu kommen, zielt darauf ab, eine Schädigungsskala zu definieren, die eine quantifizierbare Beschreibung des Schädigungszustandes der Lageroberfläche ermöglicht. Zunächst werden im Rahmen einer Versuchsreihe 16 Lager bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen elektrisch geschädigt und dabei wird in regelmäßigen Abständen der Zustand der Laufbahnoberfläche erfasst.

Von diesen Versuchsdaten ausgehend wird im ersten Schritt die elektrische Schädigung mithilfe einer komparativen Schädigungsskala bewertet. Darauf aufbauend werden Anforderungen an eine Schädigungsskala formuliert, die nicht nur eine qualitative oder komparative, sondern vor allem eine quantitative Bewertung elektrischer Lagerschädigung ermöglicht. Anschließend werden 45 unterschiedliche standardisierte Oberflächeneigenschaften auf ihre Eignung geprüft. Davon erfüllen 12 Oberflächeneigenschaften alle Anforderungen und können somit für eine Quantifizierung der Schädigung verwendet werden. Für diese Eigenschaften wird jeweils ein kritischer Grenzwert definiert.

Im zweiten Schritt wird gezeigt, dass anhand der quantitativen Schädigungsskala die zeitliche Änderung der Schädigung infolge elektrischer Last beschrieben werden kann. Damit wird der Effekt der unterschiedlichen Betriebsbedingungen sowie deren Wechselwirkungen auf die zeitliche Änderung der Schädigung untersucht. Es zeigt sich, dass der Schädigungsfortschritt mit der Schmierfilmdicke im Wälzkontakt zunimmt.

Im letzten Schritt wird gezeigt, dass die Quantifizierung des Schädigungszustandes mithilfe künstlicher neuronaler Netze auf Basis von Vibrationsdaten im Betrieb möglich ist. Dazu werden aus den Daten der Vibrationsmessung charakteristische Kennwerte (Features) abgeleitet. Diese Features werden zunächst selektiert, um redundante Features zu reduzieren. Anschließend wird mit 15 der 16 Versuchsdaten das neuronale Netz trainiert und die Funktionalität mit dem übrigen Datensatz validiert. Die Genauigkeit des erstellten Vorhersagemodells liegt im Rahmen der Varianz der Schädigung auf der Laufbahnoberfläche.

Basierend auf den in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnissen lassen sich weitere Untersuchungen durchführen, mit dem Ziel, die Lebensdauer von Wälzlagern unter elektrischer Last ganzheitlich zu beschreiben. Ansätze für derlei Untersuchungen werden am Ende dieser Arbeit gegeben.



---

## Abstract

Electrical damages in rolling bearings are a common cause of failure in electrical machines. They occur as a result of potential differences between the stationary and rotating elements of the bearing. These lead to electrical discharges in the rolling contact, which damage the surfaces of the rolling elements as well as the lubricant in between and thus cause premature bearing failure. Although the phenomenon has been known since the beginning of the 20th century, there is no holistic description of the lifetime of rolling bearings under electric load yet.

The approach followed in this work to get closer to such a description aims at defining a damage scale that allows a quantification of the damage state on the bearing surface. Therefore, 16 bearings are electrically damaged under different operating conditions in a series of tests and the condition of the raceway surface is measured at regular intervals.

Based on these test data, the electrical damage is evaluated in a first step using a comparative damage scale. Based on this evaluation, requirements are formulated for a damage scale that allows not only a qualitative or comparative, but above all a quantitative evaluation of the electrical bearing damage. Subsequently, 45 different standardized surface properties are tested for their suitability. Of these, 12 surface properties meet all the requirements and can thus be used to quantify the damage. A critical limit is defined for each of these properties.

In the second step, it is shown that the quantitative damage scale can be used to describe the change in electrical damage over time. Thus, the effect of the different operating conditions and their interactions on the temporal change of the damage is investigated. It is shown that the damage progress increases with the lubricant film thickness in the rolling contact.

In the last step, the quantification of the damage state with an artificial neural network trained with vibration data is shown. For this purpose, characteristic features are derived from the vibration measurement data. These features are first selected to reduce redundant features. Subsequently, the neural network is trained with 15 of the 16 test data and the functionality is validated with the remaining data set afterwards. The accuracy of the created prediction model is within the variance of the damage on the raceway surface.

Based on the knowledge gained in this work, further investigations can be carried out with the aim of a holistic description of the lifetime of rolling bearings under electrical load. Approaches for such investigations are given in an outlook at the end of this work.



---

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Mehrere Staaten der Europäischen Union, sowie weitere Länder wie Chile oder Singapur, die zusammen etwa 25% des globalen Pkw-Marktes ausmachen, haben sich zum Ziel gesetzt, ab dem Jahre 2035 nur noch emissionsfreie Fahrzeuge zuzulassen<sup>1</sup>. Auch andere Länder wie die Vereinigten Staaten von Amerika oder China, die kein solches Ziel ausgesprochen haben, setzen Maßnahmen zur Förderung emissionsfreier Fahrzeuge um<sup>2</sup>. Unter emissionsfreien Fahrzeugen werden dabei batterie- und brennstoffzellenbetriebene Elektrofahrzeuge sowie Plug-In Hybride verstanden. Diese Fahrzeuge eint, dass sie mindestens einen Elektromotor im Antriebsstrang verwenden<sup>3</sup>. Schäden an den Wälzlager des Elektromotors sind dabei eine der häufigsten Ursachen für deren Ausfall<sup>4</sup>. Eine häufige Form von Schäden sind insbesondere im Kontext elektrischer Motoren und Antriebsmaschinen elektrische Lagerschäden. Diese werden durch einen durch Potentialdifferenzen zwischen Stator und Rotor des Elektromotors induzierten elektrischen Stromdurchschlag im Lager verursacht und schädigen die Wälzlageroberflächen und den Schmierstoff. In Abbildung 1-1 sind zwei Beispiele elektrischer Oberflächenschäden auf dem Außenring eines Wälzlagers zu sehen. Abbildung 1-1a) zeigt Kraterschäden und Abbildung 1-1b) zeigt Riffelschäden. Kraterschäden sind oftmals eine Vorstufe von Riffelschäden<sup>5</sup>. Für die Lebensdauer von Lagern werden daher vor allem Riffelschäden als kritisch betrachtet.

Ein beachtlicher Teil der Forschung und Entwicklung im Bereich elektrischer Lagerschäden widmet sich den Abhilfemaßnahmen, die verwendet werden können, um das Auftreten elektrischer Ströme zu vermeiden<sup>6</sup>. Solche sind bspw. elektrisch isolierende Lager mit keramischen Wälzkörpern (Hybridlager), leitende Dichtungen oder leitende Schmierstoffe. Jedoch bedarf der Einsatz solcher Maßnahmen einer genauen elektrischen Modellierung der elektrischen Antriebsmaschine sowie aller mit ihr elektrisch kontaktierten Systeme (bspw. das Getriebe), da der falsche Einsatz solcher Maßnahmen die elektrischen Ströme nicht verhindern, sondern lediglich durch andere Komponenten leiten und diese damit schädigen kann<sup>7</sup>. Zudem verursachen solche Maßnahmen zusätzliche Kosten und

---

<sup>1</sup> Bibra et al. (2022) S.55ff.

<sup>2</sup> Bibra et al. (2022) S.55.

<sup>3</sup> Yang et al. (2016) S.16ff.

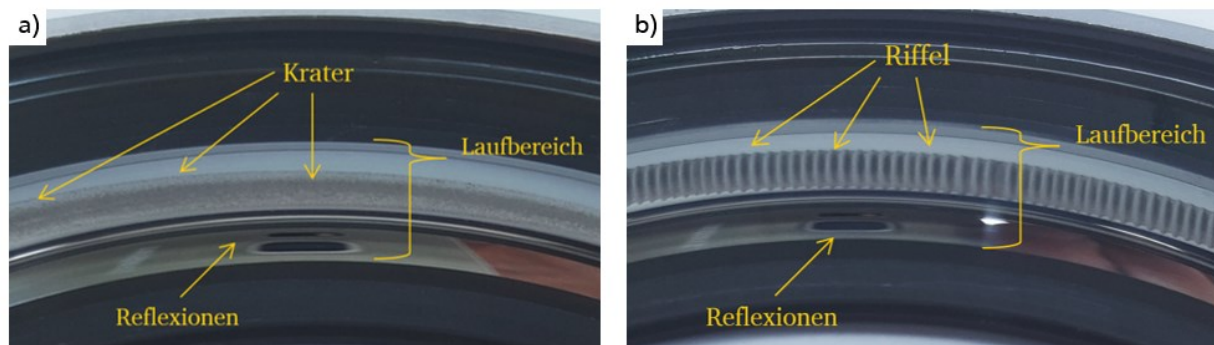
<sup>4</sup> Nandi et al. (2005) S.720.

<sup>5</sup> Tischmacher (2018) S.20.

<sup>6</sup> Mütze (2011) S.385.

<sup>7</sup> Schneider et al. (2022b) S.7.

benötigen zusätzlichen Bauraum. Beides sind kritische Kenngrößen in der Antriebsstrangentwicklung<sup>8</sup>. Um die Notwendigkeit und Wirksamkeit dieser Abhilfemaßnahmen zu beurteilen, ist eine Beschreibung der Lagerlebensdauer von Wälzlagern unter mechanischer und elektrischer Last notwendig.



**Abbildung 1-1:** a) Wälzlageraußenring mit Kratern; b) Wälzlageraußenring mit Riffel.  
Quelle: Piske (2020) S.18f.

Die erweiterte Lebensdauer von Wälzlagern unter mechanischer Last wird berechnet mithilfe von

$$L_{na} = a_1 \cdot a_{ISO} \cdot \left(\frac{C}{P}\right)^p, \quad 1.1$$

wobei  $L_{na}$  in  $10^6$  Umdrehungen angegeben wird<sup>9</sup>. Die zulässige Ausfallwahrscheinlichkeit wird über den Faktor  $a_1$  dargestellt, Lagertyp und Lagergröße gehen in die dynamische Tragfähigkeit  $C$  ein, der Exponent der Lebensdauergleichung  $p$  beschreibt den Effekt unterschiedlicher Wälzkörperformen und die am Lager anliegende mechanische Last wird über die dynamische Lagerbelastung  $P$  berücksichtigt. Der Faktor  $a_{ISO}$  fasst die Verschmutzung und die Viskosität des Schmierstoffs sowie die Ermüdungsgrenzbelastung des Wälzlagereisens zusammen. Der Einfluss elektrischer Ströme auf die Lebensdauer des Wälzlagers wird in Gleichung 1.1 nicht abgebildet. Eine ganzheitliche Beschreibung der Lagerlebensdauer unter elektrischer Last ist nicht bekannt<sup>10</sup>. Eine verwendete Kenngröße zur Beschreibung elektrischer Lagerschädigung ist beispielsweise die elektrische Lagerstromdichte  $\hat{J}_L$ , welche den Lagerstrom auf die Hertz'sche Kontaktfläche des Wälzlagers bezieht. Mithilfe dieser kann ein Grenzwert für einen sicheren Einsatzbereich definiert

<sup>8</sup> Vgl. Kirchner (2007).

<sup>9</sup> Sauer (2018) S.174.

<sup>10</sup> Harder et al. (2022) S.1.; Schneider et al. (2022c) S.88ff.

---

werden, in dem keine Riffelbildung zu erwarten ist, sowie Grenzwerte, ab denen kritische Lagerschädigung wahrscheinlich ist. Jedoch zeigt sich, dass diese Grenzwerte abhängig von der auftretenden Lagerstromart unterschiedliche Werte annehmen und somit nicht allgemein angewendet werden können<sup>11</sup>. Unabhängig von der Lagerstromart entspricht die vollständige Vermeidung elektrischer Lagerschädigung einer dauerfesten Auslegung der Lager im Sinne der Produktentwicklung hinsichtlich des betrachteten Schadensfalls<sup>12</sup>. Für eine zeitfeste Auslegung, welche oftmals kostengünstigere Lösungen aufgrund geringerer Anforderungen an das Produkt ermöglicht, reicht die Aussage *ob* elektrische Lagerschäden entstehen nicht aus. Es ist dafür notwendig abschätzen zu können, *wann* diese Schäden kritisch werden und zu einem Ausfall der Lager und damit der elektrischen Antriebsmaschine führen. Für die Durchführung einer solchen Abschätzung bedarf es einer Quantifizierung des Schädigungszustandes.

## 1.2 Ziel der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist es, eine metrische Skala auf Basis der optischen Untersuchung der geschädigten Wälzlageroberflächen zu erstellen, mit der eine Quantifizierung des Schädigungszustandes möglich ist. Damit ist es zum einen möglich, einen kritischen Schädigungszustand zu definieren. Zum anderen lässt sich anhand einer solchen Skala die zeitliche Änderung der Schädigung beschreiben und deren Abhängigkeit von Betriebszustand untersuchen. Darüber hinaus wird gezeigt, dass es möglich ist, mithilfe der Vibrationsmessung und einer auf Basis künstlicher neuronaler Netze entwickelten Modellierung den vorhandenen Schädigungszustand im Betrieb zu approximieren. Ein objektiv definierter kritischer Grenzwert, eine Beschreibung der zeitlichen Änderung der Schädigung sowie die Überwachung des Schädigungszustands im Betrieb sind die Grundlagen für die Entwicklung eines Modells, mit dessen Hilfe der Lagerausfall infolge elektrischer Schädigung beschrieben werden kann. Diese Arbeit liefert somit einen Grundstein für die Entwicklung eines Lebensdauermodells für Wälzlager unter elektrischer Last.

## 1.3 Aufbau der Arbeit

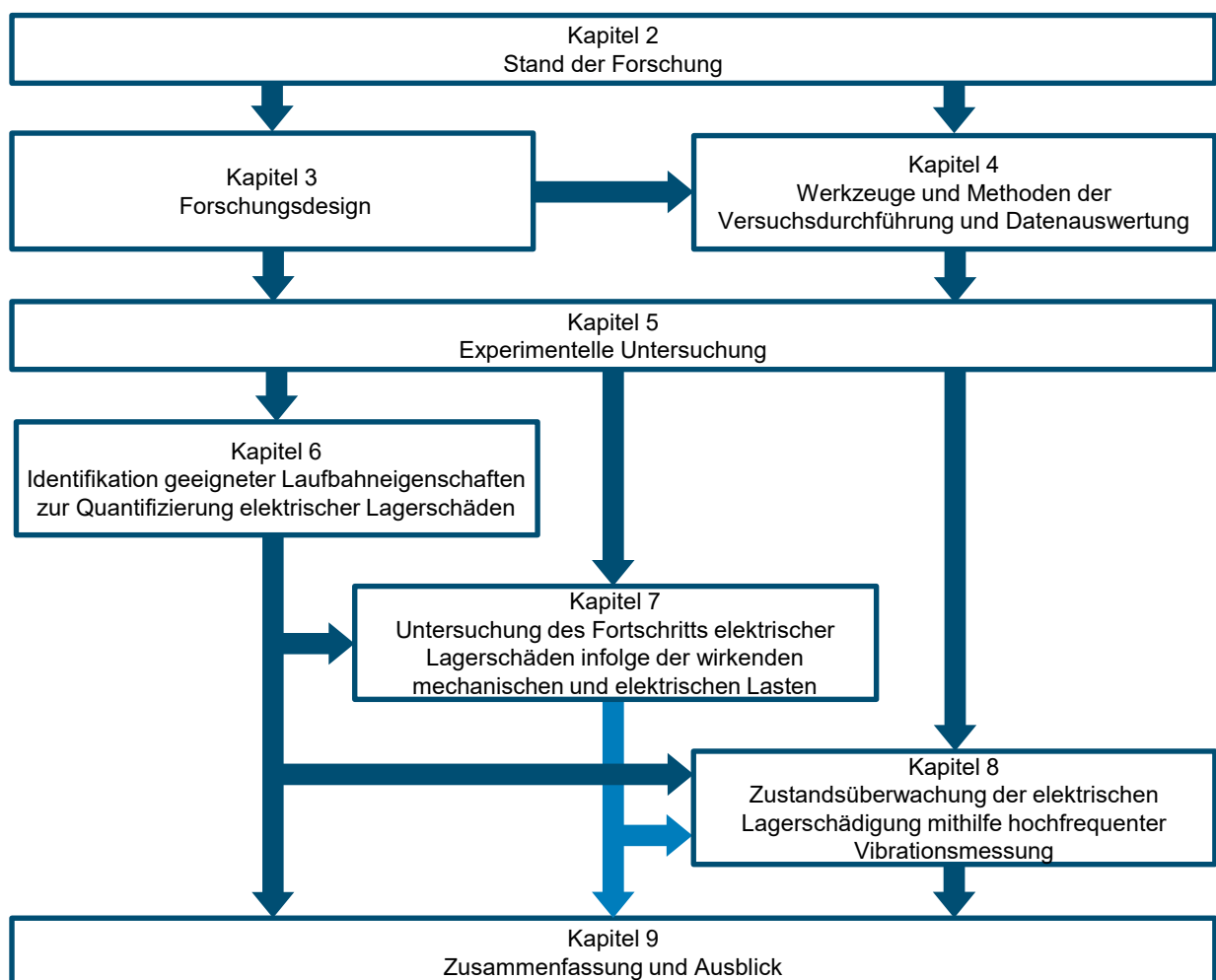
Die Arbeit folgt der in Abbildung 1-2 dargestellten Struktur. Zunächst wird in Kapitel 2 der Stand der Forschung zum Thema elektrischer Lagerschäden, deren Ursachen, Beschreibungsmodellen und deren Überwachung im Betrieb zusammengefasst. Daraus wird der Bedarf an weiterer Forschung ermittelt. Anschließend wird in Kapitel 3 aus dem vorab ermittelten Forschungsbedarf eine Forschungslücke identifiziert, die im weiteren Verlauf der Arbeit geschlossen werden soll. Dazu werden Forschungshypothesen aufgestellt und

---

<sup>11</sup> Weicker und Binder (2022) S.787.

<sup>12</sup> Bender und Gericke (2021) S.569.

die sich daraus ergebenden Forschungsfragen formuliert. In Kapitel 4 werden die im Rahmen dieser Arbeit verwendete Prüf- und Messtechnik vorgestellt. Darüber hinaus werden in dem Kapitel die Grundlagen der statistischen Datenauswertung sowie der Oberflächenuntersuchung vorgestellt, die im weiteren Verlauf der Arbeit angewendet werden. In Kapitel 5 wird der Aufbau der durchgeführten Versuche beschrieben. Anschließend werden die dabei erhobenen Versuchsdaten exemplarisch vorgestellt. In den Kapiteln 6,7 und 8 werden die Versuchsdaten ausgewertet, mit dem Ziel die formulierten Forschungsfragen zu untersuchen und zu beantworten. Jedes der Kapitel ist dabei jeweils einer Forschungsfrage gewidmet. Schließlich werden in Kapitel 9 die im Rahmen dieser Arbeit erhobenen Ergebnisse zusammengefasst und darauf aufbauend ein Ausblick für weitere Forschungsarbeiten gegeben.



**Abbildung 1-2:** Struktureller Aufbau der Arbeit.

## 2 Stand der Forschung

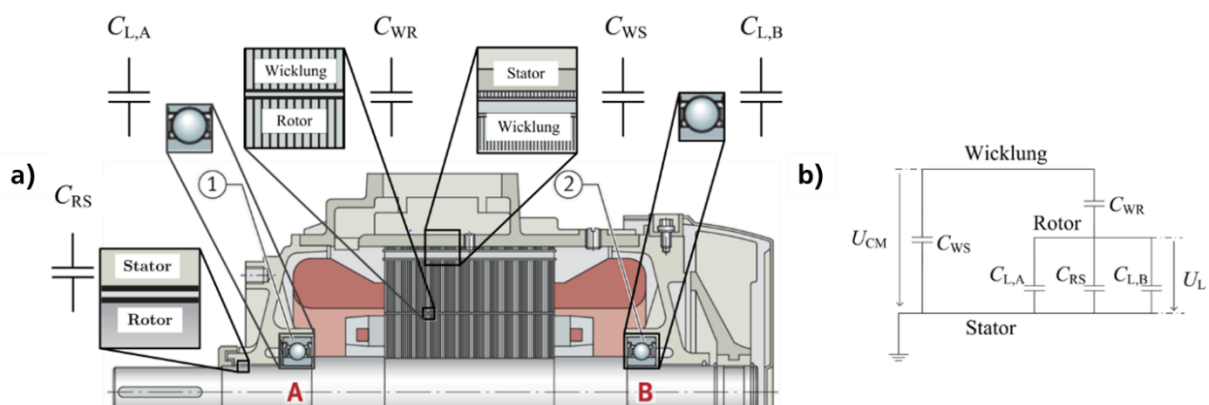
Dieses Kapitel gibt einen Überblick zum Stand der Forschung im Themengebiet elektrischer Lagerschäden, deren Ursachen und Beschreibungsweisen und deren Überwachung. Auf Basis dieses Überblicks wird ein Bedarf an weiteren Untersuchungen abgeleitet, welcher die Grundlage der Untersuchungen in den folgenden Kapiteln bildet.

### 2.1 Grundlagen elektrischer Lagerschädigung

Zunächst werden in diesem Abschnitt die elektrischen Lagerströme als Ursache elektrischer Lagerschäden vorgestellt. Anschließend werden die elektrischen Eigenschaften des Wälzlagers sowie des Schmierstoffes beschrieben, da diese einen maßgeblichen Einfluss auf die Entstehung elektrischer Lagerschäden ausüben. Zuletzt werden übliche Abhilfemaßnahmen diskutiert, die zur Reduzierung oder Vermeidung elektrischer Lagerschäden verwendet werden.

#### 2.1.1 Lagerströme in elektrischen Antriebsmaschinen

Elektrische Lagerschäden sind überwiegend aus der Anwendung in elektrischen Motoren und Generatoren bekannt<sup>13</sup>. In Abbildung 2-1a) ist eine Schnittansicht eines Drehstrommotors dargestellt. Es ist erkennbar, dass die Lager in diesem jeweils eine Kapazität  $C_{L,A}$  und  $C_{L,B}$  darstellen. Die Spalte zwischen der Wicklung und dem Stator  $C_{WS}$ , der Wicklung und dem Rotor  $C_{WR}$  sowie zwischen Rotor und Stator  $C_{RS}$  stellen ebenfalls je eine Kapazität dar. Damit lässt sich das in Abbildung 2-1b) dargestellte elektrische Ersatzschaltbild des Drehstrommotors erstellen.



**Abbildung 2-1:** a) Schnittansicht eines Drehstrommotors mit Motorkapazitäten, b) Elektrisches Ersatzschaltbild des Drehstrommotors

Quelle: Bechev (2020) S.4, nach Muetze (2004) und Radnai (2016)

<sup>13</sup> Vgl. Alger und Samson (1924) und Kohaut (1943).

---

Elektrische Lagerschäden sind immer auf elektrische Ströme zurückzuführen, welche das Lager passieren und es dadurch schädigen. In Abhängigkeit der konkreten Motorgestaltung können unterschiedliche Ursachen für das Entstehen elektrischer Lagerströme verantwortlich sein. Es wird zwischen verschiedenen Lagerströmen unterschieden. Zunächst gibt es die „klassischen“ Lagerströme, welche vor allem infolge magnetischer Asymmetrien in elektrischen Maschinen entstehen<sup>14</sup>. Darüber hinaus wird in umrichter gespeisten Antriebsmaschinen zusätzlich zwischen EDM Strömen (electric discharge machining), Rotor-Erd-Strömen und Zirkularströmen differenziert<sup>15</sup>. Diese werden im Folgenden kurz beschrieben.

Elektrostatische Entladeströme (engl. electrostatic discharges) werden durch die Steuer- spannung des Elektromotors (Common Mode Spannung)  $U_{CM}$  verursacht<sup>16</sup>. In Abbildung 2-2a) ist der zeitliche Verlauf der Common Mode Spannung, der Lagerspannung  $U_L$  und des Lagerstromes  $I_L$  zu sehen. Es ist erkennbar, dass die Lagerspannung zunächst proportional zur Common Mode Spannung ansteigt. Zum Zeitpunkt der Entladung übersteigt die am Lager anliegende Spannung den Maximalwert, der von Schmierfilm im Lager isoliert werden kann. Es entsteht ein Funkendurchschlag ähnlich zur Funkenerosion<sup>17</sup>, durch den sich alle zum Lager parallel geschalteten Kondensatoren entladen. Dadurch sinkt die Spannung am Lager ab. Angelehnt an die Funkenerosion als Fertigungsprozess wird dieser Strom in der Literatur üblicherweise als EDM-Strom bezeichnet.

Rotor-Erd-Ströme entstehen in elektrischen Antriebsmaschinen, in denen der Rotor über die angetriebenen Komponenten geerdet ist<sup>18</sup>. In Abbildung 2-2b) ist der Verlauf der Common Mode Spannung, der Lagerspannung und des Lagerstromes dargestellt. Es ist erkennbar, dass mit dem Anstieg der Common Mode Spannung eine Potentialdifferenz am Lager anliegt. Im Gegensatz zum EDM Verlauf ist diese jedoch nicht proportional zur Common Mode Spannung. Mit der Spannung am Lager geht ein phasengleicher Lagerstrom einher, der über einen deutlich längeren Zeitraum fließt als bei EDM Strömen.

Durch hohe zeitliche Änderungen  $dU_{CM}/dt$  der Motorsteuerspannung entsteht ein Strom zwischen der Wicklung und dem Stator<sup>19</sup>. Dieser Strom induziert einen magnetischen

---

<sup>14</sup> Alger und Samson (1924) S.236ff.; Costello (1993) S.423ff.

<sup>15</sup> Muetze (2004) S.10ff.

<sup>16</sup> Chen et al. (1996) S.26.

<sup>17</sup> vgl. Klocke und König (2006) S.3ff.

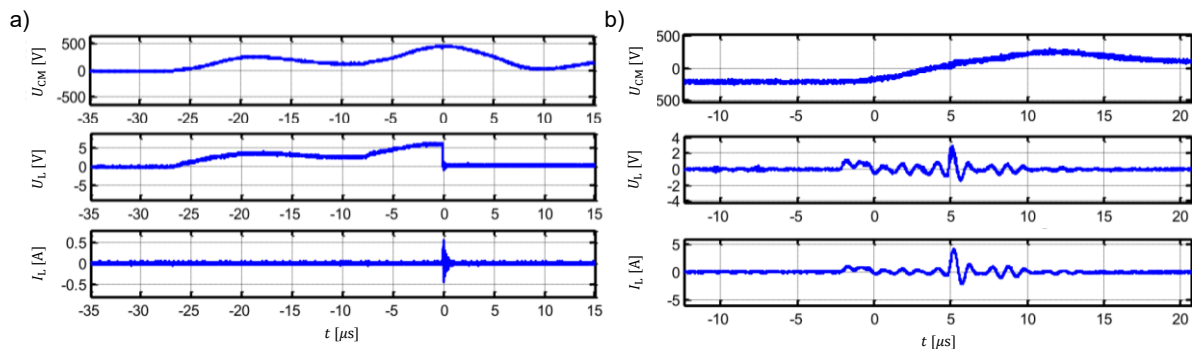
<sup>18</sup> Muetze (2004) S.14.

<sup>19</sup> Muetze (2004) S.11.



Fluss um die Welle herum, welcher wieder einen zirkularen Strom zwischen Welle und Stator bedingt. Dieser Strom wird Zirkularstrom genannt und passiert beide Lager<sup>20</sup>.

Welcher der genannten Effekte auftritt und ob die dadurch auftretenden Ströme die Lebensdauer des Lagers verringern, hängt maßgeblich von der Gestaltung des Motors sowie des verwendeten Umrichters, vom elektrischen Anschluss zwischen Umrichter und Motor und von den an den Motor gekoppelten mechanischen Bauteile ab<sup>21</sup>.



**Abbildung 2-2:** Verlauf der Common Mode Spannung, der Lagerspannung und des Lagerstromes bei a) EDM Strömen; b) Rotor-Erd-Strömen.  
Quelle: Radnai et al. (2015) S.5f, überarbeitet.

## 2.1.2 Elektrische Eigenschaften von Wälzlager

Das Wälzlager lässt sich im elektrotechnischen Sinne als eine Kombination elektrischer Impedanzen beschreiben<sup>22</sup>. Dabei stellen alle Kontaktflächen zwischen zwei Wälzpartnern jeweils eine Einzelimpedanz dar. Die Impedanz jedes Kontaktes verändert sich maßgeblich mit der Schmierfilmdicke und der Größe der Kontaktfläche<sup>23</sup>. In Abbildung 2-3 sind mögliche Zustände in der Kontaktzone dargestellt. Wenn sich kein durchgehender Schmierfilm bildet und es zu metallischen Kontakten zwischen den Wälzflächen kommt, verhält sich der der Wälzkontakt wie ein Ohm'scher Widerstand  $R_p$ . Wenn die Schmierfilmhöhe so hoch ist, dass die anliegende Spannung die Durchschlagsspannung des Schmierstoffs nicht überschreitet, wirkt er isolierend, und kann als eine Parallelschaltung aus Kondensator  $C_{p,EHD}$  und Widerstand  $R_{p,EHD}$  beschrieben werden. Der parallelgeschaltete Widerstand ist

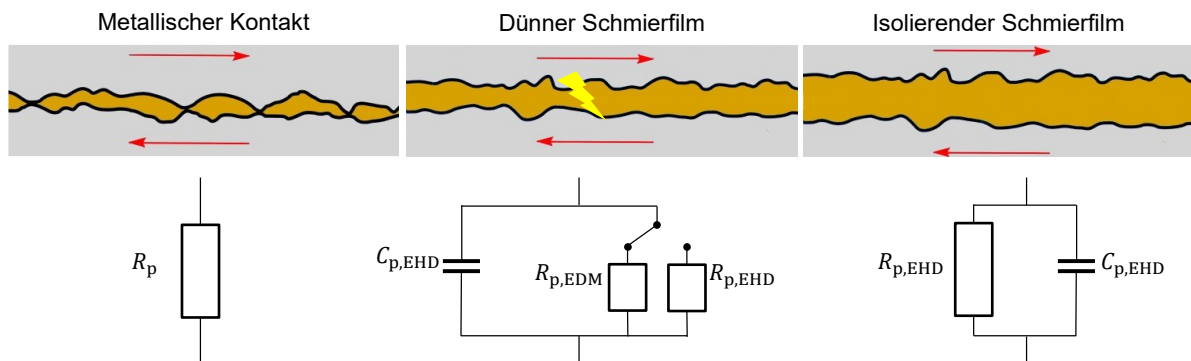
<sup>20</sup> Vgl. Hausberg und Seinsch (2000).

<sup>21</sup> Muetze (2004) S.107ff; Schneider et al. (2022b) S.7.

<sup>22</sup> Prashad (2005) S.128.

<sup>23</sup> Gemeinder (2016) S.131ff.

dabei vom spezifischen Widerstand  $\rho$  des Schmierstoffs abhängig und ist üblicherweise ausreichend hoch, damit ein überwiegend kapazitives Verhalten vorhanden ist<sup>24</sup>. Im Übergangsbereich kann eine ausreichend hohe Spannung dazu führen, dass es zu einem elektrischen Durchschlag kommt<sup>25</sup>. Bei einem Durchschlag verändert sich der Widerstand des Schmierfilms, wodurch Strom durch das Lager fließen kann. Dies wird über eine Schaltung der beiden Widerstände  $R_{p,EHD}$  und  $R_{p,EDM}$  modelliert.



**Abbildung 2-3:** Elektrisches Modell des EHD-Kontakts in Abhängigkeit der Schmierfilmdicke. Quelle: Martin (2021) S.9, nach Gemeinder (2016) S.131ff.

Im Bereich der Vollschrimerung kann die elektrische Kapazität eines Einzelkontaktes  $C_{p,EHD}$  in ihrer einfachsten Form als ein Kondensator  $C_{Hz}$  beschrieben werden, der durch die Hertz'sche Kontaktfläche  $A_{Hz}$  und die mittlere Schmierfilmdicke  $h_0$

$$C_{Hz} = \varepsilon \frac{A_{Hz}}{h_0}, \quad 2.1$$

berechnet werden kann. Dabei ist  $\varepsilon$  die Permittivität des Schmierfilms. Diese Modellierung wird von mehreren Autoren erweitert, um die elektrische Kapazität der Bereiche außerhalb der Lastzone mithilfe konstanter oder variabler Korrekturfaktoren zu beschreiben<sup>26</sup>. Ergänzend zu der Kapazität der Hertz'schen Kontaktfläche muss die Kapazität der Randbereiche sowie der unbelasteten Wälzkörper berücksichtigt werden<sup>27</sup>. Um eine Berücksichtigung von Oberflächenabweichungen in der Berechnung elektrischer Kapazitäten zu ermöglichen, sind zudem numerische Ansätze zur Simulation des elektro-thermo-elasto-hydrodynamischen Zustandes im Wälzkontakt bekannt<sup>28</sup>.

<sup>24</sup> Spikes (2020) S.90.

<sup>25</sup> Gemeinder (2016) S.131ff.

<sup>26</sup> Vgl. Barz (1996) S.105ff; Magdun und Binder (2009) S.1053ff; Wittek (2017) S.71ff und Furtmann (2017) S.129ff.

<sup>27</sup> Schirra et al. (2021) S.2f.

<sup>28</sup> Vgl. Neu et al. (2022).

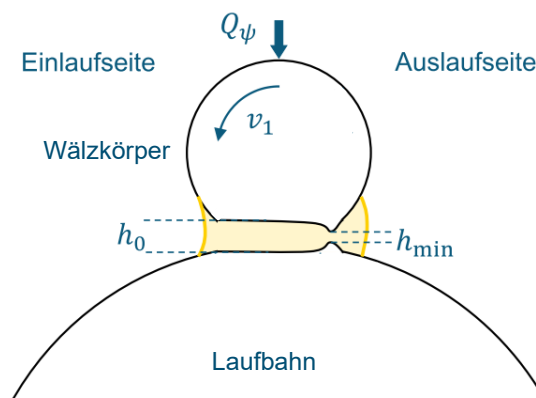
Die Schmierfilmhöhe zwischen den Wälzkontakten hat einen zentralen Einfluss auf die elektrischen Eigenschaften des Wälzlagers. Zum einen verändert diese die elektrische Kapazität des Wälzkontaktes nach Gleichung 2.1. Zum anderen beeinflusst diese die maximale Spannung, die auf einem Lager wirken kann, bevor ein elektrischer Durchschlag entsteht. Dieser Zusammenhang berechnet sich zu

$$U_{\text{krit}} = E_{\text{krit}} \cdot h_{\text{min}} \cdot \quad 2.2$$

Dabei ist  $E_{\text{krit}}$  die Durchschlagsfestigkeit der Schmierstoffs, ab der ein elektrischer Durchschlag stattfindet und  $h_{\text{min}}$  ist die minimale Schmierfilmdicke des Wälzkontaktes.

Es ist zwischen der mittleren Schmierfilmhöhe  $h_0$  und der minimalen Schmierfilmhöhe  $h_{\text{min}}$  zu unterscheiden, da diese nicht notwendigerweise gleich sind. In Abbildung 2-4 ist der Schmierfilm zwischen einem Wälzkörper und der Laufbahn dargestellt. Der Wälzkörper wird mit der Wälzkörperlast  $Q_\psi$  belastet und rollt mit der Geschwindigkeit  $v_1$  auf der Laufbahn ab. Die Kontaktfläche wird infolge der wirkenden Last elastisch deformiert. An der Auslaufseite entsteht ein Abfall der Last und damit des Druckes im Schmierfilm, was zu einer Reduktion des Schmierfilms auf  $h_{\text{min}}$  führt<sup>29</sup>.

Die Berechnung beider Schmierfilmhöhen erfolgt in Abhängigkeit der Wälzkörperlast, der Kontaktgeometrie, der Werkstoffpaarung, der Abrollgeschwindigkeit, der Betriebstemperatur und der Schmierfilmviskosität, eine Übersicht unterschiedlicher Berechnungsverfahren ist von MARIAN ET AL. gegeben<sup>30</sup>.



**Abbildung 2-4:** Schmierfilm bei elasto-hydrodynamischer Schmierung.  
Quelle: Schirra (2021) S.17, überarbeitet, nach Dahlke (1994) S.403.

<sup>29</sup> Dahlke (1994) S.403.

<sup>30</sup> Vgl. Marian et al. (2020).

---

### 2.1.3 Elektrische Schmierstoffeigenschaften

Das elektrische Verhalten des Schmierfilms ist im Wesentlichen auf die elektrische Permittivität  $\epsilon$ , den spezifischen Widerstand  $\rho$  und die Durchschlagsfeldstärke  $E_{\text{Krit}}$  des Schmierstoffs zurückzuführen. Diese sind abhängig vom Betriebszustand, in dem der Schmierstoff verwendet wird, wie der Betriebstemperatur<sup>31</sup> oder dem Betriebsdruck<sup>32</sup>. Zudem hängen die elektrischen Eigenschaften des Schmierstoffes von der Zusammensetzung des verwendeten Basisöles oder der hinzugegebenen Additive ab<sup>33</sup>. Darüber hinaus kann infolge der elektrischen Durchschläge eine chemische Reaktion entstehen, durch welche sich die chemische Zusammensetzung des Schmierstoffes und damit auch dessen tribologische und elektrische Eigenschaften im Verlauf der Einsatzzeit verändern können<sup>34</sup>. Dieser Effekt zeigt sich üblicherweise durch verbrannten Schmierstoff, wie in Abbildung 2-5 dargestellt. Schließlich können durch den elektrischen Durchschlag Metallpartikel aus den Oberflächen des Wälzlagers abgelöst und vom Schmierstoff mitgetragen werden, wodurch diese im Schmierfilm einen Kurzschluss erzeugen können und damit dessen elektrisches Verhalten beeinflussen<sup>35</sup>.



**Abbildung 2-5:** Schmierstoff vor (links) und nach (rechts) elektrischen Durchschlägen.  
Quelle: Schneider et al. (2022a) S.4. © 2022 MDPI

### 2.1.4 Abhilfemaßnahmen

In der Auslegung elektrischer Antriebsmaschinen gibt es unterschiedliche Möglichkeiten, die Auftretenswahrscheinlichkeit elektrischer Lagerschäden zu reduzieren. So können La-

---

<sup>31</sup> Spikes (2020) S.90; Bechev et al. (2020) S.26f.

<sup>32</sup> Bechev et al. (2020) S.23.

<sup>33</sup> Spikes (2020) S.90f.

<sup>34</sup> Bechev et al. (2020) S.61 und S.77; Liu (2014) S.122.

<sup>35</sup> Bechev et al. (2020) S.77.

---

ger aus isolierenden Keramikwerkstoffen sowie hybride Lager mit Wälzkörpern aus Keramik und Lagerringen aus Stahl elektrische Lagerschäden vermeiden<sup>36</sup>. Auch eine parallel zu den Lagern angeordnete elektrische Leitung zwischen Welle und Gehäuse, die mithilfe von Schleifkontakten oder elektrisch leitenden Dichtungen und Schmierstoffen realisiert werden kann, kann elektrische Lagerschäden reduzieren<sup>37</sup>. Zudem kann durch eine Reduzierung der Schaltfrequenz, durch Verwendung geschirmter Kabel und durch Verwendung von elektrischen Signalfiltern die Schädigung vermieden, reduziert oder verschoben werden<sup>38</sup>.

Allerdings ist bei der Verwendung von Abhilfemaßnahmen zu berücksichtigen, dass bspw. die Isolation eines Lagers den Stromfluss nicht vollständig aufhebt, sondern ggf. diesen nur in ein anderes Lager verlagert. Dadurch kann bspw. ein Lager im an den Elektromotor angeschlossenen Getriebe elektrisch geschädigt werden<sup>39</sup>. Zudem können bspw. leitende Elemente wie Schleifkontakte zwar mögliche EDM-Ströme verhindern, jedoch dafür die Wahrscheinlichkeit schädigender Zirkularströme erhöhen<sup>40</sup>. Somit erfordert der Einsatz von Abhilfemaßnahmen elektrischer Lagerschäden in der Auslegung des elektrischen Antriebsstrangs eine Berücksichtigung nicht nur des elektrischen Verhaltens der Antriebsmaschine, sondern potenziell des gesamten Antriebsstrangs und die auftretenden elektrischen Lagerströme<sup>41</sup>.

## 2.2 Analyse elektrischer Lagerschädigung

Dieser Abschnitt betrachtet unterschiedliche Ansätze der Analyse elektrischer Lagerschäden. Zunächst werden dabei die in der Literatur verwendeten Charakterisierungen elektrischer Lagerschäden beschrieben. Anschließend werden unterschiedliche Kenngrößen und Modelle vorgestellt, welche die Auftretenswahrscheinlichkeit elektrischer Lagerschädigung beschreiben.

---

<sup>36</sup> Huan et al. (2022) S.10356.

<sup>37</sup> Vgl. Muetze und Oh (2008).

<sup>38</sup> Muetze (2004) S.174.

<sup>39</sup> Schneider et al. (2022a) S.7.

<sup>40</sup> Schiferl und Melfi (2004) S.48 und Modi (2022) S.12.

<sup>41</sup> Schneider et al. (2022a) S.7.

## 2.2.1 Charakterisierung elektrischer Lagerschäden

Typischerweise werden elektrische Lagerschäden kategorisch unterteilt in Krater und Riffel (vgl. Abbildung 1-1)<sup>42</sup>. Dabei führen Krater zu keiner Verkürzung der Lagerlebensdauer, während Riffel einen vorzeitigen Ausfall der Lager bedingen<sup>43</sup>. In einzelnen Veröffentlichungen werden Riffelschäden subjektiv weiter unterteilt in leichte, mittlere und schwere Riffelschäden<sup>44</sup>. TISCHMACHER stellt eine differenzierte Schädigungsskala (vgl. Abbildung 2-6) vor, welche ebenfalls die Riffel weiter unterteilt, indem den einzelnen Schadenszuständen eine Schadensklasse zugeordnet wird<sup>45</sup>. Schadensklasse 0 stellt dabei die nicht schädlichen Krater dar, die Schadensklassen 1 und 2 zeigen deutlichere Kraterspuren und die Schadensklassen 3 und 4 zeigen unterschiedlich stark ausgeprägte Riffelschäden. Schadensklasse 5 zeigt letztlich Ermüdungsschäden, die infolge der Riffel entstehen. Die Schadensklassen 1 bis 5 stellen einen kontinuierlichen Schädigungsfortschritt elektrischer Lagerschädigung dar<sup>46</sup>.



**Abbildung 2-6:** Unterschiedliche Stadien der elektrischen Lagerschädigung.  
Quelle: Tischmacher (2018) S.20; © 2018 IEEE.

Darüber hinaus werden in Veröffentlichungen zur Untersuchung elektrischer Lagerschäden oft unterschiedliche Oberflächeneigenschaften als Vergleichsgröße angegeben<sup>47</sup>. Dazu

<sup>42</sup> Schaeffler Technologies AG & Co. KG (2000) S.38.

<sup>43</sup> Vgl. Muetze et al. (2004).

<sup>44</sup> Muetze et al. (2004) S.1991 oder Collin et al. (2022) S.2.

<sup>45</sup> Tischmacher (2018) S.20.

<sup>46</sup> Tischmacher (2018) S.24.

<sup>47</sup> Vgl. Zika et al. (2009b); Gemeinder (2016); Bechev et al. (2019) und weitere.

---

werden ein- und zweidimensionale Oberflächeneigenschaften nach DIN EN ISO 4287<sup>48</sup> und DIN EN ISO 25178-2<sup>49</sup> verwendet, allerdings variieren die genutzten Eigenschaften zwischen den jeweils betrachteten Veröffentlichungen<sup>50</sup>.

## 2.2.2 Beschreibung der Auftretenswahrscheinlichkeit elektrischer Lagerschäden

Im Folgenden werden unterschiedliche Ansätze zur Beschreibung der Auftretenswahrscheinlichkeit elektrischer Lagerschäden vorgestellt.

### *Elektrische Lagerstromdichte*

Die elektrische Lagerstromdichte  $\hat{j}_L$  ist eine häufig verwendete Größe zur Abschätzung der Auftretenswahrscheinlichkeit elektrischer Lagerschäden<sup>51</sup>. Sie berechnet sich aus der Amplitude des durch das Lager fließenden Stroms  $\hat{I}_L$ , geteilt durch die HERTZ'SCHE Kontaktfläche<sup>52</sup> aller belasteten Wälzkörper  $A_{Hz}$  des Wälzlagers zu

$$\hat{j}_L = \frac{\hat{I}_L}{A_{Hz}}. \quad 2.3$$

Nach MÜTZE sind Lagerströme mit einer scheinbaren Lagerstromdichte von  $\hat{j}_L < 0.1 \text{ A/mm}^2$  nicht schädlich<sup>53</sup>. Höhere scheinbare Lagerstromdichten erhöhen die Wahrscheinlichkeit von Riffelbildung. Abbildung 2-7 zeigt die von WEICKER UND BINDER vorgeschlagene Verteilung, mit welcher der Zusammenhang zwischen der scheinbaren Lagerstromdichte und der Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Riffelschäden beschrieben wird.<sup>54</sup> Die Autoren stellen fest, dass die genannten Grenzwerte für Rotor-Erd-Ströme gelten und definieren Kennwerte für EDM-Ströme, die beschreiben, dass diese bis zu einer Lagerstromdichten von  $\hat{j}_L < 2.2 \text{ A/mm}^2$  nicht schädlich sind<sup>55</sup>. Daran ist zu erkennen, dass die Grenzwerte der Lagerstromdichte von der schädigenden Stromart abhängen.

---

<sup>48</sup> Vgl. DIN EN ISO 4287 (2010).

<sup>49</sup> Vgl. DIN EN ISO 25178-2 (2012).

<sup>50</sup> Harder et al. (2022) S.2.

<sup>51</sup> Vgl. Muetze (2004); Prashad (2005); Radnai et al. (2015) und weitere.

<sup>52</sup> Vgl. Hertz (1882).

<sup>53</sup> Muetze (2004) S.180.

<sup>54</sup> Weicker und Binder (2022) S.790.

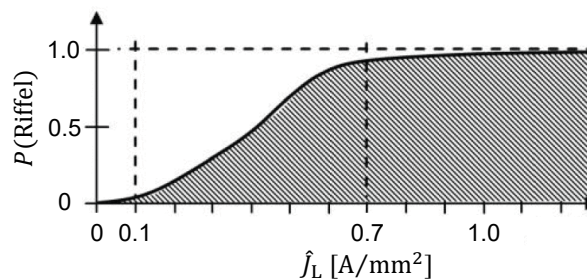
<sup>55</sup> Weicker und Binder (2022) S.788.

BUSSE ET AL. stellen basierend auf Versuchsdaten eine Berechnung der Lebensdauer für Lager unter elektrischer Last in Abhängigkeit der Lagerstromdichte auf<sup>56</sup>, welche sich berechnet zu

$$L_{el} = 7868204h \cdot 10^{-2.17 \frac{\text{mm}^2}{\text{A}}} \hat{j}_L. \quad 2.4$$

Als Schadensursache wird darin die Riffelbildung genannt, ohne den Schädigungszustand weiter zu konkretisieren. Zudem werden für die Herleitung von Gleichung 2.4 nur drei Datenpunkte verwendet. Eine Validierung der Lebensdauerberechnung an weiteren Versuchsdaten wird im Rahmen der zitierten Quelle nicht durchgeführt<sup>57</sup>.

TISCHMACHER identifiziert zwei Nachteile der Lagerstromdichte als Beurteilungskriterium elektrischer Lagerschäden außerhalb von Laborbedingungen. Einerseits muss dazu der tatsächliche Lagerstrom gemessen werden, andererseits müssen dazu die genauen Betriebslasten, Temperaturen und Drehzahlen bekannt sein. Beides ist in der Praxis oft nicht gegeben<sup>58</sup>.



**Abbildung 2-7:** Angenommene Wahrscheinlichkeitsverteilung für Riffelbildung auf den Wälzlagerlaufbahnen in Abhängigkeit der scheinbaren elektrischen Lagerstromdichte. Quelle: Weicker und Binder (2022) S.790; © 2022 IEEE.

### ***Lagerscheinleistung, Lagerenergie und Lagerscheinleistungsdichte***

Eine weitere Kenngröße, die zur Beschreibung der Auftretenshäufigkeit elektrischer Schädigung verwendet wird, ist die elektrische Lagerscheinleistung<sup>59</sup>, welche sich berechnet als das Produkt der Strom- und der Spannungsamplitude als

<sup>56</sup> Busse et al. (1997) S.573.

<sup>57</sup> Vgl. Busse et al. (1997).

<sup>58</sup> Tischmacher (2017a) S.11.

<sup>59</sup> Tischmacher (2017b) S.163ff.



---

$$\hat{S}_L = \hat{I}_L \cdot \hat{U}_L. \quad 2.5$$

Sie beschreibt die elektrische Leistung und damit die elektrische Energie, die in das Lager geleitet wird. Im Gegensatz zur ins Lager geleiteten elektrischen Energie, was ebenfalls eine Kenngröße zur Beschreibung elektrischer Lagerschäden ist<sup>60</sup>, ist diese allerdings einfacher messtechnisch zu erfassen, da zur Bestimmung der ins Lager geleiteten Energie der zeitliche Verlauf des Stroms und der Spannung integriert werden muss<sup>61</sup>. TISCHMACHER beschreibt, dass bis zu einem Wert von  $\hat{S}_L \leq 20\text{VA}$  kein vorzeitiger Lagerausfall infolge elektrischer Schädigung zu erwarten ist und bei  $\hat{S}_L \geq 60\text{VA}$  ein vorzeitiger Lagerausfall infolge Riffelbildung zu erwarten ist<sup>62</sup>. Allerdings sind diese Werte nicht allgemeingültig übertragbar, da diese nur für einen Lagertyp bestimmt wurden. WEICKER UND BINDER schlagen in Analogie zur Lagerstromdichte vor, die scheinbare Lagerleistung mit der HERTZ'SCHEN Kontaktfläche zu normieren<sup>63</sup>. Diese Größe nennen sie scheinbare Lagerleistungsdichte, welche sich berechnet zu

$$\hat{s}_L = \frac{\hat{S}_L}{A_{\text{HZ}}} = \hat{J}_L \cdot \hat{U}_L. \quad 2.6$$

Die von TISCHMACHER genannten Grenzwerte werden entsprechend mit der HERTZ'SCHEN Kontaktfläche skaliert, sodass bis zu einem Wert von  $\hat{s}_L \leq 40\text{VA}/\text{mm}^2$  kein vorzeitiger Lagerausfall eintritt und bei  $\hat{s}_L \geq 120\text{VA}/\text{mm}^2$  die kritische Einsatzgrenze liegt. Eine Verifizierung dieser Grenzwerte mit Versuchsdaten aus anderen Lagergrößen und Geometrien wird im Rahmen der zitierten Veröffentlichung jedoch nicht vorgestellt<sup>64</sup>.

### ***Anzahl elektrischer Durchschläge***

Ein weiteres Verfahren zur Beschreibung elektrischer Schädigung ist die Betrachtung der Häufigkeit von Einzeldurchschlägen<sup>65</sup>. In Abbildung 2-8 ist die Häufigkeit der EDM-Durchschläge und damit die Lagerschädigung über der Betriebstemperatur des Lagers aufgetragen<sup>66</sup>. Mit der Temperatur ändert sich die Schmierfilmdicke und damit die Anzahl elektrischer Durchschläge.

---

<sup>60</sup> Tischmacher und Gattermann (2010) S.10.

<sup>61</sup> Tischmacher (2017a) S.11.

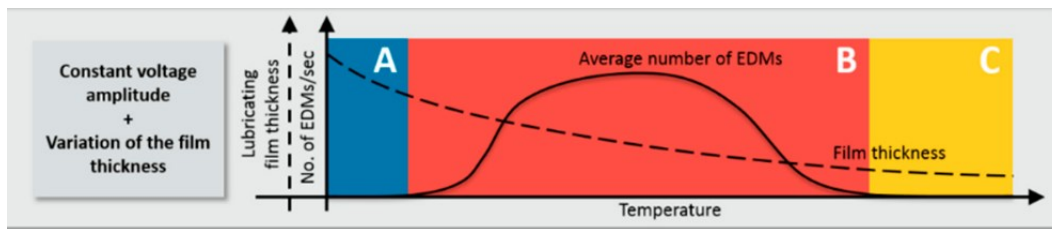
<sup>62</sup> Tischmacher (2018) S.24.

<sup>63</sup> Weicker und Binder (2022) S.788.

<sup>64</sup> Vgl. Weicker und Binder (2022).

<sup>65</sup> Gonda et al. (2019) S.3; Joshi (2019) S.76; Plazenet et al. (2021) S.942 und weitere.

<sup>66</sup> Gonda et al. (2019) S.3.



**Abbildung 2-8:** Häufigkeit von EDM Durchschlägen in Abhängigkeit der Schmierfilmdicke.  
Quelle: Gonda et al. (2019) S.3. © 2019 MDPI.

COLLIN ET AL. entwickeln darauf aufbauend ein Lebensdauermodell für elektrische Lager-  
schäden infolge von EDM Lagerströmen<sup>67</sup>. Die Lebensdauer ist in Tagen angegeben und  
berechnet sich zu

$$L_{\text{EDM,d}} = \frac{N_{\text{EDM}}}{\alpha_T \cdot f_s} \cdot \frac{1}{24 \frac{\text{h}}{\text{d}} \cdot 3600 \frac{\text{sek}}{\text{h}}} \quad 2.7$$

Dabei ist  $N_{\text{EDM}}$  die kritische Anzahl an Durchschlägen bis zum Lagerausfall,  $f_s$  beschreibt  
die Schaltfrequenz des Umrichters und  $\alpha_T$  ist ein Korrekturfaktor, der die Temperatur be-  
rücksichtigt und zwischen 0.6 und 1.2 variiert. Die kritische Anzahl an Durchschlägen<sup>68</sup>  
berechnet sich dabei zu

$$N_{\text{EDM}} = 4.1 \cdot 10^{11} - 1.5 \cdot 10^9 \cdot \frac{d_e^{2/3}}{1\text{J}} \quad 2.8$$

Der Parameter  $d_e$  beschreibt die Energie eines Durchschlags. Die kritische Lagerschädi-  
gung wird dabei anhand der Grenzwerte aus DIN ISO 20816-1<sup>69</sup> bewertet. Allerdings wird  
dabei nicht berücksichtigt, dass diese die Grenzwerte für die Vibrationsbeschleunigungen  
und Geschwindigkeiten darstellen, die eine technische Anlage nicht überschreiten soll.  
Damit ist diese Bewertung unabhängig von der Drehzahl, mit der diese Anlage betrieben  
wird<sup>70</sup>. Dies ist im Kontext der Inbetriebnahme einer technischen Anlage sinnvoll, aller-  
dings sind die Amplituden schadensinduzierter Vibrationen eine Funktion der Drehzahl<sup>71</sup>.

<sup>67</sup> Collin et al. (2022) S.5.

<sup>68</sup> Collin et al. (2022) S.4.

<sup>69</sup> Vgl. DIN ISO 20816-1 (2017).

<sup>70</sup> Vgl. DIN ISO 20816-1 (2017).

<sup>71</sup> Schaeffler Monitoring Services GmbH (2019) S.37.

---

Wenn die Drehzahl nicht berücksichtigt wird, werden letztendlich unterschiedliche Schadenszustände miteinander verglichen. Zudem wird bei der Abschätzung der Anzahl ertragbarer Durchschläge die geschädigte Fläche weder hinsichtlich der Lagergröße noch hinsichtlich des Lastwinkel berücksichtigt.<sup>72</sup>.

## **2.3 Methoden der Zustandsüberwachung von Wälzlagern**

Dieser Abschnitt gibt einen Überblick über die Methoden der Zustandsüberwachung und der Erkennung von Wälzlagerschäden im Allgemeinen sowie elektrischer Lagerschäden im Speziellen. Dabei werden vor allem Methoden der Vibrationsmessung und der darauf aufbauenden Datenauswertung mittels maschinellen Lernens vorgestellt. Abschließend werden Ansätze der Zustandsüberwachung im Wälzlager mittels elektrischer Impedanzmessung präsentiert.

### **2.3.1 Vibrationsmessung**

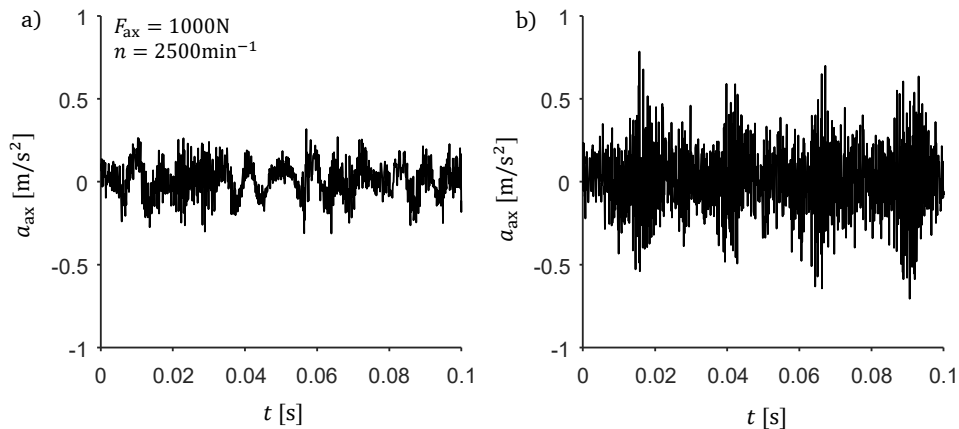
Die Überwachung technischer Anlagen und der darin verbauten Wälzlager durch Messung der am Gehäuse auftretenden Geschwindigkeiten und Beschleunigungen ist ein etabliertes und weit verbreitetes Verfahren<sup>73</sup>. Änderungen im gemessenen Beschleunigungssignal deuten dabei auf mögliche Veränderungen im Betriebszustand hin. Eine solche Veränderung kann dabei zunächst durch eine Änderung der anliegenden Lasten und Drehzahlen, durch Veränderungen am Lager selbst oder an den benachbarten Komponenten hervorgerufen werden. In Abbildung 2-9 ist die Aufnahme der Vibrationen eines intakten Lagers sowie eines Lagers mit elektrischen Riffelschäden bei gleichen Versuchsbedingungen dargestellt. Es ist erkennbar, dass das geschädigte Lager bei ansonsten gleichen Betriebsbedingungen deutlich höhere Amplituden der Beschleunigung als das intakte Lager aufweist. Diese Veränderung im Beschleunigungssignal kann genutzt werden, um einen Rückschluss auf den Schädigungszustand zu ziehen. Eine Übersicht unterschiedlicher Verfahren zur Modellierung des Zusammenhangs zwischen Lagerschaden und der dadurch entstehenden Vibration ist durch SINGH ET AL gegeben<sup>74</sup>.

---

<sup>72</sup> Vgl. Collin et al. (2022).

<sup>73</sup> Vgl. Randall (2011); DIN ISO 20816-1 (2017); Schaeffler Monitoring Services GmbH (2019) und weitere.

<sup>74</sup> Vgl. Singh et al. (2015).



**Abbildung 2-9:** a) Aufnahme des Beschleunigungssignales eines intakten Lagers; b) Aufnahme des Beschleunigungssignales eines Lagers mit Riffelschäden.  
Eigene Abbildung.

Eine Interpretation der Ursache für die Veränderung des gemessenen Vibrationssignals kann anhand einer Analyse der Frequenzanteile des Schwingungssignals erfolgen. Diese wird üblicherweise mittels einer Fourier-Transformation durchgeführt. Damit lässt sich identifizieren, in welcher Frequenz die Schwingungsanteile liegen, die zu einer Erhöhung des Schwingungssignals führen, und daraus einen Rückschluss auf den aufgetretenen Schaden ziehen. So lassen sich bspw. in radialen Wälzlagern Schäden auf dem Wälzlagerinnenring von Schäden auf dem Wälzlageraußenring unterscheiden, da diese aufgrund ihrer unterschiedlichen Überrollfrequenzen zu Erhöhungen in unterschiedlichen Frequenzen des Vibrationsspektrums führen<sup>75</sup>.

Zur Beurteilung der Kritikalität der Schwingungen gibt es verschiedene Ansätze. Die subjektive Beurteilung der hörbaren Geräusche ist ein verwendetes Diagnoseverfahren zu Zustandsüberwachung elektrischer Lagerschäden<sup>76</sup>. Eine subjektive Beurteilung kann jedoch je nach Kompetenz der beurteilenden Person zu erheblichen Schwankungen im Ergebnis führen<sup>77</sup>. Nach DIN ISO 20816-1 werden Grenzwerte für die zulässigen Schwinggeschwindigkeiten für unterschiedliche Betriebsszenarien definiert<sup>78</sup>. Diese beschreiben, welche Schwinggeschwindigkeiten für den kurzfristigen oder dauerhaften Betrieb einer Anlage

<sup>75</sup> Schaeffler Monitoring Services GmbH (2019) S.155ff.

<sup>76</sup> Weicker und Binder (2022) S.789.

<sup>77</sup> Vgl. Kirchner (2007) S.588.

<sup>78</sup> DIN ISO 20816-1 (2017) S.38.

---

zulässig sind. Eine Berücksichtigung der vorherrschenden Drehzahl erfolgt dabei nicht, da diese Kennwerte für den sicheren Betrieb der Anlage und nicht zur Schadensüberwachung einzelner Komponenten definiert sind. TISCHMACHER ordnet unterschiedlichen Beträgen der Beschleunigung unterschiedliche Schadensklassen elektrischer Schädigung zu, jedoch sind auch diese nicht in Bezug zu der Drehzahl der elektrischen Antriebsmaschine gesetzt<sup>79</sup>.

### 2.3.2 Charakteristische Kenngrößen der Zustandsüberwachung

Die Überwachung der Veränderung des unbearbeiteten Zeitsignals zur Identifikation von Änderungen im Betriebsverhalten eines technischen Systems, wie es beispielhaft in Abbildung 2-9 gezeigt ist, ist möglich. In der Praxis hat es sich jedoch als zielführend erwiesen, die auftretenden Schwingungen mithilfe charakteristischer Eigenschaften (engl.: Features) zu beschreiben<sup>80,81</sup>. Features sind üblicherweise statistische Kennwerte wie der Mittelwert, der Effektivwert oder die Standardabweichung. Eine ausführliche Beschreibung erfolgt in Abschnitt 4.3. Im Rahmen dieser Arbeit werden sowohl Features verwendet, die aus dem Zeitsignal abgeleitet werden, als auch Features, die im Frequenzbereich gebildet werden. In Anhang A1 und Anhang A2 sind die entsprechenden Features aufgelistet, deren Bedeutung und die jeweilige Quelle<sup>82</sup>, der sie entnommen sind. Die Recherche und Zusammenfassung der betrachteten Features basiert auf der Arbeit von SHATRI<sup>83</sup>.

### 2.3.3 Maschinelles Lernen in der Zustandsüberwachung von Wälzlagern

Algorithmen des maschinellen Lernens (engl.: machine learning algorithms) werden in den unterschiedlichsten Anwendungen verwendet, um den Zusammenhang zwischen bekannten Eingangsdaten und unbekanntem Ausgangsdaten mithilfe eines Modells zu beschreiben<sup>84</sup>. Sowohl Eingangs- als auch Ausgangsdaten können u.a. als Zahlenwerte, Klassifizierungen oder Bilddaten gegeben sein<sup>85</sup>. Das Modell beruht dabei nicht auf einem expliziten physikalischen Zusammenhang, sondern wird aus Beobachtungen abgeleitet<sup>86</sup>. Im ersten

---

<sup>79</sup> Tischmacher (2017a) S.17.

<sup>80</sup> In Abgrenzung zu den Eigenschaften der Oberflächenuntersuchung, die in Abschnitt 4.5 vorgestellt werden, wird für die Eigenschaften des Schwingungsverhaltens im weiteren Verlauf dieser Arbeit der englische Begriff Feature verwendet.

<sup>81</sup> Lei (2017) S.19ff.

<sup>82</sup> Lei et al. (2008) S.1595; Lei (2017) S.30 und S.39; Tom (2015) S.21ff; Grover und Turk (2020) S.3; Saucedo-Dorantes et al. (2021) S.8f sowie Jain und Bhosle (2021) S.1ff.

<sup>83</sup> Shatri (2022) S.12ff.

<sup>84</sup> Richter (2019) S.1.

<sup>85</sup> Richter (2019) S.2.

<sup>86</sup> Richter (2019) S.3.

---

Schritt der Modellentwicklung wird das Modell mit einem Datensatz bestehend aus Kombinationen aus Eingangs- und Ausgangsdaten trainiert. Daraus wird mithilfe des verwendeten Algorithmus ein Zusammenhang zwischen diesen Daten abgeleitet. Im zweiten Schritt wird das entwickelte Modell mithilfe von neuen Datensätzen validiert<sup>87</sup>, um sicher zu stellen, dass das entwickelte Modell den gesuchten Zusammenhang mit der geforderten Genauigkeit beschreibt. Für eine ausführliche Beschreibung der unterschiedlichen Anwendungsmöglichkeiten, den Besonderheiten unterschiedlicher Algorithmen des maschinellen Lernens sowie einer genaueren Beschreibung des Vorgehens beim Training und bei der Validierung des entwickelten Modells, wird auf die entsprechende Fachliteratur verwiesen<sup>88</sup>.

Modelle, die mithilfe von Algorithmen des maschinellen Lernens entwickelt wurden, werden vermehrt bei der Zustandsüberwachung von Wälzlagern sowie der Vorhersage der Auftretenswahrscheinlichkeit von Lagerschäden genutzt<sup>89</sup>. Dazu werden Features, die aus Vibrationsmessdaten abgeleitet sind, als Eingangsdaten des Modells verwendet. Mehrere Publikationen nutzen unterschiedliche Algorithmen zur Klassifizierung unterschiedlicher Lagerschäden bei konstanten<sup>90</sup> oder unterschiedlichen<sup>91</sup> Versuchsbedingungen. ANGER nutzt in seiner Arbeit maschinelles Lernen zur Regression elektrischer Lagerschäden<sup>92</sup>. Allerdings ist der verwendete Grenzwert, ab dem ein Lager als vollständig geschädigt gilt, anhand der Schwingungsamplitude definiert<sup>93</sup>. Eine solche Definition liefert nur bei konstanten Drehzahlen vergleichbare Ergebnisse.

### 2.3.4 Messung der elektrischen Impedanz

Die Überwachung der Schmierfilmdicke in EHD-Kontakten mithilfe der elektrischen Impedanz ist ein etabliertes Verfahren<sup>94</sup>. Wie in Abschnitt 2.1.2 beschrieben, ändert sich die elektrische Impedanz in Abhängigkeit des Schmierzustandes im Lager. Eine Messung dieser erlaubt zunächst eine Unterscheidung zwischen elasto-hydrodynamischer Schmierung und Mischreibung. Da eine unvollständige Schmierung die Ursache für weitere Schadensfälle darstellen kann<sup>95</sup>, kann eine Lagerschädigung durch Messung der elektrischen

---

<sup>87</sup> Validiert im Sinne von Kirchner (2020) S.9.

<sup>88</sup> Vgl. Richter (2019); Kubat (2017); Bishop (2006) und weitere.

<sup>89</sup> Vgl. Jiang et al. (2015); Anger (2018); Ewert et al. (2021) und weitere.

<sup>90</sup> Vgl. Jiang et al. (2015) und Ewert et al. (2021).

<sup>91</sup> Lessmeier et al. (2016) S.8.

<sup>92</sup> Anger (2018) S.78ff.

<sup>93</sup> Anger (2018) S.92.

<sup>94</sup> Vgl. Bethke (1991) und Jablonka et al. (2012).

<sup>95</sup> Czichos und Habig (2015) S.469.

---

Impedanz frühzeitig erkannt werden. Im Kontext der sensorischen Nutzung von Maschinenelementen wurde gezeigt, dass die Messung der Impedanz auch genutzt werden kann, um die Last eines Lagers zu messen<sup>96</sup>. Dazu wird die Modellierung des Wälzkontaktes als elektrische Impedanz nach Abschnitt 2.1.2 invertiert, um die anliegende Lagerlast zu berechnen. Um eine derartige Berechnung robust zu gestalten, werden die Modellierung der elektrischen Eigenschaften von Wälzlagern weiter verbessert<sup>97</sup>. Bei ausgeprägtem Schmierfilm ist es zudem möglich mithilfe elektrischer Impedanzmessung vorhandene Oberflächenschäden zu erkennen und diese zu quantifizieren<sup>98</sup>.

## 2.4 Forschungsbedarf

Wie im bisherigen Abschnitt dargestellt, ist das Phänomen elektrischer Lagerschäden schon lange der Forschungsgegenstand unterschiedlicher ingenieurwissenschaftlicher Forschungsdisziplinen. Die bisherigen Untersuchungen zeigen, welche Effekte eine elektrische Lagerschädigung beeinflussen und dementsprechend welche Maßnahmen eine Reduzierung der Lagerschädigung bewirken können. Allerdings gibt es auch eine Reihe Fragestellungen, welche bisher nicht vollständig beantwortet werden können. So ergibt die Recherche zum Thema elektrischer Lagerschäden, dass keine einheitliche Bewertungsgrundlage für die Beschreibung elektrischer Lagerschäden existiert. In den meisten Publikationen werden elektrische Lagerschäden mithilfe der Einordnungen in Riffel und Krater klassifiziert. In einzelnen Publikationen werden die Laufbahnoberflächen zwar vermessen, jedoch werden dazu unterschiedliche Messgrößen verwendet, wodurch die Ergebnisse kaum vergleichbar sind. Eine einheitliche metrische Skala zur Quantifizierung elektrischer Lagerschäden existiert nicht.

Die Bewertung der Schwere eines Lagerschadens erfolgt überwiegend subjektiv, einen einheitlichen Grenzwert gibt es nicht<sup>99</sup>. Auch die Bewertung des Einflusses der Betriebsparameter auf das Fortschreiten der Schädigung erfolgt in einem qualitativen („führt zu Riffelbildung“ oder „führt nicht zu Riffelbildung“) oder komparativen („führt zu schnellerer Riffelbildung“) Bewertungsschema<sup>100</sup>. Eine Quantifizierung solcher Untersuchungen ist nicht bekannt. Wenn weder der kritische Wert, ab dem ein Lager als geschädigt angenommen wird, noch der Effekt, den die Betriebsparameter auf die Änderung der Schädigung ausüben, quantifiziert werden können, ist eine quantitative Beschreibung der Lebensdauer des

---

<sup>96</sup> Vgl. Schirra et al. (2018); Schirra et al. (2021) und Schirra (2021).

<sup>97</sup> Vgl. Puchtler et al. (2022).

<sup>98</sup> Vgl. Martin (2021).

<sup>99</sup> Vgl. Weicker und Binder (2022) S.789.

<sup>100</sup> Vgl. Radnai et al. (2015) S.103.

---

Wälzlagers nicht möglich. Das führt dazu, dass elektrische Antriebsmaschinen und Abhilfemaßnahmen elektrischer Schädigung so ausgelegt werden, dass die Common Mode Spannung und der dadurch verursachte Lagerstrom unterkritisch sind und somit keine Riffelbildung eintritt<sup>101</sup>. Das System Elektromotor wird somit im Sinne der Produktentwicklung<sup>102</sup> dauerhaft gegen elektrische Lagerschäden ausgelegt. Eine anforderungsgerechte zeitfeste Auslegung, durch welche eine höhere elektrische Belastung der Lager sowie der elektrischen und mechanischen Komponenten der Antriebsmaschine zulässig ist und dadurch Potentiale zur Kostenreduktion ermöglicht werden, benötigt eine Quantifizierung des Schadensfortschrittes in Abhängigkeit der anliegenden mechanischen und elektrischen Lasten<sup>103</sup>. Eine derartige Quantifizierung bedarf einer objektiven und einheitlichen Skala, anhand welcher der elektrische Schädigungszustand von Wälzlagern einheitlich und vergleichbar beschrieben werden kann. Darauf aufbauend lassen sich die Effekte unterschiedlicher Betriebsfaktoren quantifizieren und eine Aussage über die Lebensdauer der Lager unter einem gegebenen Betriebszustand tätigen.

---

<sup>101</sup> Mütze (2011) S.385ff.

<sup>102</sup> Bender und Gericke (2021) S.569.

<sup>103</sup> Vgl. Sauer (2016) S.112.



### 3 Forschungsdesign

In diesem Kapitel wird zuerst die Zielsetzung aus dem im vorherigen Kapitel beschriebenen Forschungsbedarf abgeleitet. Um dieses Ziel zu erreichen, werden Forschungshypothesen aufgestellt und daraus Forschungsfragen abgeleitet sowie das Vorgehen, mit dem diese beantwortet werden.

#### 3.1 Zielsetzung

Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit ist die Definition einer metrischen Schädigungsskala für elektrische Wälzlagerschäden, die eine quantitative Bewertung elektrischer Lagerschäden ermöglicht und als Grundlage einer Lebensdauerberechnung dienen soll. Aufgrund der Veränderungen der Laufbahnoberfläche, die durch elektrische Schädigung am Wälzlager entstehen, erscheint es als zielführend, die Schädigungsskala anhand dieser Änderung der Laufbahnoberfläche zu definieren. Dies ermöglicht die Bewertung der elektrischen Schädigung unabhängig von der Ursache des anliegenden elektrischen Lagerstroms. Darauf aufbauend soll anhand dieser Skala die Änderung der elektrischen Schädigung infolge des Betriebszustandes beschrieben werden. Zudem sollen Grenzwerte kritischer Schädigung anhand dieser Skala definiert werden. Schließlich soll es möglich sein, den Skalenwert und somit den Schädigungszustand eines Wälzlagers im Betrieb zu erfassen.

In Abbildung 3-1 ist schematisch das Forschungsziel dargestellt. Zunächst soll es möglich sein, zu einem Zeitpunkt  $t_1$  den Schädigungszustand des Lagers im Betrieb anhand einer vorab definierten Skalengröße  $x$  auf den Wert  $x_1$  zu bestimmen. Anschließend soll es möglich sein, bei bekannten Betriebsbedingungen die zeitliche Änderung der Schädigung  $dx/dt$  zu berechnen. Wenn nun ein Wert  $x_{\text{Krit}}$  definiert ist, der einen kritischen Schädigungszustand beschreibt, kann mithilfe des Schädigungszustandes  $x_1$  und der zeitlichen Änderung der Schädigung  $dx/dt$  eine Berechnung des Zeitpunktes  $t_{\text{Krit}}$  durchgeführt werden, zu dem das Lager den kritischen Schädigungszustand  $x_{\text{Krit}}$  erreicht. Daraus lässt sich wiederum die verbleibende Lebensdauer  $\Delta t = t_{\text{Krit}} - t_1$  des Wälzlagers berechnen.

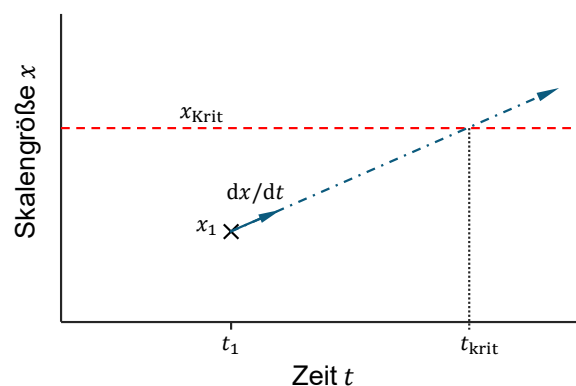


Abbildung 3-1: Schematische Darstellung des übergeordneten Forschungsziels.

---

## 3.2 Forschungsfragen

Aus der vorab definierten Zielsetzung lassen sich die im Weiteren erläuterten Forschungsfragen ableiten. Es wurde gezeigt, dass bisher keine etablierte systematische Quantifizierung elektrischer Lagerschäden in der Literatur bekannt ist und das Ziel formuliert, eine solche Quantifizierung basierend auf dem Zustand der Laufbahnoberfläche zu definieren. Ein bewährtes Mittel der Quantifizierung des Oberflächenzustandes stellen standardisierte Oberflächeneigenschaften dar. Ansätze der Quantifizierung des Schädigungszustandes anhand standardisierter Oberflächeneigenschaften sind bekannt, jedoch werden diese in der Literatur bisher nicht systematisch verwendet und es wird keine qualitative Bewertung des Zustandes daraus abgeleitet. Umgekehrt gibt es Ansätze der qualitativen Bewertung des Schädigungszustandes<sup>104</sup>, welche jedoch nicht quantifiziert sind. Daraus lässt sich folgende Forschungshypothese ableiten:

*Hypothese:*

*Standardisierte Oberflächeneigenschaften eignen sich für eine qualitative und quantitative Bewertung des Schädigungszustandes infolge schädlicher elektrischer Lagerströme.*

Aus dieser Hypothese leitet sich folgende Forschungsfrage ab:

- FF1: Welche standardisierten Oberflächeneigenschaften der Wälzlagerlaufbahnen eignen sich für eine qualitative und quantitative Bewertung des Schädigungszustandes infolge schädlicher elektrischer Lagerströme?

Um diese Frage zu beantworten, werden die Oberflächeneigenschaften der Laufbahnen elektrisch geschädigter Wälzlager untersucht. Der qualitative Zustand von Laufbahnoberflächen wird mithilfe einer Studie basierend auf dem Bewertungsschema nach TISCHMACHER<sup>105</sup> bewertet. Innerhalb dieser Studie wird der Zustand der Laufbahnoberfläche von mehreren Personen unabhängig voneinander bewertet. Die Eigenschaften der Laufbahnoberfläche werden nach DIN EN ISO 4287<sup>106</sup> und DIN EN ISO 25178-2<sup>107</sup> bestimmt. Basierend auf den Ergebnissen der qualitativen Schadensbewertung werden Anforderungen definiert, die eine geeignete Eigenschaft der Laufbahnoberfläche erfüllen muss, um für eine quantitative Bewertung des Schädigungszustands verwendbar zu sein. Damit ist es möglich, einem qualitativen Schädigungszustand den Wertebereich einer oder mehrerer Oberflächeneigenschaften zuzuordnen und diesen damit zu quantifizieren, woraus sich eine quantifizierbare Schädigungsskala ableiten lässt.

---

<sup>104</sup> Vgl. Tischmacher (2018) oder Collin et al. (2022).

<sup>105</sup> Vgl. Tischmacher (2018) S.20.

<sup>106</sup> DIN EN ISO 4287 (2010).

<sup>107</sup> DIN EN ISO 25178-2 (2012).

---

Anhand der ermittelten Schädigungsskala ist es möglich, den Zustand elektrisch geschädigter Laufbahnoberflächen zu verschiedenen Zeitpunkten zu bestimmen und damit die zeitliche Veränderung der Laufbahnoberflächen zu beschreiben. Bei bekannten Betriebsbedingungen lässt sich damit der Effekt der anliegenden elektrischen und mechanischen Lagerbelastung auf die Schädigung und deren zeitliche Änderung untersuchen. Daraus ergibt sich folgende Forschungshypothese:

*Hypothese:*

*Die zeitliche Änderung der Laufbahnoberfläche ist von der anliegenden elektrischen und mechanischen Lagerbelastung abhängig und lässt sich in Abhängigkeit dieser quantitativ beschreiben.*

Um die Hypothese zu prüfen, muss folgende Forschungsfrage untersucht werden:

- FF2: Wie verändert die kombinierte elektrische und mechanische Lagerbelastung die identifizierten Eigenschaften der Laufbahnoberfläche?

Die elektrische und mechanische Lagerbelastung setzt sich aus mehreren voneinander unabhängigen Faktoren ab, die im Rahmen der durchgeführten Versuchsreihe variiert werden. Wenn ein Faktor einen signifikanten Effekt auf die Änderung der Laufbahnoberfläche besitzt, so ist diese Eigenschaft von dem untersuchten Faktor abhängig. Gleiches gilt für die Wechselwirkung mehrerer Faktoren. Die Effektstärke zwischen dem untersuchten Faktor bzw. zwischen der Wechselwirkung mehrerer Faktoren sowie der untersuchten Änderung der Laufbahnoberfläche wird im Rahmen dieser Untersuchung quantifiziert. Alle signifikanten Effekte der Faktoren und deren Wechselwirkungen können zur mathematischen Beschreibung des Zusammenhangs zwischen der Änderung des Oberflächenzustands sowie der elektrischen und mechanischen Lagerbelastung herangezogen werden.

Als Ergebnis der ersten Forschungsfrage wird die Schädigungsskala aus Oberflächenmessungen an der Wälzlageroberfläche abgeleitet und damit der Schädigungszustand des Wälzlagers beschrieben. Damit die Schädigungsskala auch zur Beurteilung des Schädigungszustands im Lagerbetrieb genutzt werden kann, muss die der Schädigungsskala zugrundeliegende Änderung der Oberflächeneigenschaft im Betrieb messtechnisch erfasst werden können. Ein Verfahren zur Überwachung des Betriebszustands von Wälzlagern stellt die Schwingungsmessung mit anschließender Auswertung von Eigenschaften des Schwingungssignals (Features) im Zeit- und Frequenzbereich dar. Die Auswertung dieser Features kann dabei sowohl von Personen durchgeführt werden, als auch mit Methoden des maschinellen Lernens. Im Stand der Forschung zeigt sich, dass Methoden des maschinellen Lernens in der Lage sind, Wälzlagerschäden aus den Features der Schwingungsmessdaten zu identifizieren. Dieser Ansatz soll genutzt werden, um ein Modell zu erstellen, das den Zustand elektrischer Lagerschäden im Betrieb quantifizieren kann. Die

---

Grundlage für dieses Modell stellen die im Rahmen der zweiten Forschungsfrage genutzten Versuchsdaten, die bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen erhoben wurden. Die daraus abgeleitete Forschungshypothese lautet:

*Hypothese:*

*Mithilfe von Methoden des maschinellen Lernens kann aus den Daten der Vibrationsmessung eine Quantifizierung der elektrischen Wälzlagerschädigung in unterschiedlichen Betriebsbedingungen entwickelt werden.*

Die sich daraus ergebende Forschungsfrage lautet:

- FF3: Wie kann mithilfe von Methoden des maschinellen Lernens auf Basis von Vibrationsmessdaten ein Modell entwickelt werden, das die elektrische Oberflächenschädigung bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen hinreichend genau quantifiziert?

Die Grundlage der Modellentwicklung stellt die Generierung geeigneter Features dar, auf denen das Modell aufbaut. Die Verwendung der Mittelwerte in separaten Frequenzbändern des Schwingungssignals als Feature ermöglicht eine erhöhte Aussagegenauigkeit in der Überwachung von Lagerschäden mit Methoden des maschinellen Lernens<sup>108</sup>. Dieser Ansatz soll im Rahmen dieser Arbeit erweitert werden, indem neben den Mittelwerten auch weitere Kenngrößen der separaten Frequenzbänder berechnet und als Features verwendet werden. Es ist zu untersuchen, inwieweit die berechneten Features redundante Informationen enthalten. Features, die eine hohe Redundanz zueinander aufweisen, werden zusammengefasst. Die daraus entstehende Menge an Features dient als Grundlage für die Entwicklung eines Modells mithilfe der Methoden des maschinellen Lernens. Dieses Modell wird mit einem Teil der vorhandenen Versuchsdaten trainiert und anschließend wird die Funktionalität des Modells an einem Datensatz, der nicht Teil des Trainingsdatensatzes war, validiert.

---

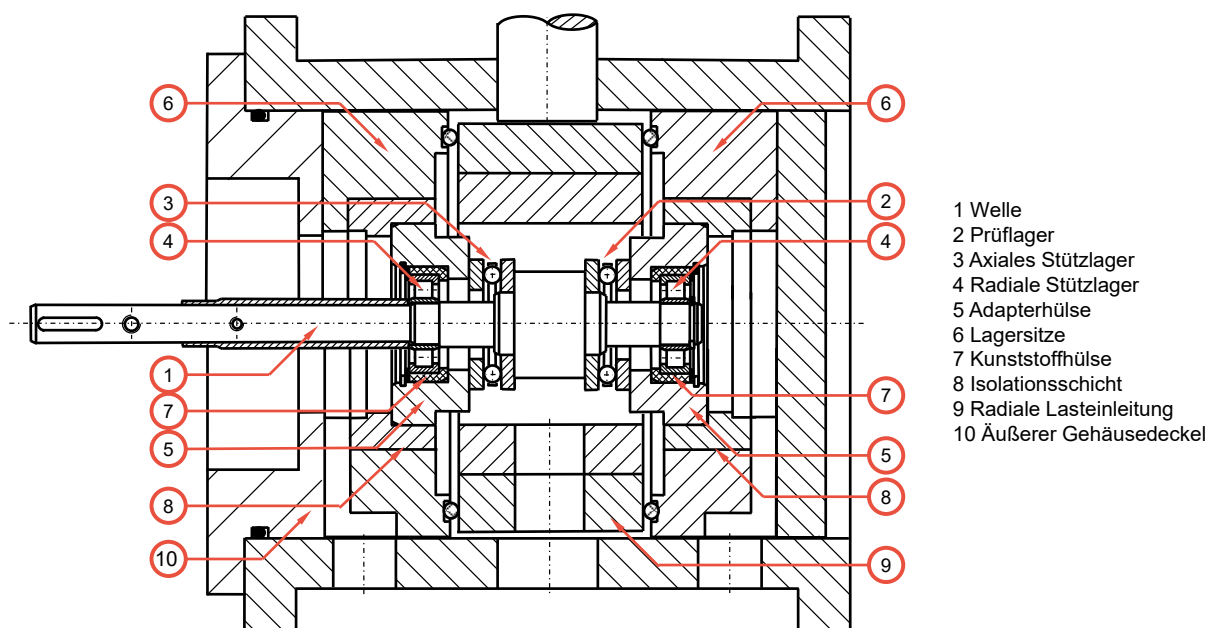
<sup>108</sup> Bienefeld et al. (2021) S.9.

## 4 Werkzeuge und Methoden der Versuchsdurchführung und Datenauswertung

In diesem Kapitel werden die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Werkzeuge und Methoden beschrieben, die in der Versuchsdurchführung sowie in der anschließenden Auswertung der erhobenen Versuchsdaten verwendet werden. Dazu werden zunächst der Prüfstand sowie die Messtechnik vorgestellt, die in der weiteren experimentellen Untersuchung verwendet werden. Anschließend werden die für diese Arbeit grundlegenden statistischen Kenngrößen und Auswerteverfahren beschrieben. Abschließend werden die Grundlagen der Oberflächenanalyse vorgestellt.

### 4.1 Wälzlagerprüfstand

Der Wälzlagerprüfstand „Athene“ ist ein von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderter Prüfstand zur Untersuchung der Wechselwirkung der elektrischen und mechanischen Eigenschaften von Wälzlagern. Er besteht aus vier baugleichen Prüfkammern, die eine zeitgleiche Untersuchung von Wälzlagern ermöglicht. In Abbildung 4-1 ist die Schnittansicht einer Prüfkammer dargestellt, welche für die durchgeführten Versuche modifiziert wurde.



**Abbildung 4-1:** Schnittansicht der zur Untersuchung von Axialrillenkugellagern modifizierten Prüfkammer des Wälzlagerprüfstands Athene.  
Eigene Abbildung.

---

Zunächst werden die mechanische Funktion des Prüfstandes, die darin verbaute Messtechnik und abschließend das elektrische Verhalten des Prüfstandes sowie deren Messung vorgestellt. Eine weiterführende Beschreibung des Prüfstandes ist in der Literatur gegeben<sup>109</sup>.

#### 4.1.1 Funktionsweise

Der Prüfstand besteht aus insgesamt vier baugleichen Prüfkammern, in denen die betriebsbedingten elektrischen Eigenschaften von Lagern untersucht werden können. In jeder Prüfkammer befinden sich vier Wälzlager, die alle auf einer Welle montiert sind. Eines dieser Lager stellt das Prüflager dar, die Übrigen sind Stützlager. Die Welle wird über einen Elektromotor angetrieben. Die axiale und radiale Last wird auf die Lager mithilfe jeweils eines hydraulischen Zylinders aufgebracht. Die Lasteinleitung erfolgt unabhängig voneinander. Die äußeren Lagerringe lassen sich jeweils mithilfe von Lamellensteckern elektrisch kontaktieren, die elektrische Kontaktierung der Welle erfolgt mit einem Schleifkontakt. Um einen eindeutigen elektrischen Signalfluss zu ermöglichen, sind die Lagersitze elektrisch vom Gehäuse isoliert. Die Isolierung der Welle vom Elektromotor erfolgt mithilfe einer Klauenkupplung mit zwei Elastomerkränzen. Die Kontaktierung der Lager kann sowohl mit dem prüfstandsinternen Signalgenerator<sup>110</sup>, als auch mit externer Signal- und Messtechnik erfolgen. Die Schmierung der Lager erfolgt über eine Umlaufschmierung, welche über einen Durchlauferhitzer verfügt und die Einstellung der Schmierstofftemperatur und damit auch indirekt der Lagertemperatur ermöglicht. In Tabelle 4-1 sind die mechanischen und elektrischen Kenndaten des Wälzlagerprüfstandes Athene zusammengefasst.

Der Prüfstand ist mit Messtechnik zur Überwachung des eingestellten Betriebszustands ausgestattet. Motordrehzahl und Drehmoment werden über den Motorstrom erfasst. Die anliegenden Lasten werden über Kraftmessdosen gemessen. Zudem werden die Beschleunigungen der Prüfkammer in radialer und axialer Richtung mit Beschleunigungssensoren erfasst. Die Temperaturen an den Lageraußenringen sowie in Zu- und Ablauf wird über PT100 Temperatursensoren gemessen.

In den bisherigen Untersuchungen, die an diesem Prüfstand durchgeführt wurden, wurden nur Lager untersucht, die eine radiale Last tragen können. Für eine Untersuchung axialer Rillenkugellager, die nicht für radiale Lasten geeignet sind, wird die Lasteinleitung in einer Prüfkammer modifiziert. In Abbildung 4-1 ist die Schnittansicht der modifizierten Prüfkammer dargestellt. Auf der Welle (1) ist das Prüflager (2) sowie das axiale Stützlager (3) und die beiden radialen Stützlager (4) angeordnet. Um eine derartige Anordnung zu ermöglichen, wurden zwei Adapterhülsen (5) gefertigt, die in die Lagersitze (6) montiert

---

<sup>109</sup> Vgl. Schirra et al. (2021) S.4; Harder et al. (2021) S.68f; Schirra (2021) S.37ff.

<sup>110</sup> Vgl. Gesellschaft für Systementwicklung & Instrumentierung mbH (2018).

werden. Um die radialen Stützlager vom Prüflager und vom axialen Stützlager zu isolieren, sind diese in jeweils einer Kunststoffhülse (7) montiert. Zudem ist in den Lagersitzen eine elektrische Isolationsschicht (8) angebracht. Das radiale Druckstück (9) übt keine Last auf die Lager aus und dient ausschließlich der Sicherstellung der Umlaufschmierung. Aus Gründen der Übersicht sind einige der außen anliegenden Komponenten der Prüfkammer nicht dargestellt (bspw. Schrauben zur Montage des äußeren Gehäusedeckels (10), innerer Gehäusedeckel und Dichtung, Schleifkontakt sowie Klauenkupplung). Das Prüflager sowie das axiale Stützlager sind axiale Rillenkugellager vom Typ 51305 von Schaeffler<sup>111</sup> (siehe Anhang A3), die radialen Stützlager sind Zylinderrollenlager vom Typ NU203 von SKF<sup>112</sup>. Als Schmierstoff wird das Referenzöl FVA3 verwendet (siehe Anhang A4).

**Tabelle 4-1:** Kenndaten des Wälzlagerprüfstandes „Athene“.

Parameter	Variable	Wertebereich		Einheit
		Min	Max	
Radiale Last	$F_{\text{Rad}}$	0	80	kN
Axiale Last	$F_{\text{Ax}}$	0	40	kN
Drehzahl	$n$	0	8000	$\text{min}^{-1}$
Temperatur	$\vartheta$	30	90	°C
Elektrische Spannung	$\hat{U}$	0	24	V
Frequenz des elektrischen Spannung	$f_{\text{el}}$	0	20	kHz

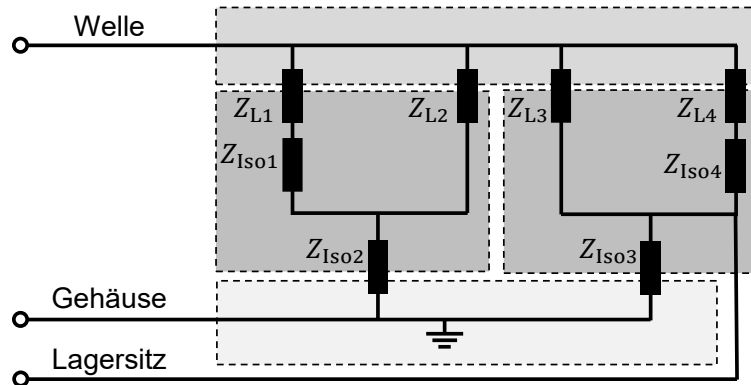
#### 4.1.2 Elektrischer Prüfstandsaufbau

Für die folgenden elektrischen Untersuchungen lässt sich für die Prüfkammer das in Abbildung 4-2 dargestellte elektrische Ersatzschaltbild ableiten. Die beiden radialen Stützlager sind durch die elektrischen Impedanzen  $Z_{L1}$  und  $Z_{L4}$  abgebildet. Diese sind jeweils durch eine Kunststoffhülse gegen den Lagersitz der Axiallager elektrisch isoliert. Diese Isolationen werden entsprechend durch die Impedanzen  $Z_{\text{Iso1}}$  und  $Z_{\text{Iso4}}$  beschrieben. Die axialen Lager werden durch die Impedanzen  $Z_{L2}$  und  $Z_{L3}$  abgebildet. Die Lagersitze wiederum sind durch die Isolationsschichten  $Z_{\text{Iso2}}$  und  $Z_{\text{Iso3}}$  vom Gehäuse isoliert. Die Impedanzen der Isolationen wurden in demontierten Zustand vermessen und sind in Tabelle

<sup>111</sup> Schaeffler Medias (2022).

<sup>112</sup> SKF (2022).

4-2 aufgelistet. Der Aufbau der Isolierung dient der Sicherstellung, dass das schädigende elektrische Signal durch das Prüflager fließt und die Stützlager nicht geschädigt werden.



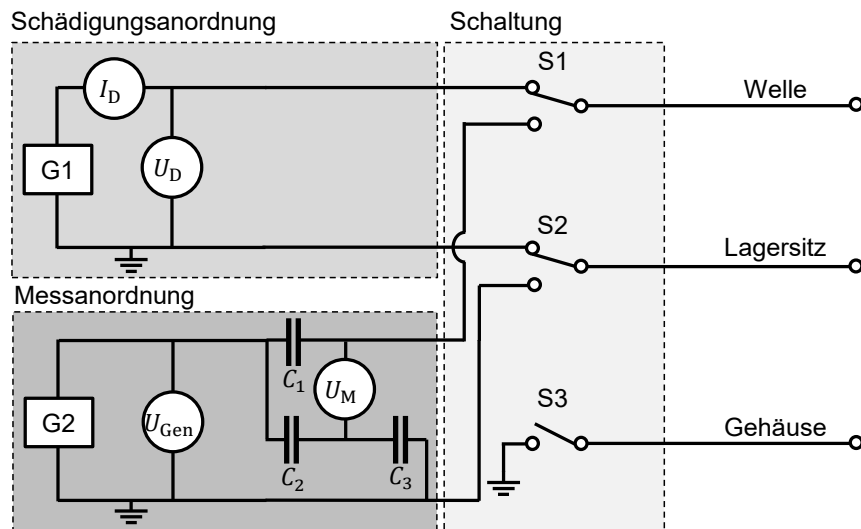
**Abbildung 4-2:** Elektrisches Schaltbild einer Prüfkammer des Wälzlagerprüfstandes angepasst an die Untersuchung von axialen Lagern.  
Eigene Abbildung.

**Tabelle 4-2:** Impedanzen der Isolationsschichten.

Impedanz bei $f_{el} = 20\text{kHz}$	Resistiver Anteil in $\text{k}\Omega$	Kapazitiver Anteil in $\text{pF}$
$Z_{\text{Iso1}}$	$494 \pm 0.5$	$565.9 \pm 0.4$
$Z_{\text{Iso2}}$	$13400 \pm 300$	$26.4 \pm 0.2$
$Z_{\text{Iso3}}$	$13400 \pm 400$	$27.1 \pm 0.6$
$Z_{\text{Iso4}}$	$555 \pm 4.1$	$525.1 \pm 0.3$

Die elektrische Kontaktierung ist in Abbildung 4-3 dargestellt und erfüllt zwei Funktionen. In erster Linie wird über die Kontaktierung die schädigende elektrische Energie in das Lager geleitet. Diese Funktion wird von der Schädigungsanordnung erfüllt. Zum anderen wird die Kontaktierung für die Signalleitung genutzt, um die elektrische Impedanz des Lagers mithilfe der Messanordnung zu messen. Da beide Funktionen ein elektrisches Signal auf das Lager geben, können diese nicht gleichzeitig durchgeführt werden. Um eine eindeutige Signalleitung zu gewährleisten, werden diese durch die Schaltung getrennt.





**Abbildung 4-3:** Schaltbild der elektrischen Kontaktierung.  
Eigene Abbildung.

Das schädigende elektrische Signal wird vom internen Signalgenerator des Wälzlagerprüfstandes (G1) erzeugt<sup>113</sup>. Die Aufnahme der am Lager anliegenden Spannung sowie des durch das Lager fließenden Stroms erfolgt einerseits mithilfe der internen Datenauswertung, die über die gesamte Versuchsdauer in einem festen Intervall den Effektivwert der Spannung und des Stromes aufnimmt. Zudem besteht die Möglichkeit den Monitorausgang des Prüfstands zu verwenden, welcher das Stromsignal ausgibt. Für die entsprechende hochfrequente Spannungsmessung wird die Spannung zwischen Welle und Lagersitz abgegriffen. Beide hochfrequenten Signale werden über ein Differentialoszilloskop *Picoscope 4444* von PICO TECHNOLOGY LTD. ausgelesen<sup>114</sup>.

Die verwendete Messanordnung entspricht einer komplexen Wheatstone-Brücke, mit der die Impedanz des Lagers berechnet wird. Für eine ausführliche Beschreibung des Aufbaus wird auf die Veröffentlichung von PUCHTLER ET AL. verwiesen<sup>115</sup>. Die Umschaltung zwischen der Schädigungs- und der Messanordnung wird über eine Schaltbox mit mechanischen Kippschaltern S1 und S2 durchgeführt.

Im Rahmen von Voruntersuchungen konnten Potentialunterschiede zwischen Gehäuse und Lagersitz gemessen werden, welche vor allem bei Lagersitzen mit schlechten Isolationschichten  $Z_{Is02}$  und  $Z_{Is03}$  zu einer erheblichen Beeinflussung der Messung führen. Diese

<sup>113</sup> Gesellschaft für Systementwicklung & Instrumentierung mbH (2018).

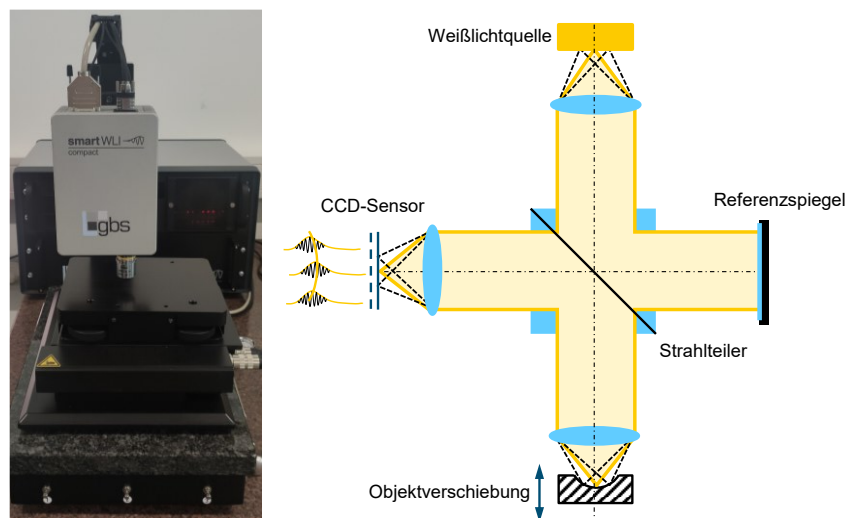
<sup>114</sup> Pico Technology Ltd. (2017).

<sup>115</sup> Puchtler et al. (2023) S.38.

Potentialunterschiede lassen sich durch induzierte Ströme im Prüfstand erklären, die entsprechend auch auf das Gehäuse übergehen. Um diesen Effekt zu reduzieren, wird über den Schalter S3 das Gehäuse an der Prüfkammer zusätzlich mit einem zentralen Erdungsleiter verbunden.

## 4.2 Weißlichtinterferometer

Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Wälzlageroberflächen werden mithilfe eines Weißlichtinterferometers vermessen. In Abbildung 4-4 ist links das verwendete Weißlichtinterferometer dargestellt und rechts ist dessen Funktionsprinzip skizziert.



**Abbildung 4-4:** links: Smart WLI Weißlichtinterferometer; rechts: Prinzip des Weißlichtinterferometers.

Eigene Abbildung nach Löffler-Mang et al. (2020) S.465.

Interferometer nutzen Überlagerungseffekte zweier kohärenter Lichtwellen<sup>116</sup>. In Abhängigkeit der Phasendifferenz zwischen den Wellen variiert die Intensität der überlagerten Wellen. In der Anwendung wird dieser Effekt genutzt, indem eine Lichtquelle Lichtwellen mit gleicher Phase aussendet. Diese werden am Strahlteiler geteilt, ein Teil der Lichtwellen wird am Referenzspiegel reflektiert, der andere Teil wird vom vermessenen Objekt reflektiert. Anschließend werden die beiden Teile wieder am Strahlenteiler vereinigt, wobei die unterschiedliche Weglänge zwischen dem Referenzspiegel und jedem auf dem Messobjekt

<sup>116</sup> Löffler-Mang et al. (2020) S.446.

---

vermessenen Punkt eine Interferenz der beiden Wellen bildet. Diese Interferenz wird von einem Fotosensor (bspw. charged coupled device, CCD) aufgenommen.<sup>117</sup>

Beim Weißlichtinterferometer wird eine Lichtquelle mit kurzer Kohärenzlänge genutzt. Bei diesem Aufbau treten Interferenzerscheinungen nur auf, wenn der Referenzspiegel und das vermessene Objekt den gleichen Abstand zum Strahlteiler besitzen<sup>118</sup>. Das Messobjekt wird in vorab definierten Schritten in vertikaler Richtung verschoben, während der Sensor jeweils eine Aufnahme des untersuchten Bereichs erstellt. Dadurch liefert der Sensor für jeden Messpunkt (Pixel) einen Verlauf der Intensität. Wenn der untersuchte Oberflächenpunkt in den Bereich der Kohärenz kommt, zeigt das Signal des Sensors einen Ausschlag der Interferenz an. Die Höhe des betrachteten Oberflächenpunktes ist dabei auf der Höhe, auf welcher der Interferenzausschlag sein Maximum erreicht<sup>119</sup>. So ist eine präzise Vermessung des Höhenverlaufs einer Oberfläche möglich.

Das am Fachgebiet für Produktentwicklung und Maschinenelemente (pmd) verwendete Weißlichtinterferometer ist das *smartWLI compact*<sup>120</sup>. Die technischen Spezifikationen sind in Tabelle 4-3 zusammengefasst.

**Tabelle 4-3:** Technische Spezifikationen des Weißlichtinterferometers smartWLI compact.  
Quelle: Gesellschaft für Bild- und Signalverarbeitung (GBS) mbH (2021).

Parameter	Werte	Einheit
Auflösung Kamera	1920 × 1200	Pixel
Bildfeld	0.37 × 0.23	mm <sup>2</sup>
Punktabstand	0.19	µm
Topografiereproduzierbarkeit	< 7	nm

### 4.3 Statistische Grundlagen

Dieser Abschnitt dient dazu, eine kurze Übersicht der statistischen Definitionen und Kennwerte zu geben, die im weiteren Verlauf der Arbeit verwendet werden.

---

<sup>117</sup> Vgl. Löffler-Mang et al. (2020).

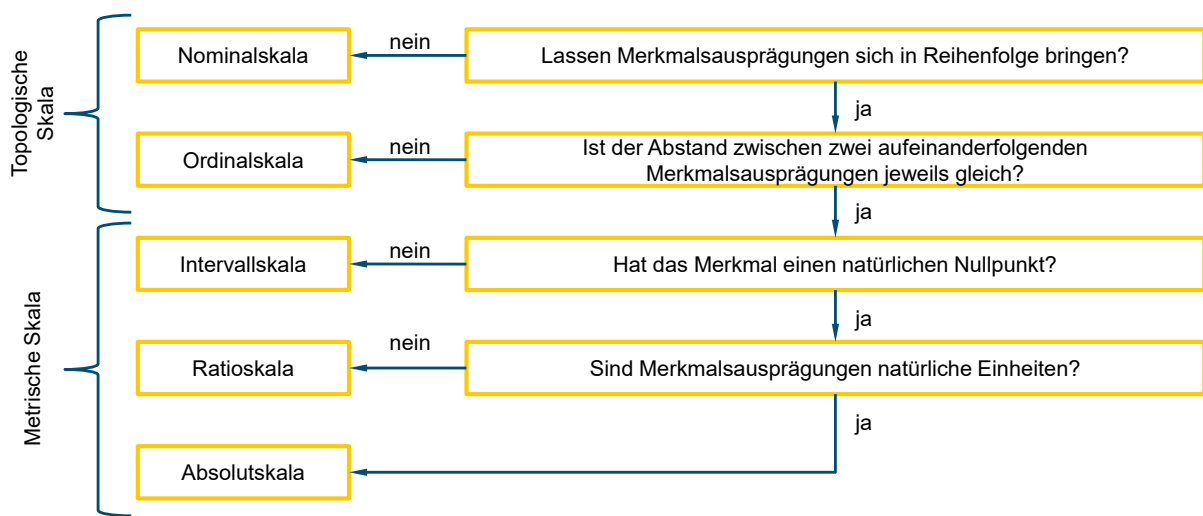
<sup>118</sup> Löffler-Mang et al. (2020) S.464.

<sup>119</sup> Löffler-Mang et al. (2020) S.464.

<sup>120</sup> Gesellschaft für Bild- und Signalverarbeitung (GBS) mbH (2021).

### 4.3.1 Skalenniveaus

Skalen dienen zur Abgrenzung unterschiedlicher Merkmalsausprägungen<sup>121</sup>. Dabei wird zwischen verschiedenen Skalen differenziert. Abbildung 4-5 zeigt unterschiedliche Skalen sowie deren Bestimmung. Eine Nominalskala beinhaltet zwei oder mehr Merkmalsausprägungen, die sich in keine gewichtete Reihenfolge einordnen lassen. In einer solchen Skala kann nur festgestellt werden, ob zwei Merkmalsausprägungen gleich oder ungleich sind<sup>122</sup>. Als Beispiel dafür kann eine Skala zur Beurteilung unterschiedlicher Lagerschäden<sup>123</sup> genommen werden. Diese erlaubt zwar eine Unterscheidung unterschiedlicher Schäden (bspw. Ermüdungsschäden oder Riffel), ordnet diese jedoch in keine eindeutige Rangfolge.



**Abbildung 4-5:** Arten von Messskalen und deren Bestimmung.  
Eigene Abbildung nach Kosfeld et al. (2016) S.6ff.

Wenn die Merkmalsausprägungen sich in eine eindeutige Rangfolge bringen lassen und die Abstände der einzelnen Ausprägungen nicht gleich verteilt sind, handelt es sich bei der Skala um eine Ordinalskala<sup>124</sup>. Ein Beispiel dafür wäre die Bewertung von Lagerschäden mithilfe einer Ampelskala (bspw: grün: Lager in Ordnung; gelb: Lager wird demnächst

<sup>121</sup> Der Begriff „Merkmal“ wird in diesem Abschnitt im Sinne der Statistik verwendet. Im Sinne der Produktentwicklung (Kirchner (2020) S.10) ist der Einsatz von Skalen nicht nur auf Merkmale beschränkt, sondern kann auch zur Abgrenzung von Eigenschaftsausprägungen verwendet werden.

<sup>122</sup> Kosfeld et al. (2016) S.6.

<sup>123</sup> Schaeffler Technologies AG & Co. KG (2000) S.11ff.

<sup>124</sup> Kosfeld et al. (2016) S.7.

---

ausfallen; rot: Lager ist defekt). Die Merkmale einer solchen Ampel lassen sich in eine eindeutige Rangfolge bringen, jedoch sind die Abstände zwischen den Merkmalen nicht gleich.

Eine Intervallskala und eine Ratioskala haben Merkmalsabstände, die eine eindeutige Rangfolge besitzen und äquidistante Abstände aufweisen. Sie unterscheiden sich darin, ob der Nullpunkt der Skala natürlich oder willkürlich gewählt ist<sup>125</sup>. Die Messung der Fläche eines Ermüdungsschadens auf der Laufbahnoberfläche eines Wälzlagers stellt bspw. eine Ratioskala dar. Eine Absolutskala erfordert zudem das Verwenden einer natürlichen Einheit als Messgröße<sup>126</sup>. Die Anzahl an Riffeln auf einer elektrisch geschädigten Laufbahnoberfläche kann beispielsweise anhand einer Absolutskala angegeben werden.

Die Unterscheidung der einzelnen Skalen ist notwendig, da anhand der verschiedenen Skalen unterschiedliche Aussagen getätigt und damit verbundene Rechenoperationen durchgeführt werden dürfen. So kann anhand einer Nominalskala nur eine qualitative Beurteilung durchgeführt werden („Merkmal ist gleich“ oder „Merkmal ist ungleich“). Eine Ordinalskala erlaubt zudem eine komparative Bewertung („Merkmal ist größer als“ oder „Merkmal ist kleiner als“). Um Additions- und Subtraktionsoperationen durchführen zu können, benötigt man mindestens eine Intervallskala. Für Multiplikationen und Divisionen ist mindestens eine Ratioskala erforderlich<sup>127</sup>.

### 4.3.2 Lagemaße

Im Folgenden werden unterschiedliche Maße definiert, die jeweils einen Kennwert zur Beschreibung des Verhaltens einer Skalengröße  $x$  bestehend aus  $N$  Werten mit der dazugehörigen Verteilungsfunktion  $h(x)$  darstellen. Die Definitionen sind der Arbeit von KOSFELD ET AL.<sup>128</sup> entnommen.

Der Modalwert  $D$  ist definiert als der Wert  $x_l \in x$ , für den die Häufigkeitsverteilung maximal wird und wird berechnet als

$$D = x_l \text{ mit } h(x_l) = \max(h(x)). \quad 4.1$$

Der Modalwert kann bei allen im vorherigen Abschnitt definierten Skalen ermittelt werden.

Das  $P$ -Quantil  $\check{x}_p$  gibt den Wert einer Verteilung  $h(x)$  an, bei dem  $P \cdot 100\%$  aller Werte ( $0 < P < 1$ ) kleiner als  $\check{x}_p$  sind und  $(1 - P) \cdot 100\%$  größer. Dazu werden alle Elemente von  $x$  zunächst vom kleinsten zum größten Element sortiert. Das Element  $x_l$  ist an der  $N_l$ -

---

<sup>125</sup> Kosfeld et al. (2016) S.7.

<sup>126</sup> Kosfeld et al. (2016) S.9.

<sup>127</sup> Kosfeld et al. (2016) S.11.

<sup>128</sup> Kosfeld et al. (2016) S.67ff.

ten Stelle dieser Sortierung. Das  $P$ -Quantil wird mithilfe folgender Fallunterscheidung berechnet, je nachdem, ob die Anzahl aller Werte  $N$  ungerade oder gerade ist

$$\check{x}_P = \begin{cases} x_l & \text{für } N_l/N > P \text{ und } N_{l-1}/N < P \\ \frac{1}{2} \cdot (x_l + x_{l+1}) & \text{für } N_l/N = P \end{cases} . \quad 4.2$$

Die Berechnung eines Quantils erfordert mindestens eine Ordinalskala.

Der Median  $\check{x} = \check{x}_{0,5}$  einer Verteilung ist ein besonderes Quantil mit  $P = 0.5$ . Bei diesem Quantil liegen gleichviele Werte unterhalb wie oberhalb von  $\check{x}$ . Analog sind das 25%-und 75%-Quantil ebenfalls besondere Quantile mit  $P = 0.25$  und  $P = 0.75$ . Diese Quantile werden auch Quartile bezeichnet, da diese zusammen mit dem Median den Wertebereich in vier gleich große Bereiche teilen.

Das arithmetische Mittel  $\bar{x}$  ist der ungewichtete Mittelwert aller Werte  $x$  und wird berechnet als

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i. \quad 4.3$$

Für die Berechnung des arithmetischen Mittels wird eine metrische Skala vorausgesetzt.

Bei der Untersuchung von Datensätzen, die um den Wert null verteilt sind (bspw. Beschleunigungssignale oder Wechselstrom) wird das quadratische Mittel  $x_{\text{RMS}}$  (engl: Root Mean Square; im Deutschen oft auch Effektivwert) betrachtet<sup>129</sup>. Dieses berechnet sich als

$$x_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2}. \quad 4.4$$

Auch für die Berechnung des quadratischen Mittels wird eine metrische Skala vorausgesetzt.

Die verschiedenen vorgestellten Lagemaße unterscheiden sich nicht nur in den Skalen in denen sie verwendet werden dürfen, sondern bewerten das Verhalten des betrachteten Datensatzes unterschiedlich. So ist beispielsweise der Median robuster gegen einzelne Ausreißer im Datensatz als das arithmetische Mittel, während das quadratische Mittel sensitiver gegenüber Ausreißern ist als das arithmetische Mittel.

---

<sup>129</sup> Schaeffler Monitoring Services GmbH (2019) S.34.

---

Sofern nicht näher definiert, wird in dieser Arbeit unter dem Mittelwert immer das arithmetische Mittel verstanden.

### 4.3.3 Streuungs- und Schiefemaße

Mithilfe der Streuungs- und Schiefemaße wird beschrieben, wie die einzelnen Werte eines Datensatzes um einen Messwert verteilt sind. Sofern nicht anders angegeben, sind die Definitionen der Arbeit von KOSFELD ET AL.<sup>130</sup> entnommen.

Die Spannweite  $x_{pk-pk}$  (im engl: peak to peak value) einer Verteilung ist die Differenz zwischen dem größten und dem kleinsten Wert eines Datensatzes und berechnet sich als

$$x_{pk-pk} = \max(x) - \min(x). \quad 4.5$$

Der Quartilsabstand  $q_x$  ist die Differenz zwischen dem 25% und 75% Quartil einer Verteilung. Dadurch beschreibt der Quartilsabstand die Größe des Bereichs in dem die „inneren“ 50% der Datenpunkte einer Verteilung liegen. Er berechnet sich als

$$q_x = \check{x}_{0.75} - \check{x}_{0.25}. \quad 4.6$$

Die Varianz  $\sigma_x^2$  einer Verteilung ist das arithmetische Mittel der quadrierten Abweichung eines Datenpunktes  $x_i$  vom arithmetischen Mittel der Verteilung  $\bar{x}$  und wird berechnet als

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2. \quad 4.7$$

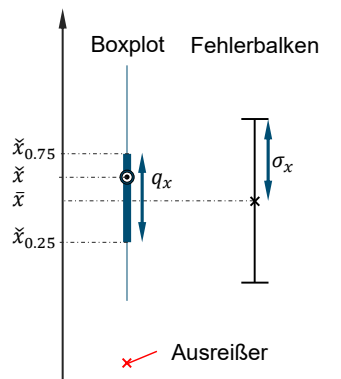
Die Standardabweichung  $\sigma_x$  einer Verteilung ist die Wurzel der Varianz  $\sigma_x^2$  und damit das quadratische Mittel der Messabweichung.

Sowohl der Quartilsabstand als auch die Standardabweichung werden zur übersichtlichen Visualisierung der Verteilung von untersuchten Daten verwendet. In Abbildung 4-6 sind dafür die unterschiedlichen Visualisierungen aufgezeigt. Median und Quartilsabstand werden mithilfe eines Boxplots dargestellt. Dabei wird der Median als Kreis abgebildet und der Quartilsabstand als dicker Balken. Der Wertebereich außerhalb des Quartilsabstandes, in dem Datenpunkte liegen, die keine Ausreißer sind, ist als dünner Balken dargestellt. Ausreißer sind als rote Kreuze dargestellt. Ein Datenpunkt gilt als Ausreißer, wenn dieser außerhalb von  $[\check{x}_{0.25} - 1.5 \cdot q_x; \check{x}_{0.75} + 1.5 \cdot q_x]$  liegt<sup>131</sup>.

---

<sup>130</sup> Kosfeld et al. (2016) S.109ff.

<sup>131</sup> Kosfeld et al. (2016) S.115f.



**Abbildung 4-6:** Visualisierung Boxplot und Fehlerbalken.  
Eigene Abbildung.

Dem Gegenüber sind das arithmetische Mittel und die Standardabweichung als Fehlerbalken dargestellt mit dem arithmetischen Mittel als Kreuz und der Standardabweichung als Bereich oberhalb und unterhalb des arithmetischen Mittels.

Wie auch die Lagemaße geben die Verteilungsmaße unterschiedliche Informationen zur Verteilung. Während der Quartilsabstand robuster ist gegenüber Ausreißern als die Standardabweichung, ist die Spannweite sensitiver als die Standardabweichung.

Bei ideal normalverteilten Datenpunkten sind der Modalwert, der Median und das arithmetische Mittel gleich. Wenn der Modalwert und der Median vom arithmetischen Mittel abweichen, spricht man von einer schiefen Verteilung. Bei einer rechtsschiefen Verteilung sind der Modalwert und der Median kleiner als das arithmetische Mittel, bei einer linksschiefen Verteilung ist der Modalwert größer als der Median und das arithmetische Mittel. Eine Bewertung der Schiefe erfolgt mit dem Schiefekoeffizienten,  $s_x$  welcher sich berechnet als

$$s_x = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^3}{\sigma_x^3}. \quad 4.8$$

Wenn der Schiefekoeffizient größer null ist, liegt Rechtsschiefe vor, wenn er kleiner null ist, liegt Linksschiefe vor<sup>132</sup>.

Die Kurtosis  $k_x$  schließlich beschreibt die Wölbung der Daten um den Mittelwert in der untersuchten Verteilung<sup>133</sup> und berechnet sich zu

<sup>132</sup> Kosfeld et al. (2016) S.132ff.

<sup>133</sup> Randall (2011) S.65f. und Fahrmeir et al. (2016) S.69.



---


$$k_x = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4}{\sigma_x^4}. \quad 4.9$$

Eine positive Kurtosis beschreibt eine spitze Verteilung mit einer höheren Anzahl der Datenpunkte an den Rändern der Verteilung. Flache Verteilungen zeichnen sich durch eine negative Kurtosis aus und die Datenpunkte liegen überwiegend in der Mitte der Verteilung.

## 4.4 Methoden der Versuchsplanung und Datenauswertung

Dieser Abschnitt beschreibt die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten statistischen Methoden der Versuchsplanung und der Datenauswertung.

### 4.4.1 Korrelationsanalyse

Die Korrelationsanalyse dient der Untersuchung der statistischen Abhängigkeit zweier Größen  $x$  und  $y$  in einem Datensatz. Zur Quantifizierung dieser Abhängigkeit kann der Korrelationskoeffizient nach BRAVAIS-PEARSON verwendet werden<sup>134</sup>, welcher sich berechnet zu

$$r_{xy} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sigma_x \cdot \sigma_y}. \quad 4.10$$

Der Korrelationskoeffizient kann dabei die Werte  $-1 \leq r_{xy} \leq 1$  annehmen. Positive Werte geben einen gleichsinnigen Zusammenhang zwischen den beiden Größen  $x$  und  $y$  an („wenn  $x$  zunimmt, so nimmt auch  $y$  zu“), negative Werte zeigen einen gegensinnigen Zusammenhang auf („wenn  $x$  zunimmt, so nimmt  $y$  ab“). Der Betrag des Korrelationskoeffizienten beschreibt die Stärke der Korrelation. Eine starke Korrelation zeigt einen annähernd linearen Zusammenhang zwischen den untersuchten Größen. Bei einer schwachen Korrelation ist dieser lineare Zusammenhang weniger gut erkennbar, weil dieser entweder nicht vorhanden (z.B. konstantes Verhalten) oder von einer Streuung in den Daten überlagert ist. Die Bewertung erfolgt anhand der Grenzwerte in Tabelle 4-4<sup>135</sup>.

Bei der Verwendung des Korrelationskoeffizienten nach BRAVAIS-PEARSON sind zwei wichtige Eigenschaften zu beachten. Zum einen ist dieser nur auf metrischen Skalen anwendbar, zum anderen quantifiziert er lineare Zusammenhänge. Aus diesen Gründen ist es oftmals zweckmäßig den Rangkorrelationskoeffizienten nach SPEARMAN zu verwenden<sup>136</sup>.

---

<sup>134</sup> Fahrmeir et al. (2016) S.126ff.

<sup>135</sup> Kosfeld et al. (2016) S.212.

<sup>136</sup> Fahrmeir et al. (2016) S.133ff.

Dieser berechnet die Korrelation der Ränge der untersuchten Größen. Der Rang eines Datenpunktes  $x_i$  wird ermittelt, indem alle Datenpunkte der Größe  $x$  in aufsteigender Reihenfolge sortiert werden mit  $x_1 \leq x_j \leq x_n$ . Der Rang der Datenpunktes  $x_i$  ist die Stelle  $j$ , an welcher der Datenpunkt sich nach der Sortierung befindet, also

$$\text{rg}(x_i) = \text{rg}(x_j) = j. \quad 4.11$$

Der SPEARMAN Rangkorrelationskoeffizient berechnet sich somit zu

$$r_{xy} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (\text{rg}(x_i) - \bar{\text{rg}}(x)) \cdot (\text{rg}(y_i) - \bar{\text{rg}}(y))}{\sigma_{\text{rg}(x)} \cdot \sigma_{\text{rg}(y)}}. \quad 4.12$$

Ebenso wie der Korrelationskoeffizient nach BRAVAIS-PEARSON nimmt auch der Rangkorrelationskoeffizient Werte zwischen -1 und 1 an. Die Korrelationsstärke darf somit analog zum Korrelationskoeffizienten nach Tabelle 4-4 interpretiert werden<sup>137</sup>. Allerdings muss beachtet werden, dass die Rangkorrelation die Monotonie des Zusammenhangs zweier Größen beschreibt. Nichtlineare Zusammenhänge zwischen den untersuchten Größen beeinflussen die Bewertung nicht, sofern sie monoton sind. Außerdem kann der Rangkorrelationskoeffizient auch an ordinalen Daten angewendet werden.

**Tabelle 4-4:** Beschreibung der Korrelationsstärke anhand des Rangkorrelationskoeffizienten.  
Quelle: Kosfeld et al. (2016)

Aussage	Betrag der Korrelation
Kein Zusammenhang	$ r  \leq 0.1$
Schwacher Zusammenhang	$0.1 <  r  \leq 0.3$
Mittlerer Zusammenhang	$0.3 <  r  \leq 0.8$
Starker Zusammenhang	$0.8 <  r  \leq 1$

Im weiteren Verlauf der Arbeit wird, sofern nicht anders angegeben, die Korrelation zwischen zwei Größen immer mit dem Rangkorrelationskoeffizienten verwendet<sup>138</sup>, da damit

<sup>137</sup> Kosfeld et al. (2016) S.217.

<sup>138</sup> Dies gilt auch dann, wenn nur der Begriff Korrelationskoeffizient verwendet wird. Abweichung werden explizit genannt.

---

auch Daten einer ordinalen Skala bewertet werden können und diese Bewertung nur die Monotonie zwischen zwei Größen bewertet.

#### 4.4.2 Hauptkomponentenanalyse

Die Hauptkomponentenanalyse (engl.: Primary Component Analysis; PCA) betrachtet die Gesamtvarianz und damit den Informationsgehalt, der in einem Datensatz unterschiedlicher Messgrößen enthalten ist<sup>139</sup>. Dabei werden Ersatzgrößen mithilfe einer Koordinatentransformation berechnet, die in absteigender Reihenfolge jeweils den größtmöglichen Anteil der Gesamtvarianz abbilden, welche noch nicht durch eine der vorhergehenden Ersatzgrößen abgebildet ist. Diese werden Hauptkomponenten genannt.

Bei der Berechnung der Hauptkomponenten wird wie folgt vorgegangen<sup>140</sup>. Für die Berechnung der Hauptkomponenten aus den untersuchten Größen müssen diese zuvor standardisiert werden nach

$$x_{s,j} := \frac{x_i - \bar{x}_j}{\sigma_{x,j}} . \quad 4.13$$

Dadurch hat jede standardisierte Größe  $x_{s,j}$  den Mittelwert  $\bar{x}_{s,j} = 0$  und die Standardabweichung  $\sigma_{x_{s,j}} = 1$ . Aus allen standardisierten Größen  $x_{s,j}$  wird die Matrix  $\mathbf{x}$  gebildet. Die Varianz von  $\mathbf{x}$  wird durch die Matrix  $\mathbf{S} = \text{Var}(\mathbf{x})$  beschrieben. Es wird die Linearkombination  $\mathbf{a}'_1 \mathbf{x}$  gesucht, für die die Varianz maximal wird, mit der Nebenbedingung, dass  $\mathbf{a}'_1 \mathbf{a}_1 = 1$  gilt. Das führt zum Optimierungsproblem

$$\max_{\mathbf{a}} (\text{Var}(\mathbf{a}'_1 \mathbf{x})) = \max_{\mathbf{a}} (\mathbf{a}'_1 \mathbf{S} \mathbf{a}_1) . \quad 4.14$$

Dieses Optimierungsproblem lässt sich auf folgendes Eigenwertproblem zurückführen

$$\mathbf{S} \mathbf{a}_1 = \lambda \mathbf{a}_1 . \quad 4.15$$

Die Lösung dieses Eigenwertproblems ergibt den größten Eigenwert  $\lambda_1$  zum Eigenvektor  $\mathbf{a}_1$ . Die Linearkombination  $\mathbf{a}'_1 \mathbf{x}$  wird als erste Hauptkomponente  $HK_1$  bezeichnet. Die zweite Hauptkomponente wird analog zur Ersten berechnet, mit der zusätzlichen Nebenbedingung  $\mathbf{a}'_2 \mathbf{a}_1 = 0$ , welche eine Orthogonalität zwischen den Eigenvektoren und damit

---

<sup>139</sup> Handl und Kuhlenkasper (2017) S.126ff.

<sup>140</sup> Für eine ausführliche Herleitung der Berechnung sei auf Handl und Kuhlenkasper (2017) S.126ff verwiesen. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Hauptkomponentenanalyse mit der Funktion `pca` in MATLAB (Mathworks (2012)) ausgeführt.

den Hauptkomponenten fordert. Alle weiteren Hauptkomponenten werden entsprechend berechnet.<sup>141</sup>

Durch die Maximierung der Varianz für jede Hauptkomponente nimmt die Varianz für jede folgende Hauptkomponente ab. Während die ersten Hauptkomponenten einen großen Anteil der Gesamtvarianz beinhalten, ist dieser bei den letzten Hauptkomponenten geringer. Es ist daher möglich, die Hauptkomponenten mit niedrigem Informationsanteil wegzulassen, und nur die Hauptkomponenten zu betrachten, die einen signifikanten Varianzanteil und damit einen signifikanten Informationsgehalt beinhalten. Als Bewertungsgröße wird dazu die Varianz der jeweiligen Hauptkomponenten verwendet. Nach JOLIFFE liegt der kritische Grenzwert der Varianz der Hauptkomponenten bei  $\lambda_{\text{Krit}} = 0.7$ <sup>142</sup>. Hauptkomponenten, die unterhalb dieses Wertes liegen, können vernachlässigt werden. Dadurch lässt sich die Anzahl der untersuchten Größen reduzieren, ohne den darin enthaltenen Informationsgehalt maßgeblich zu verändern.

#### 4.4.3 Statistische Versuchsplanung und Effektanalyse

Die Statistische Versuchsplanung wird eingesetzt, wenn der Zusammenhang zwischen unterschiedlichen Eingangsgrößen, auch Faktoren  $F_i$  genannt, mit einer oder mehreren Ausgangsgrößen  $x$  untersucht werden soll. Eine Übersicht unterschiedlicher Methoden der statistischen Versuchsplanung ist von SIEBERTZ ET AL. gegeben<sup>143</sup>, an dieser Stelle sollen die Grundlagen vorgestellt werden, die im weiteren Verlauf der Arbeit verwendet werden. Einen der einfachsten Versuchspläne stellt der vollfaktorielle Versuchsplan dar. In Rahmen dessen werden die Kombinationen aller  $N_F$  Faktoren auf allen  $N_S$  Faktorstufen durchgeführt. Als Ergebnis einer solchen Versuchsplanung lässt sich zunächst der Zusammenhang zwischen der untersuchten Ausgangsgröße und den variierten Faktoren berechnen als

$$x = \bar{x} + \sum_{i=1}^{N_F} \text{fn}(F_i) + \sum_{i=1}^{N_F-1} \sum_{j=i+1}^{N_F} \text{fn}(F_i, F_j) + \sum_{i=1}^{N_F-2} \sum_{j=i+1}^{N_F-1} \sum_{k=i+2}^{N_F} \text{fn}(F_i, F_j, F_k) \quad 4.16$$

$$\dots + \text{fn}(F_1, \dots, F_{N_F}).$$

Die Funktionen  $\text{fn}$  stellen dabei jeweils ein Polynom des Grades  $N_S - 1$  dar. Der Mittelwert aller Messungen ist  $\bar{x}$ , die Haupteffekte der untersuchten Faktoren werden mit  $\text{fn}(F_i)$  dargestellt und die übrigen Terme stellen die Effekte der Wechselwirkungen der untersuchten Faktoren dar. Die jeweiligen Modellkonstanten der Polynome werden im Rahmen der Versuchsdurchführung bestimmt, wobei die Anzahl der durchgeführten Versuchskombinationen der Anzahl der Parameter entsprechen muss. Diese berechnet sich zu

<sup>141</sup> Handl und Kuhlenkasper (2017) S.126ff.

<sup>142</sup> Jolliffe (1972) S.170.

<sup>143</sup> Vgl. Siebertz et al. (2017).

$$N_M = N_S^{N_F}. \quad 4.17$$

Es ist erkennbar, dass mit zunehmender Anzahl untersuchter Faktoren  $N_F$  sowie mit zunehmender Anzahl untersuchter Faktorstufen  $N_S$  der Versuchsumfang exponentiell ansteigt. Für eine effiziente Untersuchung des Zusammenhangs zwischen der untersuchten Größe sowie den betrachteten Faktoren wird folgende Anpassungen im Versuchsplan durchgeführt. Zunächst einmal ist es für eine Untersuchung, ob ein Faktor oder eine Wechselwirkung von Faktoren einen Effekt auf die untersuchte Größe einen signifikanten Effekt ausübt ausreichend, diesen in zwei Faktorstufen zu untersuchen. Zudem kann angenommen werden, dass vor allem die Haupteffekte und die Wechselwirkungen zwischen zwei Faktoren den stärksten Einfluss auf die Ausgangsgröße haben und die Wechselwirkungen höherer Ordnung zunächst vernachlässigt werden können<sup>144</sup>. Durch diese Vereinfachungen entsteht der teilfaktorielle Versuchsplan (oft auch als Screening Versuchsplan bezeichnet), der den Zusammenhang zwischen Ausgangsgröße und den Faktoren wie folgt beschreibt

$$x = \bar{x} + \sum_{i=1}^{N_F} \frac{E_i}{2} \cdot F_i + \sum_{i=1}^{N_F-1} \sum_{j=i+1}^{N_F} \frac{E_{i,j}}{2} \cdot F_i \cdot F_j. \quad 4.18$$

Der Effekt  $E_i$  eines einzelnen Faktors  $F_i$  wird so durch einen einzelnen Parameter ausgedrückt, welcher sich berechnet als die Differenz des Mittelwertes von  $x$  aller Versuche der höheren Faktorstufe  $\bar{x}(F_{i,+})$  und aller Versuche der niedrigeren Faktorstufe  $\bar{x}(F_{i,-})$ .

$$\text{fn}(F_i) = E_i = \bar{x}(F_{i,+}) - \bar{x}(F_{i,-}). \quad 4.19$$

#### 4.4.4 Varianzanalyse

Nachdem im vorherigen Abschnitt gezeigt wurde, wie aus einem Versuchsplan Effekte einzelner Faktoren ermittelt werden, wird in diesem Abschnitt mithilfe der Varianzanalyse geprüft, ob es sich bei den untersuchten Effekten auch um wahre Effekte handelt. Effekte, die nicht wahr sind, können bei der Erstellung des Modells in Gleichung 4.18 vernachlässigt werden und vereinfachen so dieses Modell. Dieses Verfahren ist ein Standardverfahren zur statistischen Datenauswertung und Bestandteil gängiger Software zur Datenauswertung<sup>145</sup>. Insofern wird an dieser Stelle nur eine kurze Zusammenfassung der Funktionsweise der Varianzanalyse vorgestellt und für eine ausführliche Herleitung auf die vorab zitierten Quellen verwiesen<sup>146</sup>.

<sup>144</sup> Siebertz et al. (2017) S.28ff.

<sup>145</sup> Mathworks (2006a).

<sup>146</sup> Siebertz et al. (2017) S.73ff und S.111ff; Fahrmeir et al. (2016) S.477ff.

Das Ziel der Varianzanalyse ist es, zu untersuchen, welcher Anteil der Gesamtvarianz einer untersuchten Ausgangsgröße durch den Effekt eines Versuchsfaktors erklärbar ist und wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, dass es sich bei diesem Effekt um einen zufälligen Effekt handelt. Der dafür verwendete Kennwert wird als „Sum of Squares between Groups“  $SSB_i$  bezeichnet und berechnet sich als

$$SSB_i = N_+ \cdot (\bar{x}(F_{i,+}) - \bar{x})^2 + N_- \cdot (\bar{x}(F_{i,-}) - \bar{x})^2. \quad 4.20$$

$N_+$  und  $N_-$  ist die Anzahl der Versuche auf der jeweiligen Stufe. Diese Gleichung gilt nur für einen zweistufigen Versuchsplan. Bei mehreren Stufen muss der Term entsprechend erweitert werden.  $SSB_i$  beschreibt damit die Varianz, die durch die Variation des Faktors  $F_i$  entsteht. Die Gesamtvarianz wird über die „Total Sum of Squares“  $TSS$  abgebildet, welche berechnet wird als

$$TSS = \sigma_x^2. \quad 4.21$$

Über die Differenz  $SSW$ , die sich sich berechnet als

$$SSW = TSS - \sum_{i=1}^N SSB_i, \quad 4.22$$

wird der Anteil der Varianz beschrieben, der nicht durch die  $N$  betrachteten Effekte beschrieben wird. Somit wird diese Größe auch als Fehler (engl. Error) bezeichnet. Die Größen  $SSB$  und  $SSW$  werden durch die Anzahl der Freiheitsgrade  $DF$  geteilt, über die die entsprechende Größe verfügt. Ein Modellparameter, also ein Faktor oder eine Wechselwirkung von Faktoren, mit zwei Stufen verfügt über einen Freiheitsgrad, ein Versuchsplan mit 16 Versuchen verfügt über insgesamt 15 Freiheitsgrade. Die Differenz zwischen den Freiheitsgraden des Versuchsplans und aller berücksichtigter Modellparameter werden dem Fehler zugeordnet. Diese Quotienten aus  $SSB$  und  $SSW$  sowie der dazugehörigen Freiheitsgrade werden als „Mean Square“  $MS$  bezeichnet. Um die Wirkung eines Faktors ins Verhältnis zum Fehler zu setzen, werden die Mean Squares aus  $SSB$  und  $SSW$  ins Verhältnis gesetzt und damit der  $f$ -Quotient des Faktors  $F_i$  berechnet, also

$$f = \frac{MS(SSW_i)}{MS(SSB)}. \quad 4.23$$

Anschließend wird die Hypothese geprüft, dass der untersuchte Effekt mit einem bestimmten  $f$ -Quotienten ein zufälliger Effekt ist. Die Wahrscheinlichkeit, dass diese Hypothese stimmt, wird anhand der FISHER-Verteilung ermittelt. Die berechnete Wahrscheinlichkeit wird mit einem definierten Signifikanzniveau abgeglichen. Wenn die berechnete Wahrscheinlichkeit unter diesem Niveau liegt, kann die Hypothese eines zufälligen Effektes verworfen werden. Effekte, für die diese Hypothese nicht verworfen werden kann, werden als zufällige Effekte behandelt und iterativ aus der weiteren Betrachtung ausgeschlossen. Dabei kann es vorkommen, dass Effekte, die vor dem Entfernen eines anderen Effektes als

---

nicht zufällig angesehen wurden, nach dem Entfernen als zufällig gelten, da beim Verändern eines Effektes dessen Freiheitsgrad und dessen  $SSW$  dem Fehler zugerechnet werden und sich daher das  $MS(SSB)$ , der  $F$ -Quotient und schließlich auch das Ergebnis des Hypothesentests für die übrigen Effekte verändert. Das Ergebnis der Varianzanalyse wird in tabellarischer Form dargestellt, üblicherweise als ANOVA-Tabelle (aus dem Englischen: Analysis of Variance) bezeichnet.

## 4.5 Grundlagen der Oberflächenanalyse

In diesem Abschnitt werden die Eigenschaften zur normierten Beschreibung der Oberflächen vorgestellt.<sup>147</sup> Dabei werden die Messgrößen hinsichtlich der Ordnung der Formabweichung sowie hinsichtlich der betrachteten Dimension unterschieden. Eine Auflistung aller genutzten Oberflächeneigenschaften sowie deren Definition ist in Anhang A4 nachzuschlagen.

### 4.5.1 Ordnung der Formabweichung





In der Verwendung von Oberflächeneigenschaften wird zwischen unterschiedlichen Ordnungen differenziert. Diese Ordnungen beschreiben die Größe der untersuchten Gestaltabweichung. In Abbildung 4-7 sind die unterschiedlichen Ordnungen sowie Beispiele und Entstehungsarten dargestellt.<sup>148</sup> Es wird dabei zwischen Formabweichungen (1. Ordnung), Welligkeit (2. Ordnung), Rauheit (3. bis 5. Ordnung) sowie dem Gitteraufbau des Werkstoffs (6. Ordnung) unterschieden. Gestaltabweichungen 1. Ordnung sind dabei durch die Betrachtung der gesamten Oberfläche erkennbar, während Abweichungen der 2 bis 5. Ordnung an einem Flächenelement der vermessenen Oberfläche bestimmt werden. Als Abgrenzung zwischen den Ordnungen 2 bis 5 werden Verhältnisse zwischen Wellenabstand zu Wellentiefe von 1000:1 bis 100:1 für Welligkeit bzw. 100:1 bis 5:1 für Rauheit genannt.<sup>149</sup>

---

<sup>147</sup> Basierend auf den Definitionen in DIN EN ISO 4287 (2010) und DIN EN ISO 25178-2 (2012).

<sup>148</sup> vgl. DIN 4760 (1982) S.2.

<sup>149</sup> vgl. DIN 4760 (1982) S.1.

Gestaltabweichung (als Profilschnitt überhöht dargestellt)	Beispiele für die Art der Abweichung	Beispiele für die Entstehungsursache
1. Ordnung: Formabweichungen 	Geradheits-, Ebenheits-, Rundheits- Abweichung, u.a.	Fehler in den Führungen der Werkzeugmaschine, Durchbiegung der Maschine oder des Werkstückes, falsche Einspannung des Werkstückes, Härteverzug, Verschleiß
2. Ordnung: Welligkeit 	Wellen (siehe DIN 4761)	Außermittige Einspannung, Form- oder Laufabweichungen eines Fräasers, Schwingungen der Werkzeugmaschine oder des Werkzeuges.
3. Ordnung: Rauheit 	Rillen (siehe DIN 4761)	Form der Werkzeugschneide, Vorschub oder Zustellung des Werkzeuges
4. Ordnung: Rauheit 	Riefen Schuppen Kuppen (siehe DIN 4761)	Vorgang der Spanbildung (Reißspan, Scherspan, Aufbauschneide), Werkstoffverformung beim Strahlen, Knospenbildung bei galvanischer Behandlung
5. Ordnung: Rauheit Anmerkung: nicht mehr in einfacher Weise bildlich darstellbar	Gefügestruktur	Kristallisationsvorgänge, Veränderung der Oberfläche durch chemische Einwirkung (z.B. Beizen), Korrosionsvorgänge
6. Ordnung: Anmerkung: nicht mehr in einfacher Weise bildlich darstellbar	Gitteraufbau des Werkstoffes	

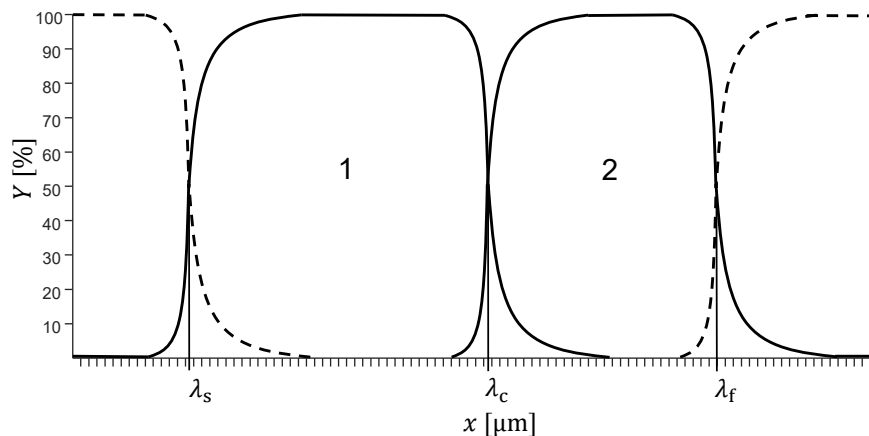
**Abbildung 4-7:** Ordnungssystem für Gestaltabweichungen  
Eigene Darstellung nach (DIN 4760 (1982)) S.2.

In DIN EN ISO 4287 werden die unterschiedlichen Formabweichungen durch Profilfilterung des Primärprofils mit Bandpassfiltern unterschiedlicher Grenzwellenlängen definiert. Der Bereich der Welligkeit ist dabei zwischen den Wellenlängen  $\lambda_s$  und  $\lambda_c$  definiert, wohingegen die Rauheit zwischen den Wellenlängen  $\lambda_c$  und  $\lambda_f$  liegt.<sup>150</sup> In Abbildung 4-8 ist die Übertragungscharakteristik der Filter dargestellt. Die Filter sind dabei als Gaußfilter nach DIN EN ISO 16610-21 definiert<sup>151</sup>. Die Grenzwellenlängen stellen Wellenlängen dar, bei denen die Übertragungsfunktion den Wert 0.5 annimmt.

<sup>150</sup> vgl. DIN EN ISO 4287 (2010) S.6f.

<sup>151</sup> vgl. DIN EN ISO 16610-21 (2013).





**Abbildung 4-8:** Übertragungscharakteristik für das Rauheits- und Welligkeitsprofil  
Quelle: DIN EN ISO 4287 S.7, überarbeitet.

#### 4.5.2 Bezeichnung der verwendeten Oberflächeneigenschaften

Je nach Prüf- und Auswerteverfahren werden Oberflächeneigenschaften aus ein oder zweidimensionalen Auswertebereichen der Oberfläche berechnet. Diese Information, der verwendete Filter, sowie das genutzte Auswerteverfahren ist in der Bezeichnung der Oberflächeneigenschaft hinterlegt. So wird bspw. für die Berechnung der mittleren arithmetischen Rauheit  $R_a$  ein eindimensionales Oberflächenprofil verwendet. Dieses wird zunächst mit einem Bandpassfilter mit den Grenzwellenlängen  $\lambda_c$  und  $\lambda_f$  gefiltert. Anschließend wird für das Profil das arithmetische Mittel als statistische Auswertemethode angewendet.

Eindimensionale Oberflächeneigenschaften werden nach DIN EN ISO 4287 entsprechend dem zuvor verwendeten Filter bezeichnet. Eigenschaften des Primärprofils werden mit  $P_i$  bezeichnet,  $W_i$  beschreibt Eigenschaften des Welligkeitsprofils und  $R_i$  die Eigenschaften des Rauheitsprofils<sup>152</sup>. Nach DIN EN ISO 25178-2 wird eine derartige Unterscheidung für zweidimensionale Oberflächeneigenschaften nicht verwendet. Stattdessen werden Höhenparameter mit  $S_i$  und Volumenparameter mit  $V_i$  bezeichnet<sup>153</sup>. Um die verwendete Filterung an den Eigenschaften zu erkennen, werden diese daher um einen weiteren Index ergänzt. So beschreibt beispielsweise  $S_{i,j}$  den Kennwert  $S_i$  mit der Filterung  $j$ , wobei  $j$  je nach verwendeter Filterung mit  $P$ ,  $W$  oder  $R$  ersetzt wird. Der Index  $i$  beschreibt das im Anschluss an die Filterung verwendete Auswerteverfahren zur Berechnung der Oberflächeneigenschaft. Eine Übersicht der verwendeten Auswerteverfahren ist in Anhang A5 gegeben.

<sup>152</sup> vgl. DIN EN ISO 4287 (2010) S.9.

<sup>153</sup> vgl. DIN EN ISO 25178-2 (2012).



---

## 5 Experimentelle Untersuchungen

In diesem Kapitel werden der Aufbau und die Durchführung der Versuche beschrieben sowie die damit erzielten Ergebnisse vorgestellt.

### 5.1 Versuchsplanung

Zunächst wird beschrieben, welche Faktoren im Rahmen der durchgeführten Versuchsreihe untersucht werden sollen. Anschließend wird daraus der Versuchsplan basierend auf Abschnitt 4.4.3 abgeleitet und darauf aufbauend der Versuchsablauf vorgestellt. Zuletzt wird das Vorgehen der Oberflächenuntersuchung im Detail vorgestellt.

#### 5.1.1 Definition der Versuchsfaktoren und Versuchsparameter

Als erstes müssen die Versuchsfaktoren sowie die entsprechenden Faktorstufen definiert werden, die im Rahmen der Untersuchungen variiert werden sollen. Alle Größen, die nicht als Faktoren im Rahmen der Versuchsreihe variiert werden, stellen Versuchsparameter dar und müssen über alle Versuche möglichst konstant gehalten werden. Alle Größen, die weder aktiv gestellt werden noch konstant gehalten werden können, sind als Störgrößen zu überwachen.

In Tabelle 5-1 ist eine Übersicht von Einflüssen dargestellt, welche direkt am Wälzlagerprüfstand eingestellt werden können und welche die Entstehung und den Fortschritt elektrischer Lagerschädigung beeinflussen. Ein Beispiel hierfür ist die Schmierfilmdicke, welche die elektrische Schädigung beeinflusst<sup>154</sup>. Diese kann nicht direkt eingestellt werden, sondern ergibt sich aus der Wechselwirkung der Größen Lagertyp, Lagergröße, Lagerlast, Schmierstoff, Betriebstemperatur und Drehzahl. Zudem ist zu beachten, dass sich die einzelnen Einflüsse jeweils aus mehreren Größen zusammensetzen. So kann der Einfluss der Schmierung weiter unterteilt werden in die Art des Schmierstoffs (Öl- oder Fettschmierung), die Basisviskosität, die chemische Zusammensetzung, die beigemischten Additive sowie mögliche Verschmutzungs- und Alterungseffekte. Jeder dieser Effekte kann wiederum die elektrische Lagerschädigung beeinflussen<sup>155</sup>.

Zunächst sollen aus den in Tabelle 5-1 zusammengefassten Einflüssen, diejenigen hervorgehoben werden, die im Rahmen der durchgeführten Versuchsreihe nicht variiert werden und somit konstante Versuchsparameter darstellen. Dies geschieht anhand des übergeordneten Zieles dieser Arbeit sowie der darauf aufbauenden Forschungsfragen (vgl. Abschnitte 3.1 und 3.2). Der erste konstante Parameter ist der verwendete Lagertyp. Obwohl eine allgemeine Schadensskala, wenn diese einen praktischen Mehrwert bieten soll, unabhängig vom betrachteten Wälzlager gelten muss, wird im Rahmen dieser Arbeit nur ein

---

<sup>154</sup> Vgl. Radnai et al. (2015).

<sup>155</sup> Vgl. Bechev et al. (2020).

spezieller Lagertyp eines Lagerherstellers untersucht. Dadurch reduzieren sich mögliche Unsicherheiten hinsichtlich unterschiedlicher Lagergeometrien, Oberflächenbeschaffenheiten, Anzahl, Größe und Form der Wälzkörper sowie der Zusammensetzung der Stähle der Lagerringe und Wälzkörper. Alle im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Lager sind Axialrillenkugellager vom Lagertyp 51305 der *Schaeffler AG* (siehe Anhang A3). Obwohl axiale Rillenkugellager kaum Verwendung in elektrischen Antriebsmaschinen finden, bieten sich diese für Prüfstandsversuche im Kontext der Untersuchung elektrischer Oberflächenschäden an. Das liegt zum einen daran, dass sich die beiden Lagerringe und der Käfig mit den Wälzkörpern zerstörungsfrei trennen und wieder zusammenfügen lassen. Zum anderen sind die Laufbahnoberflächen plan auf den Lagerringen orientiert und dadurch für optische Oberflächenmesstechnik im Vergleich zu radialen Lagerbauformen gut zugänglich. Daher wurden diese schon in früheren Arbeiten zur Untersuchung elektrischer Oberflächenschädigung verwendet<sup>156</sup>.

**Tabelle 5-1:** Mögliche Einflüsse auf das Auftreten und Fortschreiten elektrischer Lagerschädigung.

Einfluss		
Lagertyp	Schmierung	Elektrische Spannung
Lagerlast	Betriebstemperatur	Signalfrequenz
Drehzahl	Elektrischer Lagerstrom	Signalart

Der im Lager verwendete Schmierstoff hat einen signifikanten Einfluss auf die elektrische Lagerschädigung<sup>157</sup>. Der Einfluss der Alterung des Schmierstoffs kann reduziert werden, wenn die Menge des verwendeten Schmierstoffs deutlich höher ist als für die Schmierung des Lagers benötigt. Dies kann bspw. mithilfe einer Umlaufschmierung umgesetzt werden, wie sie am Wälzlagerprüfstand vorhanden ist. Der im Prüfstand zirkulierende Schmierstoff ist deutlich mehr, als für die Schmierung der Lager benötigt werden. Zudem werden über einen Filter im Schmierungskreislauf sichergestellt, dass mögliche Verschmutzungen im Schmierstoff den Versuch nicht beeinträchtigen. Bei einem derartigen Aufbau erhöht sich die Unsicherheit sowie der zeitliche und wirtschaftliche Aufwand, wenn der verwendete Schmierstoff bzw. die verwendeten Additive in der Versuchsreihe variiert werden. So muss

<sup>156</sup> Vgl. Zika et al. (2009a); Zika et al. (2009b) oder Graf und Sauer (2020).

<sup>157</sup> Vgl. Bechev et al. (2020).

---

sichergestellt werden, dass alle Komponenten des Schmierstoffkreislaufs gründlich gereinigt werden, damit der Schmierstoff und die Additive des vorherigen Versuchs den darauffolgenden Versuch nicht beeinflussen. Da die Untersuchung des Einflusses der Schmierstoffeigenschaften nicht das primäre Ziel dieser Arbeit ist, wird im Sinne des Robust Design<sup>158</sup> entschieden, diese Unsicherheit zu eliminieren. Für alle Versuche wird das Referenzöl FVA 3 (siehe Anhang A4) ohne Variation der Additive im Schmierstoff genutzt.

Die Temperatur, bei der das Lager betrieben wird, beeinflusst aufgrund der damit zusammenhängenden Änderung der Schmierfilmdicke ebenfalls die elektrische Lagerschädigung<sup>159</sup>. Die Schmierfilmdicke kann jedoch auch mithilfe der Variation der Drehzahl verändert werden. Dabei erfolgt die Variation der Drehzahl am Prüfstand deutlich schneller als die der Temperatur. Darüber hinaus müssen bei einer Variation der Temperatur thermische Effekte im Prüfstand berücksichtigt werden (bspw. Passungsänderung infolge unterschiedlicher Wärmeausdehnungskoeffizienten der verwendeten Werkstoffe). Diese Unsicherheiten werden somit ebenfalls eliminiert, indem die Temperatur über alle Versuche konstant gehalten wird. Als Versuchstemperatur wird  $\vartheta = 40^\circ\text{C}$  verwendet, da dies gleichzeitig eine Referenztemperatur für Schmierstoffe ist.

Schließlich muss bei der Definition der Versuchsfaktoren berücksichtigt werden, dass das Verhältnis aus Spannung und Strom über die elektrische Impedanz des Wälzlagers

$$Z_L = \frac{U_L}{I_L}, \quad 5.1$$

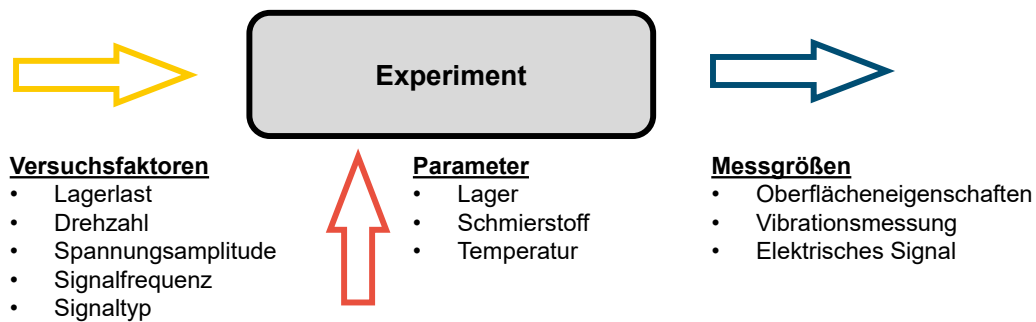
gekoppelt ist. Diese ist wiederum unter anderem von den wirkenden Betriebsparametern (Drehzahl und mechanische Last) abhängig. Somit können nur zwei der drei Größen eingestellt werden. Die dritte Größe ist nicht unabhängig veränderbar. Im Rahmen dieser Arbeit wird die elektrische Spannung sowie die Impedanz des Lagers (indirekt über die Variation der Betriebsparameter) verändert. Der Lagerstrom stellt eine Messgröße dar.

Somit lassen sich die vorab beschriebenen Einflüsse innerhalb der Versuchsreihe nach Abbildung 5-1 einordnen. Die Lagerlast, die Drehzahl, die Amplitude sowie die Frequenz und der Typ des anliegenden elektrischen Signals sind die Versuchsfaktoren, die variiert werden. Das verwendete Lagertyp, Schmierstoff sowie die Betriebstemperatur werden nicht verändert. Die Oberflächeneigenschaften, die Vibrationen an der Prüfkammer sowie die elektrischen Signale sind die Messgrößen der Versuchsreihe.

---

<sup>158</sup> Mathias (2015) S.104.

<sup>159</sup> Gonda et al. (2019) S.3.



**Abbildung 5-1:** Faktoren, Parameter und Messgrößen der Versuchsreihe.

## 5.1.2 Versuchsplanung

Nachdem im vorherigen Abschnitt festgelegt wurde, welche Faktoren untersucht werden, wird in diesem Abschnitt definiert, wie oft und im welchem Wertebereich jeder Faktor variiert werden soll. Als Versuchsplan wird ein teilfaktorieller Versuchsplan mit jeweils zwei Faktorstufen pro Faktor und insgesamt 16 untersuchten Kombinationen gewählt<sup>160</sup>. Ein solcher Versuchsplan erlaubt die Untersuchung der Effekte der einzelnen Faktorstufen sowie deren direkte Wechselwirkungen (Zweifachwechselwirkungen). Ein solcher Versuchsplan eignet sich zum Screening der Faktoren, also der Identifikation vorhandener Effekte zwischen den Versuchsfaktoren und den Messgrößen.

Die Anzahl der Wiederholungen pro Faktorstufe und damit der gesamte Versuchsumfang wird in Abhängigkeit des Verhältnisses aus erwarteter Effektstärke und Varianz der Messgrößen festgelegt<sup>161</sup>. Mit einem Versuchsplan aus je zwei Stufen pro Faktor und mehr als sieben Wiederholungen pro Faktorstufe ist es möglich, einen Effekt mit der doppelten Effektstärke der Standardabweichung mit einer 90% Wahrscheinlichkeit als wahr zu identifizieren. Die Wahrscheinlichkeit einen scheinbaren Effekt als wahr zu identifizieren liegt in dieser Größenordnung bei 5%<sup>162</sup>. Die Varianz der elektrischen Schädigung sowie die Effektstärken der untersuchten Versuchsfaktoren und deren Wechselwirkungen in der gegebenen Versuchsanordnung wurden bisher nicht quantifiziert. Daher wird die Wahrscheinlichkeit, wahre Effekte zu erkennen, als ausreichend hoch und die Wahrscheinlichkeit, falsche Effekte als wahr zu erkennen, als ausreichend gering eingestuft.

<sup>160</sup> Vgl. Siebertz et al. (2017) S.31.

<sup>161</sup> Siebertz et al. (2017) S.128ff.

<sup>162</sup> Siebertz et al. (2017) S.131.

Im nächsten Schritt müssen die Stufen für die jeweiligen Faktoren definiert werden, welche im Rahmen der Versuchsdurchführung variiert werden. Die mechanischen Versuchsfaktoren orientieren sich an den Werten in der Arbeit von ZIKA ET AL., in welcher ebenfalls Untersuchungen an baugleichen Lagern durchgeführt wurden. Darin werden die Lager bei einer Axiallast von  $F_{Ax} = 1400 \text{ N}$  und einer Drehzahl von  $n = 1000 \text{ min}^{-1}$  betrieben<sup>163</sup>. In dieser Arbeit wird die Axiallast zwischen  $F_{Ax} = 1000 \text{ N}$  und  $F_{Ax} = 3500 \text{ N}$  und die Drehzahl zwischen  $n = 500 \text{ min}^{-1}$  und  $n = 2500 \text{ min}^{-1}$  variiert. Sie liegen somit in einem vergleichbaren Wertebereich. Die daraus resultierenden mechanischen Betriebsgrößen des Lages sind Anhang A6 zu entnehmen.

Basierend auf den bisherigen Untersuchungen zu elektrischen Lagerschäden ist bekannt, dass am verwendeten Wälzlagerprüfstand schon im mittleren einstelligen Voltbereich eine elektrische Schädigung der Wälzlageroberflächen erfolgt<sup>164</sup>. Das liegt daran, dass dieser anstelle von kurzzeitigen EDM-Entladungen Rotor-Erd-Ströme nachbildet. Somit wird die Grenze für die anliegende Spannung zwischen  $\hat{U} = 2.5 \text{ V}$  und  $\hat{U} = 5 \text{ V}$  gelegt. Die Frequenz der Wechselspannung wird zwischen  $f_{el} = 5000 \text{ Hz}$  und  $f_{el} = 20000 \text{ Hz}$  variiert. In der Signalform wird zwischen einem Sinus- und einem Rechtecksignal unterschieden.

Die Faktorstufen sind in Tabelle 5-2 zusammengefasst. Der vollständige Versuchsplan ist Anhang A7 zu entnehmen. Die einzelnen Versuche werden mit V01 bis V16 bezeichnet.

**Tabelle 5-2:** Faktorstufen des Versuchsplans.

Faktor	Einheit	-	+
Lagerlast $F_{Ax}$	N	1000	3500
Drehzahl $n$	$\text{min}^{-1}$	500	2500
Elektrische Spannung $\hat{U}$	V	2.5	5
Signalfrequenz $f_{el}$	Hz	5000	20000
Signaltyp	–	Rechteck	Sinus

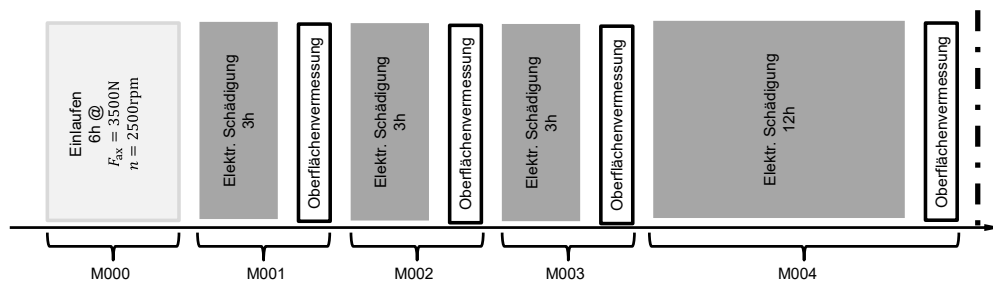
### 5.1.3 Versuchsablauf

Alle in dieser Versuchsreihe durchgeführten Versuche folgen dem in Abbildung 5-2 dargestellten Ablauf. Zu Beginn wird jeder Versuch 6 Stunden lang eingelaufen. Dabei werden

<sup>163</sup> Zika et al. (2009b) S.790.

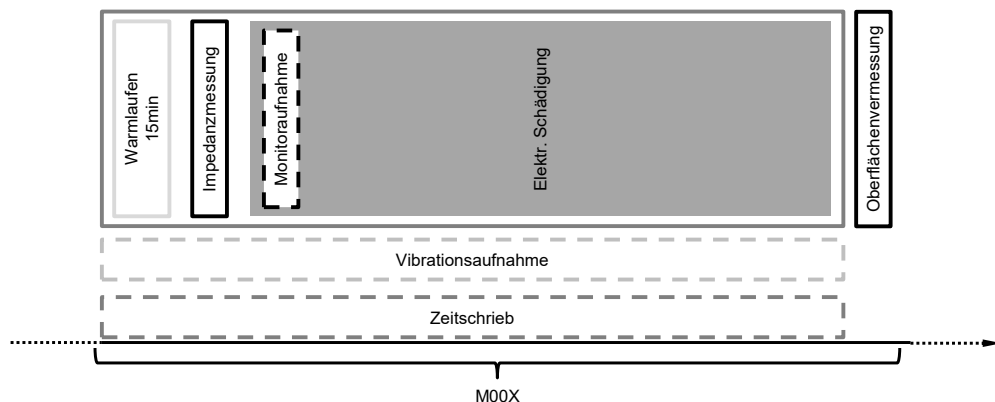
<sup>164</sup> Harder et al. (2021).

die Lager auf der hohen mechanischen Last- und Drehzahlstufe betrieben, während keine elektrische Last anliegt. Dadurch werden Rauheiten auf den Wälzoberflächen geglättet und somit vergleichbare Startbedingungen für die folgenden Untersuchungen geschaffen. Diese Versuchsphase wird M000 bezeichnet. Anschließend wird das Lager in vier Phasen M001 bis M004 elektrisch geschädigt. Die Phasen M001 bis M003 haben eine geplante Dauer von 3 Stunden, Phase M004 hat eine geplante Dauer von 12 Stunden. Wenn die am Prüfstand vorab eingestellten Grenzwerte überschritten werden, wird die Schädigungsphase vorzeitig beendet. Im Anschluss an jede Schädigungsphase erfolgt die Untersuchung der Laufbahnoberfläche.



**Abbildung 5-2:** Zeitlicher Versuchsablauf.  
Quelle: Harder et al. (2022). S.5.

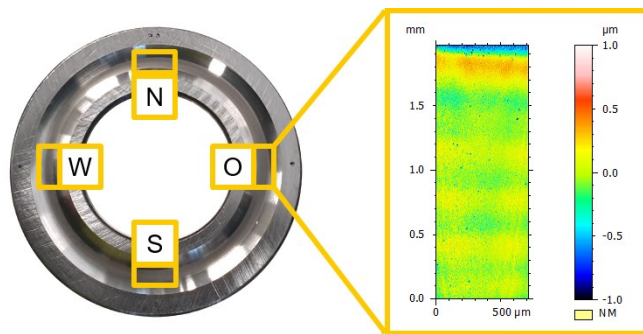
Alle Versuchsphasen werden nach dem in Abbildung 5-3 dargestellten Ablauf durchgeführt. Zuerst läuft das Lager 15 Minuten lang bei der eingestellten mechanischen Last, bis das Lager die Solltemperatur besitzt. In dieser Phase liegt keine elektrische Last an. Die elektrische Impedanz wird gemessen. Daraufhin wird die elektrische Last eingeschaltet und mehrere hochfrequente Messungen der elektrischen Spannung und des Stroms durchgeführt. Während der gesamten Versuchsphase werden die Vibrationen der Prüfkammer gemessen. Zudem wird während der gesamten Versuchsphase ein Zeitschrieb erstellt, in dem alle Daten der prüfstandsinternen Zustandsüberwachung abgespeichert sind.



**Abbildung 5-3:** Zeitlicher Ablauf aller Versuchsphasen.



Die Untersuchung der Laufbahnoberflächen wird nach jeder Schädigungsperiode durchgeführt. Mithilfe des Weißlichtinterferometers erfolgt eine Aufnahme vier definierter Messstellen in jeweils 90° Versatz<sup>165</sup>. Diese Messstellen werden analog zum Kompass mit „N“, „O“, „S“ und „W“ bezeichnet. Der Bereich „N“ ist dabei durch zwei Punkte markiert, die übrigen Positionen sind mit jeweils einem Punkt markiert. In Abbildung 5-4 ist exemplarisch ein Lagerring mit den entsprechenden Messstellen und Bezeichnungen dargestellt. Jede Aufnahme ist dabei  $2.1 \times 0.7 \text{ mm}^2$  groß. Alle untersuchten Laufbahnoberflächen werden fotografiert sowie eine Replikat der Oberfläche erstellt.



**Abbildung 5-4:** Untersuchte Bereiche der Laufbahnoberfläche  
Quelle: Harder et al. (2022) S.5.

## 5.2 Versuchsergebnisse

Die im vorherigen Abschnitt beschriebene Versuchsreihe besteht aus 16 Versuchen. Diese werden mit Versuch V01W<sup>166</sup> bis V16 bezeichnet. Alle Versuchsdaten sind veröffentlicht<sup>167,168</sup>. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird der Versuch V09 repräsentativ genutzt, um die Ergebnisse der durchgeführten Auswertung zu visualisieren, da dieser den kontinuierlichen elektrischen Schädigungsfortschritt sehr gut darstellt.

<sup>165</sup> Durch die Markierung ist es möglich, die gleichen Bereichen wiederholt zu messen. Beim direkten Vergleich zwischen zwei Abbildungen gleicher Bereiche sei jedoch zu bedenken, dass diese nicht exakt dieselben Punkte der Laufbahnoberfläche darstellen.

<sup>166</sup> Die Versuche V01, V03 und V06 wurden im Verlauf der Messreihe wiederholt, die Wiederholungen werden entsprechend V01W, V03W und V06W bezeichnet. Grund für die Wiederholung sind jeweils falsche elektrische Signale, in V01 und V03 wurde eine zu hohe Spannung angelegt, in Versuch V06 gab es einen Fehler in der Kontaktierung, durch welchen der Versuch phasenweise ohne elektrische Schädigung durchgeführt wurde.

<sup>167</sup> Harder und Kirchner (2022a) und Harder und Kirchner (2022b).

<sup>168</sup> Im Rahmen der durchgeführten Versuche wurde, wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, die Impedanz der Lager gemessen. Diese Messdaten wurden in den weiteren Auswertungen nicht weiter genutzt, weswegen sie in diesem Abschnitt nicht näher betrachtet werden. Die Messdaten sind ebenfalls von Harder und Kirchner (2022b) veröffentlicht und stehen der wissenschaftlichen Gemeinschaft für weitere Auswertungen zur Verfügung.

---

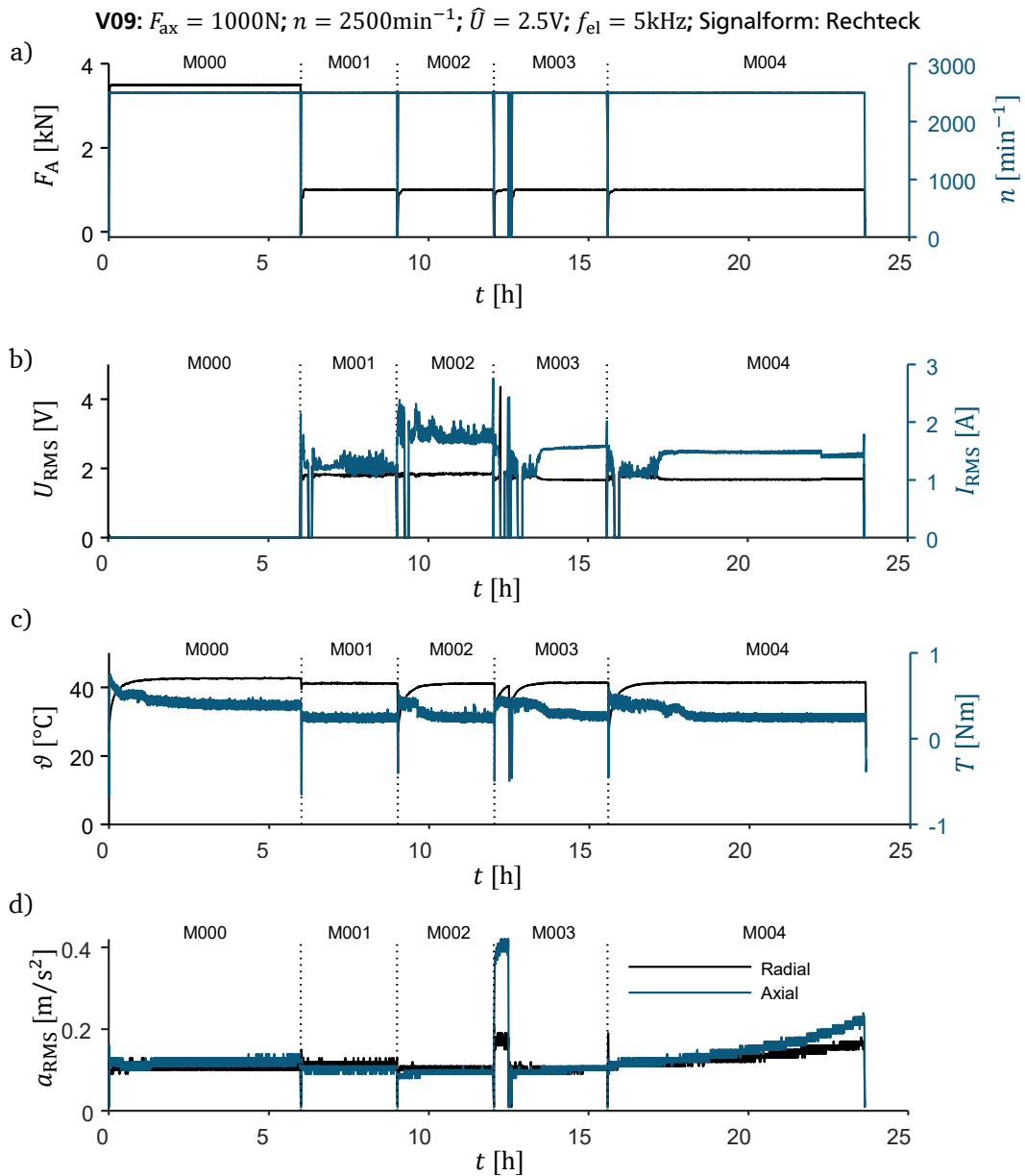
In Abbildung 5-5 sind die zeitlichen Verläufe der Last und der Drehzahl (a), der Effektivwerte der Spannung und des Stromes (b), der Temperatur und des Drehmomentes (c) sowie der Effektivwerte der radialen und axialen Vibration (d) des Versuchs V09 dargestellt. Die einzelnen Phasen M000 bis M004 sind durch vertikale punktierte Linien voneinander abgegrenzt. Im Verlauf der anliegenden Last ist der Übergang zwischen der Einlauf- und der Schädigungsphase durch einen Sprung erkennbar. Ansonsten verlaufen Kraft und Drehzahl zeitlich konstant. Der Effektivwert der anliegenden Spannung ist in den Phasen elektrischer Schädigung ebenfalls annähernd konstant. Bei dem Effektivwert des Stroms lassen sich zwischen den verschiedenen Schädigungsphasen Sprünge erkennen. Ein Grund für die Sprünge könnten Abweichungen in der Montage sein, die zu einer Änderung der Einbauposition führen. Zudem ist in den Phasen M001 und M002 ein deutliches Rauschen im Effektivwert erkennbar, welches in den Phasen M003 und M004 abnimmt. Der Verlauf der Temperatur und des Drehmomentes zeigt ein Einschwingverhalten, wobei der Verlauf des Drehmomentes mit dem Verlauf der Temperatur begründet werden kann. Durch das Aufwärmen des Lagers im Betrieb sinkt die Viskosität des Schmierstoffs. Damit nimmt die Reibung im Lager und infolgedessen das Widerstandsmoment am Motor ab. Im Verlauf der Vibrationen lässt sich ein hoher Ausschlag zu Beginn von M003 erkennen. Dieser ist auf einen Fehler in der Montage des Schleifringes zurückzuführen. Nach der Behebung des Fehlers liegt die Vibration im gleichen Bereich wie in Phase M002. Im Verlauf von M004 ist ein Anstieg der radialen und axialen Vibration erkennbar. Bedingt durch den Vibrationsanstieg wurden die Abschaltkriterien des Prüfstandes ausgelöst, wodurch die Versuchsphase M004 nach ca. 8 Stunden beendet wurde.

Die übrigen Versuche zeigen einen vergleichbaren zeitlichen Verlauf. Es kommt bei Versuchen mit niedriger Spannung  $\hat{U}$  mehrfach vor, dass zuerst kein Strom fließt und ein Initialdurchschlag mithilfe einer mehrere Sekunden lang andauernden Spannungsüberhöhung, ausgelöst werden muss<sup>169</sup>. Diese sind in den zeitlichen Verläufen als hohe Spannungsspitzen erkennbar.

Als nächstes werden die Änderungen der Laufbahnoberflächen betrachtet. Dazu sind in Abbildung 5-6 exemplarisch die Aufnahmen aus Versuch V09 für alle Schädigungsperioden dargestellt. Es ist erkennbar, dass sich nach Schädigungsperiode M001 eine ca. 2 mm breite graue Spur auf der Laufbahn gebildet hat. Diese Spur, auch als Graufleckigkeit bezeichnet (engl.: Grey Frosting), ist über den gesamten Umfang des Lagerrings in der Mitte der Laufbahn zu sehen. Nach der Schädigungsperiode M002 ist die graue Spur dunkler und damit klarer vom nicht geschädigten Bereich der Laufbahn zu unterscheiden. Nach der Schädigungsperiode M003 ist aus der grauen Spur ein gestreiftes Muster, welches als Riffel (engl.: Fluting) bezeichnet wird, in oberen Teil des Bildes zu erkennen. Nach M004 sind die Riffel über den gesamten Umfang zu sehen.

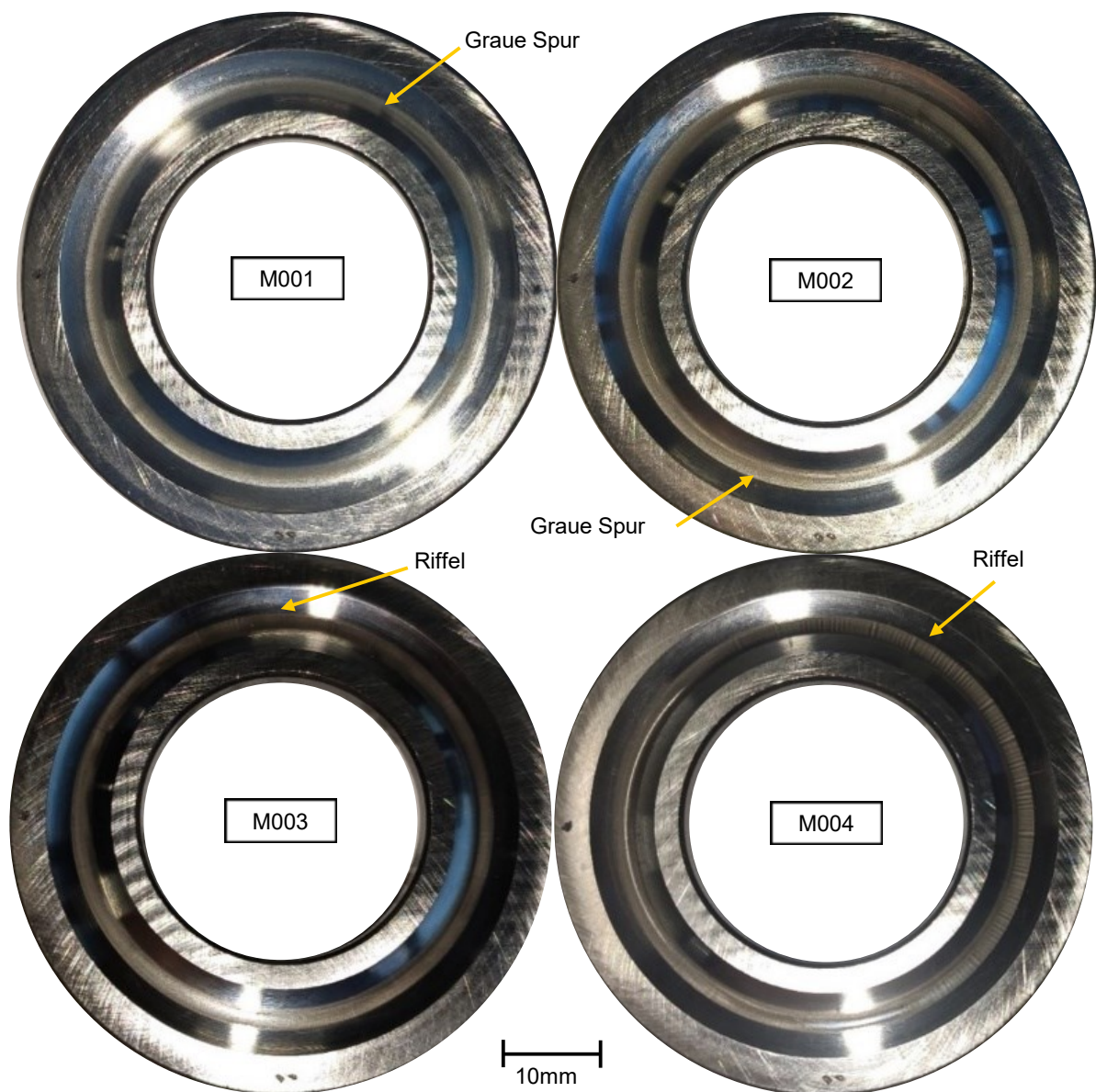
---

<sup>169</sup> Vgl. Harder et al. (2021).



**Abbildung 5-5:** Versuch V09 : a) Zeitschriebe der Last und Drehzahl; b) Zeitschriebe der Effektivwerte der Spannung und des Stromes; c) Zeitschriebe der Temperatur und des Drehmoments; d) Zeitschriebe der Effektivwerte der axialen und radialen Vibrationen.

In den Versuchen V01W, V02, V06W, V09 und V12 ist ebenfalls die Entstehung von Riffeln zu beobachten. Die anderen Versuche weisen keine sichtbare Riffelspur auf. In den Versuchen V03W, V04 und V08 sind einzelne tiefere Krater in der Foto-Aufnahme zu erkennen. Der Versuch V05 zeigt als einziger Versuch eine Graufärbung der vollständigen Laufbahn und nicht nur eines Bereiches, wie es bei den übrigen Versuchen zu beobachten ist.



**Abbildung 5-6:** Fortschritt der Oberflächenänderung nach jeder Schädigungsphase in V09.

Im Anschluss an die Oberflächenaufnahmen werden die mit dem Weißlichtinterferometer erstellten Scans der Oberflächentopografie untersucht. In Abbildung 5-7 sind exemplarisch die Scans für alle Bereiche nach den Schädigungsperioden M001 bis M004 für Versuch V09 dargestellt. Die Abszisse ist die radiale Richtung des Lagerrings und die Ordinate ist die tangentielle Richtung an der entsprechenden Messstelle. Die Höhe der einzelnen Messpunkte wird farblich unterschieden, die Skala ist rechts neben der jeweiligen Abbildung dargestellt. Bei allen Aufnahmen wurden vorab die makroskopische Form der Rille entfernt.

---

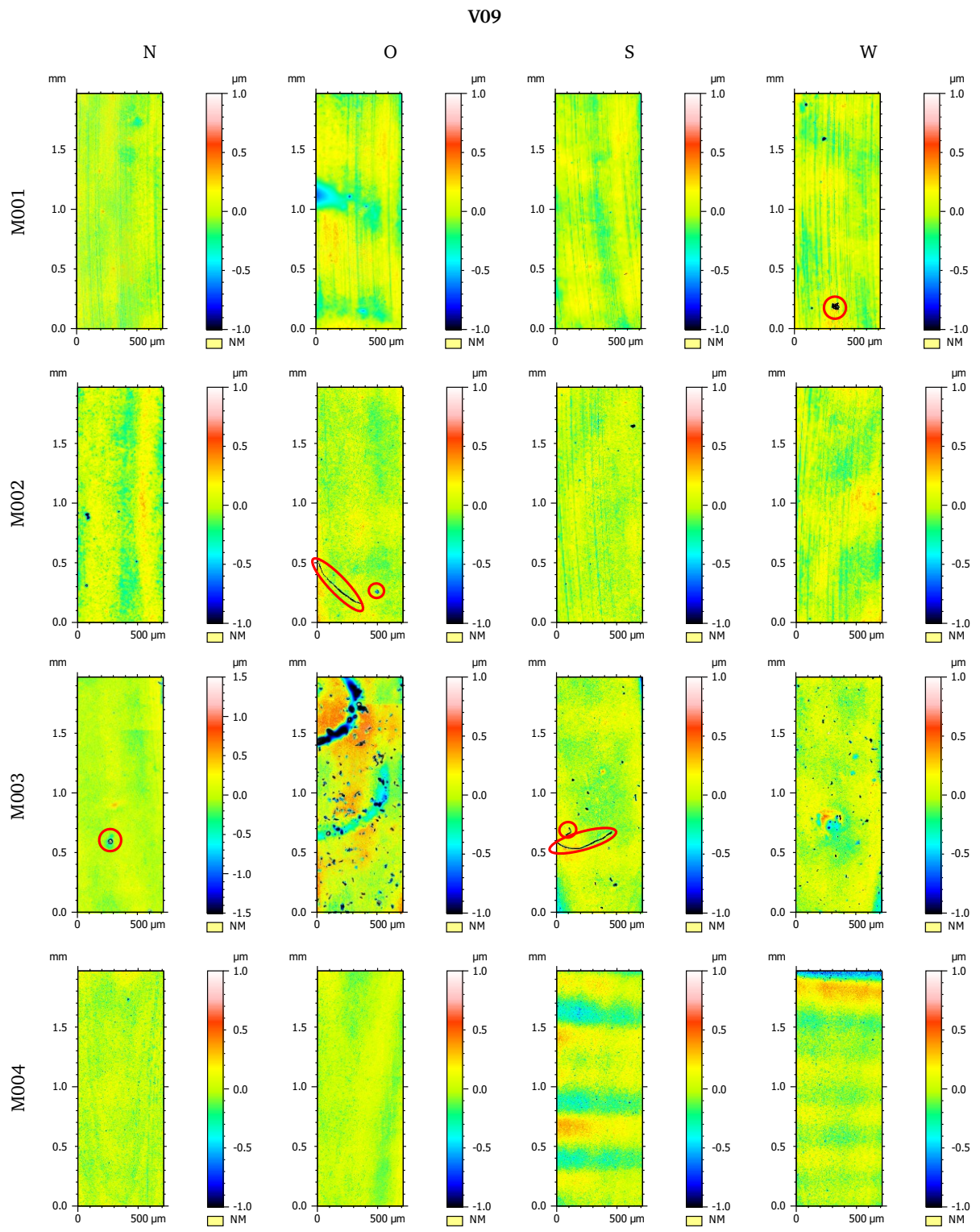
Nach der ersten Schädigungsperiode sind auf den Laufbahnoberflächen feine Linien in tangentialer Richtung zu erkennen. Diese sind voraussichtlich noch Spuren vom Fertigungsprozess. Diese Spuren sind auch nach M002 zu sehen, jedoch sind diese schon von einem punktförmigen Muster überlagert. Jeder Punkt stellt einen Krater dar, welcher infolge eines elektrischen Durchschlags entstanden ist. Die Aufnahmen nach M003 zeigen keine Fertigungsspuren mehr, stattdessen sind nur noch Krater zu sehen. In M003O sind zudem tiefere Strukturen zu erkennen. Die Größe und Anordnung dieser Strukturen lässt allerdings nicht darauf schließen, dass diese eine Folge der elektrischen Schädigung sind. Sie sind eher auf Verschmutzung zurückzuführen. Bestätigt wird das durch einen Vergleich mit den Aufnahmen von M004, in denen solche Strukturen nicht zu beobachten sind. Bedingt durch den Anteil der anormalen Strukturen wird die gesamte Messung aus der Berechnung der Oberflächenkennwerte ausgeschlossen. In den Aufnahmen M004S und M004W ist ein wellenartiges Muster zu erkennen, welches Riffelschäden darstellt.

In den Aufnahmen sind zudem Formen zu erkennen, die nicht mit dem untersuchten Effekt, sondern vielmehr mit Verschmutzungen der Aufnahme in Verbindung stehen. Diese Elemente sind in den jeweiligen Aufnahmen mit einem roten Kreis oder einer Ellipse markiert. Damit diese Elemente die Berechnung der Oberflächeneigenschaften nicht beeinflussen, werden die markierten Stellen manuell ausselektiert und bei der Berechnung nicht berücksichtigt. In den Versuchen V02 und V09 sind die entstandenen Riffel auf dem Oberflächenscan beobachtbar. In den Aufnahmen der Versuche V01W, V06W und V12 sind die entstandenen Riffel auf der Oberflächenaufnahme nicht zu erkennen. In den Versuchen V03W, V08 und V12 sind die tiefen Krater ebenfalls in den Oberflächenscans zu beobachten. V05 zeigt als einziger Versuch eine deutlich gröbere Struktur mit größeren Höhenunterschieden.

Ergänzend zu den Aufnahmen der elektrischen Signale in Abbildung 5-5b werden zusätzlich hochfrequente Aufnahmen des Spannungs- und Stromverlaufs während der jeweiligen Schädigungsphasen durchgeführt. In Abbildung 5-8 ist ein Schwingenspiel der angelegten elektrischen Wechselspannung sowie des Stromes aus jeder Schädigungsphase für Versuch V09 dargestellt. Zudem ist für jede Schädigungsphase ein gemittelttes Schwingenspiel der Spannung und des Stromes dargestellt, für die über mehrere Schwingenspiele gemittelt wurden. Es ist erkennbar, dass der Verlauf der Spannung in allen vier Schädigungsphasen annähernd gleich aussieht. Der Verlauf stellt ein Rechtecksignal dar, der Betrag der Spannungsamplitude liegt unter 2V. Die für EDM-Ströme typischen Einbrüche der Spannungsamplitude infolge eines Stromdurchgangs<sup>170</sup> sind nicht erkennbar. Stattdessen bildet der Stromverlauf den Spannungsverlauf annähernd phasengleich nach. Insofern zeigt das Lager ein überwiegend resistives Verhalten. Wie schon vorab beschrieben, schwankt die Amplitude des Stromes zwischen den einzelnen Schädigungsperioden.

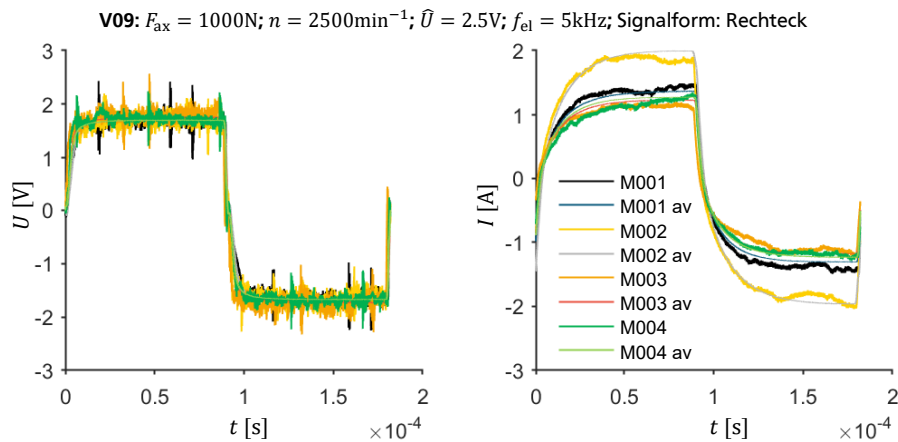
---

<sup>170</sup> Tischmacher und Gattermann (2010) S.3.



**Abbildung 5-7:** Oberflächenscans der Laufbahnoberfläche an den Positionen N, O, S, W jeweils nach den Schädigungsphasen M001, M002, M003 und M004 des Versuchs V09.

Auch die übrigen Versuche zeigen überwiegend resistives Verhalten sowie eine Variation der Stromamplitude.



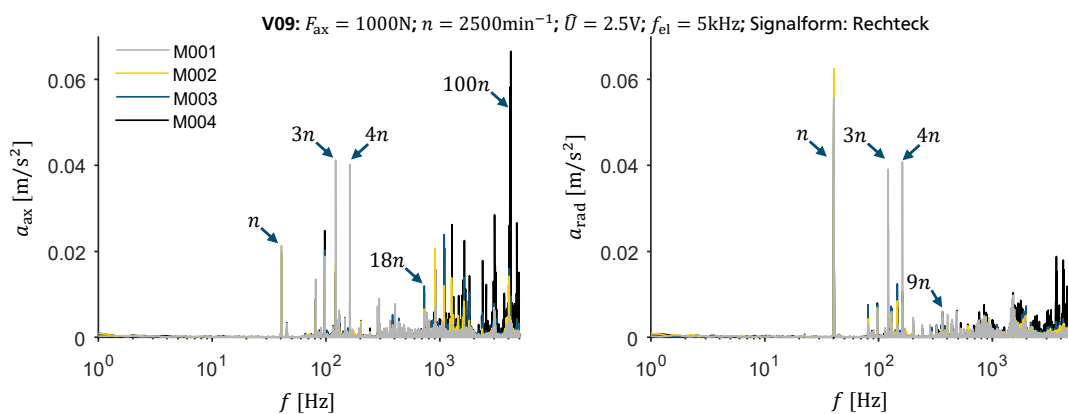
**Abbildung 5-8:** Ausschnitt des zeitlichen Verlaufs des angelegten Spannungssignals sowie des Stromes in den unterschiedlichen Schädigungsphasen und deren jeweilige Mittelung für Versuch V09.

Abschließend werden ergänzend zu den Betrachtungen der Beschleunigungen in Abbildung 5-5d die Ergebnisse der hochfrequenten Aufnahme der Beschleunigungen, die am Prüfstand gemessen wurden, vorgestellt. Hierzu sind in Abbildung 5-9 die Frequenzspektren der axialen und radialen Schwingungen am Ende jeder Schädigungsperiode dargestellt. Es ist erkennbar, dass der erste hohe Ausschlag eine Schwingantwort mit der Frequenz der Wellendrehzahl darstellt. Eine Ursache für solche Schwingungen kann eine Unwucht in den rotierenden Komponenten sein (bspw. bedingt durch den Schleifkontakt). Zudem sind sowohl in den axialen wie auch in den radialen Schwingungen zwei Ausschläge bei der drei- bzw. vierfachen Frequenz der Wellendrehzahl in Schädigungsperiode M001 erkennbar. In den folgenden Schädigungsperioden sind diese Schwingungsanteile geringer. Eine mögliche Erklärung für dieses Verhalten können Abweichungen in der Montage sein. In den axialen Beschleunigungsdaten erkennt man einen eindeutigen Anstieg der Vibrationsanteile ab dem 18-fachen der Frequenz der Wellendrehzahl mit fortschreitender Schädigungsperiode. Auch bei den radialen Beschleunigungen ist ein Anstieg der Schwingungsanteile zu erkennen, allerdings beginnt dieser schon beim neunfachen der Frequenz der Wellendrehzahl. Eine Erklärung dafür, dass der Faktor neun sowie vielfache davon in den Frequenzbändern zu beobachten sind liegt daran, dass die verwendeten Lager neun Wälzkörper besitzen. Jeder Wälzkörper überrollt die gleiche Stelle der Wälzlageroberfläche mit der Drehfrequenz des Käfigs. Diese berechnet sich für Axiallager<sup>171</sup> zu

<sup>171</sup> Harris (2001) S.311.

$$n_m = \frac{1}{2}(n_o + n_i), \quad 5.2$$

mit der Drehzahl des Wellenrings  $n_i$  und der Drehzahl des Gehäuserings  $n_o$ . Im hier verwendeten Aufbau ergibt die Käfigdrehzahl die Hälfte der Wellendrehzahl. Bei neun gleichzeitig rotierenden Wälzkörpern  $N_{WK} = 9$ , zwei Lageroberflächen und mehrfachen Oberflächenschäden (Krater und Riffel) auf beiden Oberflächen erscheint es nachvollziehbar, dass die beobachteten Frequenzen Vielfache von  $N_{WK} \cdot n_m$  darstellen. In den restlichen Versuchen lässt sich ebenfalls eine Erhöhung des Vibrationsspektrums mit fortschreitender Schädigungsdauer erkennen, vor allen in den höheren Ordnungen der Käfigdrehzahl.



**Abbildung 5-9:** Frequenzanalyse der axialen und radialen Beschleunigungssignale über alle Schädigungsperioden für Versuch V09.



---

## 6 Identifikation geeigneter Laufbahneigenschaften zur Quantifizierung elektrischer Lagerschäden

Dieses Kapitel widmet sich der Beantwortung der ersten Forschungsfrage (vgl. Abschnitt 3.2). Dazu wird zuerst eine Studie zur Bewertung der Oberflächenschäden mit der in der Literatur vorhandenen Bewertungsskala durchgeführt. Basierend auf den Erkenntnissen dieser Studie werden Anforderungen an eine Oberflächeneigenschaft, die sich zur Bewertung elektrischer Oberflächenschäden eignet, ermittelt. Im nächsten Schritt wird die Eignung der geprüften Oberflächeneigenschaften untersucht und abschließend werden für alle geeigneten Eigenschaften jeweils ein Grenzwert definiert, der einer kritischen Schädigung zugeordnet werden kann.

Die Ergebnisse dieses Kapitels sind im Rahmen Veröffentlichung HARDER ET AL. (2022) publiziert.

### 6.1 Studie zur Charakterisierung des Oberflächenzustandes

In diesem Abschnitt wird die Studie vorgestellt, mit welcher der Zustand geschädigter Laufbahnoberflächen bewertet wird. Die Bewertung der Oberflächenschäden basiert auf der Abstufung unterschiedlicher Schadensfortschritte, die von TISCHMACHER definiert<sup>172</sup> und erweitert<sup>173</sup> wurde (vgl. Abschnitt 2.2.1).

#### 6.1.1 Aufbau und Durchführung der Studie

Die Abstufung der unterschiedlichen elektrischen Lagerschäden nach TISCHMACHER stellt eine Möglichkeit zur Einordnung der vorhandenen Schädigung am Lager dar. Sie bietet damit auch eine Skala zur Bewertung der Schädigung (vgl. Abbildung 2-6). Sie beginnt bei Stufe 0, welche die Graufleckigkeit abbildet und keinen Einfluss auf die Lagerlebensdauer darstellt, und endet bei Stufe 5, welche Ermüdungsschäden darstellt<sup>174</sup>. Die dazwischenliegenden Stufen zeigen unterschiedliche Ausprägungen von Krater und Riffelbildung. Eine Quantifizierung der Stufen mit Oberflächeneigenschaften ist dabei nicht gegeben. Lager ohne sichtbare elektrische Oberflächenschäden werden zudem in der Skala nach TISCHMACHER nicht berücksichtigt. Damit im Rahmen dieser Studie Lager mit sichtbarer Graufleckigkeit von Lagern ohne sichtbare elektrische Schädigung differenziert werden können, wird die Bewertung nach TISCHMACHER um eine Stufe ohne erkennbare Schädigung erweitert. In Tabelle 6-1 ist die Bewertung von TISCHMACHER sowie deren Modifizierung dargestellt. Die modifizierte Bewertung elektrischer Lagerschäden wird in Abgrenzung zur bisherigen Bewertung im Weiteren als „Schadenklasse“ (*SK*) bezeichnet. Die Schadenkasse  $SK = 0$  beinhaltet Lager, die keine sichtbaren elektrischen Lagerschäden

---

<sup>172</sup> Tischmacher (2017a) S.3.

<sup>173</sup> Tischmacher (2018) S.20.

<sup>174</sup> Tischmacher (2018) S.20.

vorweisen. Die Stufen nach TISCHMACHER werden entsprechend um eins erhöht, wodurch die Schadensklassen  $SK = 1$  bis 6 gebildet werden.

Sofern es bei der Beurteilung einer Laufbahn nicht möglich ist, eine eindeutige Schadensklasse zuzuordnen, besteht die Möglichkeit, Zwischenklassen in Schritten von 0.5 zu nutzen (bspw.  $SK = 2.5$ ). Feinere Beurteilungsklassen erscheinen aufgrund des subjektiven Beurteilungscharakters der Schädigungsskala als nicht zweckmäßig und können eine falsche Präzision suggerieren. Eine differenzierte Beschreibung der einzelnen Schädigungsstufen ist bei TISCHMACHER nicht gegeben. Mithilfe der so definierten Schadensklasse kann in den nachfolgenden Abschnitten die Bewertung der erzeugten Lagerschäden durchgeführt werden.

**Tabelle 6-1:** Vergleich des Bewertungsschemas nach TISCHMACHER (vgl. Abbildung 2-6) und der modifizierten Skala.

	Keine sichtbaren Lagerschäden	Graufleckigkeit	Kraterbildung	Riffel mit zunehmender Intensität			Ermüdungsschäden
Stufe nach TISCHMACHER	Nicht vorhanden	0	1	2	3	4	5
„Schadensklasse“ $SK$	0	1	2	3	4	5	6

Wie in Abschnitt 5.1.3 beschrieben, sollen die Lageroberflächen bei jeder Demontage vermessen und subjektiv bewertet werden. Eine Bewertung der Probe zu diesem Zeitpunkt birgt zwei Nachteile. Einerseits müssen alle beurteilenden Personen im Moment der Demontage anwesend sein, um die Beurteilung durchzuführen. Das kann dazu führen, dass entweder die Versuchsdauer dadurch unverhältnismäßig in die Länge gezogen wird, um allen beurteilenden Personen den gleichen Rahmen zur Beurteilung zu ermöglichen oder die Beurteilungen nicht unter gleichen Rahmenbedingungen (bspw. unterschiedliche Personenanzahl) durchgeführt werden. Andererseits führt eine Beurteilung anhand der realen Proben zu Rückschlüssen der bewertenden Personen, in welchem Stadium der Versuchsdurchführung das von ihnen beurteilte Lager befindet. Dieses Wissen kann die Ergebnisse der Studie beeinflussen.

Um diese Nachteile zu umgehen, wurde bei der Studie folgendes Vorgehen gewählt. Zum Zeitpunkt jeder Demontage wurden mehrere Photographien der Laufbahnoberfläche erstellt. Diese wurden nach Abschluss der Messreihe zusammengetragen und in zufällig an-

geordneter Form für die beurteilenden Personen vorbereitet. In Abbildung 6-1 ist exemplarisch ein Bewertungsblatt der Studie dargestellt. Der bewertete Lagerring wird in zwei Darstellungen gezeigt, zudem ist die Nummer der Bewertungsreihenfolge  $N_{\text{Aus}} = 31$  in der oberen linken Ecke angegeben, was dem Lager V09M004 entspricht. Die Bewertung wird von insgesamt acht Personen durchgeführt. Alle Teilnehmenden besitzen einen ingenieurwissenschaftlichen Masterabschluss. Vor der Durchführung der Beurteilung wurden alle teilnehmenden Personen die erweiterte Schädigungsskala vorgestellt. Im Anschluss an die Schulung bewerten alle Studienteilnehmenden selbstständig die Lagerbilder und füllen ihre Bewertung in einer Tabelle aus. Die so erhobenen Ergebnisse werden im folgenden Abschnitt vorgestellt und diskutiert.



**Abbildung 6-1:** Bewertungsblatt der durchgeführten Studie von Lager V09M004.

### 6.1.2 Studienergebnisse

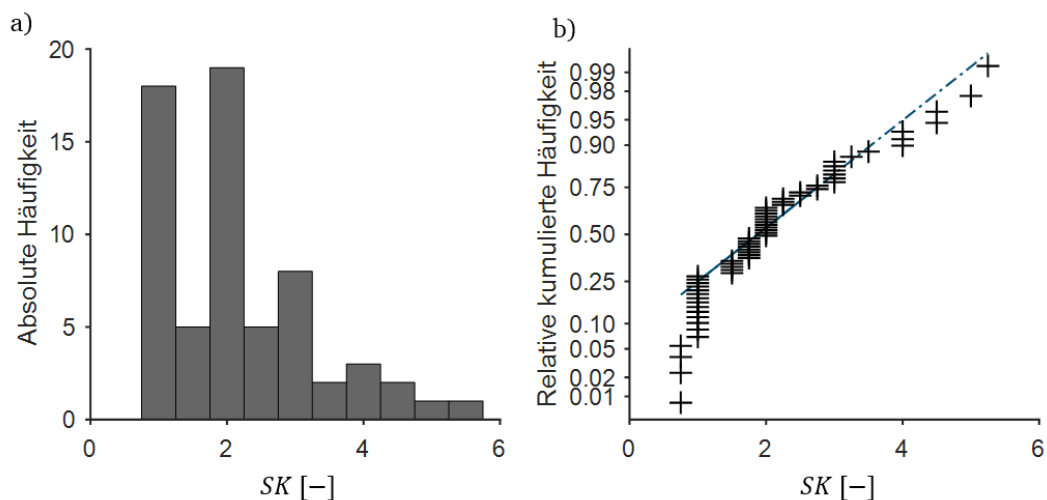
Die einzelnen Bewertungen sind im Anhang A8 aufgeführt und Teil der Veröffentlichung von HARDER UND KIRCHNER (2022)<sup>175</sup>. Die in dieser Studie verwendete Schadenskala stellt, wie auch die Bewertungsskala nach TISCHMACHER, eine Ordinalskala dar, sodass statistische Kennzahlen wie der Mittelwert und die Standardabweichung für die erhobenen Studienergebnisse nicht berechnet werden können. Der Grund dafür liegt darin, dass bei ordinalen Skalen nicht sichergestellt ist, dass die Skalenabstände äquidistant sind<sup>176</sup>. Daher

<sup>175</sup> Harder und Kirchner (2022a).

<sup>176</sup> Vgl Kosfeld et al. (2016) S.67f.

werden aus den Bewertungen der einzelnen Lagerringe der Median der Schadenklasse  $SK$  und das 1.Quartil  $SK_{0,25}$ , das 3.Quartil  $SK_{0,75}$  sowie Quartilsabstand  $q_{SK}$  berechnet. Letzterer wird zur Beurteilung der Streuung jeder Bewertung genutzt. Zudem ist an jedem Versuch die Nummer  $N_{Aus}$  angegeben. Diese beschreibt die Bewertungsreihenfolge der Versuche.

In Abbildung 6-2a) ist die absolute Häufigkeit der Bewertung der einzelnen Schadensklassen für alle Lager aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass der Modalwert der Bewertung bei  $SK = 2$  liegt. Aus dem Verlauf lässt sich schließen, dass die Studienergebnisse keine Normalverteilung, sondern eine linksschiefe Verteilung darstellen. Zu gleichem Ergebnis führt die Betrachtung von Abbildung 6-2b). Hier ist die kumulierte relative Häufigkeit über die Schadensklasse aufgetragen. Die blaue Strichpunktlinie stellt zudem der Verlauf einer idealen Normalverteilung dar. Es ist erkennbar, dass bei niedrigen Schadensklassen die Ergebnisse vom idealen Verlauf der Normalverteilung abweichen. Dies ist insofern nicht ungewöhnlich, da hier die Bewertung gleicher Lager mit unterschiedlicher Schädigungsdauer vorliegt. Daher ist es in einem derart erhobenen Datensatz wahrscheinlicher, dass niedrigere Schädigungen überproportional häufig auftreten.

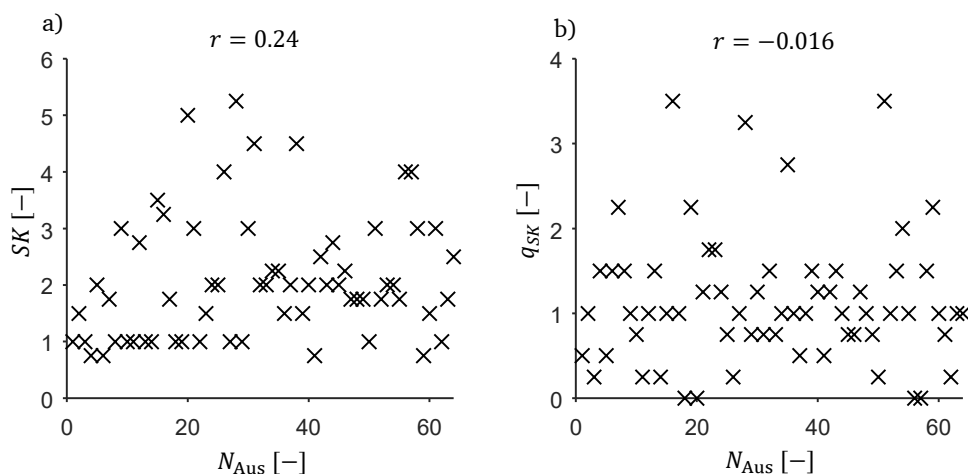


**Abbildung 6-2:** a) Histogramm der bewerteten Schadensklassen; b) kumulierte relative Häufigkeit der Schadensklassen.

In Abbildung 6-2b ist zudem zu erkennen, dass einzelne Datenpunkte Werte annehmen, welche auf der Bewertungsskala nicht vorgesehen sind (bspw.  $SK = 0.75$ ). Dazu ist zu beachten, dass die dargestellten Datenpunkte jeweils den Median der acht Bewertungen für das entsprechende Lager darstellen. Der Median für eine gerade Anzahl an Punkten liegt zwischen den mittleren beiden Punkten und ist entsprechend als das arithmetische Mittel dieser beiden Punkte definiert (vgl. Abschnitt 4.3.2).

In Abbildung 6-3 ist die Schadensklasse sowie der Quartilsabstand der Schadensklasse in Abhängigkeit der Bewertungsreihenfolge  $N_{Aus}$  aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass die

einzelnen Bewertungen weder für die Schadensklasse noch für deren Quartilsabstand eine starke Signifikanz aufweisen. Zur gleichen Schlussfolgerung führt die Betrachtung des Rangkorrelationskoeffizienten nach SPEARMAN, welcher die Korrelation der Rangfolge zweier Datensätzen bewertet und somit zur Bewertung von Korrelation in Datensätzen basierend auf einer Ordinalskala geeignet ist.<sup>177</sup>



**Abbildung 6-3:** a) Ergebnis der bewerteten Schadensklasse in Abhängigkeit der Bewertungsreihenfolge; b) Quartilsabstand der Schadensklasse in Abhängigkeit der Bewertungsreihenfolge.

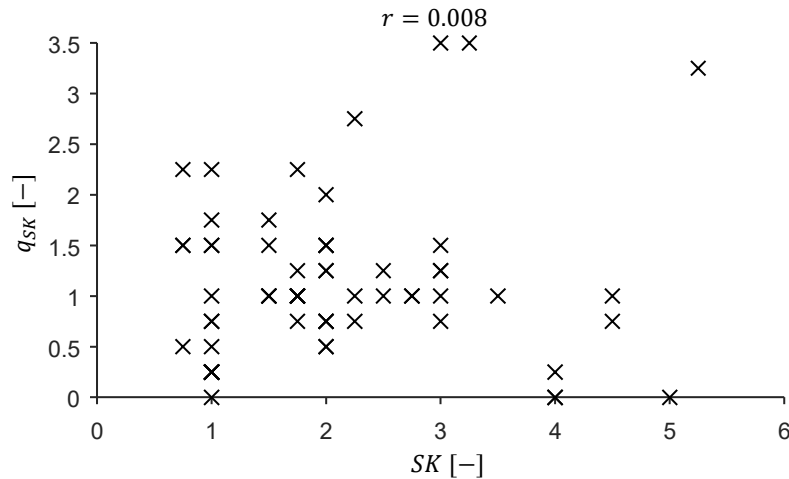
Der Rangkorrelationskoeffizient zwischen der Schadenklasse und der Bewertungsreihenfolge liegt bei  $r = 0.24$  und der Korrelationskoeffizient zwischen dem Quartilsabstand der Schadenklasse und der Bewertungsreihenfolge liegt bei  $r = -0.016$ . Korrelationen im Bereich  $0.1 < |r| \leq 0.3$  weisen nur einen schwachen Zusammenhang zwischen den untersuchten Größen auf, Korrelationen im Bereich  $|r| \leq 0.1$  besitzen keinen Zusammenhang.<sup>178</sup> Die Bewertungsreihenfolge hat somit weder einen signifikanten Einfluss auf den ermittelten Wert der Schadenklasse noch auf dessen Streuung. Damit kann gezeigt werden, dass im Rahmen der Studiendurchführung keine systematischen Fehler begangen wurden und die erhobenen Daten für eine weitere Auswertung verwendbar sind.

Der Verlauf des Quartilsabstandes der Schadenklasse in Abhängigkeit der Schadenklasse ist in Abbildung 6-4 dargestellt. Es ist kein klarer Zusammenhang zwischen der bewerteten Schadenklasse und ihrem Quartilsabstand erkennbar. Auch der Rangkorrelationskoeffizient nach SPEARMAN von  $r = 0.008$  zeigt keine Korrelation zwischen den beiden Größen. Somit kann festgestellt werden, dass weder die Bewertung der Lagerschäden, noch deren

<sup>177</sup> Vgl. Kosfeld et al. (2016) S.235.

<sup>178</sup> Kosfeld et al. (2016) S.212.

Standardabweichung stark von der Bewertungsreihenfolge abhängt. Auch sind diese beiden Größen voneinander unabhängig. Dies bedeutet, dass in der Bewertung kein erkennbarer Trend auftritt, der in der weiteren Auswertung berücksichtigt werden muss.



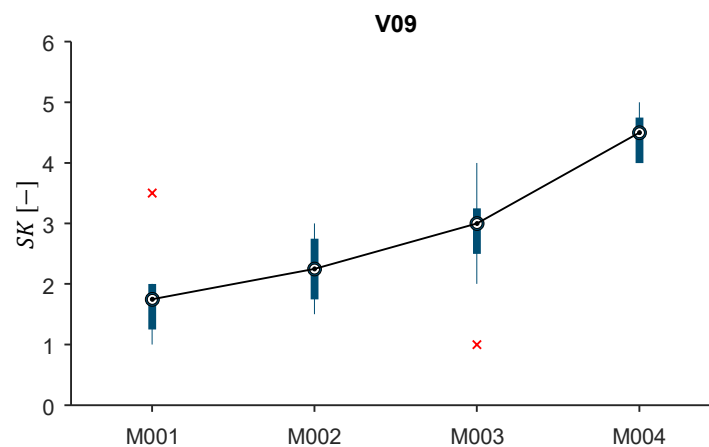
**Abbildung 6-4:** Quartilsabstand der Schadensklasse in Abhängigkeit der bewerteten Schadensklasse.

In Abbildung 6-4 ist zudem zu beobachten, dass der Quartilsabstand in der Schadensbewertung hohe Werte annimmt. Der Median des Quartilsabstandes über alle Bewertungen liegt bei  $\check{q}_{SK} = 1$ . Das bedeutet, dass 50% der bewerteten Lager eine Streuung einer ganzen Bewertungsstufe oder mehr aufweisen. Das kann unterschiedliche Gründe haben. Zunächst ist festzuhalten, dass die Bewertung nicht anhand der vorhandenen Lagerringe, sondern anhand von Photographien dieser durchgeführt wurde. Es kann angenommen werden, dass die Aufnahmen einen Einfluss auf das Bewertungsergebnis haben. Geringfügige Abweichungen der Ausleuchtung während der Aufnahme können einzelne Bereiche der Lager stärker oder schwächer geschädigt erscheinen lassen und damit die Bewertung dieser Lager beeinflussen. Zudem ist die Beschreibung und Differenzierung der einzelnen Stufen und der damit verbundenen Schadensklassen nicht ausführlich formuliert<sup>179</sup>, wodurch für die beurteilenden Personen die Abgrenzung der einzelnen Schadenklassen nicht nachvollziehbar gewesen sein könnte. Eine zu geringe Teilnehmerzahl und der damit verbundene hohe Einfluss einzelner Ausreißer in den Bewertungen kann als Ursache für die hohe Streuung nicht vollständig ausgeschlossen werden. Sie ist jedoch unwahrscheinlich, da die statistische Kenngrößen Median und Quartilsabstand resistent gegenüber Ausreißern sind<sup>180</sup>.

<sup>179</sup> Vgl. Tischmacher (2018).

<sup>180</sup> Fahrmeir et al. (2016) S.52 und S.62.

In Abbildung 6-5 ist der Verlauf der bewerteten Schadensklasse nach jeder Schädigungsperiode von Versuch V09 als Boxplot dargestellt. Der Boxplot ermöglicht eine übersichtliche Darstellung der Mediane und Quartile. Zudem zeigt er Ausreißer (vgl. Abschnitt 4.3.3). Es ist erkennbar, dass der Median der Bewertung nach jeder Schädigungsperiode steigt, was einer zunehmenden Schädigung entspricht. Jedoch ist insbesondere zwischen den Bewertungen M001, M002 und M003 eine Überlagerung der Quartilsabstände zu erkennen, was bedeutet, dass die zwischen diesen Phasen beobachtbare Erhöhung der Schädigung nicht signifikant ist<sup>181</sup>. Die Quartilsabstände zwischen den Schädigungszuständen M003 und M004 überlagern sich nicht, was auf eine signifikante Zunahme der Schädigung zurückschließen lässt. Zudem gibt es keine Überlagerung der Quartilsabstände zwischen M001 und M004, was für den gesamten Versuch einen signifikanten Anstieg der Schädigung bedeutet.



**Abbildung 6-5:** Verlauf der bewerteten Schadensklasse für den Versuch V09 nach jeder Schädigungsperiode dargestellt als Boxplot.  
Quelle: Harder et al. (2022) S.8.

Die Verläufe der Schadensbewertung für die restlichen Versuche sind in Abbildung 6-6 dargestellt. Die Versuche V01W, V02, V06W, V09 und V12, bei denen Riffel festgestellt wurden, wurden in den entsprechenden Schädigungsperioden alle mit  $SK > 3$  bewertet, was nach Tabelle 6-1 der Bereich der Riffelschäden ist. In den Versuchen V12, V14 und V15 ist ein monotoner Anstieg des Medians über die einzelnen Schädigungsperioden erkennbar. Dieser ist bedingt durch die Überlagerung der Quartilsabstände in den meisten Fällen nicht signifikant. Lediglich zwischen V15M002 und V15M003 ist der Anstieg auch

<sup>181</sup> Die Signifikanz eines Unterschiedes zwischen zwei verglichenen Bewertungen wird mithilfe des Wilcoxon Rangsummentest (Fahrmeir et al. (2016) S.421ff) quantifiziert. Daten werden als signifikant unterschiedlich betrachtet, wenn die Wahrscheinlichkeit, dass diese gleich sind, kleiner 5% ist. Optisch ist in einer Boxplot Darstellung ein signifikanter Anstieg erkennbar, wenn die 25%-75% Quartile zweier Bewertungen sich nicht überschneiden.

---

signifikant. Allerdings ist festzustellen, dass in allen drei Versuchen eine signifikante Zunahme der Schädigung zwischen M001 und M004 stattfindet. Die Versuche V01W, V02, V03W und V06W zeigen ebenfalls einen signifikanten Anstieg der Schädigung zwischen M001 und M004. Allerdings weisen sie nach einzelnen Schädigungsperioden eine Abnahme der Schädigung auf, welche zu Teil sogar signifikant sind. Die Versuche V04, V05, V07, V08, V10, V13 und V16 weisen weder eine signifikante Änderung noch ein monotonen Verhalten der Schädigung auf. V11 weist eine signifikante Abnahme der bewerteten Schädigung zwischen den M001 und M004 auf und das Verhalten ist monoton sinkend.

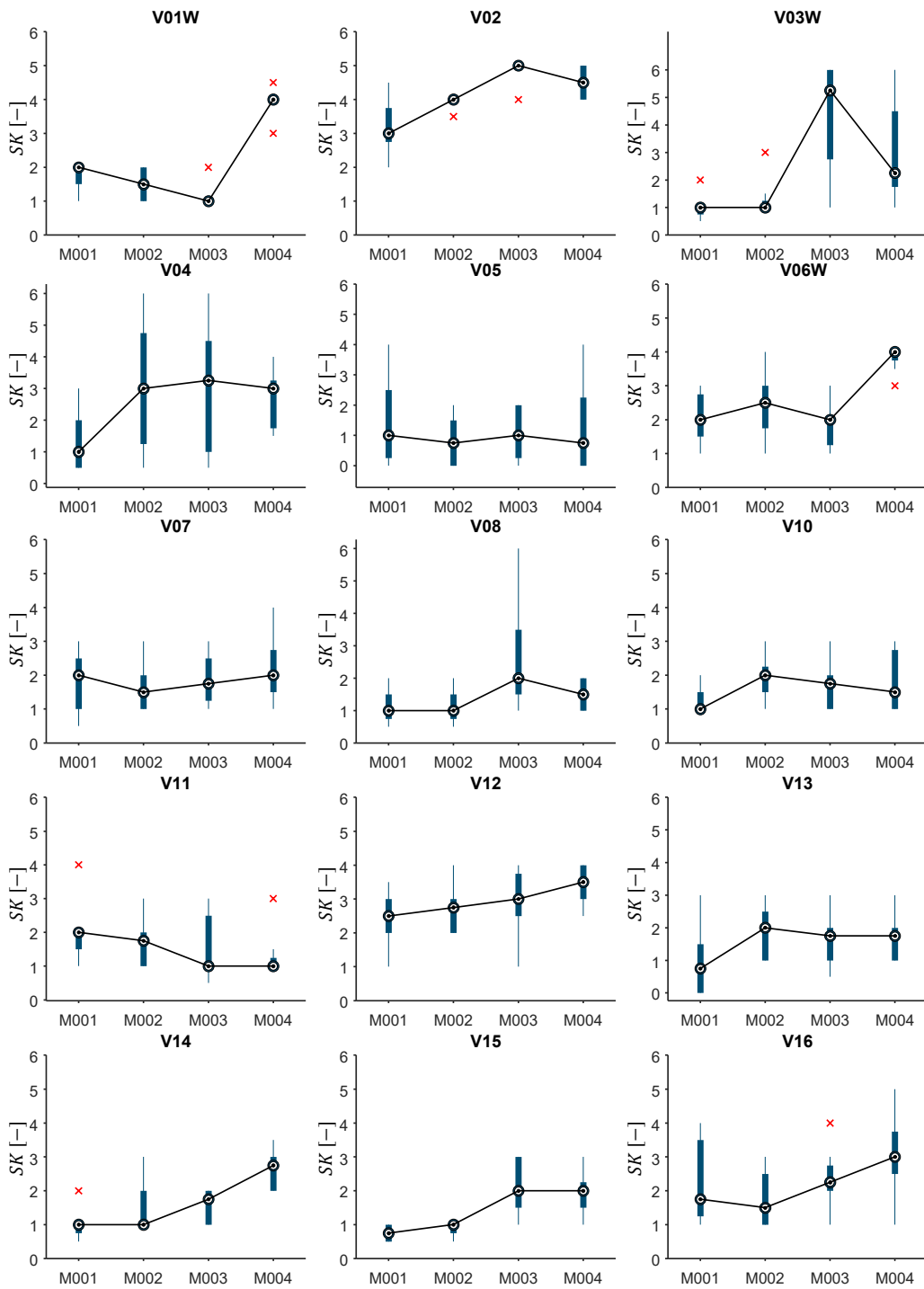
Dieses Verhalten der abnehmenden Schädigung kann unterschiedliche Ursachen haben. Zum einen kann es sich um Heilungseffekte in den entsprechenden Schädigungsperioden handeln, die zu einer Verbesserung des Lagerzustands führen. Zum anderen kann die abnehmende Schädigung durch systematische Schwächen in der durchgeführten Bewertung der Lageroberflächen begründet sein. Heilungseffekte können an dieser Stelle nicht vollständig ausgeschlossen werden. Sie sind allerdings in der Literatur zu elektrischen Lager Schäden bisher nicht beobachtet worden, weswegen dieser Erklärungsansatz nicht weiter untersucht wird. Die Bewertung anhand der Fotografien kann ebenfalls zu einem Fehler in der Beurteilung der Laufbahnoberfläche führen. Es ist zu erkennen, dass alle signifikanten Abnahmen der Schädigung entweder unter oder über der Schädigungsklasse  $SK = 3$  liegen. Diese grenzt nach Tabelle 6-1 Schadensbilder mit erkennbaren Riffelstrukturen von Schadensbildern mit Kraterstrukturen ab. Das bedeutet, dass die Bewertung eine Abgrenzung dieser zwei Schadensformen ermöglicht, aber die Abgrenzung innerhalb der Schadensformen mit der verwendeten Skala nur eingeschränkt möglich ist.

Eine weitere Besonderheit ist der überdurchschnittlich hohe Quartilsabstand in den Versuchen V03, V04 und V08. Eine Erklärung dafür können die tiefen Krater auf den Oberflächen sein, die in eben diesen Versuchen festgestellt wurden. Da die verwendete Schadensskala solche Schäden nicht abbildet (vgl. Abbildung 2-6), besteht die Vermutung, dass die studienteilnehmenden Personen diese sehr unterschiedlich interpretiert haben.

Zusammenfassend lassen sich folgende Erkenntnisse aus der durchgeführten Studie ziehen:

- Die Bewertung mit der Schadensskala ist in der Lage Riffelschäden zu identifizieren und von Graufleckigkeit zu unterscheiden. Somit ist sie für eine qualitative Bewertung von Lagerschäden geeignet und kann als Grundlage für die Entwicklung einer quantitativen Skala genutzt werden.
- Der Median des Quartilsabstandes von  $\check{q}_{SK} = 1$  bedeutet, dass die Bewertung von 50% der Lager um mindestens einen Skalenabstand schwankt. Dadurch ist die verwendete Skala nur unter Einschränkungen für eine komparative Bewertung geeignet. Eine solche Einschränkung wäre, dass nur betrachtet wird, ob der vorhandene Schaden größer oder kleiner als  $SK = 3$  ist.





**Abbildung 6-6:** Verlauf der bewerteten Schadensklasse für die Versuche nach jeder Schädigungsperiode.  
 Quelle: Harder et al. (2022) S.14.

- 
- Ursachen für die hohe Schwankung in der Bewertung können einerseits auf den Aufbau der Studie zurückgeführt werden (Anzahl der Teilnehmer, Photographie als Bewertungsgrundlage), andererseits ergeben sie sich aus dem Aufbau der Schadensbewertung (feingliedrige Abstufung, knappe Definition der Abstufungen, Subjektivität der Bewertung). Zudem wird das Schadensbild einzelner tiefer Krater nicht durch die Skala abgebildet und hat dadurch in der Bewertung zu hohen Schwankungen geführt.

## 6.2 Anforderungsermittlung

Basierend auf den Ergebnissen der vorangegangenen Studie werden die Anforderungen an eine geeignete Oberflächeneigenschaft zur Bewertung elektrischer Oberflächenschäden formuliert. Das Vorgehen orientiert sich dabei an dem methodischen Vorgehen der Anforderungsermittlung in der Produktentwicklung.<sup>182</sup> Im Folgenden werden die gestellten Anforderungen<sup>183</sup> vorgestellt und anschließend in Tabelle 6-2 in Form einer Anforderungsliste zusammengefasst.

Die bisher verwendete Bewertungsskala stellt eine Ordinalskala dar, die eine qualitative Bewertung des vorhandenen Schadens ermöglicht und unter Einschränkungen auch eine komparative Bewertung. Allerdings ist die Äquidistanz der Skalenabstände nicht gegeben, was sie für eine Verwendung zur quantitativen Beschreibung des Oberflächenschadens nicht geeignet macht. Insofern gilt die Festforderung, dass eine geeignete Oberflächeneigenschaft anhand einer metrischen Skala definiert sein muss.

Die Studienergebnisse zeigen, dass die verwendete Schadensskala den vorhandenen Oberflächenschaden qualitativ beschreiben kann. Eine geeignete Oberflächeneigenschaft muss solche Effekte ebenfalls abbilden können. Insofern ist es notwendig, dass die Eigenschaft mit einer hinreichend hohen Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Oberflächenbewertung korreliert. Als Bewertungsgrundlage wird der Rangkorrelationskoeffizient nach SPEARMAN genutzt. Dieser bietet einerseits den Vorteil, dass dieser auch auf ordinalskalierte Datensätze angewendet werden kann.<sup>184</sup> Andererseits eignet sich dieser auch zur Beschreibung nichtlinearer monotoner Wechselwirkungen.<sup>185</sup> Als Bereichsforderung wird ein Korrelationskoeffizient  $|r_{SK,x}| \geq 0.3$  festgelegt. Dieser entspricht nach KOSFELD einem „mittleren“ positiven bzw. negativen Zusammenhang.<sup>186</sup> Alle betrachteten Oberflächeneigenschaften, die eine niedrigere Korrelation aufweisen, sind daher nicht geeignet. Zudem wird davon abgesehen, den Schwellenwert auf einen höheren Betrag festzulegen, da die

---

<sup>182</sup> Vgl. Kirchner (2020) S.53ff.

<sup>183</sup> Harder et al. (2022) S.3.

<sup>184</sup> Vgl. Kosfeld et al. (2016) S.216.

<sup>185</sup> Vgl. Fahrmeir et al. (2016) S.135.

<sup>186</sup> Kosfeld et al. (2016) S.212.

bewertete Schadensklasse einerseits selbst eine Streuung ausweist und andererseits einzelne Effekte (wie z.B. große Krater) in dieser nicht abgebildet sind (vgl. Abschnitt 6.1.2). Ein zu hoher Schwellenwert für den Korrelationskoeffizienten würde folglich zu einer Überinterpretation der Schadensbewertung führen.

Zudem ist es erforderlich, dass mithilfe der verwendeten Oberflächeneigenschaft Oberflächen mit Riffelschädigung klar von Oberflächen ohne Riffel unterschieden werden können. Oberflächen ohne Riffelschäden sind Teil der Menge  $A$  mit  $A = \{SK < 3\}$ . Lager mit Riffeln sind entsprechend Teil der Menge  $B$  mit  $B = \{SK \geq 3\}$ . Als Bereichsforderung wird festgelegt, dass die Wahrscheinlichkeit, dass Messwerte einer Oberfläche mit Riffeln und einer Oberfläche ohne Riffel im gleichen Wertebereich liegen, kleiner  $P(A = B) < 0.05$  ist.

Die Ergebnisse der vorangegangenen Studie zeigen, dass die Bewertung eine hohe Streuung aufweist. Die Bereichsforderung ist daher, dass eine geeignete Eigenschaft eine niedrigere Streuung in den Kennwerten als die Schadensbewertung aufweist, was zu einer höheren Aussagekraft der dadurch entwickelten Skala führt. Zudem ist es für eine zuverlässige Auswertung der Versuchsergebnisse erforderlich, dass die Schwankung der gemessenen Daten unabhängig von dem Wertebereich ist, in dem die Skalengröße liegt. Das Ziel ist eine möglichst geringe Korrelation zwischen der Skalengröße  $x$  und deren Standardabweichung  $\sigma_x$ . Als Mindestwert wird gefordert, dass es keinen starken Zusammenhang (vgl. Tabelle 4-4) zwischen Messwert und dessen Standardabweichung gibt. Die Korrelation zwischen diesen Werten sei also  $|r_{x,\sigma_x}| < 0.8$ .

**Tabelle 6-2: Anforderungsliste**

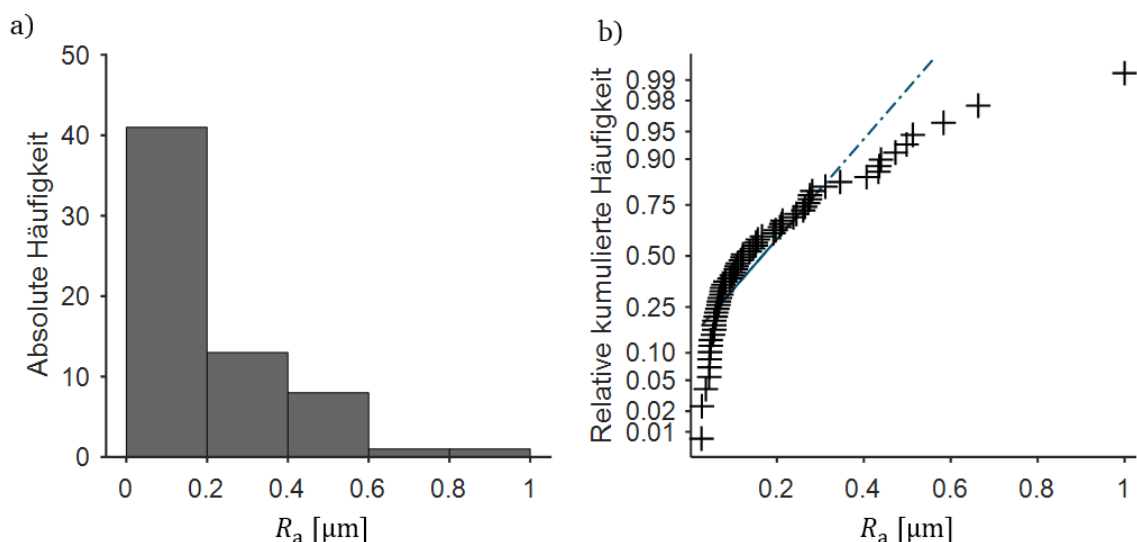
Nr.	Forderung	Bezeichnung	Werte
1	FF	Metrische Skala	Äquidistante Abstände
2	BF	Korrelation mit $SK$	$ r_{SK,x}  \geq 0.3$
3	BF	Unterscheidung Riffel	$P(A = B) < 0.05$
4	BF	Streuung der Messwerte	$s_x < s_{SK}$
5	BF	Korrelation mit Standardabweichung	$ r_{x,\sigma_x}  < 0.8$

## 6.3 Untersuchung der Oberflächeneigenschaften elektrisch geschädigter Wälzlagerlaufbahnen

Im Folgenden wird geprüft, welche Oberflächeneigenschaften die im vorherigen Kapitel ermittelten Anforderungen erfüllen. Dazu werden die in Anhang A4 beschriebenen Oberflächeneigenschaften aus den vorgestellten Interferometrieaufnahmen der Laufbahnoberflächen abgeleitet. Die Eigenschaften jeder Oberfläche werden mithilfe des Analyseprogramms *MountainsMap8* aus jeder Aufnahme ermittelt. Anschließend werden der Mittelwert und die Standardabweichung jeder Eigenschaft aus den einzelnen Aufnahmen, die nach einer Schädigungsperiode aufgenommen wurden, berechnet.

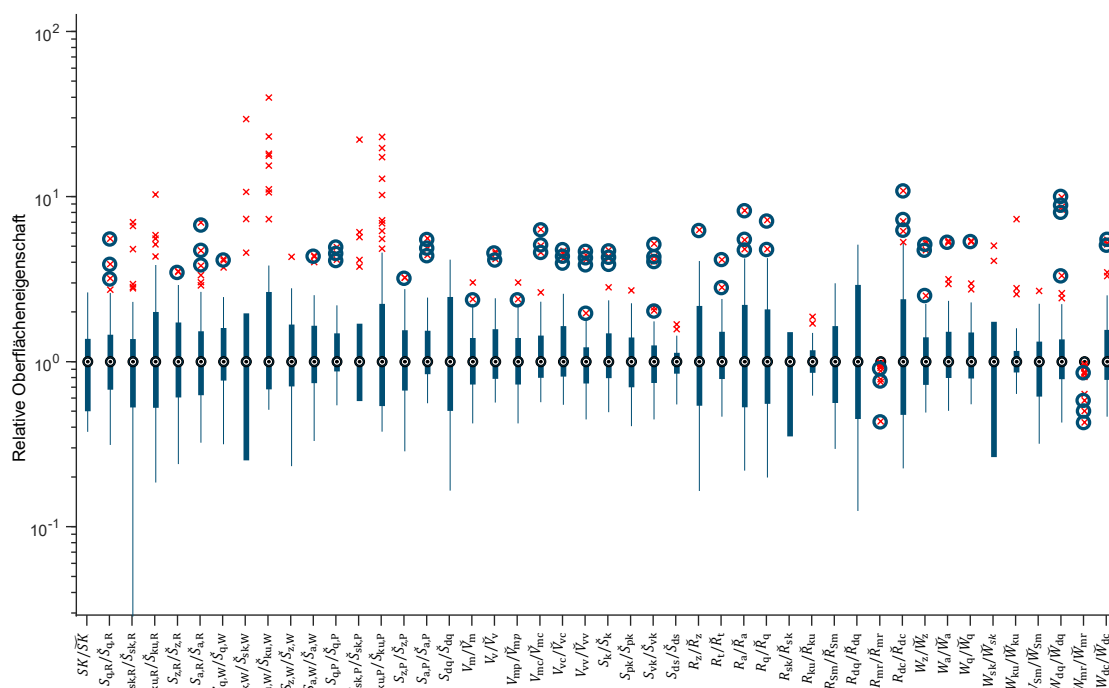
### 6.3.1 Untersuchung von Verteilung und Ausreißern in den ermittelten Eigenschaften

Zu Beginn der Auswertung wird geprüft, ob alle in den Versuchen gemessenen Oberflächen für die Auswertung verwendet werden können. Dazu wird zuerst die Verteilung der Messdaten betrachtet. Das Histogramm der Verteilung der mittleren arithmetischen Linienrauheit  $R_a$  ist exemplarisch in Abbildung 6-7a dargestellt. Es ist zu erkennen, dass wie auch bei den Ergebnissen der Schadensbewertung, die Rauheit nicht normalverteilt, sondern linksschief ist. Zudem ist zu bemerken, dass zwei Messungen höhere Werte annehmen als der Rest der Messdaten. Noch deutlicher sind diese Ausreißer in Abbildung 6-7b zu erkennen, in der die relative kumulierte Häufigkeit der Messungen gegen die Rauheit aufgetragen ist. Die beiden rechten Punkte weichen deutlich von der Geraden der Normalverteilung ab und können daher als Ausreißer betrachtet werden.



**Abbildung 6-7:** a) Histogramm der mittleren arithmetischen Rauheit; b) kumulierte relative Häufigkeit der mittleren arithmetischen Rauheit.

Um die Ausreißer in allen gemessenen Oberflächeneigenschaften untersuchen zu können, werden alle Oberflächeneigenschaften als Boxplot (vgl. Abschnitt 4.3.3) in Abbildung 6-8 dargestellt. Die einzelnen Oberflächeneigenschaften werden mit ihrem jeweiligen Median normiert, damit alle unterschiedlichen Eigenschaften in einer Abbildung vergleichend betrachtet werden können. Zusätzlich dazu ist die Ordinate als relative Größe logarithmisch aufgetragen, da die Ausreißer der jeweiligen Oberflächeneigenschaften z.T. um mehrere Größenordnungen variieren. Eine Besonderheit dabei ist, dass eine hohe Anzahl der vorhandenen Ausreißer Versuch V05 zuzuordnen sind. Diese Ausreißer sind zusätzlich blau umkreist. Es ist erkennbar, dass die Daten von Versuch V05 in über der Hälfte der untersuchten Oberflächeneigenschaften einen oder mehrere Ausreißer bedingen.

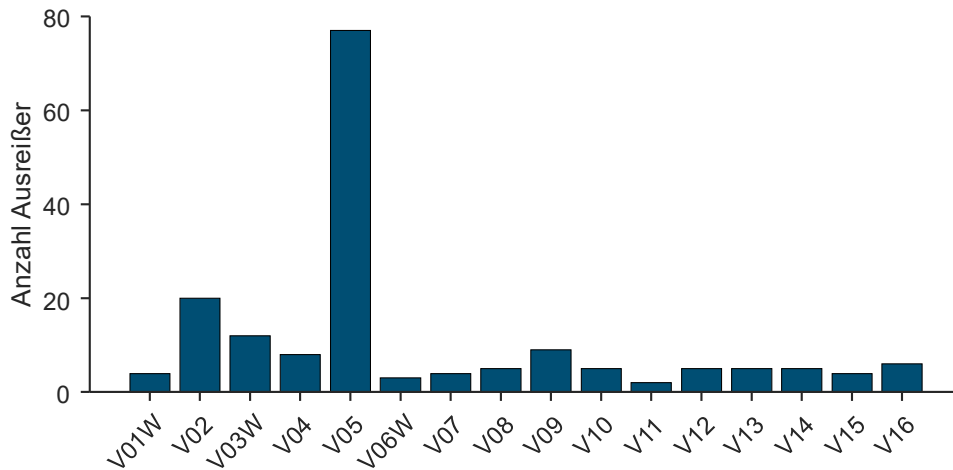


**Abbildung 6-8:** Boxplot der untersuchten Oberflächeneigenschaften bezogen auf den jeweiligen Median. Die blau umkreisten Ausreißer sind aus Versuch V05.

Noch deutlicher lässt sich dieser Effekt in Abbildung 6-9 beobachten. Hier ist die Summe aller Ausreißer über alle Oberflächeneigenschaften aufgetragen. Während die anderen Versuchsreihen jeweils weniger als 20 Ausreißer bedingen, sind über 70 Ausreißer auf Versuch V05 zurückzuführen. Dieser Umstand wird dadurch unterstützt, dass bereits bei der Betrachtung der Laufbahnen sowie der Oberflächenscans (vgl. Abschnitt 5.2) die Ergebnisse von V05 sich deutlich von den restlichen Versuchen unterscheiden. Sie zeigen eine deutlich breitere Schädigung der Laufbahn und die Schädigung ist im Vergleich zu den restlichen Versuchen deutlich tiefer. Aufgrund der auffällig hohen Anzahl an Ausreißern sowie der starken Abweichung der Schadensbildentwicklung kann für den Datensatz

---

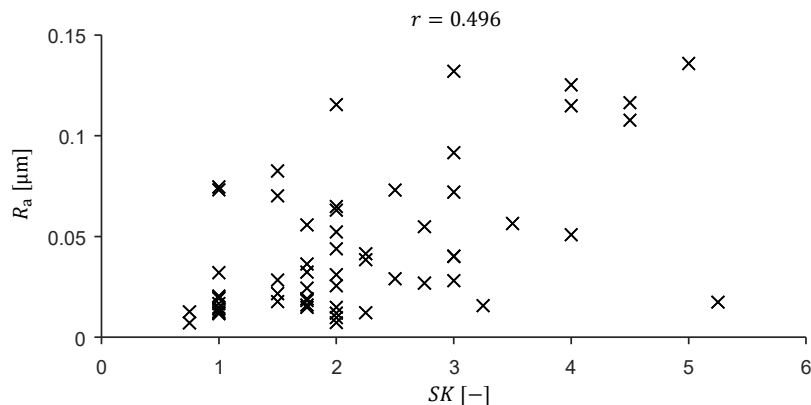
V05 ein systematischer Fehler während der Versuchsdurchführung nicht ausgeschlossen werden. Der Gesamtdatensatz wird daher um die Daten von V05 bereinigt.



**Abbildung 6-9:** Summe aller Ausreißer in den untersuchten Oberflächeneigenschaften für den jeweiligen Versuch.

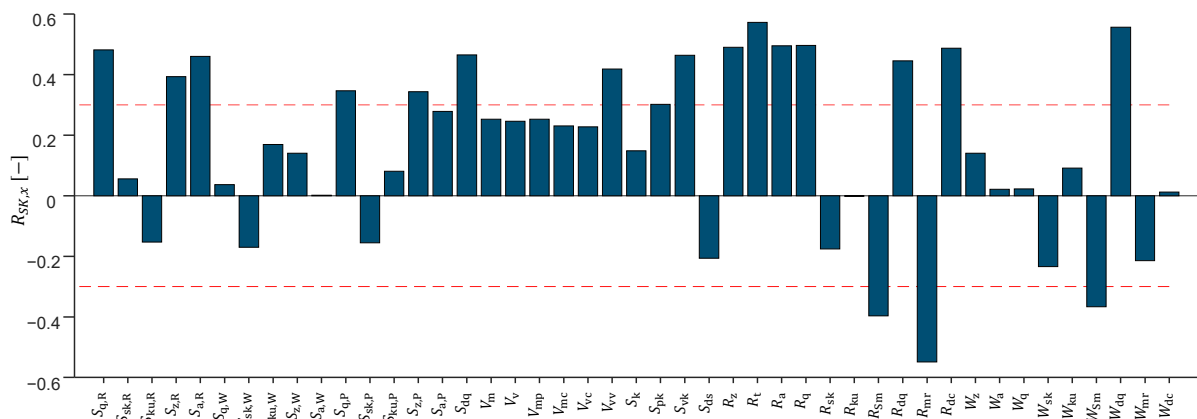
### 6.3.2 Untersuchung der Korrelation der Oberflächeneigenschaften mit der bewerteten Schädigung

Als nächstes wird die Korrelation zwischen den einzelnen Oberflächeneigenschaften mit dem bewerteten Lagerschaden untersucht. Oberflächeneigenschaften, die potenziell geeignet sind für die Verwendung als metrische Skala elektrischer Lagerschädigung müssen mit der Veränderung der Laufbahnoberfläche zusammenhängen. Der Zustand jeder Laufbahn nach jeder Schädigungsperiode ist durch die Schadensklasse  $SK$  komparativ beschrieben. Wenn die betrachtete Oberflächeneigenschaft im Zusammenhang mit der elektrischen Lagerschädigung steht, muss diese mit der bewerteten Schadensklasse korrelieren. Es wird die Korrelation zwischen allen Bewertungen der Schadensklasse nach jeder Schädigungsperiode mit der entsprechenden betrachteten Oberflächeneigenschaft berechnet. In Abbildung 6-10 ist exemplarisch die mittlere arithmetische Rauheit  $R_a$  gegen die Schadensklasse  $SK$  aufgetragen. Es ist erkennbar, dass mit zunehmender Schadensklasse tendenziell auch die gemessene Rauheit zunimmt. Jedoch liegen die betrachteten Werte nicht entlang einer Linie, sondern weisen eine breite Verteilung auf. Der aus diesen Werten berechnete Korrelationskoeffizient liegt bei  $r = 0.496$ , was einer mittleren Korrelation entspricht. Damit kann festgehalten werden, dass die mittlere arithmetische Rauheit  $R_a$  die geforderte Korrelation erfüllt.



**Abbildung 6-10:** Scatterplot der bewerteten Schädigung und der gemessenen mittleren arithmetischen Rauheit.

In Abbildung 6-11 sind die Korrelationskoeffizienten aller untersuchter Oberflächeneigenschaften als Balkendiagramm dargestellt. Zudem sind die Schranken für die signifikante Korrelation  $|r| \geq 0.3$  aufgetragen. Alle Eigenschaften außerhalb dieser Schranken erfüllen die Forderung. Es ist erkennbar, dass von den 45 untersuchten Oberflächeneigenschaften 19 Eigenschaften eine Korrelation von  $|r| \geq 0.3$  aufweisen. Die übrigen Eigenschaften erfüllen diese Anforderung nicht.



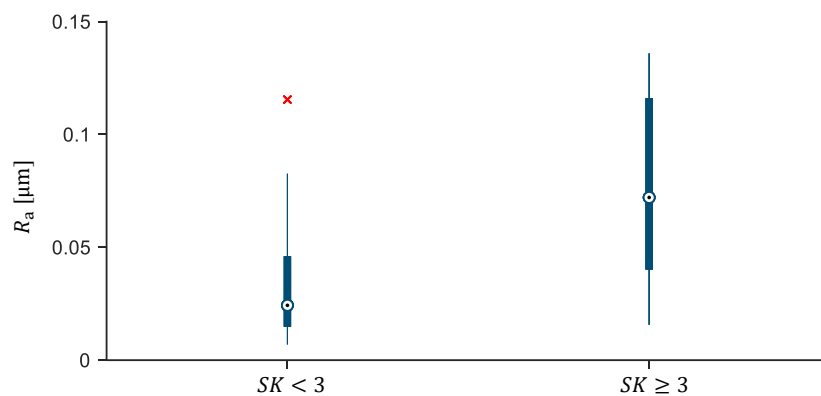
**Abbildung 6-11:** Korrelationskoeffizienten der untersuchten Oberflächeneigenschaften. Alle Eigenschaften außerhalb der markierten Begrenzung erfüllen die Anforderung.

Quelle: Harder et al. (2022) S.9.

### 6.3.3 Untersuchung der Identifikation von Riffeln

In diesem Abschnitt wird geprüft, ob mithilfe der gemessenen Oberflächeneigenschaften Lager mit ausgeprägter Riffelbildung unterschieden werden können. Dazu werden die Da-

ten der untersuchten Laufbahnen in zwei Gruppen geteilt. Lager, die im Median eine Bewertung von  $SK < 3$  erhalten haben, zählen zu Menge  $A$  der Lager ohne Riffel mit  $A = \{SK < 3\}$ . Lager, die im Median mit  $SK \geq 3$  bewertet wurden, zählen zu Menge  $B$  der Lager mit Riffeln mit  $B = \{SK \geq 3\}$ . Somit befinden sich in Menge  $A$  45 Lageroberflächen und in Menge  $B$  15 Lageroberflächen. In Abbildung 6-12 ist der Boxplot beider Gruppen exemplarisch für die arithmetische Rauheit  $R_a$  aufgetragen. Es ist erkennbar, dass der Median der Menge  $B$  größer ist, als der Median der Menge  $A$ . Die Quartilsabstände beider Mengen überlagern sich nur geringfügig. Anhand dessen kann festgestellt werden, dass es einen Übergangsbereich der Rauheit gibt, in dem sowohl Lager ohne Riffel als auch Lager mit Riffel liegen können. Im Median unterscheiden sich beide Mengen allerdings.



**Abbildung 6-12:** Boxplot der mittleren arithmetischen Rauheit sortiert nach der bewerteten Schädigungsklasse.

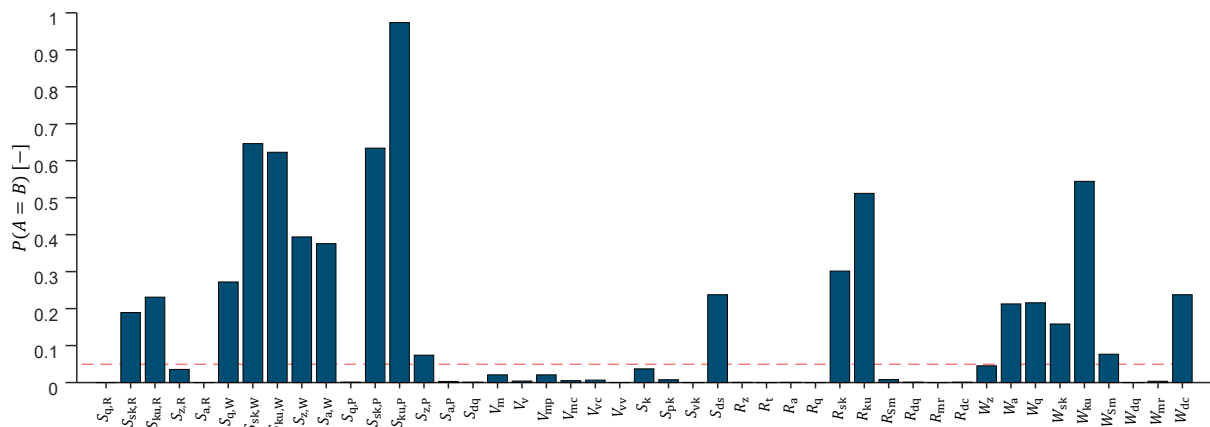
Diese Aussage kann mithilfe des WILCOXON Rangsummentests<sup>187</sup> quantifiziert werden. Mit diesem Verfahren wird die Hypothese geprüft, dass zwei Mengen an Daten den gleichen Median besitzen und damit die gleiche Verteilung. Wenn die dabei berechnete Wahrscheinlichkeit unter einem kritischen Wert liegt, kann diese Hypothese verworfen werden und die beiden Gruppen sind unterschiedlich.  $P(A = B) < 0.05$  wurde als kritische Wahrscheinlichkeit definiert. Nach dem WILCOXON Rangsummentest lässt sich berechnen, dass die Wahrscheinlichkeit, dass beide Mengen gleich sind, bei  $P(A = B)_{R_a} = 0.004$  liegt. Die Hypothese der gleichen Mengen kann verworfen werden. Die arithmetische Rauheit  $R_a$  ermöglicht somit eine eindeutige Unterscheidung zwischen Riffeln und keinen Riffeln.

Das Ergebnis des WILCOXON Rangsummentests für alle untersuchten Oberflächeneigenschaften ist in Abbildung 6-13 dargestellt. Der Grenzwert, bis zu dem die Hypothese gleicher Mengen verworfen werden kann, ist als gestrichelte rote Linie dargestellt. Alle Eigenschaften unterhalb der rot gestrichelten Linie erfüllen die Anforderung, alle Eigenschaften

<sup>187</sup> Vgl. Wilcoxon (1945).



darüber erfüllen die Anforderung nicht. Es ist erkennbar, dass von den 45 untersuchten Eigenschaften 26 Eigenschaften die Anforderung erfüllen. Die übrigen Eigenschaften erfüllen die Anforderung nicht.



**Abbildung 6-13:** Ergebnis des Rangsummentest zur Untersuchung der Wahrscheinlichkeit gleicher Mengen A und B. Alle Eigenschaften unterhalb des Grenzwertes erfüllen die Anforderung.

Quelle: Harder et al. (2022) S.10.

### 6.3.4 Untersuchung der Schwankung der Oberflächeneigenschaften

Die Schwankung der Schadensklasse wird über den Quartilsabstand der abgegebenen Bewertungen beschrieben. Dieser soll mit der Standardabweichung der gemessenen Oberflächeneigenschaften verglichen werden. Um diese miteinander vergleichen zu können, müssen zwei Voraussetzungen erfüllt werden. Die erste Voraussetzung ist, dass beide Größen metrisch sein müssen, da eine Umrechnung dieser beiden Größen nur bei metrischen Daten zulässig ist<sup>188</sup>. Da die Ergebnisse der Schadensbewertung nicht metrisch sind, ist eine solche Umrechnung nicht zulässig. Damit ein Vergleich trotzdem möglich ist, wird angenommen, dass die verwendete Skala der Lagerschädigung metrisch ist. Das bedeutet, dass die Abstände zwischen den Stufen gleich sind, nicht aber, dass die damit beschriebene Schädigung in äquidistanten Schritten beschrieben wird. Insofern wird auch nicht die Schwankung der Schädigung, sondern nur die Schwankung der Bewertung diskutiert.

Die zweite Voraussetzung ist, dass die Daten, aus denen der Median bzw. die Standardabweichung berechnet sind, normalverteilt sind. Wie in Abbildung 6-2 und Abbildung 6-7 sichtbar ist, sind beide Verteilungen linksschief und somit nicht normalverteilt. Allerdings liegt die Ursache in der linksschiefen Verteilung darin, dass Lager mit unterschiedlicher

<sup>188</sup> Vgl. Kosfeld et al. (2016) S.12.

Schädigungsdauer verglichen werden. Es wird daher angenommen, dass bei einer ausreichend hohen Stichprobe untersuchter Lager gleicher Schädigungsdauer eine Normalverteilung zu erwarten ist.

Somit sind beide Voraussetzungen erfüllt, die für eine Vergleichbarkeit erforderlich sind. Damit die einzelnen Oberflächeneigenschaften miteinander und mit der bewerteten Schadenklasse verglichen werden können, müssen diese in relative Größen umgewandelt werden. Als Bezugsgröße wird die Obergrenze des Datensatzes gewählt. Diese wird im Allgemeinen berechnet als<sup>189</sup>

$$z_{0,x} = \check{x}_{0.75} + 1.5 \cdot q_x. \quad 6.1$$

Dabei beschreibt das  $\check{x}_{0.75}$  das 75% Quantil der untersuchten Größe und  $q_x$  ist der Quartilsabstand der entsprechenden Größe  $x$ . Durch die Verwendung der Obergrenze wird sichergestellt, dass die Bewertung nicht durch einen einzelnen Ausreißer verfälscht wird, wie es bei der Verwendung des größten gemessenen Wertes möglich wäre. Somit berechnet sich die relative Schwankung der Schadensklasse mit

$$s_{SK} = \frac{0.5 \cdot \bar{q}_{SK}}{z_{0,SK}}. \quad 6.2$$

$\bar{q}_{SK}$  beschreibt den Mittelwert des Quartilsabstandes über alle bewerteten Lager. Dieser wird anstelle des in Abschnitt 6.1.2 definierten Medians verwendet, da der Mittelwert sensibler bzgl. Ausreißern ist und damit einzelne Messungen mit einer hohen Schwankung in der Bewertung nicht unberücksichtigt bleiben. Analog zu Gleichung 6.2 wird die relative Schwankung aller Messgrößen berechnet mit

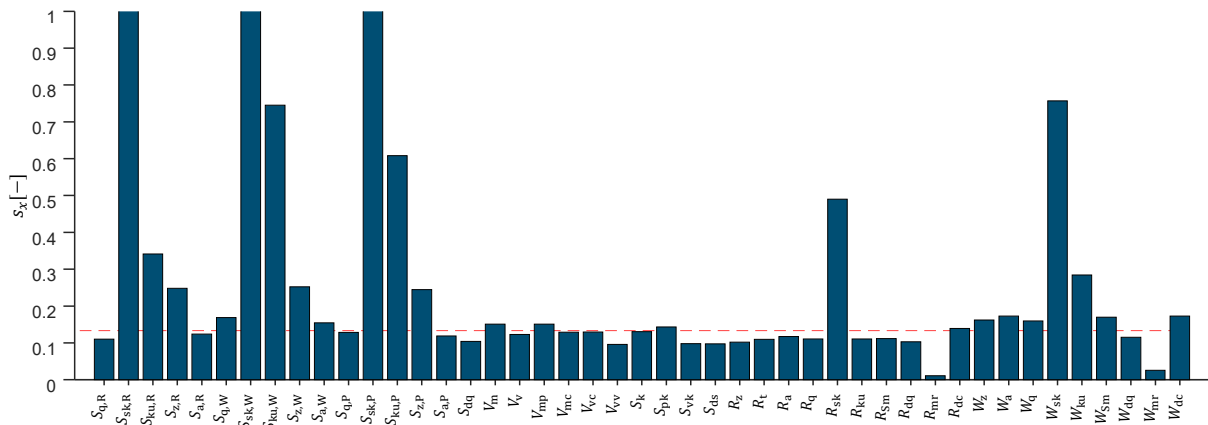
$$s_x = \frac{0.68 \cdot \bar{\sigma}_x}{z_{0,x}}. \quad 6.3$$

$\bar{\sigma}_x$  ist dabei die über alle Messungen gemittelte Standardabweichung der gemessenen Größe  $x$ . Der Unterschied in den Faktoren in den Gleichungen 6.2 und 6.3 ist notwendig, um den halben Quartilsabstand und die Standardabweichung zu normieren.

In Abbildung 6-14 ist die relative Schwankung der untersuchten Oberflächeneigenschaften dargestellt. Als Referenz ist die Schwankung der Schadensbewertung  $s_{SK} = 0.13$  als gestrichelte rote Linie dargestellt. Besonders auffällig ist, dass alle Werte, welche die Schiefe des Profils beschreiben, eine sehr hohe Schwankung aufweisen. Insgesamt erfüllen 21 Eigenschaften die gesetzte Anforderung. Die übrigen Eigenschaften erfüllen die Anforderung nicht.

---

<sup>189</sup> Fahrmeir et al. (2016) S.62.

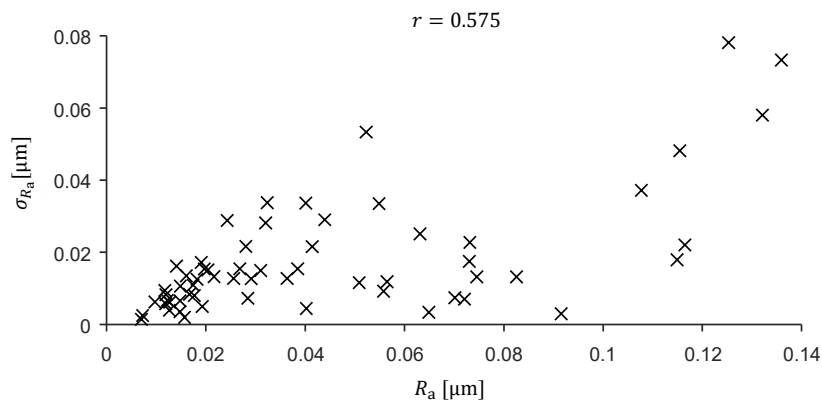


**Abbildung 6-14:** Relative Schwankung der untersuchten Oberflächeneigenschaften<sup>190</sup>. Alle Eigenschaften unterhalb des Grenzwertes erfüllen die Anforderung.  
Quelle: Harder et al. (2022) S.10.

### 6.3.5 Untersuchung der Korrelation zwischen Betrag und Schwankung der Oberflächeneigenschaft

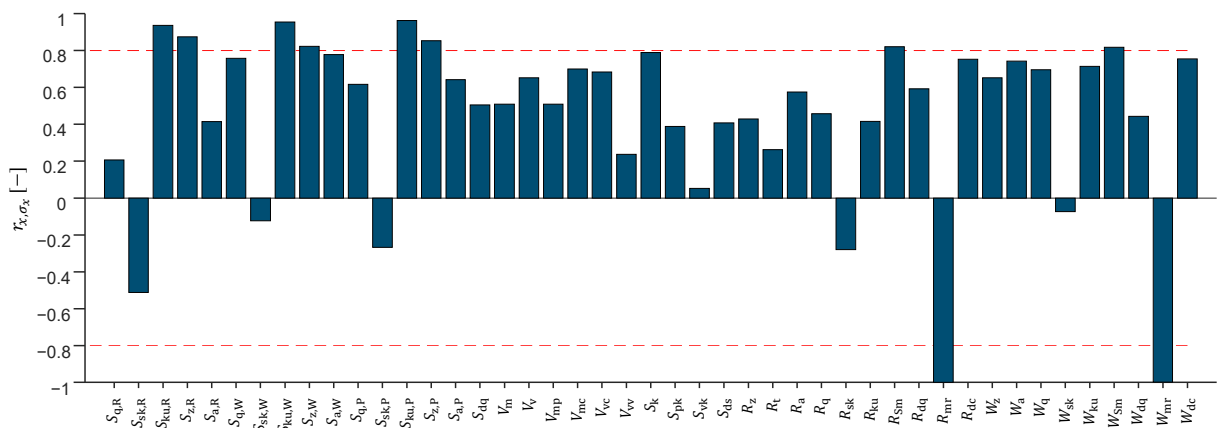
Die letzte Anforderung an eine Oberflächeneigenschaft ist die Unabhängigkeit zwischen dem Betrag der gemessenen Eigenschaft und der dazugehörigen Standardabweichung. Für eine optimale Messung ist es notwendig, dass diese beiden Größen so wenig Wechselwirkung wie möglich besitzen. Zumindest ist es aber erforderlich, dass keine starke Wechselwirkung zwischen diesen Größen vorliegt (siehe Abschnitt 4.4.1). In Abbildung 6-15 ist exemplarisch die Standardabweichung der mittleren arithmetischen Rauheit  $\sigma_{R_a}$  über ihren Mittelwert  $R_a$  aufgetragen. Es ist eine leichte Tendenz erkennbar, dass mit zunehmendem Mittelwert die Standardabweichung ebenfalls zunimmt. Das wird auch durch den Rangkorrelationskoeffizienten von  $r = 0.575$  bestätigt. Dieser liegt allerdings unterhalb des kritischen Wertes von  $|r_{x,\sigma_x}| < 0.8$ , weswegen keine starke Korrelation vorliegt und die Oberflächeneigenschaft somit die Anforderung erfüllt.

<sup>190</sup> Die Darstellung ist aus Übersichtsgründen bei  $s_x = 1$  abgeschnitten. Die Werte für  $s_{S_{3k,R}}$ ,  $s_{S_{3k,W}}$  und  $s_{S_{3k,P}}$  liegen alle über 1.



**Abbildung 6-15:** Scatterplot der Standardabweichung der mittleren arithmetischen Rauheit über ihren Mittelwert.

Abbildung 6-16 zeigt die Koeffizienten der Korrelation zwischen der Standardabweichung und dem Mittelwert der jeweiligen Oberflächeneigenschaft. Die meisten Eigenschaften weisen eine mittlere Korrelation von  $0.3 < |r_{x,\sigma_x}| < 0.8$  auf. Es ist erkennbar, dass von den untersuchten Eigenschaften 35 Eigenschaften die Anforderung erfüllen. Die übrigen Eigenschaften erfüllen die Anforderung nicht.



**Abbildung 6-16:** Korrelation zwischen Mittelwert und Standardabweichung der Oberflächeneigenschaften. Alle Eigenschaften innerhalb der Begrenzung erfüllen die Anforderung.

Quelle: Harder et al. (2022) S.11.

### 6.3.6 Bewertung der Anforderungserfüllung und Definition von kritischen Grenzwerten

Aus der Prüfung der gestellten Anforderungen ergibt sich, dass von den 45 untersuchten Oberflächeneigenschaften 12 Eigenschaften alle Anforderungen erfüllen. Diese sind in Tabelle 6-3 zusammengefasst. Durch die Erfüllung der gestellten Anforderungen sind alle 12 Oberflächeneigenschaften für eine Quantifizierung elektrischer Lagerschäden geeignet. Auf eine vergleichende Bewertung der Anforderungserfüllung der identifizierten Oberflächeneigenschaften wurde im Rahmen dieser Arbeit verzichtet.

**Tabelle 6-3:** Bewertung der Anforderungserfüllung.

Oberflächeneigenschaft	Äquidistante Abstände	$ r_{SK,x}  \geq 0.3$	$P(A = B)$	$s_x < s_{SK}$	$ r_{x,\sigma_x}  < 0.8$
$S_{q,R}$	+	0.481	0.0007	0.110	0.206
$S_{a,R}$	+	0.460	0.0019	0.124	0.414
$S_{q,P}$	+	0.347	0.0012	0.129	0.617
$S_{dq}$	+	0.466	0.0082	0.104	0.505
$V_{VV}$	+	0.419	0.0024	0.096	0.238
$S_{vk}$	+	0.464	0.0019	0.098	0.053
$R_z$	+	0.490	0.0040	0.101	0.429
$R_t$	+	0.573	0.0001	0.101	0.263
$R_a$	+	0.496	0.0042	0.118	0.575
$R_q$	+	0.497	0.0027	0.110	0.458
$R_{dq}$	+	0.446	0.0010	0.103	0.593
$W_{dq}$	+	0.557	0.0011	0.115	0.443

Eine qualitative Bewertung elektrischer Oberflächenschäden ist ebenfalls möglich, indem ein Grenzwert für die jeweilige Oberflächeneigenschaft definiert wird, welcher Zustände mit unterschiedlicher Schadensqualität voneinander abgrenzt. Bei elektrischen Lagerschäden werden typischerweise Kraterschäden, die als nicht kritisch eingestuft werden, von Riffelschäden, die einen kritischen Schädigungszustand darstellen, unterschieden<sup>191</sup>.

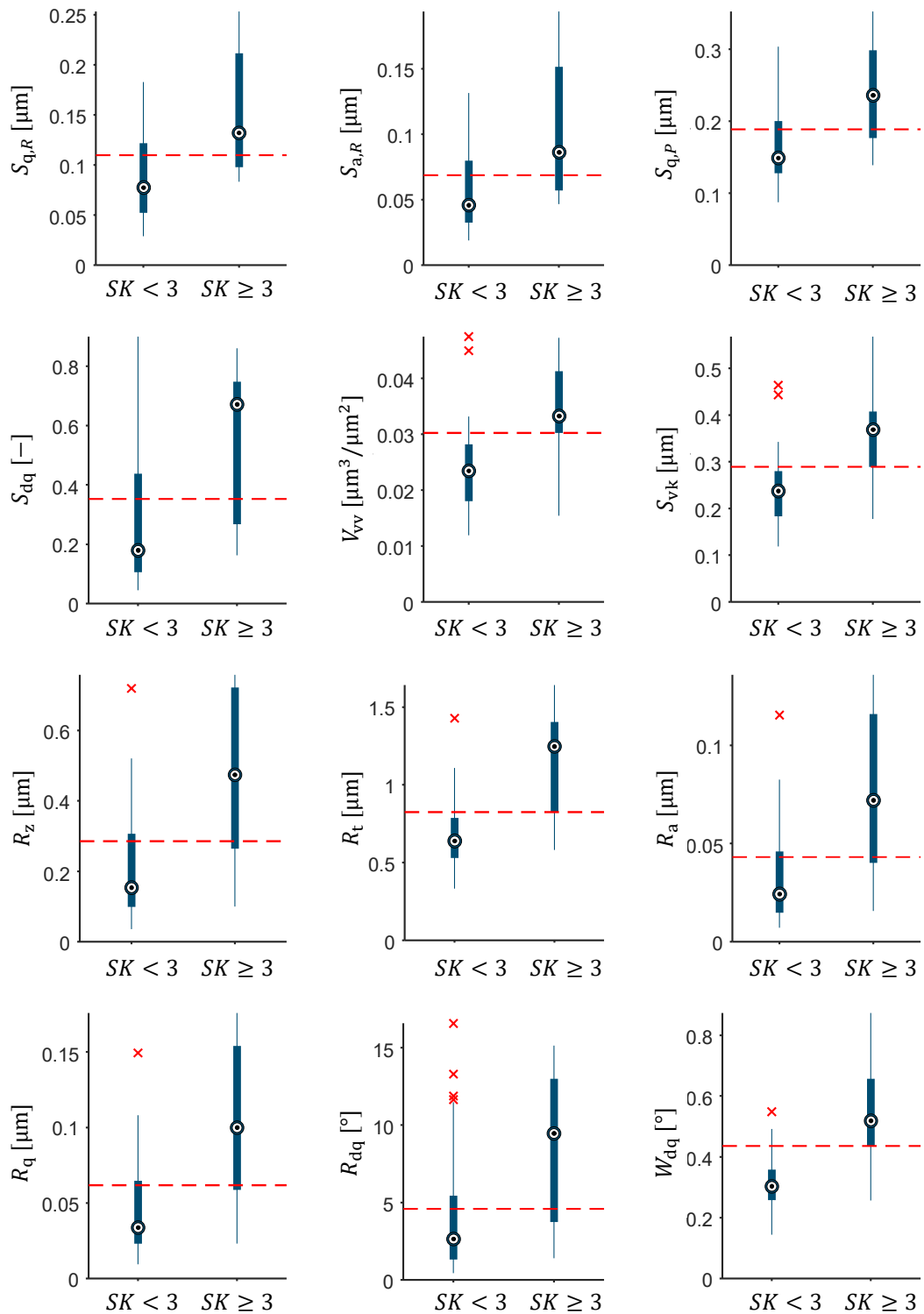
<sup>191</sup> Vgl. Muetze (2004).

Durch den Grenzwert  $SK = 3$  wird eine Abgrenzung von Oberflächen mit Riffelschäden von Oberflächen ohne Riffelschäden ermöglicht. Entsprechend werden die bewerteten Lagerschäden in die Mengen A und B aufgeteilt, welche geschädigten Lageroberflächen ohne und mit Riffeln darstellen (vgl. Abschnitt 6.2 und Abschnitt 6.3.3). Die Abgrenzung zwischen den beiden Schadenszuständen wird am Übergang zwischen dem 3. Quartil der Menge A ( $\check{x}_{0,75,A}$ ) und dem 1. Quartil der Menge B ( $\check{x}_{0,25,B}$ ) definiert. Sofern sich die Quartile überschneiden, wird als kritischer Wert der Mittelwert von  $\check{x}_{0,75,A}$  und  $\check{x}_{0,25,B}$  berechnet. Falls  $\check{x}_{0,25,B}$  größer ist als  $\check{x}_{0,75,A}$ , wird  $\check{x}_{0,25,B}$  als kritischer Wert betrachtet. Mathematisch wird dieser Zusammenhang beschrieben als

$$x_{\text{Krit}} := \begin{cases} \frac{\check{x}_{0,25,B} + \check{x}_{0,75,A}}{2} & \text{wenn } \check{x}_{0,25,B} < \check{x}_{0,75,A} \\ \check{x}_{0,25,B} & \text{wenn } \check{x}_{0,25,B} \geq \check{x}_{0,75,A} \end{cases} \quad 6.4$$

In Abbildung 6-17 sind die Boxplots aller geeigneter Oberflächeneigenschaften dargestellt. Zudem ist der jeweilige kritische Wert als rote gestrichelte Linie aufgetragen. Bei allen Eigenschaften sind Messwerte enthalten, die unterhalb des kritischen Wertes liegen, jedoch Riffel zeigen. Ebenso gibt es Messwerte, die oberhalb des kritischen Wertes liegen, jedoch keine Riffel zeigen. Dies ergibt sich durch die Definition des Grenzwertes, dass bis zu 75 % der untersuchten Lager mit Riffelschaden eine Oberflächeneigenschaft oberhalb dieses Wertes aufweisen und 75 % der Lager ohne Riffelschaden eine Oberflächeneigenschaft unterhalb dieses Wertes. In Tabelle 6-4 sind alle kritischen Werte der jeweiligen Oberflächeneigenschaften aufgetragen.

Als nächstes wird geprüft, ob die definierten Werte mit Messwerten aus der Literatur vereinbar sind. Obwohl nur wenige Beiträge im Forschungsbereich elektrischer Lagerschäden einen Fokus auf die Quantifizierung der Oberflächenschädigung legen (siehe Abschnitt 2.2.1), gibt es eine Reihe von Veröffentlichungen, in denen Versuchsdaten unterschiedlicher Oberflächeneigenschaften elektrisch geschädigter Wälzlager veröffentlicht sind. Diese Versuchsdaten werden als Referenz zu den im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Grenzwerten genommen. Wenn sich Versuchsdaten aus der Literatur mithilfe der in Tabelle 6-4 aufgetragenen kritischen Werte abgrenzen lassen, wird dies als Bestätigung des entsprechenden Grenzwertes gewertet. Wenn in einer Literaturquelle Werte für Oberflächenschäden angegeben werden, die zwar dem konkreten Grenzwert widersprechen, allerdings im Rahmen der 25% oberhalb bzw. unterhalb des Grenzwertes liegen, werden die Daten der entsprechenden Quelle nicht als Widerspruch zum Grenzwert betrachtet. Sofern die veröffentlichten Daten außerhalb dieses Bereiches liegen, werden diese als Abweichung gewertet.



**Abbildung 6-17:** Boxplots der Verteilung der geeigneten Oberflächeneigenschaften. Die Daten wurden in zwei Gruppen (ohne Riffelschäden und mit Riffelschäden) eingeteilt. Die rot gestrichelte Linie stellt kritischen Grenzwert dar, der eine Abgrenzung zwischen Riffeln und Kraterschäden ermöglicht.

Quelle: Harder et al. (2022) S. 15.

---

ZIKA ET AL. untersuchen die Riffelentstehung bei unterschiedlichen nieder- und hochfrequenten Strömen<sup>192</sup>. Darin werden auch Messwerte für die quadratische mittlere Rauheit  $R_q$  sowie die totale Rauheit  $R_t$  für sechs Laufbahnen elektrisch geschädigter Lager vorgestellt, von denen eine klare Riffel zeigt. Für  $R_q$  werden Werte zwischen  $0.060 \mu\text{m}$  und  $0.090 \mu\text{m}$  auf Laufbahnoberflächen ohne Riffel gemessen. Auf der Laufbahn mit Riffeln werden Werte zwischen  $0.045 \mu\text{m}$  und  $0.128 \mu\text{m}$  gemessen<sup>193</sup>. Die unterschiedlichen Werte sind dabei darauf zurückzuführen, dass in der Arbeit von ZIKA ET AL. zwischen den Oberflächeneigenschaften dunkler und heller Riffelbereiche differenziert wird. Diese Messwerte erlauben zwar keine Verifikation des definierten Grenzwertes für  $R_{q,Krit}$ . Sie stehen aber auch nicht im Widerspruch dazu, da die Messwerte im gleichen Bereich liegen wie die Ergebnisse dieser Arbeit.

Für  $R_t$  werden Werte zwischen  $0.450 \mu\text{m}$  und  $0.792 \mu\text{m}$  auf Laufbahnoberflächen ohne Riffel gemessen. Auf der Laufbahn mit Riffeln werden Werte zwischen  $0.480 \mu\text{m}$  und  $0.838 \mu\text{m}$  gemessen<sup>194</sup>. Die Messergebnisse der Laufbahnen ohne Riffel stehen im Einklang mit dem Grenzwert  $R_{t,Krit}$ . Auch die Messung der dunklen Riffelbereiche mit einem Wert von  $0.480 \mu\text{m}$  steht in keinem Widerspruch mit diesem, obwohl dieser Wert klar außerhalb der im Rahmen dieser Arbeit gemessenen Werte liegt. Das liegt daran, dass im Gegensatz zu den Daten von ZIKA ET AL. die im Rahmen dieser Arbeit gemessenen Werte über mehrere Riffel gemessen wurden. Da  $R_t$  keine Mittelung darstellt, sondern die Differenz des höchsten und des tiefsten Messwertes der Oberfläche, muss die Rauheit über mehrere Riffel mindestens genauso groß sein, wie die Rauheit der hellen Bereiche ( $0.838 \mu\text{m}$ ). Insofern wird der Grenzwert durch die Messwerte von ZIKA ET AL. bestätigt.

BECHEV ET AL. untersuchen in ihrer Veröffentlichung den Einfluss unterschiedlicher Fette auf die elektrische Schädigung von Lagern<sup>195</sup>. Darin geben sie auch die Riefentiefe  $S_{vk}$  von Lagern mit grauen Laufspuren ( $0.1 \mu\text{m}$  bis  $0.3 \mu\text{m}$ ), mit leichten Riffeln ( $0.1 \mu\text{m}$  bis  $0.2 \mu\text{m}$ ) und mit starken Riffeln ( $0.4 \mu\text{m}$  bis  $0.6 \mu\text{m}$ ) an<sup>196</sup>. Während die Ergebnisse der grauen Laufspuren und der starken Riffel nicht im Widerspruch zu den in Rahmen dieser Arbeit erhobenen Daten stehen, sind die leichten Riffel außerhalb des Bereiches von  $S_{vk}$ , der im Rahmen dieser Arbeit gemessen wurde. Insofern weichen die Ergebnisse für  $S_{vk}$  von den Literaturwerten ab.

---

<sup>192</sup> Vgl. Zika et al. (2009b).

<sup>193</sup> Zika et al. (2009b) S.793.

<sup>194</sup> Zika et al. (2009b) S.793.

<sup>195</sup> Vgl. Bechev et al. (2018).

<sup>196</sup> Bechev et al. (2018) S.10.



---

GEMEINDER stellt in seiner Arbeit Werte für  $R_a$  (0.03  $\mu\text{m}$  bis 0.06  $\mu\text{m}$ ),  $R_z$  (0.22  $\mu\text{m}$  bis 0.44  $\mu\text{m}$ ) und  $R_q$  (0.04  $\mu\text{m}$  bis 0.08  $\mu\text{m}$ ) für elektrisch geschädigte Lager ohne erkennbare Riffelbildung vor<sup>197</sup>. Diese stehen nicht im Widerspruch zu den Ergebnissen dieser Arbeit oder zu den hier definierten Grenzwerten.

GRAF UND SAUER präsentieren ebenfalls Messdaten elektrisch geschädigter Oberflächen von Wälzlagern ohne Riffelbildung<sup>198</sup>. Sie zeigen die Änderung der quadratischen Flächenrauheit  $S_{q,p}$  über die Zeit in Abhängigkeit der anliegenden elektrischen Last. Dabei messen sie Werte von  $S_{q,p}$  zwischen 0.17  $\mu\text{m}$  und 0.40  $\mu\text{m}$ <sup>199</sup>. Diese Werte weichen von den in Rahmen dieser Arbeit gemessenen Werte ab. Aufbauend auf diesen Versuchen haben GRAF UND SAUER zudem die Riefentiefe  $S_{vk}$  angegeben (0.39  $\mu\text{m}$  bis 1.04  $\mu\text{m}$ )<sup>200</sup>. Diese Werte weichen ebenfalls von den in Rahmen dieser Arbeit gemessenen Werten ab.

Weitreichende Untersuchungen zum elektrischen Stromdurchgang werden im Rahmen von zwei Projekten der Forschungsvereinigung Antriebstechnik (FVA) durchgeführt<sup>201</sup>. Im Rahmen des Forschungsvorhabens FVA 650 I werden unterschiedliche Betriebszustände hinsichtlich ihrer Kritikalität für die Entstehung elektrischer Lagerströme untersucht<sup>202</sup>. Dabei werden Rauheitskennwerte  $R_a$ ,  $R_q$  und  $R_z$  von fünf elektrisch geschädigten Lagern ohne Riffel sowie von einem Lager mit Riffeln angegeben. Die gemessenen Werte für  $R_a$  liegen zwischen 0.02  $\mu\text{m}$  und 0.06  $\mu\text{m}$  für Lager ohne Riffel sowie zwischen 0.05  $\mu\text{m}$  und 0.25  $\mu\text{m}$  beim Lager mit Riffelschäden. Sie stellen somit keinen Widerspruch zu den ermittelten Grenzwerten dar. Für  $R_q$  liegen die Messwerte zwischen 0.03  $\mu\text{m}$  und 0.08  $\mu\text{m}$  für Lager ohne Riffel sowie zwischen 0.06  $\mu\text{m}$  und 0.71  $\mu\text{m}$  beim Lager mit Riffelschäden und stellen somit ebenfalls keinen Widerspruch dar. Für  $R_z$  werden Werte zwischen 0.23  $\mu\text{m}$  und 0.67  $\mu\text{m}$  für Lager ohne Riffel sowie zwischen 0.47  $\mu\text{m}$  und 2.83  $\mu\text{m}$  beim Lager mit Riffelschäden gemessen. Die Messwerte der Lager ohne Riffel stellen dabei eine Abweichung zu dem im Rahmen dieser Arbeit definierten Grenzwert dar, da diese oberhalb des zulässigen Wertebereichs liegen.<sup>203</sup>

In dem Forschungsvorhaben 650 II wurde der Einfluss unterschiedlicher Schmierstoffe auf die elektrische Lagerschädigung untersucht und dabei eine Reihe unterschiedlicher Oberflächeneigenschaften auf neun Lagerringen gemessen. Dabei wurden jedoch nur Lager

---

<sup>197</sup> Gemeinder (2016) S.116.

<sup>198</sup> Vgl. Graf und Sauer (2020).

<sup>199</sup> Graf und Sauer (2020) S.10.

<sup>200</sup> Graf und Sauer (2022) S.151.

<sup>201</sup> Vgl. Radnai et al. (2015) und Bechev et al. (2020).

<sup>202</sup> Vgl. Radnai et al. (2015).

<sup>203</sup> Radnai et al. (2015). Daten für Lager ohne Riffel: S.47,50,52,56,59. Daten für Lager mit Riffel: S.64.

---

ohne Riffelschäden vermessen<sup>204</sup>. Die Daten zu den Eigenschaften  $S_{q,p}$  ( $< 0.3 \mu\text{m}$ ),  $S_{vk}$  ( $< 0.3 \mu\text{m}$ ),  $R_a$  ( $< 0.08 \mu\text{m}$ ),  $R_q$  ( $< 0.1 \mu\text{m}$ ) und  $R_t$  ( $< 0.9 \mu\text{m}$ ) stehen in keinem Widerspruch zu den definierten Grenzwerten. Eine Bestätigung der Grenzwerte ist aufgrund fehlender Messdaten mit Riffelschäden nicht möglich. Die gemessenen Werte für  $R_z$  ( $0.3 \mu\text{m}$  bis  $0.7 \mu\text{m}$ ) liegen oberhalb des im Rahmen dieser Arbeit gemessenen Bereiches, weswegen eine Abweichung vorliegt.<sup>205</sup>

In Tabelle 6-4 sind die Grenzwerte für die betrachteten Oberflächeneigenschaften aufgetragen sowie Literaturquellen angegeben, in denen diese Eigenschaft ebenfalls gemessen wurde. Darüber hinaus wird bewertet, ob die Literaturwerte mit den kritischen Werten übereinstimmen, ob sie zumindest keinen Widerspruch darstellen, oder ob eine Abweichung zwischen dem Grenzwert und der Literatur vorhanden ist. Dabei wird die kritischste Bewertung angegeben. So sind bspw. für  $S_{q,p}$  sowohl Literaturwerte vorhanden, die keinen Widerspruch anzeigen als auch welche, die eine Abweichung darstellen. Insgesamt weist der Literaturvergleich somit eine Abweichung zum Grenzwert auf. Eigenschaften, zu denen keine Vergleichsdaten vorhanden sind, sind als solche markiert.

## 6.4 Diskussion

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse dieses Kapitels diskutiert. Anschließend wird eine Bewertung dieser Ergebnisse durchgeführt sowie diese in den Kontext der untersuchten Forschungsfrage gestellt.

### 6.4.1 Diskussion der Eignung unterschiedlicher Oberflächeneigenschaften

Im vorhergehenden Kapitel wurden 45 unterschiedliche Eigenschaften von Laufbahnoberflächen untersucht und ihre Eignung zur Bewertung elektrischer Lagerschäden beurteilt. Als Referenz wurde dabei die subjektive Beurteilung der elektrischen Lagerschäden genommen, die im Rahmen einer Studie erhoben wurde. Basierend auf der Beurteilung wurden Anforderungen an eine geeignete Oberflächeneigenschaft abgeleitet. Dabei konnten 12 Eigenschaften die definierten Anforderungen erfüllen. Daraus ließen sich einige Beobachtungen machen, die über die Anforderungserfüllung hinaus dem Verständnis des Zusammenhangs zwischen den Eigenschaften und den elektrischen Schäden dienen.

Zunächst lässt sich beobachten, dass beinahe alle Eigenschaften der Welligkeit nur eine geringe Korrelation zur Schädigung aufweisen. Nur eine Eigenschaft ( $W_{dq}$ ) erfüllt die Anforderungen. Da im Kontrast dazu sowohl Kennwerte der Rauheit als auch des Primärpro-

---

<sup>204</sup> Bechev et al. (2020) S.76ff.

<sup>205</sup> Bechev et al. (2020) S.158ff.

files mehr Korrelationen aufweisen, kann festgehalten werden, dass eine dedizierte Betrachtung langwelliger Effekte auf Laufbahnoberflächen nur bei  $W_{dq}$  einen Mehrwert bietet.

**Tabelle 6-4:** Zusammenfassung der kritischen Werte für Riffel für die jeweiligen Oberflächeneigenschaften

Eigenschaft	Krit. Wert $X_{\text{Krit}}$	Literatur
$S_{q,R}$	0.110 $\mu\text{m}$	Keine Vergleichsdaten vorhanden.
$S_{a,R}$	0.069 $\mu\text{m}$	Keine Vergleichsdaten vorhanden.
$S_{q,P}$	0.189 $\mu\text{m}$	Abweichung (BECHEV ET AL. 2020 & GRAF UND SAUER 2020).
$S_{dq}$	0.353	Keine Vergleichsdaten vorhanden.
$V_{vv}$	0.030 $\frac{\mu\text{m}^3}{\mu\text{m}^2}$	Keine Vergleichsdaten vorhanden.
$S_{vk}$	0.289 $\mu\text{m}$	Abweichung (BECHEV ET AL. 2018, BECHEV ET AL. 2020 & GRAF UND SAUER 2022).
$R_z$	0.285 $\mu\text{m}$	Abweichung (RADNAI ET AL. 2015, GEMEINDER 2016 & BECHEV ET AL. 2020).
$R_t$	0.824 $\mu\text{m}$	Kein Widerspruch (ZIKA ET AL. 2009 & BECHEV ET AL. 2020).
$R_a$	0.043 $\mu\text{m}$	Kein Widerspruch (RADNAI ET AL. 2015 & GEMEINDER 2016 & BECHEV ET AL. 2020).
$R_q$	0.062 $\mu\text{m}$	Kein Widerspruch (ZIKA ET AL. 2009, RADNAI ET AL. 2015 & GEMEINDER 2016).
$R_{dq}$	4.596 $^\circ$	Keine Vergleichsdaten vorhanden.
$W_{dq}$	0.436 $^\circ$	Keine Vergleichsdaten vorhanden.

---

Eine weitere Beobachtung ist aus der Betrachtung der relativen Schwankung in Abbildung 6-14 ableitbar. Darin ist zu erkennen, dass die Schiefe der Punkteverteilung als Bewertungsparameter unabhängig von der Dimension oder der angewandten Filterung eine besonders hohe relative Streuung aufweist. Dies kann daran liegen, dass diese Kenngrößen sehr sensitiv gegenüber einzelnen Spitzen oder Tälern sind.<sup>206</sup> In Abschnitt 5.2 wurden zwar Bereiche mit deutlichen Ausreißern nicht für die Berechnung der Eigenschaften berücksichtigt, allerdings wurden vor allem kleinere Anomalien nicht ausgeschlossen. Diese können der Grund für die hohen Schwankungen sein. Zudem erklärt dies auch, warum die Schwankung bei den Flächenparametern höher ist als bei Linienparametern, da diese bei Linienparametern nicht immer im ausgewerteten Bereich liegen. Auch für die hohe Schwankung der Kurtosis ist dies eine mögliche Erklärung, deren Schwankung zwar geringer ist, als die der Schiefe aber bis auf  $R_{ku}$  über dem zulässigen Wert liegt (siehe Abbildung 6-14).

#### 6.4.2 Diskussion des Vergleichs mit Literaturwerten

Im Vergleich der definierten kritischen Werte der Oberflächen mit Werten aus der Literatur wird deutlich, dass Messungen bekannt sind, die von den im Rahmen dieser Arbeit gemessenen Werten abweichen. Insbesondere werden in einigen Veröffentlichungen<sup>207</sup> Messwerte präsentiert, die keine Riffel zeigen, aber oberhalb des jeweiligen kritischen Wertes sowie außerhalb des gemessenen Wertebereiches für Lager ohne Riffel liegen. Dies kann mehrere Ursachen haben. Zunächst werden in den genannten Veröffentlichungen andere Lagergrößen verwendet. Bezüglich des Herstellers der verwendeten Lager werden in den Veröffentlichungen keine Angaben gemacht. Es kann daher nicht ausgeschlossen werden, dass die Lager in der Literatur bereits im Neuzustand andere Oberflächeneigenschaften besitzen als die in dieser Arbeit verwendeten Lager. Der Einfluss des Fertigungsprozesses und der daraus resultierenden initialen Oberflächeneigenschaften der Lagerlaufbahn sowie der Lagergröße auf die Entstehung elektrischer Lagerschäden ist zu untersuchen.

Außerdem zeigen die abweichenden Messdaten aus der Literatur vor allem falsch positive Ergebnisse ( $\alpha$ -Fehler). Das bedeutet, dass anhand der Oberflächeneigenschaften Riffelschäden vorliegen sollten, es aber nicht tun. Dem gegenüber wurden falsch negative Daten ( $\beta$ -Fehler) in der Literatur nicht beobachtet, wobei nur sehr wenige Messwerte von Riffelschäden in der Literatur vorhanden sind. Das bedeutet, dass die definierten Grenzwerte eine konservative Bewertung der Lagerschäden ermöglichen, welche zwar einerseits zuverlässig Riffelbildung erkennt, andererseits aber auch Lager ohne Riffelschäden zu diesen

---

<sup>206</sup> DIN EN ISO 4287 (2010) S.15.

<sup>207</sup> Bechev et al. (2018), Graf und Sauer (2020) und Graf und Sauer (2022).

---

zuordnet. Zu konservativ gesetzte Grenzwerte bergen das Risiko, die ertragbare Schädigung nicht auszuschöpfen. Dies wäre zwar eine unwirtschaftliche Auslegung, stellt jedoch den zuverlässigen Einsatz sicher. Daraus ergeben sich folgende Aufgaben. Zunächst müssen zulässige Grenzwerte für das Eintreten von  $\alpha$ - und  $\beta$ -Fehlern ermittelt werden. Anschließend muss die Wahrscheinlichkeit bei den gesetzten Grenzwerten für  $\alpha$  und  $\beta$ -Fehler quantifiziert und die Grenzwerte entsprechend angepasst werden. Eine solche Untersuchung benötigt einen deutlich größeren Satz an Messdaten elektrisch geschädigter Wälzlageroberflächen und der daraus abgeleiteten Verteilungen der gemessenen Oberflächeneigenschaften. Vor allem für elektrisch geschädigte Lageroberflächen mit Riffeln werden weitere Messdaten benötigt.

Darüber hinaus wurden sechs Oberflächeneigenschaften als geeignet identifiziert, die in der Literatur bisher nicht zu Bewertung elektrischer Lagerschäden verwendet wurden. Insbesondere die Eigenschaften der Profilsteigung stellen dabei eine Beschreibungsmöglichkeit dar, die in der bisherigen Bewertung elektrischer Lagerschäden nicht genutzt wird.

### **6.4.3 Bewertung der Ergebnisse**

Mit der ersten Forschungsfrage sollte untersucht werden, welche Oberflächeneigenschaften der Wälzlagerlaufbahnen sich für eine qualitative und quantitative Bewertung des Schädigungszustandes infolge schädlicher elektrischer Lagerströme eignen. Dazu wurden basierend auf einer Studie zur subjektiven Bewertung der Lagerschädigung Anforderungen an eine geeignete Oberflächeneigenschaft ermittelt. Anschließend wurden 45 Oberflächeneigenschaften auf ihre Eignung untersucht und dabei 12 geeignete Eigenschaften identifiziert. Für jede dieser Eigenschaften wurden Grenzwerte definiert, die den Übergang zu Riffelschäden aufzeigen. Die gemessenen Werte wurden mit Literaturwerten abgeglichen und Abweichungen diskutiert. Dabei konnten mehrere Oberflächeneigenschaften identifiziert werden, die in bisherigen Oberflächenuntersuchungen nicht betrachtet wurden. Vor allem der quadratische Mittelwert der Profilsteigung kann ein geeignetes Auswerteverfahren zur Beschreibung elektrischer Lagerschäden darstellen, da mehrere Größen der Profilsteigung sich im Rahmen der Untersuchung als geeignet erwiesen.

Bezugnehmend auf die erste Forschungsfrage lässt sich festhalten, dass jede der 12 identifizierten Oberflächeneigenschaften für die Verwendung als Schädigungsskala für die qualitative als auch für die quantitative Bewertung der elektrischen Schäden auf Wälzlageroberflächen geeignet ist. Dadurch ist die erste Forschungsfrage beantwortet und die damit zusammenhängende Hypothese verifiziert.



---

## 7 Untersuchung des Fortschritts elektrischer Lagerschädigung infolge der wirkenden mechanischen und elektrischen Lasten

Dieses Kapitel ist der Untersuchung der zweiten Forschungsfrage (vgl. Abschnitt 3.2) gewidmet. Zuerst werden unterschiedliche Ansätze betrachtet, mit denen die zeitliche Änderung der in Kapitel 6 als geeignet identifizierten Oberflächeneigenschaften beschrieben werden. Anschließend wird der Effekt der mechanischen und elektrischen Lagerbelastung auf die zeitliche Änderung der elektrischen Lagerschädigung mithilfe einer Varianzanalyse untersucht. Zudem wird der Zusammenhang zwischen der zeitlichen Änderung der Oberflächeneigenschaften und der scheinbaren Lagerstromdichte  $\hat{j}_L$  sowie zur elektrischen Lagerscheinleistung  $\hat{S}_L$  untersucht.

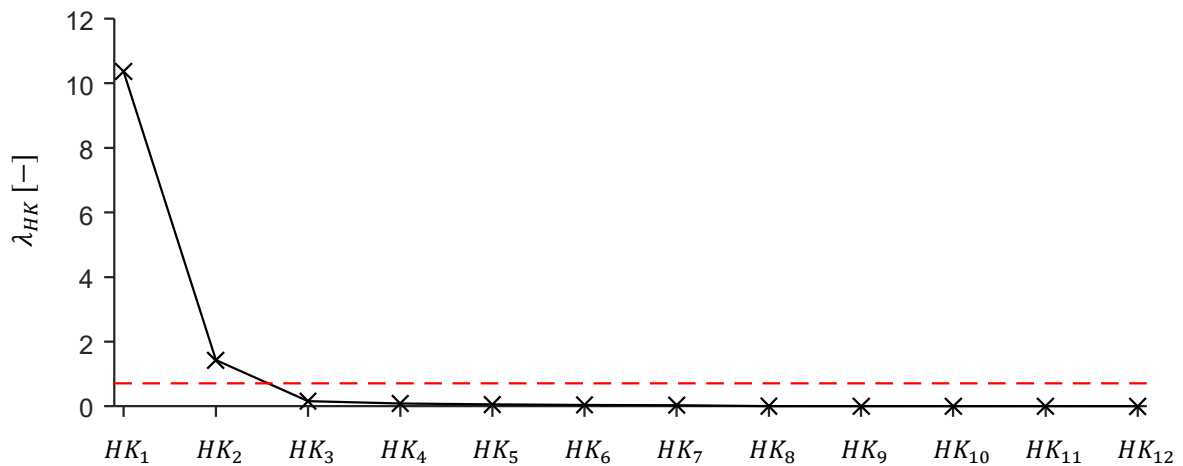
### 7.1 Definition der zeitlichen Änderung der Schädigung

In diesem Abschnitt werden zunächst die Hauptkomponenten der Oberflächenschädigung analysiert. Anschließend wird definiert, wie die zeitliche Änderung der Oberflächenschädigung beschrieben wird.

#### 7.1.1 Hauptkomponentenanalyse

In Kapitel 6 wurden 12 unterschiedliche Oberflächeneigenschaften identifiziert, die einerseits mit der optischen Beurteilung der Schädigung korrelieren und andererseits eine Unterscheidung zwischen Krater- und Riffelschäden ermöglichen. Im nächsten Schritt soll untersucht werden, aus welchen Hauptkomponenten die Veränderung der Oberflächeneigenschaften zusammengesetzt ist (vgl. Abschnitt 4.4.2). Da die unterschiedlichen Oberflächeneigenschaften aus den gleichen Aufnahmen extrahiert sind, besteht die Möglichkeit, dass sie miteinander in Wechselwirkung stehen und Veränderungen der Oberfläche redundant beschreiben. Somit stellt sich die Frage, welche und wie viele relevante Hauptkomponenten den Verlauf der Oberflächeneigenschaften bestimmen.

In Abbildung 7-1 ist die Varianz der Hauptkomponenten als Screeplot aufgetragen. Dieser zeigt die Eigenwerte und damit die Varianz der Hauptkomponenten in absteigender Reihenfolge. Es ist erkennbar, dass die Varianz der ersten Hauptkomponente  $HK_1$  deutlich höher ist als die der übrigen Hauptkomponenten. Die erste Hauptkomponente stellt 85% der Gesamtvarianz dar, die zweite Hauptkomponente 11,7%, die dritte 1,3% und die restlichen Hauptkomponenten stellen zusammen 2% der Gesamtvarianz dar.



**Abbildung 7-1:** Screeplot der Varianz der Hauptkomponenten

Der Grenzwert, unter dem Hauptkomponenten vernachlässigt werden können, liegt nach JOLIFFE<sup>208</sup> bei  $\lambda_{\text{Krit}} = 0.7$  und ist als rot gestrichelte Linie in der Abbildung dargestellt. Somit lässt sich erkennen, dass über 96% der gesamten Varianz in den Messdaten über die ersten beiden Hauptkomponenten beschrieben werden können. Die restlichen Hauptkomponenten können somit vernachlässigt werden.

In Tabelle 7-1 ist der Rang-Korrelationskoeffizient nach SPEARMAN zwischen den untersuchten Oberflächeneigenschaften und den ermittelten Hauptkomponenten dargestellt. Es ist erkennbar, dass die erste Hauptkomponente eine mittlere bis hohe Korrelation zu den Oberflächeneigenschaften aufweist. Bei acht der zwölf Oberflächeneigenschaften liegt die Korrelation bei  $r > 0.9$ . Kombiniert mit dem in Abbildung 7-1 gezeigten Eigenwert der Hauptkomponenten von  $\lambda > 10$ , lässt sich schlussfolgern, dass die erste Hauptkomponente die Veränderung der Oberfläche und damit die elektrische Schädigung darstellt, welche im Rahmen dieser Arbeit untersucht werden soll. Die starke Korrelation zwischen der ersten Hauptkomponente und der Mehrheit der identifizierten Oberflächeneigenschaften erlaubt die Verwendung einer der Oberflächeneigenschaften als Ersatzgröße für die Hauptkomponente und damit für die elektrische Schädigung. Dieses Vorgehen erscheint im Sinne der praktischen Anwendung nützlicher als die Beschreibung der Schädigung über die Linearkombination, die zur Berechnung der ersten Hauptkomponente notwendig ist. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird die mittlere arithmetische Rauheit  $R_a$  stellvertretend für die erste Hauptkomponente verwendet. Aufgrund der starken Korrelation zwischen

<sup>208</sup> Jolliffe (1972) S.170.



Hauptkomponente und den identifizierten Oberflächeneigenschaften sind diese Ergebnisse auf die anderen Hauptkomponenten übertragbar.

**Tabelle 7-1:** Rangkorrelationskoeffizient zwischen den untersuchten Oberflächeneigenschaften und den ersten beiden Hauptkomponenten.

Eigenschaft	$HK_1$	$HK_2$	Eigenschaft	$HK_1$	$HK_2$
$S_{q,R}$	0.97	0.40	$R_z$	0.94	0.56
$S_{a,R}$	0.97	0.41	$R_t$	0.95	0.45
$S_{q,P}$	0.66	-0.21	$R_a$	0.94	0.53
$S_{dq}$	0.95	0.54	$R_q$	0.94	0.53
$V_{vv}$	0.83	-0.03	$R_{dq}$	0.92	0.63
$S_{vk}$	0.84	0.003	$W_{dq}$	0.83	0.10

Die zweite Hauptkomponente hat zum einen eine deutlich geringere Korrelation mit den gemessenen Oberflächeneigenschaften als die erste Hauptkomponente, zum anderen schwankt der Korrelationskoeffizient in einem größeren Maße ( $-0.21 < r < 0.63$ ). Die physikalische Interpretation erscheint zunächst nicht offensichtlich. Daher soll im weiteren Verlauf dieser Arbeit der Einfluss der Effekte auf die zweite Hauptkomponente untersucht werden, um daraus Rückschlüsse über die physikalische Bedeutung dieser Hauptkomponente ziehen zu können.

### 7.1.2 Beschreibung der zeitlichen Änderungsrate

Im vorherigen Abschnitt wurden zwei Hauptkomponenten als Haupteffekte der Oberflächenschädigung identifiziert. Darauf aufbauend soll in diesem Abschnitt analysiert werden, wie die zeitliche Änderung einer Oberflächeneigenschaft sowie jeder Hauptkomponente mithilfe jeweils eines Kennwertes beschrieben werden kann. Mit dieser Beschreibung kann der Effekt der Versuchsfaktoren auf diesen Kennwert in den folgenden Abschnitten betrachtet werden. In Langzeitversuchen kann insbesondere bei niedriger elektrischer Last beobachtet werden, dass ab einer bestimmten Schädigungsdauer (200h-1500h) die Schädigung einen asymptotischen Verlauf annimmt, sich keine Änderung der Oberflächen mehr feststellen lässt und keine Riffelbildung beobachtet werden kann.<sup>209</sup>

<sup>209</sup> Tischmacher (2018) S.25.

Daher kann nicht davon ausgegangen werden, dass die zeitliche Änderung der Wälzlageroberfläche infolge elektrischer Schädigung zeitlich konstant ist. Die Schädigung lässt sich somit nicht als eine lineare Funktion der Zeit beschreiben. Für eine Bewertung des Effektes der Versuchsfaktoren auf den Schadensfortschritt wird der zeitliche Verlauf der Schädigung als ein nach dem ersten Glied abgebrochenes Taylorpolynom approximiert. Im Kontext der relativ kurzen Laufzeit der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche (max. 21 Stunden Schädigungsdauer insgesamt) im Vergleich zu den genannten Beobachtungszeitraum von TISCHMACHER erscheint eine Approximation der Schädigungsfunktion durch ein Polynom ersten Grades vertretbar.

Es sind unterschiedliche Ansätze zur Bestimmung der zeitlichen Änderung der Oberflächeneigenschaften, im weiteren Schädigungsrate genannt, möglich. So kann diese als totale, mittlere oder interpolierte Schädigungsrate dargestellt werden, welche im Weiteren definiert werden. Die totale Schädigungsrate für eine Oberflächeneigenschaft wird wie folgt definiert

$$\dot{x}_{\text{tot}} := \frac{x_{\text{M004}} - x_{\text{M001}}}{t_{\text{M004}} - t_{\text{M001}}} . \quad 7.1$$

Dabei wird der Differenzenquotient der Messwerte der Oberflächeneigenschaften nach Schädigungsperiode M004 und M001 gebildet. Die mittlere Schädigungsrate wird im Gegensatz dazu definiert als

$$\dot{x}_{\text{av}} := \frac{1}{3} \sum_{i=\text{M002}}^{\text{M004}} \left( \frac{x_i - x_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \right) . \quad 7.2$$

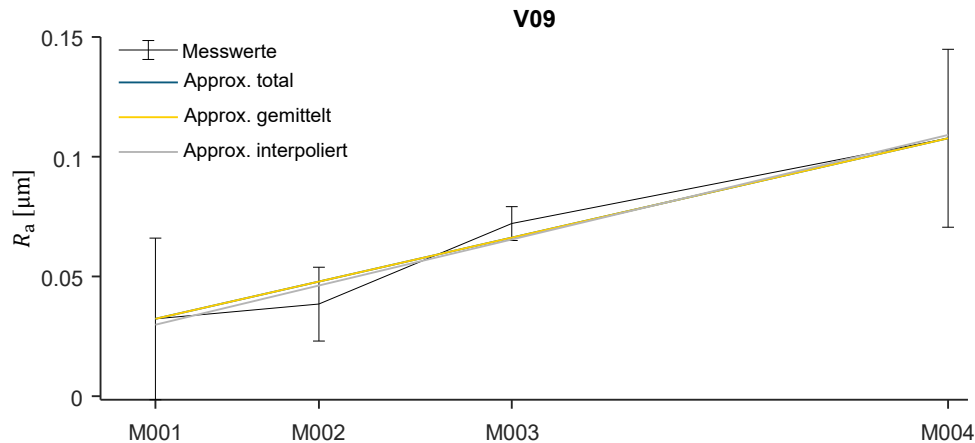
Dabei wird der Differenzenquotient der Schädigung für jede Schädigungsperiode gebildet und anschließend über alle Schädigungsperioden gemittelt. Die interpolierte Schädigung wird dadurch ermittelt, dass eine Gerade gesucht wird, die in einem möglichst geringen Abstand zu den jeweiligen Messwerten liegt. Diese Gerade wird mit der *Polyfit*-Funktion<sup>210</sup> in MATLAB berechnet, welche durch die Lösung von VANDERMONDE Systemen<sup>211</sup> eine Polynominterpolation durch die Messwerte durchführt. Die Gerade wird als Polynom ersten Grades beschrieben. Die Steigung dieser Gerade wird als interpolierte Schädigungsrate  $\dot{x}_{\text{int}}$  definiert.

In Abbildung 7-2 ist exemplarisch der zeitliche Verlauf der mittleren arithmetischen Rauheit für Versuch V09 aufgetragen. Zudem sind die Approximationen des zeitlichen Verlaufs der Rauheit mithilfe der totalen  $\dot{R}_{a,\text{tot}}$ , mittleren  $\dot{R}_{a,\text{av}}$  und interpolierten Änderungsrate

<sup>210</sup> Mathworks (2006b).

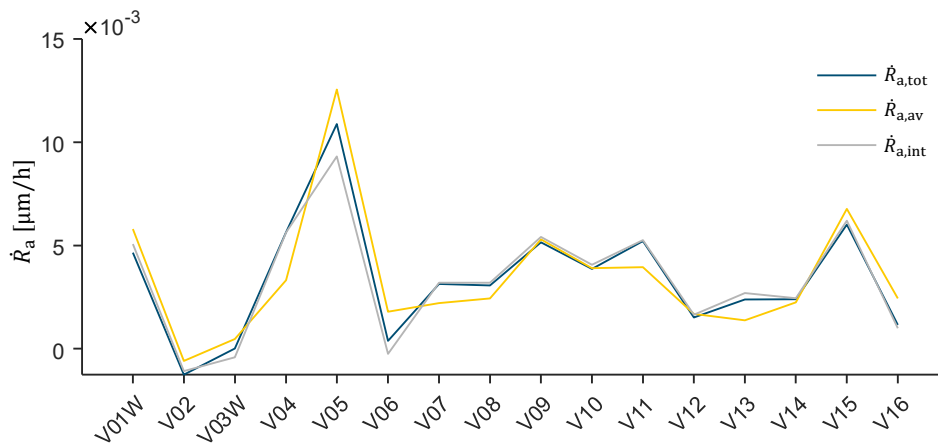
<sup>211</sup> Golub und van Loan (1996) S.184ff.

$\dot{R}_{a,int}$  aufgetragen. Es ist erkennbar, dass die einzelnen Änderungsraten sich nur geringfügig unterscheiden. Zudem liegen alle Linearisierungen innerhalb der Standardabweichung der gemessenen Werte.



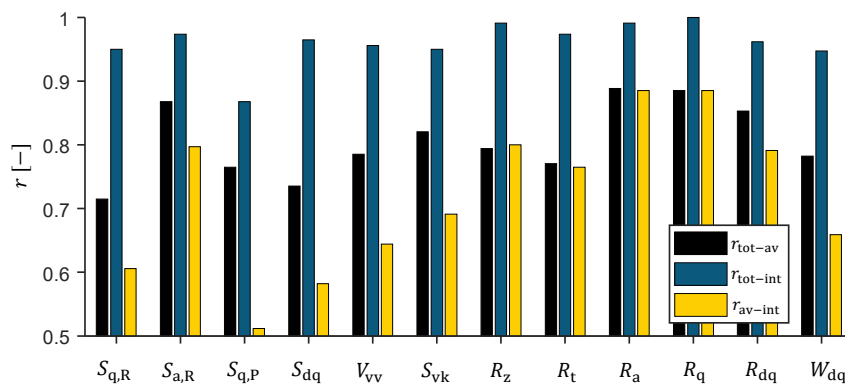
**Abbildung 7-2:** Verlauf der mittleren arithmetischen Rauheit für Versuch V09 sowie Approximation des Verlaufs mithilfe der aus den Messwerten abgeleiteten totalen, mittleren und interpolierten Änderungsraten.

In Abbildung 7-3 sind die Änderungsraten der mittleren arithmetischen Rauheit für alle Versuche aufgetragen. Es ist erkennbar, dass in den jeweiligen Versuchen die arithmetische Rauheit  $R_a$  unterschiedlich schnell ansteigt. Zudem ist festzustellen, dass vor allem die totale und die interpolierte Änderungsrate einen nahezu identischen Verlauf aufweisen. Die gemittelte Änderungsrate weicht dahingehend von den anderen beiden Berechnungsarten ab. Um zu beurteilen, ob die unterschiedlich berechneten Änderungsraten vergleichbare Informationen darstellen, wird der Rangkorrelationskoeffizient nach SPEARMAN für jeweils zwei der Änderungsraten berechnet. In Abbildung 7-4 sind die Korrelationskoeffizienten zwischen den unterschiedlichen Änderungsraten für alle Oberflächeneigenschaften aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass vor allem zwischen der totalen und der interpolierten Änderungsrate eine hohe Korrelation ( $r > 0.8$ ) herrscht, für die meisten Oberflächeneigenschaften liegt die Korrelation zwischen den Änderungsraten bei  $r_{tot-int} \approx 0.95$ . Es kann daher davon ausgegangen werden, dass eine Betrachtung beider Änderungsraten wenig bis gar keine zusätzliche Information liefert und daher im weiteren Verlauf dieser Arbeit auf die Untersuchung der interpolierten Änderungsrate verzichtet werden kann.



**Abbildung 7-3:** Die totale, mittlere und interpolierte Änderungsrate der mittleren arithmetischen Rauheit über alle Versuche

Zwischen der totalen und der mittleren Änderungsrate ist eine mittlere bis starke Korrelation  $r_{\text{tot-av}} > 0.7$  über alle Oberflächeneigenschaften hinweg beobachtbar. Somit sind die totale und die mittlere Änderungsrate ähnlich. Daher wird für das weitere Vorgehen in dieser Arbeit nur die totale Änderungsrate für die Beschreibung der zeitlichen Änderung der Oberflächeneigenschaften und Hauptkomponenten genutzt.



**Abbildung 7-4:** Rangkorrelationskoeffizient zwischen totaler und mittlerer, totaler und interpolierter sowie mittlerer und interpolierter Änderungsrate der untersuchten Oberflächeneigenschaften.

## 7.2 Der Effekt der untersuchten Faktoren auf die zeitliche Änderung der Oberflächenschädigung

In diesem Abschnitt werden die Wirkung der im Versuchsplan variierten Faktoren auf die Änderung der mittleren arithmetischen Rauheit betrachtet. Dazu wird zuerst der Effekt

---

der Faktoren anhand einer Hebelanalyse untersucht. Anschließend wird mittels einer Varianzanalyse die Signifikanz der Effekte beschrieben und daraus eine Modellierung des Zusammenhangs zwischen der Änderungsrate mit der mittleren arithmetischen Rauheit entwickelt. Schließlich wird die Modellierung verifiziert.

### 7.2.1 Effektanalyse

Ein faktorieller Versuchsplan, wie er in den Abschnitten 4.4.3 und 5.1.2 beschrieben ist, dient der Untersuchung der Effekte der einzelnen Faktoren sowie deren Wechselwirkungen auf ein oder mehrere Qualitätsmerkmale<sup>212</sup>. Die Faktoren des Versuchsplans sind die axiale Last  $F_{Ax}$ , die Drehzahl  $n$ , die Amplitude der angelegten elektrischen Spannung  $\hat{U}$ , die Frequenz des elektrischen Signals  $f_{el}$  sowie die Signalform. Als Qualitätsmerkmale dient die totale Änderungsrate der in Kapitel 6 identifizierten Oberflächeneigenschaften. Der Effekt  $E$  eines Faktors  $F$  auf ein Qualitätsmerkmal  $x$  bei zwei Faktorstufen berechnet sich nach Gleichung 4.19. Die berechneten Werte für die Effekte der Versuchsfaktoren auf die Änderungsrate der arithmetischen Rauheit sind in Tabelle 7-2 zusammengefasst. Zudem ist auch der Mittelwert der totalen Änderungsrate  $\overline{\dot{R}}_{a,tot}$  mit aufgeführt.

Eine Visualisierung der Effekte ist mithilfe eines Hebeldiagramms möglich, wie es in Abbildung 7-5 dargestellt ist. Zu sehen sind für jeden Faktor sowie jede Wechselwirkung zweier Faktoren der Mittelwert sowie die Standardabweichung bei der jeweiligen Faktorstufe + oder – als Fehlerbalken. In gestrichelter Linie ist zudem der Mittelwert über alle Versuche  $\overline{\dot{R}}_{a,tot}$  aufgetragen. Die Stärke eines Effektes wird über den Betrag der Steigung des Hebels dargestellt. Je größer der Betrag der Steigung, desto stärker der Effekt.

Es ist erkennbar, dass die betragsmäßig stärksten ermittelten Effekte die Frequenz des elektrischen Signals  $f_{el}$ , deren Wechselwirkung mit der Spannungsamplitude  $\hat{U}$  sowie die Wechselwirkung aus Axiallast  $F_{Ax}$  und Drehzahl  $n$  sind. Der starke Effekt der Wechselwirkung aus Axiallast und Drehzahl auf die elektrischen Lagerschäden und somit auch auf deren zeitliche Änderung ist zu erwarten, da diese Größen maßgeblich die Schmierfilmdicke im Wälzlager beeinflussen<sup>213</sup>. Der Einfluss der Schmierfilmdicke auf die elektrische Schädigung der Laufbahnoberfläche wurde schon in der Literatur gezeigt<sup>214</sup>. Der Effekt der Frequenz  $f_{el}$  sowie ihrer Wechselwirkung mit der Spannungsamplitude  $\hat{U}$  ist ebenso plausibel, da über diese Größen die zeitliche Änderung der Spannung  $dU/dt$  beschrieben wird, welche ebenfalls die Entstehung elektrischer Lagerschäden beeinflusst<sup>215</sup>.

---

<sup>212</sup>Vgl. Siebertz et al. (2017) S.31.

<sup>213</sup> Hamrock und Dowson (1981) S.189f.

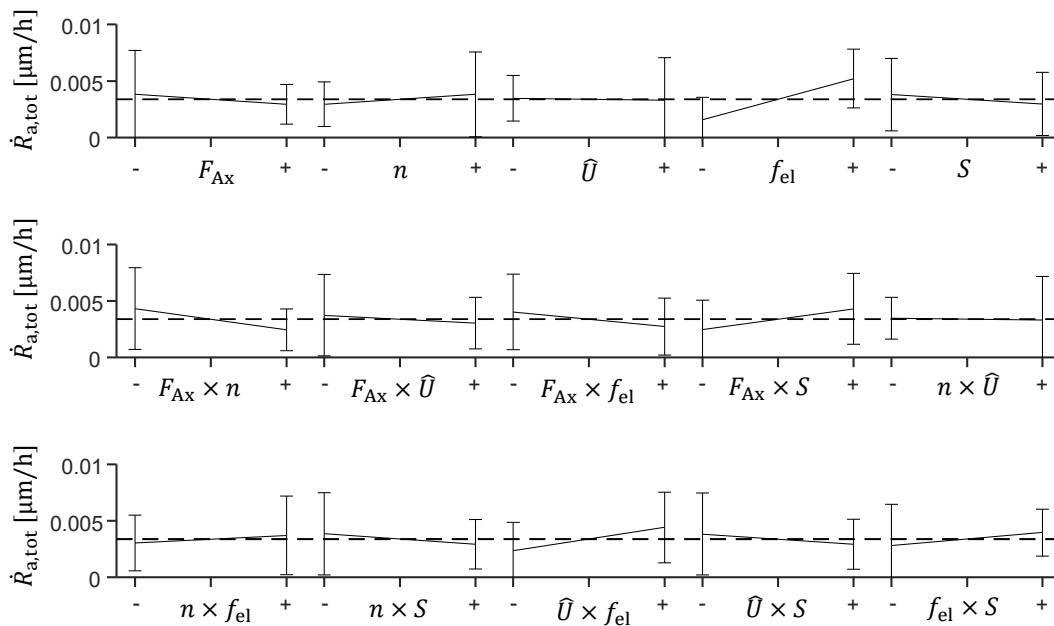
<sup>214</sup> Radnai et al. (2015) S40ff.

<sup>215</sup> Muetze (2004) S.10.

**Tabelle 7-2:** Berechnete Effekte der Versuchsfaktoren sowie deren Wechselwirkungen auf die totale Änderungsrate der mittleren arithmetischen Rauheit.

Effekt	Wert	Einheit	Effekt	Wert	Einheit
$\overline{\dot{R}}_{a,tot}$	0.00339	$\frac{\mu\text{m}}{\text{h}}$	$E_{F_{ax},f_{el}}$	-0.00128	$\frac{\mu\text{m}}{\text{h}}$
$E_{F_{ax}}$	-0.000871	$\frac{\mu\text{m}}{\text{h}}$	$E_{F_{ax},S}$	0.00184	$\frac{\mu\text{m}}{\text{h}}$
$E_n$	0.000873	$\frac{\mu\text{m}}{\text{h}}$	$E_{n,\hat{U}}$	-0.000151	$\frac{\mu\text{m}}{\text{h}}$
$E_{\hat{U}}$	-0.000174	$\frac{\mu\text{m}}{\text{h}}$	$E_{n,f_{el}}$	0.000663	$\frac{\mu\text{m}}{\text{h}}$
$E_{f_{el}}$	0.00365	$\frac{\mu\text{m}}{\text{h}}$	$E_{n,S}$	-0.000929	$\frac{\mu\text{m}}{\text{h}}$
$E_S$	-0.000822	$\frac{\mu\text{m}}{\text{h}}$	$E_{\hat{U},f_{el}}$	0.00205	$\frac{\mu\text{m}}{\text{h}}$
$E_{F_{ax},n}$	-0.00187	$\frac{\mu\text{m}}{\text{h}}$	$E_{\hat{U},S}$	-0.000898	$\frac{\mu\text{m}}{\text{h}}$
$E_{F_{ax},\hat{U}}$	-0.000697	$\frac{\mu\text{m}}{\text{h}}$	$E_{f_{el},S}$	0.00115	$\frac{\mu\text{m}}{\text{h}}$

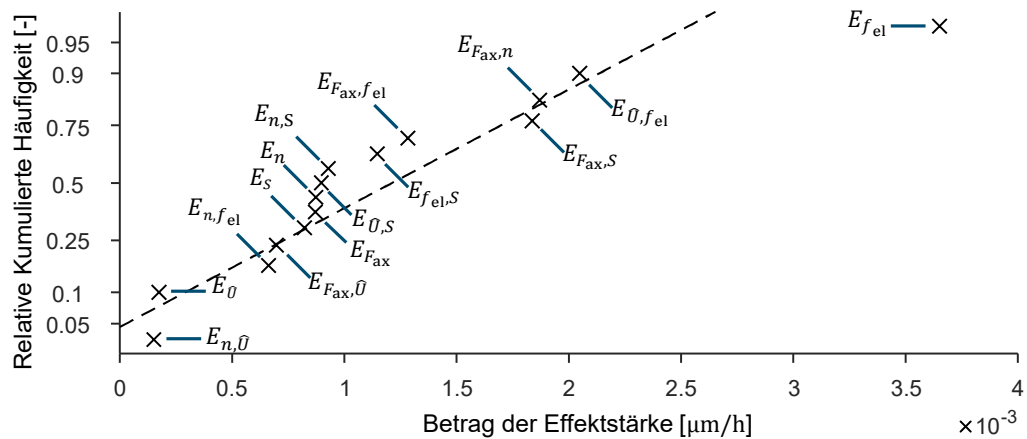
Als schwächste Effekte ergeben sich die Wechselwirkung aus Spannungsamplitude  $\hat{U}$  und Drehzahl  $n$ , die Spannungsamplitude  $\hat{U}$  sowie die Wechselwirkung aus Drehzahl  $n$  und der Frequenz des elektrischen Signals  $f_{el}$ . Die Wechselwirkungen zwischen den elektrischen Größen und der Drehzahl ist gering, weil die Drehzahl am Prüfstand unabhängig von dem am Lager angelegten elektrischen Signal eingestellt wird. Bei einem realen Elektromotor sind diese gekoppelt. Bemerkenswert ist allerdings, dass die Spannungsamplitude einen sehr geringen Effekt auf die Schädigungsrate ausübt. Die Gründe für dieses Ergebnis werden in Abschnitt 7.4 im Detail untersucht.



**Abbildung 7-5:** Hebelanalyse der Effekte der Versuchsfaktoren auf die totale Änderungsrate der mittleren arithmetischen Rauheit.

Im nächsten Schritt soll untersucht werden, ob es sich bei den betrachteten Effekten um wahre oder scheinbare Effekte handelt. Eine Möglichkeit, dies grafisch zu beurteilen, bietet der Halbnormalen-Plot, in dem der Betrag der Effektstärke über der kumulierten Häufigkeit aufgetragen ist. Dabei ist die Überlegung, dass die Beträge zufälliger Effekte normalverteilt sind. Sofern ein Effekt nicht zufällig ist, weicht dieser deutlich von der Normalverteilung ab.<sup>216</sup> In Abbildung 7-6 ist der Betrag der Effektstärken der Versuchsfaktoren auf die totale Änderungsrate der mittleren arithmetischen Rauheit aufgetragen. Es ist erkennbar, dass nur der Effekt der Frequenz des elektrischen Signals  $f_{el}$  von der Normalverteilung abweicht. Die übrigen Effekte liegen entlang der Gerade der Normalverteilung. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass der Effekt der Frequenz des elektrischen Signals ein wahrer Effekt ist, während die übrigen Effekte sich wie zufällige Effekte verhalten.

<sup>216</sup> Vgl. Daniel (1959).



**Abbildung 7-6:** Halbnormalen-Plot der Betrages der Effektstärken der Versuchsfaktoren auf die totale Änderungsrate der mittleren arithmetischen Rauheit.

## 7.2.2 Varianzanalyse

Die Varianzanalyse wird dazu genutzt, um wahre Effekte in Versuchsdaten von scheinbaren Effekten abzugrenzen. Dazu wird die Wahrscheinlichkeit berechnet, mit der es sich bei dem untersuchten Effekt um einen zufälligen Effekt handelt (vgl. Abschnitt 4.4.4). In Tabelle 7-3 ist die ANOVA-Tabelle für die Effekte der Versuchsfaktoren auf die totale Änderung der mittleren arithmetischen Rauheit in drei Zuständen dargestellt. Im ersten Abschnitt werden alle Effekte berücksichtigt. Daher ist der Freiheitsgrad des Fehlers entsprechend null, genauso wie  $SSB$  und  $MS(SSB)$  aller Effekte. Dementsprechend ist im ersten Schritt auch kein  $f$ -Quotient und keine Wahrscheinlichkeit berechenbar. Damit diese Werte berechnet werden können, muss aus dem System eine Varianz in Form eines Freiheitsgrades vorhanden sein. Um diese zu erreichen, wird ein Effekt entfernt. Üblicherweise ist das der Effekt, welcher den geringsten Anteil zur Erklärung der Variabilität im System beiträgt und daher den geringsten Wert für  $SSW$  oder  $MS(SSW)$  besitzt. Alternativ kann im Halbnormalen-Plot in Abbildung 7-6 der Effekt mit dem niedrigsten Betrag ausgewählt werden<sup>217</sup>.

Im zweiten Abschnitt der ANOVA wurde das kritische Signifikanzniveau als  $P_{krit} = 5\%$  (vgl. Abschnitt 5.1.2) definiert. Es werden zuerst die Wechselwirkung auf zufällige Effekte untersucht und dann die Haupteffekte. Dadurch kann zuerst der Effekt der Wechselwirkung zwischen Drehzahl und der Amplitude des elektrischen Signals entfernt werden, und dessen Freiheitsgrad und  $SSW$  dem Fehler zugerechnet werden. Dies wird so lange wie-

<sup>217</sup> Siebertz et al. (2017) S.117.



derholt, bis kein Effekt oberhalb des kritischen Signifikanzniveaus liegt, wodurch alle Effekte bis auf den Effekt der Frequenz des elektrischen Signals ausgeschlossen werden. Somit bestätigt die Varianzanalyse das Ergebnis aus Abbildung 7-6, dass dieser Effekt nicht zufällig ist.

**Tabelle 7-3:** ANOVA-Tabelle der Varianzanalyse der Effekte der Versuchsfaktoren auf die totale Änderung der mittleren arithmetischen Rauheit

Ursache	Beginn					$P_{\text{krit}} = 5\%$					$P_{\text{krit}} = 10\%$				
	DF	SSW	MS	f	P [%]	DF	SSW	MS	f	P [%]	DF	SSW	MS	f	P [%]
$E_{F_{\text{ax}}}$	1	3.03	3.03	*	*						1	3.03	3.03	0.95	36.2
$E_n$	1	3.04	3.04	*	*						1	3.04	3.04	0.96	36.1
$E_{\hat{U}}$	1	0.12	0.12	*	*						1	0.12	0.12	0.04	85.1
$E_{f_{\text{el}}}$	1	53.3	53.3	*	*	1	53.3	53.3	10	0.72	1	53.3	53.3	16.7	0.46
$E_S$	1	2.70	2.70	*	*						1	2.70	2.70	0.85	38.8
$E_{F_{\text{ax}},n}$	1	14.0	14.0	*	*						1	14.0	14.0	4.38	7.45
$E_{F_{\text{ax}},\hat{U}}$	1	1.94	1.94	*	*										
$E_{F_{\text{ax}},f_{\text{el}}}$	1	6.60	6.60	*	*										
$E_{F_{\text{ax}},S}$	1	13.5	13.5	*	*						1	13.5	13.5	4.23	7.87
$E_{n,\hat{U}}$	1	0.09	0.09	*	*										
$E_{n,f_{\text{el}}}$	1	1.76	1.76	*	*										
$E_{n,S}$	1	3.50	3.50	*	*										
$E_{\hat{U},f_{\text{el}}}$	1	16.8	16.8	*	*						1	16.8	16.8	5.26	5.55
$E_{\hat{U},S}$	1	3.22	3.22	*	*										
$E_{f_{\text{el}},S}$	1	5.26	5.26	*	*										
Fehler	0	0	0			14	75.5	5.39			7	22.3	3.19		
Total	15	129				15	129				15	129			

Somit verbleibt lediglich die Frequenz des elektrischen Signals als einziger identifizierter wahrer Effekt. Bedingt durch die hohe Standardabweichung der erhobenen Daten (erkennbar an der Größe der Fehlerbalken im Vergleich zur Effektstärke in Abbildung 7-5) ist die Effektstärke der übrigen Effekte nicht ausreichend hoch, um sich signifikant von der

Streuung in den Versuchsdaten abzusetzen. Es besteht also die Wahrscheinlichkeit, dass wahre Effekte aufgrund der hohen Varianz als zufällig eingestuft wurden.

Eine Möglichkeit weitere wahre Effekte zu identifizieren besteht darin das kritische Signifikanzniveau von 5% auf 10% anzuheben. Dies ist im dritten Abschnitt von Tabelle 7-3 dargestellt. Dabei wurde das gleiche Vorgehen angewendet wie im zweiten Abschnitt, jedoch wurde die Hypothese zufälliger Effekte erst ab einer Wahrscheinlichkeit von über 10% verworfen. Damit erhöht sich einerseits die Wahrscheinlichkeit wahre Effekte zu identifizieren, andererseits aber auch die Wahrscheinlichkeit zufällige Effekte als wahr zu identifizieren. Zu beachten ist, dass die Haupteffekte dabei weiterhin im Modell bleiben müssen, auch wenn die Wahrscheinlichkeit zufälliger Änderungen deutlich über dem kritischen Signifikanzniveau liegt, solange Wechselwirkungen dieses Haupteffektes noch berücksichtigt werden.<sup>218</sup>

Explizit lässt sich der Zusammenhang zwischen der Änderungsrate der Oberflächenrauheit und den Versuchsfaktoren mithilfe eines empirischen Modells beschreiben. Dieses wird im Verlauf dieser Arbeit als reduziertes Modell bezeichnet und berechnet sich zu

$$\begin{aligned} \dot{R}_{a,\text{tot}} = & \overline{\dot{R}_{a,\text{tot}}} + \frac{E_{F_{\text{ax}}}}{2} \cdot \tilde{F}_{\text{ax}} + \frac{E_n}{2} \cdot \tilde{n} + \frac{E_{\tilde{U}}}{2} \cdot \tilde{U} + \frac{E_{f_{\text{el}}}}{2} \cdot \tilde{f}_{\text{el}} + \frac{E_S}{2} \cdot \tilde{S} \\ & + \frac{E_{F_{\text{ax}},n}}{2} \cdot \tilde{F}_{\text{ax}} \cdot \tilde{n} + \frac{E_{F_{\text{ax}},S}}{2} \cdot \tilde{F}_{\text{ax}} \cdot \tilde{S} + \frac{E_{\tilde{U},f_{\text{el}}}}{2} \cdot \tilde{U} \cdot \tilde{f}_{\text{el}}. \end{aligned} \quad 7.3$$

Für die Effekte werden die Werte aus Tabelle 7-2 verwendet. Die dimensionslosen Faktoren  $\tilde{F}$  sind dabei jeweils

$$\tilde{F} = \frac{2F - (F_+ + F_-)}{F_+ - F_-}. \quad 7.4$$

Die Signalform stellt dabei einen Sonderfall dar, da diese im Gegensatz zu den anderen Versuchsfaktoren einen diskreten Wert darstellt. Entsprechend kann  $\tilde{S}$  nur die Werte -1 (Rechtecksignal) und 1 (Sinus) annehmen.

Dem reduzierten Modell wird im Folgenden das vollständige Modell gegenübergestellt, welches alle Effekte berücksichtigt und nach Gleichung 4.18 berechnet wird. Die Abweichung zwischen dem reduzierten und dem vollständigen Modell kann mithilfe des Residuums<sup>219</sup> quantifiziert werden. Dieses berechnet sich aus der Varianz der nicht berücksichtigten Effekte  $SSW$  und der Gesamtvarianz  $TSS$  zu

$$R^2 = \frac{SSW}{TSS}. \quad 7.5$$

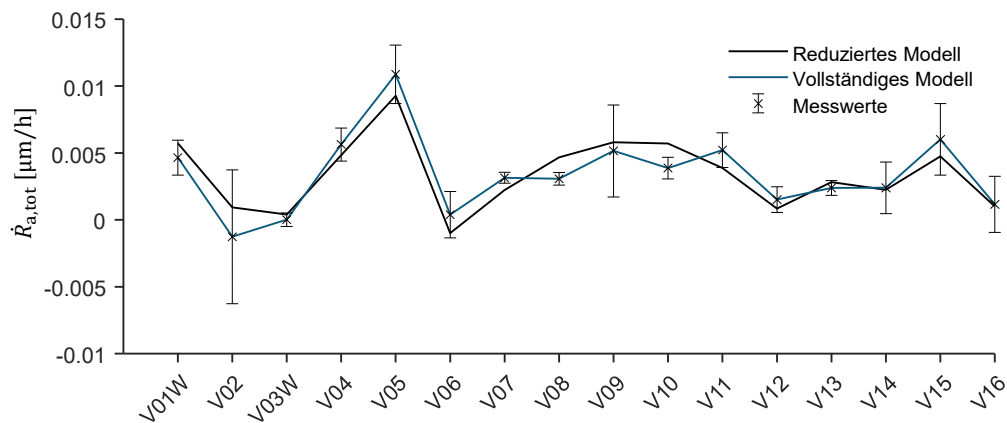
<sup>218</sup> Dean et al. (2017) S.202.

<sup>219</sup> Siebertz et al. (2017) S.21.

---

Das Residuum des reduzierten Modells beträgt 17%.

In Abbildung 7-7 sind die gemessenen Werte der totalen Änderung der mittleren arithmetischen Rauheit über alle Versuche aufgetragen. Zudem sind die Werte aufgetragen, die mit dem reduzierten Modell nach Gleichung 7.3 berechnet werden, sowie die mit dem vollständigen Modell berechneten Werte. Wie zu erwarten, bildet das vollständige Modell den Verlauf der gemessenen Werte ab. Im Verlauf des reduzierten Modells ist eine Abweichung von den gemessenen Werten erkennbar.



**Abbildung 7-7:** Totale Änderungsrate der mittleren arithmetischen Rauheit; Messwerte und berechnete Werte mithilfe des Beschreibungsmodells mit reduzierten Versuchsparameter, sowie mithilfe des vollständigen Beschreibungsmodells.

### 7.2.3 Modellverifizierung

Die Verifizierung eines Systems im Sinne der Produktentwicklung bedeutet die Überprüfung der Richtigkeit der getroffenen Annahmen zur Beschreibung dieses Systems<sup>220</sup>. Im Kontext eines empirischen Modells müssen für eine Modellverifizierung nach SIEBERTZ ET AL.<sup>221</sup> folgende Anforderungen an ein Modell erfüllt sein:

- Der Modellfehler muss unabhängig vom Betrag des Qualitätsmerkmals sein.
- Der Modellfehler muss unabhängig von der Versuchsreihenfolge sein.
- Der Modellfehler muss über alle Versuche normalverteilt sein.
- Sofern in den Versuchsdaten, die die Basis des Modells darstellen, Ausreißer vorhanden sind, dürfen diese das Modell nicht signifikant beeinflussen.

---

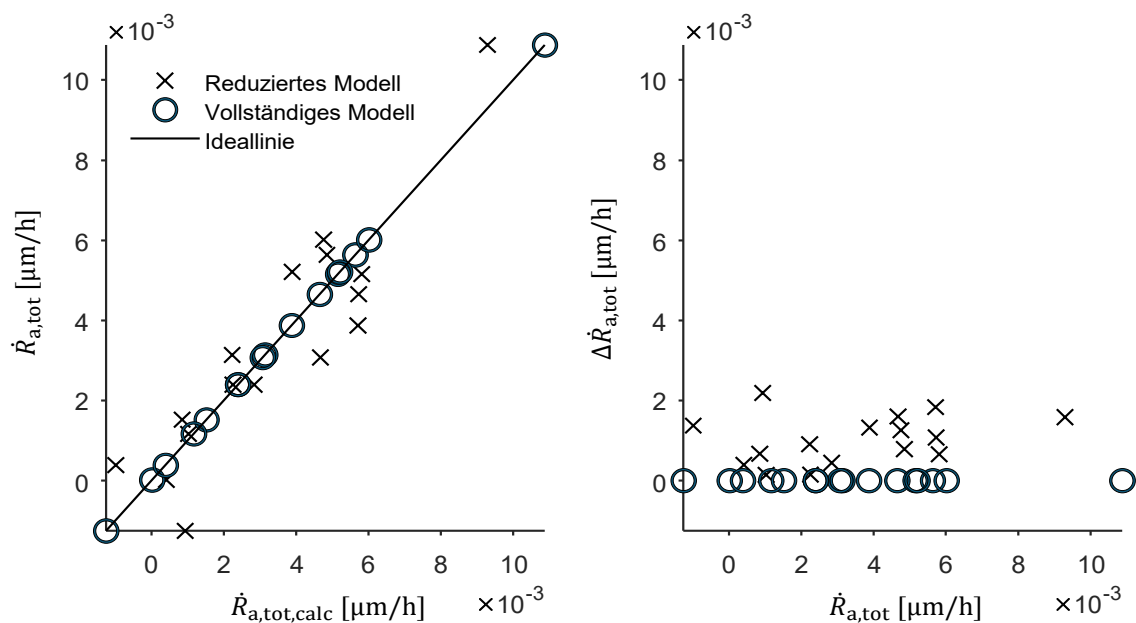
<sup>220</sup> Kirchner (2020) S.9.

<sup>221</sup> Siebertz et al. (2017) 134f.

Der Modellfehler ist dabei definiert als Betrag der Differenz zwischen den gemessenen Werten  $\dot{R}_{a,tot}$  und den berechneten Werten  $\dot{R}_{a,tot,calc}$

$$\Delta\dot{R}_{a,tot} = |\dot{R}_{a,tot} - \dot{R}_{a,tot,calc}| \quad 7.6$$

In Abbildung 7-8 sind links die Messwerte über die berechneten Werte für beide Modellierungen aufgetragen. Zudem ist die Ideallinie einer perfekten Modellierung aufgetragen, die darstellt, dass Messwerte und Berechnung exakt übereinstimmen. Es ist erkennbar, dass es keine sichtbaren Abweichungen zwischen dem vollständigen Modell und der Ideallinie gibt. Für das reduzierte Modell sind die Abweichungen von der Ideallinie deutlich erkennbar, allerdings ist keine systematische Modellabweichung identifizierbar.

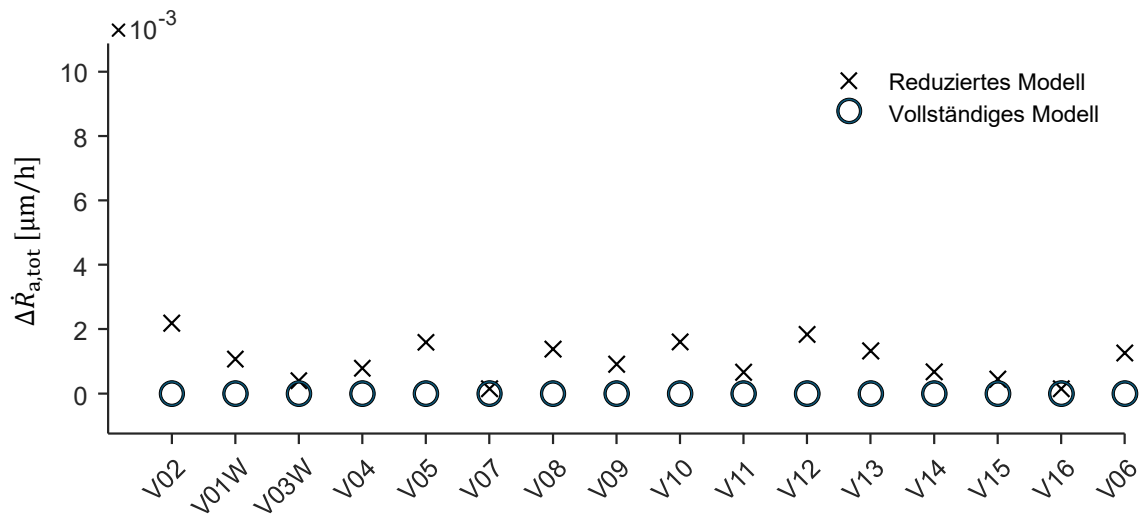


**Abbildung 7-8:** links: Gemessene Werte über berechnete Werte der totalen Änderungsrate der mittleren arithmetischen Rauheit; rechts: Messfehler über Betrag der totalen Änderungsrate der mittleren arithmetischen Rauheit.

Noch besser lässt sich der Zusammenhang zwischen Betrag und Fehler in Abbildung 7-8 rechts beobachten. Es ist zu erkennen, dass der Fehler im reduzierten Modell zwar höher ist als im vollständigen Modell, jedoch weist er keine systematische Tendenz auf. Insofern ist die erste Forderung der Modellverifizierung, dass der Modellfehler unabhängig vom Betrag des Qualitätsmerkmals ist, erfüllt.

Im nächsten Schritt wird untersucht, ob die Versuchsreihenfolge einen systematischen Fehler erkenntlich macht. Dazu sind in Abbildung 7-9 die Modellfehler des vollständigen und reduzierten Modells über die chronologische Versuchsreihenfolge aufgetragen. Da einige Versuche im Verlauf der Messreihe wiederholt wurden, entspricht dieser nicht der

Versuchsnummerierung. Auch in diesem Fall ist kein Trend erkennbar, weswegen auch die zweite Forderung zur Modellverifizierung erfüllt ist.



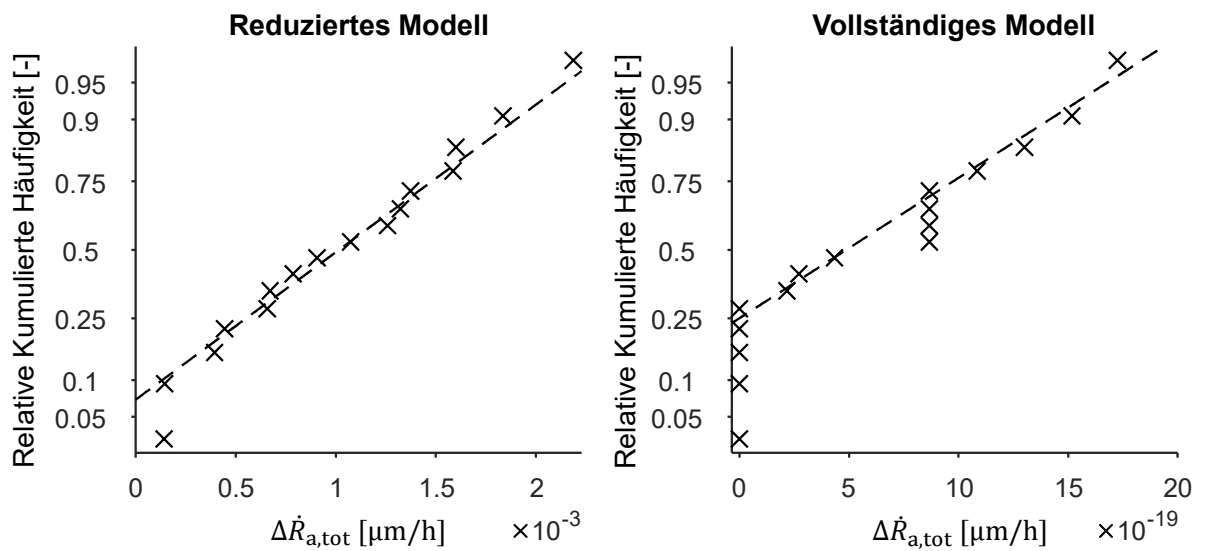
**Abbildung 7-9:** Modellfehler der berechneten totalen Änderungsrate der mittleren arithmetischen Rauheit über die Versuche in chronologischer Reihenfolge.

Die Normalverteilung der Modellfehler wird über den Halbnormalen-Plot in Abbildung 7-10 untersucht. In der linken Abbildung ist der Halbnormalen-Plot des reduzierten Modells dargestellt, in der rechten der des vollständigen Modells. Es ist erkennbar, dass weder im reduzierten noch im vollständigen Modell die Verteilung des Modellfehlers eine signifikante Abweichung von der Normalverteilung aufweist<sup>222</sup>. Daher darf der Modellfehler als normalverteilt betrachtet werden. Damit ist auch die dritte Forderung erfüllt.

Der Einfluss einzelner Messungen auf das Gesamtmodell kann über den COOK-Abstand  $D_i$  beschrieben werden<sup>223</sup>. Dieser Abstand basiert auf der Differenz zwischen der Vorhersage des Modells unter Berücksichtigung der untersuchten Messung sowie der Vorhersage des Modells unter Vernachlässigung der untersuchten Messung. Für eine genauere Herleitung wird auf Cook und Weisberg (1982) verwiesen. Wenn der COOK-Abstand einer Messung Werte von  $D_i \geq 1$  annimmt, muss davon ausgegangen werden, dass diese Messung das gesamte Modell verfälscht.

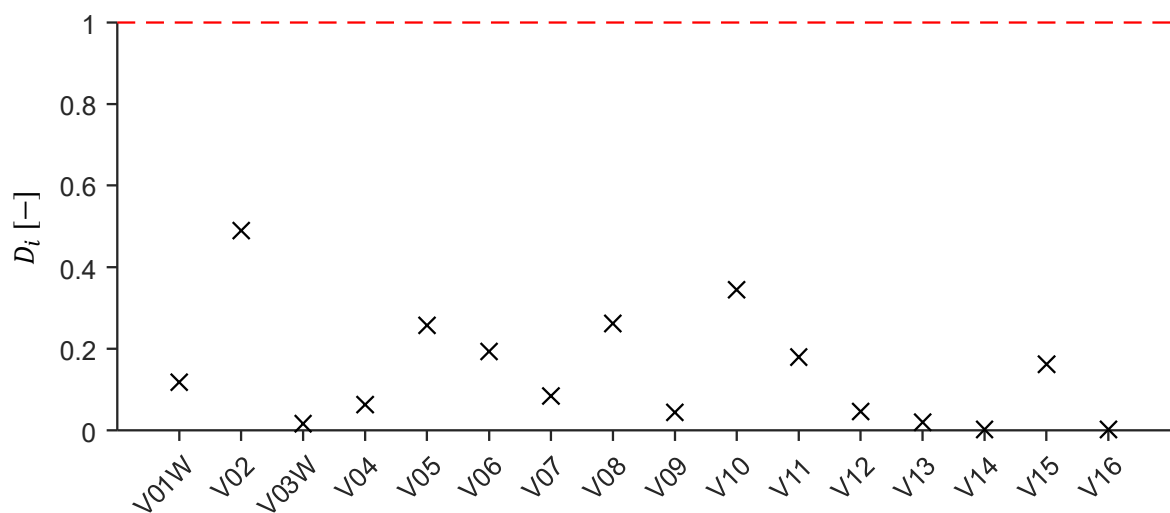
<sup>222</sup> Bei der Interpretation des Halbnormalenplots des vollständigen Modells ist die Skalierung der x-Achse zu beachten.

<sup>223</sup> Cook und Weisberg (1982) S.187.



**Abbildung 7-10:** Halbnormalen-Plot der Modellfehler des reduzierten Modells der totalen Änderungsrate der mittleren arithmetischen Rauheit; links: Reduziertes Modell; rechts: Vollständiges Modell.

In Abbildung 7-11 ist der Cook-Abstand aller Messungen bezüglich der totalen Änderungsrate der mittleren arithmetischen Rauheit aufgetragen. Es ist erkennbar, dass keine der Messungen oberhalb von  $D_i \geq 1$  liegt und somit keine der Messungen das Modellverhalten signifikant verfälscht.



**Abbildung 7-11:** Cook-Abstand der einzelnen Messungen bzgl. der reduzierten Modellierung der totalen Änderungsrate der mittleren arithmetischen Rauheit.

---

Eine Bestimmung des COOK-Abstandes für das vollständige Modell ist mit der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuchszahl nicht möglich, da zum Erstellen des vollständigen Modells auf alle Versuchsergebnisse zurückgegriffen werden muss. Das Entfernen eines Versuchs führt zur Unterbestimmtheit des Systems. Da das reduzierte Modell nach der in Abschnitt 7.2.2 durchgeführten Varianzanalyse eine Vereinfachung des vollständigen Modells mit allen signifikanten Effekten darstellt, wird an dieser Stelle angenommen, dass das vollständige Modell einen vergleichbaren Verlauf des COOK-Abstandes darstellen würde. Eine mögliche Abweichung wäre somit nur auf den Einfluss einzelner Messungen auf Effekte zurückzuführen, welche sich über alle Messungen als nicht signifikant erwiesen haben. Insofern kann angenommen werden, dass auch das vollständige Modell nicht signifikant von Messfehlern einzelner Messungen beeinflusst wird. Damit ist auch die vierte Forderung erfüllt und sowohl die vollständige als auch die reduzierte Modellierung verifiziert.

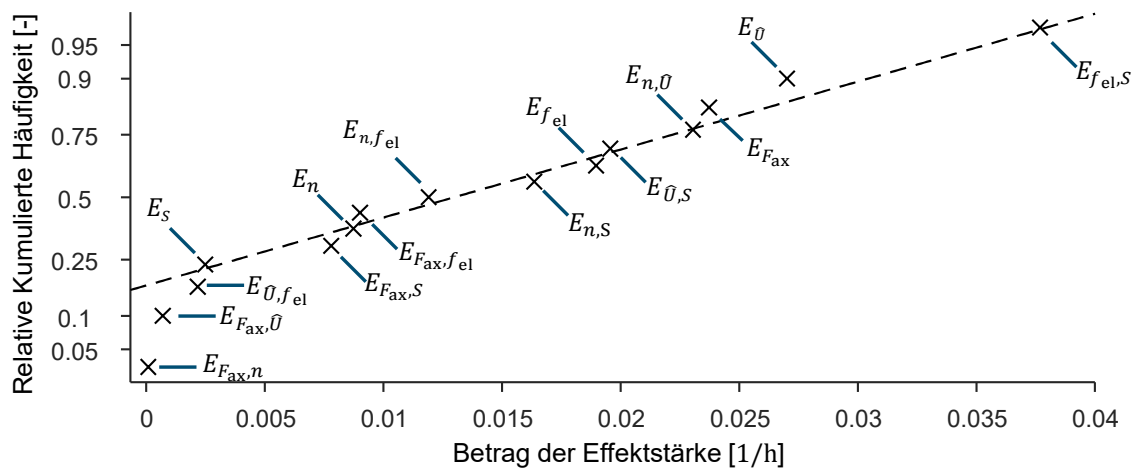
Somit wird gezeigt, dass die zeitliche Änderung der elektrischen Schädigung mithilfe der Versuchsfaktoren modelliert werden kann. Bedingt durch die hohe Varianz der erhobenen Versuchsdaten und der damit verbundenen Wahrscheinlichkeit, wahre Effekte ausgeschlossen und scheinbare Effekte nicht ausgeschlossen zu haben, muss an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass das in dieser Arbeit erstellte Modell validiert werden muss.

### **7.3 Untersuchung der zweiten Hauptkomponente**

Nachdem im vorherigen Abschnitt das Verhalten der ersten Hauptkomponente am Beispiel der mittleren arithmetischen Rauheit untersucht wurde, wird an dieser Stelle auf gleiche Art und Weise das Verhalten der zweiten Hauptkomponente der Variation der Oberflächeneigenschaften betrachtet. Dazu wird die totale Änderungsrate der Hauptkomponente nach Gleichung 4.13 berechnet und die Effekte der Versuchsfaktoren sowie deren Wechselwirkungen auf diese ermittelt. Diese sind analog zu Abbildung 7-6 in Abbildung 7-12 in Form eines Halbnormalen-Plots aufgetragen. Es ist erkennbar, dass sich die Reihenfolge, in der die Effekte entlang der Halbnormalen angeordnet sind, von der Reihenfolge in Abbildung 7-6 deutlich unterscheidet. So ist bspw. der Effekt der Spannungsamplitude der zweitgrößte Effekt, während er bezüglich der Änderungsrate den zweitgeringsten Anteil ausgemacht hat. Allerdings ist festzuhalten, dass keiner der Effekte signifikant von der Normalverteilung abweicht, und es sich somit um scheinbare Effekte handelt.

Da keiner der Eingangsparameter einen signifikanten Effekt auf die zweite Hauptkomponente ausübt, besteht die Vermutung, dass diese einen Effekt der Oberflächeneigenschaften selbst darstellt. HANDL UND KUHLKASPER beschreiben in ihrer Interpretation der Hauptkomponenten, dass die erste Hauptkomponente üblicherweise einen Mittelwert der untersuchten Größen darstellt, während die zweite Hauptkomponente den Kontrast - also

den Unterschied - zwischen diesen beschreibt<sup>224</sup>. Basierend auf den Korrelationswerten in Tabelle 7-1 wird an dieser Stelle eine ähnliche Interpretation gewählt. Die breite Streuung der ermittelten Rangkorrelationskoeffizienten von  $r_{HK_2, S_{q,P}} = -0.21$  und  $r_{HK_2, R_{dq}} = 0.63$  führt zu der Schlussfolgerung, dass die zweite Hauptkomponente die Unterschiede in den gemessenen Oberflächeneigenschaften abbildet. Dass ein Unterschied im Verhalten der Oberflächeneigenschaften vorhanden ist, ist bedingt durch die unterschiedliche Berechnung der einzelnen Oberflächeneigenschaften (vgl. Abschnitt 4.5).



**Abbildung 7-12:** Halbnormalen-Plot des Betrages der Effektstärken der Versuchsfaktoren auf die totale Änderungsrate der zweiten Hauptkomponente .

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die zweite Hauptkomponente nicht einen physikalischen Zusammenhang zwischen den Versuchsfaktoren und den untersuchten Oberflächeneigenschaften beschreibt, sondern den Kontrast zwischen diesen. Somit würde eine weitere Untersuchung der zweiten Hauptkomponente nicht den Effekt der Schädigung, sondern die Unterschiede der einzelnen Oberflächeneigenschaften bedingt durch ihre unterschiedlichen Definitionen betrachten. Da dies nicht Ziel dieser Arbeit ist, wird daher von einer weiteren Untersuchung der zweiten Hauptkomponente abgesehen.

## 7.4 Untersuchung der Wechselwirkung der Schädigungsrate mit den elektrischen Betriebsgrößen im Wälzlager

Im bisherigen Verlauf des Kapitels wurde vor allem der statistische Zusammenhang zwischen den Versuchsfaktoren und der zeitlichen Änderung der elektrischen Schädigung untersucht. Im folgenden Abschnitt soll nun geprüft werden, inwieweit ein Zusammenhang

<sup>224</sup> Handl und Kuhlenkasper (2017) S.130 u. S.134.



---

zwischen der Schädigungsrate und den elektrischen Betriebsgrößen des Lagers identifiziert werden kann.

### 7.4.1 Wechselwirkung der Schädigungsrate mit der Spannung und dem Strom am Wälzlager

Zunächst wird der Zusammenhang zwischen der Schädigung sowie Spannung und Strom betrachtet. Dazu werden aus den Versuchsdaten die charakteristischen Kennwerte abgeleitet. Dafür wird erneut der zeitliche Verlauf der Effektivwerte der Spannung  $U_{\text{RMS}}$  und des Stroms  $I_{\text{RMS}}$  für Versuch V09 in Abbildung 5-5 betrachtet. Es ist erkennbar, dass der Effektivwert der Spannung über alle Schädigungsperioden annähernd konstant ist. Beim Stromverlauf ist zu erkennen, dass dieser in den Schädigungsphasen M001, M003 und M004 auf einem ähnlichen Niveau ist, in M002 ist dieser um 0.5A höher. Zudem ist beim Stromverlauf ein deutliches Rauschen im zeitlichen Verlauf erkennbar.

Um dieses Verhalten der Signalverläufe der Spannung und des Stroms in Korrelation zur Oberflächenschädigung setzen zu können, werden aus den Verläufen charakteristische Kennwerte abgeleitet. Zunächst wird der arithmetische Mittelwert des jeweils anliegenden Signals über die Schädigungsdauer  $t_{\text{dam}}$  berechnet zu

$$\bar{x}_{\text{RMS}} = 1/t_{\text{dam}} \int_0^{t_{\text{dam}}} x_{\text{RMS}} dt. \quad 7.7$$

Dabei werden vorab nur die Messpunkte berücksichtigt, in denen eine elektrische Spannung angelegt ist. Zudem wird der Maximalwert der jeweiligen Größe berechnet über

$$\hat{x}_{\text{RMS}} = \max(x_{\text{RMS}}). \quad 7.8$$

Schließlich wird das Rauschen des Signals über das Verhältnis zwischen Maximalwert und Mittelwert betrachtet als

$$x_{\text{RMS,pk}} = \frac{\hat{x}_{\text{RMS}}}{\bar{x}_{\text{RMS}}}. \quad 7.9$$

Zusätzliche Informationen zum Verlauf der elektrischen Betriebsgrößen lassen sich aus den hochfrequenten Monitoraufnahmen ableiten (vgl. Abbildung 5-8). Es ist erkennbar, dass der Verlauf der Spannung in allen vier Schädigungsphasen annähernd gleich aussieht. Der Verlauf stellt ein Rechtecksignal dar, der Betrag der Spannungsamplitude liegt knapp unter 2V. Das lässt sich mithilfe der Erkenntnis von WEICKER UND BINDER erklären, dass nach dem Erreichen der kritischen Lagerstromdichte von  $J_{\text{B}} > 0.1$  zusätzliche durch das

---

Lager fließende Leistung zu einer Erhöhung des Lagerstromes führt, während die Spannung annähernd konstant bleibt<sup>225</sup>. Die für EDM-Ströme typischen Einbrüche der Spannungsamplitude infolge eines Stromdurchgangs<sup>226</sup> sind nicht erkennbar. Stattdessen bildet der Stromverlauf den Spannungsverlauf annähernd phasengleich nach. Insofern zeigt das Lager ein überwiegend resistives Verhalten, welches typisch für Rotor-Erd-Ströme ist<sup>227</sup>.

Aus den hochfrequenten Monitoraufnahmen lassen sich ebenfalls mehrere Kenngrößen ableiten. Alle Kenngrößen werden dabei für jede Schädigungsperiode berechnet und anschließend gemittelt. Zunächst wird die Amplitude des Signals über das Maximum der gemittelten Schwingungsperiode berechnet

$$\hat{x}_{av} = \max(x_{av}). \quad 7.10$$

Entsprechend wird der Maximalwert des gemessenen Zeitsignals berechnet als

$$\hat{x} = \max(x). \quad 7.11$$

Das Verhältnis der beiden Maximalwerte beschreibt das Rauschen der zeitlichen Signale

$$x_{pk} = \frac{\hat{x}}{\hat{x}_{av}}, \quad 7.12$$

Jeder der durch die Gleichungen 7.6 bis 7.12 beschriebenen Kennwerte lässt sich entsprechend für die elektrische Spannung und den elektrischen Strom berechnen. Das führt zu 12 Größen, deren Einfluss auf die elektrische Schädigung mithilfe des Rangkorrelationskoeffizienten untersucht wird.

In Tabelle 7-4 sind die Rangkorrelationskoeffizienten der Kennwerte der elektrischen Spannung und des Stroms aufgetragen. Es ist erkennbar, dass alle Kennwerte der elektrischen Spannung nur eine geringe Korrelation ( $|r| < 0.3$ ) aufweisen. Das deckt sich mit den Erkenntnissen aus Abschnitt 7.2.1, in dem der Effekt der elektrischen Sollspannung auf die Schädigung als gering beschrieben wird.

---

<sup>225</sup> Weicker und Binder (2022) S.786.

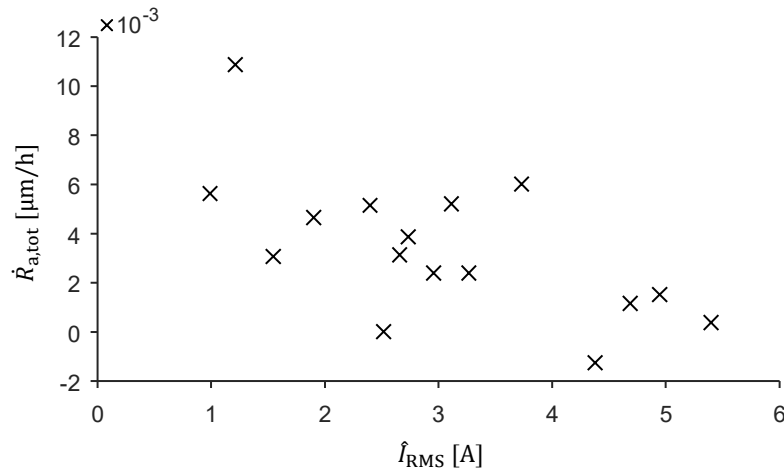
<sup>226</sup> Muetze (2004) S.11ff.

<sup>227</sup> Muetze (2004) S13f.

**Tabelle 7-4:** Rang-Korrelationskoeffizient zwischen den untersuchten Kenngrößen von Spannung und Strom mit der Änderungsrate der mittleren arithmetischen Rauheit.

Eigenschaft	Korrelation	Eigenschaft	Korrelation
$\bar{U}_{\text{RMS}}$	-0.23	$\bar{I}_{\text{RMS}}$	-0.36
$\hat{U}_{\text{RMS}}$	-0.25	$\hat{I}_{\text{RMS}}$	-0.57
$U_{\text{RMS,pk}}$	0.08	$I_{\text{RMS,pk}}$	-0.04
$\hat{U}_{\text{av}}$	-0.01	$\hat{I}_{\text{av}}$	-0.42
$\hat{U}$	-0.04	$\hat{I}$	-0.32
$U_{\text{pk}}$	-0.01	$I_{\text{pk}}$	0.26

Dem gegenüber ist eine deutliche Korrelation zwischen den Kennwerten des fließenden Lagerstroms und der Schädigungsrate zu erkennen. Allerdings handelt es sich hierbei um eine negative Korrelation. Das bedeutet, dass bei steigendem Strom die Schädigungsrate sinkt. In Abbildung 7-13 ist exemplarisch die Schädigungsrate über den maximalen Effektivwert des Stromes aufgetragen. Wie durch den Korrelationskoeffizienten zu erwarten lässt die Tendenz erkennen, dass mit zunehmendem Strom, die Schädigungsrate abnimmt. Dies erscheint zunächst kontraintuitiv, da in der Literatur ein zunehmender Strom, (bzw. eine zunehmende Lagerstromdichte; vgl. Abschnitt 2.2.2) zu erhöhter Schädigung führt. Um diesen Sachverhalt genauer zu verstehen, wird im folgenden Abschnitt die Wechselwirkung der Schädigungsrate mit den in der Literatur verwendeten Kenngrößen elektrischer Lagerschädigung untersucht.



**Abbildung 7-13:** Scatterplot der totalen Änderungsrate der mittleren arithmetischen Rauheit über den maximalen Effektivwert des Stromes.

### 7.4.2 Wechselwirkung der Schädigungsrate mit den Kenngrößen elektrischer Lagerschädigung

Im vorherigen Abschnitt wurden die aus den Messdaten der elektrischen Signale abgeleiteten Kenngrößen beschrieben und deren Wechselwirkung mit der Schädigungsrate betrachtet. Darauf aufbauend werden in diesem Abschnitt aus den Kennwerten die typischen Kenngrößen zur Beschreibung elektrischer Schädigung untersucht. Die erste dieser Kenngrößen ist die elektrische Lagerstromdichte

$$\hat{J}_{\text{L,RMS}} = \frac{\hat{I}_{\text{RMS}}}{A_{\text{Hz}}}, \quad 7.13$$

berechnet aus dem Maximalwert des Effektivwertes des Lagerstroms  $\hat{I}_{\text{RMS}}$  geteilt durch die HERTZ'SCHE Kontaktfläche  $A_{\text{Hz}}$ , welche in Anhang A6 gegeben ist. Zudem wird die am Lager anliegende Scheinleistung

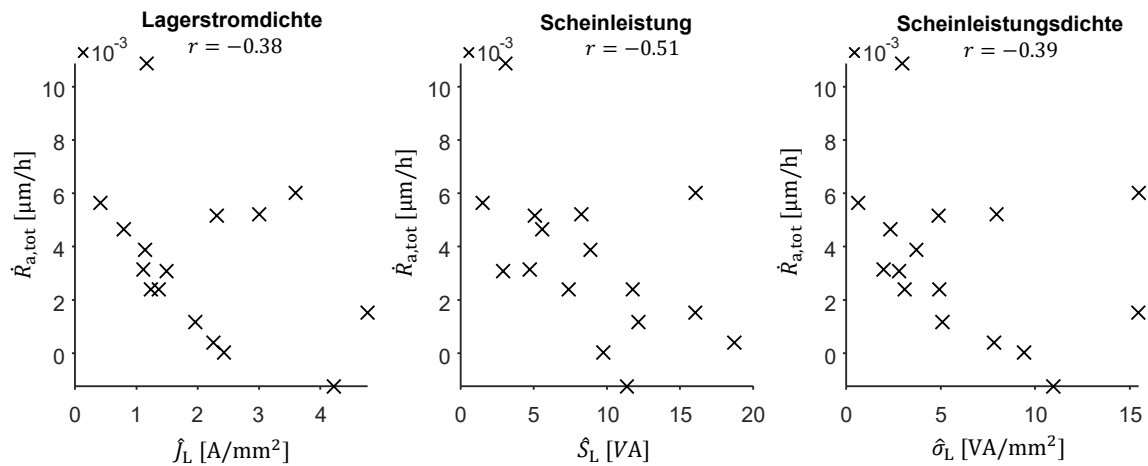
$$\hat{S}_{\text{L,RMS}} = \hat{I}_{\text{RMS}} \cdot \hat{U}_{\text{RMS}}, \quad 7.14$$

sowie die Scheinleistungsdichte

$$\hat{s}_{\text{L,RMS}} = \frac{\hat{S}_{\text{L,RMS}}}{A_{\text{Hz}}}, \quad 7.15$$

betrachtet. In Abbildung 7-14 sind die Scatterplots der drei vorgestellten Kenngrößen über die Schädigungsrate aufgetragen. Zudem sind die berechneten Rangkorrelationskoeffizienten angegeben. Es ist erkennbar, dass die Daten alle eine negative Korrelation aufweisen, was dadurch bedingt ist, dass diese Größen in Proportion zur Stromstärke stehen. Das erscheint kontraintuitiv, da in der Literatur für jede dieser Größe die Wahrscheinlichkeit

und die Schwere der Lagerschädigung ansteigt (vgl. Abschnitt 2.2.2.). Eine direkte Erklärung kann an dieser Stelle dazu nicht gegeben werden.



**Abbildung 7-14:** Scatterplot der totalen Änderungsrate der mittleren arithmetischen Rauheit aufgetragen über die Lagerstromdichte, die scheinbare Lagerleistung und die scheinbare Lagerleistungsdichte.

Bei den berechneten Kenngrößen lässt sich zudem beobachten, dass während die Lagerstromdichte in einem Wertebereich liegt, in dem eine Lagerschädigung zu erwarten ist, die Werte der Scheinleistung sowie der Scheinleistungsdichte von den in der Literatur beschriebenen Werten abweichen. TISCHMACHER beschreibt, dass unter  $S_B < 20\text{VA}$  ein sicherer Betrieb möglich ist<sup>228</sup>. Alle in dieser Arbeit erhobenen Messwerte liegen jedoch unter diesem Grenzwert. Ein Grund dafür ist, dass diese Grenzwerte für einen spezifischen Lagertyp definiert wurden, weswegen von WEICKER UND BINDER die Verwendung der Scheinleistung bezogen auf die HERTZ'SCHE Kontaktfläche - der Scheinleistungsdichte - vorgeschlagen wird<sup>229</sup>. Allerdings liegen die hier vorgestellten Messwerte auch deutlich unter dem von den Autoren festgelegten Grenzwert von  $\hat{\sigma}_L < 40\text{VA}/\text{mm}^2$ . Das liegt daran, dass dieser Grenzwert speziell für EDM-Ströme definiert wurde, in den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuchen aber Rotor-Erd-Ströme nachgebildet wurden. Diese weisen zwar zu Literaturangaben ähnliche Beträge auf (vgl. Lagerstromdichte), fließen allerdings über einen deutlich längeren Zeitraum. In Abbildung 5-8 ist zu sehen, dass über die gesamte Schwingungsperiode ein Strom fließt, wodurch eine deutlich höhere Energie durch das Lager geleitet wird.

<sup>228</sup> Tischmacher (2018) S.25.

<sup>229</sup> Weicker und Binder (2022) S.788.

---

### 7.4.3 Wechselwirkung der Schädigungsrate mit der Lagerimpedanz

Im nächsten Schritt soll die Wechselwirkung der Impedanz mit der Schädigungsrate betrachtet werden. Der Betrag der Impedanz berechnet sich als das Verhältnis von Spannungsamplitude zu Stromamplitude

$$|Z_L| = \frac{\hat{U}_{\text{RMS}}}{\hat{I}_{\text{RMS}}}. \quad 7.16$$

In Abbildung 7-15 ist der Scatterplot der Schädigungsrate über den Betrag der Impedanz aufgetragen. Der Rangkorrelationskoeffizient beträgt  $r = 0.53$ . Es ist erkennbar, dass der Betrag der Impedanz eine positive Korrelation mit der Schädigungsrate aufweist. Der resistive Anteil der Wälzlagerimpedanz kann nach GEMEINDER ET AL.<sup>230</sup> elektrotechnisch approximiert werden mit

$$R_L = \rho \cdot \frac{h_0}{A_{\text{Hz}}}. \quad 7.17$$

Dabei ist  $h_0$  die mittlere Schmierfilmdicke im Wälzkontakt,  $\rho$  ist der spezifische elektrische Widerstand des Schmierstoffs und  $A_{\text{Hz}}$  die Hertz'sche Kontaktfläche. Die HERTZ'SCHE Kontaktfläche erklärt die Korrelation zwischen Impedanz und Schädigung nicht, da in Abschnitt 7.2.1 beobachtet wurde, dass die Axiallast nur einen geringen Effekt auf die Schädigungsrate ausübt. Da die HERTZ'SCHE Kontaktfläche hauptsächlich eine Funktion der Lagerlast ist, übt auch sie nur einen geringen Effekt auf die Schädigungsrate aus. Die Korrelation zwischen HERTZ'SCHER Kontaktfläche und Schädigung liegt bei  $r = -0.06$  in einem sehr niedrigen Bereich. Der spezifische Widerstand  $\rho$  des Schmierstoffs ist abhängig von der Betriebstemperatur und dem Betriebsdruck<sup>231</sup>. Während die Betriebstemperatur über alle Versuche konstant gehalten wurde, variiert der Druck im Wälzkontakt in Abhängigkeit der anliegenden Lagerlast. Jedoch liegt der mittlere Druck in Wälzkontakt in einem Bereich, in dem keine druckabhängigen Änderungen des spezifischen Widerstands zu erwarten sind (vgl. Anhang A6), weswegen der spezifische Widerstand des Schmierfilms ebenfalls als konstant betrachtet werden kann. Damit bleibt der Zusammenhang, dass die Impedanz, und damit auch die Schädigungsrate, von der Schmierfilmdicke abhängt und mit zunehmender Schmierfilmdicke ansteigt.

Dieses Ergebnis passt zu den Ergebnissen von GONDA ET AL., die die Zahl der EDM-Durchschläge in Abhängigkeit der Schmierfilmdicke untersuchen (vgl. Abbildung 2-8)<sup>232</sup>. Im Kontext von Abbildung 2-8 würde sich das Versuchsprogramm dieser Arbeit im Übergangs-

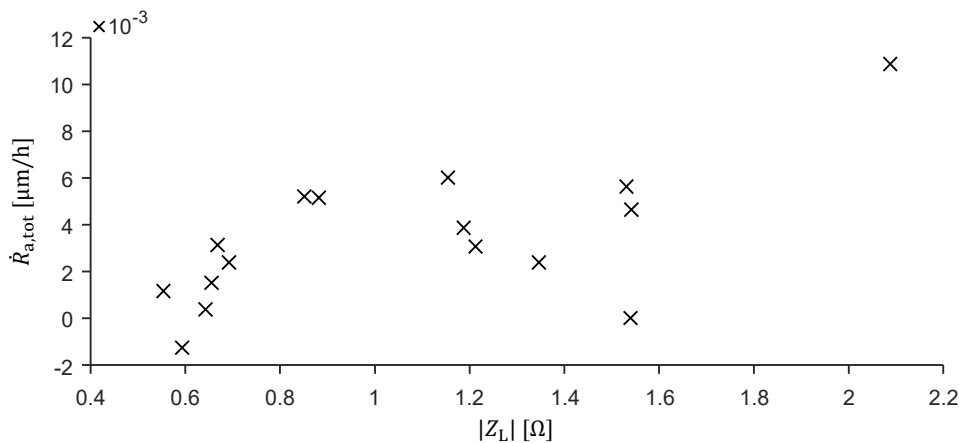
---

<sup>230</sup> Gemeinder et al. (2014) S.1805.

<sup>231</sup> Bechev et al. (2020) S.17.

<sup>232</sup> Gonda et al. (2019) S.3.

bereich zwischen den Bereichen B und C befinden, in denen bei den Autoren eine Zunahme von EDM-Durchschlägen mit zunehmender Schmierfilmdicke beschreiben. Dieser Zusammenhang scheint auf die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuchsergebnisse übertragbar zu sein.



**Abbildung 7-15:** Scatterplot der totalen Änderungsrate der mittleren arithmetischen Rauheit aufgetragen über den Betrag der Impedanz.

## 7.5 Diskussion

In diesem Abschnitt werden die zuvor beschriebenen Ergebnisse diskutiert und interpretiert und im Kontext der untersuchten Forschungsfrage bewertet.

### 7.5.1 Diskussion der Definition der Schädigungsrate

Basierend auf den in Kapitel 6 identifizierten Oberflächeneigenschaften ist es möglich eine Änderungsrate zu berechnen und somit die zeitliche Änderung der elektrischen Schädigung zu beschreiben. Dabei erscheint es aus Sicht des vorhandenen Informationsgehaltes zunächst unerheblich, welche Oberflächeneigenschaft verwendet wird. Alle Oberflächeneigenschaften zeigen eine deutliche Korrelation mit der als Schädigung identifizierten Hauptkomponente der Oberflächendaten. Eine finale Entscheidung, welche Oberflächeneigenschaft schlussendlich am besten für die Beschreibung der Schädigung geeignet ist, hängt von der jeweiligen praktischen Nutzbarkeit ab. So bieten eindimensionale Oberflächeneigenschaften den Vorteil, dass diese einfacher und schneller mit taktilen Oberflächenmessgeräten gemessen werden können, da nur eine geringere Oberfläche vermessen werden muss. Dafür wird mit zweidimensionalen Oberflächeneigenschaften die Oberfläche in einer zusätzlichen Dimension charakterisiert. Der Zielkonflikt zwischen der Einfachheit und der Genauigkeit der Messung muss bei der Auswahl der Messgröße berücksichtigt werden.

---

Bei der Auswahl der Berechnung der Änderungsrate hat sich gezeigt, dass die unterschiedlichen Berechnungsverfahren in dem verwendeten Datensatz nur einen geringfügigen Unterschied ausmachen. Es ist jedoch wichtig hervorzuheben, dass die Annahme einer zeitlich konstanten Änderungsrate der elektrischen Lagerschädigung nicht allgemeingültig ist. Im Stand der Forschung lassen sich Quellen finden, die sowohl eine progressiven wie auch einen asymptotischen Verlauf der Lagerschädigung plausibel erscheinen lassen<sup>233</sup>. Der genaue Verlauf der zeitlichen Änderung der Lagerschädigung bedarf somit weiterer Untersuchungen.

### **7.5.2 Diskussion des Effektes der Betriebsparameter auf die Schädigungsrate**

Der in Abschnitt 5.1 vorgestellte Versuchsplan zielt auf eine statistisch abgesicherte Beschreibung der Effekte der Versuchsparameter auf die Schädigungsrate und eine darauf aufbauende Modellierung der Schädigungsrate in Abhängigkeit dieser Versuchsparameter. Eine solche Modellierung lässt sich zwar mithilfe von Gleichung 7.3 aufstellen, jedoch ist die Validität dieses Zusammenhangs anzuzweifeln. Der Grund dafür liegt in der vergleichsweise hohen Varianz der Versuchsdaten, bzw. in einer im Vergleich zur Varianz niedrigen Versuchsanzahl. Allerdings lässt sich basierend auf den erhobenen Versuchsdaten und der damit ermittelten Streuung eine Abschätzung durchführen, welche Wiederholungszahl notwendig ist, um eine belastbare Aussage über die Effektstärke tätigen zu können. Die Standardabweichung der totalen Änderungsrate über alle Versuche liegt bei  $\sigma_{\dot{R}_a} = 0.0029\mu\text{m}/\text{h}$ . Wenn bei dieser Streuung wahre Effekte bei einer spezifischen Effektstärke von einer Standardabweichung mit einer 90% Wahrscheinlichkeit erkannt werden sollen und die Wahrscheinlichkeit falsche Effekte als wahr zu erkennen unter 5% liegen soll, bedarf es bei einem zweistufigen Versuch mindestens 23 Wiederholungen pro Faktorstufe. Insgesamt müsste der Versuchsplan somit dreimal wiederholt werden. Wenn die Anzahl der Faktorstufen erhöht, oder auch Effekte mit geringerer Effektstärke erkannt werden sollen, muss die Versuchsanzahl ebenso angepasst werden. Die Abschätzung der Versuchsanzahl erfolgt nach SIEBERTZ ET AL.<sup>234</sup>.

Bei der Betrachtung des Zusammenhangs zwischen der Schädigungsrate und den elektrischen Betriebsgrößen ist eine deutliche Korrelation mit dem Betrag der Impedanz und der damit zusammenhängenden Schmierfilmdicke erkennbar. Dies kann mithilfe der elektrischen Energie erklärt werden, die an einem ohmschen Widerstand in Wärme umgewandelt wird. Diese nimmt mit zunehmendem Widerstand zu. Da wiederum auch die Kratergröße mit zunehmendem Energieeintrag zunimmt<sup>235</sup>, erscheint es nachvollziehbar, dass

---

<sup>233</sup> Tischmacher (2018) S.25 oder Harder et al. (2021) S.70.

<sup>234</sup> Siebertz et al. (2017) S.131.

<sup>235</sup> Tischmacher und Gattermann (2010) S.6.



---

damit auch die Schädigungsrate ansteigt. Für weiterführende Untersuchungen ist somit eine genauere Untersuchung des Effektes der Schmierfilmdicke auf die Schädigungsrate notwendig, da diese einen hohen Einfluss darauf hat. Eine Möglichkeit dazu wäre entweder eine Erhöhung der Faktorstufen der Drehzahl oder die Untersuchung der Betriebstemperatur als zusätzlichem Faktor.

### 7.5.3 Bewertung der Ergebnisse

In diesem Kapitel wurde gezeigt, dass die Schädigungsrate über die zeitliche Änderung einer der in Kapitel 6 identifizierten Oberflächeneigenschaften beschrieben werden kann (stellvertretend am Beispiel der mittleren arithmetischen Rauheit  $R_a$  gezeigt). Mithilfe dieser ist es möglich, eine Quantifizierung des Effektes, den einzelne Betriebsparameter oder deren Wechselwirkungen auf die Schädigungsrate ausüben, durchzuführen. Die im Rahmen der Untersuchungen quantifizierten Effekte ermöglichen den Ansatz einer mathematischen Modellierung des Zusammenhangs zwischen der elektrischen und mechanischen Lagerbelastung sowie der zeitlichen Änderung der elektrischen Schädigung. Jedoch ist diese Modellierung nur eingeschränkt nutzbar, da bedingt durch die zuvor nicht bekannte hohe Standardabweichung der Versuchsdaten, vorhandene Effekte im Rauschen untergehen und somit nicht eindeutig identifiziert werden können. Durch die erhobenen Messdaten ist es allerdings möglich, die Standardabweichung zu quantifizieren und dadurch weitere Versuchsreihen planen, die eine zuverlässige Modellierung ermöglichen. Über den Einfluss des Effektes der Versuchsparameter hinaus konnte eine Korrelation zwischen der Schädigungsrate und der Schmierfilmdicke identifiziert werden. Diese kann mithilfe von bekannten Ergebnissen in der Literatur plausibilisiert werden, bedarf allerdings noch weiterer Untersuchungen.

Bezugnehmend auf die vorher formulierte Forschungsfrage lässt sich festhalten, dass obwohl der exakte Zusammenhang zwischen elektrischer und mechanischer Lagerlast auf die Schädigung nicht abschließend gefunden werden konnte, im Rahmen dieses Kapitels die Grundlagen für eine detailliertere Untersuchung dieser Forschungsfrage gelegt wurden. So wurde gezeigt, dass die zeitliche Änderung einer der identifizierten Oberflächeneigenschaften (bspw. der mittleren arithmetischen Rauheit  $R_a$ ) als Schädigungsrate eine nutzbare Einheit zur Beschreibung der zeitlichen Änderung elektrischer Schädigung darstellt. Es wurde die Varianz der Versuchsdaten ermittelt, aus der in weiterführenden experimentellen Untersuchungen der notwendige Versuchsumfang abgeschätzt werden kann, der für die geforderte Ergebnisgenauigkeit notwendig ist. Mithilfe dieser Ergebnisse wird ein Mehrwert für das weitere Forschungsvorgehen in Richtung eines Lebensdauermodells für Lager unter elektrischer Last geschaffen.



---

## 8 Zustandsüberwachung der elektrischen Lagerschädigung mithilfe hochfrequenter Vibrationsmessung

Dieses Kapitel widmet sich der dritten Forschungsfrage (vgl. Abschnitt 3.2). Um diese Frage zu beantworten, werden zuerst die untersuchten Kennwerte der Vibrationsmessung (engl.: Features) definiert. Anschließend wird betrachtet, welche Features den Zusammenhang mit der elektrischen Lagerschädigung beschreiben und daher zur Modellierung der elektrischen Lagerschädigung verwendet werden können. Anschließend wird mit den im Rahmen dieser Arbeit erhobenen Daten ein künstliches neuronales Netz erstellt, mit welchem gezeigt wird, dass eine Approximation der elektrischen Lagerschädigung mithilfe der identifizierten Features möglich ist.

### 8.1 Definition der untersuchten Features der Vibrationsmessung

Zunächst wird in diesem Abschnitt beschrieben, welche Features aus den Daten der Vibrationsmessung extrahiert werden und wie diese extrahiert werden.

#### 8.1.1 Beschreibung der verwendeten Versuchsdaten

Im Verlauf der experimentellen Untersuchungen werden die radialen und axialen Beschleunigungen der Prüfkammer mit einer Abtastfrequenz  $f_{\text{mess}} = 10$  kHz gemessen. Die letzten fünf Sekunden jeder Minute werden dabei abgespeichert und für die weitere Auswertung verwendet. Diese periodische Untersuchung der Versuchsdaten liegt in der Größenordnung vergleichbarer Untersuchungen aus der Literatur<sup>236</sup>. Auf die Auswertung der gesamten Zeitschriebe wird aus Gründen des zu beherrschenden Datenumfangs verzichtet, da auch keine zusätzlichen Informationen daraus zu erwarten sind. Aus diesen Zeitschrieben und den daraus berechneten Frequenzbändern werden die Features berechnet, die im weiteren Verlauf dieses Kapitels untersucht werden. Für diese Feature wird ein gleitender Mittelwert über eine Dauer von jeweils fünf Messpunkten berechnet, um deren Vorhersagegenauigkeit zu erhöhen<sup>237</sup>. Für den Vergleich der gemessenen Vibrationsdaten mit den Oberflächendaten wird somit jeweils der Mittelwert der Features aus den letzten fünf Minuten der Messung verwendet.

#### 8.1.2 Kenngrößen im Zeitbereich

Für jedes im vorherigen Abschnitt definierte Aufnahmezeitfenster der Vibrationsmessung werden die in Anhang A1 definierten Features berechnet. Dabei wird zwischen Features der Vibrationsdaten in axialer Richtung und Features der Vibrationsdaten in radialer Richtung

---

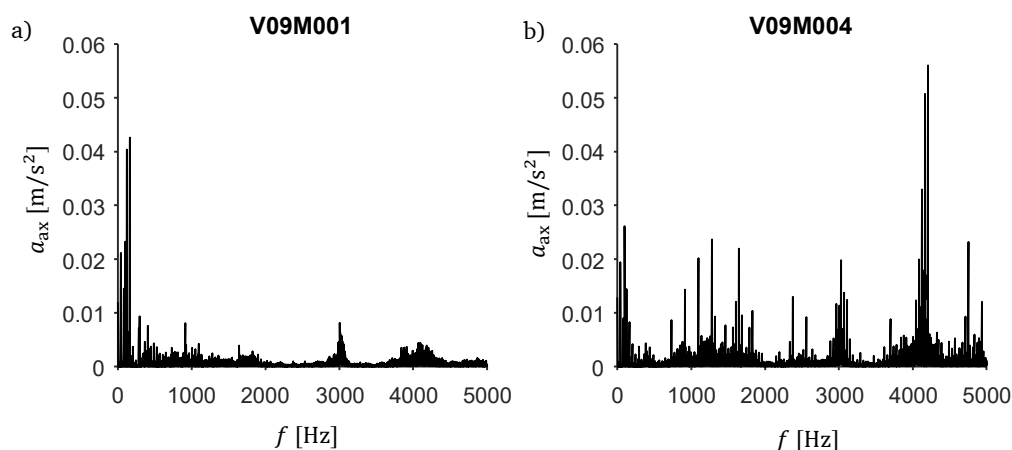
<sup>236</sup> Bienefeld et al. (2021) S.7f.

<sup>237</sup> Bienefeld et al. (2022) S.9.

unterschieden. Diese werden entsprechend bezeichnet (bspw.  $T_{i,ax}$  und  $T_{i,rad}$ ). Damit werden im Zeitbereich insgesamt 78 Features gebildet.

### 8.1.3 Kenngrößen im Frequenzbereich

Als nächstes werden die Kenngrößen der Vibrationsmessung im Frequenzbereich gebildet. Das Zeitsignal wird zunächst mit einer Fensterfunktion multipliziert, um mögliche Leakeffekte bei der Transformation in den Frequenzbereich zu vermeiden<sup>238</sup>. Dazu wird in dieser Arbeit das Hanning-Fenster verwendet<sup>239</sup>. Anschließend werden die Messdaten mittels der Fast-Fourier-Transformation (FFT) in den Frequenzbereich überführt. In Abbildung 8-1 sind exemplarisch die Frequenzspektren der axialen Beschleunigung für die Schädigungsphasen M001 und M004 in Versuch V09 dargestellt. Es ist erkennbar, dass sich der Maximalwert des Spektrums erhöht und dass dieser bei einer anderen Frequenz auftritt. Zudem ist eine Erhöhung der Frequenzantwort im gesamten Bereich zwischen 1000 und 5000 Hz zu beobachten, während die Schwingungen im Bereich 100 bis 200 Hz deutlich abnehmen. Die Beschreibung dieser Beobachtungen erfolgt mit den in Anhang A2 aufgeführten Features. Das führt zu insgesamt 26 Features für die Messschriebe der axialen und radialen Vibrationsdaten ( $F_{1,ax}$  und  $F_{1,rad}$ ).



**Abbildung 8-1:** Frequenzspektrum der axialen Beschleunigung am Ende der Schädigungsphasen V09M001 (a) und V09M004 (b).

Darüber hinaus wird das mit der FFT ermittelte Frequenzspektrum mithilfe der Drehzahl  $n$  skaliert, wodurch das Frequenzspektrum nicht in Hz (wie in Abbildung 8-1), sondern in Vielfachen (Ordnungen) der Drehzahl angegeben wird. Da die in dieser Arbeit durchgeführten Versuche bei zwei unterschiedlichen Drehzahlen durchgeführt wurden, ergibt sich

<sup>238</sup> Schaeffler Monitoring Services GmbH (2019) S.61ff.

<sup>239</sup> Schaeffler Monitoring Services GmbH (2019) S.63.

---

so die Möglichkeit, Veränderungen im Vielfachen der jeweiligen Drehzahl zu vergleichen. Um eine Vergleichbarkeit der betrachteten Daten sicherzustellen, werden die Ordnungsspektren nur bis zum 100-fachen der Anregungsfrequenz betrachtet. Auch für diese Spektren werden jeweils die in Anhang A2 angegebenen Features in radialer und axialer Richtung berechnet ( $\tilde{F}_{i,ax}$  und  $\tilde{F}_{i,rad}$ ).

#### 8.1.4 Kenngrößen der Hüllkurve

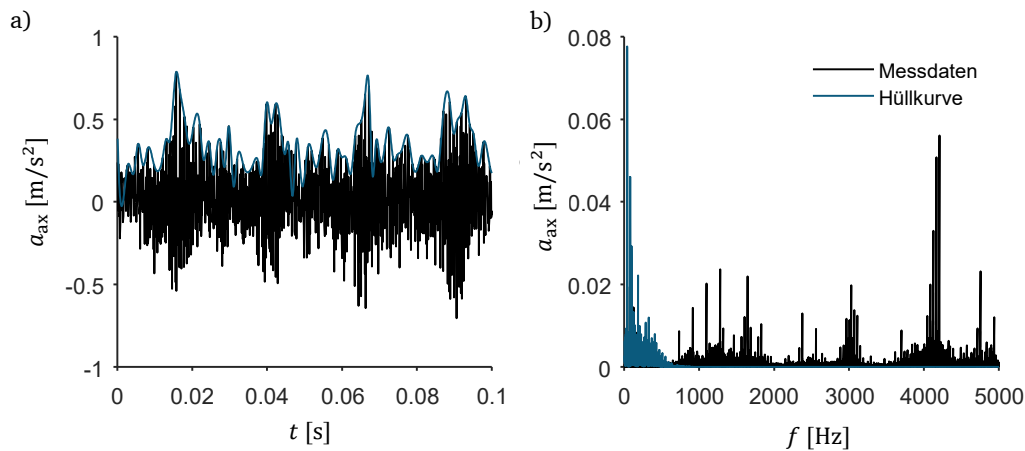
In der Zustandsüberwachung von Wälzlagern treten infolge der Überlagerung unterschiedlicher Schwingungsfrequenzen Amplitudenmodulationen auf<sup>240</sup>. Dabei wird ein niederfrequentes Signal mit der Frequenz  $f_{low}$  mit einem hochfrequenten Signal  $f_{high}$  überlagert. Im Frequenzbereich ist ein derartiges Signal als das hochfrequente Signal zu erkennen, mit den benachbarten Seitenbändern der Frequenz  $f_{high} \pm m \cdot f_{low}$ . Das niederfrequente Signal ist dabei nicht mehr identifizierbar<sup>241</sup>. Um das niederfrequente Signal untersuchen zu können muss eine Demodulation des ursprünglichen Signals durchgeführt werden, bspw. mithilfe einer Hüllkurve. Eine derartige Demodulation kann bspw. mithilfe der Hilbert-Transformation durchgeführt werden<sup>242</sup>. In Abbildung 8-2 a) ist exemplarisch ein Schwingungssignal mit dazugehöriger Hüllkurve für die Aufnahme V09M004 abgebildet. Im zeitlichen Verlauf ist erkennbar, dass die Hüllkurve das niederfrequente Verhalten des Signals abbildet, die hochfrequenten Effekte jedoch weitestgehend unberücksichtigt bleiben. Dementsprechend zeigt das Frequenzspektrum der Hüllkurve Abbildung 8-2 b) einen hohen Ausschlag im Bereich der Anregungsfrequenz, während bei den höheren Frequenzen das Signal verschwindend gering ist. Aus einer derartig erzeugten Hüllkurve werden analog zum Vorgehen in Abschnitt 8.1.3 die Features extrahiert, wodurch 52 zusätzliche Features entstehen (bspw.  $F_{i,env,ax}$  und  $\tilde{F}_{i,env,rad}$ ).

---

<sup>240</sup> Schaeffler Monitoring Services GmbH (2019) S.70.

<sup>241</sup> Schaeffler Monitoring Services GmbH (2019) S.72.

<sup>242</sup> Feldman (2011) S.739.



**Abbildung 8-2:** Messdaten und daraus abgeleitete Hüllkurve für den Versuch V09M004 im Zeitbereich (a) und Frequenzbereich (b).

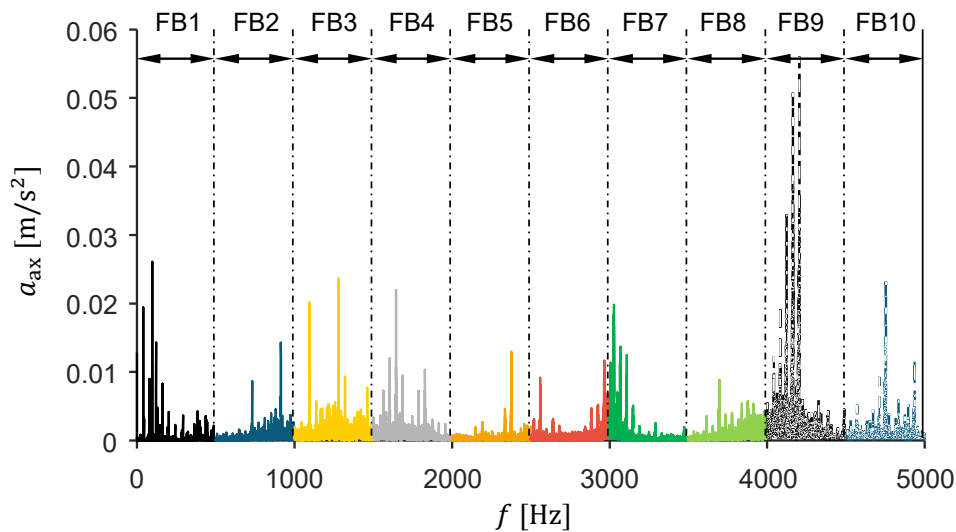
### 8.1.5 Kenngrößen innerhalb einzelner Frequenzbänder

BIENEFELD ET AL. haben gezeigt, dass der Mittelwert einzelner Frequenzbänder als Feature zur Untersuchung von Lagerschäden verwendet werden kann<sup>243</sup>. Dazu wird das Frequenzspektrum in  $j$  äquidistante Frequenzbänder unterteilt und anschließend der Mittelwert der Frequenzantwort in diesem Frequenzband berechnet. Im Rahmen dieser Arbeit wird das beschriebene Vorgehen erweitert. Zunächst wird das Frequenzspektrum in zehn äquidistante Frequenzbänder unterteilt (siehe Abbildung 8-3), anschließend werden in jedem dieser Frequenzbänder die in den Abschnitten 8.1.3 und 8.1.4 vorgestellten Feature berechnet. Das führt zu 1040 zusätzlichen Features (bspw.  $F_{i,ax,FBj}$  und  $\tilde{F}_{i,env,rad,FBj}$ ).

## 8.2 Featureauswahl

Im vorherigen Abschnitt wurde die Analyse der Vibrationsmessdaten mithilfe von insgesamt 1218 unterschiedlichen Features beschrieben. Eine so hohe Anzahl an Features erscheint einerseits nicht praktikabel für die Zustandsüberwachung eines einzelnen technischen Systems. Andererseits ist anzunehmen, dass die hohe Anzahl an Features auch redundante Informationen beinhalten. Der folgende Abschnitt zielt somit darauf ab, aus allen berechenbaren Features diejenigen zu synthetisieren, die eine effiziente Beschreibung des Systemverhaltens bei geringer Redundanz ermöglichen.

<sup>243</sup> Bienefeld et al. (2021) S.9.

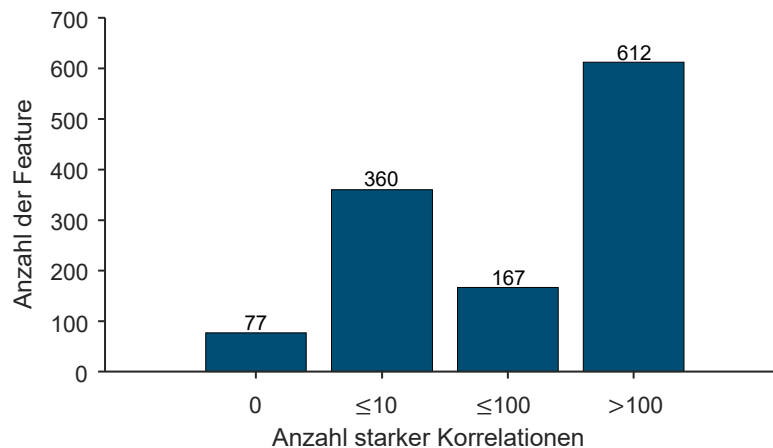


**Abbildung 8-3:** Frequenzbänder im Frequenzspektrum der axialen Beschleunigung V09M004.

### 8.2.1 Identifikation und Zusammenfassung redundanter Feature

Die Identifikation redundanter Features erfolgt mithilfe der Rangkorrelation der Features untereinander. Die Rangkorrelation beschreibt, inwieweit zwei Größen ein monotonen Verhalten aufweisen (vgl. Abschnitt 4.4.1). Das wird mithilfe des Rangkorrelationskoeffizienten  $r$  ausgedrückt. Für diese Untersuchung wird angenommen, dass zwei Features ab einem Wert von  $|r| \geq 0.8$  als hoch korreliert anzusehen sind und die zusätzliche Information, die durch die Betrachtung beider Features gewonnen werden kann, sehr gering ist. Somit ist es zunächst ausreichend, nur eines der beiden Features weiter zu untersuchen.

In Abbildung 8-4 ist aufgetragen, wie viele Features eine starke Korrelation mit anderen Features aufweisen. Es ist erkennbar, dass 77 Features keine starke Korrelation mit einem anderen Feature zeigen. Weitere 360 Features zeigen eine Korrelation mit bis zu zehn anderen Features, 167 Features zeigen Korrelationen mit bis zu 100 Features und 612 Features zeigen Korrelationen mit über 100 Features. Das zeigt die erwartete Redundanz innerhalb der Features.



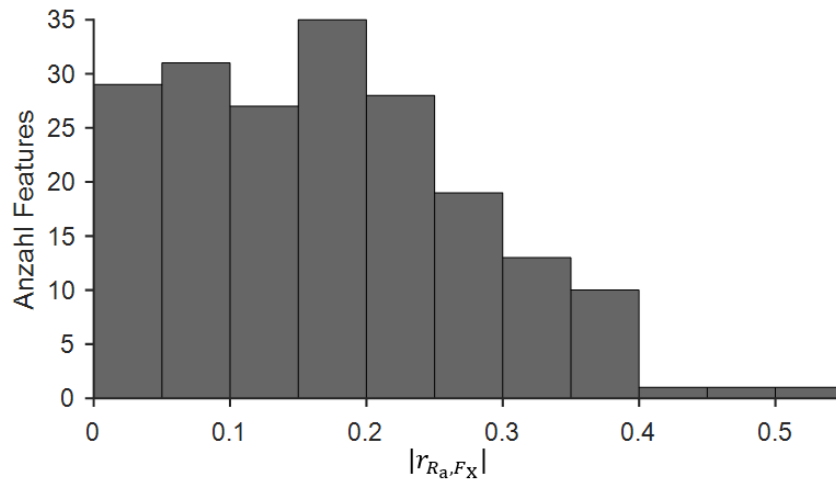
**Abbildung 8-4:** Anzahl der Features, die starke Korrelationen mit anderen Features aufweisen.

Um diese Redundanz zu reduzieren, werden zunächst die Features in Abhängigkeit der Anzahl an starken Korrelationen, welche sie mit den anderen Features aufweisen, sortiert. Anschließend werden alle Features mit denen das erste Feature korreliert, weggelassen. Aufgrund der hohen Übereinstimmung zwischen diesen, ist es möglich, durch das erste Feature den Informationsgehalt der weggelassenen Features zu repräsentieren. Dieses Feature besitzt nun keine starke Korrelation mehr mit den anderen Features. Das Vorgehen aus Sortieren nach der höchsten Anzahl an starken Korrelationen und Weglassen aller Features, mit denen das erste Feature korreliert, wird solange wiederholt, bis keine starken Korrelationen mehr zwischen Features vorhanden sind. Dadurch lassen sich die Features auf insgesamt 197 unterschiedliche Feature reduzieren, welche in Anhang A9 aufgelistet sind.

### 8.2.2 Analyse der Korrelation zwischen den Features und der mittleren arithmetischen Rauheit

Nachdem im vorherigen Abschnitt die Redundanz innerhalb der Features reduziert wurde, wird im nächsten Schritt der Zusammenhang mit der elektrischen Lagerschädigung betrachtet. Dazu wird die Rangkorrelation der Features mit der elektrischen Schädigung berechnet, welche mithilfe der mittleren arithmetischen Rauheit der Wälzlageroberfläche  $R_a$  beschrieben wird. In Abbildung 8-5 ist die Häufigkeitsverteilung des Betrages der Korrelation der untersuchten Features mit der mittleren arithmetischen Rauheit dargestellt. Es ist erkennbar, dass von den untersuchten 195 Features nur 26 eine Korrelation von  $|\tau| \geq 0.3$  aufweisen. Die übrigen Features liegen darunter und zeigen daher nur eine schwache Korrelation.





**Abbildung 8-5:** Häufigkeitsverteilung des Betrages der Korrelation der untersuchten Feature mit der arithmetischen Rauheit der Wälzlagerlaufbahn.

Die 26 Features, die eine höhere Korrelation mit  $R_a$  aufweisen, sind in Abbildung 8-6 dargestellt. Zusätzlich sind ihr jeweiliger Betrag der Rangkorrelation mit  $R_a$  und der Betrag der Rangkorrelation der Feature untereinander visualisiert. Bei der Betrachtung der identifizierten Features ist erkennbar, dass alle Features mit einer Korrelation von  $|r| \geq 0.3$  zu den Features zählen, die aus den Frequenzbändern extrahiert wurden. Alle Features, die aus dem Zeitbereich und aus den Bereichen des Frequenzspektrums extrahiert wurden, weisen eine niedrigere Korrelation auf. Die höchste Korrelation mit der mittleren arithmetischen Rauheit weist das Feature  $\tilde{F}_{5,FB5,ax}$  mit dem Wert  $r_{R_a, \tilde{F}_{5,FB5,ax}} = -0.53$  auf.

### 8.2.3 Hauptkomponentenanalyse der Vibrationsfeatures

In Abbildung 8-6 ist zu erkennen, dass die betrachteten Features keine starke Korrelation untereinander aufweisen, und daraus keine direkte Redundanz abgeleitet werden kann. Allerdings ist die Korrelation der Features mit  $|r| \leq 0.79$  so stark, als dass davon ausgegangen werden kann, dass immer noch redundante Information in den Features vorhanden ist. Um diesen Zusammenhang näher zu betrachten wird die Hauptkomponentenanalyse durchgeführt (vgl. Abschnitt 4.4.2.). Die Hauptkomponentenanalyse transformiert die untersuchten Größen in Koordinaten um, die jeweils den größtmöglichen Teil der nicht erklärten Varianz im System beschreiben. Die Komponenten, die einen vernachlässigbaren Teil der Varianz erklären, können im Anschluss an die Hauptkomponentenanalyse vernachlässigt werden. Mithilfe der Hauptkoordinatentransformation werden die 26 betrachteten Feature in die Hauptkomponenten  $VK_1$  bis  $VK_{26}$  transformiert. Die Varianz, die die jeweilige Hauptkomponente darstellt, wird mit  $\lambda_{VK}$  ausgedrückt.

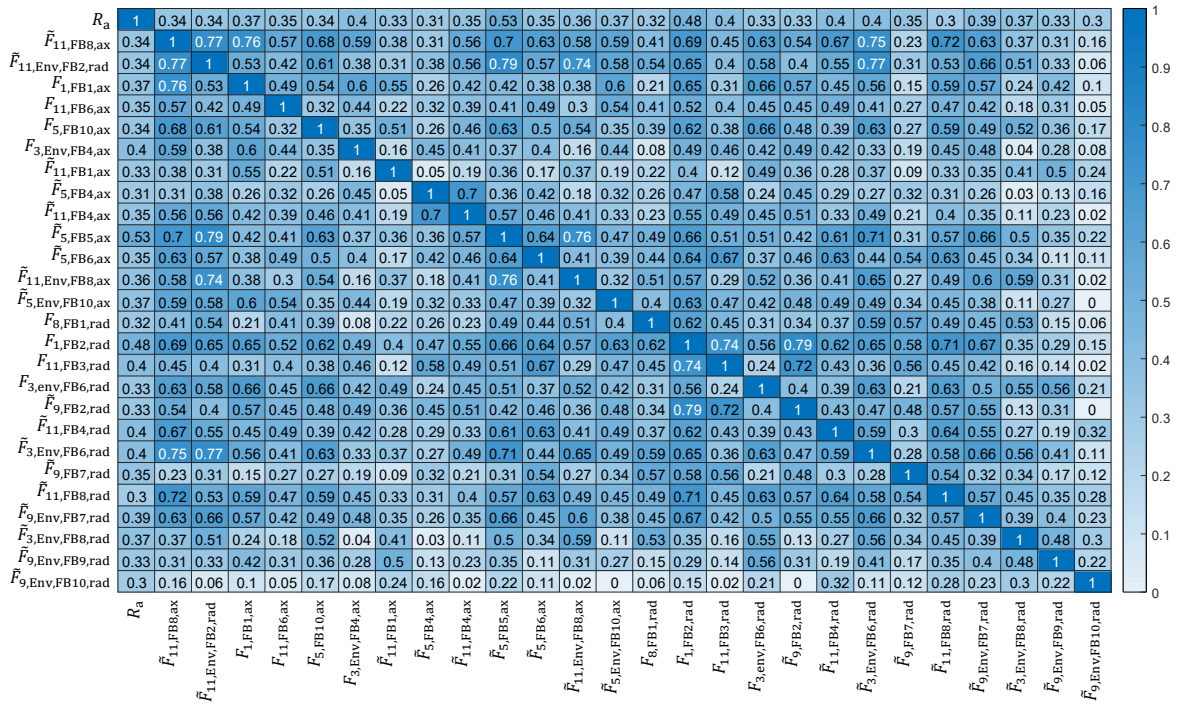
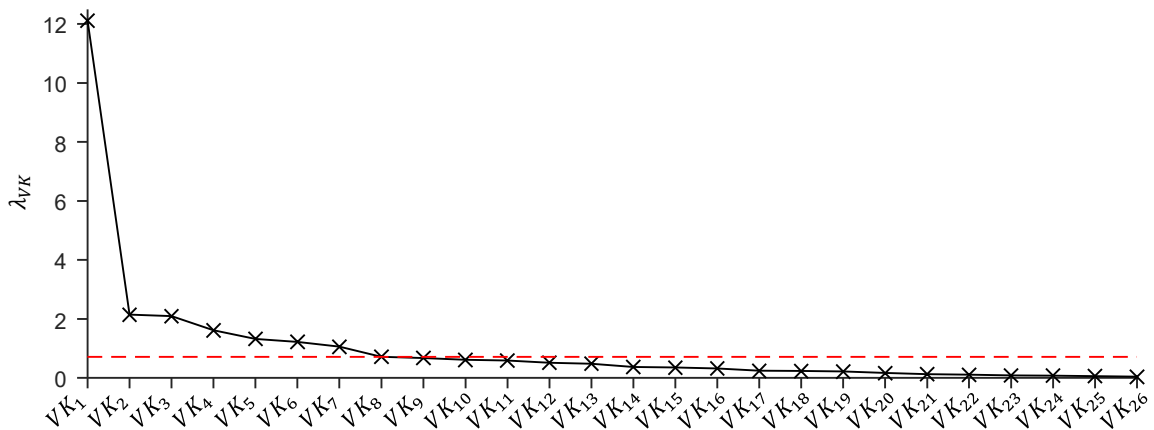


Abbildung 8-6: Betrag der Korrelation der untersuchten Feature untereinander und mit der arithmetischen Rauheit der Wälzlagerlaufbahn.

In Abbildung 8-7 ist die Varianz aller Hauptkomponenten in Form eines Screeplots dargestellt. In der rot gestrichelten Linie ist zudem der Grenzwert nach JOLIFFE eingezeichnet, ab dem der Anteil der mit einer Hauptkomponente erklärten Varianz vernachlässigbar ist<sup>244</sup>. Somit liefern von den 26 Hauptkomponenten nur sieben Hauptkomponenten einen signifikanten Beitrag zur Erklärung der Gesamtvarianz. Die restlichen Hauptkomponenten liefern nur einen geringfügigen Beitrag zur Erklärung der Gesamtvarianz und sind daher vernachlässigbar.

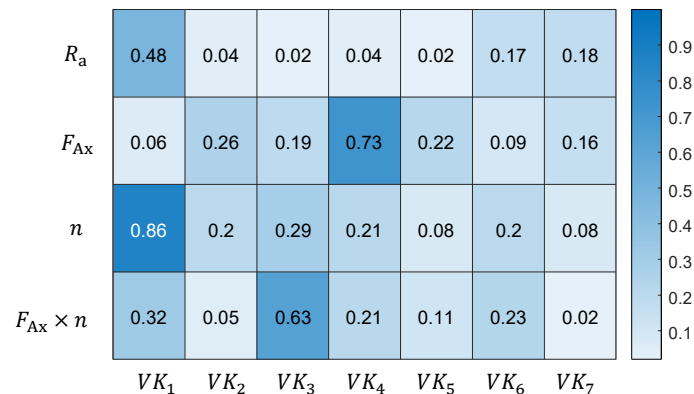
<sup>244</sup> Jolliffe (1972) S.170.



**Abbildung 8-7:** Screeplot der Varianz der Hauptkomponenten der Vibrationsfeature.

Im nächsten Schritt wird geprüft, welcher Zusammenhang zwischen den Hauptkomponenten mit der elektrischen Lagerschädigung und mit der mechanischen Lagerlast besteht. Auf eine Betrachtung des Einflusses der elektrischen Lagerlast wird verzichtet, da das Hinzunehmen oder Entfernen dieser keinen direkten Einfluss auf die gemessenen Vibrationen ausübt, sondern diese durch die elektrische Oberflächenschädigung langfristig beeinflusst. In Abbildung 8-8 ist der Betrag der Korrelation zwischen der mittleren arithmetischen Rauheit, der Axialkraft, der Drehzahl sowie der Wechselwirkung aus Kraft und Drehzahl mit den Hauptkomponenten der Vibrationsschwingungen dargestellt. Es ist erkennbar, dass die mittlere arithmetische Rauheit nur mit der ersten Hauptkomponente eine signifikante Korrelation aufweist. Es ist allerdings zu beobachten, dass diese Hauptkomponente eine noch deutlich höhere Korrelation zur Drehzahl aufweist. Dies ist durch das Prinzip der Hauptkomponentenanalyse bedingt, welche die untersuchten Größen so transformieren, dass jede Größe den größtmöglichen Anteil an der Gesamtvarianz beschreibt. Die erste Hauptkomponente korreliert mit der Drehzahl, da die gemessenen Beschleunigungen eine Funktion der Drehzahl sind<sup>245</sup>. Insofern erscheint eine Hauptkomponentenanalyse der Vibrationsfeature zur Erkennung von Oberflächenschäden in Datensätzen mit veränderlichen Drehzahlen nicht zielführend.

<sup>245</sup> Schaeffler Monitoring Services GmbH (2019) S.37.



**Abbildung 8-8:** Betrag der Rangkorrelation zwischen den Hauptkomponenten, der mittleren arithmetischen Rauheit sowie der Kraft, der Drehzahl und der Wechselwirkung aus Kraft und Drehzahl.

## 8.2.4 Identifikation der relevanten Features mithilfe des "RreliefF" Algorithmus

Neben den allgemeinen statistischen Verfahren gibt es im Bereich des Feature-Engineerings eine Vielzahl an Verfahren zur Bewertung der Aussagekraft der untersuchten Features. Ziel dieser Verfahren ist es, nur die wichtigen Features für die Modellierung des untersuchten Zusammenhangs zu verwenden. Zum einen wird damit die Erstellung des Modells zeiteffizienter, und zum anderen können zu viele Features in einem Modell zum „Overfit“ führen, durch den das Modell das in den Referenzdaten enthaltene Rauschen abbildet und nicht mehr den untersuchten Zusammenhang<sup>246</sup>. Eine Übersicht möglicher Verfahren sowie einen Vergleich ihrer Performanz und Recheneffizienz liefern BOMMERT ET AL.<sup>247</sup> Im Rahmen dieser Arbeit wird der *RreliefF* Algorithmus<sup>248</sup> zur Identifikation geeigneter Features verwendet. Dieses Verfahren kann nicht nur zur Featureauswahl für eine Regression verwendet werden - also für die Modellierung metrischer Betriebszustände - sondern funktioniert auch unabhängig von einem konkreten Modellierungsansatz. Der Algorithmus ist in der *Statistics and Machine Learning Toolbox* in MATLAB implementiert<sup>249</sup>.

<sup>246</sup> Kubat (2017) S.103f.

<sup>247</sup> Vgl. Bommert et al. (2020).

<sup>248</sup> Vgl. Robnik-Sikonja und Kononenko (1997).

<sup>249</sup> Mathworks (2010).

Der *RreliefF* Algorithmus bewertet die Aussagekraft eines Features anhand der Wahrscheinlichkeit benachbarter Featurepunkte zu unterschiedlichen Werten der untersuchten Messgröße anzugehören. Für eine ausführliche Herleitung des *RreliefF* Algorithmus wird auf die Veröffentlichung von ROBNIK-SIKONJA UND KONONENKO verwiesen<sup>250</sup>.

In Abbildung 8-9 sind 30 der in Abschnitt 8.2.1 identifizierten 197 Feature aufgetragen, die mithilfe des *RreliefF* Algorithmus die höchste Bewertung erhalten haben. Im Vergleich zu den in Abbildung 8-6 identifizierten Features mit der höchsten Korrelation ist erkennbar, dass die hier betrachteten Features sowohl Features aus dem Zeitbereich als auch aus dem Frequenzspektrum enthalten. Drei der Features zeigen eine hohe Korrelation mit der mittleren arithmetischen Rauheit und weisen bei der Auswertung mit dem *RreliefF* Algorithmus hohe Bewertungen auf. Diese sind die Features  $\tilde{F}_{11, Env, FB8, ax}$ ,  $F_{1, FB1, ax}$  und  $F_{1, FB2, rad}$ . Im folgenden Abschnitt wird geprüft, ob die im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Features einen Rückschluss auf die elektrische Lagerschädigung ermöglichen und zu deren Zustandsüberwachung genutzt werden können.

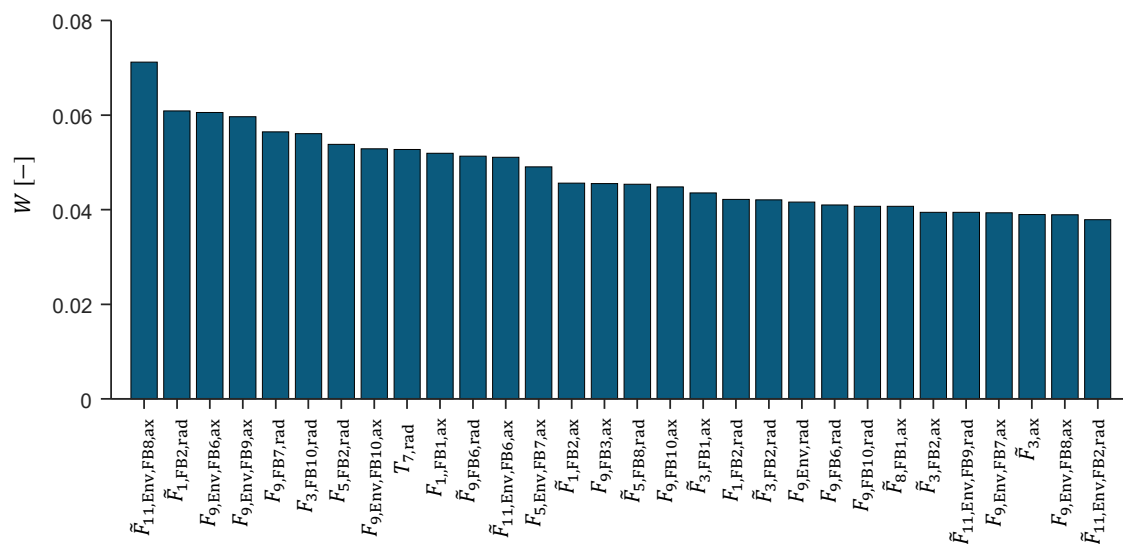


Abbildung 8-9: Bewertung der Feature mithilfe des *RreliefF* Algorithmus.

<sup>250</sup> Vgl. Robnik-Sikonja und Kononenko (1997).

---

### 8.3 Modellierung der elektrischen Lagerschädigung in Abhängigkeit der Kenngrößen der Vibrationsmessung mittels künstlicher neuronaler Netze

Nachdem in den vorherigen Abschnitten Features identifiziert wurden, die zur Quantifizierung elektrischer Lagerschäden geeignet sind, wird in diesem Abschnitt exemplarisch ein künstliches neuronales Netz verwendet, um diese Eignung zu bestätigen. Zunächst wird dabei das Design des verwendeten Netzes vorgestellt und die Daten in Trainings- und Validierungsdatensätze aufgeteilt. Abschließend werden die Ergebnisse der Berechnung mit dem entwickelten neuronalen Netz vorgestellt.

#### 8.3.1 Aufbau des künstlichen neuronalen Netzes

Künstliche neuronale Netze (KNN) sind eine Unterkategorie von Algorithmen, die im Bereich des maschinellen Lernens vielfältige Anwendungen finden<sup>251</sup>. Daher wird an dieser Stelle nur die Gestaltung eines neuronalen Netzes für die konkrete Anwendung beschrieben, für eine allgemeine Beschreibung der Funktionsweise neuronaler Netze wird auf die entsprechende Fachliteratur verwiesen<sup>252</sup>.

In Abbildung 8-10 ist das verwendete neuronale Netz dargestellt. Es besteht aus einer Eingangsebene, in die eine variable Anzahl an Features eingegeben werden kann. Die Ausgangsebene gibt die vorhergesagte mittlere arithmetische Rauheit aus. Dazwischen befinden sich zwei versteckte Ebenen, mit  $m_{E_1} = m_{E_2} = m_E = 30$  Neuronen in jeder Ebene. Das Netz ist vollständig verbunden, was bedeutet, dass alle Neuronen benachbarter Ebenen miteinander verbunden sind.

Um die Gewichtung der Neuronen und ihrer Verbindungen zu bestimmen, muss das Netz trainiert werden. Dazu werden die vorhandenen Messdaten in zwei Gruppen geteilt. Die erste Gruppe besteht aus den Trainingsdaten, die zweite Gruppe sind die Validierungsdaten. Mithilfe der Trainingsdaten werden die Gewichtungen der Neuronen iterativ angepasst (engl.: Backpropagation) damit der Fehler zwischen den Messdaten und ihrer Approximation minimal wird. Der Approximationsfehler wird mithilfe des Root Mean Square Error (*RMSE*) quantifiziert, also der Wurzel des mittleren Fehlerquadrates, welche sich berechnet zu

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (x_i - \hat{x}_i)^2}. \quad 8.1$$

---

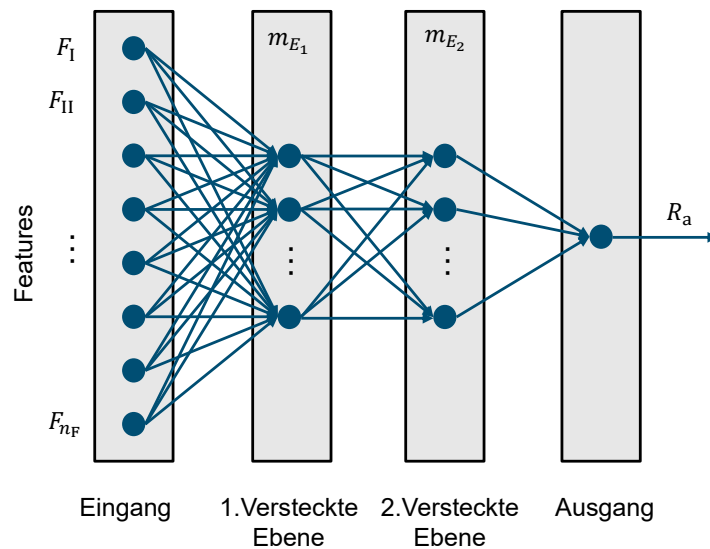
<sup>251</sup> Richter (2019) S.1.

<sup>252</sup> Vgl. Kruse et al. (2015).

Dabei ist  $x_i$  der entsprechende Messwert und  $\hat{x}_i$  die mithilfe des neuronalen Netzes berechnete Approximation. Um den berechneten Fehler einordnen zu können wird dieser mit dem quadratischen Mittelwert des Messfehlers  $RMSE_\sigma$  der gemessenen Daten verglichen, welcher sich berechnet zu

$$RMSE_\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (\sigma_{x,i})^2}. \quad 8.2$$

Dieser liegt für die mittlere arithmetische Rauheit bei  $RMSE_\sigma = 0.029\mu\text{m}$ . Sobald der Approximationsfehler geringer ist als der Messfehler, ist eine weitere Verbesserung des Modells mit den vorhandenen Messdaten nicht möglich, da die Approximationsergebnisse im Rahmen der Messunsicherheit liegen.



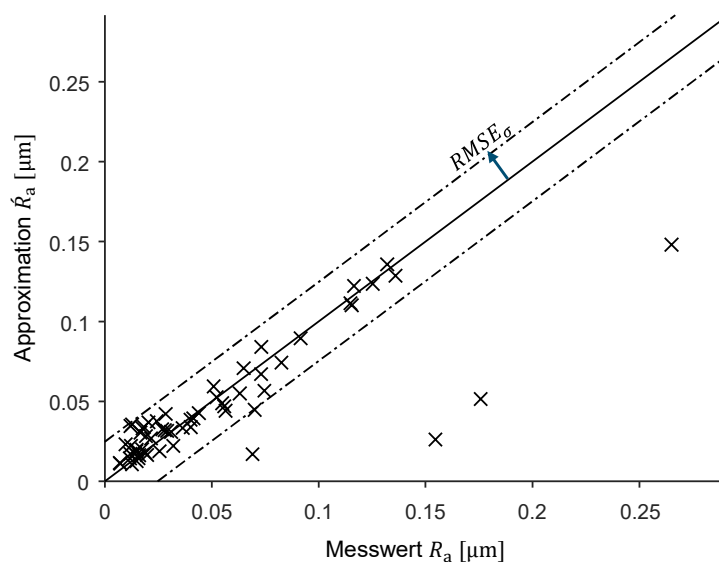
**Abbildung 8-10:** Aufbau des künstlichen neuronalen Netzes (vereinfacht).

Zum Training des neuronalen Netzes werden die Daten von 15 der 16 durchgeführten Versuche genutzt. Der verbleibende Datensatz wird zur Validierung verwendet. Die Validierung erfolgt mit den Versuchsdaten von V09. Im Rahmen dieser Untersuchung wird Versuch V09 als Validierungsversuch verwendet. Das Training des neuronalen Netzes wird mithilfe der MATLAB-Funktion `trainNetwork`<sup>253</sup> durchgeführt.

<sup>253</sup> Mathworks (2016).

### 8.3.2 Ergebnisse

Mithilfe der vorab beschriebenen Trainingsdaten wird das KNN trainiert. Die Anzahl der eingehenden Features wird in Reihenfolge der in Abschnitt 8.2.4 beschriebenen Gewichtung iterativ erhöht und der Approximationsfehler des trainierten Netzes bewertet. Das Netz, das den geringsten Approximationsfehler in den Trainings- und Validierungsdaten erzielt hat, wird aus den ersten 13 Features aufgebaut. In Anhang A10 befinden sich die Parameter dieses trainierten neuronalen Netzes. Das Ergebnis des trainierten Netzes ist in Abbildung 8-11 zu sehen. Darin sind die gemessenen Werte der Trainingsdaten der mittleren arithmetischen Rauheit entlang der Abszisse aufgetragen und deren Approximation mithilfe des KNN entlang der Ordinate. Zudem ist als durchgezogene Linie die Ideallinie dargestellt, bei welcher der berechnete Wert dem Messwert entspricht. Als Strichpunktlinie sind zudem die Schranken des quadratischen Mittelwertes des Messfehlers aufgetragen. Es ist erkennbar, dass bis auf vier Punkte alle Punkte innerhalb dieser Schranken liegen und daher das KNN diese Punkte mit einer vergleichbaren Genauigkeit abbildet. Vier Punkte liegen außerhalb dieser Schranken. Bei diesen Punkten handelt es sich um die Messungen des Versuchs V05 nach den entsprechenden Schädigungsperioden. Dieser Versuch zeigt in den vorherigen Untersuchungen ebenfalls Ergebnisse, die sich deutlich von den übrigen Ergebnissen unterscheiden, weswegen deren Verhalten an dieser Stelle nicht weiter berücksichtigt wird. Die Korrelation zwischen den gemessenen und approximierten Werten liegt bei  $r = 0.89$ , was einer starken Korrelation entspricht. Die Wurzel des mittleren Fehlerquadrates liegt bei  $RMSE = 0.009\mu\text{m}$  und somit im Rahmen der Messgenauigkeit.

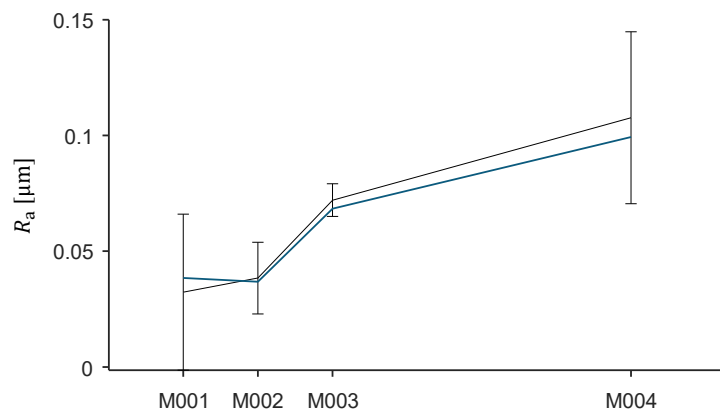


**Abbildung 8-11:** Gemessene und approximierte Werte der mittleren arithmetischen Rauheit, Ideallinie und quadratischer Mittelwert des Messfehlers.



---

Als nächstes wird das Modell mithilfe der Daten des Versuchs V09 validiert<sup>254</sup>. In Abbildung 8-12 ist die gemessene und berechnete Rauheit nach allen Schädigungsperioden aufgetragen. Es ist erkennbar, dass auch für den Validierungsdatensatz das KNN die Schädigung mit einer Genauigkeit berechnet, die im Rahmen der Messunsicherheit liegt. Die Wurzel des mittleren Fehlerquadrates liegt für Versuch V09 bei  $RMSE = 0.005\mu\text{m}$  und somit unterhalb von  $RMSE_{\sigma}$ . Damit ist gezeigt, dass das KNN in der Lage ist, aus Features der Vibrationsmessdaten die mittlere arithmetische Rauheit vorherzusagen, wodurch das damit entwickelte Modell validiert ist.



**Abbildung 8-12:** Mittlere arithmetische Rauheit in Versuch V09 nach allen Schädigungsperioden, gemessen (schwarz) und berechnet (blau).

Nachdem gezeigt wurde, dass mithilfe des KNN eine Berechnung der mittleren Rauheit und damit die Quantifizierung der Schädigung möglich ist, kann das KNN genutzt werden, um die Änderung der Schädigung über den Versuchsverlauf zu interpolieren. Dazu ist in Abbildung 8-13 die mithilfe der Vibrationsmessdaten berechnete arithmetische Rauheit für die gesamten Schädigungsphasen von Versuch V09 dargestellt. Es ist erkennbar, dass der berechnete Rauheitsverlauf die gemessene Schädigung wiedergibt und innerhalb der Schädigungsperioden eine klare Tendenz aufweist. Zwischen den Schädigungsperioden (nach 6 Stunden bzw. nach 9 Stunden Schädigungsdauer) sind allerdings deutliche Unstetigkeiten zu erkennen. Diese hängen mit leichten Abweichungen im Montageprozess im Rahmen der Versuchsdurchführung zusammen. Das KNN kann diese nicht von einem Anstieg der Schädigung differenzieren, da es nicht darauf trainiert wurde. Der Peak nach 6 Stunden ist zudem auf einen Fehler in der Montage zurückzuführen, bei dem die Klaue der elektrischen Kontaktierung falsch montiert wurde. Nachdem dieser Fehler behoben wurde, sinkt das Signal auf das bisherige Niveau ab. (vgl. Abschnitt 5.2). In den einzelnen

---

<sup>254</sup> Validiert im Sinne der Produktentwicklung nach Kirchner (2020) S.9.

Schädigungsperioden zeigt der Verlauf der berechneten Rauheit einen überwiegend monotonen Verlauf und das Rauschen liegt im Rahmen der Messungenauigkeit. Damit kann gezeigt werden, dass mit dem KNN eine Quantifizierung der elektrischen Lagerschädigung möglich ist.

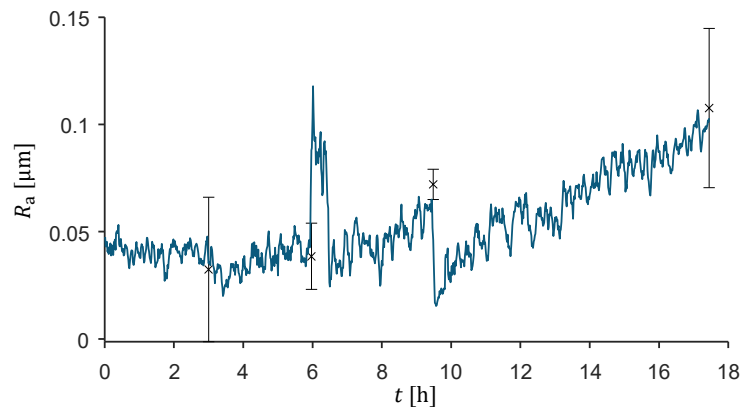


Abbildung 8-13: Mittlere arithmetischen Rauheit in Versuch V09 interpoliert.

## 8.4 Diskussion und Bewertung der Ergebnisse

Es wurden sowohl unterschiedliche Features aus dem Frequenz- und Zeitbereich verwendet, als auch Features, die aus einzelnen Frequenzbändern gebildet wurden. Dabei zeigt sich, dass die Feature der Frequenzbänder die betragsmäßig höchsten Korrelationen mit der elektrischen Lagerschädigung aufweisen. Auch bei der Bewertung mit dem *RreliefF*-Algorithmus bekommen diese Features die höchsten Bewertungen. Es ist erkennbar, dass sowohl die dimensionsbehaftete als auch die dimensionslose Untersuchung der Frequenz- und Ordnungsbänder nutzbare Features liefert. Ebenfalls bringt die Betrachtung der Features der Einhüllenden sowie des unbearbeiteten Signals zusätzliche Informationen, die bei der Entwicklung eines Modells zur Beschreibung elektrischer Lagerschäden genutzt werden können. Es erscheint insofern sinnvoll, zunächst alle Features zu berechnen und anschließend die am besten geeigneten Features zu selektieren und jene mit redundantem Informationsgehalt auszuschließen.

Es ist anzumerken, dass die Features im Rahmen dieser Arbeit mit einer großzügigen Korrelationsschranke von  $|r| \geq 0.8$  zusammengefasst wurden. Es besteht die Wahrscheinlichkeit, dass dadurch auch Feature zusammengefasst wurden, die jeweils noch zusätzliche Informationen zur Modellierung elektrischer Lagerschädigung beitragen können. Um solche Effekte unterscheiden zu können, bedarf es allerdings größerer Datensätze von elektrischen Oberflächenschäden mit den dazugehörigen Vibrationsmessdaten. Die Ergebnisse dieser Arbeit stellen einen Startpunkt für derartige Untersuchungen dar.

---

Für eine Erhöhung der Datenqualität und der Informationsdichte der berechneten Features sind folgende Untersuchungen notwendig. Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Frequenzspektrum in zehn äquidistante Frequenzbänder aufgeteilt. Es ist zu prüfen inwieweit die Verwendung nicht äquidistanter Aufteilungen (bspw. eine logarithmische Aufteilung) zu einer Verbesserung der berechneten Features führt. Auch eine Zusammenfassung oder weitere Aufteilung einzelner Frequenzbänder kann zusätzliche Informationen liefern. Insbesondere kann dies bei der dimensionslosen Betrachtung der Frequenzbänder der Vielfachen der Anregungsfrequenz sinnvoll sein. Da elektrische Riffelschäden ein periodisches Muster auf der Wälzlageroberfläche darstellen (vgl. Abbildung 1-1b), ist es sinnvoll, vor allem Effekte in den Vielfachen der Überrollfrequenz und damit auch der Anregungsfrequenz zu beobachten.

Im Anschluss an die Feature-Auswahl wurde gezeigt, dass mithilfe der Features, die überwiegend aus den Frequenzbändern berechnet werden, ein künstliches neuronales Netz (KNN) trainiert werden kann, das die elektrische Lagerschädigung nicht nur qualitativ klassifizieren, sondern auch quantifizieren kann. Die dabei erreichte Genauigkeit liegt in der Größenordnung der Streuung der gemessenen Lagerschädigung. Dadurch ist die dritte Forschungsfrage beantwortet.

Bei der Modellierung der Lagerschädigung zeigt sich jedoch, dass das Modell nicht robust gegen Abweichungen in der Montage der Prüfkammer oder gegen äußere Störeinflüsse (bspw. falsch angebrachte elektrische Kontaktierung) ist. Zunächst einmal liegt es daran, dass das neuronale Netz nicht darauf trainiert wurde solche Effekte zu differenzieren. Für die praktische Anwendung einer solchen Überwachung in der Elektromobilität ist eine derartige Differenzierung essenziell, da dort sowohl eine deutlich höhere Variation der Betriebszustände als auch verstärkte Störeinflüsse zu erwarten sind. Im beschriebenen Experiment konnte mit der Modellierung jedoch eine ausreichende Vorhersagegenauigkeit erzielt werden.

Weiterhin ist hinsichtlich der Modell- und der Dateneffizienz zu untersuchen, wie viele und welche Features für eine zuverlässige Modellierung notwendig sind. So ist zu prüfen, ob die ausschließliche Verwendung von axialen oder radialen Daten ebenso gute Ergebnisse liefern kann. Damit kann die Verwendung eines einzelnen Beschleunigungssensors zur Zustandsüberwachung der elektrischen Lagerschädigung ausreichend sein. Auch die Wahl des Machine Learning Algorithmus, mit dem das Modell erstellt wird, sowie das Design des entsprechenden Modells kann zu einer Verbesserung der erhaltenen Approximation führen. Entsprechend ist es dann möglich, Algorithmen zur Featureauswahl zu verwenden, die für spezifische Machine Learning Methoden oder für spezifische Modelldesigns optimiert wurden.



---

## 9 Zusammenfassung & Ausblick

In diesem Kapitel sind die Ergebnisse der Arbeit nochmals verkürzt zusammengetragen. Abschließend werden die nächsten Schritte zur Entwicklung eines Beschreibungsmodells der elektrischen Wälzlagerschädigung auf Grundlage der in dieser Arbeit gewonnenen neuen Erkenntnisse aufgezeigt.

### 9.1 Zusammenfassung

Bezugnehmend auf den Titel dieser Arbeit wurde folgender Beitrag zur Beschreibung des Fortschrittes elektrischer Schädigung in Wälzlagern geliefert. Es wurde gezeigt, dass die elektrische Schädigung von Wälzlageroberflächen mithilfe von Oberflächeneigenschaften quantifiziert werden kann. Dazu wurden mithilfe einer Studie die Schädigung von Wälzlageroberflächen komparativ bewertet und anschließend darauf aufbauend Anforderungen an eine quantitative Bewertung abgeleitet. Von den 45 untersuchten Oberflächeneigenschaften konnten insgesamt 12 identifiziert werden, die zur quantitativen Beschreibung geeignet sind. Die für diese Oberflächeneigenschaften ermittelten Grenzwerte, ab denen eine Riffelbildung entstehen kann, wurden mit aus der Literatur bekannten Werten plausibilisiert.

Es wurde zudem gezeigt, dass anhand dieser Oberflächeneigenschaften eine Beschreibung der zeitlichen Änderung der elektrischen Lagerschädigung möglich ist. Es ist zudem möglich, den Effekt der elektrischen und mechanischen Betriebsgrößen auf die zeitliche Änderung der Schädigungsrate zu untersuchen. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass mit zunehmender Schmierfilmdicke eine Zunahme der Schädigungsrate einhergeht. Mithilfe der im Rahmen dieser Arbeit identifizierten Streuung der elektrischen Schädigung lassen sich weitere Versuchsreihen planen, die eine präzisere Modellierung ermöglichen.

Darüber hinaus wurde gezeigt, dass die elektrische Lagerschädigung mithilfe von Vibrationsmessdaten in-situ gemessen werden kann. Dafür wurde mithilfe von Features, die aus den Frequenzbändern der Vibrationsmessung abgeleitet wurden, ein künstliches neuronales Netz trainiert, welches nicht nur eine Klassifikation der Lagerschäden, sondern auch eine Regression und damit eine quantitative Beschreibung des Lagerzustandes ermöglicht. Damit konnte gezeigt werden, dass die entwickelte Quantifizierung elektrischer Lagerschäden praktisch angewendet werden kann.

Zudem sind die im Rahmen dieser Arbeit erhobenen Versuchsdaten alle veröffentlicht, stehen der wissenschaftlichen Gemeinschaft für weitere Auswertungen zur Verfügung und stellen somit für sich genommen einen Beitrag zur Beschreibung des Fortschrittes elektrischer Schädigung in Wälzlagern dar.

---

## 9.2 Ausblick

Der in dieser Arbeit erzielte Erkenntniszuwachs hat die Perspektive auf die Beschreibung elektrischer Lagerschädigung verändert und eröffnet neue Anknüpfungspunkte für künftige Forschungsvorhaben.

Aus den in Kapitel 6 identifizierten zwölf Oberflächeneigenschaften muss eine Eigenschaft ausgewählt werden, die als Skala zur Beschreibung elektrischer Schädigung genutzt wird. Mögliche zusätzliche Bewertungskriterien sind unter anderem der Aufwand, mit dem die bewertete Eigenschaft erhoben wird, die Robustheit der Messung dieser Eigenschaft oder wie gut sich diese mit den Mitteln der Zustandsüberwachung erfassen lässt. Nachdem die am besten geeignete Eigenschaft als nutzbare Schädigungsskala identifiziert wird, muss ein Limit der elektrischen Schädigung anhand dieser Skala definiert werden. Dazu können die in Tabelle 6-4 definierten Grenzwerte verwendet werden. Allerdings zeigte der Abgleich der definierten Werte mit Messungen aus der Literatur, dass die Grenzwerte konservativ sind. Eine strikte Verwendung dieser Grenzwerte lässt somit potenzielle Lebensdauer der Lager ungenutzt. Im Sinne einer effizienten Nutzung der Lager erscheint es zielführend, die Definition des Grenzwertes für kritische elektrische Lagerschädigung anzupassen. Eine praktikable Definition könnte anhand der Vibrationskennwerte aus DIN ISO 20816-1<sup>255</sup> abgeleitet werden. Allerdings bringt eine solche Definition nur einen Mehrwert, wenn die Randbedingungen, bei denen aus den Vibrationskennwerten ein Schädigungsgrenzwert abgeleitet wird, bekannt sind und in einem praktisch relevanten Bereich liegen. Die Prüfanordnung, der Lagertyp und Lagergröße sowie die Einsatzbedingungen, bei denen die Schädigungswerte gemessen werden, müssen so gewählt werden, dass eine Übertragung der Ergebnisse auf reale Einsatzszenarien, bspw. im Kontext der Elektromobilität, möglich ist.

In Kapitel 7 konnte unter anderem die Streuung der Änderungsrate der elektrischen Lagerschädigung ermittelt werden. Damit lassen sich in Zukunft Versuchspläne entwickeln, die den Effekt unterschiedlicher Parameter auf die Schädigungsrate untersuchen. In Abhängigkeit der untersuchten Effektstärken und der benötigten Konfidenz der geforderten Aussagen kann die Anzahl an Versuchswiederholungen angepasst werden. So ist es zunächst möglich, zur Erhöhung der Konfidenz der in dieser Arbeit identifizierten Effekte die gezeigten Versuchsreihen zu wiederholen. Darauffolgend ist die Ergänzung zusätzlicher Faktorstufen als Zwischenstufen oder als Erweiterung des Faktorraums möglich. Insbesondere der Zusammenhang zwischen Schädigungsrate und Schmierfilmdicke sollte näher untersucht werden, indem letztere durch zusätzliche Faktorstufen der Drehzahl genauer aufgelöst wird. Die Erweiterung des Versuchsplans um weitere Faktoren, die bisher als

---

<sup>255</sup> DIN ISO 20816-1 (2017) S.38.

---

konstante Parameter im Versuchsplan abgebildet sind, ist ebenfalls eine logische Fortsetzung dieser Arbeit. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Lagerformen und Lagergrößen sowie auf unterschiedliche Schmierstoffzusammensetzungen ist für die ganzheitliche Beschreibung des elektrischen Schädigungsfortschritts notwendig.

Ein weiterer Aspekt, der zusätzlicher Untersuchungen bedarf, ist die Schädigungsrate selbst. Für die durchgeführten Untersuchungen ist die Approximation der zeitlichen Änderung der Schädigung als konstanter Wert zunächst ausreichend. Allerdings deuten Ergebnisse in der Literatur an, dass diese Annahme nicht allgemeingültig ist und somit weiterer Untersuchungen bedarf. Zudem ist das Verhalten der elektrischen Schädigung bei Lastkollektiven zu untersuchen. Mögliche Fragestellungen diesbezüglich sind, inwieweit die Schädigungsanteile der einzelnen Lasten aufsummiert werden dürfen oder ob die Reihenfolge unterschiedlicher Lasten die Gesamtschädigung beeinflusst.

Um solche Effekte zu untersuchen, bedarf es einer Zustandsüberwachung, die den Schädigungszustand des Lagers im Betrieb möglichst gut vorhersagen kann. In Kapitel 8 wurde gezeigt, dass es möglich ist, ein künstliches neuronales Netz zu trainieren, um die elektrische Lagerschädigung bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen identifizieren zu können. Darauf aufbauend muss untersucht werden, welche Features in Kombination mit welchen Algorithmen eine effektive und effiziente Bestimmung des Schädigungszustands ermöglichen.

Mit der Beantwortung der Forschungsfragen sowie der darauf aufbauenden Anregung neuer Forschungsfragen ist diese Arbeit abgeschlossen.

---

## Anhang

### A1 Charakteristische Kenngrößen (Features) im Zeitbereich

Im Folgenden werden die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Features im Zeitbereich tabellarisch aufgelistet. Dabei wird deren Bezeichnung sowie deren Berechnung angegeben, sowie die Quelle, welcher diese entnommen wurden. Die Zusammenfassung aller Features ist der Arbeit von Shatri<sup>256</sup> entnommen.

Kennwert	Gleichung	Quelle
Arithmetisches Mittel	$T_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$	Lei (2017)
Effektivwert (RMS)	$T_2 = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2}$	Lei (2017)
Größter Ausschlag	$T_3 = \max( x )$	Grover und Turk (2020)
Quadrat des Mittelwertes der Wurzel (SRM)	$T_4 = \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{ x_i } \right)^2$	Lei (2017)
Spannweite (peak to peak)	$T_5 = \max(x) - \min(x)$	Grover und Turk (2020)
Standardabweichung	$T_6 = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - T_1)^2}$	Lei (2017)
Schiefe	$T_7 = \frac{1}{N \cdot T_6^3} \sum_{i=1}^N (x_i - T_1)^3$	Lei (2017)
Kurtosis	$T_8 = \frac{1}{N \cdot T_6^4} \sum_{i=1}^N (x_i - T_1)^4$	Lei (2017)
Verhältnis Maximalwert zu Effektivwert (Crest Factor)	$T_9 = \frac{T_3}{T_2}$	Lei (2017)

---

<sup>256</sup> Shatri (2022) S.13-16



Kennwert	Gleichung	Quelle
Verhältnis Effektivwert zu mittlerem Absolutwert (	$T_{10} = \frac{T_2}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N  x_i }$	Lei (2017)
Verhältnis Maximalwert zu mittlerem Absolutwert	$T_{11} = \frac{T_3}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N  x_i }$	Lei (2017)
(Clearance Factor)	$T_{12} = \frac{T_3}{T_4}$	Lei (2017)
(Skewness Factor)	$T_{13} = \frac{T_7}{T_2^3}$	Grover und Turk (2020)
(Kurtosis Factor)	$T_{14} = \frac{T_8}{T_2^4}$	Grover und Turk (2020)
Geometrischer Mittelwert	$T_{15} = \left( \prod_{i=1}^N x_i \right)^{\frac{1}{N}}$	Grover und Turk (2020)
Effektivwert des Betrages	$T_{16} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N  x_i ^2}$	Grover und Turk (2020)
Mittlere absolute Abweichung vom Mittelwert	$T_{17} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N  x_i - T_1 $	Grover und Turk (2020)
Median der absoluten Abweichung vom Median	$T_{18} = \text{median}( x - \text{median}(x) )$ (Definition Median siehe Gleichung 4.2)	Grover und Turk (2020)
Verhältnis Anzahl Nulldurchgänge zu Anzahl der Punkte	$T_{19} = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^{N-1} \left  \frac{\Delta(\text{sgn}(x))_i}{\Delta x} \right $	Grover und Turk (2020)
Entropie	$T_{20} = - \sum_{i=1}^N h(x_i) \cdot \log_2 h(x_i)$	Grover und Turk (2020)
Energie	$T_{21} = \sum_{i=1}^N x_i^2$	Grover und Turk (2020)

Kennwert	Gleichung	Quelle
Varianz	$T_{22} = T_6^2$	Saucedo-Dorantes et al. (2021)
Mobilität	$T_{23} = \frac{\text{Standardabweichung} \left( \frac{\Delta x}{\Delta t} \right)}{T_6}$ (Definition Standardabweichung vgl. Gleichung 4.7)	Grover und Turk (2020)
Komplexität	$T_{24} = \frac{\text{Mobilität} \left( \frac{\Delta x}{\Delta t} \right)}{T_{23}}$ (Definition Mobilität vgl. $T_{23}$ )	Grover und Turk (2020)
Minimalwert	$T_{25} = \min( x )$	Tom (2015)
Fünfte Moment	$T_{26} = \frac{1}{N \cdot T_6^5} \sum_{i=1}^N (x_i - T_1)^5$	Saucedo-Dorantes et al. (2021)
Sechste Moment	$T_{27} = \frac{1}{N \cdot T_6^6} \sum_{i=1}^N (x_i - T_1)^6$	Saucedo-Dorantes et al. (2021)
Produkt RMS und Kurtosis	$T_{28} = T_2 \cdot T_8$	Jain und Bhosle (2021)
RMS Formfaktor	$T_{29} = \frac{T_2}{T_1}$	Saucedo-Dorantes et al. (2021)
SRM Formfaktor	$T_{30} = \frac{T_4}{T_1}$	Saucedo-Dorantes et al. (2021)
Latitüde Faktor	$T_{31} = \frac{T_3}{T_4}$	Saucedo-Dorantes et al. (2021)

Kennwert	Gleichung	Quelle
Normal negative Log. Wahrscheinlichkeit	$T_{32} = - \sum_{i=1}^N \log \left( \frac{1}{T_6 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x_i - T_1)^2}{2 \cdot T_{22}}} \right)$	Grover und Turk (2020)
Variationskoeffizient	$T_{33} = \frac{T_{22}}{T_1}$	Shatri (2022)
Inverser Variationskoeffizient	$T_{34} = \frac{T_1}{T_{22}}$	Shatri (2022)
Spitzenwert	$T_{35} = \frac{T_5}{2}$	Tom (2015)
Obere Schranke Histogramm	$T_{36} = \max(x) + \frac{T_5}{2 \cdot (N - 1)}$	Grover und Turk (2020)
Untere Schranke Histogramm	$T_{37} = \min(x) - \frac{T_5}{2 \cdot (N - 1)}$	Grover und Turk (2020)
Median	$T_{38} = \text{median}(x)$ (Definition Median siehe Gleichung 4.2)	Grover und Turk (2020)
k-Faktor	$T_{39} = T_{35} \cdot T_2$	Tom (2015)

## A2 Charakteristische Kenngrößen (Features) im Frequenzbereich

Im Folgenden werden die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Features im Frequenzbereich tabellarisch aufgelistet. Dabei wird deren Bezeichnung sowie deren Berechnung angegeben, sowie die Quelle, welcher diese entnommen wurden. Die Zusammenfassung aller Features ist der Arbeit von Shatri<sup>257</sup> entnommen.

Kennwert	Gleichung	Quelle
Arithmetisches Mittel	$F_1 = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M y_j$	Saucedo-Dorantes et al. (2021)
Varianz	$F_2 = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M (y_j - F_1)^2$	Saucedo-Dorantes et al. (2021)
Schiefe	$F_3 = \frac{1}{M \cdot F_2^{3/2}} \sum_{j=1}^M (y_j - F_1)^3$	Saucedo-Dorantes et al. (2021)
Kurtosis	$F_4 = \frac{1}{M \cdot F_2^{4/2}} \sum_{j=1}^M (y_j - F_1)^4$	Lei (2017)
Gewichtetes Mittel	$F_5 = \frac{1}{M \cdot F_1} \sum_{j=1}^M (f_j \cdot y_j)$	Saucedo-Dorantes et al. (2021)
Gewichtete Standardabweichung	$F_6 = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{j=1}^M (f_j - F_5)^2 \cdot y_j}$	Saucedo-Dorantes et al. (2021)
C Faktor	$F_7 = \sqrt{\frac{1}{M \cdot F_1} \sum_{j=1}^M (f_j^2 \cdot y_j)}$	Saucedo-Dorantes et al. (2021)
D Faktor	$F_8 = \sqrt{\frac{1}{M \cdot F_1 \cdot F_7^2} \sum_{j=1}^M (f_j^4 \cdot y_j)}$	Saucedo-Dorantes et al. (2021)

<sup>257</sup> Shatri (2022) S.17f

Kennwert	Gleichung	Quelle
E Faktor	$F_9 = \frac{(M \cdot F_1 \cdot F_7)^{3/2}}{F_8}$	Saucedo-Dorantes et al. (2021)
G Faktor	$F_{10} = \frac{F_6}{F_5}$	Saucedo-Dorantes et al. (2021)
Gewichtete Schiefe	$F_{11} = \frac{1}{M \cdot F_6^3} \sum_{j=1}^M (f_j - F_5)^3 \cdot y_j$	Saucedo-Dorantes et al. (2021)
Gewichtete Kurtosis	$F_{12} = \frac{1}{M \cdot F_6^4} \sum_{j=1}^M (f_j - F_5)^4 \cdot y_j$	Saucedo-Dorantes et al. (2021)
H Faktor	$F_{13} = \frac{1}{M \cdot \sqrt{F_6}} \sum_{j=1}^M \sqrt{f_j - F_5} \cdot y_j$	Saucedo-Dorantes et al. (2021)

### A3 Daten Axialrillenkugellager 51305

Im Folgenden ist die Geometrie sowie die Tragzahlen des Lagers 51305<sup>258</sup> der Schaeffler AG aufgeführt.

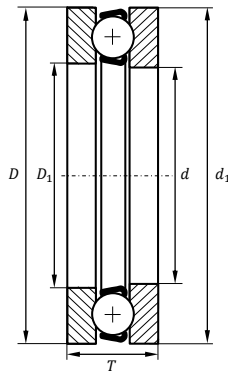


Abbildung 9-1: Schnittansicht des Axialrillenkugellagers 51305.

Kennwert	Variable	Wert
Innendurchmesser Wellenscheibe	$d$	25 mm
Außendurchmesser Gehäusescheibe	$D$	52 mm
Innendurchmesser Gehäusescheibe	$d_1$	27 mm
Außendurchmesser Wellenscheibe	$D_1$	52 mm
Höhe	$T$	18 mm
Statische Traglast	$C_0$	55 kN
Dynamische Traglast	$C$	34.5 kN
Anzahl Wälzkörper	$N_{WK}$	9
Wälzkörperdurchmesser	$D_{WK}$	10 mm

<sup>258</sup> Schaeffler Medias (2022).

---

#### A4 Daten FVA Versuchsöl Nr.3

Kennwert	Variable	Wert
Dichte (bei $\vartheta = 15^{\circ}\text{C}$ )	$\rho$	878 kg/m <sup>3</sup>
Kin. Viskosität (bei $\vartheta = 40^{\circ}\text{C}$ )	$\nu_{40}$	92 mm <sup>2</sup> /s
Kin. Viskosität (bei $\vartheta = 100^{\circ}\text{C}$ )	$\nu_{100}$	10.6 mm <sup>2</sup> /s

---

## A5 Definierte Oberflächeneigenschaften

Im Folgenden werden die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Kenngrößen der Oberflächencharakterisierung vorgestellt<sup>259</sup>.

### ***Größte Höhe des Profils***

Die Größte Höhe des Profils  $X_z$  beschreibt die Spannweite der Verteilung der Profilordinaten auf der Einzelmessstrecke.

### ***Gesamthöhe des Profils***

Die Gesamthöhe des Profils  $X_t$  beschreibt die Spannweite der Verteilung der Profilordinaten auf der Gesamtmessstrecke.

### ***Arithmetischer Mittelwert der Profilordinaten***

Die Oberflächeneigenschaft  $X_a$  beschreibt das arithmetische Mittel der Verteilung der Profilordinaten entlang einer Einzelmessstrecke.

### ***Quadratischer Mittelwert der Profilordinaten***

Die Oberflächeneigenschaft  $X_q$  beschreibt das quadratische Mittel der Verteilung der Profilordinaten entlang einer Einzelmessstrecke.

### ***Schiefe des Profils***

Die Oberflächeneigenschaft  $X_{sk}$  beschreibt die Schiefe der Verteilung der Profilordinaten entlang einer Einzelmessstrecke.

### ***Steilheit des Profils***

Die Oberflächeneigenschaft  $X_{ku}$  beschreibt die Kurtosis der Verteilung der Profilordinaten auf der Gesamtmessstrecke.

### ***Mittlere Rillenbreite der Profilelemente***

Die Oberflächeneigenschaft  $X_{sm}$  beschreibt das arithmetische Mittel der Breite einzelner Profilelemente entlang einer Einzelmessstrecke.

### ***Quadratischer Mittelwert der Profilsteigung***

Die Oberflächeneigenschaft  $X_{dq}$  beschreibt das quadratische Mittel der örtlichen Profilsteigungen entlang einer Einzelmessstrecke.

### ***Relativer Materialanteil des Profils***

Die Oberflächeneigenschaft  $X_{mr}(c)$  beschreibt die Summe der Materiallängen der Profilelemente bis zu einer Schnitthöhe  $c$  geteilt durch die Messstrecke.

---

<sup>259</sup> Nach DIN EN ISO 4287 (2010) S.12ff und DIN EN ISO 25178-2 (2012) S.12ff.



---

### ***Höhendifferenz zwischen zwei Schnittlinien***

Die Oberflächeneigenschaft  $X_{\delta c}$  beschreibt die Differenz der Schnitthöhen zweier vorgegebener Materialanteilstwerte. In dieser Arbeit wird die Höhendifferenz zwischen der 20% und der 80% Materialanteilstwerte berechnet.

### ***Kernhöhe***

Die Oberflächeneigenschaft  $S_k$  beschreibt die Breite des Kerns der Oberfläche. Der Kern der Oberfläche berechnet sich mit dem kleinsten Betrag des Gradienten der kumulierten Häufigkeitsverteilung oberhalb des Materialanteils von 40%.

### ***Reduzierte Spitzenhöhe***

Die Oberflächeneigenschaft  $S_{pk}$  ist die mittlere Höhe der Spitzen oberhalb des Profilkerns.

### ***Reduzierte Talhöhe***

Die Oberflächeneigenschaft  $S_{vk}$  ist die mittlere Höhe der Täler unterhalb des Profilkerns.

### ***Kernmaterialvolumen***

Die Oberflächeneigenschaft  $V_{mc}$  ist das integrierte Materialvolumen des Profilkerns.

### ***Spitzenmaterialvolumen***

Die Oberflächeneigenschaft  $V_{mp}$  ist das integrierte Materialvolumen der Profilsitzen.

### ***Materialvolumen***

Die Oberflächeneigenschaft  $V_m$  ist die Summe des Kern- und des Spitzenmaterialvolumens.

### ***Leeres Volumen des Kerns***

Die Oberflächeneigenschaft  $V_{mc}$  ist das freie Materialvolumen im Bereich des Profilkerns.

### ***Leeres Volumen der Täler***

Die Oberflächeneigenschaft  $V_{vv}$  ist das freie Materialvolumen im Bereich des Täler.

### ***Leeres Volumen***

Die Oberflächeneigenschaft  $V_v$  ist die Summe des freien Materialvolumens im Bereich des Profilkerns und des freien Materialvolumens im Bereich der Täler.

### ***Dichte der Hochpunkte***

Die Oberflächeneigenschaft  $S_{ds}$  beschreibt die Dichte der Hochpunkte einer Oberfläche.

## A6 Kennwerte des Axialrillenkugellagers 51305 im Betrieb

In der folgenden Tabelle werden Betriebsgrößen für die verwendeten Lager bei allen im Rahmen der Versuchsdurchführung verwendeten mechanischen Last und Drehzahlkombinationen aufgetragen.

Kennwert	Variable	Betriebsbedingungen			
		$F_{Ax} = 1000N$ $n = 500rpm$	$F_{Ax} = 3500N$ $n = 500rpm$	$F_{Ax} = 1000N$ $n = 2500rpm$	$F_{Ax} = 3500N$ $n = 2500rpm$
Nominelle Lebensdauer	$L_{10h}$	$1.49 \cdot 10^6$ h	$3.47 \cdot 10^4$ h	$2.98 \cdot 10^5$ h	$6.93 \cdot 10^3$ h
Wälzkörperlast	$Q$	111.1N	388.9N	111.1N	388.9N
Lastwinkel	$\beta$	90.0 °	90.0 °	89.7 °	89.9 °
HERTZ'SCHE Kontaktfläche	$A_{Hz,i}$	0.12 mm <sup>2</sup>	0.27 mm <sup>2</sup>	0.12 mm <sup>2</sup>	0.27 mm <sup>2</sup>
HERTZ'SCHE Flächenpressung	$\bar{p}_{Hz}$	$964 \frac{N}{mm^2}$	$1464 \frac{N}{mm^2}$	$964 \frac{N}{mm^2}$	$1464 \frac{N}{mm^2}$

## A7 Versuchsplan

Versuch	Axiallast $F_A$ [kN]	Drehzahl $n$ [rpm]	Spannung $U$ [V]	Frequenz $f$ [kHz]	Signalform [–]
V01	3.5	2500	5	20	Sinus
V02	1	2500	5	5	Sinus
V03	1	500	2.5	5	Sinus
V04	3.5	500	2.5	20	Sinus
V05	1	2500	5	20	Rechteck
V06	3.5	2500	5	5	Rechteck
V07	3.5	500	2.5	5	Rechteck
V08	1	500	2.5	20	Rechteck
V09	1	2500	2.5	5	Rechteck
V10	3.5	500	5	20	Rechteck
V11	1	500	5	20	Sinus
V12	1	500	5	5	Rechteck
V13	3.5	2500	2.5	20	Rechteck
V14	3.5	2500	2.5	5	Sinus
V15	1	2500	2.5	20	Sinus
V16	3.5	500	5	5	Sinus

## A8 Ergebnisse der Studie zur Bewertung der elektrischen Lagerschäden auf der Wälzlagerlaufbahnoberfläche

Versuchs- bezeichnung	Bewertung 1	Bewertung 2	Bewertung 3	Bewertung 4	Bewertung 5	Bewertung 6	Bewertung 7	Bewertung 8	$SK$	$q_{SK}$	$N_{Aus}$
V01WM001	2	2	2	2	1	1	2	2	2	0.5	5
V01WM002	1	1	2	2	1	2	1.5	1.5	1.5	1	60
V01WM003	2	1	1	1	1	1	1	1	1	0	18
V01WM004	4.5	4	4	4	4	4	4	3	4	0	56
V02M001	3.5	3	3	3	4	4.5	2	2.5	3	1	9
V02M002	4	4	4	4	4	4	4	3.5	4	0	57
V02M003	5	5	5	5	5	5	5	4	5	0	20
V02M004	5	5	4	4	4.5	5	4.5	4	4.5	1	38
V03WM001	0.5	1	1	1	2	1	1	0.5	1	0.25	50
V03WM002	1.5	1	1	1	1	3	1	1	1	0.25	11
V03WM003	2.5	6	3	5	6	6	5.5	1	5.25	3.25	28
V03WM004	2.5	6	2	2	5	4	1.5	1	2.25	2.75	35
V04M001	0.5	2	3	1	1	2	0.5	0.5	1	1.5	13
V04M002	1.5	3	3	4	5.5	6	1	0.5	3	3.5	51
V04M003	2.5	4	1	4	5	6	1	0.5	3.25	3.5	16
V04M004	1.5	3	3	4	3.5	3	2	1.5	3	1.5	58
V05M001	0.5	2	0	1	3	4	1	0	1	2.25	19
V05M002	0	2	0	1	0	2	1	0.5	0.75	1.5	4
V05M003	1	2	0	1	2	2	0.5	0	1	1.75	22
V05M004	0	2	0	1	2.5	4	0.5	0	0.75	2.25	59

Versuchs- bezeichnung	Bewertung 1	Bewertung 2	Bewertung 3	Bewertung 4	Bewertung 5	Bewertung 6	Bewertung 7	Bewertung 8	$SK$	$q_{SK}$	$N_{Aus}$
V06WM001	1	2	1	3	2	3	2	2.5	2	1.25	40
V06WM002	3	4	2	3	2	3	1	1.5	2.5	1.25	42
V06WM003	2	3	1	2	1	2	2	1.5	2	0.75	33
V06WM004	4	4	4	4	4	4	3.5	3	4	0.25	26
V07M001	0.5	3	2	2	3	2	1	1	2	1.5	53
V07M002	1.5	2	1	1	2	3	1	1.5	1.5	1	2
V07M003	1.5	3	1	2	2	3	1	1.5	1.75	1.25	47
V07M004	2	1	2	3	1	4	2	2.5	2	1.25	24
V08M001	1	2	1	1	0.5	2	0.5	1	1	0.75	10
V08M002	1	1	1	2	2	1	0.5	0.5	1	0.75	29
V08M003	1	3	2	2	4	6	2	1	2	2	54
V08M004	1.5	2	2	1	2	1	1	1.5	1.5	1	36
V09M001	1	2	2	1	1.5	3.5	2	1.5	1.75	0.75	49
V09M002	2	2	3	1.5	1.5	3	2.5	2.5	2.25	1	34
V09M003	2	3	3	4	1	3.5	3	3	3	0.75	61
V09M004	4.5	5	4	4	4.5	5	4	4.5	4.5	0.75	31
V10M001	1	1	1	2	1	1	1	2	1	0.5	1
V10M002	2.5	3	2	2	2	2	1	1	2	0.75	25
V10M003	1.5	2	1	2	2	3	1	1	1.75	1	48
V10M004	3	1	1	3	1	2	2.5	1	1.5	1.75	23
V11M001	1	4	2	1	2	2	2	2	2	0.5	37
V11M002	1	2	2	1	2	3	1	1.5	1.75	1	55

Versuchs- bezeichnung	Bewertung 1	Bewertung 2	Bewertung 3	Bewertung 4	Bewertung 5	Bewertung 6	Bewertung 7	Bewertung 8	$SK$	$Q_{SK}$	$N_{Aus}$
V11M003	1	3	1	2	3	1	0.5	1	1	1.5	8
V11M004	1.5	3	1	1	1	1	1	1	1	0.25	14
V12M001	2.5	2	3	3	1	3.5	2	2.5	2.5	1	64
V12M002	3	3	2	2	3	4	2.5	2	2.75	1	12
V12M003	3.5	4	3	4	1	3	2	3	3	1.25	21
V12M004	4	4	4	3	3	4	3	2.5	3.5	1	15
V13M001	0	2	0	1	3	0	0.5	1	0.75	1.5	6
V13M002	2	2	2	3	1	3	1	1	2	1.5	43
V13M003	1.5	2	1	2	2	3	0.5	1	1.75	1	17
V13M004	1.5	1	2	2	1	3	1	2	1.75	1	63
V14M001	1	1	1	1	1	2	0.5	0.5	1	0.25	62
V14M002	1	1	1	3	1	3	1	1	1	1	27
V14M003	1	2	1	2	2	2	1.5	1	1.75	1	52
V14M004	2.5	3	3	3	2	3.5	2	2	2.75	1	44
V15M001	0.5	1	1	1	0.5	0.5	0.5	1	0.75	0.5	41
V15M002	0.5	1	1	1	1	0.5	1	1	1	0.25	3
V15M003	1	3	2	3	1	2	3	2	2	1.5	32
V15M004	1	2	2	2	1	3	2.5	2	2	0.75	45
V16M001	1.5	3	1	2	4	4	1	1.5	1.75	2.25	7
V16M002	1	2	1	3	1	3	1	2	1.5	1.5	39
V16M003	2.5	2	2	2	1	4	3	2.5	2.25	0.75	46
V16M004	3.5	5	2	3	1	4	3	3	3	1.25	30

---

## A9 Unabhängige Features

### *Features im Zeitbereich*

Nr.	Feature	Nr.	Feature	Nr.	Feature	Nr.	Feature	Nr.	Feature
1	$T_{1,ax}$	3	$T_{9,ax}$	5	$T_{38,ax}$	7	$T_{7,rad}$	9	$T_{26,rad}$
2	$T_{7,ax}$	4	$T_{26,ax}$	6	$T_{1,rad}$	8	$T_{9,rad}$		

### *Features im Frequenzspektrum*

Nr.	Feature	Nr.	Feature	Nr.	Feature	Nr.	Feature	Nr.	Feature
1	$F_{5,env,ax}$	4	$\tilde{F}_{5,ax}$	7	$\tilde{F}_{3,env,ax}$	10	$F_{3,env,rad}$	13	$\tilde{F}_{3,rad}$
2	$F_{9,env,ax}$	5	$\tilde{F}_{8,ax}$	8	$F_{1,rad}$	11	$F_{8,env,rad}$	14	$\tilde{F}_{8,rad}$
3	$\tilde{F}_{3,ax}$	6	$\tilde{F}_{1,env,ax}$	9	$F_{3,rad}$	12	$F_{9,env,rad}$	15	$\tilde{F}_{1,env,rad}$

### Features in den Frequenzbändern - axial

Nr.	Feature	Nr.	Feature	Nr.	Feature	Nr.	Feature	Nr.	Feature
1	$F_{1,FB1,ax}$	19	$F_{9,FB8,ax}$	37	$F_{9,env,FB7,ax}$	55	$\tilde{F}_{11,FB4,ax}$	73	$\tilde{F}_{5,env,FB1,ax}$
2	$F_{3,FB1,ax}$	20	$F_{11,FB8,ax}$	38	$F_{9,env,FB8,ax}$	56	$\tilde{F}_{1,FB5,ax}$	74	$\tilde{F}_{8,env,FB1,ax}$
3	$F_{3,FB2,ax}$	21	$F_{5,FB9,ax}$	39	$F_{11,env,FB8,ax}$	57	$\tilde{F}_{3,FB5,ax}$	75	$\tilde{F}_{3,env,FB2,ax}$
4	$F_{5,FB2,ax}$	22	$F_{9,FB9,ax}$	40	$F_{3,env,FB9,ax}$	58	$\tilde{F}_{5,FB5,ax}$	76	$\tilde{F}_{3,env,FB3,ax}$
5	$F_{5,FB3,ax}$	23	$F_{11,FB9,ax}$	41	$F_{9,env,FB9,ax}$	59	$\tilde{F}_{9,FB5,ax}$	77	$\tilde{F}_{9,env,FB4,ax}$
6	$F_{9,FB3,ax}$	24	$F_{5,FB10,ax}$	42	$F_{3,env,FB10,ax}$	60	$\tilde{F}_{1,FB6,ax}$	78	$\tilde{F}_{3,env,FB5,ax}$
7	$F_{5,FB4,ax}$	25	$F_{9,FB10,ax}$	43	$F_{9,env,FB10,ax}$	61	$\tilde{F}_{5,FB6,ax}$	79	$\tilde{F}_{9,env,FB5,ax}$
8	$F_{9,FB4,ax}$	26	$F_{8,env,FB1,ax}$	44	$\tilde{F}_{3,FB1,ax}$	62	$\tilde{F}_{9,FB6,ax}$	80	$\tilde{F}_{9,env,FB6,ax}$
9	$F_{11,FB4,ax}$	27	$F_{3,env,FB2,ax}$	45	$\tilde{F}_{8,FB1,ax}$	63	$\tilde{F}_{3,FB7,ax}$	81	$\tilde{F}_{11,env,FB6,ax}$
10	$F_{3,FB5,ax}$	28	$F_{5,env,FB2,ax}$	46	$\tilde{F}_{11,FB1,ax}$	64	$\tilde{F}_{5,FB7,ax}$	82	$\tilde{F}_{3,env,FB7,ax}$
11	$F_{5,FB5,ax}$	29	$F_{3,env,FB3,ax}$	47	$\tilde{F}_{1,FB2,ax}$	65	$\tilde{F}_{9,FB7,ax}$	83	$\tilde{F}_{11,env,FB8,ax}$
12	$F_{9,FB5,ax}$	30	$F_{5,env,FB3,ax}$	48	$\tilde{F}_{3,FB2,ax}$	66	$\tilde{F}_{11,FB8,ax}$	84	$\tilde{F}_{3,env,FB10,ax}$
13	$F_{3,FB6,ax}$	31	$F_{9,env,FB3,ax}$	49	$\tilde{F}_{9,FB2,ax}$	67	$\tilde{F}_{1,FB9,ax}$	85	$\tilde{F}_{5,env,FB10,ax}$
14	$F_{5,FB6,ax}$	32	$F_{3,env,FB4,ax}$	50	$\tilde{F}_{3,FB3,ax}$	68	$\tilde{F}_{3,FB9,ax}$	86	$\tilde{F}_{9,env,FB10,ax}$
15	$F_{9,FB6,ax}$	33	$F_{9,env,FB5,ax}$	51	$\tilde{F}_{5,FB3,ax}$	69	$\tilde{F}_{5,FB9,ax}$		
16	$F_{11,FB6,ax}$	34	$F_{9,env,FB6,ax}$	52	$\tilde{F}_{9,FB3,ax}$	70	$\tilde{F}_{9,FB9,ax}$		
17	$F_{3,FB7,ax}$	35	$F_{3,env,FB7,ax}$	53	$\tilde{F}_{3,FB4,ax}$	71	$\tilde{F}_{5,FB10,ax}$		
18	$F_{11,FB7,ax}$	36	$F_{5,env,FB7,ax}$	54	$\tilde{F}_{5,FB4,ax}$	72	$\tilde{F}_{9,FB10,ax}$		



### Features in den Frequenzbändern - radial

Nr.	Feature	Nr.	Feature	Nr.	Feature	Nr.	Feature	Nr.	Feature
1	$F_{5,FB1,rad}$	19	$F_{9,FB7,rad}$	37	$F_{9,env,FB8,rad}$	55	$\tilde{F}_{3,FB6,rad}$	73	$\tilde{F}_{9,env,FB5,rad}$
2	$F_{8,FB1,rad}$	20	$F_{3,FB8,rad}$	38	$F_{11,env,FB8,rad}$	56	$\tilde{F}_{5,FB6,rad}$	74	$\tilde{F}_{9,env,FB6,rad}$
3	$F_{1,FB2,rad}$	21	$F_{5,FB8,rad}$	39	$F_{3,env,FB9,rad}$	57	$\tilde{F}_{9,FB6,rad}$	75	$\tilde{F}_{11,env,FB6,rad}$
4	$F_{5,FB2,rad}$	22	$F_{9,FB8,rad}$	40	$F_{9,env,FB9,rad}$	58	$\tilde{F}_{3,FB7,rad}$	76	$\tilde{F}_{3,env,FB7,rad}$
5	$F_{3,FB3,rad}$	23	$F_{5,FB9,rad}$	41	$F_{3,env,FB10,rad}$	59	$\tilde{F}_{5,FB7,rad}$	77	$\tilde{F}_{5,env,FB7,rad}$
6	$F_{5,FB3,rad}$	24	$F_{9,FB9,rad}$	42	$F_{9,env,FB10,rad}$	60	$\tilde{F}_{9,FB7,rad}$	78	$\tilde{F}_{9,env,FB7,rad}$
7	$F_{11,FB3,rad}$	25	$F_{3,FB10,rad}$	43	$\tilde{F}_{8,FB1,rad}$	61	$\tilde{F}_{3,FB8,rad}$	79	$\tilde{F}_{3,env,FB8,rad}$
8	$F_{3,FB4,rad}$	26	$F_{5,FB10,rad}$	44	$\tilde{F}_{1,FB2,rad}$	62	$\tilde{F}_{5,FB8,rad}$	80	$\tilde{F}_{5,env,FB8,rad}$
9	$F_{9,FB4,rad}$	27	$F_{9,FB10,rad}$	45	$\tilde{F}_{3,FB2,rad}$	63	$\tilde{F}_{9,FB8,rad}$	81	$\tilde{F}_{9,env,FB8,rad}$
10	$F_{11,FB4,rad}$	28	$F_{3,env,FB2,rad}$	46	$\tilde{F}_{9,FB2,rad}$	64	$\tilde{F}_{11,FB8,rad}$	82	$\tilde{F}_{5,env,FB9,rad}$
11	$F_{3,FB5,rad}$	29	$F_{3,env,FB3,rad}$	47	$\tilde{F}_{3,FB3,rad}$	65	$\tilde{F}_{3,FB9,rad}$	83	$\tilde{F}_{9,env,FB9,rad}$
12	$F_{5,FB5,rad}$	30	$F_{3,env,FB5,rad}$	48	$\tilde{F}_{5,FB3,rad}$	66	$\tilde{F}_{5,FB9,rad}$	84	$\tilde{F}_{11,env,FB9,rad}$
13	$F_{9,FB5,rad}$	31	$F_{9,env,FB5,rad}$	49	$\tilde{F}_{9,FB3,rad}$	67	$\tilde{F}_{9,FB9,rad}$	85	$\tilde{F}_{3,env,FB10,rad}$
14	$F_{11,FB5,rad}$	32	$F_{3,env,FB6,rad}$	50	$\tilde{F}_{11,FB3,rad}$	68	$\tilde{F}_{5,FB10,rad}$	86	$\tilde{F}_{5,env,FB10,rad}$
15	$F_{3,FB6,rad}$	33	$F_{9,env,FB6,rad}$	51	$\tilde{F}_{11,FB4,rad}$	69	$\tilde{F}_{9,FB10,rad}$	87	$\tilde{F}_{9,env,FB10,rad}$
16	$F_{5,FB6,rad}$	34	$F_{3,env,FB7,rad}$	52	$\tilde{F}_{3,FB5,rad}$	70	$\tilde{F}_{11,env,FB2,rad}$		
17	$F_{9,FB6,rad}$	35	$F_{9,env,FB7,rad}$	53	$\tilde{F}_{5,FB5,rad}$	71	$\tilde{F}_{3,env,FB3,rad}$		
18	$F_{5,FB7,rad}$	36	$F_{5,env,FB8,rad}$	54	$\tilde{F}_{9,FB5,rad}$	72	$\tilde{F}_{9,env,FB4,rad}$		

## A10 Trainiertes Künstliches Neuronales Netz

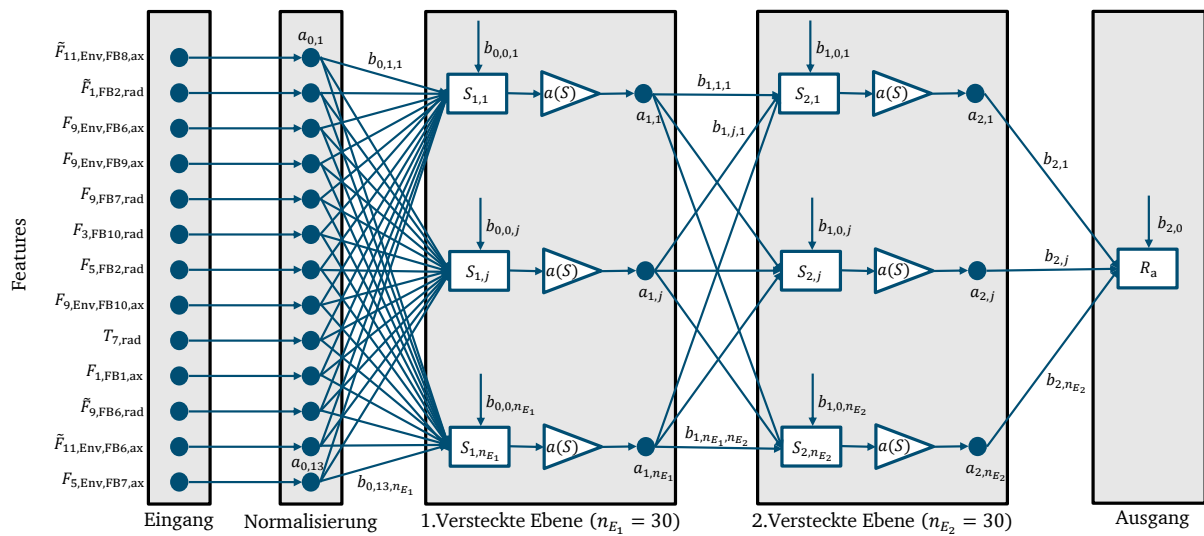


Abbildung 9-2: Detaillierter Aufbau des künstlichen neuronalen Netzes.

Die Normierung der Features erfolgt mit folgender Gleichung

$$a_{0,i} = \frac{F_i - \bar{F}_i}{\sigma_{F_i}}. \quad 9.1$$

Feature	$\bar{F}_i$	$\sigma_{F_i}$	Feature	$\bar{F}_i$	$\sigma_{F_i}$
$\tilde{F}_{11, \text{Env,FB8,ax}}$	127,9447	116,8397	$F_{9, \text{Env,FB10,ax}}$	0,9982	$2,80 \cdot 10^{-5}$
$\tilde{F}_{1, \text{FB2,rad}}$	$3,27 \cdot 10^{-4}$	$1,20 \cdot 10^{-4}$	$T_{7, \text{rad}}$	0,0255	0,2081
$F_{9, \text{Env,FB6,ax}}$	0,9948	$1,36 \cdot 10^{-4}$	$F_{1, \text{FB1,ax}}$	$4,56 \cdot 10^{-4}$	$2,28 \cdot 10^{-4}$
$F_{9, \text{Env,FB9,ax}}$	0,9977	$3,84 \cdot 10^{-5}$	$\tilde{F}_{9, \text{FB6,rad}}$	0,9948	$5,45 \cdot 10^{-4}$
$F_{9, \text{FB7,rad}}$	0,9963	$1,45 \cdot 10^{-4}$	$\tilde{F}_{11, \text{Env,FB6,ax}}$	-0,8968	59,3103
$F_{3, \text{FB10,rad}}$	1,1646	0,8174	$F_{5, \text{Env,FB7,ax}}$	$3,24 \cdot 10^3$	11,2525
$F_{5, \text{FB2,rad}}$	768,4447	21,6014			

$$S_{k,j} = \sum_{i=0}^{n_k} a_{k,i} \cdot b_{k,i,j}, \quad 9.2$$

mit  $a_{k,0} = 1$ .

$b_{0,i,j}$	$i = 0$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
j = 1	7,67E-08	-0,2699	0,5949	-0,0593	-0,0215	-0,4949	-0,3079	1,0484	-0,3522	0,3102	1,2860	-1,0480	-0,3841	-0,1978
2	7,91E-08	-0,5569	0,0005	-0,5214	-0,2019	0,9656	0,3576	-0,0370	0,5207	-0,0375	-0,2250	-0,1396	-0,2444	-0,0300
3	1,27E-08	0,4014	0,7365	-0,0227	0,1936	1,2948	1,2612	-0,6818	0,6806	-0,4870	-0,2554	0,2023	-0,3351	-0,2025
4	-1,17E-07	-1,3674	0,7458	-0,6282	-0,8398	0,6259	0,6917	2,0896	-1,1209	1,1830	2,0490	-0,4997	-0,9760	0,2115
5	-5,53E-08	-0,5456	-0,6061	-1,1345	0,8481	0,5643	-1,5996	-1,0903	0,0571	0,9909	-0,4596	-0,3616	0,3666	-0,7784
6	4,81E-09	-0,5855	-0,5088	0,0212	0,1908	-0,2154	-0,6230	0,1135	-0,4977	0,3810	-0,4621	-0,3718	0,1346	0,1520
7	1,02E-07	-1,3058	0,1476	0,0079	0,8690	-0,8897	-0,5430	-0,2247	0,7536	-0,0081	-0,0750	0,6824	0,5588	0,4983
8	5,25E-08	0,2845	-0,3261	0,5817	0,1957	-0,4579	-0,4487	-0,1172	0,9637	-0,0145	-0,2634	0,9008	0,7298	-0,1615
9	-6,66E-08	0,5894	0,3241	0,9696	-0,0346	0,2021	-0,6335	-0,4540	0,3229	-0,1882	-0,3556	-0,1093	-0,2340	0,1162
10	-6,93E-08	0,0445	0,0138	-0,3761	0,8123	-0,4804	-0,4741	0,8276	0,3855	-0,8182	0,5032	-0,0323	1,5646	-0,3024
11	-1,23E-08	-0,4952	0,2070	-0,4999	-0,6818	-0,1604	0,4856	0,4147	-0,7828	-0,3053	0,1060	-0,1201	0,1819	-0,4324
12	-2,57E-08	0,1295	-0,1056	0,5671	0,5129	-0,2772	0,0419	0,4344	0,3086	0,4600	0,6030	0,7581	0,0559	-0,1047
13	-1,28E-08	0,1555	0,4968	-0,3293	0,0009	0,0889	-0,8276	0,3511	-0,3225	0,3152	0,5201	-0,1414	-0,0952	-0,2796
14	4,35E-08	0,3041	0,6234	0,4240	-0,7560	-0,0535	0,0504	0,8402	-0,3708	0,3416	0,5400	-0,0754	0,0621	-0,4400
15	2,32E-08	-0,1039	0,4464	-0,1581	0,9693	0,1857	0,0400	0,1386	0,6939	-0,0079	-0,0239	0,7116	0,6199	-0,1830
16	6,94E-08	-0,5070	0,7411	-0,9353	0,0464	-0,4734	-0,5274	-0,2292	-0,3199	-0,3119	-0,4094	-0,3258	0,7787	-0,5252
17	3,83E-08	-0,5252	-0,5518	-0,0840	-0,6997	-0,6607	0,4229	-0,4403	0,9564	-0,5066	-1,2510	0,7636	0,5716	-0,1706
18	-3,36E-08	0,5164	-0,0050	0,1486	-0,5184	0,4805	-0,0613	0,0697	0,0227	-0,2592	0,0464	1,0782	-1,3259	-0,2384
19	1,30E-07	0,5220	-0,1866	0,6114	0,8882	0,1357	0,0124	0,9235	-0,1729	0,1343	1,1132	-0,5047	-0,2904	0,6172
20	4,58E-08	-1,5453	0,1331	-0,5182	-0,7595	-1,2268	-0,9744	-0,2897	0,8119	1,2622	-0,9128	0,3588	-0,4209	0,2496
21	-4,02E-08	-0,2629	0,0329	-1,2413	0,3754	0,6525	0,2135	-0,2895	-0,5753	-0,4049	0,1545	0,2510	-0,1933	-0,2901
22	-2,94E-08	0,0622	-0,2330	-0,4313	-0,4195	-0,5179	-0,0023	-0,2597	0,0698	0,8240	-0,6230	0,8176	-0,4856	0,7211
23	7,85E-08	-0,3966	-0,6638	-0,4714	-0,1980	0,6239	-0,0368	0,1949	0,1155	-0,5519	-0,2748	0,6174	0,5911	0,1235
24	2,81E-08	-0,5893	-0,5065	-0,0110	0,1394	1,0415	-0,0049	0,1798	-0,6827	0,9558	0,0096	-0,8527	-1,2038	0,0210
25	-7,95E-08	0,2368	0,4598	-0,5983	-0,3093	0,8293	0,0459	0,8795	-1,2166	0,3206	0,8123	0,1931	-0,2119	0,2341
26	-1,64E-08	-0,0680	0,5621	-0,3611	0,6079	0,1151	-0,4919	0,2440	-0,3981	-0,3299	0,2444	-0,1258	0,2563	0,1865
27	-5,02E-08	0,0053	0,0350	1,8227	-0,7537	-0,7901	-0,1711	1,3623	-0,1043	0,2731	0,4724	-0,6221	-0,7434	0,1097
28	7,85E-08	-0,1941	0,4935	-0,7777	0,2729	-0,1526	-1,2210	-0,8229	-1,1517	0,3520	0,6062	-0,7948	-0,6380	-0,9056
29	5,61E-09	0,0361	0,0313	0,4279	0,1702	-0,1017	0,3474	0,6891	-0,1647	0,4781	0,4670	-0,3440	-0,2129	-0,2935
30	-2,37E-08	0,4122	-0,0281	0,5535	-0,2429	-0,0939	0,6819	0,1217	0,0664	0,0849	0,6875	0,5820	-0,2842	0,2542

$b_{1,i,j}$	$i = 0$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$j = 1$	-5,67E-09	-0,2102	0,1643	0,3122	-0,1455	0,0387	0,1415	0,0783	-0,1258	0,2350	-0,3660	0,0754	-0,3227	-0,2427
2	3,23E-08	-0,2362	0,0341	-0,3374	-0,1674	0,0362	0,0313	-0,1485	0,2546	-0,1531	-0,3433	0,0961	-0,0514	-0,3171
3	-9,26E-08	0,4164	-0,3916	-0,1874	0,9213	0,4512	-0,1458	-0,2289	0,3315	0,0822	0,7005	-0,0857	0,3364	0,1170
4	1,07E-08	-0,4216	0,3403	0,2210	0,0326	-0,1210	0,1237	0,1154	0,2557	0,2345	-0,2721	-0,1339	-0,4795	-0,0069
5	-2,20E-07	0,6529	0,1024	-0,0532	0,9836	0,4213	-0,1290	-0,5944	0,1709	-0,1143	0,3524	0,1776	0,1226	0,1467
6	-5,95E-09	-0,0808	0,1345	0,0481	-0,0740	-0,2233	-0,6499	-0,2613	-0,0715	-0,2023	-0,2833	0,0192	-0,3829	-0,4689
7	-1,06E-07	0,3029	-0,0270	0,1865	0,4919	0,2234	-0,2528	-0,0767	0,3061	-0,5776	0,3331	0,2631	-0,0530	0,0216
8	7,43E-08	0,7009	-0,5673	-0,8022	0,0247	-0,1829	-0,2545	-0,2097	-0,1372	-0,3265	-0,2528	-0,3991	0,4418	-0,0721
9	4,19E-08	-0,3581	-0,0549	-0,2539	-0,1581	-0,2627	0,1058	-0,1582	0,0094	-0,2680	-0,1356	-0,2796	-0,1393	0,2555
10	7,04E-08	-0,2820	0,0689	-0,8738	-0,6092	-0,0601	-0,3733	-0,1757	-0,0993	-0,0020	0,0561	-0,0748	-0,7072	-0,0011
11	6,47E-09	-0,1829	0,1871	0,1437	0,1929	0,0574	-0,3158	0,2354	-0,2494	-0,0186	-0,2998	0,1116	-0,1556	-0,2318
12	4,01E-08	-0,0949	-0,3739	0,2114	0,1006	-0,2229	-0,2488	-0,2304	-0,0828	-0,2727	0,4701	0,0018	0,1729	0,5399
13	6,48E-08	-0,2132	0,0415	-0,3234	-0,3653	-0,3667	-0,2093	0,1466	-0,0035	0,0712	-0,3369	-0,1662	0,0290	-0,6008
14	2,84E-07	0,3275	0,0784	0,1825	0,8069	0,1699	-0,0586	-0,5019	0,2338	-0,4139	0,7578	0,1700	0,0532	0,5036
15	2,01E-07	0,1795	0,5968	-0,2654	1,2978	-0,2930	-0,1873	-1,1417	0,2306	-0,6436	-0,3077	0,5735	-0,3325	0,3708
16	-1,26E-07	0,1877	0,1090	-0,1392	0,0252	0,0218	-0,0707	-0,2498	-0,0762	-0,0465	0,1334	0,4876	0,1794	-0,3307
17	-2,54E-07	0,6515	-0,3956	-1,1537	0,3057	0,1168	-0,0814	-0,7835	0,2810	-0,0338	-0,2510	0,4560	0,4589	-0,0818
18	-1,61E-07	0,3308	-0,3315	-0,3025	0,1689	0,0983	0,1549	-0,4285	0,1607	-0,0519	0,4481	0,0446	0,1099	0,0697
19	6,93E-09	-0,0578	-0,1813	0,0380	-0,1329	0,1585	0,0635	0,2568	-0,1978	0,1308	-0,4809	0,0146	-0,3814	-0,4216
20	1,17E-07	0,3651	0,2416	0,2473	0,5732	0,1787	-0,0438	-0,0901	0,4280	-0,1871	0,0224	-0,2017	-0,1700	0,1317
21	8,72E-09	-0,2942	0,3960	0,1485	0,1830	0,1647	-0,0312	0,0874	0,4104	-0,3041	0,3492	0,1300	-0,0191	-0,4526
22	1,46E-08	0,1709	0,0078	-0,3318	-0,5127	0,1842	0,3331	0,1413	0,1462	0,1357	-0,3374	0,1222	-0,3128	-0,0446
23	-1,05E-08	-0,1274	-0,3750	0,2783	-0,0961	-0,2928	-0,2520	0,2132	0,1294	0,0244	0,2581	0,1695	0,2383	-0,1602
24	-1,65E-08	-0,3675	0,1114	-0,2224	-0,3201	-0,3296	0,1065	0,0667	-0,1874	0,1020	0,0093	-0,3778	-0,2497	0,1054
25	-3,25E-08	-0,3337	-0,2075	0,0511	-0,1429	-0,0750	-0,0874	-0,1045	0,0267	-0,1355	0,0852	0,0497	0,4309	0,0512
26	1,19E-07	0,3908	0,1555	-0,0523	0,7912	0,1372	-0,4989	-0,6375	0,1667	-0,4238	0,0037	0,0143	0,1126	0,4037
27	5,56E-08	0,0571	0,2099	-0,1109	0,2738	0,1408	-0,1325	0,0191	0,1816	-0,4274	-0,2579	-0,3051	0,1482	0,3516
28	1,61E-08	-0,1748	-0,0130	0,1472	-0,1834	0,1843	-0,1322	0,3209	-0,3178	-0,3111	0,1533	0,1149	0,1780	-0,3177
29	8,14E-08	-0,9643	-0,2244	-0,1307	-0,5552	0,0729	-0,2547	0,3851	0,1196	0,1572	-0,0187	-0,4984	-0,3246	-0,6388
30	-1,05E-07	0,3882	-0,5003	-0,3644	0,1002	0,1723	-0,4410	0,1184	0,5091	-0,1506	0,0013	-0,1365	0,7137	0,3827

$b_{1,i,j}$	$i = 14$	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
$j = 1$	-0,2872	0,2223	0,2641	0,1623	0,0077	0,1441	-0,1252	0,2626	-0,2155	0,3071	-0,0653	-0,2233	-0,2273	-0,1291
2	-0,3790	-0,3570	-0,4098	-0,1562	-0,3616	0,2273	-0,0848	0,3067	-0,1637	0,1430	0,1036	-0,1665	0,1580	-0,0553
3	0,3136	0,2897	0,1401	0,2897	0,0149	0,1287	-0,7121	0,0932	-0,1719	-0,4046	0,0311	0,0939	0,2903	0,3956
4	0,0743	0,2829	-0,0119	0,2698	-0,0532	-0,2413	0,2017	-0,1459	0,2132	0,2165	0,1663	0,2596	0,1901	-0,3795
5	0,4641	-0,2856	-0,2411	0,1892	0,0306	-0,1797	-0,3042	0,5190	-0,0197	0,2408	0,6180	0,5370	0,2250	0,1285
6	0,0687	0,3665	-0,3398	0,8370	-0,7898	-0,4400	-0,4744	-0,1637	-0,4632	0,7583	-0,4584	-0,8914	-0,3206	0,1279
7	0,2260	-0,0802	0,1425	0,2905	0,2737	-0,5554	-0,2491	0,4026	0,1926	0,3738	0,2843	0,2138	-0,3163	0,2065
8	0,0691	0,6420	-0,4113	0,3204	-0,2966	1,0300	-0,9651	-0,6660	-0,4306	-0,6407	0,2432	-0,0563	-0,5342	0,1092
9	0,1065	-0,1218	0,1098	-0,0026	-0,2675	-0,3359	0,1468	0,0226	-0,2824	-0,2305	-0,2474	0,1904	0,0056	0,0270
10	-1,0712	-0,3307	-0,5098	0,3495	-0,9368	0,3752	-0,5064	0,8975	-0,3344	0,5887	-0,1051	-0,2574	0,4830	-0,1764
11	0,1250	-0,2195	0,2400	0,2764	0,0251	0,0579	0,3095	0,2991	-0,0159	0,2468	0,1763	0,3157	-0,2366	-0,1914
12	0,1315	0,2646	0,2189	0,2777	-0,0659	-0,1183	-0,0183	0,0257	0,1912	-0,0664	-0,3566	0,1302	-0,1734	-0,1085
13	-0,5839	0,1374	-0,2569	-0,1028	-0,3903	0,1278	0,1040	0,1224	-0,0092	0,4403	0,1355	-0,4277	-0,1049	0,0116
14	0,1747	-0,0323	0,3724	0,6256	-0,1738	-0,3305	-0,2646	0,0103	0,1805	-0,3973	0,2130	0,9731	0,3424	0,1875
15	-0,2040	-1,1175	-0,1833	0,7773	-0,4650	-0,0104	-0,5629	0,1820	-0,6808	0,3638	0,2466	0,3602	0,1482	0,5580
16	0,1516	-0,1529	-0,1635	0,2751	-0,3599	0,1865	-0,2758	-0,1425	-0,3905	0,6164	0,1722	-0,4286	-0,1256	0,5789
17	-0,1017	-0,1265	-0,1880	0,5479	-0,0311	0,2252	-0,8474	0,2458	-0,5426	-0,0796	0,0825	-0,7242	-0,1447	0,6557
18	0,3376	-0,0459	0,2552	-0,1952	0,0109	0,0043	-0,4042	0,1576	-0,2584	-0,4207	-0,2317	0,2612	0,1525	0,1100
19	0,0216	-0,2465	-0,4229	-0,1641	-0,1370	0,1628	-0,1326	-0,0598	0,1525	-0,0705	-0,1581	0,1140	-0,1126	-0,3571
20	0,4060	-0,2559	-0,1799	-0,1651	-0,1158	-0,1896	-0,0458	-0,0654	-0,1507	0,1957	0,0496	0,3351	0,2431	0,5393
21	-0,2456	0,0954	0,3002	0,6535	-0,6955	-0,1090	-0,4730	0,1397	-0,0126	0,1503	-0,0915	-0,1403	-0,5185	0,2975
22	0,1310	-0,1627	0,1332	0,2072	-0,0889	0,4547	-0,1265	0,3738	0,1004	-0,1992	0,3620	-0,2942	-0,2065	0,2124
23	-0,0998	-0,0235	-0,1693	0,2637	0,1296	-0,2231	-0,2283	-0,3422	-0,2526	0,1266	-0,3643	-0,1013	-0,1791	-0,1339
24	0,1091	-0,1961	0,2148	0,0046	0,2053	-0,0623	-0,0363	0,1812	0,0416	-0,0491	-0,0652	0,2824	0,3870	0,0546
25	-0,2991	0,5443	-0,1206	0,2776	-0,1931	-0,1853	-0,1696	-0,2615	-0,0914	-0,0039	-0,3352	-0,4461	-0,3043	0,0332
26	0,0475	-0,4748	-0,2394	0,2581	-0,3973	0,0449	-0,4034	0,5845	-0,3205	-0,1536	0,3667	0,4604	0,3121	0,3831
27	0,1405	-0,2888	-0,0095	-0,2095	0,1127	0,0838	-0,2524	0,3920	-0,2267	-0,1050	0,1173	0,5184	0,2504	0,1609
28	0,0397	0,2246	0,3082	0,4160	-0,1000	0,1887	-0,0149	-0,2588	-0,2636	-0,1935	0,2535	-0,0092	0,0705	0,1914
29	-1,1718	0,3249	0,1270	0,4039	-0,5230	-0,5203	-0,4029	0,4568	0,1668	0,4373	-0,6903	-0,4980	-0,1230	-0,4734
30	0,2643	0,3614	0,0079	0,1307	0,2433	0,0710	-0,6999	0,0561	-0,1577	0,2515	-0,4129	-0,5414	-0,1372	0,3871

$$a_{k,i} = \gamma_{k,i} \cdot \frac{S_{k,i} - \bar{S}_{k,i}}{\sqrt{\sigma_{S_{k,i}} + 10^{-5}}} + \beta_{k,i} \quad 9.3$$

$b_{1,i,j}$	$i = 28$	29	30
$j = 1$	-0,0873	0,1401	-0,2968
2	0,1351	-0,1433	-0,2306
3	0,4284	0,1366	0,1743
4	-0,2911	-0,2997	-0,1619
5	0,5185	-0,1858	0,0823
6	-1,0876	-0,2613	0,2102
7	0,5602	-0,0857	0,0958
8	0,2047	0,7660	-0,7846
9	0,1705	-0,1372	-0,2678
10	-0,5295	-0,4790	-0,4782
11	-0,0299	-0,0116	0,0213
12	-0,0221	-0,3932	0,2542
13	-0,3232	-0,3655	-0,0260
14	0,1353	0,0979	0,1311
15	0,0379	-0,2569	0,1415
16	-0,1715	0,1916	-0,1063
17	0,5378	0,2743	-0,0697
18	0,5534	0,3396	0,3036
19	0,1871	0,2874	0,0012
20	0,4610	0,1383	0,2048
21	-0,4385	-0,2310	-0,1015
22	0,1750	0,3118	-0,2218
23	-0,1374	0,0262	0,1413
24	0,1299	-0,1549	-0,0052
25	0,1076	0,2550	-0,0773
26	0,2702	0,2604	0,1194
27	0,2826	-0,0397	0,1124
28	-0,1464	0,1904	-0,0089
29	-0,8092	-0,7164	-0,8240
30	0,3699	0,0761	0,0015

$b_{2,i}$	
$i = 0$	3,9421
1	0,7235
2	1,1489
3	2,5378
4	1,0256
5	2,3824
6	2,1580
7	1,9619
8	2,3020
9	0,4869
10	2,9211
11	0,8232
12	1,0540
13	1,2332
14	2,4418
15	3,0915
16	1,4150
17	2,8349
18	1,4357
19	0,5886
20	1,4014
21	1,8719
22	1,2676
23	0,8305
24	0,4900
25	1,1064
26	2,2581
27	1,5305
28	0,8276
29	2,2595
30	2,5811

	$\bar{S}_{0,i}$	$\sigma_{\bar{S}_{0,i}}$	$\beta_{0,i}$	$\gamma_{0,i}$	$\bar{S}_{1,i}$	$\sigma_{S_{1,i}}$	$\beta_{1,i}$	$\gamma_{1,i}$
$i = 1$	-1,04E-04	3,167	0,233	1,022	-0,241	1,264	-0,441	0,717
2	3,19E-04	1,241	-0,039	1,181	-1,359	1,467	0,152	1,138
3	2,29E+02	3,835	-0,180	1,111	1,125	5,172	0,556	2,131
4	3,47E-04	14,0100,267	1,257	0,073	1,037	-0,464	0,640	
5	-4,95E-04	15,497-0,156	0,803	1,824	5,949	0,352	2,061	
6	-2,81E-04	2,924	0,109	0,743	-3,026	4,791	0,672	2,167
7	-3,75E-04	3,441	0,081	1,526	1,202	1,918	0,504	1,571
8	9,09E+02	2,574	-0,110	0,546	-1,499	7,033	0,090	1,968
9	-1,04E+02	2,153	0,054	0,950	-1,055	1,411	-0,440	0,723
10	-4,33E-04	5,697	0,104	0,614	-3,334	9,071	0,999	2,361
11	3,36E-04	6,251	0,285	0,768	0,908	0,549	-0,324	0,884
12	-3,20E-04	5,738	0,272	1,083	0,045	0,659	0,098	1,084
13	-5,82E+02	0,875	-0,088	1,208	-1,542	3,249	-0,149	1,035
14	3,89E-04	3,292	0,231	0,895	1,738	6,138	0,346	2,195
15	-4,73E-04	2,077	0,193	1,101	-0,395	7,456	0,644	2,903
16	-1,53E+02	13,7980,066	0,900	0,009	0,824	0,084	1,418	
17	8,12E-04	4,053	-0,243	1,496	-0,818	2,160	1,188	2,268
18	3,91E-04	4,419	0,134	1,130	0,215	2,215	0,143	1,289
19	-7,76E-04	9,925	0,088	1,232	-1,027	0,210	-0,387	0,490
20	8,68E-04	10,7260,835	1,721	1,233	2,170	0,049	1,029	
21	-2,84E-04	2,457	-0,294	1,257	-0,760	1,574	0,223	1,440
22	4,22E-04	2,923	-0,393	0,870	0,133	0,717	-0,425	0,558
23	2,40E-04	1,590	0,050	1,364	-0,764	0,797	-0,141	0,783
24	-3,37E-04	6,839	0,137	0,909	-0,280	0,608	-0,469	0,647
25	-4,01E+02	4,739	0,389	1,343	-0,825	1,187	-0,135	1,077
26	-5,07E-04	0,939	-0,230	0,953	0,514	4,631	0,302	2,182
27	2,93E-04	6,977	0,121	1,235	0,484	1,603	-0,097	1,203
28	-4,47E-04	10,215-0,104	1,329	0,418	0,556	-0,368	0,596	
29	-2,32E-04	1,882	0,014	0,963	-4,029	14,934	0,219	1,853
30	1,54E-04	5,732	-0,186	0,710	0,076	2,339	0,610	2,167



---

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: a) Wälzlageraußenring mit Kratern; b) Wälzlageraußenring mit Riffel. Quelle: Piske (2020) S.18f.....	2
Abbildung 1-2: Struktureller Aufbau der Arbeit. ....	4
Abbildung 2-1: a) Schnittansicht eines Drehstrommotors mit Motorkapazitäten, b) Elektrisches Ersatzschaltbild des Drehstrommotors Quelle: Bechev (2020) S.4, nach Muetze (2004) und Radnai (2016) .....	5
Abbildung 2-2: Verlauf der Common Mode Spannung, der Lagerspannung und des Lagerstromes bei a) EDM Strömen; b) Rotor-Erd-Strömen. Quelle: Radnai et al. (2015) S.5f, überarbeitet. ....	7
Abbildung 2-3: Elektrisches Modell des EHD-Kontakts in Abhängigkeit der Schmierfilmdicke. Quelle: Martin (2021) S.9, nach Gemeinder (2016) S.131ff.....	8
Abbildung 2-4: Schmierfilm bei elasto-hydrodynamischer Schmierung. Quelle: Schirra (2021) S.17, überarbeitet, nach Dahlke (1994) S.403. ....	9
Abbildung 2-5: Schmierstoff vor (links) und nach (rechts) elektrischen Durchschlägen. Quelle: Schneider et al. (2022a) S.4. .© 2022 MDPI.....	10
Abbildung 2-6: Unterschiedliche Stadien der elektrischen Lagerschädigung. Quelle: Tischmacher (2018) S.20; © 2018 IEEE. ....	12
Abbildung 2-7: Angenommene Wahrscheinlichkeitsverteilung für Riffelbildung auf den Wälzlagerlaufbahnen in Abhängigkeit der scheinbaren elektrischen Lagerstromdichte. Quelle: Weicker und Binder (2022) S.790; © 2022 IEEE. ....	14
Abbildung 2-8: Häufigkeit von EDM Durchschlägen in Abhängigkeit der Schmierfilmdicke. Quelle: Gonda et al. (2019) S.3. © 2019 MDPI. ....	16
Abbildung 2-9: a) Aufnahme des Beschleunigungssignales eines intakten Lagers; b) Aufnahme des Beschleunigungssignales eines Lagers mit Riffelschäden. Eigene Abbildung. ....	18
Abbildung 3-1: Schematische Darstellung des übergeordneten Forschungsziels.....	23
Abbildung 4-1: Schnittansicht der zur Untersuchung von Axialrillenkugellagern modifizierten Prüfkammer des Wälzlagerprüfstands Athene. Eigene Abbildung. ...	27
Abbildung 4-2: Elektrisches Schaltbild einer Prüfkammer des Wälzlagerprüfstandes angepasst an die Untersuchung von axialen Lagern. Eigene Abbildung. ....	30
Abbildung 4-3: Schaltbild der elektrischen Kontaktierung. Eigene Abbildung. ....	31
Abbildung 4-4: links: Smart WLI Weißlichtinterferometer; rechts: Prinzip des Weißlichtinterferometers. Eigene Abbildung nach Löffler-Mang et al. (2020) S.465. .....	32
Abbildung 4-5: Arten von Messskalen und deren Bestimmung. Eigene Abbildung nach Kosfeld et al. (2016) S.6ff.....	34
Abbildung 4-6: Visualisierung Boxplot und Fehlerbalken. Eigene Abbildung. ....	38
Abbildung 4-7: Ordnungssystem für Gestaltabweichungen Eigene Darstellung nach (DIN 4760 (1982)) S.2.....	46



---

Abbildung 4-8: Übertragungscharakteristik für das Rauheits- und Welligkeitsprofil Quelle: DIN EN ISO 4287 S.7, überarbeitet. ....	47
Abbildung 5-1: Faktoren, Parameter und Messgrößen der Versuchsreihe.....	52
Abbildung 5-2: Zeitlicher Versuchsablauf. Quelle: Harder et al. (2022). S.5. ....	54
Abbildung 5-3: Zeitlicher Ablauf aller Versuchsphasen. ....	54
Abbildung 5-4: Untersuchte Bereiche der Laufbahnoberfläche Quelle: Harder et al. (2022) S.5. ....	55
Abbildung 5-5: Versuch V09 : a) Zeitschriebe der Last und Drehzahl; b) Zeitschriebe der Effektivwerte der Spannung und des Stromes; c) Zeitschriebe der Temperatur und des Drehmoments; d) Zeitschriebe der Effektivwerte der axialen und radialen Vibrationen.....	57
Abbildung 5-6: Fortschritt der Oberflächenänderung nach jeder Schädigungsphase in V09.....	58
Abbildung 5-7: Oberflächenscans der Laufbahnoberfläche an den Positionen N, O, S, W jeweils nach den Schädigungsphasen M001, M002, M003 und M004 des Versuchs V09.....	60
Abbildung 5-8: Ausschnitt des zeitlichen Verlaufs des angelegten Spannungssignals sowie des Stromes in den unterschiedlichen Schädigungsphasen und deren jeweilige Mittelung für Versuch V09.....	61
Abbildung 5-9: Frequenzanalyse der axialen und radialen Beschleunigungssignale über alle Schädigungsperioden für Versuch V09.....	62
Abbildung 6-1: Bewertungsblatt der durchgeführten Studie von Lager V09M004.....	65
Abbildung 6-2: a) Histogramm der bewerteten Schadensklassen; b) kumulierte relative Häufigkeit der Schadensklassen.....	66
Abbildung 6-3: a) Ergebnis der bewerteten Schadensklasse in Abhängigkeit der Bewertungsreihenfolge; b) Quartilsabstand der Schadensklasse in Abhängigkeit der Bewertungsreihenfolge. ....	67
Abbildung 6-4: Quartilsabstand der Schadensklasse in Abhängigkeit der bewerteten Schadensklasse. ....	68
Abbildung 6-5: Verlauf der bewerteten Schadensklasse für den Versuch V09 nach jeder Schädigungsperiode dargestellt als Boxplot. Quelle: Harder et al. (2022) S.8. ....	69
Abbildung 6-6: Verlauf der bewerteten Schadensklasse für die Versuche nach jeder Schädigungsperiode. Quelle: Harder et al. (2022) S.14.....	71
Abbildung 6-7: a) Histogramm der mittleren arithmetischen Rauheit; b) kumulierte relative Häufigkeit der mittleren arithmetischen Rauheit. ....	74
Abbildung 6-8: Boxplot der untersuchten Oberflächeneigenschaften bezogen auf den jeweiligen Median. Die blau umkreisten Ausreißer sind aus Versuch V05.....	75
Abbildung 6-9: Summe aller Ausreißer in den untersuchten Oberflächeneigenschaften für den jeweiligen Versuch. ....	76
Abbildung 6-10: Scatterplot der bewerteten Schädigung und der gemessenen mittleren arithmetischen Rauheit.....	77

---

Abbildung 6-11: Korrelationskoeffizienten der untersuchten Oberflächeneigenschaften. Alle Eigenschaften außerhalb der markierten Begrenzung erfüllen die Anforderung. Quelle: Harder et al. (2022) S.9. ....	77
Abbildung 6-12: Boxplot der mittleren arithmetischen Rauheit sortiert nach der bewerteten Schädigungsklasse.....	78
Abbildung 6-13: Ergebnis des Rangsummentest zur Untersuchung der Wahrscheinlichkeit gleicher Mengen A und B. Alle Eigenschaften unterhalb des Grenzwertes erfüllen die Anforderung. Quelle: Harder et al. (2022) S.10. ....	79
Abbildung 6-14: Relative Schwankung der untersuchten Oberflächeneigenschaften. Alle Eigenschaften unterhalb des Grenzwertes erfüllen die Anforderung. Quelle: Harder et al. (2022) S.10. ....	81
Abbildung 6-15: Scatterplot der Standardabweichung der mittleren arithmetischen Rauheit über ihren Mittelwert. ....	82
Abbildung 6-16: Korrelation zwischen Mittelwert und Standardabweichung der Oberflächeneigenschaften. Alle Eigenschaften innerhalb der Begrenzung erfüllen die Anforderung. Quelle: Harder et al. (2022) S.11.....	82
Abbildung 6-17: Boxplots der Verteilung der geeigneten Oberflächeneigenschaften. Die Daten wurden in zwei Gruppen (ohne Riffelschäden und mit Riffelschäden) eingeteilt. Die rot gestrichelte Linie stellt kritischen Grenzwert dar, der eine Abgrenzung zwischen Riffeln und Kraterschäden ermöglicht. Quelle: Harder et al. (2022) S.15. ....	85
Abbildung 7-1: Screeplot der Varianz der Hauptkomponenten .....	94
Abbildung 7-2: Verlauf der mittleren arithmetischen Rauheit für Versuch V09 sowie Approximation des Verlaufs mithilfe der aus den Messwerten abgeleiteten totalen, mittleren und interpolierten Änderungsrate. ....	97
Abbildung 7-3: Die totale, mittlere und interpolierte Änderungsrate der mittleren arithmetischen Rauheit über alle Versuche .....	98
Abbildung 7-4: Rangkorrelationskoeffizient zwischen totaler und mittlerer, totaler und interpolierter sowie mittlerer und interpolierter Änderungsrate der untersuchten Oberflächeneigenschaften.....	98
Abbildung 7-5: Hebelanalyse der Effekte der Versuchsfaktoren auf die totale Änderungsrate der mittleren arithmetischen Rauheit. ....	101
Abbildung 7-6: Halbnormalen-Plot der Betrages der Effektstärken der Versuchsfaktoren auf die totale Änderungsrate der mittleren arithmetischen Rauheit.....	102
Abbildung 7-7: Totale Änderungsrate der mittleren arithmetischen Rauheit; Messwerte und berechnete Werte mithilfe des Beschreibungsmodells mit reduzierten Versuchsparameter, sowie mithilfe des vollständigen Beschreibungsmodells.....	105
Abbildung 7-8: links: Gemessene Werte über berechnete Werte der totalen Änderungsrate der mittleren arithmetischen Rauheit; rechts: Messfehler über Betrag der totalen Änderungsrate der mittleren arithmetischen Rauheit. ....	106

---

Abbildung 7-9: Modellfehler der berechneten totalen Änderungsrate der mittleren arithmetischen Rauheit über die Versuche in chronologischer Reihenfolge. ....	107
Abbildung 7-10: Halbnormalen-Plot der Modellfehler des reduzierten Modells der totalen Änderungsrate der mittleren arithmetischen Rauheit; links: Reduziertes Modell; rechts: Vollständiges Modell. ....	108
Abbildung 7-11: Cook-Abstand der einzelnen Messungen bzgl. der reduzierten Modellierung der totalen Änderungsrate der mittleren arithmetischen Rauheit. .	108
Abbildung 7-12: Halbnormalen-Plot des Betrages der Effektstärken der Versuchsfaktoren auf die totale Änderungsrate der zweiten Hauptkomponente . ....	110
Abbildung 7-13: Scatterplot der totalen Änderungsrate der mittleren arithmetischen Rauheit über den maximalen Effektivwert des Stromes. ....	114
Abbildung 7-14: Scatterplot der totalen Änderungsrate der mittleren arithmetischen Rauheit aufgetragen über die Lagerstromdichte, die scheinbare Lagerleistung und die scheinbare Lagerleistungsdichte.....	115
Abbildung 7-15: Scatterplot der totalen Änderungsrate der mittleren arithmetischen Rauheit aufgetragen über den Betrag der Impedanz.....	117
Abbildung 8-1: Frequenzspektrum der axialen Beschleunigung am Ende der Schädigungsphasen V09M001 (a) und V09M004 (b). ....	122
Abbildung 8-2: Messdaten und daraus abgeleitete Hüllkurve für den Versuch V09M004 im Zeitbereich (a) und Frequenzbereich (b). ....	124
Abbildung 8-3: Frequenzbänder im Frequenzspektrum der axialen Beschleunigung V09M004.....	125
Abbildung 8-4: Anzahl der Features, die starke Korrelationen mit anderen Features aufweisen. ....	126
Abbildung 8-5: Häufigkeitsverteilung des Betrages der Korrelation der untersuchten Feature mit der arithmetischen Rauheit der Wälzlagerlaufbahn. ....	127
Abbildung 8-6: Betrag der Korrelation der untersuchten Feature untereinander und mit der arithmetischen Rauheit der Wälzlagerlaufbahn. ....	128
Abbildung 8-7: Screeplot der Varianz der Hauptkomponenten der Vibrationsfeature. .	129
Abbildung 8-8: Betrag der Rangkorrelation zwischen den Hauptkomponenten, der mittleren arithmetischen Rauheit sowie der Kraft, der Drehzahl und der Wechselwirkung aus Kraft und Drehzahl. ....	130
Abbildung 8-9: Bewertung der Feature mithilfe des Rrelief Algorithmus.....	131
Abbildung 8-10: Aufbau des künstlichen neuronalen Netzes (vereinfacht). ....	133
Abbildung 8-11: Gemessene und approximierte Werte der mittleren arithmetischen Rauheit, Ideallinie und quadratischer Mittelwert des Messfehlers. ....	134
Abbildung 8-12: Mittlere arithmetische Rauheit in Versuch V09 nach allen Schädigungsperioden, gemessen (schwarz) und berechnet (blau).....	135
Abbildung 8-13: Mittlere arithmetischen Rauheit in Versuch V09 interpoliert. ....	136
Abbildung 9-1: Schnittansicht des Axialrillenkugellagers 51305. ....	XXIII
Abbildung 9-2: Detaillierter Aufbau des künstlichen neuronalen Netzes. ....	XXXV

---

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1: Kenndaten des Wälzlagerprüfstandes „Athene“ .....	29
Tabelle 4-2: Impedanzen der Isolationsschichten.....	30
Tabelle 4-3: Technische Spezifikationen des Weißlichinterferometers smartWLI compact. Quelle: Gesellschaft für Bild- und Signalverarbeitung (GBS) mbH (2021). .....	33
Tabelle 4-4: Beschreibung der Korrelationsstärke anhand des Rangkorrelationskoeffizienten. Quelle: Kosfeld et al. (2016).....	40
Tabelle 5-1: Mögliche Einflüsse auf das Auftreten und Fortschreiten elektrischer Lagerschädigung.....	50
Tabelle 5-2: Faktorstufen des Versuchsplans.....	53
Tabelle 6-1: Vergleich des Bewertungsschemas nach TISCHMACHER (vgl. Abbildung 2-6) und der modifizierten Skala. ....	64
Tabelle 6-2: Anforderungsliste .....	73
Tabelle 6-3: Bewertung der Anforderungserfüllung. ....	83
Tabelle 6-4: Zusammenfassung der kritischen Werte für Riffel für die jeweiligen Oberflächeneigenschaften.....	89
Tabelle 7-1: Rangkorrelationskoeffizient zwischen den untersuchten Oberflächeneigenschaften und den ersten beiden Hauptkomponenten.....	95
Tabelle 7-2: Berechnete Effekte der Versuchsfaktoren sowie deren Wechselwirkungen auf die totale Änderungsrate der mittleren arithmetischen Rauheit.....	100
Tabelle 7-3: ANOVA-Tabelle der Varianzanalyse der Effekte der Versuchsfaktoren auf die totale Änderung der mittleren arithmetischen Rauheit .....	103
Tabelle 7-4: Rang-Korrelationskoeffizient zwischen den untersuchten Kenngrößen von Spannung und Strom mit der Änderungsrate der mittleren arithmetischen Rauheit. .....	113

---

## Literaturverzeichnis

- Alger, P. L.; Samson, H. W. (1924): *Shaft Currents in Electric Machines*. In: *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers* XLIII, S. 235–245. DOI: 10.1109/t-aiee.1924.5060981.
- Anger, C. (2018): *Hidden semi-Markov Models for Predictive Maintenance of Rotating Elements*. Dissertation. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt.
- Barz, M. (1996): *Die Schmierfilmbildung in fettgeschmierten schnelllaufenden Spindellagern*. Dissertation. Leibniz Universität Hannover, Hannover.
- Bechev, D. (2020): *Prüfmethodik zur Charakterisierung der elektrischen Eigenschaften von Wälzlager-schmierstoffen*. Dissertation. Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern.
- Bechev, D.; Gonda, A.; Capan, R.; Sauer, B. (2019): *Untersuchung der Oberflächenmutationen und der Riffelbildung bei spannungsbeaufschlagten Wälzlagern*: 13. VDI Fachtagung Gleit- und Wälzlagern. Schweinfurt: VDI Verlag GmbH, S. 301–312. DOI: 10.51202/9783181023488-301.
- Bechev, D.; Kiekbusch, T.; Radnai, B.; Sauer, B. (2018): *Untersuchung der Auswirkungen von leitenden und nichtleitenden Schmierfetten auf die Oberflächeneigenschaften bei spannungsbeaufschlagten Wälzlagern*. In: *Tribologie und Schmierungstechnik* 65 (3), S. 5–11.
- Bechev, D.; Weicker, M.; Sauer, B.; Binder, A. (2020): *Schädlicher Stromdurchgang 2 Forschungsvorhaben Nr. 650 II*. Methodik zur praxisnahen Charakterisierung von elektrischen Schmierstoffeigenschaften zur Verbesserung der rechnerischen Verhersage von Lagerströmen. Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (Heft 1387).
- Bender, B.; Gericke, K. (2021): *Pahl/Beitz Konstruktionslehre*. 9. Aufl. Berlin, Heidelberg. Springer. DOI: 10.1007/978-3-662-57303-7.
- Bethke, J. (1991): *Entwicklung einer praktisch einsetzbaren Meßtechnik für die Schmierfilmdicke in Wälzlagern und anderen realen tribologischen Systemen*. Dissertation. Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern.
- Bibra, E. Meena; Connelly, E.; Dhir, S.; Drtil, M.; Henriot, P.; Le Marois, J.-B. et al. (2022): *Global Electric Vehicle Outlook 2022*. Hg. v. IEA Publications. International Energy Agency. France. Online verfügbar unter <https://iea.blob.core.windows.net/assets/e0d2081d-487d-4818-8c59-69b638969f9e/GlobalElectricVehicleOutlook2022.pdf>, zuletzt geprüft am 14.09.2022.
- Bienefeld, C.; Kirchner, E.; Vogt, A.; Kacmar, M. (2022): *On the Importance of Temporal Information for Remaining Useful Life Prediction of Rolling Bearings Using a Random Forest Regressor*. In: *Lubricants* 10 (4), S. 67. DOI: 10.3390/lubricants10040067.
- Bienefeld, C.; Vogt, A.; Kacmar, M.; Kirchner, E. (2021): *Feature-Engineering für die Zustandsüberwachung von Wälzlagern mittels maschinellen Lernens*. In: *Tribologie und Schmierungstechnik* 68 (6), S. 5–11. DOI: 10.24053/TuS-2021-0032.
- Bishop, C. M. (2006): *Pattern recognition and machine learning*. New York. Springer.

- 
- Bommert, A.; Sun, X.; Bischl, B.; Rahmenführer, J.; Lang, M. (2020): *Benchmark for filter methods for feature selection in high-dimensional classification data*. In: *Computational Statistics & Data Analysis* 143 (10), S. 106839. DOI: 10.1016/j.csda.2019.106839.
- Busse, D. F.; Erdman, J. M.; Kerkman, R. J.; Schlegel, D. W.; Skibinski, G. L. (1997): *The effects of PWM voltage source inverters on the mechanical performance of rolling bearings*. In: *IEEE Transactions on Industry Applications* 33 (2), S. 567–576. DOI: 10.1109/28.568024.
- Chen, S.; Lipo, T. A.; Fitzgerald, D. (1996): *Source of induction motor bearing currents caused by PWM inverters*. In: *IEEE Transactions on Energy Conversion* 11 (1), S. 25–32. DOI: 10.1109/60.486572.
- Collin, R.; Yokochi, A.; Jouanne, A. von (2022): *EDM Damage Assessment and Lifetime Prediction of Motor Bearings Driven by PWM Inverters: 2022 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. Detroit, MI, USA, 09.10.2022 - 13.10.2022: IEEE, S. 1–6. DOI: 10.1109/ECCE50734.2022.9947689.
- Cook, R. D.; Weisberg, S. (1982): *Residuals and influence in regression*. New York. Chapman & Hall.
- Costello, M. J. (1993): *Shaft voltages and rotating machinery*. In: *IEEE Transactions on Industry Applications* 29 (2), S. 419–426. DOI: 10.1109/28.216553.
- Czichos, H.; Habig, K.-H. (2015): *Tribologie-Handbuch*. 4. Aufl. Wiesbaden. Springer. DOI: 10.1007/978-3-8348-2236-9.
- Dahlke, H. (1994): *Handbuch Wälzlager-Technik*. Bauarten, Gestaltung, Betrieb. Überarb. Neuausg. Braunschweig. Vieweg.
- Daniel, C. (1959): *Use of Half-Normal Plots in Interpreting Factorial Two-Level Experiments*. In: *Technometrics* 1 (4), S. 311–341. DOI: 10.1080/00401706.1959.10489866.
- Dean, A. M.; Voß, D.; Draguljić, D. (2017): *Design and analysis of experiments*. 2. Aufl. New York. Springer. DOI: 10.1007/978-3-319-52250-0.
- Ewert, P.; Orłowska-Kowalska, T.; Jankowska, K. (2021): *Effectiveness Analysis of PMSM Motor Rolling Bearing Fault Detectors Based on Vibration Analysis and Shallow Neural Networks*. In: *Energies* 14 (3), S. 1–24. DOI: 10.3390/en14030712.
- Fahrmeir, L.; Heumann, C.; Künstler, R.; Pigeot, I.; Tutz, G. (2016): *Statistik. Der Weg zur Datenanalyse*. 8. Aufl. Berlin, Heidelberg. Springer. DOI: 10.1007/978-3-662-50372-0.
- Feldman, M. (2011): *Hilbert transform in vibration analysis*. In: *Mechanical Systems and Signal Processing* 25 (3), S. 735–802. DOI: 10.1016/j.ymssp.2010.07.018.
- Furtmann, A. (2017): *Elektrisches Verhalten von Maschinenelementen im Antriebsstrang*. Dissertation. Leibniz Universität Hannover, Hannover.

- 
- Gemeinder, Y. (2016): *Lagerimpedanz und Lagerschädigung bei Stromdurchgang in umrichter gespeisten elektrischen Maschinen*. Dissertation. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt.
- Gemeinder, Y.; Schuster, M.; Radnai, B.; Sauer, B.; Binder, A. (2014): *Calculation and validation of a bearing impedance model for ball bearings and the influence on EDM-currents*: International Conference on Electrical Machines (ICEM), 2014. Institute of Electrical and Electronics Engineers; IEEE Industrial Electronics Society; International Conference on Electrical Machines; ICEM. Piscataway, NJ: IEEE. DOI: 10.1109/icelmach.2014.6960428.
- DIN EN ISO 16610-21, 2013: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Filterung - Teil 21*. Lineare Profilfilter: Gauß-Filter.
- DIN EN ISO 25178-2, 2012: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft - Teil 2*: Begriffe und Oberflächen-Kenngrößen.
- DIN EN ISO 4287, 2010: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit*.
- Gesellschaft für Bild- und Signalverarbeitung (GBS) mbH (2021): *smartWLI compact*. Ilmenau. Online verfügbar unter [https://www.gbs-ilmenau.de/images/GBS/Produkte/compact/DE\\_smartWLI\\_compact.pdf](https://www.gbs-ilmenau.de/images/GBS/Produkte/compact/DE_smartWLI_compact.pdf), zuletzt geprüft am 07.12.2022.
- Gesellschaft für Systementwicklung & Instrumentierung mbH (2018): *Leistungsverstärker Wälzlagerprüfstand*. Interface Control Document - Installation und Betrieb. Aachen.
- DIN 4760, 1982: *Gestaltabweichungen; Begriffe, Ordnungssystem*.
- Golub, G. H.; van Loan, C. F. (1996): *Matrix computations*. 3. Aufl. Baltimore/London. John Hopkins University Press.
- Gonda, A.; Capan, R.; Bechev, D.; Sauer, B. (2019): *The Influence of Lubricant Conductivity on Bearing Currents in the Case of Rolling Bearing Greases*. In: *Lubricants* 7 (12), S. 108. DOI: 10.3390/lubricants7120108.
- Graf, S.; Sauer, B. (2020): *Surface Mutation of the Bearing Raceway caused by electrical Current Passage in Mixed Friction Operation*. In: *Bearing World Journal* Vol. 5, S. 137–147.
- Graf, S.; Sauer, B. (2022): *Simulative Untersuchungen des Einflusses elektromechanischer Belastungen an einem Axiallager auf die Glättung der Oberflächen und den Traganteil im Kugel-Laufbahnkontakt*. In: *Forsch Ingenieurwes* 86 (2), S. 145–159. DOI: 10.1007/s10010-022-00579-x.
- Grover, C.; Turk, N. (2020): *Optimal Statistical Feature Subset Selection for Bearing Fault Detection and Severity Estimation*. In: *Shock and Vibration* 2020 (2), S. 1–18. DOI: 10.1155/2020/5742053.
- Hamrock, B. J.; Dowson, D. (1981): *Ball Bearing Lubrication*. The Elastohydrodynamics of Elliptical Contacts. New York. John Wiley & Sons.
- Handl, A.; Kuhlenkasper, T. (2017): *Multivariate Analysemethoden*. Theorie und Praxis mit R. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg. Springer. DOI: 10.1007/978-3-662-54754-0.

- 
- Harder, A.; Kirchner, E. (2022a): *Voltage induced damage progression on the raceway surfaces of thrust ball bearings, Part I: Surface Measurements*. pmd TU Darmstadt. Darmstadt. DOI: 10.48328/tudatalib-932.
- Harder, A.; Kirchner, E. (2022b): *Voltage induced damage progression on the raceway surfaces of thrust ball bearings, Part II: High Frequency Measurements*. pmd TU Darmstadt. Darmstadt. DOI: 10.48328/tudatalib-1123.
- Harder, A.; Piske, L.; Neu, M.; Kirchner, E. (2021): *Initiierungs- und Abklingeffekte von elektrischen Schädigungsmechanismen im Wälzlager: Gleit- und Wälzlagerungen 2021*. VDI. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH (VDI-Bericht), S. 65–74. DOI: 10.51202/9783181023785-65.
- Harder, A.; Zaiat, A.; Becker-Dombrowsky, F. M.; Puchtler, S.; Kirchner, E. (2022): *Investigation of the Voltage-Induced Damage Progression on the Raceway Surfaces of Thrust Ball Bearings*. In: *Machines* 10 (10), S. 1–10. DOI: 10.3390/machines10100832.
- Harris, T. A. (2001): *Rolling Bearing Analysis*. 4. Auflage. New York. John Wiley & Sons.
- Hausberg, V.; Seinsch, H. O. (2000): *Wellenspannungen und zirkulierende Lagerströme bei umrichtergespeisten Induktionsmaschinen*. In: *Electrical Engineering* 82 (6), S. 313–326. DOI: 10.1007/s002020000045.
- Hertz, H. (1882): *Über die Berührung fester elastischer Körper*. In: *Journal für die reine und angewandte Mathematik* (92), S. 156–171.
- Huan, J.; Li, S.; Xia, Z.; Wang, Y.; Wang, W.; Shi, G. (2022): *Experimental study on electric corrosion damage of bearing and solution*. In: *Journal of Mechanical Engineering Science* 236 (19), S. 10349–10358. DOI: 10.1177/09544062221100328.
- Jablonka, K.; Glovnea, R.; Bongaerts, J. (2012): *Evaluation of EHD films by electrical capacitance*. In: *Applied Physics* 45 (38), S. 1–8. DOI: 10.1088/0022-3727/45/38/385301.
- Jain, P. H.; Bhosle, S. P. (2021): *Study of effects of radial load on vibration of bearing using time-Domain statistical parameters*. In: *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 1070 (1), S. 1–13. DOI: 10.1088/1757-899X/1070/1/012130.
- Jiang, H.; Chen, J.; Dong, G.; Liu, T.; Chen, G. (2015): *Study on Hankel matrix-based SVD and its application in rolling element bearing fault diagnosis*. In: *Mechanical Systems and Signal Processing* 52-53, S. 338–359. DOI: 10.1016/j.ymssp.2014.07.019.
- Jolliffe, I. T. (1972): *Discarding Variables in a Principal Component Analysis. I: Artificial Data*. In: *Applied Statistics* 21 (2), S. 160–173. DOI: 10.2307/2346488.
- Joshi, A. (2019): *Electrical Characterisations of Bearings*. Dissertation. Chalmers University of Technology, Göteborg.
- Kirchner, E. (2007): *Leistungsübertragung in Fahrzeuggetrieben*. 1. Aufl. Berlin, Heidelberg. Springer. DOI: 10.1007/978-3-540-35292-1.



- 
- Kirchner, E. (2020): *Werkzeuge und Methoden der Produktentwicklung*. Von der Idee zum erfolgreichen Produkt. 1. Aufl. Berlin. Springer Vieweg. DOI: 10.1007/978-3-662-61762-5.
- Klocke, F.; König, W. (2006): *Fertigungsverfahren 3*. Abtragen, Generieren und Lasermaterialbearbeitung. 4. Aufl. Berlin, Heidelberg. Springer.
- Kohaut, A. (1943): *Riffelbildung in Wälzlagern infolge elektrischer Korrosion*. Habilitation. Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Würzburg.
- Kosfeld, R.; Eckey, H. F.; Türck, M. (2016): *Deskriptive Statistik*. 6. Aufl. Wiesbaden. Springer. DOI: 10.1007/978-3-658-13640-6.
- Kruse, R.; Borgelt, C.; Braune, C.; Klawonn, F.; Moewes, C.; Steinbrecher, M. (2015): *Computational Intelligence*. Eine methodische Einführung in Künstliche Neuronale Netze, Evolutionäre Algorithmen, Fuzzy-Systeme und Bayes-Netze. 2. Aufl. Wiesbaden. Springer Fachmedien Wiesbaden. DOI: 10.1007/978-3-658-10904-2.
- Kubat, M. (2017): *An Introduction to Machine Learning*. 2. Aufl. Cham. Springer International Publishing. DOI: 10.1007/978-3-319-63913-0.
- Lei, Y. (2017): *Intelligent fault diagnosis and remaining useful life prediction of rotating machinery*. Xi'an, Oxford, Cambridge. Xi'an Jiaotong University Press.
- Lei, Y.; He, Z.; Zi, Y. (2008): *A new approach to intelligent fault diagnosis of rotating machinery*. In: *Expert Systems with Applications* 35 (4), S. 1593–1600. DOI: 10.1016/j.eswa.2007.08.072.
- Lessmeier, C.; Kimotho, J. K.; Zimmer, D.; Sextro, W. (2016): *Condition Monitoring of Bearing Damage in Electromechanical Drive Systems by Using Motor Current Signals of Electric Motors: A Benchmark Data Set for Data-Driven Classification*: Proceedings of the European Conference of the PHM Society 2016, S. 1–17. DOI: 10.36001/phme.2016.v3i1.1577.
- Liu, W. (2014): *The prevalent motor bearing premature failures due to the high frequency electric current passage*. In: *Engineering Failure Analysis*; 45, S. 118–127. DOI: 10.1016/j.eng-failanal.2014.06.021.
- Löffler-Mang, M.; Naumann, H.; Schröder, G. (2020): *Handbuch Bauelemente der Optik*. Grundlagen, Werkstoffe, Geräte, Messtechnik. 8. Aufl. München. Hanser. DOI: 10.3139/9783446461260.
- Magdun, O.; Binder, A. (2009): *Calculation of roller and ball bearing capacitances and prediction of EDM currents*: IECON. Porto, 3-5.11.2009: IEEE, S. 1051–1056. DOI: 10.1109/IECON.2009.5414669.
- Marian, M.; Bartz, M.; Wartzack, S.; Rosenkranz, A. (2020): *Non-Dimensional Groups, Film Thickness Equations and Correction Factors for Elastohydrodynamic Lubrication: A Review*. In: *Lubricants* 8 (10), S. 1–20. DOI: 10.3390/lubricants8100095.
- Martin, G. (2021): *Die Wälzlagerimpedanz als Werkzeug zur Untersuchung von Oberflächenabweichungen in Wälzlagern*. Dissertation. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt. DOI: 10.26083/tuprints-00019712.

---

Mathias, J. (2015): *Auf dem Weg zu robusten Lösungen*. Modelle und Methoden zur Beherrschung von Unsicherheit in den Frühen Phasen der Produktentwicklung. Dissertation. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt.

Mathworks (2006a): *anovan*. N-way analysis of variance. Online verfügbar unter <https://www.mathworks.com/help/stats/anovan.html>, zuletzt geprüft am 17.08.2022.

Mathworks (2006b): *polyfit*. Polynomial curve fitting. Online verfügbar unter <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/polyfit.html>, zuletzt geprüft am 09.08.2022.

Mathworks (2010): *relieff*. Rank importance of predictors using ReliefF or RReliefF algorithm. Mathworks. Online verfügbar unter <https://www.mathworks.com/help/stats/relieff.html>, zuletzt geprüft am 02.11.2022.

Mathworks (2012): *pca*. Principal component analysis of raw data. Online verfügbar unter <https://www.mathworks.com/help/stats/pca.html#d123e694434>, zuletzt geprüft am 29.08.2022.

Mathworks (2016): *trainNetwork*. Train deep learning neural network. Mathworks. Online verfügbar unter [https://www.mathworks.com/help/deeplearning/ref/trainnetwork.html?search-Highlight=trainNetwork&s\\_tid=srchtitle\\_trainNetwork\\_1](https://www.mathworks.com/help/deeplearning/ref/trainnetwork.html?search-Highlight=trainNetwork&s_tid=srchtitle_trainNetwork_1), zuletzt geprüft am 01.12.2022.

DIN ISO 20816-1, 2017: *Mechanische Schwingungen – Messung und Bewertung der Schwingungen von Maschinen – Teil 1: Allgemeine Anleitungen*.

Modi, J. (2022): *Innovative Bearing Solutions for Electric Current Protection in E-mobility Applications*. 2022 STLE Annual Meeting & Exhibition. STLE. Orlando, Florida (USA), 18.05.2022.

Muetze, A. (2004): *Bearing Currents in Inverter-Fed AC-Motors*. Dissertation. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt.

Muetze, A.; Binder, A.; Vogel, H.; Hering, J. (2004): *Experimental evaluation of the endangerment of ball bearings due to inverter-induced bearing currents*: 2004 IEEE Industry Applications Conference. Seattle, 3-7 Oct. 2004: IEEE, S. 1989–1995. DOI: 10.1109/IAS.2004.1348741.

Muetze, A.; Oh, H. W. (2008): *Application of Static Charge Dissipation to Mitigate Electric Discharge Bearing Currents*. In: *IEEE Transactions on Industry Applications* 44 (1), S. 135–143. DOI: 10.1109/TIA.2007.912758.

Mütze, A. (2011): *Thousands of hits: on inverter-induced bearing currents, related work, and the literature*. In: *Elektrotechnik und Informationstechnik* 128 (11-12), S. 382–388. DOI: 10.1007/s00502-011-0053-1.

Nandi, S.; Toliyat, H. A.; Li, X. (2005): *Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors—A Review*. In: *IEEE Transactions on Energy Conversion* 20 (4), S. 719–729. DOI: 10.1109/TEC.2005.847955.

- 
- Neu, M.; Zaiat, A.; Harder, A.; Kirchner, E.; Hussong, J. (2022): *Multi-physics modeling of roller bearing raceway imperfections compared to electric measurements of an EHL point contact*. In: *Tribology International* 173 (2), S. 107668. DOI: 10.1016/j.triboint.2022.107668.
- Pico Technology Ltd. (2017): *PicoScope 4444*. See the difference: high-resolution differential USB oscilloscope.
- Piske, L. (2020): *Experimentelle Untersuchung strominduzierter Wälzlagerschädigung*. Bachelorthesis. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt.
- Plazenet, T.; Boileau, T.; Caironi, C.; Nahid-Mobarakeh, B. (2021): *Influencing Parameters on Discharge Bearing Currents in Inverter-Fed Induction Motors*. In: *IEEE Transactions on Energy Conversion* 36 (2), S. 940–949. DOI: 10.1109/tec.2020.3018630.
- Prashad, H. (2005): *Tribology in electrical environments*. Amsterdam. Elsevier.
- Puchtler, S.; Schirra, T.; Kirchner, E.; Späck-Leigsnering, Y.; Gersem, H. de (2022): *Capacitance calculation of unloaded rolling elements – Comparison of analytical and numerical methods*. In: *Tribology International* 176 (1), S. 1–8. DOI: 10.1016/j.triboint.2022.107882.
- Puchtler, S.; van der Kuip, J.; Kirchner, E. (2023): *Analyzing Ball Bearing Capacitance Using Single Steel Ball Bearings*. In: *Tribology Letters* 71 (2), S. 1–10. DOI: 10.1007/s11249-023-01706-7.
- Radnai, B. (2016): *Wirkmechanismen bei spannungsbeaufschlagten Wälzlagern*. Dissertation. Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern.
- Radnai, B.; Gemeinder, Y.; Sauer, B.; Binder, A. (2015): *Schädlicher Stromdurchgang Forschungsvorhaben Nr. 650 I*. Untersuchung des Schädigungsmechanismus und der Zulässigen Lagerstrombelastung von Wälzlagern in E-Motoren und Generatoren Verursacht durch Parasitäre Hochfrequente Lagerströme. Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (Heft 1127).
- Randall, R. B. (2011): *Vibration-based condition monitoring*. Industrial, aerospace and automotive applications. Chichester, Hoboken. Wiley. DOI: 10.1002/9780470977668.
- Richter, S. (2019): *Statistisches und maschinelles Lernen*. Gängige Verfahren im Überblick. 1. Aufl. Berlin, Heidelberg. Springer. DOI: 10.1007/978-3-662-59354-7.
- Robnik-Sikonja, M.; Kononenko, I. (1997): *An Adaptation of Relief for Attribute Estimation in Regression*: 14th International Conference on Machine Learning. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc, S. 296–304.
- Saucedo-Dorantes, J.-J.; Zamudio-Ramirez, I.; Cureno-Osornio, J.; Osornio-Rios, R. A.; Antonino-Daviu, J. A. (2021): *Condition Monitoring Method for the Detection of Fault Graduality in Outer Race Bearing Based on Vibration-Current Fusion, Statistical Features and Neural Network*. In: *Applied Sciences* 11 (17), S. 1–19. DOI: 10.3390/app11178033.
- Sauer, B. (2016): *Konstruktionselemente des Maschinenbaus 1*. Grundlagen der Bechnung und Gestaltung von Maschinenelementen. 9. Aufl. Berlin, Heidelberg. Springer. DOI: 10.1007/978-3-642-39501-7.

- 
- Sauer, B. (2018): *Konstruktionselemente des Maschinenbaus 2*. Grundlagen von Maschinenelementen für Antriebsaufgaben. 8. Aufl. Berlin. Springer.
- Schaeffler Medias (2022): 51305. Axial-Rillenkugellager. Online verfügbar unter <https://medias.schaeffler.de/de/p/pdf/394611>, zuletzt geprüft am 21.03.2022.
- Schaeffler Monitoring Services GmbH (2019): *Condition Monitoring Praxis*. Handbuch zur Schwingungs-Zustandsüberwachung von Maschinen und Anlagen. 1. Aufl. Mainz.
- Schaeffler Technologies AG & Co. KG (2000): *Wälzlagerschäden*. Hg. v. Schaeffler Technologies AG & Co. KG.
- Schiferl, R. F.; Melfi, M. J. (2004): *Bearing current remediation options*. In: *IEEE Industry Applications Magazine* 10 (4), S. 40–50. DOI: 10.1109/mia.2004.1311162.
- Schirra, T. (2021): *Phänomenologische Betrachtung der sensorisch nutzbaren Effekte am Wälzlager – Einfluss unbelasteter Wälzkörper auf die elektrische Impedanz*. Dissertation. TU Darmstadt, Darmstadt. DOI: 10.26083/tuprints-00017957.
- Schirra, T.; Martin, G.; Puchtler, S.; Kirchner, E. (2021): *Electric impedance of rolling bearings - Consideration of unloaded rolling elements*. In: *Tribology International* 158, S. 1–8. DOI: 10.1016/j.triboint.2021.106927.
- Schirra, T.; Martin, G.; Vogel, S.; Kirchner, E. (2018): *Ball Bearings as Sensors for Systematical Combination of Load and Failure Monitoring: DS 92: Proceedings of the DESIGN 2018 15th International Design Conference*. Dubrovnik, 21-24 Mai 2018. Zagreb: Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb, S. 3011–3022. DOI: 10.21278/idc.2018.0306.
- Schneider, V.; Bader, N.; Liu, H.; Poll, G. (2022a): *Method for in situ film thickness measurement of ball bearings under combined loading using capacitance measurements*. In: *Tribology International* 171, S. 1–19. DOI: 10.1016/j.triboint.2022.107524.
- Schneider, V.; Behrendt, C.; Höltje, P.; Cornel, D.; Becker-Dombrowsky, F. M.; Puchtler, S. et al. (2022b): *Electrical Bearing Damage, A Problem in the Nano- and Macro-Range*. In: *Lubricants* 10 (8), S. 1–20. DOI: 10.3390/lubricants10080194.
- Schneider, V.; Stoffbrügger, J. O.; Poll, G.; Ponick, B. (2022c): *Stromdurchgang am Wälzlager. Verhalten Stromführender Wälzlager*. Forschungsvorhaben Nr. 863 I. Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (Heft 1501).
- Shatri, E. (2022): *Feature Engineering zur Zustandsüberwachung von Wälzlagern*. Masterthesis. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt.
- Siebertz, K.; van Bebber, D.; Hochkirchen, T. (2017): *Statistische Versuchsplanung*. Design of Experiments (DoE). 2. Aufl. Berlin, Heidelberg. Springer.

- 
- Singh, S.; Howard, C. Q.; Hansen, C. H. (2015): *An extensive review of vibration modelling of rolling element bearings with localised and extended defects*. In: *Journal of Sound and Vibration* 357 (3), S. 300–330. DOI: 10.1016/j.jsv.2015.04.037.
- SKF (2022): *NU 203 ECP*. Einreihiges Zylinderrollenlager, Ausführung NU. SKF. Online verfügbar unter [https://www.skf.com/de/products/rolling-bearings/roller-bearings/cylindrical-roller-bearings/single-row-cylindrical-roller-bearings/productid-NU 203 ECP](https://www.skf.com/de/products/rolling-bearings/roller-bearings/cylindrical-roller-bearings/single-row-cylindrical-roller-bearings/productid-NU%203%20ECP), zuletzt geprüft am 06.12.2022.
- Spikes, H. A. (2020): *Triboelectrochemistry: Influence of Applied Electrical Potentials on Friction and Wear of Lubricated Contacts*. In: *Tribology Letters* 68 (3), S. 1–27. DOI: 10.1007/s11249-020-01328-3.
- Tischmacher, H. (2017a): *Bearing wear in electric motors and rotating equipment under the aspect of VSD converter operation: 46th Turbomachinery & 33rd Pump Symposia*. Houston, 11-14 Dezember 2017.
- Tischmacher, H. (2017b): *Systemanalysen zur elektrischen Belastung von Wälzlagern bei umrichter-gespeisten Elektromotoren*. Leibniz Universität Hannover, Hannover.
- Tischmacher, H. (2018): *Bearing Wear Condition Identification on Converter-fed Motors: 2018 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*. Amalfi, 20-22 Juni 2018. Piscataway: IEEE. DOI: 10.1109/speedam.2018.8445293.
- Tischmacher, H.; Gattermann, S. (2010): *Bearing currents in converter operation: XIX International Conference on Electrical Machines (ICEM), 2010*. IEEE. Piscataway: IEEE. DOI: 10.1109/icelmach.2010.5608126.
- Tom, K. F. (2015): *A Primer on Vibrational Ball Bearing Feature Generation for Prognostics and Diagnostics Algorithms*. U.S. Army Research Laboratory. Online verfügbar unter <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA614145>, zuletzt geprüft am 12.10.2022.
- Weicker, M.; Binder, A. (2022): *Characteristic Parameters for Electrical Bearing Damage: 2022 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*. Sorrento, Italy: IEEE, S. 785–790. DOI: 10.1109/SPEEDAM53979.2022.9842046.
- Wilcoxon, F. (1945): *Individual Comparisons by Ranking Methods*. In: *Biometrics Bulletin* 1 (6), S. 80. DOI: 10.2307/3001968.
- Wittek, E. (2017): *Charakterisierung des Schmierungszustandes im Rillenkugellager mit dem kapazitiven Messverfahren*.
- Yang, Y.; Arshad-Ali, K.; Roeleveld, J.; Emadi, A. (2016): *State-of-the-art electrified powertrains-hybrid, plug-in, and electric vehicles*. In: *International journal of powertrains* 5 (1), S. 1–29.
- Zika, T.; Buschbeck, F.; Preisinger, G.; Gebeshuber, I. C.; Gröschl, M. (2009a): *Surface damage of rolling bearings caused by discrete current flow*. In: *ÖTG Symposium 2009 – Lebensdauer und Energieeffizienz – Product Life and Efficiency*, S. 1–9.

---

Zika, T.; Gebeshuber, I. C.; Buschbeck, F.; Preisinger, G.; Gröschl, M. (2009b): *Surface analysis on rolling bearings after exposure to defined electric stress*. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, S. 787–797. DOI: 10.1243/13506501JET538.



---

## Eigene Veröffentlichungen

### 2019

Neu, M.; Harder, A.; Kirchner, E.: Sensorische Eigenschaften von Wälz- und Gleitlagerungen: Beherrschen von Unsicherheiten von und durch die Zusatzfunktion. In: VDI Berichte, 2348, S. 183-192, Düsseldorf, VDI Verlag GmbH, 13. VDI Fachtagung Gleit- und Wälzlagerungen, Schweinfurt. 2019.

Harder, A.; Kirchner, E.: Untersuchung der sensorischen Eigenschaften von Gleitlagern. In: Schlecht, Berthold (Hrsg.): Dresdner Maschinenelemente Kolloquium DMK 2019, S. 533-542, Dresden, Sierke Verlag, Dresdner Maschinenelemente Kolloquium, Dresden. 2019.

### 2021

Harder, A.; Piske, L.; Neu, M.; Kirchner, E.: Initiierungs- und Abklingeffekte von elektrischen Schädigungsmechanismen im Wälzlager. In: VDI Berichte, 2378, S. 65-74 Düsseldorf, VDI Verlag GmbH, 14. Fachtagung VDI Gleit- und Wälzlagerungen. 2021.

Harder, A.; Gross, H. J.; Vorwerk-Handing, G.; Kirchner, E.: Using Effect Catalogues for the Design of Sensing Machine Elements – Method and Exemplary Application. In: Proceedings of the International Conference on Engineering Design (ICED21). S. 3359-3368. Cambridge University Press. Gothenburg, Sweden. 2021.

### 2022

Harder, A.; Hausmann, M.; Kraus, B.; Kirchner, E.; Hasse, A: Sensory Utilizable Design Elements: Classifications, Applications and Challenges. Applied Mechanics, 3 (1), S. 160-173.MDPI. 2022.

Neu, M.; Zaiat, A.; Harder, A.; Kirchner, E.; Hussong, J. Multi-physics modeling of roller bearing raceway imperfections compared to electric measurements of an EHL point contact. Tribology International, 173, Elsevier. 2022.

Zaiat, A.; Puchtler, S.; Harder, A.; Neu, M.; Kirchner, E.: A comparison of an analytical and a numerical approach to calculate the electrical capacitance of rolling element bearings. In: 4th International FVA-Conference, S. 8-15, Würzburg, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., FVA Bearing World, Würzburg. 2022.

Harder, A.; Zaiat, A.; Becker-Dombrowsky, F. M.; Puchtler, S.; Kirchner, E.: Investigation of the Voltage-Induced Damage Progression on the Raceway Surfaces of Thrust Ball Bearings. Machines, 10 (10). MDPI. 2022.

### 2023

Becker-Dombrowsky, F.M., Hausmann, M., Welzbacher, P., Harder, A., Kirchner, E.: Systematic identification of disturbance factors on electric characteristics of mechanical gearboxes. Forschung im Ingenieurwesen, Springer. 2023.





---

## Betreute studentische Arbeiten

### 2019

Ikreni, Miroslav; Klyk, Maximilian; Rettenmaier, Frank; Thein, Johannes; Thoma, Christian: Entwicklung eines lenkbaren Rollenprüfstands zur Untersuchung von Fahrerassistenzsystemen. Advanced Design Project. 2019.

Sparovek, Marco: Experimentelle Untersuchung eines Prüfstandes zur Impedanzmessung in Gleitlagern. Bachelor-Thesis. 2019.

Gassen, Thomas; Heinz, Felix; Lenz, Mark; Pichl, Felix; Schimpf Malte; Steppan, Rafael; Entwicklung einer Prüfkammer für die experimentelle Untersuchung von Gleitlagern im elektrischen Strompfad: Advanced Design Project. 2019.

### 2020

Groß, Hans-Joachim: Entwicklung eines Messkonzeptes für selbstschmierende Gleitlagerbuchsen. Bachelor-Thesis. 2020.

Gilbert, Philipp Alexander: Konstruieren eines Verstellmechanismus zur Positionierung von Stützlagerungen an einem Gleitlagerprüfstand. Bachelor-Thesis. 2020.

Piske, Lukas: Experimentelle Untersuchung strominduzierter Wälzlagerschädigung. Bachelor-Thesis. 2020.

### 2021

Kortenbusch, Patrick: Methodische Entwicklung von Sensorkonzepten in hydrodynamischen Gleitlagern. Bachelor-Thesis. 2021.

Apostolov, Petar: Auslegung der Schmierstoffversorgung eines Prüfstandes zur Untersuchung der sensorischen Eigenschaften von Gleitlagern. Bachelor-Thesis. 2021.

Yavuz, Bugra: Untersuchung der spannungsinduzierten Änderung von Laufbahnoberflächen in Wälzlagern. Bachelor-Thesis. 2021.

Becker, Florian-Michael: Entwicklung eines Mess- und Auswerteverfahrens zur Schadensfrüherkennung an Wälzlagern durch Impedanzmessung. Master-Thesis. 2021.

### 2022

Dittrich, Jan: Synthese von Auswertestrategien zur Interpretation von Messdaten elektrischer Oberflächenschäden in Wälzlagern. Master-Thesis. 2022.