



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Die Wälzlagerimpedanz als Werkzeug zur Untersuchung von Oberflächenabweichungen in Wälzlagern

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt

zur Erlangung des Grades
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
angenommene

DISSERTATION

vorgelegt von

Georg Martin, M.Sc.
aus Bad Camberg

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Eckhard Kirchner
Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Stephan Rinderknecht

Tag der Einreichung: 26. Januar 2021
Tag der mündlichen Prüfung: 27. April 2021

Darmstadt 2021
D17

Die Wälzlagerimpedanz als Werkzeug zur Untersuchung von Oberflächenabweichungen
in Wälzlagern

Genehmigte Dissertation von Georg Martin, M.Sc. aus Bad Camberg

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Eckhard Kirchner

Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Stephan Rinderknecht

Tag der Einreichung: 26. Januar 2021

Tag der mündlichen Prüfung: 27. April 2021

Darmstadt 2021 – D17

Bitte zitieren Sie dieses Dokument als:

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-197120

URL: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/19712>

Dieses Dokument wird bereitgestellt von tuprints,

E-Publishing-Service der TU Darmstadt

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

tuprints@ulb.tu-darmstadt.de

Die Veröffentlichung steht unter folgender Creative-Commons-Lizenz:

Namensnennung – Keine kommerzielle Nutzung – Keine Bearbeitung 4.0 International
(CC BY-NC-ND 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Erklärung

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

Darmstadt, 26. Januar 2021

* 

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Produktentwicklung und Maschinenelemente der Technischen Universität Darmstadt.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, dem Leiter des Fachgebiets *pmd*, Prof. Dr.-Ing. Eckhard Kirchner, für die Betreuung der Arbeit, die wertvollen fachlichen Anregungen und für die Begleitung über viereinhalb Jahre am *pmd*. Die Diskussionen mit Ihnen haben den Inhalt dieser Arbeit maßgeblich geprägt und geschärft. Besonders hervorheben möchte ich die Freiräume zur Arbeit an innovativen Ideen, die ich in dieser Zeit genießen durfte.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Stephan Rinderknecht danke ich für die freundliche Übernahme des Koreferats und für das Interesse an diesem Thema, dass Sie damit zeigen.

Viele weitere Menschen haben mich in den letzten viereinhalb Jahren und darüber hinaus unterstützt. Allen Kollegen am *pmd* danke ich für den Zusammenhalt und die Unterstützung, die gerade in schwierigen Moment des Forscherdaseins eine große Stütze sind, und mir immer in Erinnerung bleiben werden. Stellvertretend danke ich André Harder für die Korrektur des Manuskripts. Ein ganz besonderer Dank gilt den *Smarties* Sven Vogel, Tobias Schirra, Stefan Schork und Gunnar Vorwerk-Handing – ohne Eure Ermutigung und die fruchtbaren Diskussionen gäbe es diese Arbeit nicht.

Auch bei den Studenten, die mich im Rahmen von Projekt- und Abschlussarbeiten oder als Hiwis unterstützt haben und damit die Universität als *Gemeinschaft der Lehrenden und Lernenden* mit Leben erfüllten, bedanke ich mich. Stellvertretend seien Paul Mayerhöfer und Lukas Piske erwähnt, die einen Großteil der Versuche durchführten.

Den Mitarbeitern der Werkstatt danke ich für die unkomplizierte Zusammenarbeit und die immer schnelle Hilfe bei den meistens viel zu kurzfristigen Aufträgen.

Der letzte und wichtigste Dank gilt meinen Eltern und meinen Bruder für Euer unbedingtes Vertrauen, Unterstützung und Ermutigung.

Darmstadt, im Juli 2021
Georg Martin

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	VIII
Symbolverzeichnis	IX
Kurzfassung	XIII
Abstract	XIV
1. Einleitung	1
1.1. Motivation	1
1.2. Zielstellung und Aufbau der Arbeit	3
2. Stand der Forschung	4
2.1. Grundlagen von Wälzkontakten in Wälzlagern	4
2.2. Elektrische Eigenschaften von EHD-Kontakten	8
2.2.1. Durchschlagspannung	9
2.2.2. Kapazität	10
2.2.3. Widerstand	11
2.2.4. Impedanz	14
2.3. Wälzlagerschäden	14
2.3.1. Pittings	14
2.3.2. Strominduzierte Wälzlagerschäden	17
2.4. Zustandsüberwachung von Wälzlagern	18
2.4.1. Schwingungsüberwachung	19
2.4.2. Weitere Messtechniken	22
2.5. Forschungsbedarf	22
3. Forschungsdesign	25
3.1. Forschungslücke und Zielsetzung	25
3.2. Forschungsfragen und Gliederung	26
4. Versuchseinrichtungen	29
4.1. Wälzlagerprüfstand	29
4.1.1. Prüfstandsaufbau für Strukturversuche	30
4.1.2. Prüfstandsaufbau für Lebensdauerversuche	31
4.2. Impedanz-Messverfahren	32
4.2.1. Impedanz-Messverfahren für Versuche mit künstlich eingebrachten Oberflächenstrukturen	33

4.2.2. Impedanz-Messverfahren für Lebensdauerversuche	37
4.3. Laserstrukturierung	39
5. Lebensdauerversuche	41
5.1. Versuchsplanung	41
5.2. Versuchsdurchführung	42
5.3. Qualitative Analyse der Impedanz während der Lebensdauerversuche . .	45
5.3.1. Einlaufphase	45
5.3.2. Auftreten von Pittings	48
5.4. Quantitative Analyse der Impedanz während der Lebensdauerversuche .	52
5.4.1. Einlaufphase	53
5.4.2. Auftreten von Pittings	55
5.5. Erkenntnisse der Lebensdauerversuche	58
6. Modellierung des Zusammenhangs zwischen Wälzlagerimpedanz und Oberflächenabweichungen	61
6.1. Planung der Versuche mit variierender Strukturgeometrie	62
6.1.1. Lager und Schmierstoff	63
6.1.2. Betriebsbedingungen	63
6.1.3. Strukturgeometrie	65
6.1.4. Versuchsplan	67
6.2. Versuchsdurchführung	68
6.3. Vermessung der Strukturgeometrien	69
6.4. Ableitung von Merkmalen aus dem Impedanzsignal	73
6.4.1. Qualitative Analyse	74
6.4.2. Metriken zur Beschreibung langsamer Ausschläge	81
6.4.3. Metrik zur Beschreibung schneller Ausschläge	86
6.5. Auswertung der Versuche mit variierender Strukturgeometrie	87
6.5.1. Wälzweg langsamer Ausschläge	90
6.5.2. Höhe langsamer Ausschläge	94
6.5.3. Häufigkeit schneller Ausschläge	100
6.5.4. Verifikation	102
6.6. Planung der Versuche mit variierender Lokalisierung	106
6.7. Ergebnisse der Versuche mit variierender Lokalisierung	107
6.7.1. Qualitative Analyse	107
6.7.2. Quantitative Analyse des Abstands der Ausschläge	111
6.7.3. Übertragung des Impedanzmodells auf Außenring und Wälzkörper	113
6.8. Erkenntnisse der Versuche mit künstlichen Oberflächenstrukturen	114
7. Validierung des Modells anhand der Lebensdauerversuche	117
7.1. Auftreten schneller Ausschläge in Lebensdauerversuchen	117
7.2. Anwendung der Metriken während des Schadensfortschritts	118
7.3. Erkenntnisse der Validierung	124

8. Zusammenfassung und Ausblick	127
8.1. Zusammenfassung	127
8.2. Ausblick	129
A. Versuchsdaten der Dauerversuche	XVI
A.1. Abbildungen der entstandenen Pittings	XVI
A.2. Impedanzsignale aller Lager	XXI
A.3. Ausschläge während Schadensfortschritt	XXVII
A.4. Mittelwert, Kurtosis und Standardabweichung vor Initialschaden	XXIX
B. Versuchspläne	XXXIV
C. Geometrieparameter der verwendeten Lager	XXXVI
Literatur	XXXVII
Betreute studentische Arbeiten	XLV
Lebenslauf	XLVII

Abkürzungsverzeichnis

AE	Acoustic emission
BPFI	ball pass frequency inner race
BPFO	ball pass frequency outer race
BSF	ball spin frequency
DFT	Diskrete Fourier-Transformation
DMS	Dehnungsmessstreifen
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
EHD	Elastohydrodynamik
EDM	Electric discharge machining
FTF	fundamental train frequency
FVA	Forschungsvereinigung Antriebstechnik
IAS	Instantaneous angular speed
LCR	Induktivität (L), Kapazität (C), Widerstand (R)
PCT	Percent Contact Time
RUL	Remaining useful life
SRR	Slide-to-roll ratio
TEM	Transversal-Elektromagnetisch
<i>pmd</i>	Fachgebiet Produktentwicklung und Maschinenelemente

Symbolverzeichnis

Lateinische Buchstaben

Symbol	Einheit	Beschreibung
a		Große Halbachse der Hertzschen Fläche
a_1	m	Lebensdauerbeiwert für die Zuverlässigkeit
b	m	Kleine Halbachse der Hertzschen Fläche
A_{Hz}	m ²	Hertz'sche Fläche
b_k		Blockzugehörigkeit im Versuchsplan
C_0	N	Statische Tragzahl
C_A	F	Parasitäre Kapazität des Prüfaufbaus
C_{iso}	F	Kapazität der Isolierschicht der Lagersitze
C_p	F	Kapazität des Wälzlagers
d_{IR}	m	Laufbahndurchmesser des Innenrings
d_{AR}	m	Laufbahndurchmesser des Außenrings
D_W	m	Durchmesser der Wälzkörper
D_T	m	Teilkreisdurchmesser des Lagers
E	N/mm ²	E-Modul
f	Hz	Frequenz
f_{AR}	Hz	Überrollfrequenz am Außenring
f_{IR}	Hz	Überrollfrequenz am Innenring
f_K	Hz	Drehfrequenz des Käfigs
f_m	Hz	Messfrequenz der Impedanz
f_n	Hz	Drehfrequenz des Innenrings
$f_{n,\text{WK}}$	Hz	Drehzahl des Wälzkörpersatzes
f_p	Hz	Durchlassfrequenz des Tiefpassfilters
f_s	Hz	Abtastrate des Oszilloskops
$f_{s,Z}$	Hz	Messrate der Impedanz
f_{WK}	Hz	Überrollfrequenz am Wälzkörper
F_r	N	Radiale Lagerlast
F_a	N	Axiale Lagerlast
F		F-Wert der ANOVA
h_0	m	Zentrale Schmierfilmdicke
h_{min}	m	Minimale Schmierfilmdicke
I	A	Elektrischer Strom
j		imaginäre Einheit
J_b	A/mm ²	Scheinbare Lagerstromdichte

k		Kurtosis
k_C		Randefflussfaktor für die Kapazität
k_R		Randefflussfaktor für den Widerstand
l_p	m	Länge eines Pittings
l_{WK}	m	Abstand der Kontaktpunkte zwischen benachbarten Wälzkörpern und Laufbahn
L_{10mh}	s	Modifizierte Referenzlebensdauer (Zeit)
L_A	H	Parasitäre Induktivität des Prüfaufbaus
L_{nmr}	s	Modifizierte Referenzlebensdauer (Umdrehungen)
m_i		Metriken zur Beschreibung der Ausschläge des Impedanzsignals
n	min^{-1}	Drehzahl
$n_{a,schnell}$		Anzahl von Ausschlägen mit schnellen Ausschlägen je Messung
$n_{a,ges}$		Gesamtzahl der Ausschläge je Messung
n_{ol}		Überlappung Messpunkte je Abschnitt für Impedanzberechnung
n_A		Anzahl Messpunkte je Abschnitt für Impedanzberechnung
p_s		Relative Häufigkeit schneller Ausschläge
$p_{\ddot{u}}$		Überlebenswahrscheinlichkeit
Q_{ψ}	N	Wälzkörperlast
$r_{11}, r_{12}, r_{21}, r_{22}$	m	Hauptkrümmungsradien bei Hertzischem Punktkontakt
R^2		Bestimmtheitsmaß eines Regressionsmodells
R_{iso}	F	Widerstand der Isolierschicht der Lagersitze
R_q	m	Quadratische Rauheit
R_p	Ω	Widerstand des Wälzlagers
S_0		Statische Sicherheit
S^2		Varianz
SS_G		Gesamte Variabilität (Fehlerquadratsumme) der Messwerte
SS_{Fj}		Variabilität (Fehlerquadratsumme) der Messwerte aufgrund des Faktors j
SS_E		Gesamte Variabilität (Fehlerquadratsumme) der Messwerte aufgrund des Restfehlers
t	s	Zeit
t_1	s	Zeit des Beginns eines Ausschlags
t_2	s	Zeit des Endes eines Ausschlags
t_m	s	Zeitpunkt des Maximums eines Ausschlags
t_a^*		Dimensionsloser Zeitabstand von Ausschlägen
t_p	m	Tiefe eines Pittings
T	$^{\circ}\text{C}$	Öltemperatur
T_m	s	Dauer einer Messung

U	V	Elektrische Spannung
U_m	V	Messspannung (Einstellung am Signalgenerator)
U_G	V	Messspannung (tatsächlich am Prüfstand anliegend)
w_p	m	Breite eines Pittings
x_j		Einflussfaktoren
X		Haupteffekt
z		Anzahl der Wälzkörper im Lager
Z	Ω	Elektrische Impedanz; im Besonderen: Impedanz des Wälzlagers (Außerhalb von Kapitel 4)
Z_{ref}	Ω	Referenzniveau der Impedanz
Z_R	Ω	Impedanz eines Widerstands
Z_C	Ω	Impedanz eines Kondensators
Z_{WL}	Ω	Impedanz des Wälzlagers (In Kapitel 4)
Z_{CA}	Ω	Impedanz der parasitären Kapazität des Messaufbaus
Z_{LA}	Ω	Impedanz der parasitären Induktivität des Messaufbaus
Z_A	Ω	Impedanz des gesamten Prüfaufbaus

Griechische Buchstaben

Symbol	Einheit	Beschreibung
β		Betriebsdruckwinkel
β		Parameter der Regressionsmodelle
χ		Beiwert der Hertz'schen Gleichungen
Δf	Hz	Seitenbandabstand
Δt	Hz	Dauer eines Ausschlags
Δl	m	Wälzweg während eines Ausschlags
ε_0	F/m	Dielektrizitätskonstante
ε_r		Relative Permittivität
Λ		Spezifische Schmierfilmdicke
ΔC_p	F	Ausschlagshöhe der Kapazität
ΔR_p	Ω	Ausschlagshöhe des Widerstands (langsame Ausschläge)
$\Delta \text{Im}(Z)$	Ω	Ausschlagshöhe des Imaginärteils der Impedanz
$\Delta \text{Re}(Z)$	Ω	Ausschlagshöhe des Realteils der Impedanz
ν		Querkontraktionszahl
ω	1/s	Kreisfrequenz der Messspannung
φ_K		Drehwinkel des Wälzkörpersatzes
φ_{IR}		Drehwinkel des Innenrings
φ_{WK}		Winkel zwischen benachbarten Wälzkörpern
ρ	$\Omega \text{ m}$	Spezifischer Widerstand
ρ^*	1/m	Kumuliertes Krümmungsmaß
σ		Standardabweichung

σ	Standardabweichung
ξ	Beiwert der Hertz'schen Gleichungen

Weitere Symbole

Symbol	Einheit	Beschreibung
\ominus		Untere Faktorstufe
\oplus		Obere Faktorstufe

Indizes

iso	Eigenschaften der Isolationsschicht
Z	Hydraulikzylinder
WL	Prüflager
K	Käfig
MR	Mischreibung
AR	Außenring
IR	Innenring
WK	Wälzkörper
VP	Versuchspunkt

Kurzfassung

In der Wälzlagerforschung ist seit langem bekannt, dass die elektrische Impedanz von Wälzlagern durch die Schmierfilmdicke, die Hertzsche Fläche sowie durch metallische Kontakte von Rauheitsspitzen im Wälzkontakt bestimmt wird. Die Frage, ob diese Zusammenhänge genutzt werden können, um anhand der Impedanz auf die Oberflächeneigenschaften zu schließen, wurde bisher nicht betrachtet. Da Wälzlagerschäden, z.B. Pittings, Abweichungen der Oberflächen von der Nenngeometrie sind, können solche Rückschlüsse genutzt werden, um Wälzlagerschäden im Sinne einer Zustandsüberwachung zu diagnostizieren. Als Grundlage für die Entwicklung dieses Ansatzes zur Zustandsüberwachung wird in dieser Arbeit untersucht, wie die Wälzlagerimpedanz mit Oberflächenabweichungen zusammenhängt. Dafür wird zunächst eine hochfrequente Messung der Lagerimpedanz entwickelt und umgesetzt. Daraufhin werden Dauerversuche mit fünf Schrägkugellagern durchgeführt, wobei die Impedanz bis zur Entstehung eines Pittings und darüber hinaus während des weiteren Fortschreitens des Schadens, gemessen wird. Es zeigen sich charakteristische Ausschläge in den Impedanzsignalen, die den entstandenen Schäden zugeordnet werden können. Um ein besseres Verständnis der Zusammenhänge zwischen Impedanz und Oberflächenabweichungen zu erlangen, wird eine weitere Versuchsreihe mit künstlich eingebrachten Strukturen durchgeführt. Dabei werden verschiedene Merkmale der Ausschläge im Impedanzsignal untersucht, davon erweisen sich zwei Merkmale als besonders aussagekräftig, um die eingebrachten Oberflächenstrukturen zu charakterisieren. Anhand der Dauer der Ausschläge kann auf die Länge der Strukturen geschlossen werden. Anhand des zeitlichen Abstands kann, durch Zuordnung zu den Überrollfrequenzen, erkannt werden kann ob eine Oberflächenabweichung auf dem Außenring, dem Innenring oder einem Wälzkörper vorliegt. Diese an künstlichen Oberflächenstrukturen gewonnenen Erkenntnisse werden abschließend auf die Daten der Dauerversuche angewandt. Die Dauer der Ausschläge stimmt bei drei von fünf Lagern gut mit der tatsächlichen Schadenslänge überein, bei zwei weiteren Lagern können keine validen Aussagen abgeleitet werden. Die Zuordnung eines Schadens zu Außenring oder Innenring – Wälzkörperschäden traten nicht auf – ist anhand der Überrollfrequenzen in allen fünf Lagern möglich. Die prinzipielle Eignung der Impedanz als Werkzeug zur Zustandsüberwachung wird damit bestätigt. Um die verbleibenden Unsicherheiten zu reduzieren, eine zuverlässige Diagnose zu erreichen und ein praktisch anwendbares Werkzeug zu entwickeln, sind weitere experimentelle oder numerische Untersuchungen nötig, die abschließend skizziert werden.

Abstract

It is common knowledge in bearing research that the electric impedance of rolling bearings is governed by the lubrication film thickness, the Hertzian contact area and metallic contact of roughness asperities. However, the possibility to infer information about surface deviations from these well-known relationships has not been addressed so far. Such inferences could be used for condition monitoring of rolling bearings, since many common types of bearing damage, e.g. pittings or spalls, are in fact deviations of the surface from the nominal geometry. In order to lay the foundations for the development of such a condition monitoring approach, this thesis investigates the relationship between bearing impedance and surface deviations. As a first step, endurance tests are conducted with five angular contact ball bearings. Impedance is measured until the occurrence of initial damage and during damage progression. Characteristic peaks occur in the impedance signal, which can be attributed to the damage. In order to obtain a deeper understanding of the relationships between surface deviations and bearing impedance, a second study is performed with artificial surface structures. Several features of the impedance peaks are investigated, two of them deliver meaningful and reliable information about the surface structures. The structure length can be calculated from the duration of the peaks. The location of the damage on outer raceway, inner raceway or rolling elements can be inferred by comparing the time lag between the peaks to the known ball pass frequencies. These insights gained in the investigations on artificial structures are then applied to the endurance test data. For three of the five bearings tested, the duration of the peaks agrees well with the actual length of the pittings. For two bearings, no valid conclusions about the damage geometry can be drawn. However, the location of the damage on outer or inner raceway – no damage on a rolling element occurred during the tests – can be correctly identified for all five bearings. The results of this thesis show that the bearing impedance can be used as a tool for condition monitoring of rolling bearings. In order to reduce the remaining uncertainties, achieve a reliable diagnosis and develop a tool for practical application, further numeric or experimental work is necessary, as described in the closing chapter.

1. Einleitung

Ein wichtiges Ziel der Digitalisierung des Maschinen- und Anlagenbaus, die unter den Überschriften *Industrie 4.0* und *Industrial Internet of Things* eine tiefgreifende Transformation der Wertschöpfungsketten verursacht, ist die vorausschauende Wartung [1], häufig auch im deutschsprachigen Raum mit der englischen Bezeichnung *Predictive Maintenance* versehen. Von Randall wird ausgeführt, wie hierdurch gegenüber den althergebrachten Instandhaltungsstrategie der korrektiven und der zeitbasieren präventiven Wartung bedeutende Kosteneinsparungen erreicht werden können [2]. Bei der korrektiven Wartung wird eine Maschine bis zum Ausfall betrieben, was mit Folgeschäden und hohen Stillstandskosten einhergeht. Die rein reinlaufzeitbasierte präventiven Wartung folgt festen Wartungsintervallen, nach denen Wartungen durchgeführt werden, bevor es zu Ausfällen kommt. Hierbei werden zwangsläufig Maschinen gewartet, die noch deutlich länger fehlerfrei laufen könnten, was mit Wartungs- und Stillstandskosten verbunden ist. Ziel der vorausschauenden Wartung ist es dagegen, basierend auf dem Wissen über einen bevorstehenden oder bereits eingetretenen Schaden eine Maschine genau zum optimalen Zeitpunkt zu warten, bevor ein Schaden auftritt.

1.1. Motivation

Notwendige Voraussetzung für die Umsetzung einer vorausschauenden Wartung sind zuverlässige Informationen über den Schädigungszustand einer Maschine. Diese Informationen können z.B. durch die Analyse der Belastung und eine darauf aufbauende Prognose der Restlebensdauer gewonnen werden [3]. Ein zweiter Weg zur Information über den Schädigungszustand besteht in der Analyse von Sensordaten um einen bereits eingetreten Schaden in möglichst frühem Stadium zu erkennen [2], also in der Diagnose bzw. Überwachung des Maschinenzustands, häufig mit dem englischen Stichwort *Condition Monitoring* bezeichnet. Wälzlager als Maschinenelemente, die in beinahe jeder Maschine verbaut sind und Lasten zwischen rotierendem und stehendem System übertragen, stehen dabei besonders im Fokus, z.B. stehen Lagerschäden für 85 % aller Schäden in Motorspindeln von Werkzeugmaschinen [4]. Die Zustandsüberwachung von Wälzlagern ist seit Jahrzehnten Gegenstand der Forschung und hat eine Vielzahl von Messverfahren und Auswertungsmethoden hervorgebracht [2]. Dabei ist bis heute die Schwingungsüberwachung das in der Praxis dominierende Verfahren [5].

Die Miniaturisierung und die sinkenden Kosten von Elektronikkomponenten ermöglichen es, Sensorik auch in Maschinenelemente zu integrieren [80]¹. Dadurch wird eine

¹Eigene Arbeiten des Autors sind im Literaturverzeichnis separat aufgelistet und dementsprechend nummeriert.

Messung *in situ*, also möglichst nah am Ort des Geschehens, ermöglicht und Unsicherheiten im Übertragungspfad zwischen dem Ort des Geschehens und dem Sensor reduziert [81, 80, 82]. Vor diesem Hintergrund wird am Fachgebiet Produktentwicklung und Maschinenelemente der TU Darmstadt (*pmd*) die Integration von Sensorik in Maschinenelemente erforscht und Konzepte für die praktische Umsetzung entwickelt. Von VORWERK-HANDING ET AL. werden derartige Maschinenelemente in drei Klassen unterteilt [6]. In *sensortragenden Maschinenelemente* besteht kein Zusammenhang zwischen der mechanischen Funktion des Maschinenelements und der Sensorfunktion. Bei *sensorintegrierenden Maschinenelementen* steht die Messgröße im Zusammenhang mit der Funktion des Maschinenelements, zur Erfassung der Messgröße wird Sensorik in das Maschinenelement integriert. Zu den am *pmd* entwickelten Prototypen sensorintegrierender Maschinenelemente gehören eine Passfeder und eine elastische Klauenkupplung, deren Verformung durch Dehnungsmessstreifen (DMS) gemessen wird [7, 8, 83], und ein Zahnriemen, dessen Vorspannung mithilfe eines integrierten Beschleunigungssensors gemessen wird [84, 85]. Im Bereich der Wälzlager kann das Produkt VARIOSENSE der Firma SCHAEFFLER, das u.a. Schwingungen zum Zweck der Zustandsüberwachung des Lagers misst [9], als sensorintegrierendes Maschinenelement bezeichnet werden. Auch bei *sensorisch nutzbaren Maschinenelementen* stehen mechanische Funktion und Messfunktion in einem direkten Zusammenhang. Während bei sensorintegrierenden Maschinenelementen aber ein zusätzlicher Sensor benötigt wird, um das mechanische Verhalten (z.B. Verformung) in eine elektrisch messbare Größe zu wandeln, weisen sensorisch nutzbare Maschinenelemente ein inhärentes elektrisches Verhalten auf, das sensorisch genutzt werden kann. Dazu gehört z.B. die lastabhängige elektrische Kapazität von Wälz- und Gleitlagern, deren sensorische Nutzung am *pmd* erforscht wird [86, 10, 11]. Die Tatsache, dass bei sensorisch nutzbaren Maschinenelementen keine zusätzliche Sensorik im Maschinenelement integriert werden muss, erleichtert die Integration der sensorischen Funktion ohne zusätzlichen Bauraumbedarf, sodass der Nutzer keine Umkonstruktionen vornehmen muss [87].

Die sensorisch nutzbaren elektrischen Eigenschaften von Wälzlagern beruhen darauf, dass im elasto-hydrodynamischen Kontakt zwischen Wälzkörpern und Außen- bzw. Innenring ein Kondensator entsteht, vgl. Abbildung 1.1. Die Plattenfläche (Hertz'sche Fläche), und damit auch die Kapazität, hängen von der Last ab.

Da die Platten des Kondensators durch die Oberflächen der Kontaktpartner gebildet werden, stellt sich die Frage, wie die Eigenschaften der Oberfläche sich auf die gemessenen elektrischen Eigenschaften auswirken. Wenn es solche Auswirkungen gibt, bieten sie das Potential, anhand der elektrischen Eigenschaften auf die Oberflächeneigenschaften zurückzuschließen. Die technisch-wirtschaftliche Relevanz liegt im eingangs beschriebenen Bereich der Zustandsüberwachung. Die meisten Wälzlagerschäden können als Abweichungen der Oberflächengeometrie von der Nenngeometrie beschrieben werden [12], deshalb kann eine Diagnose von Oberflächenabweichungen zur Diagnose von Wälzlagerschäden angewendet werden. Mit der Schwingungsüberwachung steht zwar ein etabliertes Instrument für die Zustandsüberwachung von Wälzlagern zur Verfügung. Die in-situ-Messung bietet aber Potentiale, gewisse Unsicherheiten zu eliminieren, die bei der Schwingungsüberwachung unvermeidbar sind. Die Schwingungen liefern keine di-

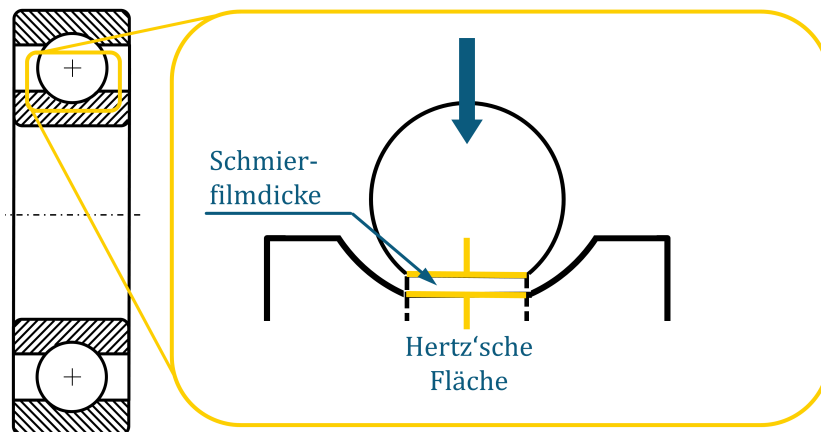


Abbildung 1.1.: Elektrisches Modell des EHD-Kontakts im Wälzlager.

rekte Information über die im Wälzkontakt entstehende Anregung, sondern messen die Antwort des strukturdynamischen Systems auf diese Anregung [2]. Verzerrungen im Übertragungspfad und die Überlagerung der Schwingungen verschiedener Maschinenelemente können deshalb die Aussagekraft der Schwingungssignale schwächen [80]. Die elektrischen Lagereigenschaften liefern dagegen eine direkte Information über die Verhältnisse im Wälzkontakt, die nicht von Effekten eines Übertragungspfad beeinflusst wird.

1.2. Zielstellung und Aufbau der Arbeit

Wie anhand der Literatur in Kapitel 2 gezeigt wird, wurde die Nutzung der elektrischen Wälzlagereigenschaften zur Diagnose von Oberflächenabweichungen, z.B. Wälzlerschäden, bisher nicht systematisch untersucht. Deshalb soll in dieser Arbeit untersucht werden, welche Zusammenhänge zwischen Oberflächeneigenschaften und elektrischen Eigenschaften von Wälzlagern bestehen und wie diese Zusammenhänge genutzt werden können, um Aussagen über Oberflächenabweichungen zu treffen. Die entsprechenden Forschungsfragen und das Vorgehen werden in Kapitel 3 entwickelt. Die hierzu verwendeten Versuchseinrichtungen werden in Kapitel 4 beschrieben. In Kapitel 5 werden dann zunächst die Veränderungen der elektrischen Eigenschaften in Lebensdauerversuchen gemessen. Um die Wechselwirkungen zwischen Betriebsbedingungen und der Geometrie der Oberflächenabweichungen systematisch zu untersuchen, werden in Kapitel 6 Versuche mit künstlich eingebrachten Oberflächenstrukturen durchgeführt. In Kapitel 7 werden die hierbei gewonnenen Erkenntnisse auf die Lebensdauerversuche angewandt und damit validiert. Abschließend werden in Kapitel 8 die Erkenntnisse zusammengefasst und ein Ausblick auf weitere nötige Forschungsarbeiten gegeben.

2. Stand der Forschung

In diesem Kapitel werden die wissenschaftlichen Grundlagen, auf denen diese Arbeit beruht, und der Stand der Forschung im relevanten Forschungsgebiet dargestellt. Zunächst werden in Abschnitt 2.1 einige wichtige Grundlagen bezüglich Wälzkontakten in Wälzlagern dargelegt. In Abschnitt 2.2 folgt der Stand der Forschung im Bereich der Wälzlagerimpedanz und verwandter Forschungsgebiete. In Abschnitt 2.3 und 2.4 werden einige für diese Arbeit wichtige Aspekte des Stands der Forschung zu Wälzlagerschäden und zur Zustandsüberwachung von Wälzlagern dargestellt. Abschließend wird in Abschnitt 2.5 aus dem Stand der Forschung abgeleitet, in welchen Aspekten weiterer Forschungsbedarf herrscht und damit die Zielsetzung dieser Arbeit begründet.

2.1. Grundlagen von Wälzkontakten in Wälzlagern

Wälzlager bestehen aus einem Außenring, einem Innenring und Wälzkörpern. Ihre beiden Funktionen sind die Ermöglichung einer relativen Drehbewegung zwischen Außen- und Innenring sowie die Übertragung von Kräften zwischen Außen- und Innenring [13]. Die Grundlage für die reibungsarme Relativbewegung ist die Schmierung des Wälzkontakts, die Grundlage für die Kraftübertragung ist die Verteilung der wirkenden Lasten auf die Wälzkörper und die Kraftübertragung im Wälzkontakt. Diese beiden Aspekte des Wälzlagers – die Wirkungsweise des einzelnen Wälzkontakts und die Lastverteilung – werden im Folgenden kurz beschrieben. Dabei werden hier nur die wesentlichen physikalischen Zusammenhänge erläutert und die Bestimmungsgleichungen für diejenigen Größen angegeben, die in dieser Arbeit Verwendung finden. Die Darstellung beschränkt sich zudem auf die Zusammenhänge in Kugellagern, da in dieser Arbeit nur Kugellager verwendet werden. Für tiefergehende Erklärungen der umfangreichen Rechenwege werden Literaturhinweise gegeben. Die im Rahmen dieser Arbeit nötigen Berechnungen werden mit einem am Fachgebiet *pmd* entwickelten MATLAB-Programm durchgeführt, dessen Bestandteile in [14] ausführlicher beschrieben sind.

Lastverteilung Rillen- und Schrägkugellager können Radial- und Axiallasten über die Wälzkörper zwischen Außen- und Innenring übertragen [15]. Die Verteilung dieser Lasten auf die einzelnen Wälzkörper hängt von Axial- und Radiallast ab. In Abbildung 2.1 ist die Lastverteilung qualitativ für verschiedene Verhältnisse von Radial- zu Axiallast dargestellt. Bei reiner Axiallast trägt jeder Wälzkörper die gleiche Last. Wenn zusätzlich Radiallast auftritt, werden die Wälzkörper, die in Richtung der Radiallast liegen, zusätzlich belastet und die gegenüberliegenden Wälzkörper entlastet. Bei großem Verhältnis von Radial- zu Axiallast tragen nicht mehr alle Wälzkörper, es bildet sich eine Lastzone

und eine unbelastete Zone aus [16]. Die auf einen einzelnen Wälzkörper wirkende Last wird als Q_ψ bezeichnet. Die Berechnung von Q_ψ für eine gegebene Lagergeometrie und Lastverteilung ist in der Literatur, z.B. in [16] und [17], beschrieben und wird hier nicht weiter erläutert.

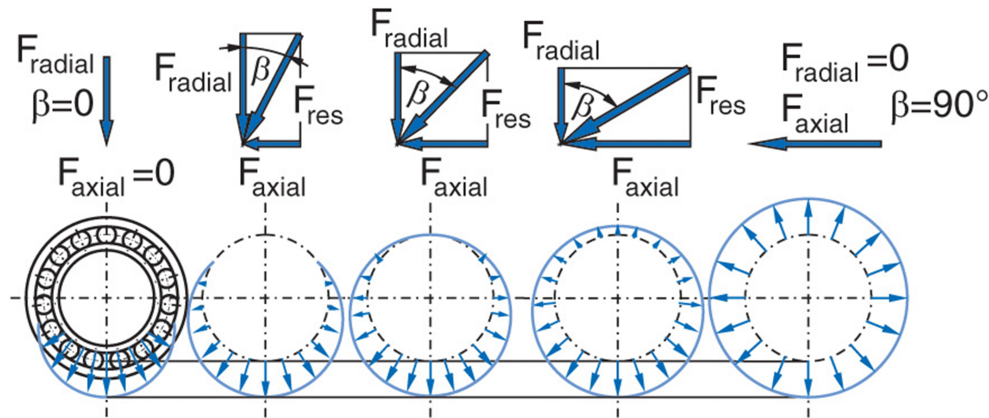


Abbildung 2.1.: Qualitative Darstellung der Lastverteilung bei verschiedenen Radial- und Axiallasten, aus [18]

Wälzkontakt Zwischen jedem belasteten Wälzkörper und dem Außen- bzw. Innenring bildet sich ein Wälzkontakt aus [17]. Die Schmierungsverhältnisse in diesem Kontakt können anhand der Stribeck-Kurve beschrieben werden [17], vgl. Abbildung 2.2. Im allgemeinen Fall beschreibt die Stribeck-Kurve das Reibungsverhalten in Abhängigkeit der spezifischen Schmierfilmdicke [19], für Wälzlager wird sie häufig auch als Funktion der Drehzahl angegeben werden [17]. Letzteres spiegelt die technisch wichtige Tatsache wieder, dass die Schmierfilmdicke mit der Drehzahl steigt. Die spezifische Schmierfilmdicke Λ beschreibt das Verhältnis der minimalen Schmierfilmdicke h_{\min} (vgl. Abbildung 2.3) zur Oberflächenrauheit und ist definiert als

$$\Lambda = \frac{h_{\min}}{\sqrt{R_{q,1}^2 + R_{q,2}^2}}, \quad (2.1)$$

dabei sind $R_{q,1}$ und $R_{q,2}$ die quadratischen Rauheiten der Kontaktpartner [16]. Bei niedriger Schmierfilmdicke ($\Lambda < 1$ nach [19]) tritt Grenzreibung auf, bei der die Last durch unmittelbaren Kontakt der Rauheitsspitzen übertragen wird. Bei ausreichend großer Schmierfilmdicke ($\Lambda > 3$ nach [19]) werden die Oberflächen vollständig durch einen Schmierfilm getrennt und es kommt zu keinen Kontakten von Rauheitsspitzen. Dieser Bereich wird im Wälzlager als elastohydrodynamische Schmierung (EHD-Schmierung) oder Vollschmierung bezeichnet. Bei Schmierfilmdicken im Bereich zwischen diesen beiden Zuständen wird von Mischreibung gesprochen, in diesem Bereich wird ein Teil der Last durch den Schmierfilm getragen und ein Teil durch unmittelbaren Kontakt von Rauheitsspitzen. Auch im Mischreibungsbereich halten sich Verschleiß und Verlustleistung

in Grenzen, sodass der Betrieb von Wälzlagern in Mischreibung durchaus möglich ist, dennoch wird für eine optimale Lebensdauer der Betrieb in Vollschnierung angestrebt [17]. Die Übergangsdrehzahl zwischen Mischreibung und Vollschnierung wird auch als Auslinkpunkt bezeichnet [15].

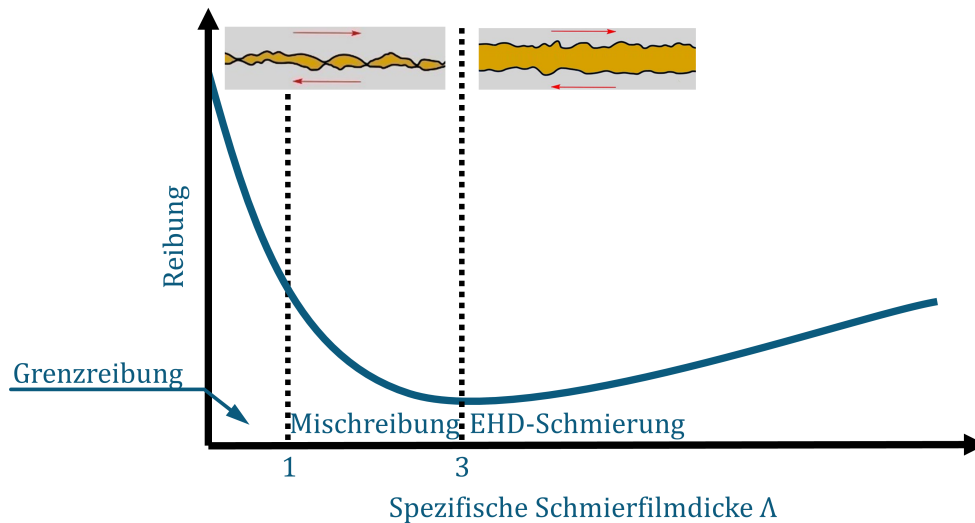


Abbildung 2.2.: Stribeck-Kurve mit Reibungszuständen im Wälzlager, eigene Darstellung in Anlehnung an [19]

Sowohl im Mischreibungs- als auch im EHD-Bereich bildet sich an belasteten Wälzkörpern eine Abplattung, die Hertz'sche Fläche. Bei EHD-Schnierung weist die tatsächliche Kontaktfläche eine etwas andere Form auf, die durch eine Einschnürung am Austritt aus dem Kontakt gekennzeichnet ist. Die unterschiedliche Druckverteilung und Verformung nach Hertz'scher Theorie und EHD-Theorie ist in Abbildung 2.3 dargestellt.

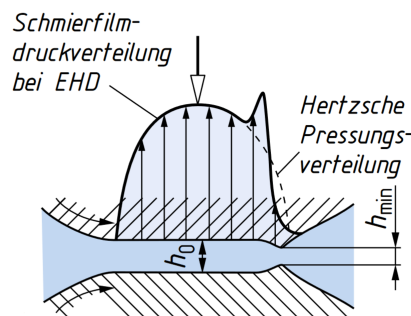


Abbildung 2.3.: Typische Kontaktgeometrie und Druckverlauf nach EHD-Theorie im Vergleich mit Hertz'scher Theorie, aus [20]

Bei Punktkontakten, z.B. bei Kugellagern, hat die Hertz'sche Fläche eine elliptische Form, die durch die große Halbachse a und die kleine Halbachse b beschrieben wird, vgl. Abbildung 2.4. Zur Bestimmung der Halbachsen müssen zunächst die Hauptkrümmungsradien r_{11} , r_{12} , r_{21} und r_{22} der beiden berührenden Körper bestimmt werden,

wie in 2.4 dargestellt. In Abbildung 2.4 sind konvexe Körper dargestellt, hier sind alle Krümmungsradien positiv. Bei konkaver Krümmung, wie bei Wälzlagern, besitzen die Krümmungsradien ein negatives Vorzeichen.

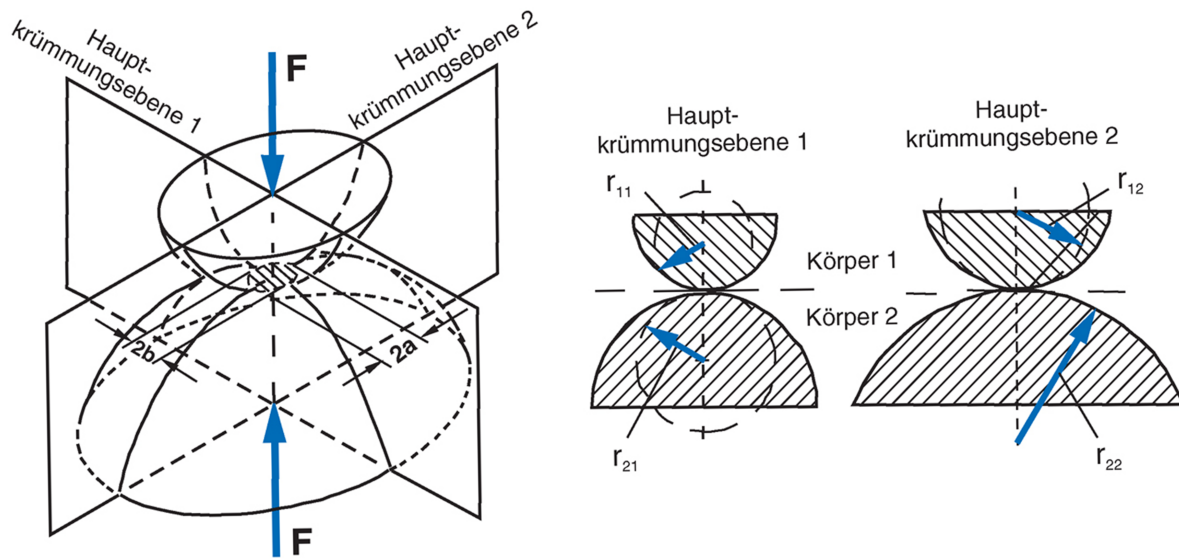


Abbildung 2.4.: Hauptkrümmungsradien beim Hertz'schen Punktkontakt, aus [18]

Aus den Krümmungsradien der Kontaktpartner werden nun mithilfe von Tabellen die Beiwerte der Hertz'schen Gleichung ξ und χ bestimmt, vgl. [21]. Die Beiwerte χ und ξ beschreiben das Verhältnis der beiden Halbachsen

$$\frac{b}{a} = \frac{\chi}{\xi}. \quad (2.2)$$

Die große Halbachse a wird mit

$$a = \xi \sqrt[3]{\frac{3Q_{\psi}(1-\nu^2)}{E\rho^*}} \quad (2.3)$$

bestimmt [21], dabei ist Q_{ψ} die Wälzkörperlast, E der Elastizitätsmodul und ν die Querkontraktionszahl der Kontaktpartner, wobei hier von Kontaktpartnern aus gleichem Material ausgegangen wird, was bei den hier verwendeten Wälzlagern mit Wälzkörpern aus Stahl gegeben ist. Das kumulierte Krümmungsmaß ρ^* wird aus den Hauptkrümmungsradien berechnet [21]:

$$\rho^* = \frac{1}{r_{11}} + \frac{1}{r_{12}} + \frac{1}{r_{21}} + \frac{1}{r_{22}} \quad (2.4)$$

Mithilfe von (2.2) kann nun auch die kleine Halbachse bestimmt werden. Die Form der Hertz'schen Fläche hängt also vom Werkstoff, den Krümmungen der Kontaktpartner und der Belastung ab. Die der Außen- und der Innenring eines Wälzlagers unterschiedliche Krümmungsradien aufweisen, sind auch die Abmessungen der Hertz'schen Fläche verschieden.

2.2. Elektrische Eigenschaften von EHD-Kontakten

Die Forschung zu den Eigenschaften von EHD-Kontakten kann in zwei Bereiche unterteilt werden, die sich durch ihre Motivation unterscheiden. Schon seit Jahrzehnten wurden elektrische Eigenschaften als Mittel verwendet, um Aussagen über das Vorhandensein und die Dicke des EHD-Schmierfilms zu treffen [22, 23, 24, 25, 26]. In diesem Sinne werden die elektrischen Eigenschaften als Sensor verwendet, um eine Zielgröße zu bestimmen. Seit einigen Jahren wird die sensorische Nutzung erweitert auf andere physikalische Größen, insbesondere die Belastung von Wälzlagern [88, 14]. Auch die vorliegende Arbeit, deren Gegenstand die Gewinnung von Informationen über den Lagerzustand ist, ist in diesen Bereich einzuordnen. Der zweite Forschungsbereich ist die Forschung im Bereich schädigender Lagerströme. Hier wird ein Modell der elektrischen Impedanz von Wälzlagern [27, 28, 29] und anderen Maschinenelementen wie Verzahnungen [29] benötigt, um schädigende Lagerströme in elektrischen Maschinen vorherzusagen. Die schädigenden Effekte selbst werden in Abschnitt 2.3 behandelt, in diesem Abschnitt wird nur die Forschung zur Lagerimpedanz behandelt, die im Kontext schädigender Lagerströme durchgeführt wird.

Die elektrischen Eigenschaften von EHD-Kontakten hängen vom Schmierzustand ab [30] [27]. GEMEINDER unterscheidet in Abhängigkeit der Schmierfilmdicke drei Zustände, [27], die in Abbildung 2.5 dargestellt sind. Bei metallischem Kontakt (Grenzreibung und Mischreibung) wird der Kontakt als ohm'scher Widerstand R_p beschrieben. Trennt der Schmierfilm die Kontaktpartner vollständig, so sind zwei Zustände zu unterscheiden: Wenn die elektrische Feldstärke die Durchbruchfeldstärke des Schmierstoffs überschreitet, kommt es zu Durchschlägen und der Kontakt wird als Kondensator C_p mit dem parallelgeschalteten Widerstand des Entladungskanals $R_{p,EDM}$ modelliert. Wenn die elektrische Feldstärke unterhalb der Durchbruchfeldstärke liegt, ist wird der Kontakt ebenfalls als Parallelschaltung eines Widerstands $R_{p,EHD}$ und eines Kondensators C_p modelliert, der Widerstand ist aber deutlich größer als der Widerstand während eines Durchschlags. Bei dünnem Schmierfilm können die beiden Zustände, je nach örtlicher Annäherung von Rauheitsspitzen, in schnellem Wechsel auftreten, was in Abbildung 2.5 als Schalter dargestellt ist. Bei ausreichend großer Schmierfilmdicke kommt es zu keinen Durchschlägen mehr, in diesem Fall wird der Kontakt als reine Parallelschaltung eines Widerstands und eines Kondensators modelliert.

Von GLOVNEA ET AL. und ALBAHRANI ET AL. wurden ausführliche Darstellungen zu elektrischen Methoden der Untersuchung von EHD-Schmierfilmen gegeben [22, 23]. Demzufolge werden in der Literatur vier unterschiedliche elektrische Größen (Durchschlagspannung, Widerstand, Kapazität und Impedanz) betrachtet. Von den meisten Autoren werden die jeweils betrachteten Größen mit entsprechenden Messschaltungen direkt gemessen. GEMEINDER sowie SCHNABEL und MARKLUND messen in einem ersten Schritt die Impedanz und berechnen daraus Widerstand und Kapazität. Eine Besonderheit stellt die Arbeit von HEEMSKERK ET AL. sowie eine Reihe weiterer Arbeiten dar, die mit dem LUBCHECK-System der Firma SKF arbeiten [24, 25, 26]. Dieses System misst den Widerstand mit Wechselstrom. Bei ohm'schem Verhalten des Schmierfilms, also bei metallischem Kontakt, wird die Ausgabe des Systems durch den ohmschen An-

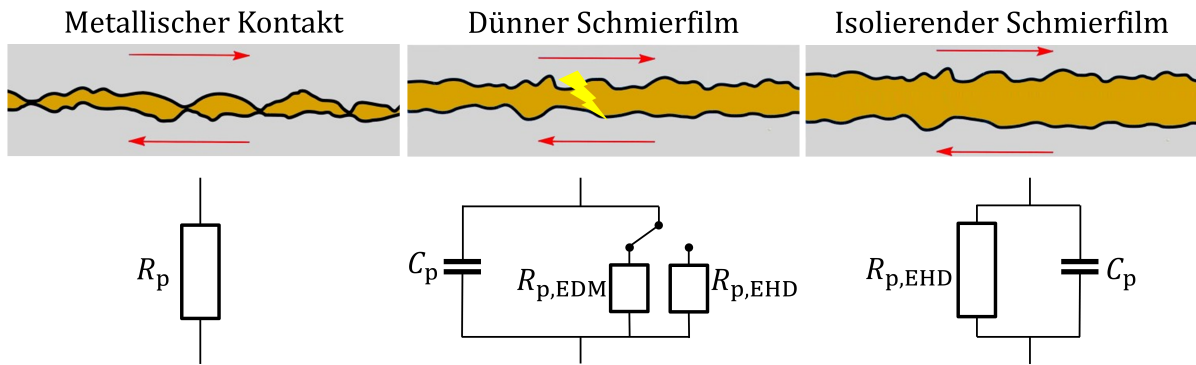


Abbildung 2.5.: Elektrisches Modell des EHD-Kontaks in Abhängigkeit der Schmierfilmdicke

teil dominiert, bei kapazitivem Verhalten dagegen wird auch das Messsignal durch die Kapazität des Schmierfilms dominiert [31]. Insofern kann dieses Verfahren als Messung des Betrages der Impedanz interpretiert werden. Da dieses Messsystem zur Erkennung von kurzzeitigem metallischem Kontakt eingesetzt werden soll, verfügt es über eine hohe Abtastrate von 100 kHz [25]. Durch Fortschritte in der Messtechnik werden auch noch höhere Abtastraten ermöglicht, das von ROSENKRANZ ET AL. entwickelte Widerstandsmessverfahren verfügt über eine Abtastrate von 1 MHz [32]. Im Bereich der Impedanzmessung werden deutlich geringere Abtastraten verwendet. MARUYAMA ET AL. verwenden ein kommerzielles Impedanzmessgerät mit einer Abtastrate von 1 Hz [33], bei SCHNABEL ET AL. kommt eine selbstentwickelte Messschaltung mit einer Abtastrate von 500 Hz zum Einsatz [34].

Für diese Arbeit ist von besonderem Interesse, welche Aussagen über die Oberflächeneigenschaften anhand dieser Größen getroffen werden können, und ob ihr transienter Zeitverlauf oder nur ihr Mittelwert gemessen wird. Diese beiden Aspekte stehen deshalb im Fokus der folgenden Ausführungen.

2.2.1. Durchschlagspannung

Zwischen 1950 und 1970 wurde von einigen Autoren die Messung der Durchschlagspannung (engl. „discharge voltage“) des Schmierfilms verwendet, um Schmierfilmdicken zu bestimmen. Je größer die Schmierfilmdicke, umso größer ist die Spannung, die benötigt wird, um einen elektrischen Durchschlag zu verursachen. Anhand einer experimentell ermittelten Kalibrierkurve kann somit bei gegebener Durchschlagspannung die Schmierfilmdicke bestimmt werden [35]. Von DYSON wurde allerdings gezeigt, dass die Durchschlagspannung auch stark von dem Gleit/Roll-Verhältnis SRR und der Temperatur abhängt [36].

2.2.2. Kapazität

Die Messung der Schmierfilmdicke anhand der Kapazität wurde 1958 von CROOK an einem Zweiseibenprüfstand entwickelt [37]. Im einfachsten Fall wird der EHD-Kontakt als Plattenkondensator mit der Kapazität

$$C_p = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A_{Hz}}{h_0} \quad (2.5)$$

modelliert [23], wobei ε_0 die Dielektrizitätskonstante, ε_r die Permittivität des Schmierstoffs, A_{Hz} die Hertz'sche Fläche und h_0 die zentrale Schmierfilmdicke ist. Dieses Modell des Kontakts ist in Abbildung 2.6 nochmals dargestellt.

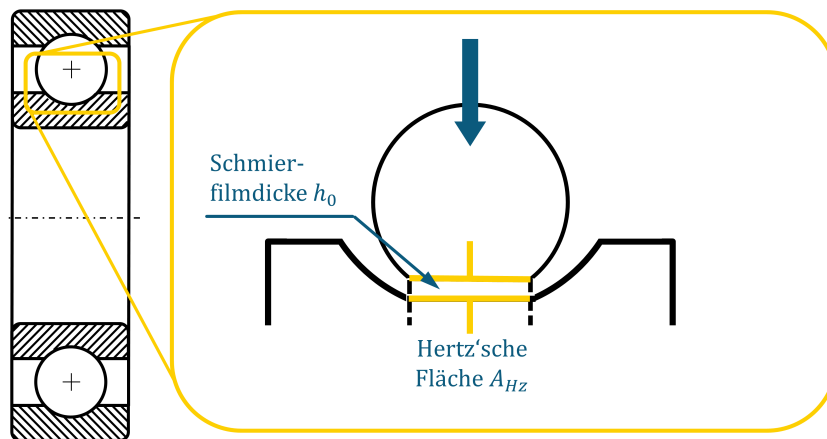


Abbildung 2.6.: Modellierung des EHD-Kontakts als Plattenkondensator.

Bei bekannter Hertz'scher Fläche kann somit die Schmierfilmdicke bestimmt werden. Das Verfahren ist seitdem in der tribologischen Forschung etabliert und wird vielfach angewendet. Für diese Arbeit relevant sind zwei Studien zum Einfluss der Oberflächenrauheit. TEN NAPEL und BOSMA zeigen an einem Vierscheibenprüfstand mithilfe dieser Methode, dass die gemessene Kapazität bei rauen Oberflächen größer ist als bei glatter Oberflächenstruktur, und führen dies auf einen geometrischen Effekt zurück, demzufolge die Kapazität eines Plattenkondensators mit rauer Oberfläche größer ist als bei glatter Plattenoberfläche. SCHMIDT kommt in umfangreichen experimentellen Untersuchungen an einem Zweiseibenprüfstand zu ähnlichen Ergebnissen, führt dies aber im Gegensatz zu TEN NAPEL und BOSMA auf eine tatsächlich reduzierte Schmierfilmdicke zurück. Erste Untersuchungen mithilfe dieser Methode im deutschsprachigen Raum wurden von BRÜSER an einem Drei-Scheiben-Prüfstand und von Bethke an Wälzlagern durchgeführt [38, 39]

Viele jüngere Arbeiten dienen dem Zweck, elektrische Modelle der Wellenlagerung zu erstellen, um schädigende Lagerströme vorherzusagen. Insbesondere die Arbeiten von BARZ, WITTEK, GEMEINDER und FURTMANN sind hier zu nennen [40, 27, 28, 29]. In diesen Arbeiten werden, basierend auf dem einfachen Modell des Wälzkontakts nach (2.5), Modelle für die Kapazität des gesamten Wälzlagers entwickelt. Für den einzelnen

Wälzkontakt wird das Modell um einen Randeinflussfaktor k_C ergänzt, der den nicht verformten Bereich der Kontaktpartner berücksichtigt, sodass sich das Modell

$$C_p = k_C \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A_{Hz}}{h_0} \quad (2.6)$$

ergibt. BARZ und GEMEINDER nehmen den Faktor als konstant an [40], [27]. WITTEK und FURTMANN erweitern diesen Ansatz, indem sie einen empirischen Ansatz zur Berechnung von k_C anhand der Schmierfilmdicke und der Lagerlast entwickeln [28] [29]. JABLONKA ET AL. und MARUYAMA ET AL. berechnen die Kapazität der nicht verformten Randzone dagegen phänomenologisch [41] [33]. SCHIRRA überträgt diesen Ansatz auf die Berechnung der gesamten Wälzlagerkapazität und zeigt eine deutlich verbesserte Übereinstimmung mit Messergebnissen über einen weiten Bereich von Betriebsbedingungen [14].

Die bisher genannten Arbeiten betrachten den Mittelwert der Kapazität. In realen Wälzlagern ist die Wälzlagerimpedanz allerdings zeitlich nicht konstant [14]. Von JABLONKA ET AL. werden Messungen in einem Rillenkugellager unter Radiallast durchgeführt, wobei nur eine leitfähige Stahlkugel verwendet wurde und alle weiteren Wälzkörper aus isolierender Keramik gefertigt waren. Damit kann der transiente Verlauf der Kapazität beim Durchgang durch die Lastzone gemessen werden.

2.2.3. Widerstand

Die Messung des Widerstands wird verwendet, um das Auftreten metallischer Kontakte zu bestimmen. Basierend auf dem Ansatz, dass der Widerstand eines Schmierfilms um Größenordnungen höher ist als der Widerstand beim metallischem Kontakt von Rauheitsspitzen, entwickelte FUREY eine Methode zur Erkennung und Messung der Häufigkeit metallischer Kontakte [42]. FUREY verwendete dabei den Mittelwert des Widerstands als Maß für den Zeitanteil metallischer Kontakte. Durch TALLIANN ET AL. wurde diese Methode weiter verfeinert, indem die Anzahl metallischer Kontakte gezählt wird [43]. HEEMSKERK ET AL. berechnen mit dem gleichen Ansatz den Zeitanteil metallischen Kontakts in Prozent [24]. Im von ihnen verwendeten Messaufbau entspricht eine geringer Lagerwiderstand, d.h. metallischer Kontakt, einer niedrigen Messspannung. Dementsprechend wird eine Referenzspannung definiert und für alle Zeitpunkte, zu denen die Spannung unterhalb dieses Referenzwertes liegt, wird metallischer Kontakt angenommen. Aus dieser Auswertung wird der Zeitanteil metallischen Kontakts als PCT-Wert (engl. „Percent Contact Time“) berechnet. Beispielhafte Spannungsverläufe und dazugehörige PCT-Werte sind in Abbildung 2.7 dargestellt.

Besonders relevant für diese Arbeit sind die Ergebnisse von TUOMAS und ISAKSSON [25]. In dieser Arbeit wird neben anderen Untersuchungen auch ein Dauerversuch bis zum Ausfall des Lagers durchgeführt. Dabei zeigt sich, dass der absolute Wert der Kapazität keine Änderungen vor dem Ausfall zeigt, aber die Häufigkeit metallischer Kontakte, die nach dem Einlaufen zunächst auf null gesunken war, vor dem Ausfall wieder ansteigt [25], vgl. Abbildung 2.8. Weitere Angaben zur Art des eingetretenen Lagerschadens werden

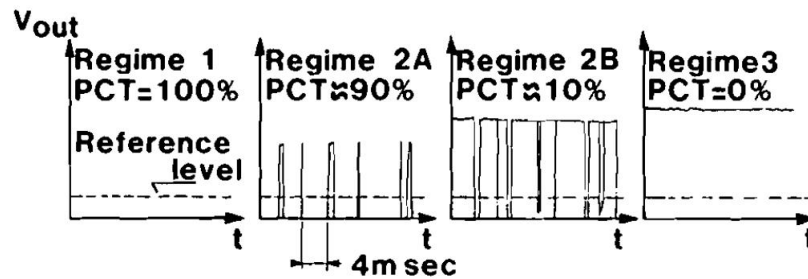


Abbildung 2.7.: Spannungssignale und PCT-Werte bei zunehmender Drehzahl aus [24]. Ganz links: vollständige Mischreibung, ganz rechts: vollständig trennender Schmierfilm (EHD-Schmierung)

von den Autoren nicht gemacht, zudem wird nur ein einziger Dauerversuch dargestellt. Eine verallgemeinerbare Regel lässt sich somit aus diesem Versuch nicht ableiten.

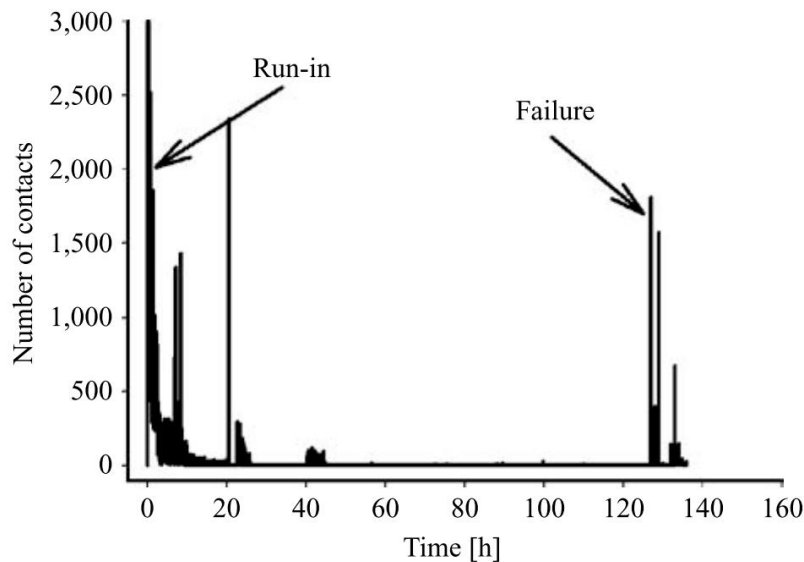


Abbildung 2.8.: Anzahl metallischer Kontakte, detektiert durch Messung des Lagerwiderstands, während eines Dauerversuchs bei TUOMAS und ISAKSSON. Abbildung aus [25]

Ebenfalls wichtig für diese Arbeit sind einige Ergebnisse zum Verhalten des Widerstands beim Einlaufen. Da beim Einlaufen Rauheitsspitzen abgetragen werden, entspricht das Einlaufen einer Veränderung der Oberflächeneigenschaften, sodass aus Einlaufversuchen Rückschlüsse auf das Verhalten des Widerstands bei Veränderung der Oberflächenrauheit gezogen werden könne. LORD und LARSSON messen die Veränderung des Widerstands und des PCT-Werts während des Einlaufs für verschiedene Oberflächenbehandlungen [44]. Abbildung 2.9 zeigt die Veränderung der beiden Werte während des Einlaufs für verschiedene Oberflächenbehandlungen. In allen Fällen sinkt der PCT-Wert und der

Mittelwert des Widerstands steigt. Daraus kann abgeleitet werden, dass die Oberflächenrauheit eine Auswirkung auf den Widerstands von EHD-Kontakten besitzt.

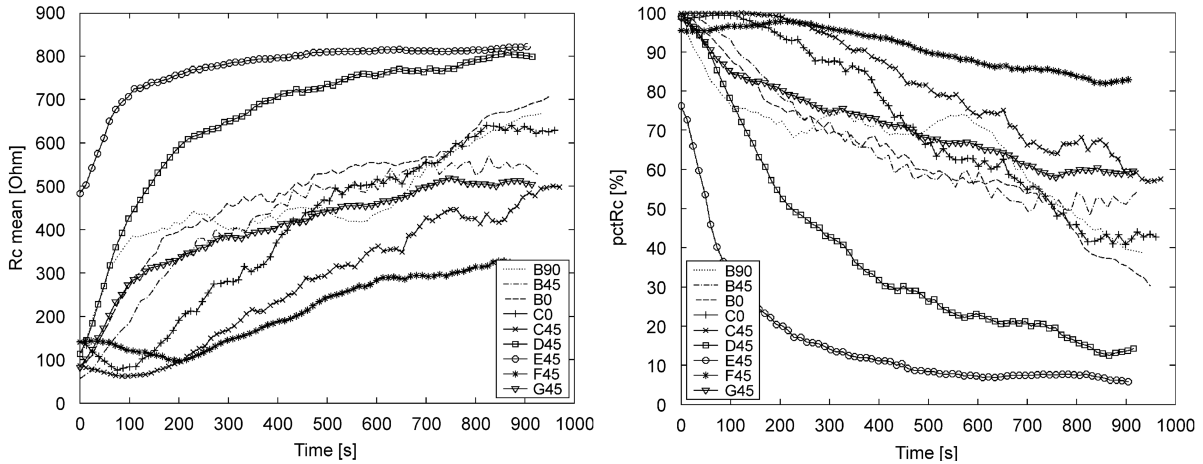


Abbildung 2.9.: Veränderung des Mittelwerts des Widerstands (links) und des PCT-Werts während des Einlaufens bei reinem Rollen ($SRR = 0$) in [44]. Die Linien entsprechen verschiedenen Oberflächenbehandlungen.

Von LUGT ET AL. wurde der Ausklinkpunkt in einem Zweiseibenprüfstand anhand von Messungen des elektrischen Widerstands bestimmt und gezeigt, dass die Ausklickdrehzahl mit fortschreitendem Einlaufen ansteigt [45]. SCHNABEL und MARKLUND führten ebenfalls Einlaufversuche an einem Einscheibenprüfstand durch, wobei während des gesamten Einlaufprozesses der Widerstand und die Kapazität gemessen wurden [34]. Allerdings befindet sich das System in Mischreibung [34], deshalb sind die Ergebnisse auf Wälzlager in EHD-Schmierung nicht übertragbar.

Die bisher genannten Arbeiten betrachten die Änderung des Widerstands beim Übergang von einem vollständig trennenden Schmierfilm zu metallischem Kontakt von Rauheitsspitzen. GEMEINDER betrachtet, aufbauend auf dem theoretischen Modell von PRASHAD, dagegen den Widerstand des isolierenden Schmierfilms [46] [27]. Analog zum Modell der Kapazität nach (2.6) wird der Schmierfilm als zylinderförmiger Leiter modelliert, dessen Widerstand R_p sich aus dem spezifischen Widerstand des Öls ρ und der Hertz'schen Fläche A_{Hz} sowie der Schmierfilmdicke h_0 zusammensetzt, zusätzlich wird ein Korrekturfaktor für Randeffekte $k_R < 1$ für Randeffekte eingeführt:

$$R_p = k_R \frac{\rho h_0}{A_{Hz}} \quad (2.7)$$

In den experimentellen Untersuchungen von Gemeinder zeigte sich allerdings, dass die mit diesem Modell berechneten Widerstände um mehrere Größenordnungen höher sind als die tatsächlich gemessenen Werte des Widerstands [27]. Deshalb kann dieses Modell nicht als valide angesehen werden.

2.2.4. Impedanz

Die elektrische Impedanz \underline{Z} ist komplexwertig und entspricht dem Wechselstromwiderstand. Analog zum ohmschen Gesetz ist sie definiert als

$$\underline{Z} = \frac{\underline{U}}{\underline{I}}, \quad (2.8)$$

wobei \underline{U} und \underline{I} die komplexwertigen Amplituden der Spannung bzw. des Stroms sind [47]. Die elektrische Impedanz eines EHD-Kontakts setzt sich aus einer Parallelschaltung eines kapazitiven Anteils C_p und eines ohmschen Anteils R_p zusammen [46] [27]. Die jeweiligen Eigenschaften dieser Anteile wurden bereits in den Abschnitten 2.2.3 und 2.2.2 dargestellt, deshalb wird im Folgenden nur auf einige messtechnische Aspekte eingegangen.

GEMEINDER misst die frequenzabhängige Lagerimpedanz über einen weiten Frequenzbereich zwischen 100 Hz und 10 MHz mit einem LCR-Meter [27]. MARUYAMA ET AL. messen ebenfalls die komplexe Impedanz mit einem LCR-Meter, allerdings bei konstanter Frequenz [33, 48]. Mithilfe eines physikalischen Modells berechnen sie daraus die Schmierfilmdicke und bei Mischreibungsbedingungen den Anteil der Hertz'schen Fläche, in dem metallischer Kontakt herrscht, am Einzelkontakt [48] und im Wälzlager [33]. Schnabel und Marklund messen die Impedanz mit einem Zweiseibenprüfstand mithilfe einer selbstentwickelten Messschaltung [34]. Abweichend von PRASHAD und GEMEINDER nehmen sie eine Reihenschaltung des ohmschen und des kapazitiven Anteils an. Wie in Abschnitt 2.2.2 bereits dargestellt, finden die Versuche im Mischreibungsbereich statt und sind somit auf EHD-Schmierung nicht übertragbar. SCHIRRA schließlich bestimmt die Wälzlagerimpedanz durch ein Verfahren, das auf der Messung der Stromstärke beruht und kann dabei auch transiente Effekte nachweisen, die auf die zeitliche Änderung der Lastverteilung im Wälzlager zurückgeführt werden [14].

2.3. Wälzlagerschäden

Die internationale Norm ISO 15243 klassifiziert Wälzlagerschäden in sechs Kategorien und zusätzliche Unterkategorien [12], vgl. Abbildung 2.10. Mit Ausnahme der Kategorie „Risse und Brüche“ und der Unterkategorie „Passungsrost“ handelt es sich bei allen Kategorien um Schäden, die den Wälzkontakt betreffen. In dieser Arbeit werden Pittings, d.h. Ausbrüche aus der Oberfläche, erzeugt, deshalb wird dieser Schadensmechanismus im Folgenden erläutert. Zudem werden elektrische Spannungen an das Lager angelegt, deshalb werden auch die grundlegenden Zusammenhänge dieses Schadensmechanismus dargestellt.

2.3.1. Pittings

Unter optimalen Schmierungsbedingungen, d.h. bei Vollschmierung und nicht verunreinigtem Schmierfilm, tritt die maximale Wechselschubspannung, die entscheidend für

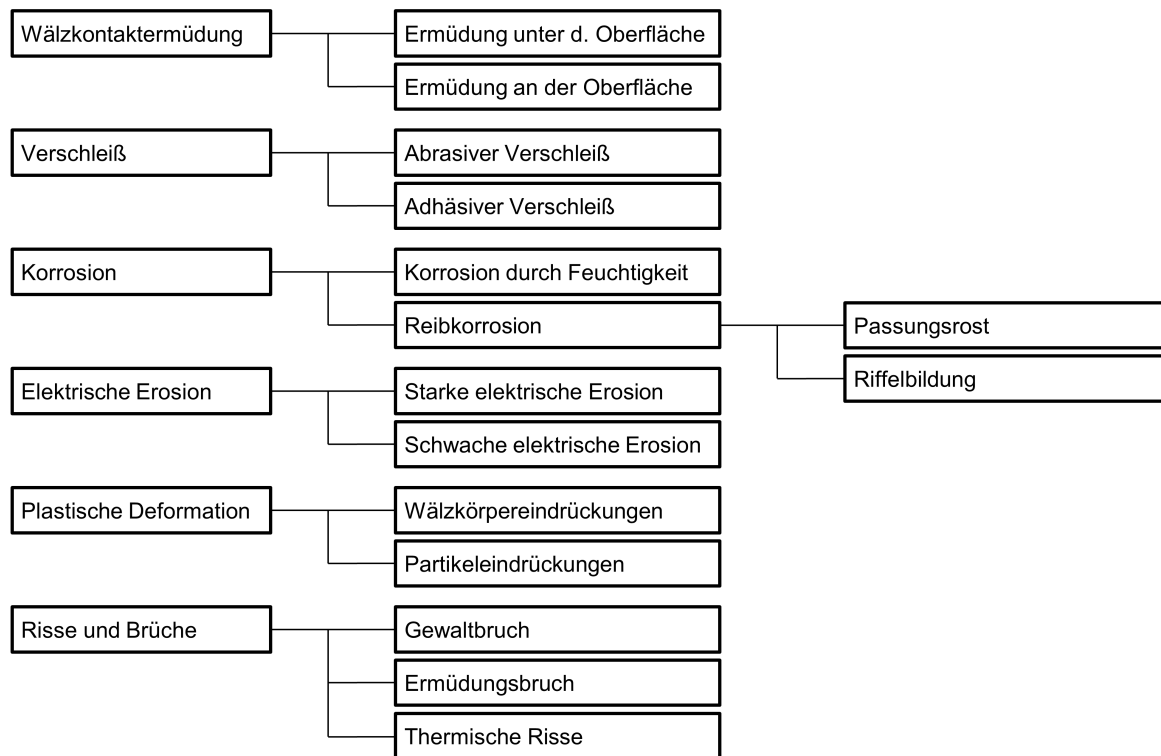


Abbildung 2.10.: Klassifikation von Wälzlagerschäden nach ISO 15243

die Werkstoffermüdung ist, unter der Oberfläche auf [49]. Dort entstehen erste Risse im Gefüge, die sich zur Oberfläche fortpflanzen und schließlich zum Ausbrechen eines Werkstoffpartikels aus der Oberfläche führen, die hinterlassene Leerstelle wird als *Pitting* oder *Grübchen* bezeichnet [17]. Ein beispielhaftes Pitting aus den in Kapitel 5 beschriebenen Dauerversuchen ist in Abbildung 2.11 dargestellt. Ausgangspunkt für solche Anrisse können z.B. nichtmetallische Einschlüsse oder ungleichmäßig verteilte Legierungsbestandteile sein [49]. Dieser Schadensmechanismus entspricht in Abbildung 2.10 der Kategorie „Ermüdung unter der Oberfläche“, er liegt auch der Wälzlager-Lebensdauerberechnung zugrunde [17]. Ausgangspunkt für Pittings können aber nicht nur Anrisse unter der Oberfläche sein. Auch Anrisse an der Oberfläche kommen vor, wenn aufgrund unzureichender Schmierung hohe Tangentialspannungen auftreten, die zu einer Verschiebung des Spannungsmaximums an die Oberfläche führen [16]. Auch Partikeleindrückungen aufgrund von verunreinigtem Schmierstoff können zu Spannungsüberhöhungen, und in der Folge zu Anrissen und Pittingversagen führen [17].

Auch nach dem Initialschaden können, abhängig von den Anforderungen an die Laufruhe, Lager noch weiterbetrieben werden [50]. In dieser Zeit vergrößert sich das Pitting weiter, wobei der Schadensfortschritt einen progressiven Verlauf zeigt [51] [50]. Abbildung 2.12 illustriert diesen progressiven Verlauf anhand von Versuchen, die von ROSADO ET AL. durchgeführt wurden, und zeigt zudem den Zustand eines Lagers am Ende des Schadensfortschritts. Derartige großflächige Oberflächenschäden werden auch als *Schälungen* bezeichnet [17].

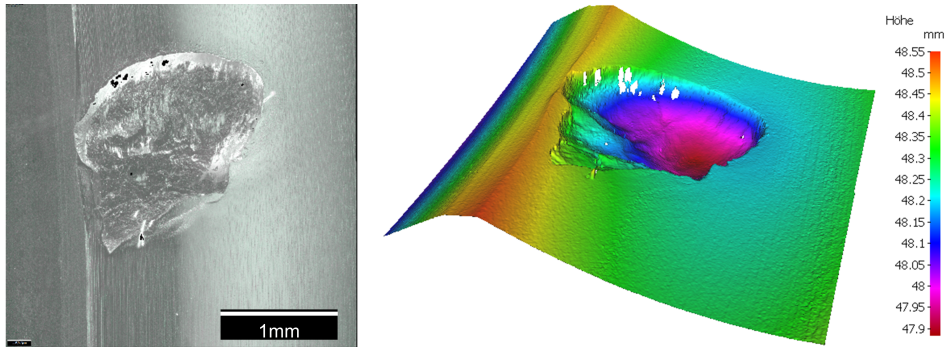


Abbildung 2.11.: Schadensbild eines Pittings am Außenring

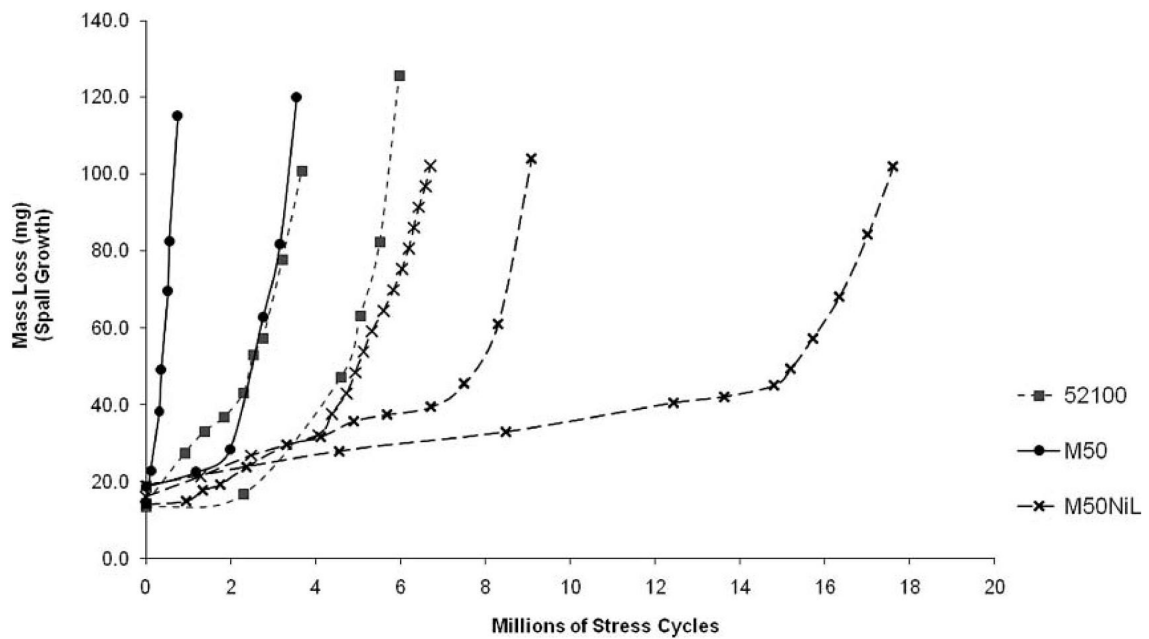


Abbildung 2.12.: Schadensfortschritt in mehreren Versuchen aus [51] (oben), dargestellt sind verschiedene Stahlsorten, sowie Zustand am Ende des Schadensfortschritts (unten). Abbildungen aus [51].

2.3.2. Strominduzierte Wälzlagerschäden

Wenn elektrischer Strom durch Wälzlager geleitet wird, können Schäden entstehen, vgl. auch Abbildung 2.10. Die beobachteten Stromschäden sind Krater- und Riffelbildung [30], die Schadensbilder sind in Abbildung 2.13 dargestellt.

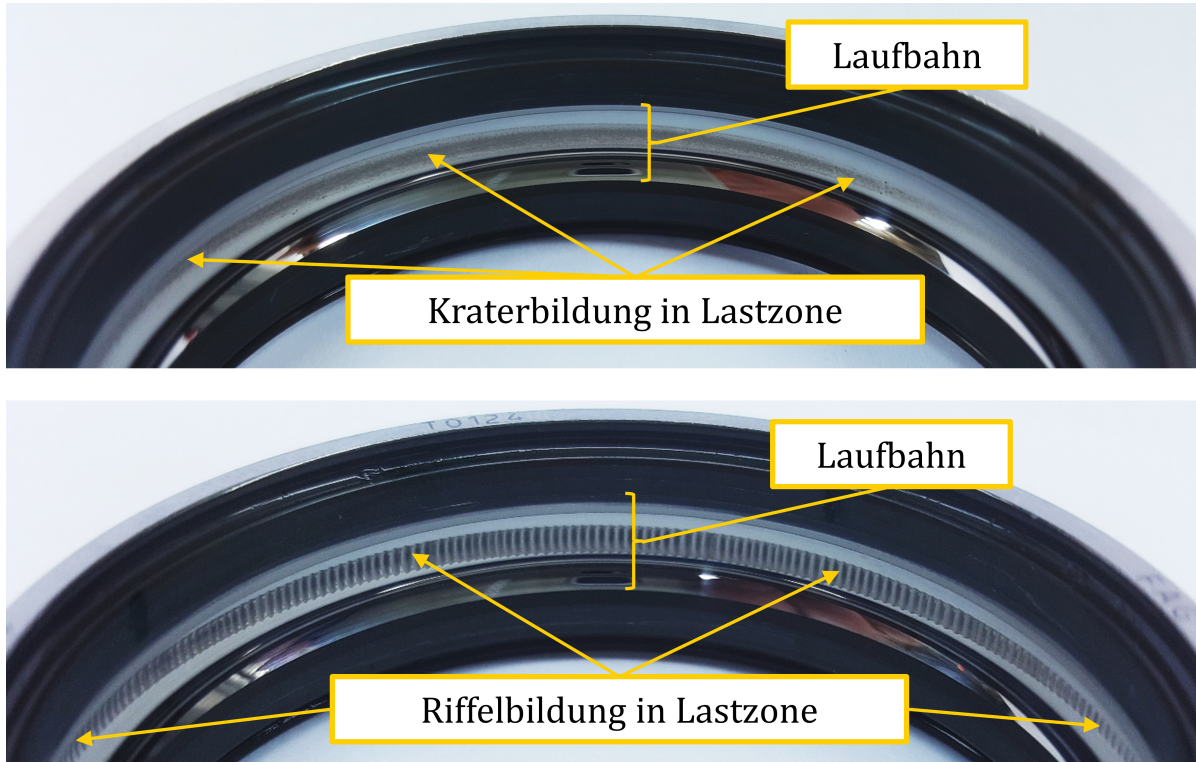


Abbildung 2.13.: Schadensbilder bei Stromdurchgang durch Wälzlager. Abbildungen aus [52]

In der Literatur werden drei schädigende Lagerstromarten genannt. Bei Rotor-Erd-Strömen und Zirkular-Lagerströmen handelt es sich um ohmsche Ströme, die unter Mischreibungsbedingungen entstehen [30]. Für diese Arbeit relevant ist die dritte schädigende Stromart, elektrische Durchschläge, in Anlehnung an das Fertigungsverfahren Funkenerosion auch als *EDM-Ströme* (engl. „electric discharge machining“) bezeichnet [30]. Die Durchschläge erzeugen die in Abbildung 2.13 gezeigten Krater. Wie in Abschnitt 2.2.1 bereits erläutert wurde, entsteht bei Überschreitung der Durchbruchfeldstärke des Schmierstoffs ein Lichtbogen zwischen den Kontaktpartnern. Die hohen Temperaturen in diesem Lichtbogen schmilzt das Material der Kontaktpartner auf. Der relevante Einflussfaktor für die Schädigung von Wälzlagern ist die scheinbare Stromdichte. Die scheinbare Lagerstromdichte J_b ist der Quotient aus der Lagerstromamplitude und der Hertz'schen Fläche im Wälzlager. Der Stromdurchgang wird durch Grenzwerte der Stromdichte in einen unkritischen, ggf. kritischen und schädlichen Bereich eingeteilt [53]. Tabelle 2.1 stellt diese Grenzwerte dar.

Scheinbare Lagerstromdichte J_b in A/mm ²	
Unkritisch	$J_b < 0,1 \dots 0,3$
Ggf. kritisch	$0,1 \dots 0,3 < J_b < 1$
Schädlich	$J_b > 1$

Tabelle 2.1.: Beurteilung der Schädigungswirkung von Lagerströmen anhand der scheinbaren Lagerstromdichte nach [53]

2.4. Zustandsüberwachung von Wälzlagern

Das Ziel der Zustandsüberwachung (engl. „condition monitoring“) ist die Diagnose des aktuellen Fehlerzustands einer Maschine und das Ziel der prädiktiven Wartung (engl. „predictive maintenance“) die Vorhersage der Restlebensdauer (RUL, engl. „remaining useful life“) [80]. JARDINE ET AL. verwenden eine ähnliche Einteilung, indem sie die zustandsorientierte Instandhaltung (engl. „condition-based maintenance“) in die Bereiche Diagnose und Prognose einteilen [54].

Für die Prognose der Restlebensdauer wird in der Literatur eine Vielzahl von Ansätzen vorgeschlagen, eine umfassende Übersicht findet sich bei JARDINE ET AL. [54]. Für den Bereich der Wälzlager existieren auch Modellansätze zur Prognose des Schadensfortschritts eines bereits entstandenen Initialschadens [50]. Für Getriebeanwendungen haben FOULARD ET AL. eine Methode zur Schätzung der Restlebensdauer entwickelt, die die akkumulierte Schädigung für das geschätzte reale Lastkollektiv im Bauteillebenslauf berechnet [3]. Das Lastkollektiv wird hierbei mithilfe eines Zustandsbeobachters anhand von Sensordaten bestimmt. SCHIRRA ET AL. skizzieren eine ähnliche Methode, die auf der Verwendung von Lastdaten beruht, die in situ durch kraftmessende Wälzlager erfasst werden [88]. Die prognostizierte Restlebensdauer ist nicht als präzise Vorhersage zu verstehen, sondern eine Zufallsvariable, die durch eine Wahrscheinlichkeitsfunktion charakterisiert wird [54]. Die Ursachen für diese Unsicherheiten sind u.a. Toleranzeinflüssen, Modellunsicherheit und Messunsicherheit [55].

Bei der Zustandsüberwachung von Maschinen werden Messdaten erfasst und ausgewertet, und anhand dessen Rückschlüsse auf den Zustand von Maschinen gezogen [5]. Hier handelt es sich, im Gegensatz zur RUL-Prognose, also um eine diagnostische Aussage. Das Ziel ist aber dennoch, eine frühzeitige Warnung vor dem finalen Ausfall des überwachten Bauteils zu erhalten [5]. Bei der Zustandsüberwachung von Wälzlagern hat sich insbesondere die Schwingungsüberwachung als Werkzeug etabliert, da hiermit unter günstigen Bedingungen eine Vorwarnzeit von mehreren Monaten erreicht werden kann [5]. Die Forschung zur Zustandsüberwachung von Wälzlagern ist so umfangreich, dass selbst Übersichtspublikationen nur bestimmte Anwendungen oder einzelne Schritte des Diagnoseprozesses in den Blick nehmen [56, 57, 58]. Im Folgenden wird deshalb nur der grundlegende Analyseansatz vorgestellt, der auf Überrollfrequenzen beruht, und der auch in dieser Arbeit Anwendung findet.

2.4.1. Schwingungsüberwachung

Bei der Überrollung eines lokalisierten Schadens durch einen Wälzkörper entsteht eine impulsartige Schwingungsanregung [2]. Die zeitlichen Abstände dieser Anregungsimpulse entsprechen den kinematischen Frequenzen des Wälzlagers [5]. Für den Fall eines stehenden Außenrings und drehenden Innenrings sind dies die Innenring-Überrollfrequenz, die häufig auch als BPF_I (engl. „ball pass frequency inner race“) bezeichnet wird,

$$f_{\text{IR}} = \frac{1}{2} f_n z \left(1 - \frac{D_W}{D_T} \cos \beta \right), \quad (2.9)$$

die Außenring-Überrollfrequenz (BPF_O, engl. „ball pass frequency outer race“)

$$f_{\text{AR}} = \frac{1}{2} f_n z \left(1 + \frac{D_W}{D_T} \cos \beta \right), \quad (2.10)$$

die Drehfrequenz des Käfigs bzw. des Wälzkörpersatzes (FTF, engl. „fundamental train frequency“)

$$f_{\text{K}} = \frac{1}{2} f_n \left(1 - \frac{D_W}{D_T} \cos \beta \right), \quad (2.11)$$

und die Wälzkörper-Drehfrequenz (BSF, engl. „ball spin frequency“)

$$f_{\text{n,WK}} = \frac{1}{2} f_n \frac{D_T}{D_W} \left(1 - \left(\frac{D_W}{D_T} \cos \beta \right)^2 \right), \quad (2.12)$$

dabei ist D_W der Wälzkörperdurchmesser, D_T der Teilkreisdurchmesser, β der Betriebsdruckwinkel, f_n die Drehfrequenz des Innenrings und z die Anzahl der Wälzkörper [5]. Die Überrollfrequenzen hängen also von Konstruktionsparametern des Wälzlagers, der Drehzahl und dem Druckwinkel ab. Für den Wälzkörper ist zu beachten, dass ein Schaden bei jeder Umdrehung des Wälzkörpers zwei mal, auf dem Außen- und auf dem Innenring, überrollt wird [2]. Zur Vereinfachung der Schreibweise wird in dieser Arbeit deshalb die Wälzkörper-Überrollfrequenz

$$f_{\text{WK}} = 2 \cdot f_{\text{n,WK}} \quad (2.13)$$

verwendet. Viele große Lagerhersteller stellen für Kataloglager auch die Werte der Überrollfrequenzen in Online-Katalogen zur Verfügung, auf diese Werte wurde in dieser Arbeit zurückgegriffen. In Tabelle 2.2 sind die Werte für die beiden in dieser Arbeit verwendeten Lagertypen dargestellt

Auf die impulsartige Anregung bei jeder Überrollung antwortet das strukturdynamische System mit seinen Eigenfrequenzen, sodass für jeden Anregungsimpuls eine gedämpfte Schwingung entsteht. Damit ergibt sich schematisch das Schwingungssignal, das in Abbildung 2.14a zu sehen ist. Da für die Schadensanalyse nur die Anregungsfrequenz und nicht die Struktureigenfrequenzen interessant sind, wird die Hüllkurve des Signals ermittelt (Abbildung 2.14b), im Spektrum der Hüllkurve sind dann die entsprechende Überrollfrequenz und ihre Harmonischen sichtbar (Abbildung 2.14c) [5].

		FAG 7205-B-XL-TVP	SKF 6205 TN9/C3
Innenring-Überrollfrequenz	$f_{\text{IR}}/f_{\text{n}}$	7,53	5,43
Außenring-Überrollfrequenz	$f_{\text{AR}}/f_{\text{n}}$	5,47	3,57
Käfig-Drehfrequenz	$f_{\text{K}}/f_{\text{n}}$	0,421	0,397
Wälzkörper-Drehfrequenz	$f_{\text{n,WK}}/f_{\text{n}}$	2,36	2,32
Wälzkörper-Überrollfrequenz	$f_{\text{WK}}/f_{\text{n}}$	4,73	4,64

Tabelle 2.2.: Kinematische Frequenzen der in dieser Arbeit verwendeten Lager bei drehendem Innenring und stehendem Außenring, bezogen auf die Drehzahl des Innenrings f_{n}

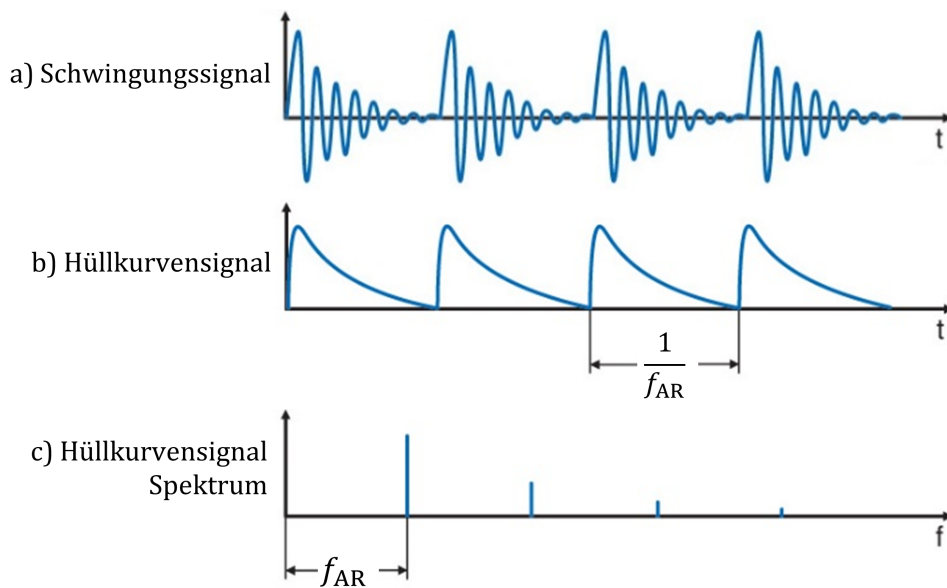


Abbildung 2.14.: Schematische Darstellung des Schwingungssignals, des Hüllkurvensignals und des Hüllkurvenspektrums bei der Überrollung eines Schadens. Abbildung überarbeitet übernommen aus [18].

Die Darstellung in Abbildung 2.14 gilt, wenn bei jeder Überrollung eine gleichartige Schwingungsanregung erfolgt. Die Schwingungsanregung hängt aber von der Wälzkörperlast zum Zeitpunkt der Überrollung ab [2]. Bei einem Schaden auf dem Außenring ist die Wälzkörperlast bei jeder Überrollung gleich, vorausgesetzt die Richtung der Lagerlast ist relativ zum Außenring konstant. Dementsprechend ergibt sich ein Schwingungssignal, das bei jeder Überrollung die gleiche Amplitude aufweist. Bei Schäden auf dem Innenring und auf einem Wälzkörper läuft der geschädigte Bereich um und durchläuft dabei die gesamte Lastzone sowie ggf. den unbelasteten Bereich des Wälzlagers. Die Amplitude der Schwingungssignal ist in diesem Fall zeitlich moduliert. Die Modulationsfrequenz entspricht den Drehzahlen des Innenrings bzw. des Wälzkörpersatzes [2]. Die Schwingungs- und Hüllkurvensignale für die drei Fälle sind in Abbildung 2.15 dargestellt.

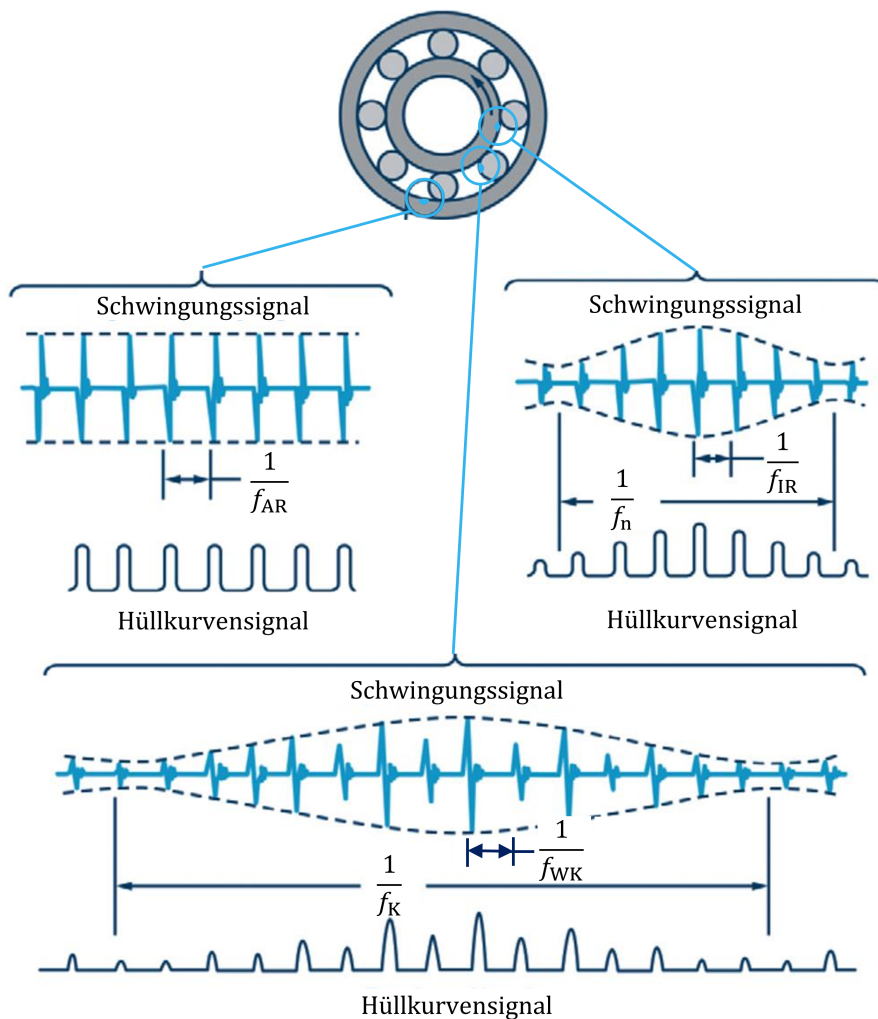


Abbildung 2.15.: Modulation des Schwingungssignals bei Schäden auf Innenring und Wälzkörpern, Abbildung überarbeitet übernommen aus [59].

2.4.2. Weitere Messtechniken

Die Schwingungsüberwachung erreicht zwar unter günstigen Umständen eine Vorwarnzeit von mehreren Monaten [5], unter anderen Umständen ist ihre Leistungsfähigkeit aber nicht zufriedenstellend, wie im Folgenden für zwei Szenarien erläutert wird. RANDALL weist darauf hin, dass Schälungen im fortgeschrittenen Stadium häufig durch die Überrollungen geglättet werden und die beschriebene impulsartige Anregung dann nicht mehr auftritt, die Schadensdiagnose ist dann nur noch indirekt möglich und nicht mehr durch die Analyse der Überrollfrequenzen [2]. Bei niedrigen Drehzahlen ist die in den Stößen enthaltene Energie bei der Überrollung nicht mehr groß genug, um eine messbare Schwingung anzuregen [60]. Vor diesem Hintergrund wird einerseits Forschung zur Verbesserung der Signalverarbeitungsmethoden von Schwingungssignalen betrieben, ein Übersichtartikel zu Entwicklungen in diesem Bereich ist bei RAI ET AL. zu finden [58]. Andererseits werden auch Messtechniken entwickelt, die anstelle der klassischen Schwingungsmessung auf andere Messgrößen setzen, z.B. die Messung von Drehschwingungen der Welle (IAS, ingl. „instantaneous angular speed“) [61] oder die Überwachung langsamlaufender Lager mithilfe von Körperschallemission (AE, engl. „acoustic emission“) [60]. Eine weitere Möglichkeit ist die Integration von Sensorik in das Maschinenelement, um eine größere Nähe zum Schaden zu erreichen. HOLM-HANSEN und GAO verwenden klassische Schwingungssensorik, integrieren diese aber in das Wälzlager, um eine größere Nähe zum Schaden zu erreichen [62]. Im kommerziellen VARIOSENSE-Lager von SCHAEFFLER ist ebenfalls ein Schwingungssensor integriert [9]. Auch an anderen EHD-Kontakten sind derartige Entwicklungen zu beobachten. KOCH ET AL. erweitern für die Zustandsüberwachung von Verzahnungen den bekannten IAS-Ansatz, indem sie die Verzahnung selbst als Maßverkörperung für die Drehschwingungsmessung [82] verwenden. TAN ET AL. nutzen auf der Welle montierte AE-Sensoren zur Überwachung von Verzahnungen, um eine größere Nähe zum Schadensort zu erreichen [63].

2.5. Forschungsbedarf

Im Stand der Forschung gibt es einige offene Punkte, die zeigen, warum es einen Forschungsbedarf im Bereich der Wälzlagerimpedanz als Werkzeug zur Untersuchung von Oberflächenabweichungen in Wälzlagern gibt. Wie in Abschnitt 2.4 dargestellt wurde, gibt es zur Umsetzung einer prädiktiven Wartung einerseits Ansätze, die auf einer Vorhersage der Restlebensdauer anhand der Belastung beruhen [3], und andererseits Ansätze, die auf der Diagnose eines bereits eingetreten Schadens beruhen [2]. Allerdings haben beide Ansätze noch Schwächen: Die lastbasierte Lebensdauerberechnung liefert immer nur eine Aussage über die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls [54]. Zwar kann durch die Messung der Belastung [3] ein Teil der Unsicherheit eliminiert werden, die Unsicherheit der individuellen Beanspruchbarkeit jedes Lagers bleibt aber. Daraus folgt, dass bei einem bestimmten Anteil der Lager Ausfälle vor der berechneten Lebensdauer auftreten. Bei einem anderen Anteil der Lager wird eine Wartung durchgeführt obwohl diese Lager noch weiterlaufen könnten [2]. Zur Abschätzung der Größenordnung dieser Lebensdau-

erstreuung kann der Lebensdauerbeiwert für die Zuverlässigkeit a_1 verwendet werden. Dieser Beiwert geht in die Lagerlebensdauerberechnung ein, wenn eine andere Überlebenswahrscheinlichkeit als die üblicherweise angenommenen 90 % verwendet werden soll. In diesem Fall wird die Lebensdauer berechnet mit

$$L_{nmr} = a_1 L_{10}, \quad (2.14)$$

wobei L_{10} die Lebensdauer bei einer Überlebenswahrscheinlichkeit von 90 % ist [15]. Der Beiwert a_1 wird für eine beliebige Überlebenswahrscheinlichkeit $p_{\ddot{u}}$ für Kugellager nach DIN ISO 281/A2 zu

$$a_1 = \left(\frac{\ln \frac{100}{p_{\ddot{u}}}}{\ln \frac{100}{90}} \right)^{\frac{1}{1,5}} \quad (2.15)$$

berechnet [64]. Für $p_{\ddot{u}} = 50\%$ ist $a_1 = 3,51$. Das bedeutet, dass der Medianwert der tatsächlich erreichbaren Lagerlebensdauern um das 3,51-fache über der Lebensdauer L_{10} liegt. Bei einem Austausch am individuellen Lebensdauerende kann also für einen Großteil der Lager eine mehrfach längere Nutzungsdauer erreicht werden als bei einem Austausch, der nur auf der Messung des Lastkollektivs beruht. Diese Überlegung macht deutlich, dass die lastbasierte Zustandsprognose noch keine optimale Ausnutzung der Lebensdauer ermöglicht.

Genau diese Erkennung des individuellen Lebensdauerendes wird durch die Techniken der Zustandsüberwachung erreicht, die in den Abschnitte 2.4.1 und 2.4.2 dargestellt wurden. Auch diese Techniken besitzen aber Grenzen, z.B. bei geringen Drehzahlen [60] oder Schäden im fortgeschrittenen Stadium [2].

Wälzlagerschäden, insoweit sie die Laufbahn betreffen, können als Abweichungen der Laufbahnoberfläche von der Nenngeometrie betrachtet werden, vgl. Abschnitt 2.3. Die Literatur im Bereich der elektrischen Eigenschaften von Wälzlager zeigt zwei Zusammenhänge zwischen Oberflächeneigenschaften und der Wälzlagerimpedanz. Der Kontakt von Rauheitsspitzen hat Auswirkungen auf den Widerstand und die Reduzierung der Schmierfilmdicke infolge erhöhter Oberflächenrauheit hat Auswirkungen auf die Kapazität, vgl. Abschnitt 2.2.3 und 2.2.2. In der Literatur konnte nur eine Arbeit aufgefunden werden, die sich konkret mit dem Zusammenhang zwischen Wälzlagerimpedanz und Schädigung beschäftigt: In dieser Arbeit beobachten TUOMAS und ISAKSSON eine Veränderung des Widerstands kurz vor dem Lagerausfall [25], vgl. Abbildung 2.8. Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass die Wälzlagerimpedanz möglicherweise als Messgröße für die Zustandsüberwachung geeignet ist. Da von TUOMAS und ISAKSSON nur eine Messung publiziert wurde, können ihre Ergebnisse allerdings nicht verallgemeinert werden. Sonstige Arbeiten zum Zusammenhang zwischen Schädigung und Impedanz sind in der Literatur nicht bekannt, insbesondere keine Arbeiten, in denen die Kapazität oder die komplexwertige Impedanz gemessen wird. Da einerseits die Zustandsüberwachung von Wälzlager noch nicht in allen Anwendungen befriedigend gelöst ist und die Literatur Hinweise auf eine mögliche Eignung der Wälzlagerimpedanz für die Zustandsüberwachung gibt, aber andererseits nur wenige und isolierte Kenntnisse über den tatsächlichen Zusammenhang zwischen Oberflächenabweichungen und Impedanz existieren, besteht

der Bedarf an einer systematischen Studie zur Eignung der Wälzlagerimpedanz für die Untersuchung von Oberflächenabweichungen in Wälzlagern. Eine solche Studie soll in dieser Arbeit durchgeführt werden, das Vorgehen wird im nächsten Kapitel dargelegt.

3. Forschungsdesign

In diesem Kapitel wird, basierend auf der Analyse des Stands der Technik, der Gegenstand der Arbeit abgegrenzt und das Vorgehen der Arbeit entwickelt. In Abschnitt 3.1 wird zunächst die Forschungslücke beschrieben, die mit dieser Arbeit geschlossen werden soll, und anhand dieser Forschungslücke die Zielstellung formuliert. In Abschnitt 3.2 werden aus dieser Zielstellung Forschungsfragen abgeleitet und das Vorgehen zur Klärung der Forschungsfragen entwickelt.

3.1. Forschungslücke und Zielsetzung

Wie in Abschnitt 2.5 ausführlich erläutert wurde, gibt es im Stand der Forschung bisher keine systematischen Untersuchungen zur Eignung der Wälzlagerimpedanz als Werkzeug für die Diagnose von Wälzlagerschäden. In dieser Arbeit soll deshalb eine solche grundsätzliche Untersuchung durchgeführt werden.

Bekannt ist, dass durch eine Messung der Kapazität eine Aussage über die Schmierfilmdicke getroffen werden kann und dass durch eine hochfrequente Widerstandsmessung metallische Kontakte von Rauheitsspitzen erkannt werden können [42, 24]. Dazu werden entsprechend schnelle Abtastraten bis zu 1 MHz verwendet, vgl. Abschnitt 2.2. Die Wichtigkeit einer hochfrequenten Messung wird von NEU ET AL. gestützt, die auf die kurzen Zeitdauern von Ereignissen im EHD-Kontakt hinweisen. So liegt beispielsweise die Dauer der Überrollung eines Pittings der Länge 0,1 mm im Lagertyp 6205, der auch in dieser Arbeit betrachtet wird, bei einer Drehzahl von 4000 min^{-1} im Bereich von $3 \cdot 10^{-5} \text{ s}$ [65]. Während hochfrequente Widerstandsmessungen also Stand der Forschung sind, werden Messungen der komplexen Impedanz bisher nur mit geringer Abtastrate vorgenommen, vgl. Abschnitt 2.2. Eine hochfrequente Messung der Impedanz kann es ermöglichen, neben der Information über ein Zusammenbrechen des Schmierfilms auch eine Information über die Kontaktfläche und die Schmierfilmdicke zu erhalten. Dies ist der erste Aspekt der Forschungslücke. Das erste Ziel der Arbeit ist deshalb, ein Verfahren zur hochfrequenten Messung der Wälzlagerimpedanz zu entwickeln und umzusetzen.

Der zweite Aspekt der Forschungslücke und der Zielsetzung ist die Auswertung der Daten. Zur Analyse von Widerstandssignalen hinsichtlich metallischem Kontakt von Rauheitsspitzen existiert umfangreiche Literatur, vgl. Abschnitt 2.2.3. Es ist zu prüfen, wie diese Erkenntnisse auf die Analyse der Impedanz übertragen werden können. Die elektrischen Eigenschaften von Wälzlagern bei der Überrollung diskreter Oberflächenabweichungen, z.B. Pittings, waren dagegen bisher nicht Gegenstand der Forschung. Hier müssen Verfahren neu entwickelt werden.

3.2. Forschungsfragen und Gliederung

Die Arbeit stützt sich im Wesentlichen auf experimentelle Untersuchungen. Grundlage dieser Untersuchungen sind zwei neuentwickelte Versuchsaufbauten, mit denen die nötige hochfrequente Messung der Wälzlagerimpedanz möglich ist. Diese Aufbauten werden in Kapitel 4 vorgestellt.

Für einen ersten Einblick in die Zusammenhänge zwischen Impedanz und Oberflächenabweichungen soll untersucht werden, ob und wie sich real auftretende Veränderungen der Oberfläche auf die Impedanz auswirken.

- FF1: Wie wirken sich die im realen Lebenslauf eines Rillenkugellagers auftretenden Oberflächenveränderungen auf die Wälzlagerimpedanz aus?

Im typischen Lebenslauf ein Wälzlagers, das in Vollschnierung und bei nicht verunreinigtem Schmierstoff betrieben wird, sind zwei Veränderungsprozesse der Oberfläche zu erwarten. Zu Beginn der Lebensdauer werden zunächst Oberflächenrauheiten eingeebnet (vgl. Abschnitt 2.2.3). Das Ende der Wälzlagerlebensdauer wird unter diesen Betriebsbedingungen typischerweise durch das Entstehen von Pittings, d.h. Ausbrüchen aus der Oberfläche von Laufbahn oder Wälzkörpern, markiert (vgl. Abschnitt 2.3.1). Unter anderen Betriebsbedingungen, z.B. bei Mischreibung und Verunreinigungen, können noch andere Oberflächenschädigungen eintreten, vgl. Abschnitt 2.3. Um erste Einblicke in die Eignung der Wälzlagerimpedanz zur Untersuchung von Oberflächenabweichungen zu erhalten, ist die Beschränkung auf die typischen Phänomene Einlaufen und Pittings aber ausreichend. Zur Untersuchung dieser Forschungsfrage werden in Kapitel 5 Lebensdauerersuche mit neuen Kugellagern durchgeführt, wobei in regelmäßigen Abständen die Impedanz gemessen wird.

Bei diesen Untersuchungen (Kapitel 5) zeigt sich, dass während der Einlaufphase und nach dem Auftreten von Pittings charakteristische Ausschläge im Impedanzsignal auftreten. Abbildung 3.1 illustriert dies anhand eines typischen Beispiels, dargestellt sind der Zeitverlauf des Real- und Imaginärteils der komplexen Wälzlagerimpedanz. Zudem wird die Topographie des aufgetretenen Pittings gezeigt. Während der Real- und Imaginärteil der Impedanz im ungeschädigten Zustand nur leichte und niederfrequente Schwankungen aufweisen, entstehen im geschädigten Zustand ausgeprägte und regelmäßige Ausschläge. Die Versuchsergebnisse deuten darauf hin, dass die Dauer und Höhe dieser Ausschläge sowie ihr zeitlicher Abstand davon abhängen, welche geometrische Form das Pitting aufweist und ob es sich auf Außenring, Innenring oder einem Wälzkörper befindet. Daraus ergeben sich zwei weitere Forschungsfragen. Zunächst sollen die vermuteten Zusammenhänge zwischen Signal und Geometrie für den Innenring genauer untersucht werden.

- FF2: Welche quantitativen und physikalischen Zusammenhänge bestehen zwischen der Geometrie von Oberflächenabweichungen am Innenring von Rillenkugellagern, den Betriebsbedingungen und der Wälzlagerimpedanz?

Eine systematische Untersuchung verschiedener Geometrien an allen drei Komponenten würde den Umfang des Versuchsprogramms stark erhöhen und wird deshalb nicht

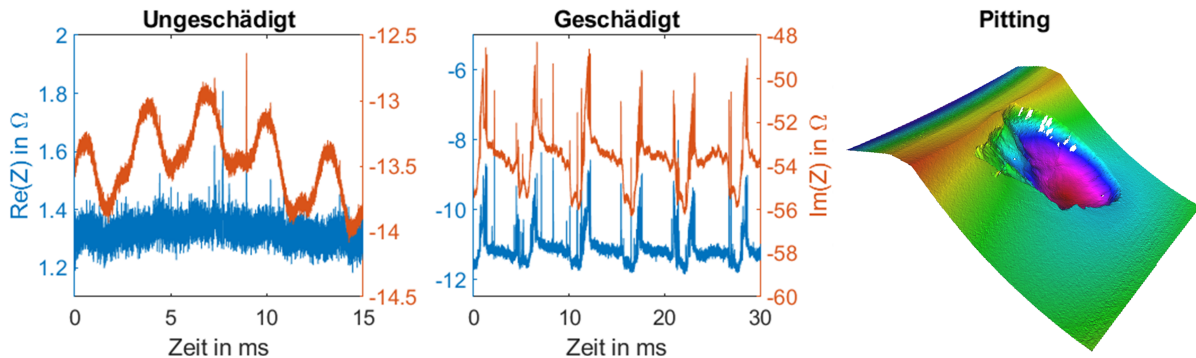


Abbildung 3.1.: Veränderung des Impedanzsignals beim Auftreten eines Pittings

umgesetzt. Der Innenring wird gewählt, da er für die verfügbare Oberflächenmesstechnik einfach zugänglich ist, der Außenring kann dagegen nicht zerstörungsfrei untersucht werden. In der Folge wird auch betrachtet, wie die Impedanz mit der Lokalisierung auf Außenring, Innenring oder Wälzkörper zusammenhängt:

- FF3: Welche quantitativen und physikalischen Zusammenhänge bestehen zwischen der Lokalisierung von Oberflächenabweichungen und der Wälzlagerimpedanz?

Zur Beantwortung dieser Forschungsfragen werden in Kapitel 6 modellhafte Zusammenhänge zwischen der Geometrie und Lokalisierung einerseits und der Wälzlagerimpedanz andererseits entwickelt. Dies geschieht auf experimentellem Weg, indem künstliche Oberflächenabweichungen durch Laserstrukturieren auf die Oberflächen der Bauteile eingebracht werden. Für die Beantwortung von FF2 werden Tiefe, Länge und Breite der Oberflächenabweichungen am Innenring systematisch variiert und die Auswirkungen auf die Ausprägung der Ausschläge untersucht. In den so modifizierten Lager wird dann unter variierenden Betriebsbedingungen die Impedanz gemessen, wobei im Versuchsplan zusätzlich die Betriebsbedingungen variiert werden. Für die Untersuchung von FF3 wird eine der am Innenring untersuchten Oberflächenabweichungen auch an Außenring und Wälzkörpern eingebracht. Die modifizierten Lager werden wiederum unter variierenden Betriebsbedingungen geprüft. Die Ergebnisse werden hinsichtlich der Frage analysiert, wie anhand der Messergebnisse auf die Lokalisierung geschlossen werden kann. In diesem Zuge wird auch geprüft, ob die am Innenring bezüglich FF2 gewonnenen Erkenntnisse auch an Außenring und Wälzkörpern gültig sind.

Die Beantwortung von FF2 und FF3 liefert Erkenntnisse über den Zusammenhang zwischen Impedanz und künstlichen Oberflächenveränderungen. Für die Praxis ist allerdings die Frage relevant, ob diese Erkenntnisse auch eine Aussage über die reale Oberflächenveränderungen erlauben. Aus dieser Überlegung ergibt sich die letzte Forschungsfrage:

- FF4: Können die Erkenntnisse von FF2 und FF3 auf im realen Lebenslauf eines Rillenkugellagers auftretende Oberflächenveränderungen übertragen werden?

Zur Beantwortung dieser Forschungsfrage werden in Kapitel 7 die Lebensdauerexperimente erneut herangezogen. Die beobachteten Veränderungen im Impedanzsignal werden mit

den Messergebnissen der Geometrieversuche verglichen. Es wird untersucht, ob die aus den Geometrieversuchen abgeleiteten Erkenntnisse zum Zusammenhang zwischen Impedanzsignal und Geometrie auch für die real aufgetretenen Schadensgeometrien gültig sind. Auf diese Weise wird die Modellierung, die zur Beantwortung von FF2 und FF3 durchgeführt wurde, bezüglich ihrer Anwendbarkeit auf reale Fälle validiert.

4. Versuchseinrichtungen

In diesem Kapitel werden die Prüfaufbauten vorgestellt, die bei der Versuchsdurchführung verwendet werden. Zunächst werden in Abschnitt 4.1 der Wälzlagerprüfstand und die zwei verwendeten Prüfstandskonfigurationen vorgestellt. Besonders im Fokus stehen die neuentwickelten Impedanzmessverfahren. Wie in Abschnitt 3.1 beschrieben, ist die Möglichkeit einer präzisen Impedanzmessung mit hoher Abtastrate eine Grundvoraussetzung für die Beantwortung der Forschungsfragen. Deshalb werden die beiden entwickelten Messmethoden in Abschnitt 4.2 ausführlich beschrieben. Ferner kommt ein Verfahren zur Erzeugung von Oberflächenabweichungen im Wälzlager zum Einsatz.

4.1. Wälzlagerprüfstand

In dieser Arbeit wird die elektrische Impedanz von Wälzlagern vermessen, die im Prüfstand ATHENE des Fachgebiets *pmd* unter definierten Betriebsbedingungen betrieben werden. Mit dem Prüfstand können Wälzlager an vier baugleichen Prüfstationen unter variablen mechanischen und thermischen Betriebsbedingungen getestet werden, dafür können radiale und axiale Lagerbelastung, Öltemperatur und Innenring-Drehzahl eingestellt werden. Zusätzlich verfügt er über die Möglichkeit, eine elektrische Spannung an den Wälzlagern einzustellen und ermöglicht somit auch die Messung der Impedanz. In Abbildung 4.1 ist eine Prüfstation zu sehen. Die wesentlichen Komponenten sind das Ölsystem mit Ölpumpe, Ölbehälter, Öltemperierung und Öltemperaturfühler (nicht abgebildet), die Lagertemperatur-Fühler (1), die Hydraulikzylinder für radiale (2) und axiale (3) Belastung, der Antriebsmotor (4), der Schleifring (5), die Kontaktierung des Prüflager-Außenrings (6) sowie je ein axial (7) sowie radial (nicht abgebildet, auf der Rückseite der Prüfkammer) montierter Beschleunigungsaufnehmer. Der Antriebsmotor ist mit der Prüfstandswelle durch eine elastische Klauenkupplung verbunden. Die Ausgleichselemente der Kupplung bestehen aus einem elektrisch isolierenden Elastomer, deshalb ist die Prüfstandswelle von der Antriebswelle elektrisch isoliert.

Der Prüfstand wird in dieser Arbeit in zwei unterschiedlichen Konfigurationen für Lebensdauerversuche (Kapitel 5) und für Versuche mit künstlich eingebrachten Oberflächenstrukturen (kurz *Strukturversuche* genannt, Kapitel 6) verwendet. Die beiden Konfigurationen werden im Folgenden beschrieben. Dabei werden die Lager, deren elektrische Eigenschaften vermessen werden, als *Prüflager* bezeichnet, und alle anderen Lager als *Stützlager*.

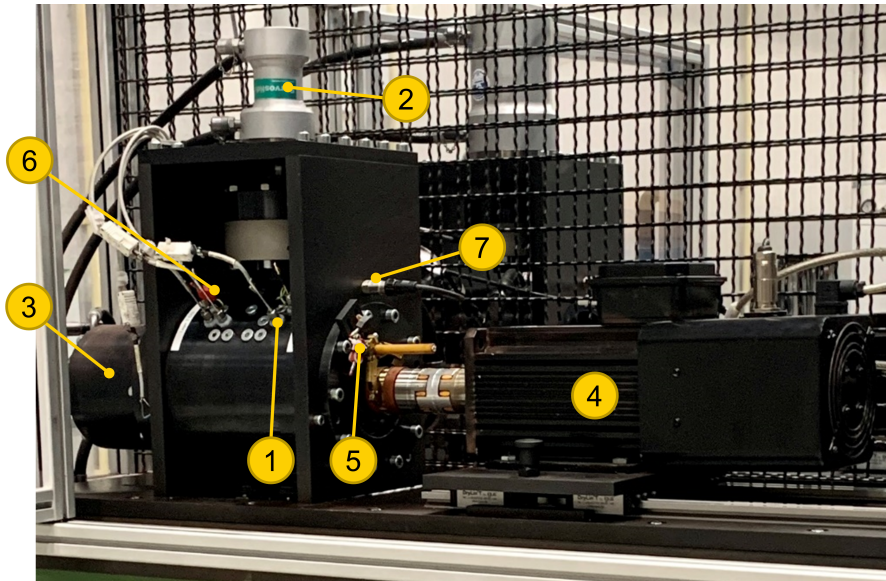


Abbildung 4.1.: Prüfstation des Wälzlagerprüfstands am Fachgebiet *pmd*

4.1.1. Prüfstandsaufbau für Strukturversuche

Der innere Aufbau des Prüfstands, der für die Strukturversuche in Kapitel 6 verwendet wird, ist schematisch in Abbildung 4.2 dargestellt. Auf der Welle sind insgesamt vier Wälzlager montiert. Die Hydraulikzylinder leiten Kräfte $F_{a,Z}$ und $F_{r,Z}$ in die Wälzlager ein. Die Radialkraft wird über den gemeinsamen Lagersitz der innenliegenden Lager eingeleitet und durch die außenliegenden Lager abgeleitet. Die Radiallast jedes einzelnen Lagers, die als F_r bezeichnet wird, beträgt also 50 % der eingeleiteten Kraft $F_{r,Z}$. Die Axiallast F_a wird durch das zylinderseitige Lager eingeleitet und durch das Prüflager abgeleitet.

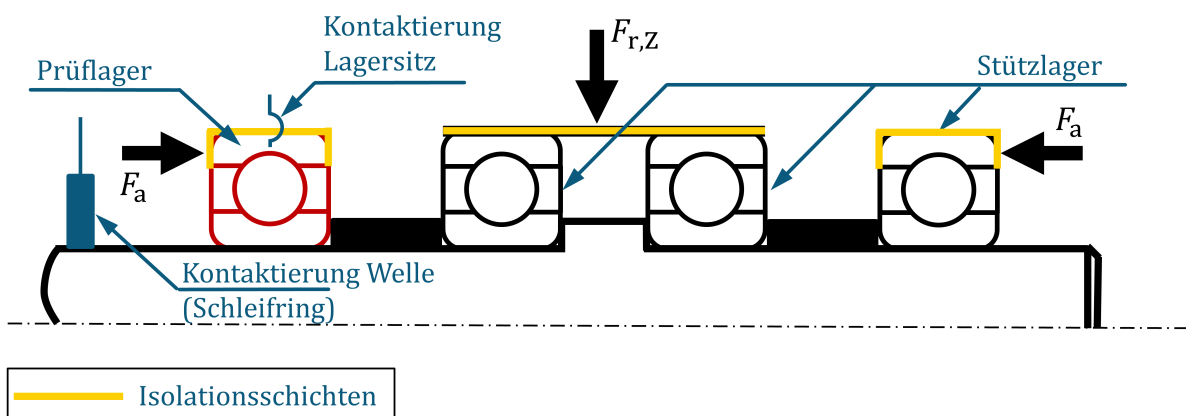


Abbildung 4.2.: Schematischer Aufbau des Wälzlagerprüfstands ATHENE in der Konfiguration für die Strukturversuche

In Abbildung 4.2 sind auch die Prüfstandskomponenten dargestellt, die einen eindeu-

tigen elektrischen Pfad durch das Prüflager ermöglichen. Die Welle kann durch einen Schleifring und der Lagersitz des Prüflagers durch einen Kontaktstift kontaktiert werden. Zwischen dem Lagersitz des Prüflagers und dem Prüfstandsgehäuse liegt eine Isolationsschicht. Die drei übrigen Lager, im Folgenden als Stützlager bezeichnet, sind als Hybridlager mit elektrisch isolierenden keramischen Wälzlager ausgeführt, zusätzlich sind auch hier Isolationsschichten zwischen den Lagersitzen und dem Gehäuse eingebracht. Das aus dieser Konstruktion resultierende elektrische Ersatzschaltbild ist in Abbildung 4.3 dargestellt. Das geerdete Gehäuse des Prüfstands dient als Bezugspotential (Masse), und der Lagersitz des Prüflagers wird mithilfe des Kontaktstiftes mit diesem Bezugspotential verbunden, d.h. die Isolierschicht wird kurzgeschlossen und kann für das elektrische Verhalten vernachlässigt werden. Das Prüflager wird durch seine Impedanz \underline{Z}_{WL} repräsentiert. Diese ist i.A. komplexwertig. Es ist mit der Welle und mit dem Bezugspotential am Gehäuse verbunden. Der Prüfaufbau weist parasitäre Induktivitäten auf, die einerseits aus den Induktivitäten der verwendeten Messkabel resultieren. Aber auch die Induktivitäten der Welle und des Gehäuses, die in den Stromkreis einbezogen sind, können nicht vernachlässigt werden, denn ihre Impedanzen liegen bei Frequenzen im MHz-Bereich in einer Größenordnung von $10\ \Omega$, wie von FURTMANN gezeigt wurde [29]. Da bei diesem Aufbau alle Komponenten in Reihe geschaltet sind, können die parasitären Induktivitäten zu einer einzigen Induktivität L_A zusammengefasst werden. Parallel zu \underline{Z}_{WL} und C_{iso} liegt die parasitäre Kapazität des Versuchsaufbaus zwischen Welle und Gehäuse C_A . Wegen der Verwendung von Hybridlagern, deren Kapazität nicht von ihren Betriebsbedingungen abhängt, kann diese parasitäre Kapazität als konstant angenommen werden. Die Bestimmung und Kompensation der parasitären Kapazität und Induktivität wird in Abschnitt 4.2.1 beschrieben. Welle und Gehäuse können kontaktiert werden. Durch diesen einfachen Aufbau wird das in Abschnitt 4.2.1 vorgestellte Impedanzmessverfahren ermöglicht, bei dem der in die Welle fließende Strom gemessen wird.

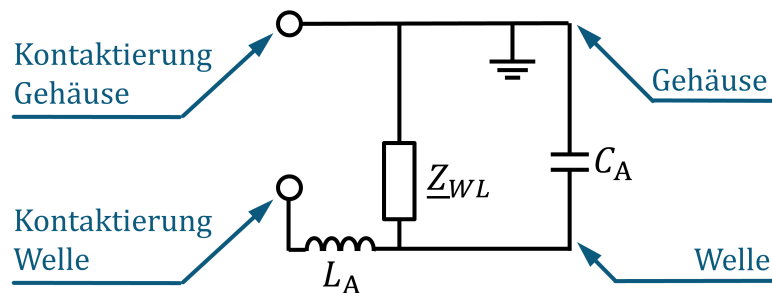


Abbildung 4.3.: Elektrisches Ersatzschaltbild des Wälzlagerprüfstands in der Konfiguration für die Strukturversuche

4.1.2. Prüfstandsaufbau für Lebensdauerversuche

Für die Lebensdauerversuche sind, im Vergleich mit dem einfachen Aufbau für die Strukturversuche, einige Modifikationen nötig. Abbildung 4.5 zeigt eine schematische Darstel-

lung dieses Aufbaus. Um Prüfzeiten zu verkürzen werden zwei Prüflager in den beiden äußeren Lagersitzen gleichzeitig getestet. Die gleichzeitige Vermessung von vier Prüflagern ist nicht möglich, da die beiden inneren Lager einen gemeinsamen Lagersitz haben und somit nicht getrennt kontaktiert werden können.

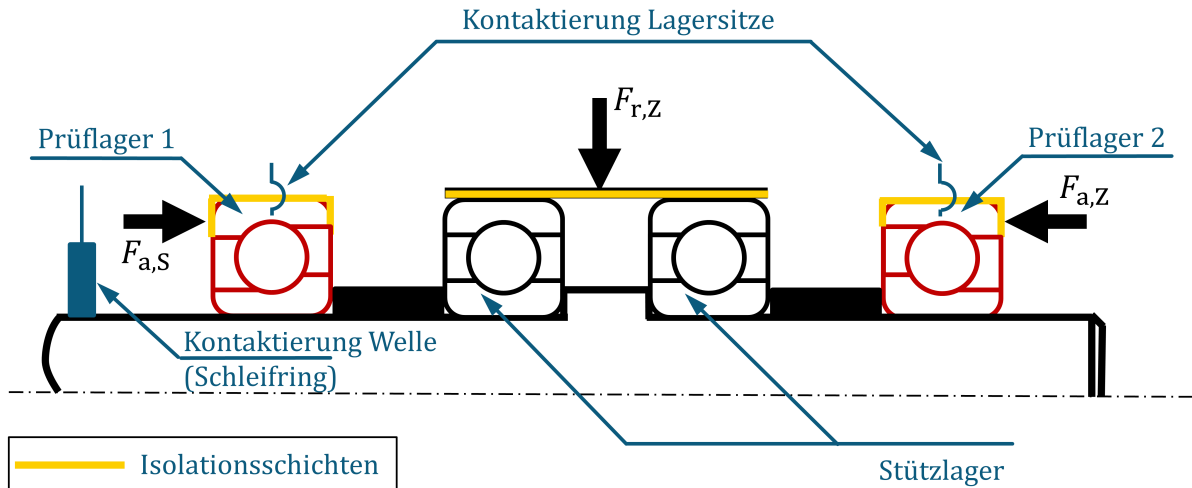


Abbildung 4.4.: Schematischer Aufbau des Wälzlagerprüfstands ATHENE in der Konfiguration für die Dauerversuche

Der einfache elektrische Aufbau nach Abbildung 4.3, bei dem zur Messung der Impedanz nur der in die Welle fließende Strom gemessen werden muss, ist in diesem Aufbau nicht mehr anwendbar. Deshalb wird die Isolierung in diesem Aufbau nicht kurzgeschlossen, sondern als Teil eines kapazitiven Spannungsteilers für die Impedanzmessung benutzt, wie in Abschnitt 4.2.2 beschrieben wird. In Abbildung 4.5 ist das elektrische Ersatzschaltbild des Aufbaus dargestellt. Die Stützlager sind, wie bei den Strukturversuchen, als Hybridlager ausgeführt und können für die elektrische Modellierung vernachlässigt werden. Die Lagersitze der beiden Prüflager sowie die Welle können kontaktiert werden. Zwischen den inneren und den äußeren Teilen der Lagersitze bilden sich aufgrund der Isolierschicht Kapazitäten $C_{iso,1,2}$ aus. Diese Kapazitäten können gemessen werden, da die Lagersitze aus dem Prüfstand demontiert werden können. Parasitäre Induktivitäten und Kapazitäten werden, anders als beim Aufbau für die Strukturversuche, in diesem Modell vernachlässigt. Der Grund ist, dass das elektrische Netzwerk nun deutlich komplexer ist und die parasitären Kapazitäten, die zwischen allen Bauteilen auftreten, nicht einfach auf einen einzigen Wert reduziert werden können.

4.2. Impedanz-Messverfahren

Die unterschiedlichen elektrischen Ersatzmodelle bedingen auch verschiedene Auswertungsverfahren zur Bestimmung der Impedanz der Prüflager. In diesem Abschnitt werden beide Verfahren detailliert vorgestellt.

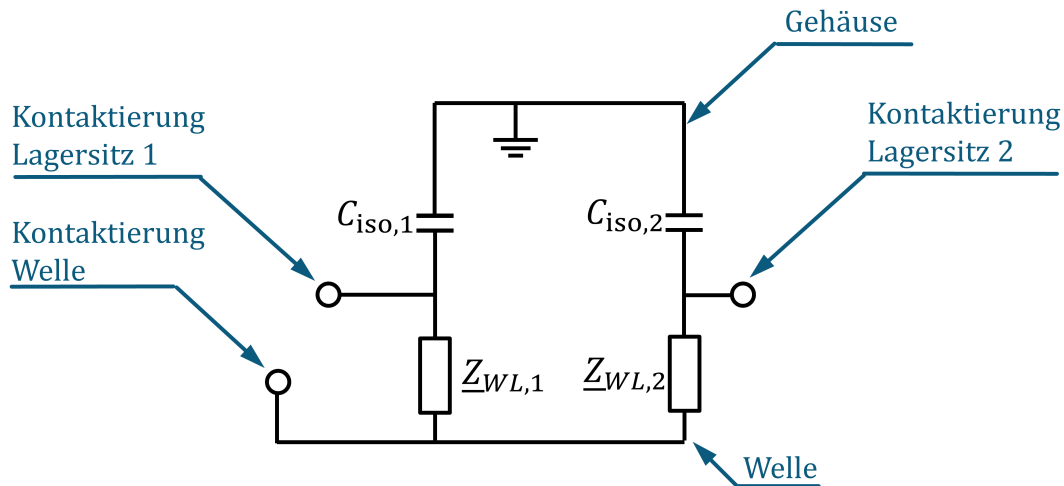


Abbildung 4.5.: Elektrisches Ersatzschaltbild des Wälzlagerprüfstands in der Konfiguration für die Dauerversuche

4.2.1. Impedanz-Messverfahren für Versuche mit künstlich eingebrachten Oberflächenstrukturen

Basierend auf der elektrischen Modellierung des Prüfstands wurde ein Messverfahren entwickelt, um die Impedanz des Prüflagers zu bestimmen. In Abbildung 4.6 ist ein elektrisches Ersatzschaltbild des Messaufbaus dargestellt. Das Messverfahren kann nicht direkt die Lagerimpedanz bestimmen, sondern misst die Gesamtimpedanz Z_A zwischen Gehäuse und Wellenanschluss. Aus der Gesamtimpedanz wird später die Wälzlagerimpedanz berechnet. Dieses Bezugspotential ist auch mit dem Gehäuse verbunden und das Gehäuse ist elektrisch leitend mit dem Lagersitz des Außenrings verbunden, sodass der Außenring auf Massepotential liegt. Mithilfe eines Signalgenerators vom Typ *Rigol DG1022Z* wird eine sinusförmige Wechselspannung mit der Messfrequenz $f_m = 2,5$ MHz und der Amplitude $\hat{U}_m = 2,5$ V zwischen der Welle und dem Bezugspotential angelegt. Aufgrund des Innenwiderstands der Spannungsquelle entspricht die tatsächliche Klemmenspannung nicht der eingestellten Messspannung \hat{U}_m . Die tatsächlich anliegende Spannung wird als Gesamtspannung U_G bezeichnet und unmittelbar am Schleifring abgegriffen. Diese Spannung sowie der in die Welle fließende Strom I werden mit einem Oszilloskop vom Typ *Picoscope 4444* und einem Stromsensor vom Typ *Tektronix CT2* gemessen.

Die Wahl der Spannungsamplitude beruht auf einem Kompromiss zwischen einem guten Signal-Rausch-Verhältnis und der Vermeidung einer Schädigung aufgrund von Stromdurchgang. Wie in diesem Abschnitt noch dargestellt wird, treten EMV-bedingte Störungen im Messsignal auf, deren Auswirkung durch eine große Messspannung verringert werden kann. Andererseits kommt es bei großen Spannungen und damit verbundenen großen Stromstärken zur Schädigung des Wälzlagers, vgl. Abschnitt 2.3. Als unkritisch wird dabei eine scheinbare Lagerstromdichte von $J_b < 0,1$ A/mm² angesehen [53], vgl. Abschnitt 2.3.2. Zur Abschätzung der maximalen in den Versuchen auftretenden Lager-

stromdichte wird einerseits die kleinste in den Versuchen auftretende Hertz'sche Fläche bestimmt, die der kleinsten auftretenden Radiallast entspricht. Nach dem verwendeten Versuchsplan, der in Abschnitt 6.1.2 beschrieben wird, beträgt die kleinste Last $F_r = 750 \text{ N}$. Die Hertz'sche Fläche aller Kontakte am Innenring beträgt in diesem Fall $1,10 \text{ mm}^2$, berechnet mit einem am *pmd* entwickelten Berechnungsprogramm, das die in Abschnitt 2.1 beschriebenen Gleichungen implementiert. Um sicher unterhalb der Grenze von $0,1 \text{ A/mm}^2$ zu bleiben, darf somit die Stromstärke einen Wert von 110 mA nicht überschreiten. Zur Bestimmung der maximal auftretenden Stromstärke wird der Betriebszustand im Stillstand bei einer Radiallast von 3500 N herangezogen. In diesem Zustand ist der Widerstand des Lagers selbst verschwindend gering, die Spannungsquelle wird nur noch durch ihren eigenen Innenwiderstand und die parasitäre Impedanz des Prüfaufbaus belastet. Der Kurzschlussstrom, der in diesem Zustand auftritt, ist die maximale Stromstärke, die im Betrieb auftreten kann [47]. Die am Signalgenerator eingestellte Spannung wurde variiert, während die Stromstärke auf dem Oszilloskop beobachtet wurde und somit der verwendete Wert von $\hat{U}_m = 2,5 \text{ V}$ bestimmt.

Die Wahl der Messfrequenz beruht auf einem Kompromiss zwischen der möglichen Messdauer und der erreichbaren Abtastrate der Impedanz. Je höher die Messfrequenz, desto höher ist auch die Messrate der Impedanz. Um schnelle Überrollungsereignisse auflösen zu können, ist eine hohe Messrate wünschenswert. Je höher die Messfrequenz, desto höher muss auch die Abtastrate des Oszilloskops gewählt werden. Aufgrund der begrenzten Speichertiefe des Oszilloskops sinkt die Dauer einer Messung mit steigender Abtastrate. Gerade bei niedrigen Drehzahlen ist eine lange Messdauer wünschenswert, um je Messung mehrere Umdrehungen der Welle aufnehmen zu können. Mit einer Messfrequenz von $f_m = 2,5 \text{ MHz}$ und einer Abtastrate von $f_s = 50 \text{ MHz}$ wird ein iterativ ermittelter sinnvoller Kompromiss erreicht. Damit ergibt sich eine Messdauer von $1,34 \text{ s}$.

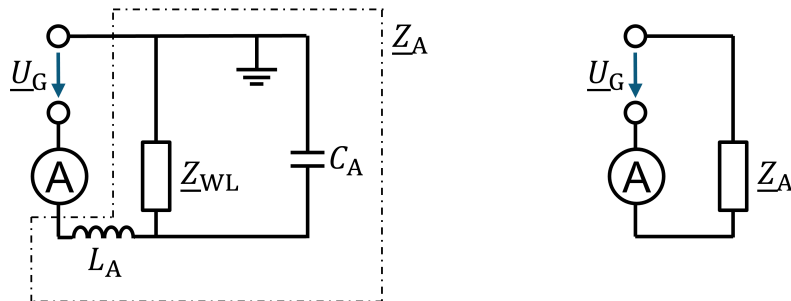


Abbildung 4.6.: Elektrisches Ersatzschaltbild des Impedanz-Messverfahrens für die Strukturversuche. Links: Vollständiges Ersatzschaltbild, rechts: Reduziert auf die Impedanz des Gesamtaufbaus \underline{Z}_A

Die Gesamtimpedanz kann durch

$$\underline{Z}_A = \frac{\underline{U}_G}{\underline{I}} \quad (4.1)$$

berechnet werden [47], wobei \underline{U}_G und \underline{I} die komplexwertigen Amplituden der Spannung bzw. des Stroms sind. Zur Bestimmung von \underline{U}_G und \underline{I} wird das Signal zunächst in

Abschnitte unterteilt, deren Länge n_A Messpunkte beträgt. Die Abschnitte überlappen sich zusätzlich um n_{ol} Messpunkte. In dieser Arbeit beträgt $n_A = 80$ und $n_{ol} = 40$. In Abbildung 4.7 ist anhand einer beispielhaften Messung dargestellt, wie das Signal in überlappende Abschnitte unterteilt wird. Für jeden Abschnitt wird U_G und I im Frequenzbereich bestimmt, indem die diskrete Fourier-Transformation (DFT) der Spannung und des Stroms bei der Frequenz f_m berechnet wird. Die Impedanz wird dann für jeden Abschnitt mit (4.1) berechnet. Auf diese Weise wird aus 80 Messpunkten des Oszilloskops ein Impedanzwert bestimmt. Die Messrate der Impedanz beträgt aufgrund der Überlappung $1/80$ der Abtastrate des Oszilloskops, somit wird mit dem Verfahren eine Messrate von 1,25 MHz erreicht. Abbildung 4.7 zeigt das Verfahren anhand einer beispielhaften Messung. Dargestellt ist der i -te und der $(i + 1)$ -te Abschnitt und ihre Abbildung auf einen Zeitpunkt im Impedanzsignal.

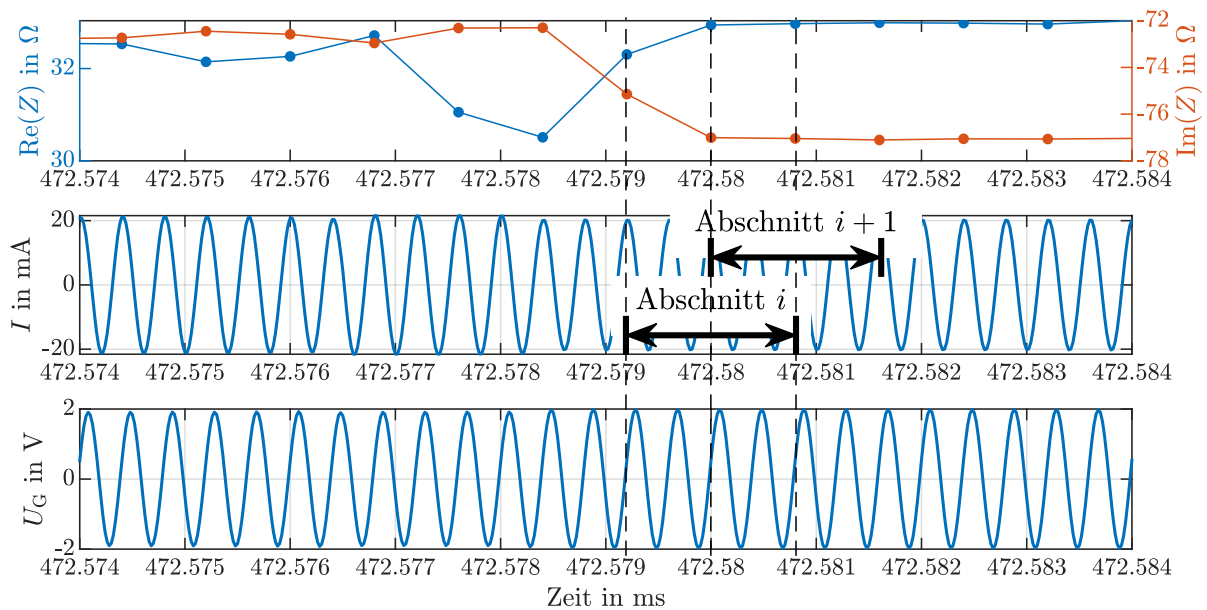


Abbildung 4.7.: Zuordnung von Abschnitten des Strom- und Spannungssignals zu Messpunkten im Impedanzsignal für eine beispielhafte Messung.

Abbildung 4.8 zeigt einen Ausschnitt aus Messsignal bei einer beispielhaften Messung aus Kapitel 6. Sichtbar ist, dass neben einem stochastischen Rauschen mehrere Spitzen erscheinen, die eine Länge von nur einem Messpunkt aufweisen. Die Tatsache, dass diese Störung nur bei laufendem Antriebsmotor auftritt, deutet auf ein EMV-Problem hin, dessen Ursache in der elektrischen Maschine liegt. Die genaue Ursache und der Übertragungsweg konnten allerdings nicht geklärt werden. Diese Störungen, die als Ausreißer bezeichnet werden können, sind hinderlich für die Analyse des Signals bezüglich einzelner Ausschläge und sollen deshalb aus dem Signal entfernt werden. Wie in Abschnitt 6.4.1 erläutert wird, treten in den Signalen bei der Überrollung von Schäden sehr steile Flanken auf, die durch einfache Tiefpassfilterung verfälscht würden. Aus diesem Grund wird ein Verfahren verwendet, das nur einzelne Ausreißer-Messpunkte entfernt, ohne die eigentliche Signalform zu verändern. Ein geeignetes Verfahren hierfür ist das HAMPEL-Filter,

das im Folgenden kurz beschrieben wird. Für eine präzise mathematische Beschreibung wird auf [66] verwiesen. Dieses Filter beruht darauf, dass Ausreißer durch eine statistisch signifikante Abweichung vom umgebenden Signal gekennzeichnet sind. Als Maß für die statistische Signifikanz wird die Standardabweichung verwendet. Das Hampel-Filter in der hier verwendeten Implementierung verwendet für den i -ten Datenpunkt ein Fenster mit einer Länge von zehn Datenpunkten um den Punkt i . Innerhalb dieses Fensters wird die Standardabweichung und der Median berechnet. Weicht der Datenpunkt um mehr als 3σ vom Median ab, wird er durch den Median ersetzt. Abbildung 4.8 zeigt einen Ausschnitt des ungefilterten sowie des gefilterten Signals. Mit diesem Filter werden alle gemessenen Impedanzen vor der weiteren Auswertung behandelt.

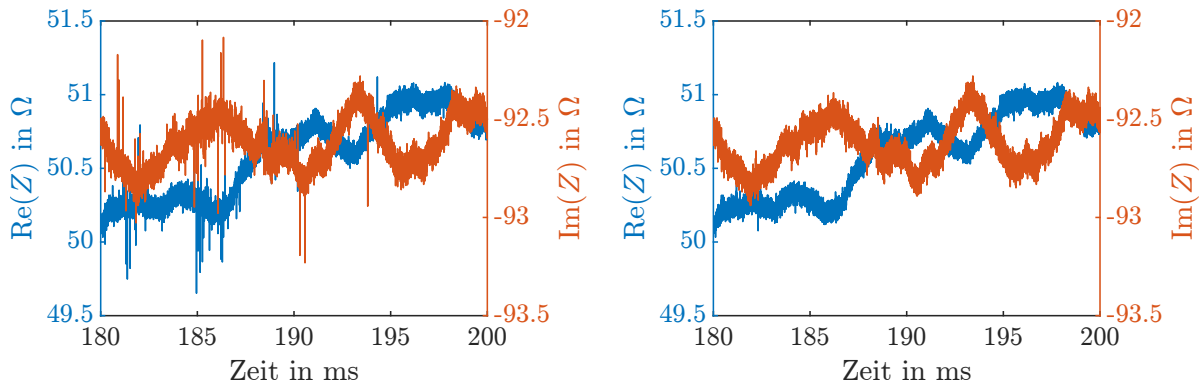


Abbildung 4.8.: Entfernung von Ausreißern aus dem Impedanzsignal. Links: Rohsignal, rechts: mit Hampel-Filter bearbeitetes Signal

Das rohe Impedanzsignal beschreibt die gesamte Impedanz des Aufbaus \underline{Z}_A , vgl. Abbildung 4.6. Dieser Impedanzwert muss um die parasitäre Induktivität L_A und Kapazität C_A bereinigt werden, um den tatsächlichen Wert der Wälzlagerimpedanz zu erhalten. Die dazu verwendeten Ersatzmodelle sind in Abbildung 4.9 dargestellt, wobei die parasitäre Kapazität und Induktivität durch ihre Impedanzen dargestellt sind. Im ersten Schritt wird die Serien-Impedanz der in dieser Arbeit verwendeten angepassten Messschaltung bestimmt. Dazu wird das Wälzlager kurzgeschlossen, indem im Stillstand eine Radialkraft von $F_r = 3500\text{ N}$ aufgebracht wird. In diesem Zustand hat das Lager keinen nennenswerten Widerstand mehr. Die Kapazität des Aufbaus liegt parallel zum kurzgeschlossenen Lager und kann deshalb vernachlässigt werden. Das Ersatzmodell, dargestellt in Abbildung 4.9 Mitte, besteht nur noch aus der Serien-Impedanz \underline{Z}_{LA} . Durch eine Messung der Impedanz in diesem Zustand wird dieser Wert bei 2,5 MHz zu $\underline{Z}_{LA} = (2,19 + 13,9j)\ \Omega$ bestimmt. Im zweiten Schritt wird die parallele parasitäre Kapazität des verwendeten Prüfstands berücksichtigt. Sie wurde bereits von SCHIRRA zu $C_A = 11,3\text{ pF}$ bestimmt [14]. Da für diese Arbeit die gleiche Prüfkammer verwendet wird, kann der von SCHIRRA bestimmte Wert auch für diese Arbeit verwendet werden. Es ergibt sich für die Prüffrequenz von $f_m = 2,5\text{ MHz}$ mit

$$\underline{Z}_{CA} = \frac{1}{j\omega C_A} \quad (4.2)$$

eine Impedanz von $\underline{Z}_{CA} = -5634j \Omega$.

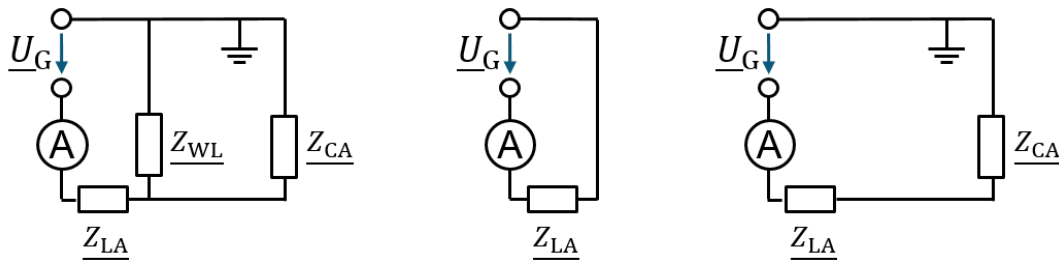


Abbildung 4.9.: Bestimmung der parasitären Einflüsse des Versuchsaufbaus. Links: vollständiges Modell; mitte: Bestimmung der parasitären Induktivität, rechts: Bestimmung der parasitären Kapazität.

Somit sind alle Parameter des Ersatzmodells bekannt. Aus einer gemessenen Gesamtimpedanz \underline{Z}_A kann die gesuchte Wälzlagerimpedanz mit

$$\underline{Z}_{WL} = \left(\frac{1}{\underline{Z}_A - \underline{Z}_{LA}} - \frac{1}{\underline{Z}_{CA}} \right)^{-1} \quad (4.3)$$

bestimmt werden.

4.2.2. Impedanz-Messverfahren für Lebensdauerversuche

Das einfache Impedanzmessverfahren, das für die Strukturversuche entwickelt wurde, kann für die Dauerversuche nicht verwendet werden. Der Grund ist, dass dieses Verfahren auf einer Messung des in die Welle fließenden Stroms beruht. Prinzipbedingt kann damit nur eine Impedanz für die gesamte Wellenlagerung bestimmt werden. Im Dauerversuch werden aber zwei Prüflager gleichzeitig vermessen, sodass ein anderes Verfahren verwendet werden muss.

Dieses zweite Verfahren beruht darauf, die Isolationsschichten der Lagersitze als kapazitive Spannungsteiler zu verwenden und wird im Folgenden anhand von Abbildung 4.10 erläutert.

Genau wie im Aufbau für die Strukturversuche wird eine Spannung U_G zwischen Welle und Gehäuse angelegt und gemessen. Zusätzlich werden die Spannungen $U_{iso,1}$ und $U_{iso,2}$ gemessen, die an den Isolierschichten der beiden Lager abfallen. Für die beiden Maschen durch $Z_{WL,1}$ und $Z_{WL,2}$ kann jeweils eine Maschengleichung aufgestellt werden, die sich zu

$$U_G - U_{iso,1} - U_1 = 0 \text{ bzw.} \quad (4.4)$$

$$U_G - U_{iso,2} - U_2 = 0 \quad (4.5)$$

ergeben. Die weitere Herleitung der Bestimmungsgleichung wird nur für $Z_{WL,1}$ durchgeführt, sie kann auf $Z_{WL,2}$ übertragen werden. Für eine Reihenschaltung von Impedanzen kann eine Spannungsteilerregel formuliert werden, analog zur Spannungsteilerregel für

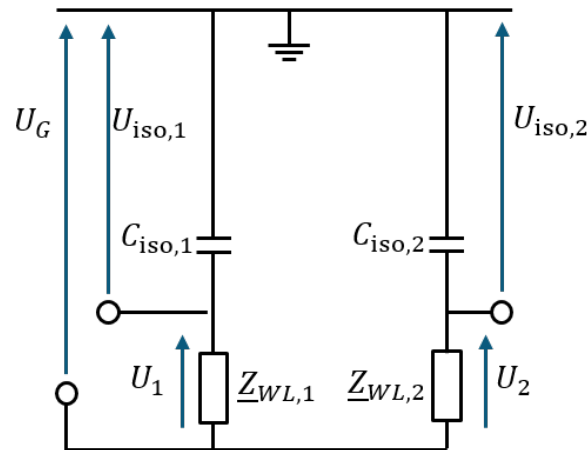


Abbildung 4.10.: Elektrisches Ersatzschaltbild des Impedanzmessverfahrens für die Dauerversuche

Widerstände [47]. Die Anwendung der komplexwertigen Spannungsteilerregel auf die Reihenschaltung aus $Z_{WL,1}$ und $C_{iso,1}$ liefert die Gleichung

$$\frac{U_1}{Z_{WL,1}} = \frac{U_{iso,1}}{Z_{iso,1}}, \quad (4.6)$$

wobei $Z_{iso,1}$ die Impedanz der Isolierschicht ist. Sie kann aus der Kapazität der Isolierschicht durch

$$Z_{iso,1} = \frac{1}{j\omega C_{iso,1}} \quad (4.7)$$

berechnet werden. Umstellen von (4.6) nach $Z_{WL,1}$ und Einsetzen der nach U_1 umgestellten Gleichung (4.4) liefert die Bestimmungsgleichung

$$Z_{WL,1} = \left(\frac{U_G}{U_{iso,1}} - 1 \right) \cdot Z_{iso,1}, \quad (4.8)$$

mit der die Wälzlagerimpedanz anhand der Messwerte berechnet werden kann. Der letzte unbekannte Parameter in (4.8) ist die Impedanz der Isolierschicht $Z_{iso,1}$. Die Kapazitäten der Isolierschichten beider Lagersitze werden mit einem LCR-Meter (Rohde & Schwarz HM8118) gemessen, nachdem die Lagersitze aus dem Prüfstand demontiert wurden. Die Kapazität des Lagersitzes 1 beträgt $C_{iso,1} = 2,2 \text{ nF}$ und Kapazität des Lagersitzes 2 beträgt $C_{iso,2} = 2,6 \text{ nF}$. Das Verhalten der Lagersitze ist im demontierten Zustand rein kapazitiv, der Isolationswiderstand liegt im $\text{M}\Omega$ -Bereich. Die maximale Messfrequenz dieses Geräts beträgt 200 kHz , deshalb kann keine direkte Messung der Impedanz bei $2,5 \text{ MHz}$ durchgeführt werden. Anhand der gemessenen Kapazitäten können mit

$$Z_{iso} = \frac{1}{j\omega C_{iso}} \quad (4.9)$$

die zugeordneten Impedanzen bei der Messfrequenz berechnet werden.

Die Spannungen U_G , $U_{\text{iso},1}$ und $U_{\text{iso},2}$ werden, wie im Aufbau für die Strukturversuche, mit einem Oszilloskop vom Typ *Picoscope 4444* gemessen und das Anregungssignal wird mit einem Funktionsgenerator vom Typ *Rigol DG1022Z* erzeugt. Die komplexen Spannungsamplituden \underline{U}_G , $\underline{U}_{\text{iso},1}$ und $\underline{U}_{\text{iso},2}$ werden mit dem bereits in Abschnitt 4.2.1 beschriebenen Verfahren bestimmt. Die Abtastrate des Oszilloskops f_s , die Messfrequenz f_m , die Messdauer T_m sowie die Amplitude \hat{U}_m und die Frequenz f_m des Anregungssignals entsprechen den Werten des Verfahrens für die Strukturversuche und sind in Abschnitt 4.2.1 dokumentiert. Auch die Verarbeitung mit einem Hampel-Filter erfolgt in der gleichen Weise wie für das Signal der Strukturversuche. Im Unterschied zum Messverfahren für die Strukturversuche werden die parasitären Induktivitäten und Kapazitäten nicht kompensiert. Der Grund liegt in der komplexeren Struktur des elektrischen Systems, was bereits in Abschnitt 4.1.2 erläutert wurde. Im Aufbau für die Strukturversuche führt nur eine Masche des elektrischen Systems durch den Prüfstand, zudem sind die Isolierschichten kurzgeschlossen. Deshalb besteht lediglich eine Spannungsdifferenz zwischen Welle und Gehäuse, alle Bauteile des stehenden Systems haben gleiches Potential. Im Gegensatz dazu führen beim Aufbau für die Dauerversuche zwei Maschen des elektrischen Netzwerks durch den Prüfstand, da die Isolierschichten nicht mehr kurzgeschlossen sind. Deshalb können zwischen den Bauteilen Potentialdifferenzen entstehen, die sich als parasitäre Kapazitäten äußern. Die Metallbauteile selbst weisen jeweils Induktivitäten auf. Die Identifikation aller parasitären Einflüsse und die Verifikation der daraus berechneten Impedanz ist entsprechend aufwendiger als beim Messverfahren für die Strukturversuche. Da für diese Arbeit, wie in den folgenden Kapiteln deutlich wird, die Absolutwerte der Impedanz wenig interessant sind, wird auf diesen aufwendigen Schritt verzichtet. In den bisherigen Erläuterungen wurde die Impedanz des Wälzlagers als $\underline{Z}_{\text{WL}}$ bezeichnet. In den folgenden Kapiteln wird im Sinne einer einfachen Schreibweise die Kennzeichnung als komplexe Größe sowie der Index WL weggelassen und die Wälzlagerimpedanz nur noch als Z bezeichnet.

4.3. Laserstrukturierung

In Kapitel 6 werden künstliche Oberflächenstrukturen in Wälzlager eingebracht. Das Ziel im Rahmen dieser Arbeit ist die Erzeugung von Schäden, die hinsichtlich ihrer Geometrie mit realen Pittings vergleichbar sind. Eine wichtige Eigenschaft realer Pittings ist, dass sie als reine Vertiefung ohne Gratbildung oder Aufwerfungen an den Rändern auftreten. Aufgrund dieser Eigenschaft scheidet die Erzeugung durch Eindruck eines Rockwell-Härteprüfkörpers, die z.B. von KRUPKA ET AL. praktiziert wurde, aus, denn bei der Umformung entstehen Grate bzw. Randaufwerfungen [67]. Es kommen also nur abtragende Verfahren infrage. Zusätzlich wird gefordert, dass die Strukturen eine definierte Geometrie aufweisen. Durch Ätzen, Zerspanung und Lasergravur können solche Strukturen erzeugt werden [68]. Von diesen Verfahren steht nur die Lasergravur für diese Arbeit zu Verfügung und wird deshalb verwendet. Das verwendete Gerät LASEBOX des Herstellers ÖSTLING MARKIERSYSTEME ist für die Laserbeschriftung konzipiert, erzeugt aber auch einen Materialabtrag. Bei Testmessungen zeigte sich, dass der Mate-

rialabtrag nicht linear mit der Belichtungszeit steigt. Eine mögliche Ursache ist, dass die Veränderung der Oberfläche zu einem veränderten Absorptionsverhalten führt.

Ein Beispiel für eine resultierende Geometrie ist in Abbildung 4.11 dargestellt. Hierbei wurde eine linienförmige Geometrie modelliert, sodass diese Abbildung die kleinste erzeugbare Geometrie repräsentiert. Auffällig ist, dass der tiefste Punkt nicht in der Mitte der Struktur, sondern an zwei Punkten außermittig auftritt. Diese Form ist plausibel, falls der Laser im Strahlmode TEM_{01} betrieben wurde, in dem ein Intensitätsminimum, und damit auch ein Minimum des Materialabtrags, in der Mitte des Strahls auftritt [69]. Informationen über die Betriebsparameter des Lasers liegen allerdings nicht vor. Anhand der Abbildung kann die Strichbreite des Lasers zu ca. $80\ \mu\text{m}$ bestimmt werden, sodass auch Strukturen mit einer Fläche erzeugt werden können, die deutlich kleiner als die Fläche typischer Pittings ist. In Abschnitt 6.3 werden die erzeugten Strukturen vermessen und damit auch die Möglichkeiten und Grenzen des Verfahrens beschrieben.

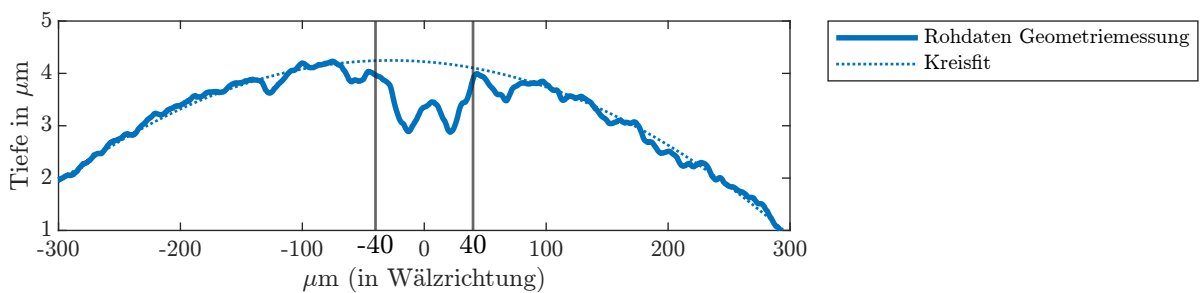


Abbildung 4.11.: Querschnitt einer erzeugten linienförmigen Struktur.

5. Lebensdauerversuche

Wie in Kapitel 3 dargestellt wurde, sollen durch die Lebensdauerversuche erste Einblicke in die Zusammenhänge zwischen Wälzlagerimpedanz und Oberflächenveränderungen gewonnen werden. Die betrachteten Oberflächenveränderungen sind das Abtragen von Rauheitsspitzen während des Einlaufens und die Schädigung durch Pittingbildung. Hinsichtlich der Auswirkungen des Einlaufens auf den Widerstand gibt es in der Literatur bereits Erkenntnisse, vgl. Abschnitt 2.2.3. Hier ist zu prüfen, inwieweit diese Erkenntnisse auf die Messung der Impedanz übertragbar sind. Zur Auswirkung von Pittings gibt es in der Literatur keine systematischen Untersuchungen, hier sollen durch eine explorative Analyse Muster im Signal erkannt werden, die mit dem Auftreten von Pittings zusammenhängen. Bei der Schädigung durch Pittings werden zwei Phasen betrachtet, vgl. Abschnitt 2.3.1. Zunächst werden die Lebensdauerversuche bis zum Auftreten eines ersten Pittings durchgeführt. Nach der geometrischen Vermessung dieses Pittings werden die Impedanzmessungen weitergeführt, während der Schaden fortschreitet. Zunächst wird in den Abschnitten 5.1 und 5.2 die Planung und Durchführung der Versuchs beschrieben. In Abschnitt 5.3 werden die gemessenen Impedanzsignale zunächst qualitativ untersucht um die Auswirkungen von Oberflächenabweichungen auf die Signale zu identifizieren. In Abschnitt 5.4 werden dann einige statistische Kenngrößen über die gesamte Lebensdauer betrachtet, um Änderungen des Impedanzsignal entlang der Lebensdauer zu beschreiben. Abschließend werden die Erkenntnisse in Abschnitt 5.5 zusammengefasst und anhand dieser Erkenntnisse das weitere Vorgehen in den folgenden Kapiteln entwickelt.

5.1. Versuchsplanung

Die Versuche werden mit dem in Abschnitt 4.1 und 4.2.2 beschriebenen Prüfstands Aufbau durchgeführt. In der ersten Versuchsphase werden die Lager bis zum Ausfall getestet, der durch die Schwingungsüberwachung des Prüfstands erkannt wird. In der zweiten Phase wird die Weiterentwicklung des entstandenen Schadens bei reduzierter Drehzahl beobachtet.

Lager und Schmierstoff Für die Versuche werden als Prüflager Schrägkugellager der Baureihe 7205B-XL-TVP des Herstellers FAG verwendet. Der Käfig besteht aus Kunststoff. Bei den Stützlagern handelt es sich um Hybridlager vom Typ HC6205 C3 von FAG. Die Versuche werden mit dem Referenzöl FVA III A durchgeführt, um die Vergleichbarkeit mit vorherigen Versuchen am Fachgebiet *pmd*, insb. [14], sicherzustellen.

Impedanzmessung Die Wälzlagerimpedanz wird mit dem in Abschnitt 4.2.2 beschriebenen Verfahren gemessen.

Betriebsbedingungen in erster Versuchsphase (Vor Initialschaden) Die Drehzahl am Prüfstand ist dadurch begrenzt, dass es bei Drehzahlen über 4000 min^{-1} erfahrungsgemäß zum sporadischen Verlust des Kontaktes zwischen Bürsten und Schleifring kommt. Die übrigen Betriebsparameter werden so gewählt, dass eine möglichst kurze Versuchslaufzeit bei gleichzeitiger Einhaltung einer statischen Sicherheit von $S_0 > 1,1$ erreicht wird. Zudem muss für die Stützlager sichergestellt werden, dass die Mindestlast erreicht wird, weshalb ein Betrieb mit reiner Axiallast nicht möglich ist. Das Wellensystem wurde in der Software BEARINX ONLINE modelliert und die Betriebsbedingungen iterativ so angepasst, dass diese Kriterien erfüllt sind. Die gewählten Versuchsbedingungen sowie die rechnerische Lebensdauer und die statische Sicherheit sind in Tabelle 5.1 zusammengefasst.

Radiallast F_r	3000 N
Axiallast F_a	28 000 N
Drehzahl n	4000 min^{-1}
Öltemperatur T	30 °C
Statische Sicherheit S_0	1,12
Modifizierte Referenzlebensdauer $L_{10\text{mh}}$	3,6 h

Tabelle 5.1.: Betriebsbedingungen und Ergebnisse der Tragfähigkeitsberechnung für die Dauerversuche

Betriebsbedingungen in zweiter Versuchsphase (Schadensfortschritt nach Eintritt des Initialschadens) In der zweiten Versuchsphase soll das Fortschreiten des Schadens beobachtet werden. In dieser Phase wird die Drehzahl auf 2000 min^{-1} reduziert, um ein langsames Fortschreiten des Schadens zu erreichen. Die übrigen Versuchsparameter werden von der ersten Versuchsphase übernommen. Im Fall von Lager 4 musste die Last erhöht werden, um ein Fortschreiten des Schadens zu erreichen, dies wird in Abschnitt 5.2 genauer beschrieben.

5.2. Versuchsdurchführung

Zunächst werden zwei Prüflager im Neuzustand eingebaut und der Versuch durchgeführt, bis die Automatisierungstechnik des Prüfstands anhand eines gestiegenen Schwingungsniveaus, wie in Abbildung 5.4 dargestellt, einen ersten Lagerschaden detektiert (Initialschaden). Während der Laufzeit wird jede Minute eine Impedanzmessung durchgeführt. Anhand der Impedanzdaten kann bereits das ausgefallene Lager benannt werden, sodass nur das geschädigte Lager ausgebaut und durch ein fabrikneues Lager ersetzt wird. Der Versuch wird nun fortgesetzt bis zum nächsten Lagerausfall.

Nach dem Initialschaden werden die ausgefallenen Lager demontiert, entfettet und die Geometrie des Schadens vermessen. Dazu wird ein Auflichtmikroskop vom Typ ALICONA INFINITEFOCUS verwendet, das durch Fokusvariation 3D-Topographien von Oberflächen bestimmen kann. In der zweiten Versuchsphase werden die ausgefallenen Lager nacheinander in den Prüfstand eingebaut und für weitere 30 min die Impedanz gemessen. In dieser Zeit wird die Impedanzmessung so häufig wie möglich durchgeführt. Die Häufigkeit wird durch die Schnelligkeit der Datenverarbeitung und -speicherung begrenzt, im Mittel werden ca. 2,5 Messungen pro Minute durchgeführt. Um ein Fortschreiten des Schadens vor der ersten Impedanzmessung zu vermeiden, werden die Lasten bereits im Stillstand aufgebracht und die Impedanzmessung unmittelbar nach Erreichen der Drehzahl gestartet. Danach werden die Lager nochmals demontiert und die Schadensgeometrie erneut vermessen. Abbildung 5.1 zeigt ein Beispiel für die entstandenen Pittings nach Eintritt des Initialschadens und nach Schadensfortschritt, entsprechende Abbildungen für die übrigen Lager finden sich in Anhang A.1.

Insgesamt wurden auf diese Weise fünf Lager bis zum Ausfall geprüft, wobei Versuch 1 aufgrund einer fehlerhaften Einstellung mit überhöhter Axiallast ($F_a = 38 \text{ kN}$) durchgeführt wurde. Tabelle 5.2 zeigt die Laufzeiten und Ausfallursachen, und Tabelle 5.3 zeigt die gemessenen Längen und Breiten der Pittings nach dem Initialschaden sowie nach dem Schadensfortschritt. Dabei ist l_p die Länge eines Pittings, gemessen in Wälzrichtung und w_p die Breite, gemessen senkrecht zur Wälzrichtung, vgl. Abbildung 5.1a. Im Fall von Lager 4 traten während des Schadensfortschritt-Versuchs zunächst keine überhöhten Schwingungen auf, auch im Impedanzsignal waren keine Unregelmäßigkeiten zu erkennen. Da dieser Zustand für eine Stunde stabil war, wurde die Last auf $F_a = 38 \text{ kN}$ und $F_r = 3 \text{ kN}$ verändert. In diesem Zustand traten erhöhte Schwingungen und Veränderungen im Impedanzsignal auf, sodass nach 19 min wieder der ursprüngliche Belastungszustand eingestellt werden konnte, in dem der Schaden nun ebenfalls im Schwingungs- und im Impedanzsignal erkennbar war. Möglicherweise ist eine im Vergleich zur ersten Versuchsphase veränderte Montageposition des Außenrings für dieses Verhalten verantwortlich, die einen veränderten Druckwinkel am Außenring verursachen würde. Aufgrund dieses veränderten Druckwinkels würde sich die Position des Wälzkontakts verschieben, sodass die geschädigte Stelle nicht mehr überrollt wird.

Lfd. Nr.	Lager	Laufzeit in h	Ausfallursache	
1		1,80	Pitting Außenring	Anm.: $F_a = 38 \text{ kN}$
2		39,3	Pitting Außenring	
3		211,5	Pitting Innenring	
4		201,3	Pitting Außenring	
5		13,8	Pitting Innenring	

Tabelle 5.2.: Laufzeiten und Ausfallursachen der Dauerversuche.

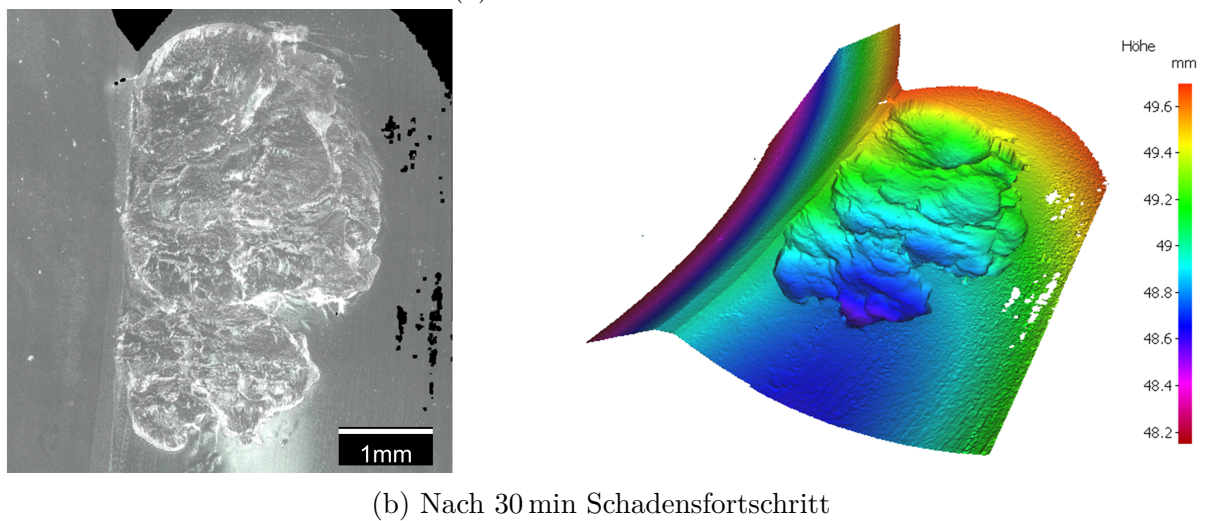
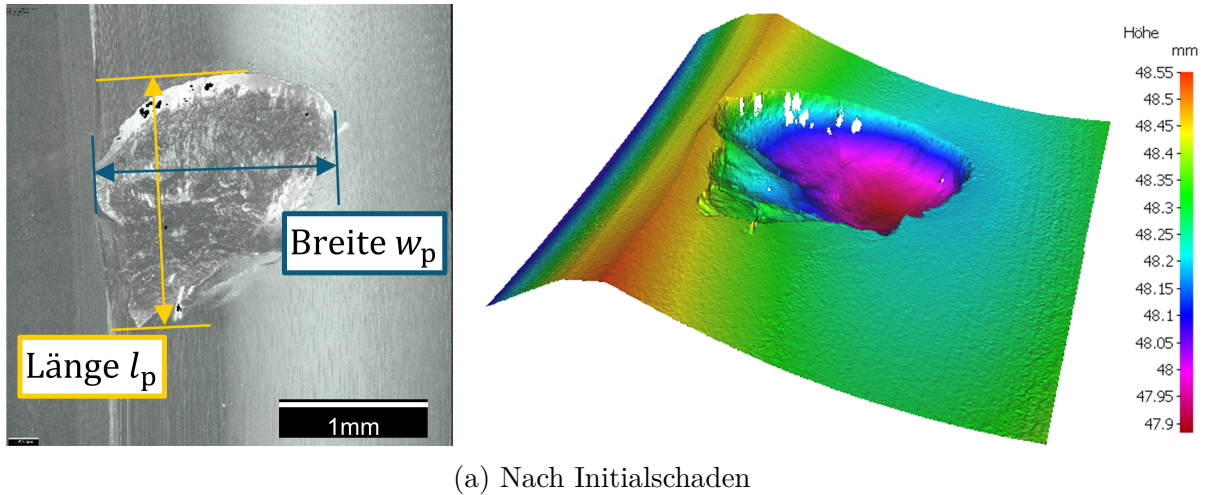


Abbildung 5.1.: Durch Fokusvariation im Auflichtmikroskop gemessene Geometrien eines beispielhaften Pittings (Lager 1).

Lfd. Nr.	Initialschaden		Nach Schadensfortschritt	
	l_p	w_p	l_p	w_p
1 (Außenring)	1,68 mm	1,66 mm	4,54 mm	2,77 mm
2 (Außenring)	1,03 mm	0,94 mm	5,09 mm	3,60 mm
3 (Innenring)	0,28 mm	0,42 mm	10,1 mm	3,55 mm
4 (Außenring)	1,13 mm	0,91 mm	18,3 mm	3,48 mm
5 (Innenring)	0,18 mm	0,73 mm	8,14 mm	3,55 mm

Tabelle 5.3.: Abmessungen der im Dauerversuch entstandenen Pittings nach Initialschaden und nach Schadensfortschritt.

5.3. Qualitative Analyse der Impedanz während der Lebensdauerversuche

Im ersten Analyseschritt werden die Impedanzsignale im Zeit- und Frequenzbereich betrachtet, um Veränderungen zu identifizieren, die während der Einlaufphase und bei der Entstehung der Pittings zu beobachten sind. Im Sinne einer kompakten Darstellung werden jeweils nur die Daten eines Lagers gezeigt, ggf. wird ein abweichendes Verhalten anderer Lager aber beschrieben. Die entsprechenden Abbildungen für die übrigen Lager sind in Anhang A zu finden.

5.3.1. Einlaufphase

In dem Versuchsaufbau für die Lebensdauerversuche kann, anders als bei den Strukturversuchen in Kapitel 6, keine Umrechnung der Wälzlagerimpedanz in Kapazität und Widerstand des Lagers durchgeführt werden. Voraussetzung hierfür wäre, dass die tatsächliche Wälzlagerimpedanz bekannt ist. Bei dem in den Dauerversuchen verwendeten Messverfahren wird aber nicht die tatsächliche Lagerimpedanz, sondern die Impedanz des gesamten Versuchsaufbaus inkl. parasitärer Kapazitäten und Induktivitäten gemessen, eine Kompensation der parasitären Einflüsse ist nicht möglich, vgl. Abschnitt 4.2.2. Abbildung 5.2 zeigt für Lager 2 den Verlauf der Impedanz kurz nach Inbetriebnahme und nach einer Versuchszeit von 4 h. In den übrigen Lagern kann ein ähnliches Verhalten festgestellt werden, die entsprechenden Darstellungen finden sich in Anhang A.2.

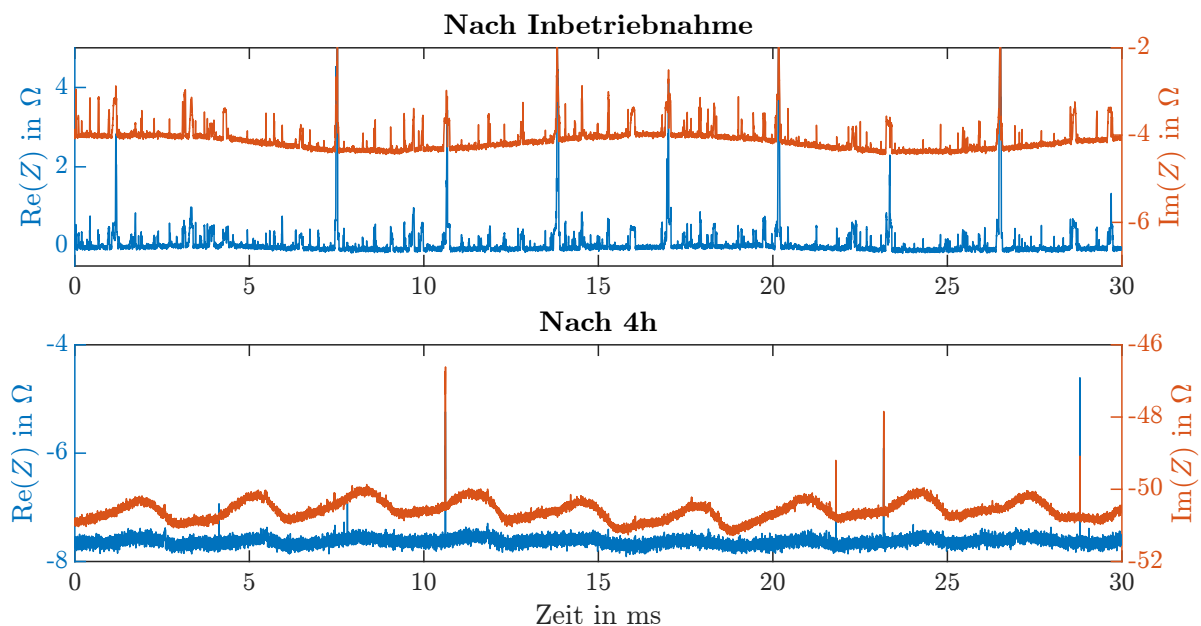


Abbildung 5.2.: Impedanzverlauf unmittelbar nach Inbetriebnahme und nach Ablauf von 4 h für Lager 2. Die Zeitdauer entspricht zwei Umdrehungen des Innenrings.

Analyse des negativen Realteils der Impedanz Vor der vergleichenden Analyse der beiden Messungen wird zunächst das auffällige Phänomen untersucht, dass der Realteil der Impedanz in der Messung nach 4 h negative Werte annimmt, was einem negativen Widerstand entspricht. Ein negativer Widerstand entspricht einer Energiezufuhr in das System. Da keine elektrische Energie in das Lager eingespeist wird, muss es sich beim gemessenen negativen Realteil der Impedanz um einen Fehler in der Messung bzw. Auswertung handeln. Eine plausible Erklärung hierfür liegt in der Impedanz der Isolierschicht Z_{iso} . Nach (4.8) geht Z_{iso} unmittelbar in den Messwert der Wälzlagerimpedanz Z ein. Ein Fehler bei der Bestimmung von Z_{iso} führt somit auch zu einem Fehler beim berechneten Wert der Wälzlagerimpedanz. Eine direkte Messung der Isolationsimpedanz bei der verwendeten Messfrequenz im belasteten und montierten Zustand war in dieser Arbeit aus zwei Gründen nicht möglich. Zum einen ist das verfügbare LCR-Meter (Rohde & Schwarz HM8118) auf den Frequenzbereich bis 200 kHz beschränkt. Zum anderen ist es nicht für Messungen geeignet, bei denen ein Messpol mit Erdpotential verbunden ist, was bei der Vermessung des Lagersitzes im montierten Zustand der Fall ist. Für die Auswertung in dieser Arbeit wurde aus diesem Grund der Wert Z_{iso} nach (5.1) aus der Kapazität des Lagersitzes bestimmt, die im demontierten und nicht belasteten Zustand gemessen wurde, vgl. Abschnitt 4.2.2. Aufgrund der großen mechanischen Belastungen kann die Isolierschicht im Betrieb verformt werden, was zu einer Annäherung der metallischen Teile und in der Folge zu Kriechströmen, also einem nicht mehr vernachlässigbaren ohmschen Anteil der Isolationsimpedanz, führen kann. Im Folgenden wird deshalb die Hypothese untersucht, dass eine Abweichung der Isolationsimpedanz im eingebauten und belasteten Zustand von der für die Auswertungen angenommenen Isolationsimpedanz für den beobachteten negativen Realteil der Impedanz verantwortlich ist.

Im ersten Schritt wird analytisch untersucht, wie sich eine nicht ideale Isolation auf $\text{Re}(Z_{\text{iso}})$ auswirkt. Es wird angenommen, dass die Impedanz der Isolierschicht sich aus der Parallelschaltung einer Kapazität C_{iso} und eines Widerstands R_{iso} zusammensetzt,

$$\frac{1}{Z_{\text{iso}}} = \frac{1}{R_{\text{iso}}} + j\omega C_{\text{iso}}. \quad (5.1)$$

Bei idealer Isolation ($R_{\text{iso}} \rightarrow \infty$) ist demzufolge $\text{Re}(Z_{\text{iso}}) = 0 \Omega$, bei nicht idealer Isolation ist $\text{Re}(Z_{\text{iso}}) > 0 \Omega$. Die Annahme einer idealen Isolation führt also, im Vergleich zum Zustand nicht idealer Isolation, zu einer Unterschätzung des Realteils $\text{Re}(Z_{\text{iso}})$.

Für den Realteil der nach (4.8) berechneten Wälzlagerimpedanz Z gilt nach den Rechenregeln für komplexe Zahlen

$$\text{Re}(Z) = \text{Re}\left(\frac{U_{\text{G}}}{U_{\text{iso}}} - 1\right) \cdot \text{Re}(Z_{\text{iso}}) - \text{Im}\left(\frac{U_{\text{G}}}{U_{\text{iso}}} - 1\right) \cdot \text{Im}(Z_{\text{iso}}). \quad (5.2)$$

Es wird deutlich, dass eine Unterschätzung von $\text{Re}(Z_{\text{iso}})$ unmittelbar zu einer Unterschätzung von $\text{Re}(Z)$ führt.

Somit konnte analytisch gezeigt werden, dass eine unter Einbaubedingungen nicht ideale Isolation zu einer Unterschätzung des Realteils der Wälzlagerimpedanz $\text{Re}(Z)$ führen kann.

In einem zweiten Schritt zur Überprüfung der aufgestellten Erklärungshypothese wird nun beispielhaft untersucht, ob eine veränderte Annahme der Isolationsimpedanz tatsächlich zu physikalisch plausiblen positiven Werten des Realteils der Wälzlagerimpedanz führt, und wie sich diese veränderte Annahme auf den qualitativen Verlauf der Impedanz auswirkt. Hierfür wird beispielhaft angenommen, dass der Isolationswiderstand $R_{\text{iso}} = 150 \Omega$ beträgt und die Impedanz der Isolationsschicht nach (5.1) berechnet, für die Isolationskapazität wird unverändert $C_{\text{iso}} = 2,6 \text{ nF}$ angenommen. Abbildung 5.3 zeigt für die in Abbildung 5.2 dargestellte Messung nach 4 h einen Vergleich dieser Auswertung mit der ursprünglichen Auswertung, die ideale Isolation annimmt. Der Vergleich zeigt, dass die angepasste Isolationsimpedanz zu plausiblen positiven Werten des Realteils der Wälzlagerimpedanz führt. Dies stützt die Erklärungshypothese, dass die Abweichung der Isolationsimpedanz im eingebauten Zustand für den negativen Realteil in der Wälzlagerimpedanz verantwortlich ist. Die qualitativen Verläufe des Real- und des Imaginärteils sind bei beiden Auswertungsvarianten gleich. Da für die Isolationsimpedanz im eingebauten Zustand kein Messwert zur Verfügung steht, und die qualitativen Verläufe durch die fehlerhafte Annahme nicht verändert werden, wird für die weiteren Auswertungen dieser Arbeit weiterhin die Annahme idealer Isolation verwendet.

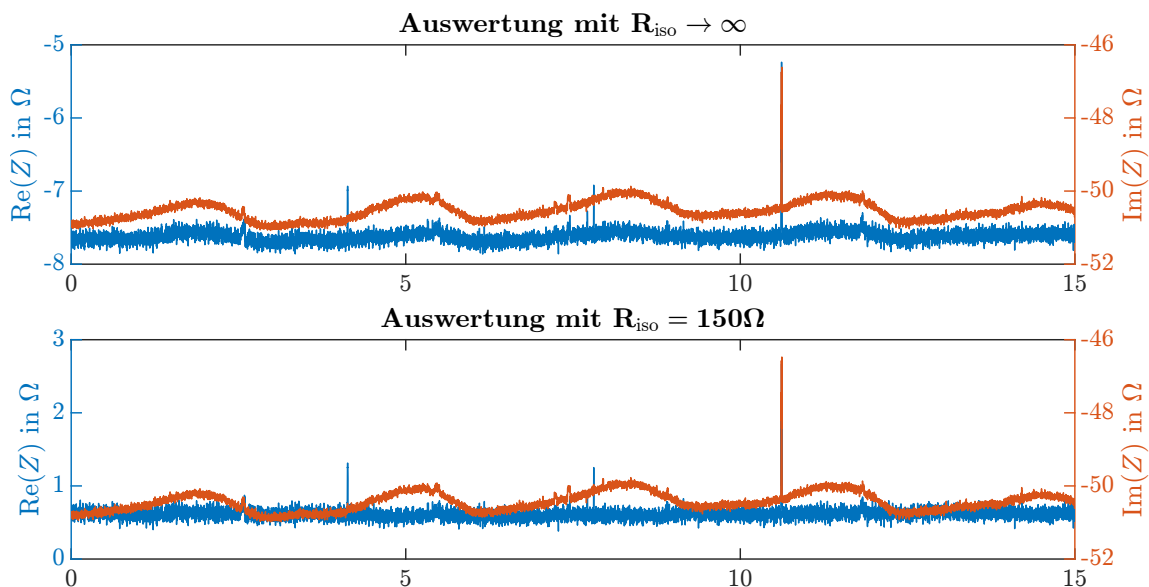


Abbildung 5.3.: Vergleich der Impedanzberechnung unter der Annahme idealer ($R_{\text{iso}} \rightarrow \infty$) und nicht idealer ($R_{\text{iso}} = 150 \Omega$) Isolation.

Analyse des Einlaufverhaltens In Abbildung 5.2 fallen regelmäßige niederfrequente Schwankungen der Impedanz in beiden Messungen auf. Solche Impedanzschwankungen bei Wälzlager sind aus [89] bekannt und können auf die zeitlich veränderliche Lastverteilung und Unwuchteffekte zurückgeführt werden. Unmittelbar nach Inbetriebnahme ist der Signalverlauf sehr unruhig und von kurzen Ausschlägen geprägt, in denen der Real- und Imaginärteil kurzzeitig ansteigt. Die Ausschläge verschwinden mit der Zeit und nach

einigen Stunden stellt sich ein glatter Verlauf ein, wobei sporadisch immer noch Ausschläge auftreten. Die Ausschläge sind im Signal stochastisch verteilt, deterministische Zeitabstände zwischen den Ausschlägen sind nicht feststellbar.

Eine mögliche Erklärung dieses Verhaltens kann aus dem bereits in Abschnitt 2.2.3 dargestellten Stand der Forschung abgeleitet werden. Metallische Kontakte von Rauheitsspitzen, die in der Einlaufphase eines EHD-Kontaktes gehäuft vorkommen, verursachen ein kurzzeitiges starkes Absinken des Widerstands [24, 44, 25, 34], vgl. Abbildung 2.7. Von TUOMAS und ISAKSSON, LORD und LARSSON sowie SCHNABEL und MARKLUND wurde beobachtet, dass die Häufigkeit solcher schneller Ausschläge im Laufe der Einlaufphase abnimmt, da die Rauheitsspitzen abgetragen werden [25, 44, 34], vgl. Abbildung 2.9. Zunächst erscheint es kontraintuitiv, dass der Realteil steigt, wenn nach der Literatur ein Sinken des Widerstands zu erwarten ist. In Abschnitt 6.4.1 zeigt sich aber bei der Auswertung der Strukturversuche, bei denen eine Umrechnung der Impedanz in Widerstand und Kapazität möglich ist, dass ein Anstieg des Realteils durchaus mit einem Sinken des Widerstands verknüpft sein kann, vgl. Abbildung 6.22. An dieser Stelle kann bereits festgestellt werden, dass der Zeitverlauf der Impedanz zu Beginn der Einlaufphase den Signalen ähnelt, die nach dem Stand der Forschung metallischem Kontakt von Rauheitsspitzen zugeschrieben werden. In Abschnitt 6.5.3 wird der physikalische Hintergrund der schnellen Ausschläge nochmals untersucht und dabei ein alternativer Erklärungsansatz vorgestellt, der die Ausschläge auf elektrische Durchschläge zurückführt.

Im Folgenden werden diese Ausschläge, die durch kurze Dauer und steile Flanken gekennzeichnet sind, als *schnelle Ausschläge* bezeichnet, in Abgrenzung von den in Abschnitt 5.3.2 beobachteten *langsamen Ausschlägen*.

Im Zusammenhang mit dem Einlaufen treten auch Veränderungen des Mittelwerts der Impedanz auf, was in Abschnitt 5.4 untersucht wird.

5.3.2. Auftreten von Pittings

Zum Verlauf der Impedanz bei der Bildung von Pittings wurde von TUOMAS und ISAKSSON eine Messung veröffentlicht, derzufolge keine Kapazitätsänderung auftritt, aber die Häufigkeit metallischer Kontakte, gekennzeichnet durch kurzzeitiges Absinken des Widerstands, vor einem Ausfall ansteigt [25], vgl. Abschnitt 2.2.3. Um Merkmale im Signal zu identifizieren, die mit dem Entstehen und Fortschreiten von Pittings verknüpft sind, werden für alle Versuche jeweils eine Messung kurz vor dem Initialschaden, unmittelbar nach Entstehung des Initialschadens und nach dem Schadensfortschritt verglichen.

Das Entstehen eines Pittings ist durch einen Anstieg der Schwingungen gekennzeichnet. Die Erhöhung der Schwingungen wird durch die Anlagensteuerung anhand der Vibrationsdaten erkannt und der Prüfstand ausgeschaltet. Abbildung 5.4 zeigt diesen Anstieg für alle fünf ausgefallenen Lager. Bei den Lagern 1, 2 und 4 ist ein plötzlicher Anstieg zu verzeichnen, sodass der Initialschaden zu einem klar abgrenzbaren Zeitpunkt eintritt. Bei den Lagern 3 und 5 steigen die Vibrationen langsam an, bei Lager 3 setzt der Anstieg ca. 8 min und bei Lager 5 ca. 3 min vor dem Abschalten des Prüfstands ein. Bei Lager 1, 2 und 4 (plötzlicher Anstieg) tritt der Schaden am Außenring auf, bei Lager 3 und 5

(langsamer Anstieg) am Innenring. Der deutlich langsamere Anstieg beim Schaden am Innenring korrespondiert mit der Beobachtung, dass die nach der Demontage vermessenen Innenring-Pittings deutlich kleiner sind als die Außenring-Pittings, vgl. Tabelle 5.3. Offensichtlich ist am Außenring bereits das erste Pitting vergleichsweise groß oder der Schaden vergrößert sich innerhalb weniger Überrollungen, während der Schaden am Innenring nach einer kleinen initialen Schädigung langsam fortschreitet.

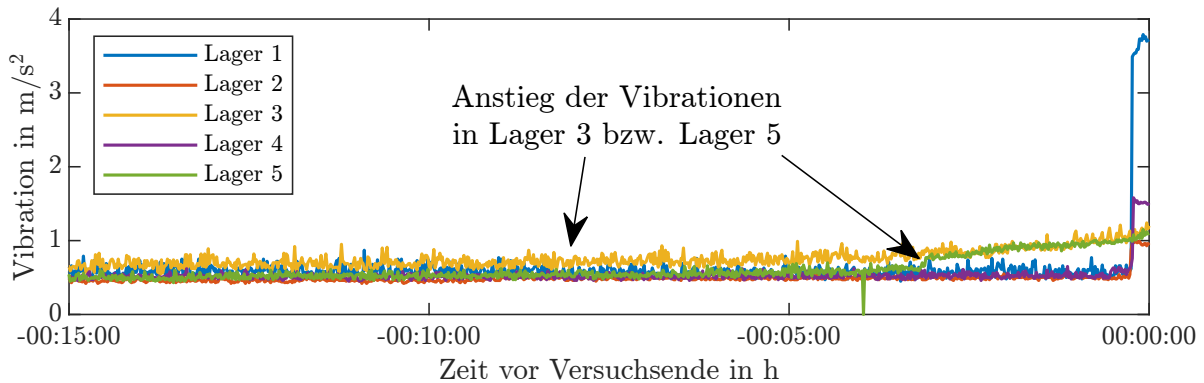


Abbildung 5.4.: RMS-Wert der axialen Schwingungssignale 15 Minuten vor Versuchsende für alle Lager

Wie eingangs erläutert wurde, soll für den Vergleich u.a. eine Messung unmittelbar vor Eintritt des Initialschadens herangezogen werden, der bei den Lagern 1, 2 und 4 durch den plötzlichen Anstieg der Vibration klar abgegrenzt ist. Die Impedanz wird nur einmal pro Minute gemessen und die Impedanzmessung ist nicht exakt mit der Prüfstandsteuerung synchronisiert. Um sicherzustellen, dass eine Messung tatsächlich vor dem Initialschadensereignis durchgeführt wurde wird deshalb nicht die letzte Messung vor dem Abschalten des Prüfstands verwendet. Stattdessen wird die vorletzte Messung verwendet, die mindestens eine Minute vor dem Abschalten und deshalb mit Sicherheit vor dem sprungartigen Anstieg der Vibration stattgefunden hat. Diese Messung wird verglichen mit einer Messung, die während des Schadensfortschritts nach ca. 1 min Versuchsdauer durchgeführt wurde und den Zustand unmittelbar nach dem Initialschaden beschreibt, und der letzten Messung des Schadensfortschritts nach 30 min. Abbildung 5.5 zeigt die drei Messungen am Beispiel von Lager 1. Bereits vor dem Ausfall sind schnelle Ausschläge im Real- und Imaginärteil des Signals sichtbar, deren Abstand dem Kehrwert der Außenring-Überrollfrequenz f_{AR} entspricht. Unmittelbar nach dem Schaden ist der Signalverlauf von schnellen Ausschlägen geprägt, ähnlich zur Einlaufphase. Ob dies auf den Schaden zurückzuführen ist oder auf die zwischenzeitliche Demontage, ist unklar. Darüber hinaus ist ein markanter Ausschlag im Signal zu sehen, der regelmäßig bei jeder Außenring-Überrollung auftritt. Noch deutlicher ist dieser Ausschlag in der Messung am Ende des Schadensfortschritts, die Dauer des Ausschlags scheint zudem länger zu sein als unmittelbar nach dem Initialschaden. Schnelle Ausschläge treten am Ende des Schadensfortschritts nur noch selten auf, gehäuft zu Beginn und Ende der langsamen Ausschläge. Dies wird in Kapitel 7 genauer analysiert. Der Ausschlag ist im Imaginärteil deutlich ausgeprägter als im Realteil. Diese Ausschläge haben eine deutlich längere

Zeitdauer als die mit metallischem Kontakt assoziierten *schnellen Ausschläge*, zudem sind auch die Flanken der Ausschläge weniger steil. Deshalb werden sie im Folgenden als *langsame Ausschläge* bezeichnet. Ein ähnliches Verhalten ist prinzipiell auch bei den anderen Lagern zu beobachten, die entsprechenden Darstellungen sind in Anhang A.2 zu sehen. Allerdings gibt es Ausnahmen: Bei Lager 2 sind zwar unmittelbar vor dem Initialschaden keine schnellen Ausschläge zu sehen, dafür treten ähnliche Ausschläge bereits ca. 30 Minuten vor dem Initialschaden auf. Bei Lager 3 sind vor dem Initialschaden keine Veränderungen im Signal sichtbar. Unmittelbar nach dem Initialschaden ist bei den Lagern 4 und 5 kein charakteristisches Verhalten messbar, aber bei allen Lagern entwickeln sich im Laufe des Schadensfortschritts sehr deutliche langsame Ausschläge, deren Zeitabstand den erwarteten Überrollfrequenzen entspricht.

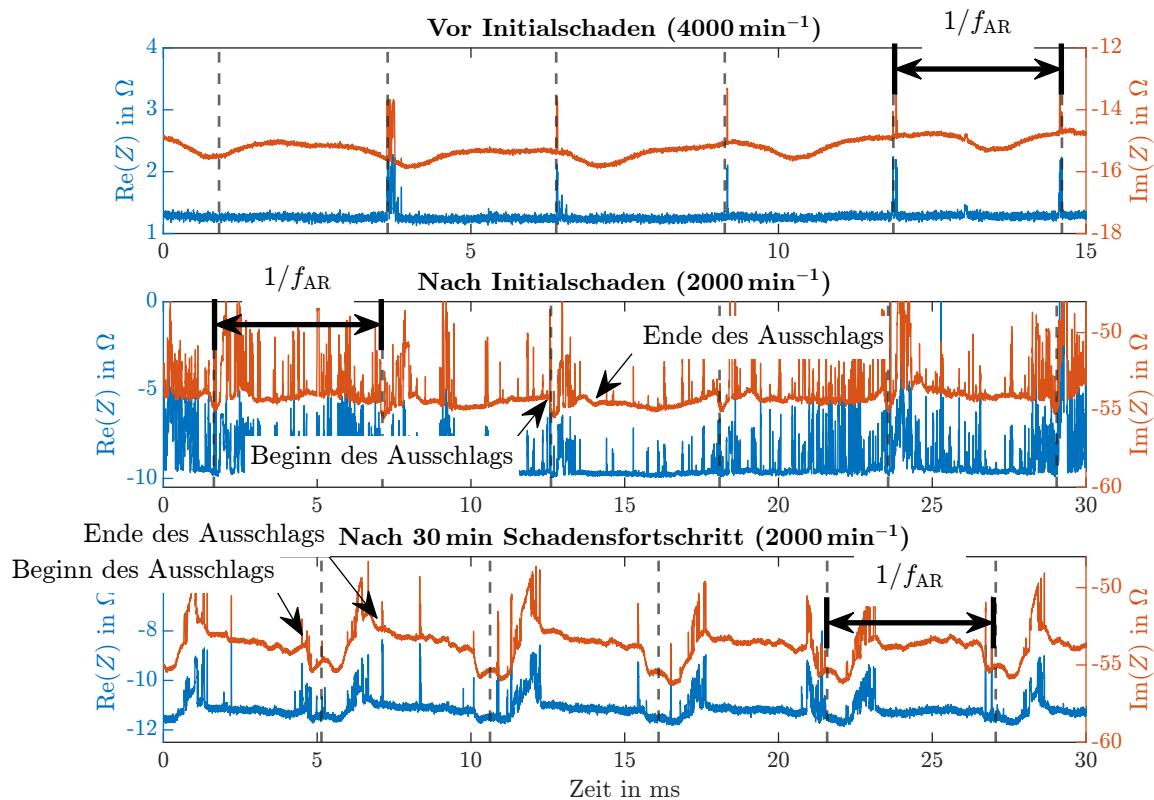


Abbildung 5.5.: Verlauf der Impedanz im Zusammenhang mit der Entstehung von Pittings bei Lager 1. Die Zeitdauer entspricht einer Umdrehung des Innenrings

Als Erkenntnis aus der Analyse im Zeitbereich lässt sich festhalten, dass das Entstehen von Pittings mit bestimmten Veränderungen im Impedanzsignal einhergeht, die sich als Ausschläge äußern. Schon vor dem Herausbrechen des Pittings treten *schnelle Ausschläge* im Signal auf. Ob diese Ausschläge in einem Zusammenhang mit dem kurz bevorstehenden Schaden stehen, z.B. aufgrund von ersten, bereits eingetretenen Ausbrüchen aus der Oberfläche, ist unklar und wird im Rahmen der quantitativen Analyse

in Abschnitt 5.4 nochmals untersucht. Das Herausbrechen des Pittings führt dann zum auftreten markanter *langsamer Ausschläge* im Signal, die sich im Laufe des Schadensfortschritts verstärkt. Diese Veränderungen treten in der Mehrzahl der untersuchten Lager auf, allerdings nicht in allen Fällen. Die Impedanzsignale im Zusammenhang mit einem Pitting ähneln insgesamt den typischen Schwingungssignalen, die bei Wälzlagerschäden entstehen, vgl. Abbildung 2.14 und 2.15 in Abschnitt 2.4.

Abschließend werden noch die Spektren der drei Messungen betrachtet. Um die bei verschiedenen Drehzahlen durchgeführten Messungen vergleichen zu können sind sie in Abbildung 5.6 als Ordnungen der Drehzahl dargestellt. Aufgrund der unterschiedlichen Drehzahlen, die mit einer unterschiedlich starken Schwingungsanregung einhergehen, sind die Amplituden der Messung vor dem Initialschaden nicht direkt mit den beiden späteren Messungen vergleichbar. Im Vergleich der beiden Messungen nach dem Initialschaden zeigt sich zunächst, dass die Amplituden während des Schadensfortschritts breitbandig absinken. Dieses Verhalten wird darauf zurückgeführt, dass wie beschrieben nach dem Initialschaden deutlich mehr schnelle Ausschläge im Signal auftreten als am Ende des Schadensfortschritts.

Die Betrachtung der Außenring-Überrollfrequenz f_{AR} und ihrer höheren Ordnungen zeigt dagegen ein etwas anderes Bild: In der Messung vor dem Initialschaden sind die nicht-geradzahigen Ordnungen der Außenring-Überrollfrequenz f_{AR} bereits im Spektrum sichtbar. Nach dem Initialschaden sind die Amplituden, trotz geringerer Drehzahl, deutlich höher und bis zum Ende des Schadensfortschritts steigen sie noch weiter. Das bestätigt den Eindruck der Analyse im Zeitbereich, dass in allen drei Messungen in unterschiedlichem Maße Ereignisse auftreten, die periodisch mit der Außenring-Überrollfrequenz sind.

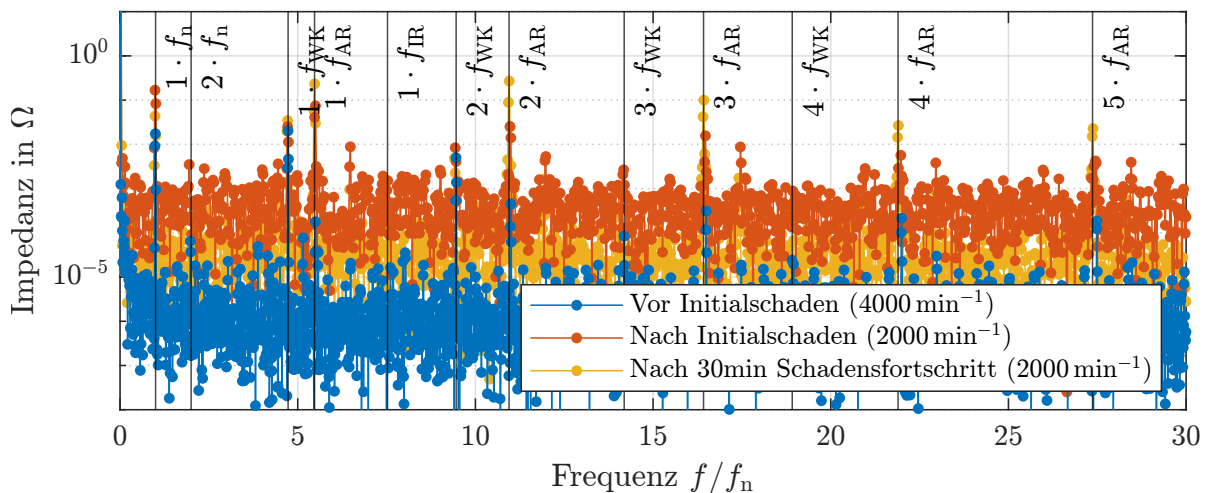


Abbildung 5.6.: Spektren des Imaginärteils der Impedanz im Zusammenhang mit der Entstehung von Pittings bei Lager 1, aufgetragen als Ordnungen der Drehzahl.

5.4. Quantitative Analyse der Impedanz während der Lebensdauerversuche

Die erste Analyse der Lebensdauerversuche hat gezeigt, dass im Impedanzsignal deutliche Veränderungen während der Lebensdauer auftreten. Insbesondere äußern sich diese Veränderungen als Ausschläge des Impedanzsignals. Die bisherige Analyse konnte nur stichprobenartig für einige Messungen jedes Lagers und nicht für alle Messungen während der Lebensdauer erfolgen. Um die qualitativen Eindrücke zu bestätigen und eine Aussage über den gesamten Verlauf der Impedanz während der Lebensdauer zu erhalten, werden deshalb einige statistische Merkmale des Impedanzsignals für jede Messung bestimmt und über der Versuchszeit aufgetragen.

Naheliegender ist die Berechnung des Mittelwerts des Real- und Imaginärteils. Zudem hat sich gezeigt, dass in der Einlaufphase und beim Auftreten von Pittings Ausschläge im Signal auftreten, das Signal wird also unruhiger. Statistisch kann dies durch die Standardabweichung und die Kurtosis des Signals quantifiziert werden. Die Kurtosis k eines Signals x wird durch

$$k = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{\sigma^4}, \quad (5.3)$$

berechnet [2], wobei σ die Standardabweichung des Signals, \bar{x} der Mittelwert und n die Anzahl der Messpunkte ist. Die beiden Merkmale können folgendermaßen interpretiert werden. Die Standardabweichung ist ein allgemeines Maß für die Streuung eines Signals zu seinem Mittelwert. Die Kurtosis ist, da Abweichungen mit der vierten Potenz eingehen, sehr empfindlich gegenüber Ausreißern. Ein Wert von $k = 3$ entspricht einem normalverteilten Signal, je höher der Wert ist, desto mehr Ausreißer enthält das Signal. Deshalb ist die Kurtosis gut geeignet um die Impulshaltigkeit eines Signals zu beschreiben [2].

Die beiden Versuchsphasen werden getrennt betrachtet, um in der vergleichsweise kurzen Zeit des Schadensfortschritts eine ausreichende Zeitauflösung zu erreichen. In Abbildung 5.7 sind zunächst die Verläufe von Mittelwert, Standardabweichung und Kurtosis vor dem Initialschaden für Lager 2 dargestellt, wobei für Standardabweichung und Kurtosis der Median über zehn Messungen dargestellt ist, um die Kurven zu glätten. Die Kurtosis und die Standardabweichung sind logarithmisch aufgetragen, um trotz des großen Wertebereichs Veränderungen erkennen zu können. Zunächst fallen große Sprünge der Mittelwerte von Real- und Imaginärteil auf. Der erste Sprung tritt auf, nachdem die zunächst fehlerhafte Belastungseinstellung geändert wurde und ist dadurch erklärbar. Weitere Sprünge treten nach ca. 22 h und ca. 36 h auf. Eine Veränderung der elektrischen Lagereigenschaften zu diesen Zeitpunkten ist unwahrscheinlich, da keine Veränderung der Vibration entdeckt wurde. Wahrscheinlich kam es zu diesen Zeitpunkten zu einer Veränderung der parasitären Eigenschaften des umgebenden Systems. Wie in Abschnitt 4.1.2 dargestellt wurde, weist der Prüfstands Aufbau in dieser Variante viele parasitäre Einflüsse auf. Wenn Kontaktwiderstände zwischen Bauteilen im Prüfaufbau sich ändern, z.B. aufgrund von Reibung, kann dies auch zu einer Veränderung der parasitären Einflüsse führen. Letztlich bleibt der Grund aber unklar. Die Verläufe für die weiteren Lager

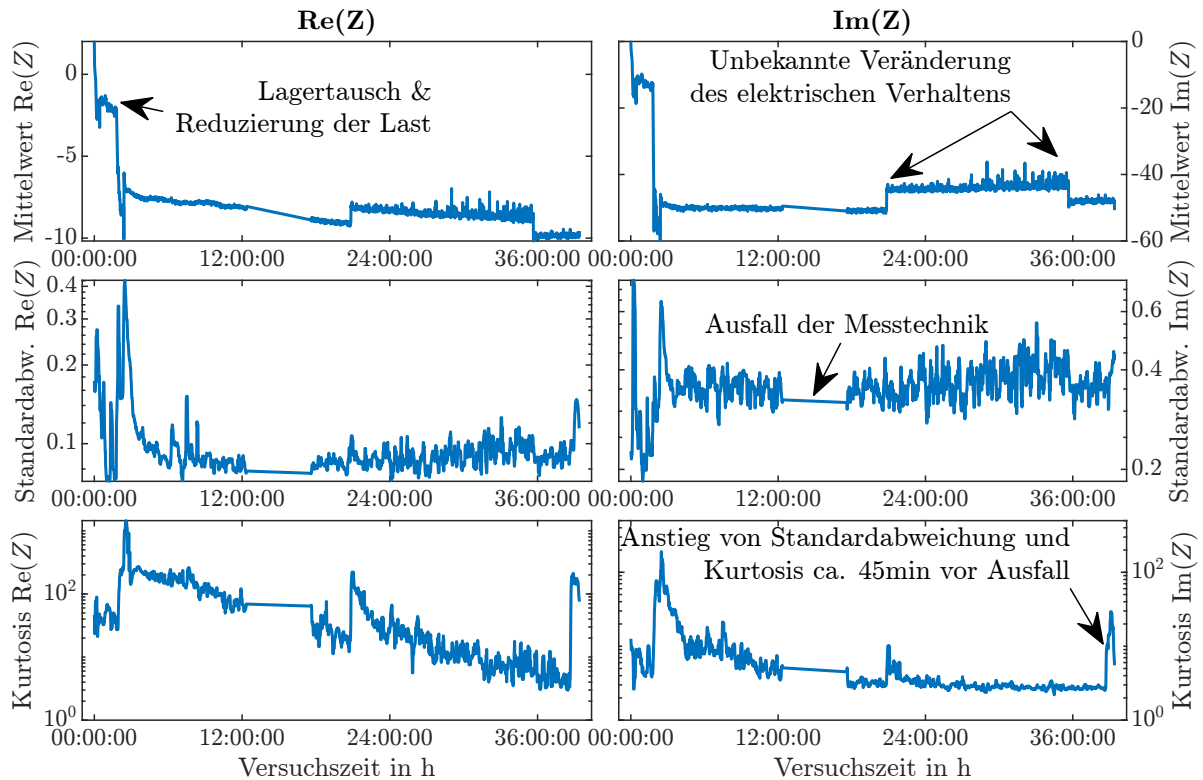


Abbildung 5.7.: Verlauf von Mittelwert, Standardabweichung und Kurtosis bis zum Eintritt des Initialschadens für Lager 2. Für Standardabweichung und Kurtosis ist der Median über zehn Messungen dargestellt.

sind in Anhang A.4 zu finden, sie zeigen ein ähnliches Verhalten. Vernachlässigt man diese Messfehler, dann zeigt sich folgendes Verhalten. Der Mittelwert von Imaginär- und Realteil der Impedanz sinkt, ebenso sinken die Standardabweichung und Kurtosis. Das entspricht der Verringerung der Impulshaltigkeit des Signals während der Einlaufphase, die bereits beobachtet wurde. Der Realteil sinkt während der gesamten Lebensdauer, der Imaginärteil dagegen erreicht ein konstantes Niveau. Die Standardabweichungen sinken nach ca. 10 h nicht mehr weiter, sodass zu diesem Zeitpunkt die Einlaufphase als abgeschlossen betrachtet werden kann. Die Werte von Kurtosis und Standardabweichung steigen ca. 45 Minuten vor dem Ausfall des Lagers wieder deutlich an.

Die Veränderungen in der Einlaufphase und vor dem Ausfall sind für diese Arbeit besonders interessant. Deshalb werden in den nächsten beiden Abschnitten die Werte aller Lager am Beginn des Prüflaufs und vor dem Ausfall genauer betrachtet.

5.4.1. Einlaufphase

In Abbildung 5.8 sind die Werte aller Lager in den ersten zwölf Stunden der Versuchslaufzeit dargestellt. Zunächst fällt auf, dass die Mittelwerte der Impedanz sich deutlich unterscheiden. Nach dem Stand der Forschung ist für gleiche Lagerbauart und gleiche Betriebsbedingungen auch ein konstanter Wert der Impedanz zu erwarten, sodass dieses

Verhalten vermutlich einen Messfehler darstellt. Als Ursache infrage kommen, wie bereits erläutert, veränderliche parasitäre Eigenschaften des elektrischen Systems. Da die qualitativen Verläufe der Impedanz, wie im Folgenden gezeigt wird, für alle Lager übereinstimmen, hat dieser Fehler keinen Einfluss auf die Aussagekraft der Messergebnisse. Für alle Lager zeigt sich ein kontinuierliches Absinken des Real- und Imaginärteils, wobei die Lager 2 und 3 nach ca. drei Stunden ein Plateau erreichen. Ein Einlaufverhalten zeigt sich besonders bei den Standardabweichungen von Real- und Imaginärteil und der Kurtosis des Imaginärteils. In den ersten Stunden sinken diese Werte. Die Standardabweichung des Imaginärteils erreicht, je nach Lager, nach ein bis vier Stunden ein konstantes Niveau, bei der Standardabweichung des Realteils wird dies nach ca. fünf bis sechs Stunden erreicht und bei der der Kurtosis des Imaginärteils nach ca. acht Stunden. Auffällig ist zudem, dass bei Lager 2 ein erneuter Anstieg und dann wieder ein Einlaufen zu beobachten ist, nachdem der Prüfstand für einen Lagertausch am zweiten Prüflager neu montiert wurde. Ein möglicher Grund ist eine leicht veränderte Montageposition nach der Neumontage. Zwar wurde bei der Neumontage darauf geachtet, den Außenring erneut in der gleichen Stellung zu montieren, dennoch kann eine leicht veränderte Position nicht ausgeschlossen werden. In diesem Fall würde ein anderer Teil der Laufbahn überrollt, deren Einlaufen dieses Verhalten erklären kann.

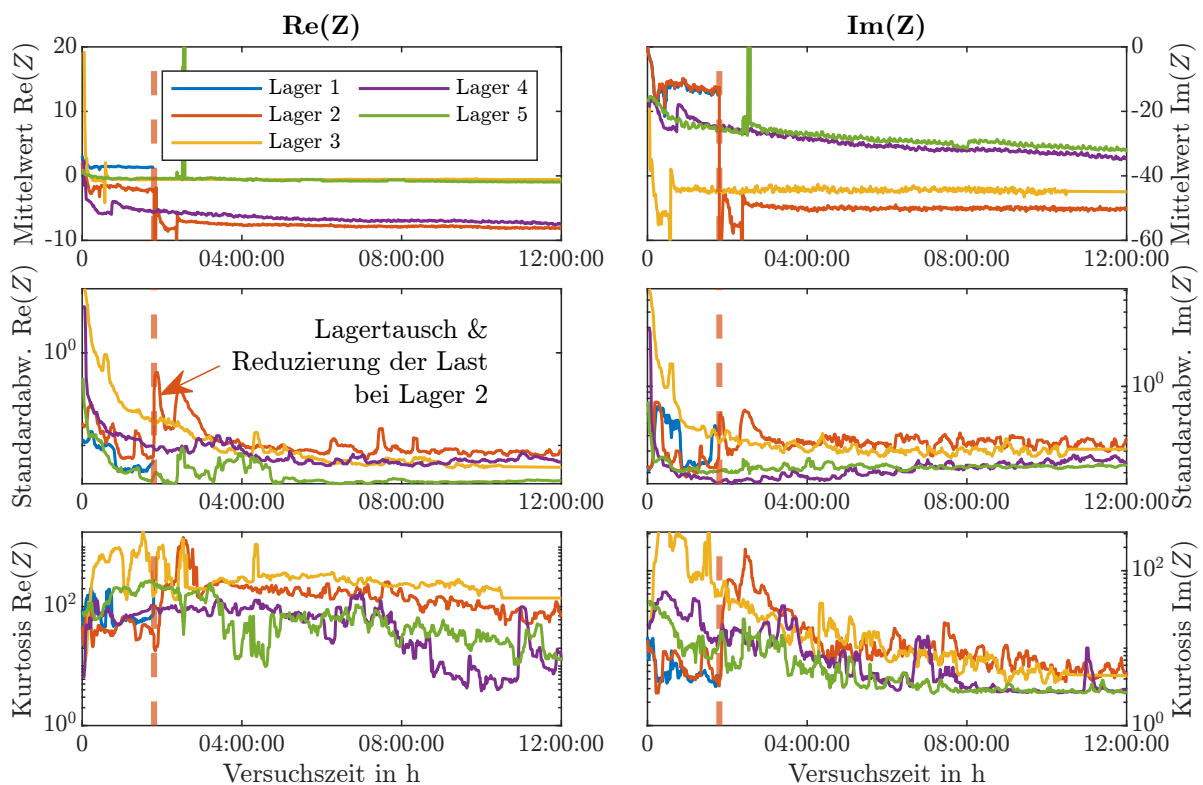


Abbildung 5.8.: Verlauf der Mittelwerte, der Standardabweichung und der Kurtosis für Real- und Imaginärteil der Impedanz während der Einlaufphase. Für Standardabweichung und Kurtosis ist der Median über zehn Messungen dargestellt.

Abschließend werden die in Abbildung 5.8 dargestellten Verläufe mit der Literatur verglichen. Bei LORD und LARSSON sowie TUOMAS und ISAKSSON wird ein degressives Abnehmen der Häufigkeit metallischer Kontakte, die sich durch schnelle Ausschläge im Signal äußern, beobachtet [44, 25]. In Abbildung 5.8 werden die Ausschläge durch die Standardabweichung und die Kurtosis quantifiziert, es zeigt sich ebenfalls eine degressive Abnahme. Von LORD und LARSSON wird zudem beobachtet, dass der Widerstand während der Einlaufphase degressiv steigt [44]. Entsprechend der Interpretation aus Abschnitt 5.3.1 äußern sich metallische Kontakte im verwendeten Aufbau als Impedanzzunahme, eine Verringerung metallischer Kontakt beim Einlaufen führt dementsprechend zu einer Abnahme der mittleren Impedanz, sodass auch dieses Verhalten mit der Literatur übereinstimmt.

5.4.2. Auftreten von Pittings

In diesem Abschnitt wird der Verlauf von Mittelwerten, Standardabweichung und Kurtosis vor dem Eintritt des Initialschadens und während des Schadensfortschritts betrachtet. Abbildung 5.9 zeigt zunächst die Verläufe eine Stunde vor dem Ausfall des jeweiligen Lagers. Die deutlichsten Signaländerungen vor dem Ausfall zeigen sich bei der Standardabweichung und Kurtosis des Realteils. Bei Lager 2 steigt die Standardabweichung ca. 25 Minuten vor dem Ausfall deutlich an. Wie in Abschnitt 5.3.2 bereits dargestellt wurde, zeigen sich zu diesem Zeitpunkt erste Ausschläge, deren Abstand der Außenring-Überrollfrequenz entspricht, und die deshalb möglicherweise erste Anzeichen des bevorstehenden Schadens sind. Bei Lager 5 ist ein leichter Anstieg der Standardabweichung ca. 20 Minuten vor dem Ausfall zu verzeichnen, bei den übrigen Lagern erst in den letzten Minuten vor dem Ausfall. Auch in diesen Fällen steht der Anstieg im Zusammenhang mit zunehmenden Ausschlägen. Die Kurtosis steigt für alle Lager bereits zu deutlich früheren Zeitpunkten an, die Werte der Kurtosis schwanken aber auch deutlich stärker. Diese Beobachtungen unterstützen die in Abschnitt 5.3.2 entwickelte Vermutung, dass im Impedanzsignal bereits vor dem Ausfall erste Anzeichen eines Ausfalls sichtbar sind. Die Ausprägung dieser Anzeichen unterscheidet sich aber, zudem treten in einzelnen Messungen ähnliche Anstiege auch vorher auf.

Abschließend werden die in Abbildung 5.10 dargestellten Verläufe von Mittelwerten, Standardabweichung und Kurtosis während des Schadensfortschritts betrachtet. Zunächst fällt auf, dass sich die Mittelwerte für Lager 4 zum Zeitpunkt der Reduzierung der Belastung sprunghaft verringern, was mit den von SCHIRRA beschriebenen Auswirkungen der Lagerlast übereinstimmt [14]. In den ersten Minuten steigt der Wert des Imaginärteils bei allen Lagern an. Sehr deutlich ist, dass in den ersten Minuten bei allen Lagern starke Veränderungen der Mittelwerte und der Standardabweichung auftreten. Vermutlich sind sie darauf zurückzuführen, dass das Signal zunächst von Impedanzsprüngen geprägt ist und später deutlich glatter wird, vgl. Abschnitt 5.3.2. Davon abgesehen zeigt keine der betrachteten Metriken ein stetiges und für alle Lager übereinstimmendes Verhalten, sodass es anhand dieser Auswertungen nicht möglich ist, eine Aussage über das Ausmaß des Schadensfortschritts zu treffen.

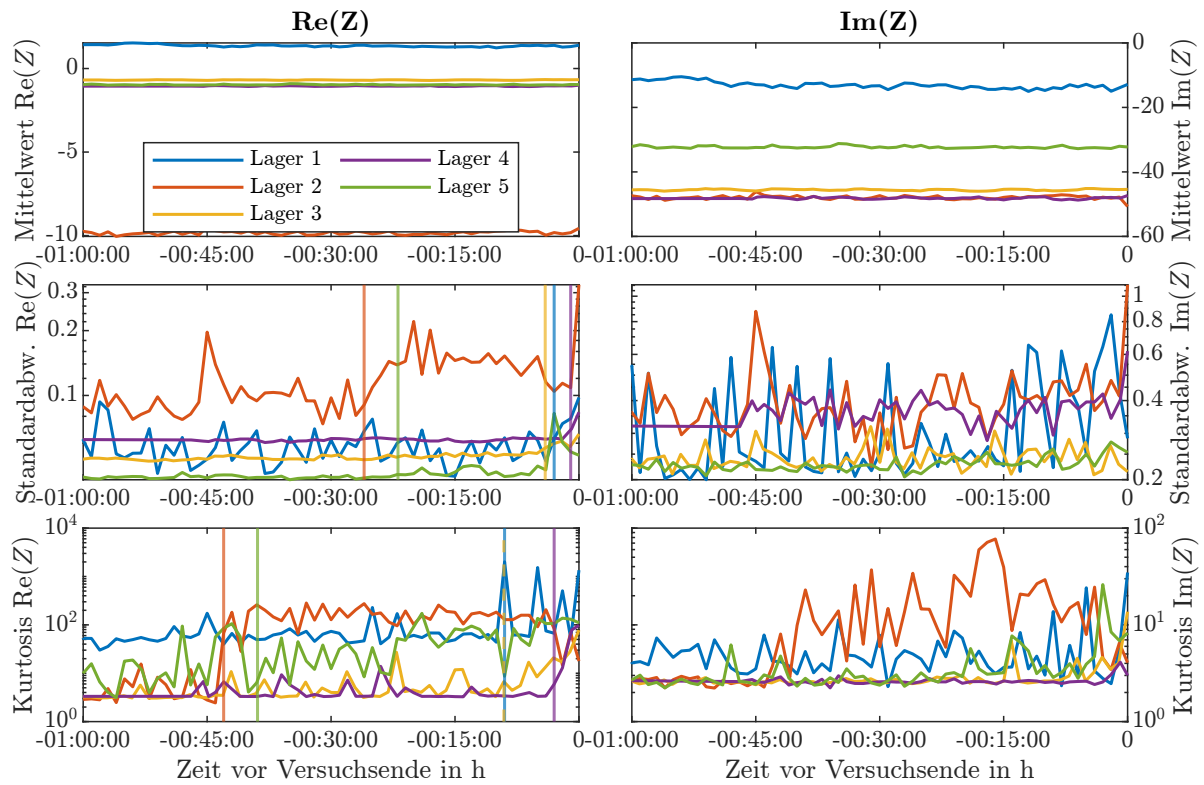


Abbildung 5.9.: Verlauf der Mittelwerte, der Standardabweichung und der Kurtosis für Real- und Imaginärteil der Impedanz eine Stunde vor dem Ausfall der Lager. Für Standardabweichung und Kurtosis des Realteils sind die Zeitpunkte markiert, zu denen sich für die jeweiligen Lager ein Anstieg feststellen lässt.

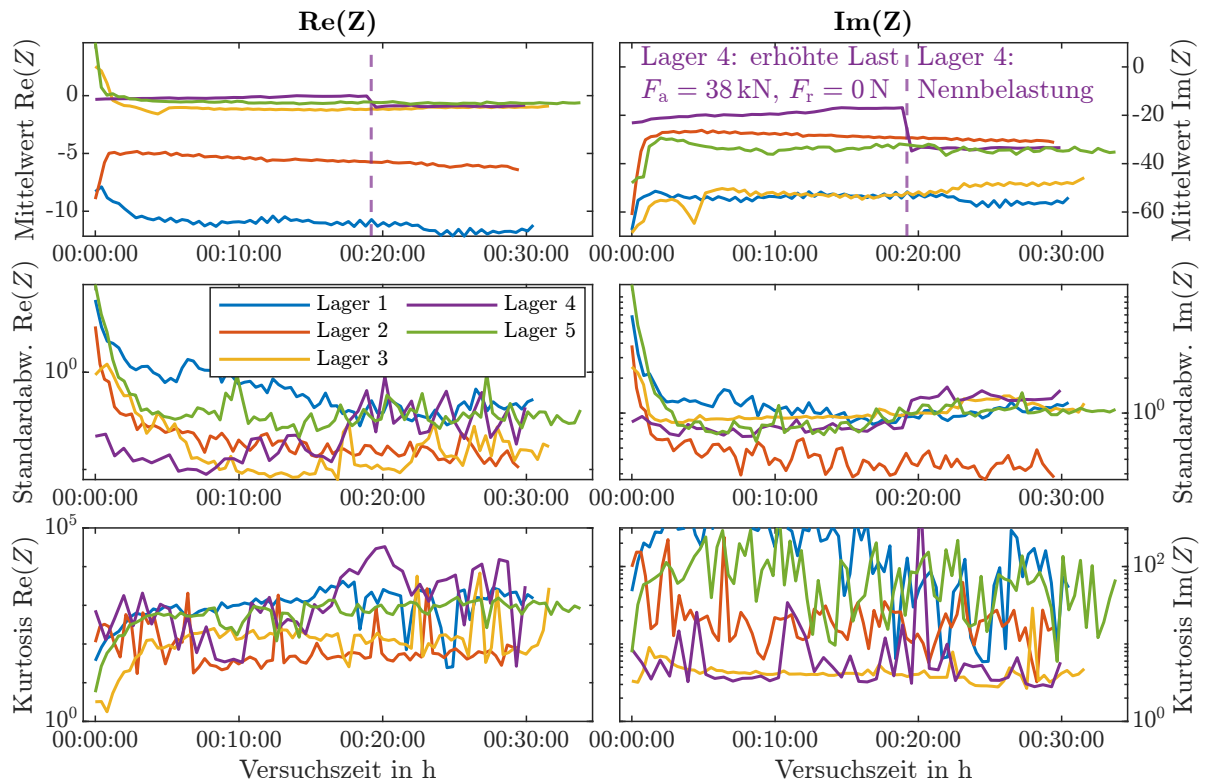


Abbildung 5.10.: Verlauf von Mittelwert, Standardabweichung und Kurtosis während des Schadensfortschritts.

5.5. Erkenntnisse der Lebensdauerversuche

Mit den in diesem Kapitel dargestellten Versuchen und Auswertungen sollten erste Einblicke in die Zusammenhänge zwischen den im realen Wälzlagerlebenslauf auftretenden Oberflächenveränderungen und der Impedanz gewonnen werden. Für das Einlaufverhalten stehen Erkenntnisse aus der Literatur zur Verfügung, die zu bestätigen waren. Für die Veränderung des Impedanzsignals beim Entstehen von Pittings gibt es in der Literatur bislang keine systematischen Untersuchungen, sodass in der Auswirkung explorativ nach Merkmalen gesucht wurde, die im Zusammenhang mit dem Schaden stehen. Die hierbei gewonnenen Erkenntnisse werden im Folgenden kurz zusammengefasst und damit die erste Forschungsfrage „Wie wirken sich die im realen Lebenslauf eines Rillenkugellagers auftretenden Oberflächenveränderungen auf die Wälzlagerimpedanz aus?“ beantwortet. Der Kontakt von Rauheitsspitzen während der Einlaufphase äußert sich in Form von schnellen Ausschlägen des Impedanzsignals, und die Glättung der Rauheit dementsprechend in der Verringerung der Streumaße Standardabweichung und Kurtosis. Auch die Mittelwerte der Impedanz verringern sich. Diese Erkenntnisse stehen im Einklang mit den Ergebnissen für Widerstandsmessungen von HEEMSKERK ET AL., TUOMAS und ISAKSSON, LORD und LARSSON sowie SCHNABEL und MARKLUND [24, 25, 44, 34]. Der Abgleich mit der Literatur und die physikalische Interpretation als metallischer Kontakt sind allerdings nur indirekt möglich, da beim verwendeten Verfahren keine Umrechnung der Impedanz in Widerstand und Kapazität möglich ist.

Das Entstehen von Pittings äußert sich bereits vor dem Anstieg der Schwingungen in einem Anstieg der bereits angesprochenen schnellen Ausschläge, dies steht im Einklang mit der von Tuomas und Isaksson veröffentlichten Messung [25], vgl. Abbildung 2.8. Nach dem Initialschaden entstehen langsame Ausschläge im Impedanzsignal, bei denen die Kapazität und der Widerstand sinken. Die Dauer der Ausschläge scheint im Zusammenhang mit der Länge des Pittings zu stehen und der zeitliche Abstand der Ausschläge kann anhand der Überrollfrequenzen einem Bauteil des Wälzlagers zugeordnet werden. Zusammenfassend konnte qualitativ gezeigt werden, wie natürlich auftretende Oberflächenabweichungen sich auf das Impedanzsignal auswirken. Für das Einlaufverhalten liefert die Literatur eine schlüssige physikalische Interpretation, derzufolge die Ausschläge im Signal auf metallischen Kontakt von Rauheitsspitzen zurückzuführen sind. Für die Ausschläge im Zusammenhang mit Pittings sind die wirkenden physikalischen Mechanismen aber noch unklar. Dieses mangelnde physikalische Verständnis erschwert auch die eindeutige Interpretation der Signale. So treten z.B. schnelle Ausschläge nicht nur vor dem Ausbrechen von Pittings auf, sondern auch als völlig normale Ereignisse während des Einlaufs. Als Diagnosewerkzeug für Wälzlagerschäden sind diese Analysen noch nicht brauchbar. Deshalb werden in den folgenden beiden Kapiteln systematische Untersuchungen durchgeführt, um das Verständnis der Zusammenhänge zwischen Oberflächenveränderungen und Wälzlagerimpedanz zu verbessern. Im Fokus steht dabei die Diagnose von Pittings, die Veränderungen während der Einlaufphase werden nicht weiter betrachtet. Dafür müssen zunächst die Untersuchungsziele geklärt werden.

Die Untersuchungen werden geleitet von dem übergeordneten Ziel, der Entwicklung eines Verfahrens zur Zustandsdiagnose, insbesondere zur Diagnose von Oberflächenabwei-

chungen der Laufbahnen und Wälzkörper. Die Zustandsüberwachung kann interpretiert werden als ein Verfahren, das anhand von Messwerten einen Rückschluss auf den Zustand der überwachten Komponente erlaubt, vgl. Abschnitt 2.4. Die Wälzlagerschäden, die diagnostiziert werden können, sind Abweichungen der tatsächlichen geometrischen Form von der Nenn-Geometrie. Das Zielobjekt der Zustandsüberwachung ist also eine geometrische Größe. Diese geometrische Größe hat zwei wesentliche Aspekte: Der erste Aspekt ist die Geometrie der Oberflächenabweichung, also ihre Abmessungen. Der zweite wichtige Aspekt ist die Frage, an welcher Stelle im Wälzlager die Abweichung auftritt, insbesondere auf welchem Bauteil – Außenring, Innenring oder Wälzkörper. Dieser letzte Aspekt wird im Folgenden als *Lokalisierung* bezeichnet.

Die bisherigen Ergebnisse geben Hinweise darauf, dass anhand von Ausschlägen der Wälzlagerimpedanz sowohl Aussagen über die Geometrie als auch über die Lokalisierung von Oberflächenabweichungen gemacht werden können. An dieser Stelle kann deshalb folgende Hypothese formuliert werden, die in den beiden folgenden Kapiteln untersucht wird:

Die Analyse von Ausschlägen der Wälzlagerimpedanz kann als Werkzeug zur Bestimmung der geometrischen Eigenschaften und der Lokalisierung von Oberflächenabweichungen in Wälzlagern verwendet werden.

Entsprechend der Hypothese kann das Ziel dieser Arbeit konkreter gefasst werden: Eine Untersuchung, ob aus der Analyse von Ausschlägen der Wälzlagerimpedanz Aussagen über Geometrie und Lokalisierung von Oberflächenabweichungen abgeleitet werden können. Um aus dem Ziel und der Hypothese konkrete zu untersuchende Fragestellungen abzuleiten, wird zunächst präziser beschrieben, was mit einem *Werkzeug zur Bestimmung der geometrischen Eigenschaften und der Lokalisierung von Oberflächenabweichungen in Wälzlagern* gemeint ist. Nach HEIDENBLUT wird die mathematische Operation, die anhand von Sensorausgabewerten und weiteren Einflussparametern eine Messgröße bestimmt, als *Modell der Auswertung* bezeichnet [70]. Das Modell der Auswertung beschreibt in einem eindeutigen mathematischen Zusammenhang die Messgröße als Funktion der Ausgabe des Sensors und weiterer Einflussparameter. VOGEL und VORWERK-HANDING haben dieses Verständnis erweitert auf Systeme, bei denen nicht nur das Messsystem, sondern auch das mechanische Verhalten von Maschinenelementen modelliert werden muss, um auf die gesuchte Größe zurückzuschließen [71, 72]. Insbesondere betrachtet VORWERK-HANDING auch Zustandsüberwachungssysteme. Sie verwenden den Begriff *Zielgröße* für diejenige Größe, deren Bestimmung das eigentliche technische Ziel ist, und *Messgröße* für diejenige Größe, die durch einen Sensor gemessen wird. Diese Begrifflichkeit wird auch im Folgenden verwendet. Somit kann das in der Hypothese bezeichnete *Werkzeug zur Bestimmung der geometrischen Eigenschaften und der Lokalisierung von Oberflächenabweichungen in Wälzlagern* verstanden werden als das in Abbildung 5.11 dargestellte Modell der Auswertung, das aus der gemessenen Impedanz, sowie ggf. weiteren Einflussparametern, die gesuchten Größen bestimmt.

Die Lokalisierung ist entsprechend der o.g. Definition die Zuordnung einer Oberflächenveränderung zu Innenring, Außenring oder Wälzkörpern. Eine präzise mathematische Beschreibung des Begriffs Geometrie ist aufgrund der vielfältigen Formen von Oberflä-

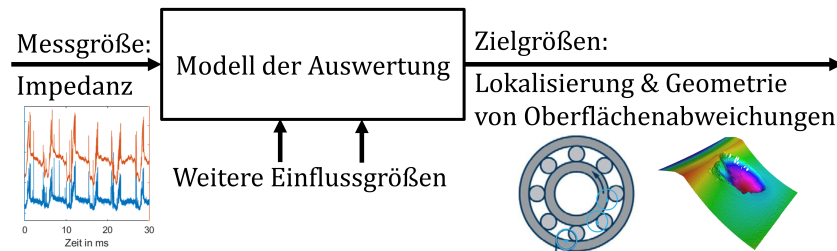


Abbildung 5.11.: Modell der Auswertung

chenveränderungen nicht trivial. In Abschnitt 6.1 wird eine Definition für die Zwecke der Modellierung in dieser Arbeit angegeben.

Das Modell der Auswertung ist nach HEIDENBLUT die Umkehrfunktion des *Modells der Messung*, das die Messgröße als Funktion der Zielgröße und weiterer Einflussparameter beschreibt und in Abbildung 5.12 dargestellt ist [70].

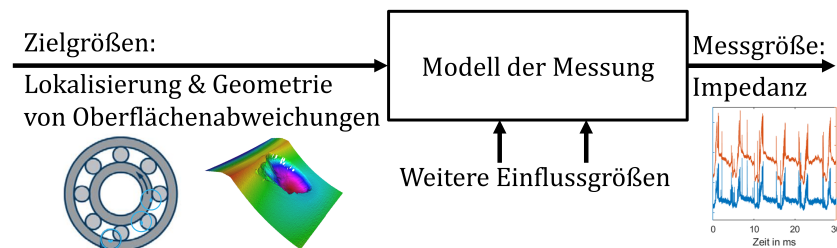


Abbildung 5.12.: Modell der Messung

Im Sinne der in der statistischen Versuchsplanung verwendeten Terminologie werden die Eingangsgrößen des Modells der Messung als *Faktoren* bezeichnet. Die Erstellung eines Modells der Messung kann somit rein formal als Vorarbeit für die Erstellung des Modells der Auswertung verstanden werden.

Vor dem Hintergrund dieser Präzisierung können nun aus der Hypothese die Untersuchungen der folgenden Kapitel abgeleitet werden. Als erster Schritt auf dem Weg zu einem Modell der Auswertung soll in Kapitel 6 ein Modell der Messung erstellt und verifiziert werden, das die Ausprägung der Ausschläge im Impedanzsignal in Abhängigkeit von der Geometrie, der Lokalisierung und weiteren Einflussfaktoren beschreibt. Das zweite Ziel ist eine Beurteilung, ob auf Basis des erarbeiteten Modells bereits relevante Informationen über Geometrie und Lokalisierung realer Oberflächenschäden aus dem Impedanzsignal abgeleitet werden können. Dazu wird das erarbeitete Modell in Kapitel 7 auf die in diesem Kapitel dargestellten Versuchsergebnisse bei realen Oberflächenschäden angewandt. Im Sinne der messtechnischen Terminologie wird das Modell damit als Modell der Auswertung angewandt und damit auch hinsichtlich seiner Eignung zur Untersuchung realer Oberflächenabweichungen validiert.

6. Modellierung des Zusammenhangs zwischen Wälzlagerimpedanz und Oberflächenabweichungen

In Abschnitt 5.5 wurde, basierend auf Lebensdauerversuchen, die Hypothese aufgestellt, dass die Analyse von Ausschlägen der Wälzlagerimpedanz verwendet werden kann, um die Geometrie und die Lokalisierung von Wälzlagerschäden zu bestimmen. Ferner wurde aus dieser Hypothese das Ziel der ersten Versuchsreihe abgeleitet: Die Erstellung eines Modells der Messung, das den Zusammenhang zwischen Ausschlägen im Impedanzsignal und den Zielgrößen Geometrie und Lokalisierung beschreibt. Um zu einem aussagekräftigen Bild dieses Zusammenhangs zu gelangen, umfasst dieses Modell empirische und physikalische Bestandteile. Die empirischen Bestandteile sind aus Versuchen abgeleitete Regressionsmodelle, und darauf basierend Informationen über die Stärke und Unsicherheit der Zusammenhänge zwischen Einflussgrößen und Ausschlägen der Impedanz. Der physikalische Bestandteil sind Hypothesen über die Ursachen für die empirisch bestimmten Zusammenhänge. Die Hypothesen werden durch Abgleich mit dem Stand der Forschung und zusätzliche Versuche evaluiert und teils auch in einfache physikalisch begründete Berechnungsmodelle abgebildet. Diese Modellstruktur ist in Abbildung 6.1 abgebildet.

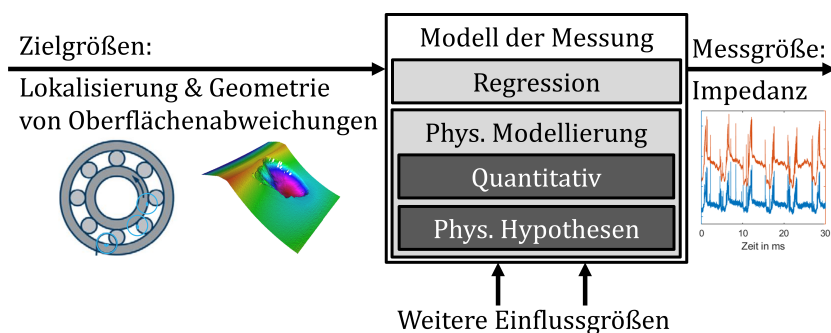


Abbildung 6.1.: Struktur der Modellierung in Kapitel 6

Das Kapitel unterteilt sich in zwei Teile. Zunächst wird anhand von Versuchen am Innenring der Zusammenhang zwischen der ersten Zielgröße, also der Geometrie von Oberflächenabweichungen, und der Impedanz untersucht. In Abschnitt 6.1 werden die Faktoren des Versuchsplans und ihre Faktorstufen ausgewählt. Reale Pittings weisen, wie auch in den eigenen Lebensdauerversuchen in Kapitel 5 deutlich wurde, keine reproduzierbare Geometrie auf. Um statistisch interpretierbare Aussagen zu erhalten, ist eine solche

definierte und reproduzierbare Geometrie allerdings notwendig. Deshalb wird in dieser Versuchsreihe auf künstliche Oberflächenabweichungen, die durch das in Abschnitt 4.3 beschriebene Verfahren eingebracht werden, zurückgegriffen. Diese Abweichungen werden, in Abgrenzung von realen Oberflächenschäden und in Anlehnung an PAUSCH [68], im Folgenden als *Strukturen* bezeichnet. In Abschnitt 6.3 werden die Ergebnisse von Geometriemessungen an diesen Strukturen vorgestellt. In Abschnitt 6.4 werden die Datenverarbeitungsschritte beschrieben, mit denen die rohen Impedanzsignale bearbeitet werden um sie für die Regressionsanalyse nutzbar zu machen. Die eigentliche Modell-erstellung und -verifikation, die den Kern des Kapitels bildet, wird in Abschnitt 6.5 beschrieben.

Im zweiten Teil des Kapitels wird der Zusammenhang zwischen der zweiten Zielgröße, also der Lokalisierung von Oberflächenveränderungen, und der Impedanz untersucht. In Abschnitt 6.6 wird die Versuchsplanung beschrieben und in 6.7 die Modellbildung. Dabei wird gleichzeitig überprüft, inwieweit sich das für die Geometrie gebildete Modell auch auf Oberflächenabweichungen an Wälzkörpern und Außenring des gleichen Lagertyps übertragen lässt, und damit dieses Modell gleichzeitig verifiziert. Eine Übertragung auf andere Lagergrößen oder Lager mit Linienkontakt ist in dieser Arbeit, wie in Kapitel 3 beschrieben, nicht vorgesehen.

Im darauf folgenden Kapitel 7 werden die in Abschnitt 6.5 und 6.7 erarbeiteten Modellvorstellungen auf die in Kapitel 5 dargestellten Lebensdauerexperimente angewandt und damit validiert.

6.1. Planung der Versuche mit variierender Strukturgeometrie

In Kapitel 5 wurde gezeigt, dass die Oberflächenveränderungen während der Einlaufphase und beim Auftreten von Pittings einen Einfluss auf die Wälzlagerimpedanz haben. Da das Einlaufverhalten keine Schädigung, sondern ein normaler Vorgang ist und bereits umfangreich untersucht wurde [44, 25], fokussieren sich die folgenden Untersuchungen auf Strukturen, deren geometrische Eigenschaften realen Pittings ähneln.

Wie in Abschnitt 2.2 dargelegt wurde, existiert zwar eine umfangreiche Literatur zum Zusammenhang zwischen Rauheit und Widerstand [24, 44], aber noch keine systematischen Erkenntnisse zu den Zusammenhängen zwischen der Impedanz und der Schädigung. Auch zu anderen makroskopischen Oberflächenabweichungen, z.B. Eindrückungen oder künstlich eingebrachte Oberflächenstrukturen, konnten keine Arbeiten im Kontext der Impedanzmessung gefunden werden. Es handelt sich also um eine klassische Screening-Situation, d.h. das Ziel der Versuche ist die Identifikation von Parametern und Wechselwirkungen, die einen Einfluss auf den zeitlichen Verlauf der Ausschläge im Impedanzsignal haben. Aus diesem Grund wird ein vollfaktorieller, zweistufiger Versuchsplan gewählt. Die untere Faktorstufe wird im Folgenden als \ominus bezeichnet, die obere Faktorstufe als \oplus . Die Festlegung der Faktoren orientiert sich an der Problemstellung und dem Stand der Forschung zur Wälzlagerimpedanz. Aus der Problemstellung, den Zusammen-

hang zwischen Wälzlagerimpedanz und der Geometrie von Oberflächenabweichungen zu beschreiben, geht zunächst hervor, dass die Oberflächenstruktur variiert werden muss, wozu in Abschnitt 6.1.3 drei Faktoren definiert werden. Aus dem Stand der Forschung zur Wälzlagerimpedanz geht hervor, dass die Betriebsbedingungen Temperatur, Drehzahl und Last den Mittelwert der Impedanz bestimmen [26, 14]. Es ist nicht bekannt, ob sie auch eine Wirkung auf die Ausprägung der hier betrachteten Ausschläge haben. Dies soll untersucht werden und deshalb werden sie in Abschnitt 6.1.2 als Faktoren variiert. Des Weiteren ist bekannt, dass der Wälzlagertyp und der Schmierstoff einen Einfluss auf die Impedanz haben. Um den Umfang der Versuche in einem handhabbaren Rahmen zu halten, werden diese Größen konstant gehalten.

6.1.1. Lager und Schmierstoff

Die Versuche werden mit Rillenkugellagern der Baureihe 6205 C3 TN9 der Firma SKF mit Kunststoffkäfig durchgeführt. Diese Veränderung des Lagertyps im Vergleich mit den Dauerversuchen wurde vorgenommen, um die Unsicherheit bzgl. der Lage der Hertz'schen Fläche zu reduzieren. Die Strukturen sollen, relativ zur Hertz'schen Kontaktfläche, eine definierte und reproduzierbare Lage aufweisen. Aufgrund des spiegelsymmetrischen Aufbaus von Rillenkugellagern liegt die Kontaktfläche bei reiner Radiallast immer in der Mitte der Laufbahn. Die Oberflächenstrukturen werden ebenfalls in der Mitte der Laufbahn eingebracht, sodass die Lage der Hertz'schen Fläche relativ zu den Oberflächenstrukturen bekannt ist. Bei Schrägkugellagern liegt der Mittelpunkt der Fläche dagegen im geneigten Bereich der Laufbahn und ist somit nicht mehr auf einfache Weise geometrisch definiert. Daraus resultiert eine Unsicherheit bei der relativen Lage von Strukturen und Hertz'scher Fläche, die durch die Wahl von Rillenkugellagern eliminiert werden kann. Die Verwendung eines Kunststoffkäfigs ermöglicht, im Gegensatz zu einem Blechkäfig, eine zerstörungsfreie Demontage des Käfigs, was eine notwendige Voraussetzung für die Einbringung der Strukturen ist. Als Schmierstoff wird das Referenzöl FVA III A verwendet, um die Vergleichbarkeit mit den Lebensdauerversuchen aus Kapitel 5 sicherzustellen.

6.1.2. Betriebsbedingungen

Für die Versuchsplanung der Betriebsbedingungen kann auf dem Stand der Forschung zur Wälzlagerimpedanz aufgebaut werden. Die Ergebnisse von SCHIRRA zeigen, dass die wesentlichen Einflussfaktoren für die Wälzlagerimpedanz, neben geometrischen und Stoffeigenschaften von Lager und Schmierstoff, nur die Axial- und Radiallast, die Drehzahl und die Temperatur sind [14].

Durch die Variation der Last soll die Größe der Hertz'schen Fläche variiert werden. Hierfür ist es ausreichend, eine reine Radiallast aufzubringen, eine zusätzliche Axialbelastung ist nicht nötig. Die Radiallast und die Temperatur werden auf zwei Stufen untersucht. Die Drehzahl wird als einziger Parameter auf fünf Stufen variiert, um sowohl Mischreibungs- als auch Vollschmierungsbedingungen abzudecken.

Die Belastung ist nach unten durch den Prüfstand begrenzt, der keine Kräfte unter $F_r = 750\text{ N}$ stellen kann, sodass die untere Faktorstufe zu $F_{r\ominus} = 750\text{ N}$ gewählt wird. Die obere Faktorstufe wird zu $F_{r\oplus} = 3500\text{ N}$ gewählt. Begrenzend hierfür sind die zu Beginn der Versuche verwendeten kostengünstigen Stützlager (Hybridlager). Angegeben mit einer statischen Tragzahl von $C_0 = 7800\text{ N}$, kam es in kurzer Zeit bei einer Belastung von 7000 N zu mehreren Ausfällen. Um die Fortführung der Versuche zu ermöglichen, wurde die Belastung auf 3500 N reduziert. Im weiteren Verlauf konnten hochwertigere Lager eingebaut werden. Um alle Versuche nach dem gleichen Versuchsplan durchführen zu können, wurde die Belastung aber nicht mehr angepasst.

Die Temperatur wird durch Einstellung der Öltemperatur T variiert. Die Wahl der Faktorstufen ($T_\ominus = 40^\circ\text{C}$ und $T_\oplus = 70^\circ\text{C}$) wird durch die Aufheiz- und Kühlzeiten bestimmt, die bei einer größeren Temperaturdifferenz stark ansteigen und die Versuchsdauer dementsprechend erhöhen. Die tatsächlich auftretenden Temperaturen am Außenring weichen hiervon ab. Für die Stufe T_\ominus liegen sie zwischen 31°C und 36°C , für die Stufe T_\oplus zwischen 49°C und 58°C . Der Mittelwert der Außenringtemperaturen weicht also deutlich von dem Nennwert ab, auch die Streuung ist beträchtlich. Eine präzise Einstellung von Außenringtemperaturen ist an diesem Prüfstand möglich und wurde in [14] durchgeführt, benötigt aber lange Versuchszeiten. Gleichzeitig verändern Überrollungen die Geometrie der Strukturen, wie in Abschnitt 6.1.3 gezeigt wird. Um diese Veränderungen zu vermeiden, werden die Versuchszeiten möglichst kurz gehalten und deshalb alle Versuche in schneller Folge durchgeführt, unter Inkaufnahme von Temperaturschwankungen. Durch die Randomisierung der Versuchsreihenfolge und die Wiederholung von Versuchen werden die Temperaturschwankungen herausgemittelt.

Die Drehzahl wird zwischen $n = 40\text{ min}^{-1}$ und $n = 4000\text{ min}^{-1}$ variiert. Dieser Bereich wird in fünf logarithmische Stufen unterteilt, um sowohl bei niedrigen Drehzahlen, wo Mischreibung zu erwarten ist, also auch bei höheren Drehzahlen, wo EHD-Schmierung zu erwarten ist, mehrere Versuchspunkte zu erhalten. Für die Analyse werden in erster Linie die beiden Stufen $n_\ominus = 1250\text{ min}^{-1}$ und $n_\oplus = 4000\text{ min}^{-1}$ herangezogen. Die übrigen Stufen (mit den römischen Ziffern *I*, *II* und *III* bezeichnet) werden lediglich punktuell betrachtet.

Die Faktorstufen von Radiallast, Temperatur und Drehzahl sind nochmals in Tabelle 6.1 zusammengefasst.

Faktorstufe	Radiallast F_r in N	Öltemperatur T in $^\circ\text{C}$	Drehzahl n in min^{-1}
\ominus	750	40	1250
\oplus	3500	70	4000
<i>I</i>			40
<i>II</i>			125
<i>III</i>			400

Tabelle 6.1.: Faktorstufen der Betriebsbedingungen für Versuche mit künstlichen Oberflächenstrukturen

6.1.3. Strukturgeometrie

Ziel der Untersuchungen ist es, einen Beitrag zur Modellierung des Zusammenhangs zwischen der Geometrie von Oberflächenabweichungen und der Wälzlagerimpedanz zu entwickeln. Nach [72] ist es vorteilhaft, die Zielgrößen bei der Entwicklung von Messsystemen als physikalische Größen auszudrücken. Geometrien besitzen die Dimension *Länge*, deshalb wird auch die künstlich eingebrachte Struktur durch Größen der Dimension Länge ausgedrückt. Die Abmessungen werden im Folgenden dimensionsbehaftet beschrieben. Auf eine dimensionslose Darstellung, wie z.B. von PAUSCH und WESCHTA für numerische Untersuchungen umgesetzt [68] [73], wird hier verzichtet. Eine dimensionslose Darstellung ist insbesondere für den Vergleich von Ergebnissen auf verschiedenen Größenskalen nützlich. Da in dieser Arbeit nur eine Lagergröße untersucht wird, kann der anschaulicheren dimensionsbehafteten Darstellung der Vorzug vor der abstrakteren dimensionslosen Darstellung gegeben werden.

Für die Festlegung der Strukturgeometrie kann auf keinen relevanten Stand der Forschung im Bereich Wälzlagerimpedanz zurückgegriffen werden. Allerdings gibt der Stand der Forschung zu Wälzlagerschäden und zu EHD-Kontakten mit strukturierter Oberfläche Hinweise für die Definition der eingebrachten Strukturen.

Die Oberflächenabweichungen sollen repräsentativ für real auftretende Wälzlagerschäden, insbesondere Pittings, sein. Die in den Lebensdauerversuchen (Kapitel 5) aufgetretenen Pittings weisen eine unregelmäßige, muschelförmige Geometrie auf. Um die Zahl der Geometrieparameter gering zu halten, wird die Strukturgeometrie auf die drei Variationsparameter Länge l_p (in Wälzrichtung), Breite w_p (in axialer Richtung) und Tiefe t_p (senkrecht zur Laufbahnoberfläche) reduziert. Aus diesen drei Parametern ergeben sich auf der gekrümmten Oberfläche des Innenrings die in Abbildung 6.2 schematisch dargestellte Struktur.

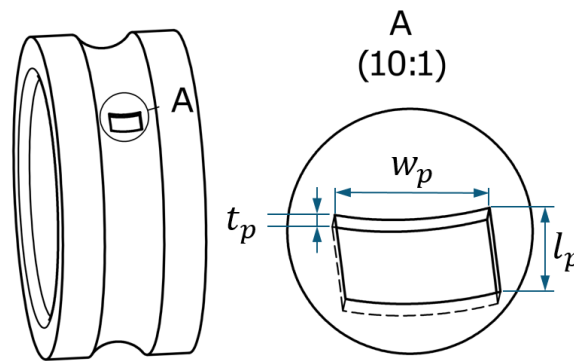


Abbildung 6.2.: Definition der Abmessungen der künstlichen Oberflächenstruktur

Für den Einfluss dieser drei Parameter auf den zeitlichen Verlauf der Ausschläge gibt es keinen Stand der Forschung, auf den zurückgegriffen werden kann. Deshalb orientiert sich die Wahl der Faktorstufen an den charakteristischen Abmessungen des EHD-Kontaktes. Für die Länge l_p und die Breite w_p ist diese charakteristische Abmessung die Ausdehnung der Hertz'schen Fläche. Deshalb wird zunächst die große Halbachse a und die kleine Hal-

bachse b im Kontakt zwischen Innenring und höchstbelastetem Wälzkörper, und dann die Abmessungen der Hertz'schen Fläche $2a$ und $2b$ auf den Kraftstufen des Versuchsplans bestimmt (Tabelle 6.2). Die Rechnung folgt dem in Abschnitt 2.1 beschriebenen Vorgehen.

Faktorstufe Radiallast	F_r in N	$2b$ in mm	$2a$ in mm
\ominus	750	0,170	2,82
\oplus	3500	0,284	4,70

Tabelle 6.2.: Abmessungen der Hertz'schen Fläche am Kontakt zwischen höchstbelastetem Wälzkörper und Innenring in Abhängigkeit der Belastung

Die Strukturlänge $l_{p\oplus} = 0,4$ mm wird so festgelegt, dass die Abmessung der Hertz'schen Fläche $2b$ in der oberen Kraftstufe $F_{r\oplus}$ kleiner ist als die Strukturlänge l_p , d.h. dass $l_{p\oplus} > 2b_{Fr\oplus}$ gilt. Entsprechend wird für die Breite w_p und die Abmessung $2a$ verfahren ($b_{p\oplus} = 5$ mm). Somit ist die Hertz'sche Fläche bei großer Kraft kleiner als die Ausdehnung der eingebrachten Struktur. Nach unten sind l_p und w_p einerseits durch das Herstellungsverfahren begrenzt. $l_{p\ominus}$ wird deshalb festgelegt als die Strichbreite des Lasers (80 μ m, vgl. Abschnitt 4.3) und entspricht somit der kleinsten herstellbaren Struktur. $w_{p\ominus}$ wurde im Rahmen von Vorversuchen ermittelt. Es zeigte sich, dass mit dem fertigungstechnisch minimal möglichen Wert von $w_p = 80$ μ m keine messbaren Änderungen im Impedanzsignal auftraten. Da in diesem Fall keine quantitative Analyse möglich wäre, wurde $w_{p\ominus}$ auf einen Wert von 1 mm erhöht, bei dem regelmäßige Ausschläge im Signal auftraten. Abbildung 6.3 zeigt die Abmessungen der Hertz'schen Fläche im Vergleich mit den gewählten Strukturgrößen.

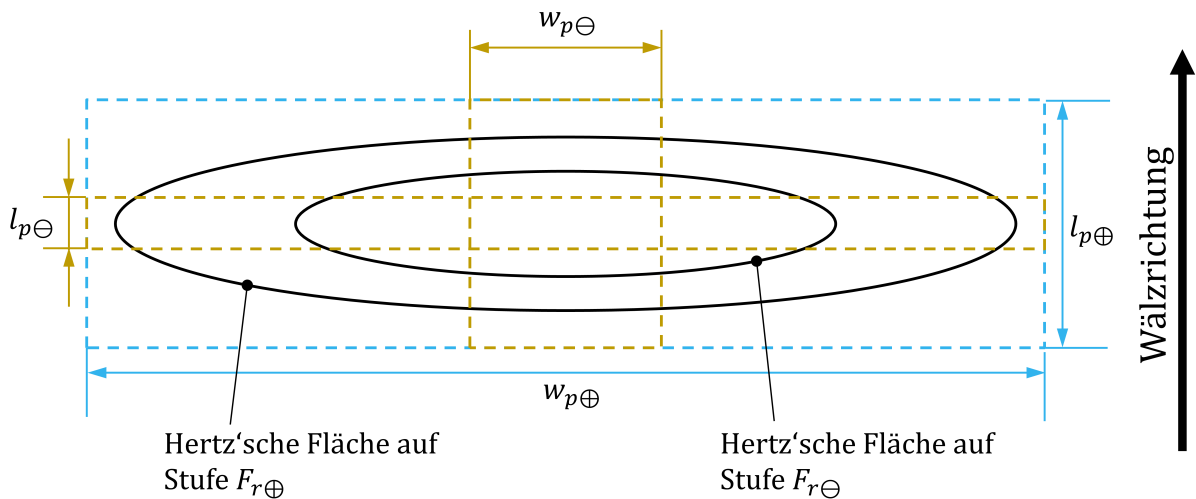


Abbildung 6.3.: Hertz'sche Fläche im Vergleich mit Länge l_p und Breite w_p der Struktur

Die Tiefe der Struktur t_p orientiert sich an der Schmierfilmdicke. In numerischen Untersuchungen von PAUSCH zeigte sich, dass es in EHD-Kontakten mit reinem Rollen

bereits bei Strukturturen im Bereich der Schmierfilmdicke zu einer negativen Beeinflussung des Schmierfilm kommt [68]. Die Tiefe realer Pittings ist zwar deutlich größer als die Schmierfilmdicke, allerdings treten bei anderen Schadensbildern, z.B. Partikeleindrückungen, auch Oberflächenschäden mit deutlich geringerer Tiefe auf, sodass die Untersuchung derart niedriger Strukturturen relevant ist. Deshalb wird festgelegt, dass die untere Faktorstufe $t_{p\ominus}$ geringer als der kleinste in den Versuchen auftretende Wert der Schmierfilmdicke sein soll, bei dem noch von einer vollständigen Trennung der Kontaktpartner ohne Berührung von Rauheitsspitzen ausgegangen werden kann. Dieser Punkt ist identisch mit dem Ausklinkpunkt, der bei einem Wert der spezifischen Schmierfilmdicke von $\Lambda = 3$ angenommen wird, vgl. Abschnitt 2.1. Anhand der quadratischen Rauheit R_q der Kontaktpartner kann mit (2.1) die minimale Schmierfilmdicke im Ausklinkpunkt berechnet werden. Für die verwendeten Lager wurde nach der Einlaufprozedur $R_q = 0,120 \mu\text{m}$ bestimmt, womit sich $h_{min} = 1,47 \mu\text{m}$ im Ausklinkpunkt ergibt. Dementsprechend wird $t_{p\ominus} = 1 \mu\text{m}$ festgelegt. Nach oben wird die Tiefe der Struktur durch das Fertigungsverfahren begrenzt, das bei einer weiteren Erhöhung der Belichtungszeit zunehmend weniger Material abträgt, vgl. Abschnitt 4.3. Um die Risiken einer thermischen Beeinflussung des Werkstoffs in Grenzen zu halten, wird $t_{p\oplus} = 2,5 \mu\text{m}$ festgelegt.

Die Faktorstufen der Strukturgeometrie sind in Tabelle 6.3 zusammengefasst. In Abschnitt 6.3 wird untersucht, welche Geometrien durch das Fertigungsverfahren tatsächlich erreicht werden und wie sie sich während des Versuchs ändern.

Faktorstufe	Länge l_p in μm	Breite w_p in mm	Tiefe t_p in μm
\ominus	80	1	1
\oplus	400	5	2,5

Tabelle 6.3.: Faktorstufen der Struktur-Geometrie

6.1.4. Versuchsplan

Die drei in Abschnitt 6.1.3 festgelegten Geometrie-Faktoren und die drei in Abschnitt 6.1.2 festgelegten Betriebsbedingungen (Belastung, Temperatur, Drehzahl) werden in einem vollfaktoriellen Versuchsplan untersucht. Entsprechend der Stufenanzahl ergeben sich $2^3 = 8$ Strukturvarianten, die im Folgenden auch als *Konfigurationen* bezeichnet werden. Der Versuchsplan der Strukturvarianten ist in Tabelle 6.4 zusammengefasst.

Die $2 \cdot 2 \cdot 5$ Kombinationen von Betriebsbedingungen, im Folgenden *Versuchspunkte* bzw. *VP* genannt, werden nach dem in in Anhang B dargestellten vollfaktoriellen Versuchsplan untersucht, der für jedes Lager durchgeführt wird. Der Versuchsplan ist in zwei Blöcke (A und B) unterteilt, in jedem Block wird jeder Versuchspunkt angefahren. Je Block werden zunächst alle Versuche auf Temperaturstufe \ominus und dann die Versuche auf Temperaturstufe \oplus durchgeführt, da eine Änderung der Temperatur einen sehr großen Zeitaufwand verursacht. Die Drehzahl- und Laststufen sind randomisiert, um Drifteffekte, z.B. aufgrund einer Veränderung der Struktur durch Wälzkörperüberrollungen, statistisch zu eliminieren. Die Randomisierung ist in Block A und Block B unterschiedlich.

Konfiguration	Prüfling Nr.	Faktorstufe t_p	Faktorstufe l_p	Faktorstufe w_p
K0	L0		nicht modifiziert	
K1	L11	⊖	⊖	⊖
K2	L10	⊖	⊖	⊕
K3	L12	⊖	⊕	⊖
K4	L5	⊖	⊕	⊕
K5	L14	⊕	⊖	⊖
K6	L7	⊕	⊖	⊕
K7	L16	⊕	⊕	⊖
K8	L9	⊕	⊕	⊕

Tabelle 6.4.: Versuchsplan der Strukturvarianten

Bei der Vermessung der Strukturen in Abschnitt 6.3 zeigt sich, dass die Strukturgeometrie sich während des Versuchs ändert. Um diesen Einfluss wenigstens näherungsweise abzubilden, wird die Zuordnung eines Versuchspunkts zu Block A oder Block B als weiterer Faktor b_k in die Auswertung aufgenommen. Damit kann untersucht werden, welchen Einfluss der Übergang zwischen Block A und Block B auf die gemessene Impedanz hat. In jedem Einzelversuch werden, nachdem die Versuchsbedingungen erreicht sind, innerhalb einer Minute drei Impedanzmessungen durchgeführt. Für die folgenden Auswertungen wird jeweils nur eine dieser Messungen verwendet, die übrigen Messungen stehen als Reserve für gelegentlich auftretende Datenfehler und für weitere Analysen in Folgearbeiten zur Verfügung.

In Abbildung 6.4 ist die Versuchsplanung nochmals zusammengefasst: Die Zielgröße *Geometrie* wurde zu drei Geometrieparametern konkretisiert, die Zielgröße *Lokalisierung* wird konstant gehalten und erst in einer zweiten Versuchsreihe in Abschnitt 6.6 und 6.7 variiert. Auch weitere Einflussgrößen wurden identifiziert, dabei werden die Drehzahl, die Öltemperatur und die Radiallast variiert, während Axiallast, Lagertyp und Schmierstoff konstant gehalten werden. Als weiterer zweistufiger Faktor wird die Zugehörigkeit zu Block A oder Block B des Versuchsplans berücksichtigt.

6.2. Versuchsdurchführung

Für jedes Lager wird eine festgelegte Versuchsreihenfolge eingehalten, die in Abbildung 6.5 dargestellt ist.

Einlaufen Zunächst werden die Lager einer Einlaufprozedur bei einer Radiallast von $F_r = 7200 \text{ N}$, einer Drehzahl von $n = 4000 \text{ min}^{-1}$ und einer Öltemperatur von $T = 70 \text{ °C}$ unterzogen, um Oberflächenunebenheiten zu glätten. Die Dauer beträgt $L_{10h}/2 = 19,5 \text{ h}$. Die Last während des Einlaufens ist deutlich größer als die maximale Laststufe des Versuchsplans, es ist also sichergestellt, dass die Hertz'sche Fläche während der Versuche kleiner ist als die durch Einlaufen geglättete Fläche.

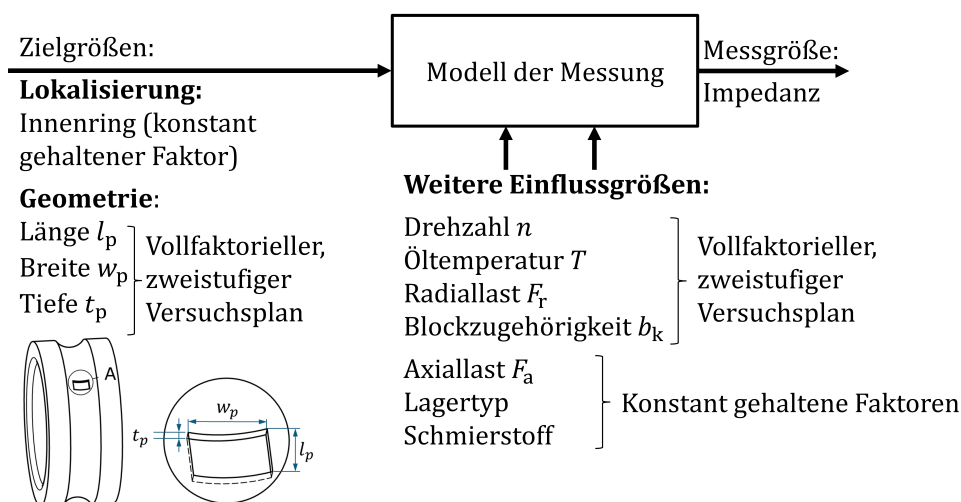


Abbildung 6.4.: Versuchsplanung für die Versuche mit variierender Strukturgeometrie

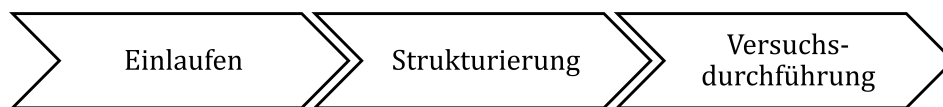


Abbildung 6.5.: Reihenfolge der Durchführung der Strukturversuche

Strukturierung Nach dem Einlaufen werden die Lager demontiert, entfettet und die Oberflächenstrukturen des Versuchsplans mit dem in Abschnitt 4.3 dargestellten Verfahren auf dem Innenring eingebracht. Danach werden die Lager unter Beibehaltung der ursprünglichen Ausrichtung von Innenring, Außenring und Käfig wieder montiert.

Versuche im Prüfstand Die Lager werden in den Prüfstand eingebaut. Bei der Montage wird der Außenring so ausgerichtet, dass der beim Einlaufen belastete Bereich des Außenrings wieder in der Lastzone liegt. Vor der Durchführung des Versuchsplan werden die Lager nochmal für 10 Minuten bei den Bedingungen von Versuchspunkt VP114 ($F_r = 3500 \text{ N}$, $T = 40 \text{ °C}$, $n = 1250 \text{ min}^{-1}$) konditioniert, um Unebenheiten, die bei der Bearbeitung entstanden sind, abzutragen.

6.3. Vermessung der Strukturgeometrien

Ein Teil der eingebrachten Strukturen wird mit dem optischen Verfahren der Fokusvariation (vgl. Abschnitt 5.2) vermessen, um die tatsächlich wirksame Geometrie und ihre Veränderung aufgrund der Überrollungen während der Versuchsdurchführung zu ermitteln. Von Interesse sind dabei lediglich die Abmessungen l_p und t_p sowie die Oberflächenbeschaffenheit im strukturierten Bereich, da die Strukturbreite w_p so groß ist, dass keine signifikanten Abweichung vom Nennwert auftreten. In der Mitte der Laufbahn wird ein 1 mm breites Segment vermessen und aus diesem Streifen fünf zufällige Querschnitte entnommen, vgl. Abbildung 6.6.

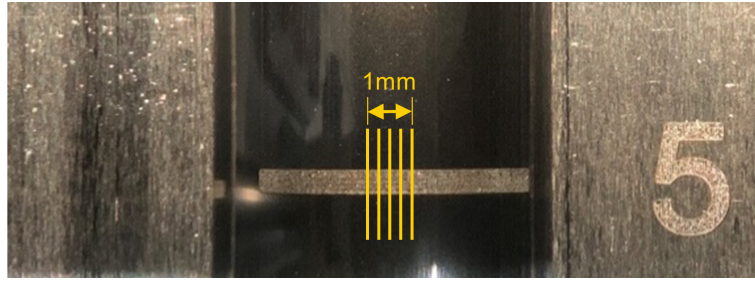


Abbildung 6.6.: Lage der vermessenen Querschnitte

Um die Tiefe der Strukturen zu bestimmen, wird für jeden Querschnitt in den nicht strukturierten Bereich sowie in den Boden der Struktur jeweils ein Kreis eingeschrieben und die Tiefe t_p als Differenz der Radien ermittelt, vgl. Abbildung 6.7. Die Länge l_p wird ebenfalls anhand der Querschnitte ermittelt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6.5 dargestellt.

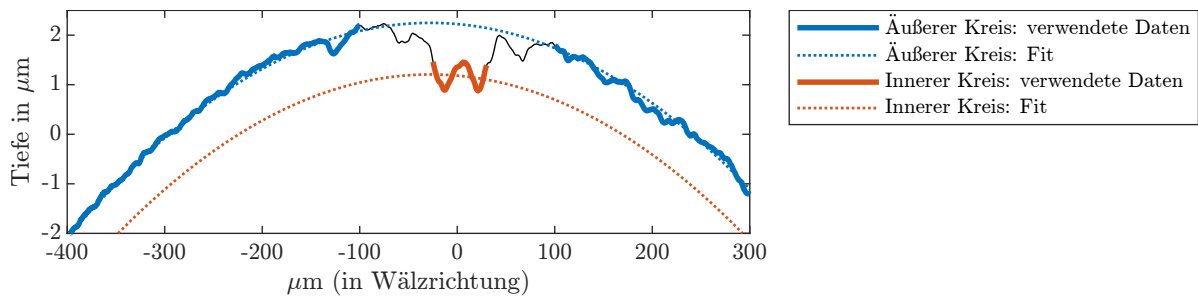


Abbildung 6.7.: Auswertung der Geometrievermessung.

In Abbildung 6.8 sind die Querschnitte für die Konfigurationen K2, K4, K6 und K8 dargestellt, damit sind die vier möglichen Kombinationen der Faktoren l_p und t_p abgedeckt. Die fünf Querschnitte von K2 und K6 weisen eine regelmäßige Form auf, die bereits in Abschnitt 4.3 beschrieben wurde. Die Ähnlichkeit der fünf Querschnitte deutet auf eine ebenmäßige Struktur hin. Die Form von K4 und K8 ist, im Vergleich dazu, deutlich unregelmäßiger. In K4 erreichen in mehreren Querschnitten Punkte im strukturierten Bereich die Höhe der unstrukturierten Laufbahn. In K8 ist eine wellenförmige Struktur sichtbar.

Die Unregelmäßigkeit wird noch deutlicher in Abbildung 6.9 sichtbar, hier ist die Topographie der Strukturen farbcodiert dargestellt, wobei die Krümmung der Laufbahn zuvor eliminiert wurde. Die höchsten Punkte der Struktur von K4 sind ähnlich hoch wie die Rauheitsspitzen im unstrukturierten Bereich, bei K8 liegt die Struktur durchgehend unterhalb des Niveaus des unstrukturierten Bereichs.

Wie in Abbildung 6.10 zu sehen ist, entsteht bei der linienförmigen Geometrie von K2 auch optisch eine deutlich gleichmäßigere Struktur als bei der rechteckigen Struktur von K6. Als Grund für diese Unregelmäßigkeit wird vermutet, dass der Abstand der vom Laser gesetzten Bahnen zu hoch ist. Der Abstand spielt für K2 und K6 keine Rolle, da vom Laser hier nur eine Bahn gesetzt wird. Diese Parametrierung ist plausibel, da

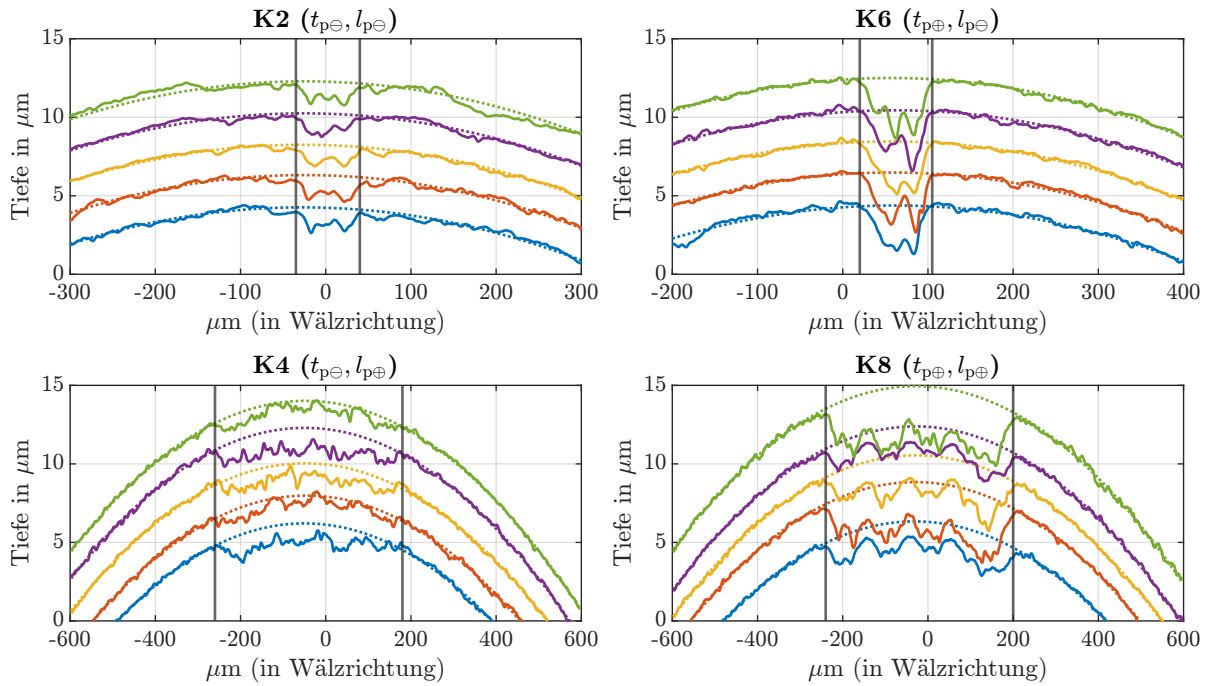


Abbildung 6.8.: Querschnitte durch die Strukturen der Konfigurationen K2, K4, K6 und K8. Die Querschnitte sind für eine übersichtliche Darstellung auf der Ordinate versetzt dargestellt und farblich unterschieden.

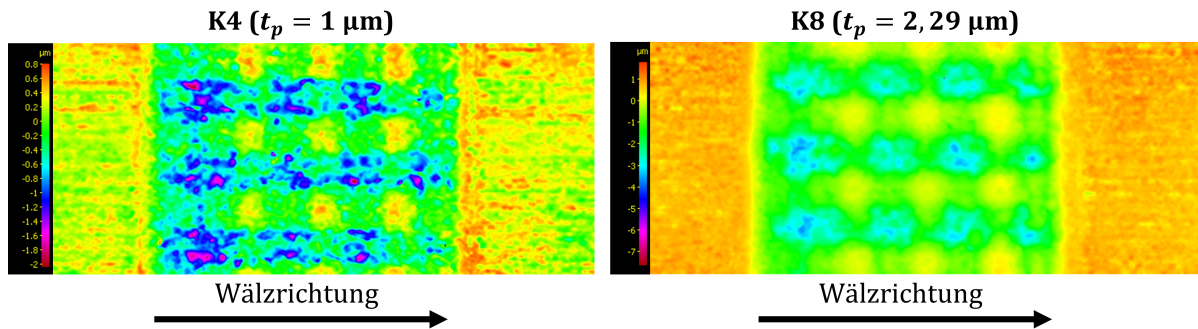


Abbildung 6.9.: Topographie der Strukturen von K4 und K8 nach Durchführung des Versuchsprogramms.

die verwendete Laseranlage für die Beschriftung und nicht für den Abtrag von Material optimiert ist. In Abschnitt 6.5.4 wird ein Versuch bei veränderten Laserparametern durchgeführt, mit denen eine regelmäßigere Struktur entsteht.

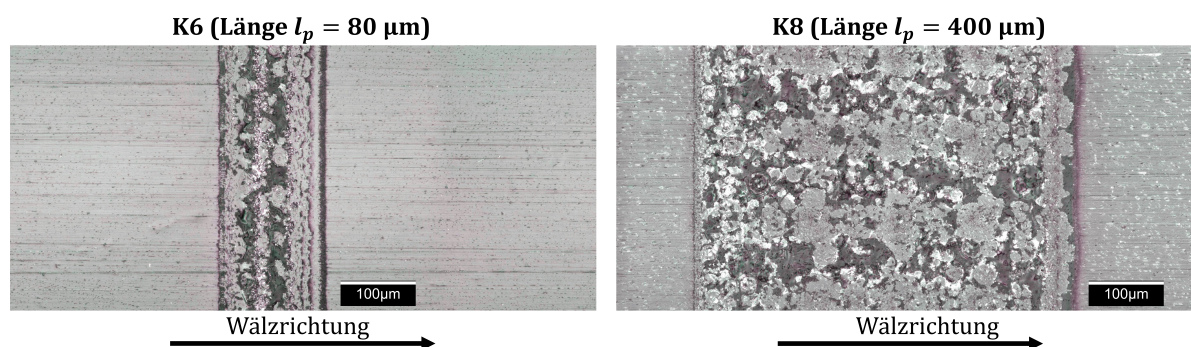


Abbildung 6.10.: Lichtmikroskopaufnahmen von K6 und K8 nach Durchführung des Versuchsprogramms

In Tabelle 6.5 sind die Mittelwerte der gemessenen Tiefe und Länge dargestellt. Die Strukturlänge von K2 ist, bei gleicher Nennlänge $l_{p\ominus}$, etwas geringer als bei K6. Die Tiefe t_p der Varianten K4 und K8 ist etwas geringer als diejenige der Varianten K2 und K6, was auf die unregelmäßige Struktur zurückgeführt werden kann.

Konfiguration	t_p	l_p
K2	1,12 μm	75 μm
K4	0,76 μm	440 μm
K6	2,70 μm	85 μm
K8	2,29 μm	440 μm

Tabelle 6.5.: Gemessene Länge und Tiefe der Strukturen in den Konfigurationen K2, K4, K6 und K8

Während des Versuchsprogramms kann es zu Veränderungen der strukturierten Oberfläche, z.B. als Abtrag von Rauheitsspitzen, kommen. Deshalb wird für eine Konfiguration (K4) ein Vergleich der Struktur vor und nach der Durchführung des Versuchsprogramms durchgeführt, vgl. Abbildung 6.11. Die Querschnitte wurden nicht an den gleichen Stellen entnommen, können also nicht direkt verglichen werden. Vor der Versuchsdurchführung ragen noch einzelne Rauheitsspitzen, die z.B. beim Aufschmelzen des Metalls entstanden sein können, über das Niveau der nicht strukturierten Laufbahn hinaus. In der Kontrollmessung sind solche Spitzen nicht mehr sichtbar. Demzufolge kommt es tatsächlich zu einer Glättung, die besonders einzelne besonders hohe Rauheitsspitzen betrifft.

Insgesamt ist festzuhalten, dass durch das Fertigungsverfahren Vertiefungen ohne Randaufwerfungen hergestellt werden konnten. Die ermittelten Tiefen und Längen liegen im Bereich der vorgesehenen Werte des Versuchsplans, sind jedoch unregelmäßig. Für das hier verfolgte Ziel, die wesentlichen Effekte und Wirkungen der Faktoren zu ermitteln, ist dies nicht problematisch, denn hierfür ist nur wichtig, dass die Faktorstufen sich

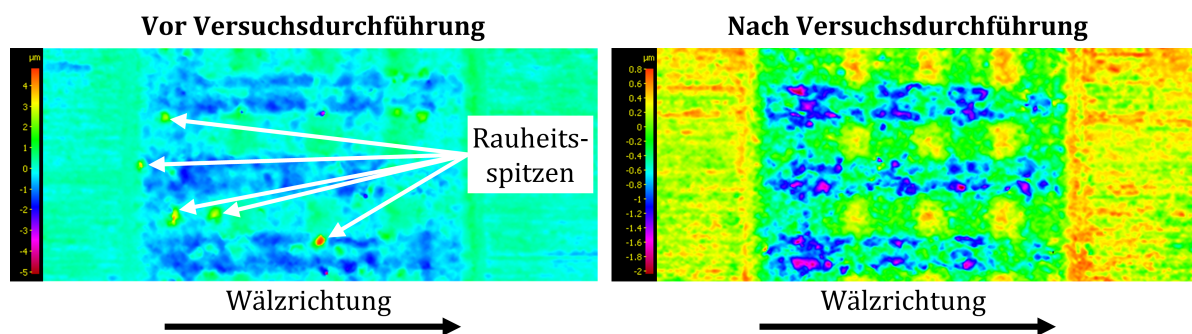


Abbildung 6.11.: Topographie der Struktur von K4 vor und nach der Versuchsdurchführung.

eindeutig unterscheiden. Bei der Interpretation sind diese Unsicherheiten allerdings zu berücksichtigen. Auch eine Glättung der Mikrogeometrie konnte nachgewiesen werden, sie wird bei der Auswertung auch quantitativ berücksichtigt.

6.4. Ableitung von Merkmalen aus dem Impedanzsignal

In diesem Abschnitt wird die Extraktion der relevanten Merkmale aus den rohen Impedanzsignalen beschrieben. Das übergeordnete Ziel der Versuchsauswertung ist eine Beschreibung des Modells der Messung, also des in Abbildung 6.4 dargestellten Zusammenhangs zwischen den Faktoren des Versuchsplans (Geometrie von Oberflächenabweichungen und Betriebsbedingungen) und der Impedanz.

Die allgemeine Modelltheorie nach STACHOWIAK besagt, dass ein Modell grundsätzlich nicht die Realität exakt abbildet, sondern nur solche Attribute abbildet, die dem Zweck des Modells dienen [74], dies wird als *Verkürzungs-* und als *pragmatisches Merkmal* eines Modells bezeichnet. Das Modell der Messung dient letztlich dem Zweck, eine Zustandsüberwachung des Wälzlagers bezüglich Veränderungen der Oberflächen von Laufbahnen und Wälzkörpern zu ermöglichen. Eine Vorhersage des Zeitverlaufs $Z(t)$ ist also nicht das Ziel. Viel zweckmäßiger für die Zustandsüberwachung ist es, das gemessene Impedanzsignal auf wenige skalare Metriken zu reduzieren, die aus dem Verlauf des Signals abgeleitet werden und relevante Eigenschaften des Signals beschreiben. In der klassischen schwingungsbasierten Zustandsüberwachung werden hierzu z.B. die Amplituden des Hüllkurvenspektrums bei den Überrollfrequenzen oder statistische Größen wie die Kurtosis verwendet [2, 5], vgl. Abschnitt 2.4. Diese Metriken können direkt überwacht werden, können aber z.B. auch als Eingangsgrößen in Verfahren des maschinellen Lernens verwendet werden, wo sie als *Features* bezeichnet werden [55]. Die Metriken werden im Folgenden als m_i bezeichnet.

Durch die Ergänzung des Faktors b_k zur Beschreibung der Blockzugehörigkeit und die Abbildung des Impedanzsignals auf die Metriken m_i wird der zu modellierende Zusammenhang nochmals präzisiert und ist in Abbildung 6.12 dargestellt.

In Abschnitt 6.4.1 werden die im Versuch gemessenen Impedanzkurven zunächst vor-

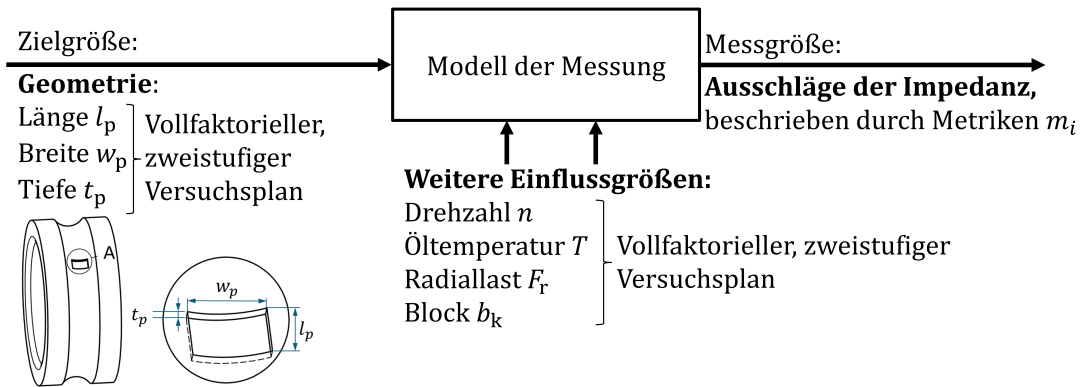


Abbildung 6.12.: Modellstruktur für Versuche mit variierender Strukturgeometrie.

läufig interpretiert und aufbauend darauf in den Abschnitten 6.4.2 und 6.4.3 ein Auswertungsverfahren entwickelt sowie die Metriken m_i definiert. In Abschnitt 6.5 wird der Zusammenhang zwischen m_i und den Faktoren des Versuchsplans modelliert.

6.4.1. Qualitative Analyse

Der Versuchsplan umfasst einen Drehzahlbereich von 40 min^{-1} bis 4000 min^{-1} . Bei niedrigen Drehzahlen ist das Impedanzsignal von Ausschlägen geprägt, die bei einer Erhöhung der Drehzahl abnehmen und ab $n = 1250 \text{ min}^{-1}$ weitgehend verschwinden. Abbildung 6.13 zeigt dies beispielhaft für eine Erhöhung der Drehzahl, wobei alle anderen Versuchsparameter konstant sind. Die Ausschläge ähneln den Ausschlägen, die bei den Dauerversuchen in Kapitel 5 als *schnelle Ausschläge* bezeichnet und auf metallischen Kontakt zurückgeführt wurden. In Abschnitt 6.5.3 wird dieses Phänomen genauer untersucht. Dabei zeigt sich, dass neben metallischem Kontakt auch elektrische Durchschläge eine mögliche Erklärung sind. Aufgrund der Sprünge ist es bei niedrigen Drehzahlen in jedem Fall nicht möglich, die für eine makroskopische Oberflächenveränderung charakteristischen langsamen Ausschläge im Signal zu identifizieren. Für die quantitativen Analysen in Abschnitt 6.5 werden deshalb nur die hohen Drehzahlstufen $n_{\ominus} = 1250 \text{ min}^{-1}$ und $n_{\oplus} = 4000 \text{ min}^{-1}$ betrachtet.

Um die Merkmale des Signals zu identifizieren, die auf eine Überrollung der Strukturen zurückzuführen sind, werden zunächst die Signale der Konfiguration K8 mit dem nicht modifizierten Lager K0 verglichen. In Abbildung 6.14 ist der Impedanzverlauf bei dem nicht modifizierten Vergleichslager abgebildet. Das Impedanzsignal weist periodische Schwankungen auf, die u.a. auf den in [89] beschriebenen Einfluss der Lastverteilung zurückgeführt werden können. Abbildung 6.15 zeigt das Impedanzsignal der Konfiguration K8 bei ansonsten gleichen Bedingungen. Deutlich sichtbar sind mehrere Ausschläge in Form einer Verringerung des Realteils und einer spiegelsymmetrischen Erhöhung des Imaginärteils, die im Vergleichslager nicht auftreten. Die Ausschläge treten in Gruppen auf, innerhalb der Gruppen beträgt der zeitliche Abstand der Ausschläge ca. 9 ms, was dem Kehrwert der Innenring-Überrollfrequenz $f_{\text{IR}} = 112,7 \text{ Hz}$ (Tabelle 2.2) entspricht. Diese Beobachtungen stimmen mit den Beobachtungen der Lebensdauerversuche (Ab-

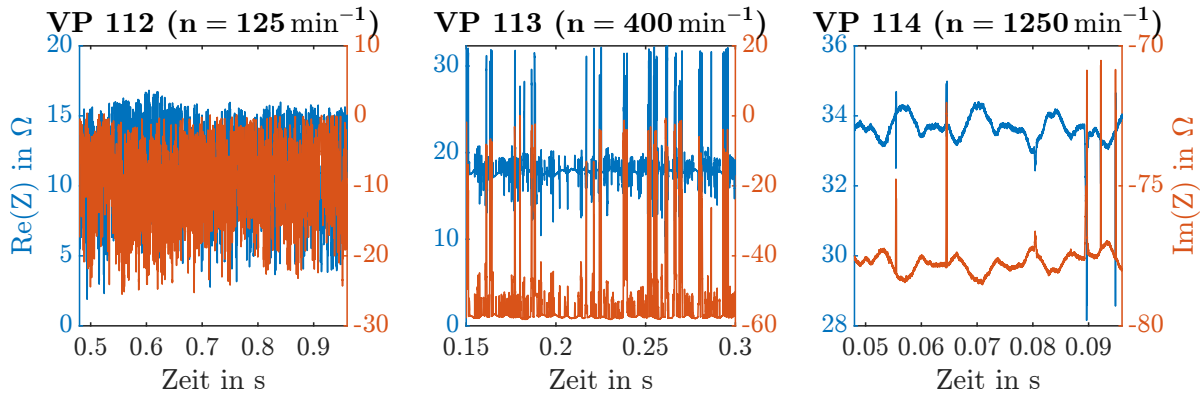


Abbildung 6.13.: Verlauf der Impedanz in Konfiguration K8 bei drei verschiedenen Drehzahlen. Bei allen Versuchspunkten ist $F_r = 3500 \text{ N}$ und $T = 70^\circ \text{C}$.

bildung 5.5) überein und können damit erklärt werden, dass die Überrollung der auf dem Innenring eingebrachten Oberflächenstrukturen die Ursache für die Ausschläge ist. Auffällig ist zudem, dass der Ausschlag in der Mitte jeder Gruppe, z.B. der mit (2) markierte Ausschlag, höher ist als an den Rändern (1 und 3) und dass je Umdrehung eine Gruppe auftritt. Die veränderliche Höhe der Ausschläge ist erklärbar, wenn man annimmt, dass die Höhe eines Ausschlags von der Wälzkörperlast abhängt und bei der Überrollung nicht belasteter Wälzkörper kein Ausschlag auftritt. Unter dieser Annahme hängt die Höhe eines Ausschlags von der Position der Struktur auf dem Innenring in der Lastzone zum Zeitpunkt der Überrollung ab. Ein ähnliches Verhalten ist aus der schwingungsbasierten Zustandsüberwachung bekannt [2], vgl. Abbildung 2.15.

Die beschriebenen Ausschläge treten in ähnlicher Form in fast allen Konfigurationen auf, allerdings nicht immer bei allen Betriebsbedingungen. Nur bei K1, der Struktur mit den kleinsten Abmessungen, treten keine messbaren Ausschläge auf. Abbildung 6.16 zeigt Ausschläge aller Konfigurationen bei gleichen Betriebsbedingungen. Die Grundform ist bei allen Lagern gleich und besteht aus einem Maximum des Imaginärteils und einem gleichzeitigen Minimum des Realteils. In einigen Fällen folgt auf diesen Ausschlag noch ein Maximum des Real- und ein Minimum des Imaginärteils, z.B. deutlich sichtbar in K6. Die Höhe und Dauer der Ausschläge variiert. In K7 und K8 sind Abweichungen von dieser Grundform sichtbar, die eine kurze Dauer und steile Flanken aufweisen, sie ähneln damit den bereits in diesem Abschnitt und in Kapitel 5 für Mischreibungsbedingungen beschriebenen *schnellen Ausschläge* und werden im Folgenden auch mit diesem Begriff belegt. Die Grundform dagegen ähnelt den in den Dauerversuchen beim Überrollen eines Pittings beobachteten langsamen Ausschlägen. Allerdings lag bei den langsamen Ausschlägen der Dauerversuche stets ein Absinken des Real- und des Imaginärteils vor, während bei den hier beobachteten Ausschlägen der Realteil sinkt, aber der Imaginärteil steigt. Mögliche Gründe für diese Abweichung werden im Rahmen der Validierung in Abschnitt 7.2 diskutiert. Trotz des Unterschieds werden die hier auftretenden Ausschläge aufgrund ihrer vergleichsweise langen Dauer und flachen Flanken im Folgenden wiederum als *langsame Ausschläge* bezeichnet.

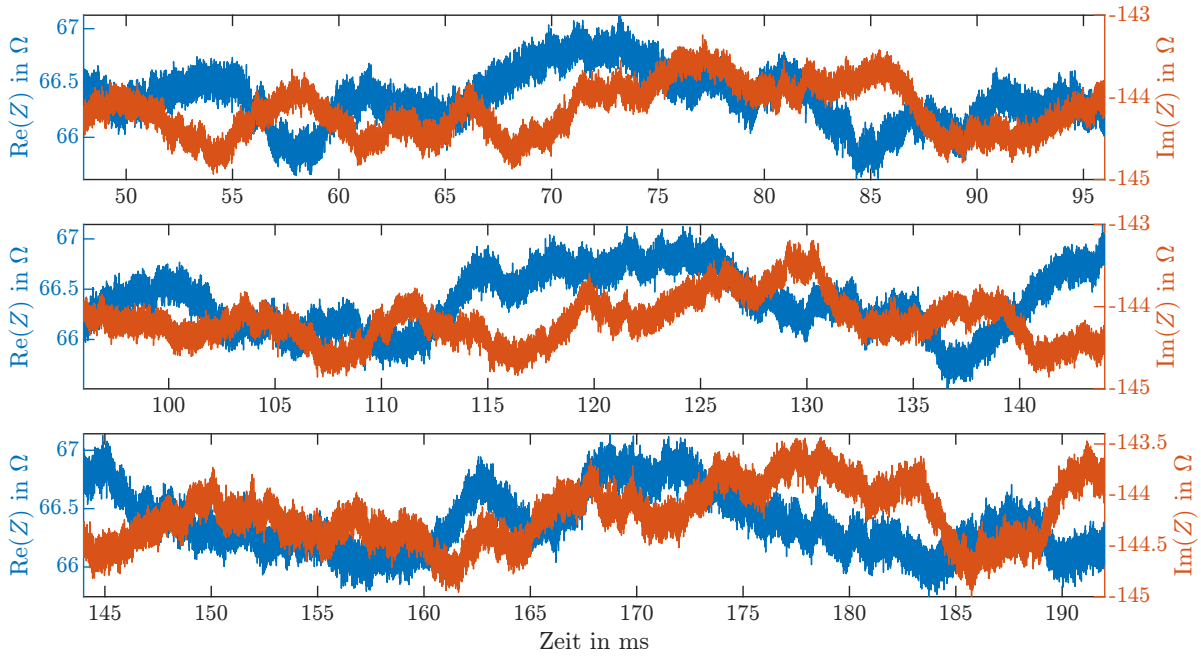


Abbildung 6.14.: Zeitverlauf der Impedanz im nicht modifizierten Vergleichslager (K0) bei Versuchspunkt VP114 ($F_r = 3500 \text{ N}$, $T = 40^\circ\text{C}$, $n = 1250 \text{ min}^{-1}$). Jede Zeile entspricht einer Umdrehung des Innenrings.

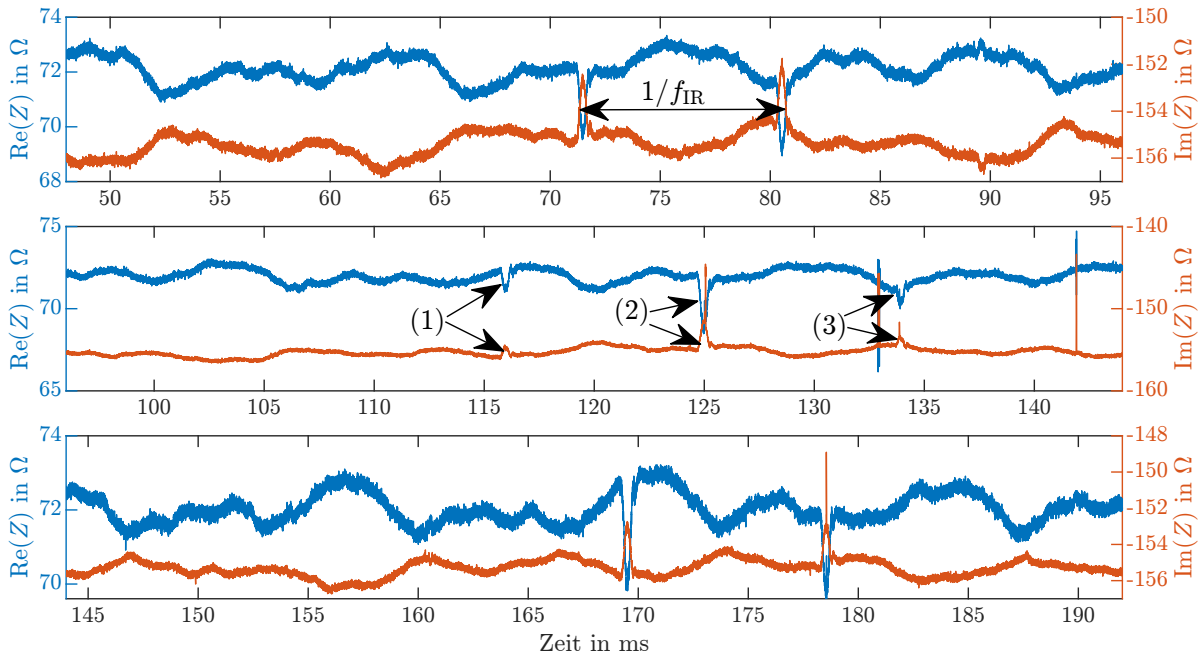


Abbildung 6.15.: Zeitverlauf der Impedanz in Konfiguration K8 bei Versuchspunkt VP114 ($F_r = 3500 \text{ N}$, $T = 40^\circ\text{C}$, $n = 1250 \text{ min}^{-1}$). Jede Zeile entspricht einer Umdrehung des Innenrings.

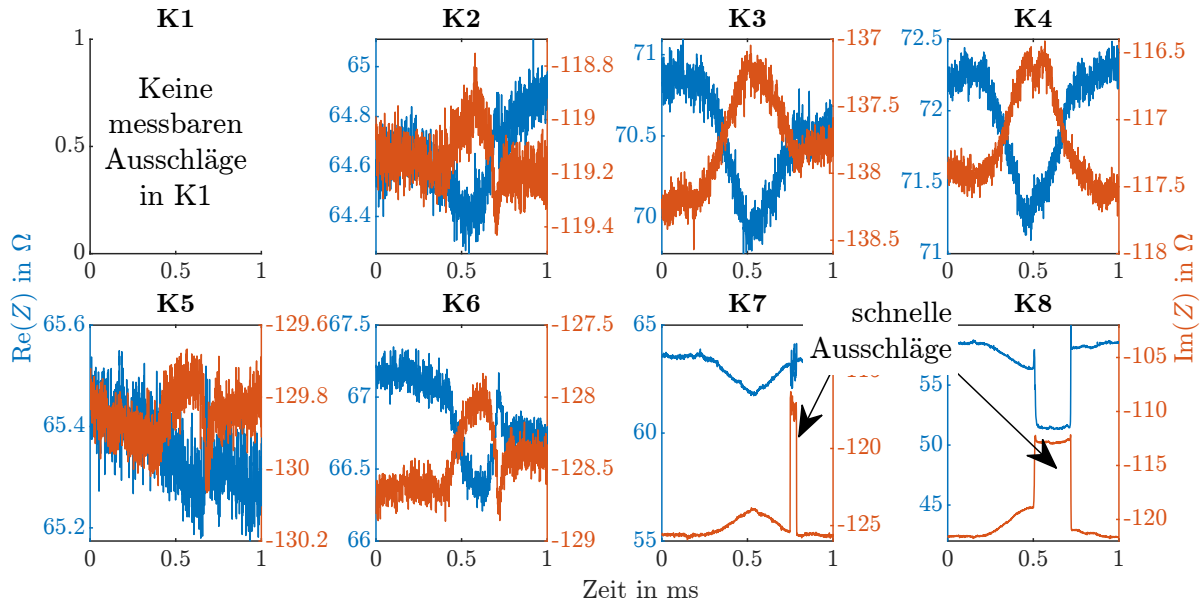


Abbildung 6.16.: Ausschläge aller Konfigurationen bei Versuchspunkt VP114 ($F_r = 3500 \text{ N}$, $T = 40 \text{ °C}$, $n = 1250 \text{ min}^{-1}$). Dargestellt ist jeweils der erste Ausschlag im Signal.

Schnelle Ausschläge treten nicht nur im Zusammenhang mit einer Überrollung auf, sondern auch zu anderen, zufälligen Zeitpunkten, wie in Abbildung 6.17 deutlich wird. Diese Abbildung zeigt einen Ausschnitt aus einer beispielhaften Messung bei 1250 min^{-1} und Detailansichten mehrerer Ausschläge. Die mit (3) und (5) bezeichneten schnellen Ausschläge treten im Zusammenhang mit einem langsamen Ausschlag auf, die anderen Ausschläge nicht. Daraus ergibt sich, dass das Auftreten eines solchen Ausschlags nicht unmittelbar auf die eingebrachten Strukturen zurückzuführen ist. Am Beispiel des Ausschlags (5) wird auch deutlich, dass innerhalb eines langsamen Ausschlags mitunter mehrere schnelle Ausschläge auftreten. Die Problematik, die sich für die Zählung und die Messung der Länge eines Ausschlags ergibt, wird in Abschnitt 6.4.3 aufgegriffen. Die komplexe Impedanz kann, anstatt der Trennung in Real- und Imaginärteil, auch durch Betrag und Phasenwinkel ausgedrückt werden. Diese Darstellung wird z.B. von GEMEINDER verwendet [27]. In Abbildung 6.18 ist diese Darstellung für die bereits in Abbildung 6.15 gezeigte Messung zu sehen. Die langsamen Ausschläge äußern sich als Absinken des Betrages und des Phasenwinkels, d.h. die Impedanz verschiebt sich etwas in Richtung des kapazitiven Bereichs. Bei den schnellen Ausschlägen sinkt ebenfalls der Betrag, die Phase steigt aber an. Bei diesen Ausschlägen verschiebt sich die Impedanz also leicht in Richtung des ohmschen Bereichs. Da eine direkte physikalische Deutung dieser Vorgänge nicht möglich ist, wird die Darstellung als Real- und Imaginärteil beibehalten.

Wie in Abschnitt 2.2 beschrieben, kann die elektrische Impedanz von Wälzkontakten und Wälzlagern als Parallelschaltung eines ohmschen Widerstands und eines Kondensators modelliert werden. Dabei gibt der ohmsche Anteil eine Aussage über das Vorhandensein

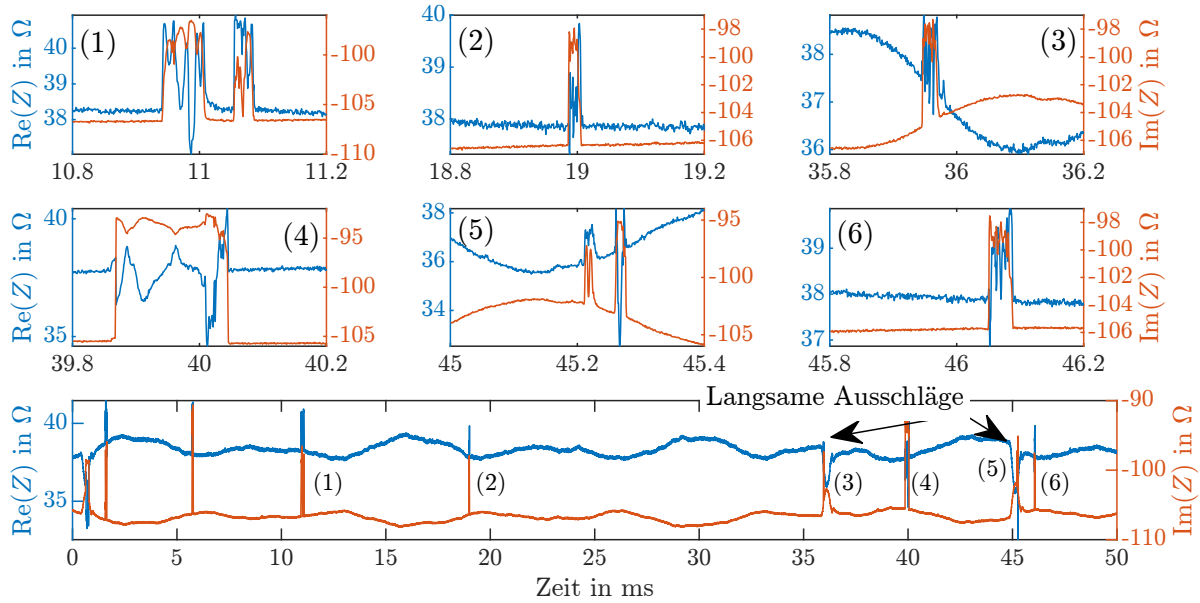


Abbildung 6.17.: Impedanzsignal der Konfiguration K8 bei Versuchspunkt VP144 ($F_r = 3500 \text{ N}$, $T = 70^\circ\text{C}$, $n = 1250 \text{ min}^{-1}$). Unten: Ausschnitt 50 ms, Oben: Detailansichten mehrerer Ausschläge.

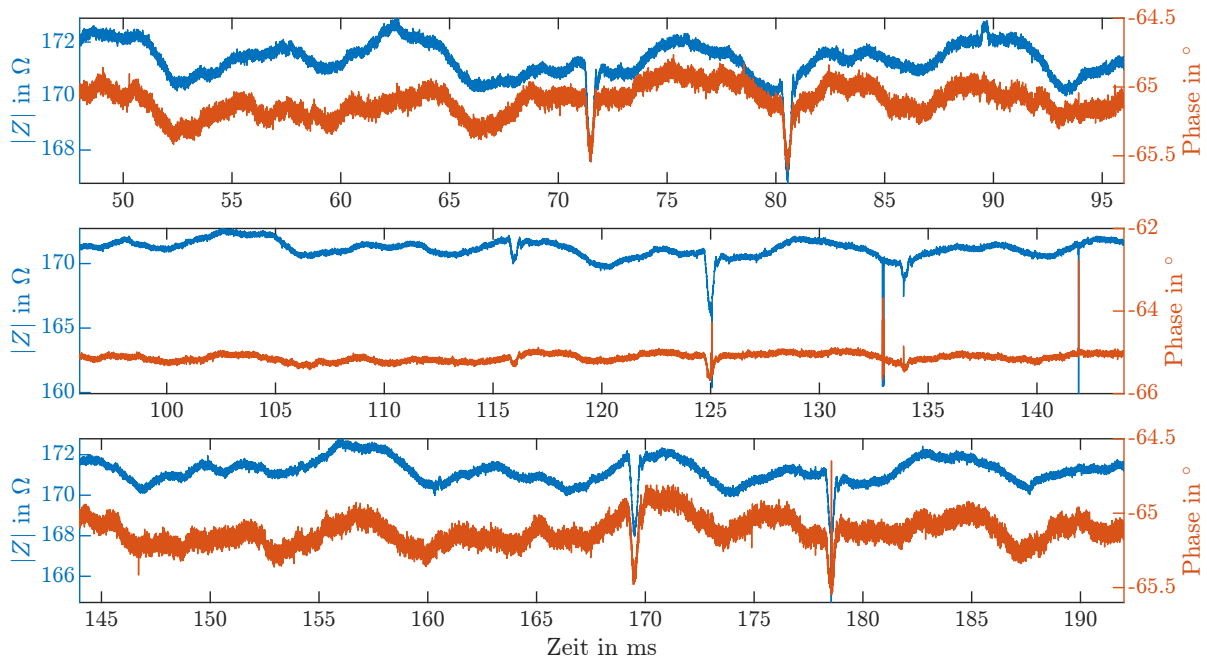


Abbildung 6.18.: Zeitverlauf der Impedanz, dargestellt als Betrag und Phase, in Konfiguration K8 bei Versuchspunkt VP114 ($F_r = 3500 \text{ N}$, $T = 40^\circ\text{C}$, $n = 1250 \text{ min}^{-1}$). Jede Zeile entspricht einer Umdrehung des Innenrings.

eines Schmierfilms und der kapazitive Anteil eine Aussage über die Schmierfilmdicke [24, 26]. Die Trennung der Wälzlagerimpedanz in eine Parallelschaltung aus Kapazität C_p und Widerstand R_p (vgl. Abbildung 6.19) kann somit relevante Informationen über die physikalischen Hintergründe von Impedanzänderungen liefern.

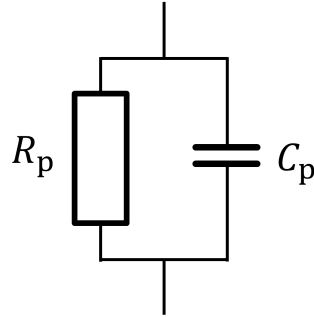


Abbildung 6.19.: Parallelschaltung von Kondensator und ohmschem Widerstand als elektrisches Modell des Wälzlagers

Im Folgenden werden die Gleichungen für die Umrechnung der komplexen Wälzlagerimpedanz Z in C_p und R_p hergeleitet. Zunächst werden R_p und C_p durch ihre Impedanzen

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C_p} \quad (6.1)$$

und

$$Z_R = R_p \quad (6.2)$$

ausgedrückt. Aus den Kirchhoffschen Regeln für Wechselstromkreise folgt, dass für die Gesamtimpedanz Z dieser parallelgeschalteten Impedanzen

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{Z_R} + \frac{1}{Z_C} = \frac{1}{R_p} + j\omega C_p \quad (6.3)$$

gilt. Der Realteil von (6.3) ist

$$\operatorname{Re}\left(\frac{1}{Z}\right) = \frac{1}{R_p}, \quad (6.4)$$

woraus unmittelbar

$$R_p = \frac{1}{\operatorname{Re}\left(\frac{1}{Z}\right)} \quad (6.5)$$

folgt. Der Imaginärteil von (6.3) ist

$$\operatorname{Im}\left(\frac{1}{Z}\right) = \omega C_p, \quad (6.6)$$

durch Umformen folgt daraus

$$C_p = \frac{\operatorname{Im}\left(\frac{1}{Z}\right)}{\omega}. \quad (6.7)$$

Mit (6.5) und (6.7) können die Kapazität und der Widerstand des Lagers unter der Annahme einer Parallelschaltung berechnet werden.

In Abbildung 6.20 sind die so berechneten Zeitverläufe von C_p und R_p für die Messung aufgetragen, die auch in Abbildung 6.15 dargestellt ist. Die mit (l) bezeichneten langsamen Ausschläge äußern sich stets als Anstieg der Kapazität C_p , insgesamt ähnelt der Verlauf von C_p sehr stark dem Verlauf von Real- und Imaginärteil der Impedanz. Im Widerstand R_p dagegen sind die langsamen Ausschläge nur wenig sichtbar. Die mit (s) bezeichneten schnellen Ausschläge äußern sich sowohl in R_p als auch in C_p . Zudem fällt auf, dass die niederfrequenten Signalstörungen in R_p nur in sehr geringem Umfang, in C_p dagegen stark auftreten.

Aus dem Stand der Forschung ist bekannt, dass metallische Kontakte mit einem Abfall des Widerstands einhergehen [24], vgl. Abschnitt 2.2.3. Das Verhalten des Widerstands bei schnellen Ausschlägen stimmt hiermit überein. Die in Kapitel 5 für die Dauerversuche und zu Beginn dieses Abschnitts geäußerte Vermutung, dass es sich bei den schnellen Ausschlägen um metallische Kontakte handelt, wird dadurch gestützt. Eine genauere Untersuchung wird in Abschnitt 6.5.3 durchgeführt. Der Anstieg der Kapazität ist nach dem Stand der Forschung mit einer Verringerung der Schmierfilmdicke verknüpft. In Abschnitt 6.5.2 wird herausgearbeitet, dass dies tatsächlich eine plausible Erklärung für das Verhalten ist.

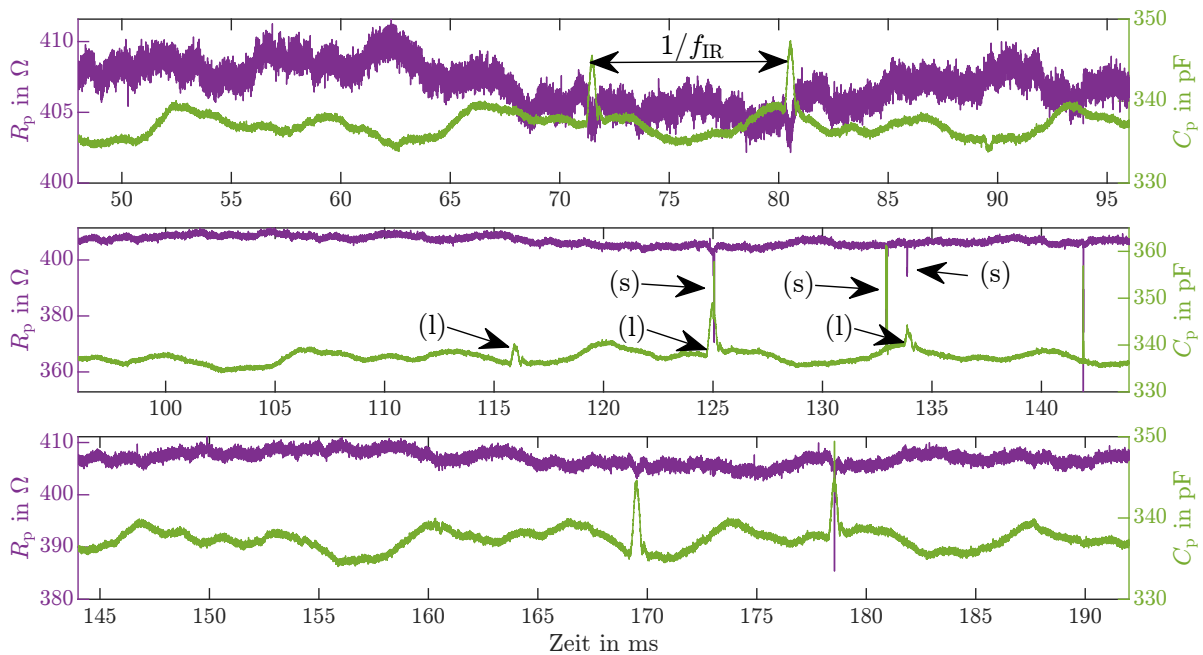


Abbildung 6.20.: Verlauf von R_p und C_p von Konfiguration K8 bei Versuchspunkt VP114 ($F_r = 3500 \text{ N}$, $T = 40^\circ \text{C}$, $n = 1250 \text{ min}^{-1}$). Jede Zeile entspricht einer Umdrehung des Innenrings.

Ein häufig in der Zustandsüberwachung verwendeter Ansatz zur Extraktion von Informationen aus einem Zeitsignal ist die Überwachung bestimmter Komponenten des Frequenzspektrums, wie der Überrollfrequenzen, vgl. Abschnitt 2.4. Die Eignung dieses

Ansatzes wird auch hier überprüft. Abbildung 6.21 zeigt einen Vergleich der Spektren der beiden in Abbildung 6.14 und 6.15 dargestellten Messungen. Dazu wurde eine DFT des Impedanzbetrags $|Z|$ durchgeführt. Beim modifizierten Lager K8 erscheint eine Reihe von Spektralkomponenten, die beim Vergleichslager K0 nicht vorhanden sind. Dies sind die Innenring-Überrollfrequenz f_{IR} und deren höhere Ordnungen, deren Abstand der Innenring-Drehfrequenz f_n entspricht. Die in Abbildung 6.21 markierten theoretischen Ordnungen von f_{IR} weichen leicht von den tatsächlich auftretenden Frequenzen ab. Das deutet auf Toleranzeinflüsse hin, die eine Abweichung der tatsächlichen von der theoretischen Frequenz bewirken können. Die Seitenbänder können dadurch erklärt werden, dass die Amplitude der Ausschläge mit der Frequenz der Drehzahl moduliert wird, entsprechend dem Durchlaufen der Lastzone einmal pro Umdrehung.

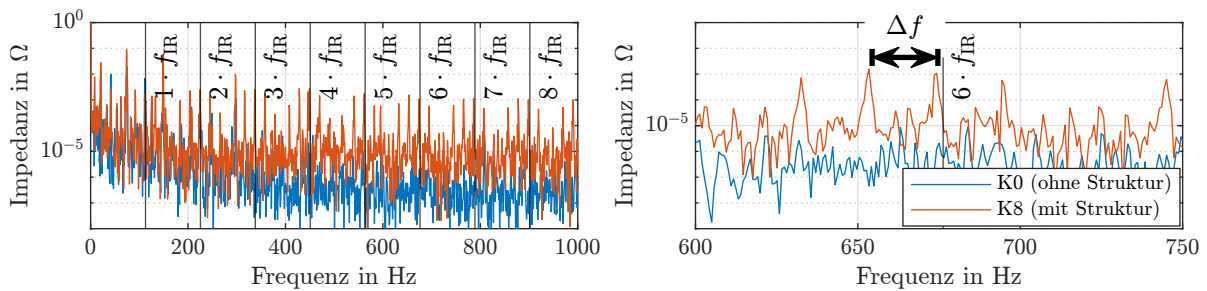


Abbildung 6.21.: Vergleich der Impedanzspektren der Konfiguration K8 mit dem nicht modifizierten Vergleichslager (K0) bei Versuchspunkt VP114 ($F_r = 3500 \text{ N}$, $T = 40 \text{ °C}$, $n = 1250 \text{ min}^{-1}$).

Zum Abschluss der qualitativen Analyse wird die in Abschnitt 5.3.1 aufgeworfene Frage untersucht, ob die in den Dauerversuchen auftretenden schnellen Ausschläge als metallische Kontakte interpretiert werden können, obwohl dort ein kontraintuitives Ansteigen des Realteils beobachtet wird. In Abbildung 6.22 ist die Messung aus Abbildung 6.17 als Real- und Imaginärteil sowie als Kapazität und Widerstand dargestellt. Bei fast allen schnellen Ausschlägen tritt im Realteil der Impedanz sowohl ein Anstieg als auch ein Absinken auf. Im Signal des Widerstands ist dagegen nur ein Absinken zu beobachten. Dadurch kann gezeigt werden, dass der Anstieg des Realteils durchaus mit einem Absinken des Widerstands verknüpft sein kann.

6.4.2. Metriken zur Beschreibung langsamer Ausschläge

In Abschnitt 6.4.1 wurde gezeigt, dass die eingebrachten Strukturen sich in Form von Ausschlägen im Zeitbereich äußern, die für alle Strukturen eine ähnliche Form mit verschiedener Dauer und Höhe aufweisen und als langsame Ausschläge bezeichnet werden. Ebenfalls wurde gezeigt, dass die Ausschläge sich im Frequenzbereich in Form von Seitenbändern äußern. Der Zeitverlauf der Ausschläge bietet Informationen über jedes einzelne Überrollungsereignis, während die Spektralanalyse nur eine integrale Information über die gesamte Messung beinhaltet. Für das Ziel der Modellierung, die Gewinnung von Informationen über die überrollte Struktur, wird die Zeitbereichsdarstellung des-

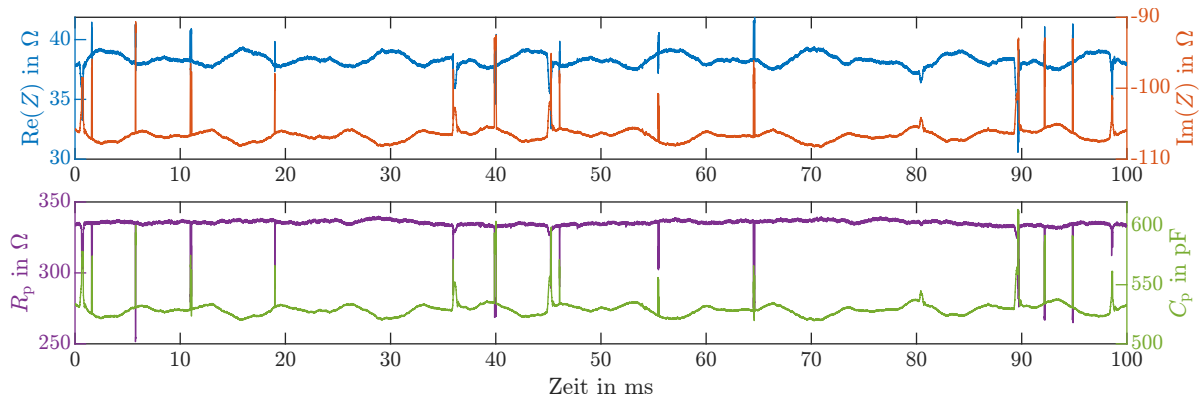


Abbildung 6.22.: Vergleich der Darstellung als Real- und Imaginärteil sowie Kapazität und Widerstand für Konfiguration K8 bei Versuchspunkt VP144 ($F_r = 3500 \text{ N}$, $T = 70 \text{ }^\circ\text{C}$, $n = 1250 \text{ min}^{-1}$).

halb als deutlich aussichtsreicher eingeschätzt. Deshalb basieren die Metriken, die in diesem Abschnitt zur Beschreibung des Signals entwickelt werden, ausschließlich auf den Zeitsignalen und charakterisieren die Dauer und die Höhe der langsamen Ausschläge. Für die Bestimmung der Metriken wird das Impedanzsignal zunächst gefiltert, um Fehler aufgrund hochfrequenter Störeinflüsse zu reduzieren. In Abbildung 6.23 ist zu sehen, dass das Signalrauschen des ungefilterten Rohsignals in der Größenordnung der Höhe des Ausschlags liegt. Eine einfache Minima- und Maxima-Suche im Bereich des Ausschlags würde zu einem großen Ablesefehler führen. Deshalb wird eine Tiefpassfilterung durchgeführt. Die Durchlassfrequenz f_p des Tiefpassfilters wurde iterativ festgelegt. Abbildung 6.23 zeigt einen Vergleich des Rohsignals mit gefilterten Signalen bei verschiedenen Durchlassfrequenzen. Je höher die Durchlassfrequenz, desto besser wird die Form des Ausschlags nachgebildet, desto größer ist aber auch der Rauscheinfluss. Bei $f_p = 100f_{IR}$ wird ein sinnvoller Kompromiss in diesem Zielkonflikt erreicht.

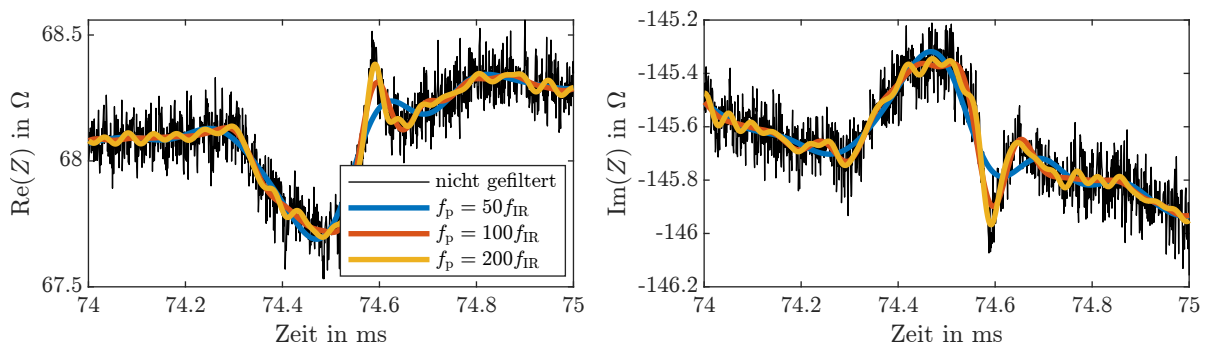


Abbildung 6.23.: Vergleich des ungefilterten Impedanzsignals mit tiefpassgefilterten Signalen bei verschiedenen Durchlassfrequenzen f_p . Konfiguration K6 in Versuchspunkt VP114 ($F_r = 3500 \text{ N}$, $T = 40 \text{ }^\circ\text{C}$, $n = 1250 \text{ min}^{-1}$).

In Abschnitt 6.4.1 wurde deutlich, dass die Form der Ausschläge innerhalb einer Mes-

sung variiert, insbesondere hängt sie von der Position in der Lastzone ab. Um diesen Einfluss zu eliminieren, wird je Umdrehung immer nur der höchste Ausschlag herangezogen, und insgesamt zehn Ausschläge ausgewertet um die verbleibende Streuung durch Mittelung statistisch zu eliminieren. Zudem werden möglichst nur Ausschläge verwendet, in denen keine schnellen Ausschläge (vgl. Abschnitt 6.4.1) auftreten, da diese schnellen Ausschläge die Bestimmung von Dauer und Höhe des Ausschlags häufig unmöglich machen. In einigen Datensätzen treten in allen Ausschlägen auch schnelle Ausschläge auf. In diesen Fällen werden Beginn und Dauer nicht mit den im Folgenden beschriebenen automatisierten Verfahren, sondern manuell bestimmt.

Dauer eines Ausschlags (Wälzweg) In Abbildung 6.16 wird deutlich, dass sich die Zeitdauer der Ausschläge bei verschiedenen Konfigurationen unterscheidet. Die erste Auswertungsmetrik soll deshalb die Dauer eines Ausschlags beschreiben. Der Beginn eines Ausschlags t_1 ist klar durch einen scharfen Anstieg der Impedanz markiert, vgl. Abbildung 6.24. Das Ende des Ausschlags kann dagegen nicht klar bestimmt werden. Der Imaginärteil erreicht zunächst ein Minimum, steigt dann nochmal zu einem Nebenmaximum an und fällt dann wieder ab. Das Ende dieser zweiten fallenden Flanke ist nicht klar definierbar und eignet sich somit nicht für eine quantitative Analyse. Für den Realteil gelten die Darstellungen analog mit umgekehrten Vorzeichen. Um ein eindeutig mathematisch definiertes Kriterium zu erhalten, wird deshalb das Minimum zwischen dem Hauptmaximum und dem Nebenmaximum des Imaginärteils als Ende des Ausschlags t_2 definiert. Mathematisch sind t_1 und t_2 definiert als die Zeiten, zu denen die Steigung des Imaginärteils der Impedanz verschwindet, d.h. die Bedingung

$$\frac{d(\operatorname{Im}(Z))}{dt} = 0 \quad (6.8)$$

erfüllt ist, wobei das tiefpassgefilterte Impedanzsignal verwendet wird. Dieses Kriterium wird in einem MATLAB-Programm evaluiert und damit die Zeitpunkte t_1 und t_2 bestimmt. Die Dauer des Ausschlags ist damit die Differenz von Beginn und Ende

$$\Delta t = t_2 - t_1. \quad (6.9)$$

In Abbildung 6.24 ist die Bestimmung von Δt an einer beispielhaften Messung dargestellt.

In Abbildung 6.16 ist zu erkennen, dass die Dauer eines Ausschlags Δt in den Konfigurationen auf Stufe $l_{p\ominus}$ (K2, K5 und K6) geringer ist als in den Konfigurationen auf Stufe $l_{p\oplus}$ (K3, K4, K7 und K8). Die Vermutung liegt nahe, dass die Dauer eines Ausschlags der Zeit entspricht, in der die Hertz'sche Fläche die Oberflächenstruktur überrollt. Um das zu überprüfen, wird Δt umgerechnet auf den Wälzweg, den der Wälzkörper in der Zeitspanne Δt auf dem Innenring zurücklegt. Abbildung 6.25 stellt die wesentlichen Zusammenhänge dieser Umrechnung dar. Innerhalb einer Zeitspanne t bewegt sich der Käfig, und mit ihm auch der Wälzkörpersatz, um einen Winkel

$$\varphi_K = 2\pi f_K t \quad (6.10)$$

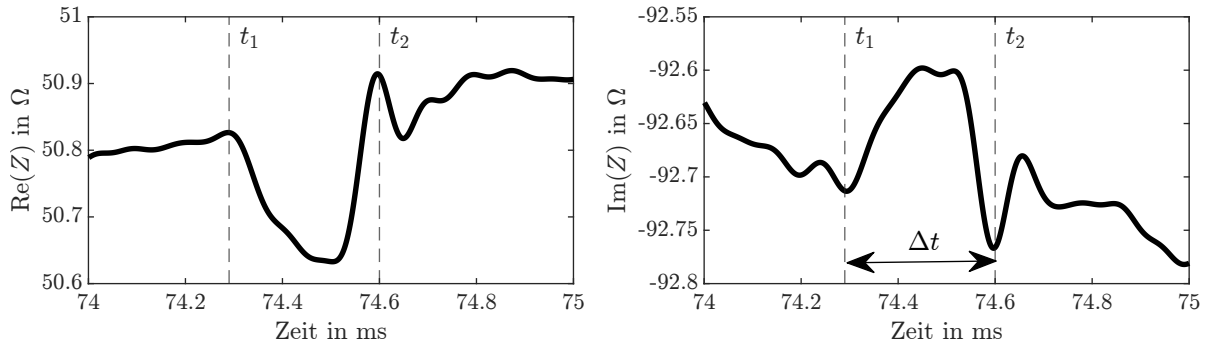


Abbildung 6.24.: Bestimmung von Δt in einer beispielhaften Messung

und der Innenring um

$$\varphi_{\text{IR}} = 2\pi f_n t. \quad (6.11)$$

Da die Drehzahlen des Wälzkörpersatzes f_K nach (2.11) und des Innenrings f_n unterschiedlich sind, ergibt sich eine Winkeldifferenz

$$\Delta\varphi = \varphi_{\text{IR}} - \varphi_K. \quad (6.12)$$

Durch Multiplikation mit dem Laufbahndurchmesser des Innenrings ergibt sich der Weg, den der Wälzkörper relativ zum Innenring in der Zeitspanne t zurücklegt, zu

$$\Delta l = \Delta\varphi \cdot d_{\text{IR}} = (\varphi_{\text{IR}} - \varphi_K) \cdot d_{\text{IR}}. \quad (6.13)$$

Einsetzen von (6.10) und (6.11) in (6.13) liefert eine Beziehung für den während der Dauer eines Ausschlags Δt zurückgelegten Wälzweg

$$\Delta l = \pi (f_n - f_K) d_{\text{IR}} \Delta t. \quad (6.14)$$

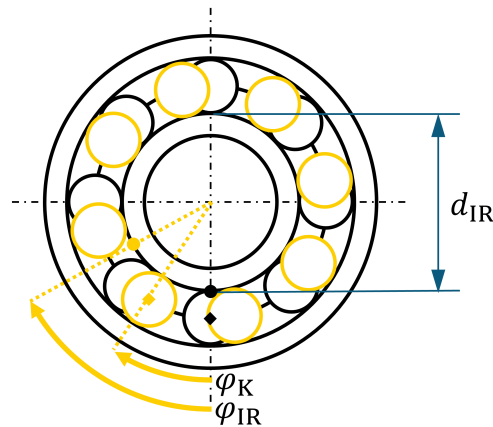


Abbildung 6.25.: Bestimmungsgrößen für die Berechnung des Wälzweges Δl .

Der Wälzweg auf dem Außenring kann analog bestimmt werden. Für den Fall eines stehenden Außenrings, der in dieser Arbeit betrachtet wird, wird der Wälzweg mit dem

Laufbahndurchmesser des Außenrings d_{AR} durch

$$\Delta l = \pi f_K d_{AR} \Delta t. \quad (6.15)$$

berechnet. Die Werte für d_{IR} und d_{AR} der in dieser Arbeit verwendeten Lagertypen können Tabelle C.1 im Anhang entnommen werden.

In Abbildung 6.26 ist die Dauer und der Wälzweg der Ausschläge für jeweils zwei Drehzahlstufen von zwei Strukturvarianten dargestellt, die sich nur in der Länge der eingebrachten Struktur unterscheiden. Die Dauer Δt aller vier Messungen unterscheidet sich deutlich. Der Wälzweg unterscheidet sich dagegen nur zwischen den Konfigurationen deutlich, zwischen den Drehzahlen gibt es nur geringe Unterschiede. Die Differenz der in Abbildung 6.26 dargestellten Mittelwerte der Wälzwege für K8 und K6 in Versuchspunkt 114 ($\Delta l = 800,3 \mu\text{m}$ bzw. $\Delta l = 460,0 \mu\text{m}$) ergibt sich zu $340,3 \mu\text{m}$. Die tatsächliche Differenz der Strukturängen in den beiden Konfigurationen beträgt $\Delta l_p = 355 \mu\text{m}$, vgl. Tabelle 6.5. Die geringe Abweichung deutet darauf hin, dass die Dauer eines Ereignisses von der Strukturänge bestimmt wird. Eine detailliertere Untersuchung des Zusammenhangs erfolgt in Abschnitt 6.5.1, an dieser Stelle kann aber bereits festgehalten werden, dass die vorgeschlagene Umrechnung der gemessenen Dauer in einen zurückgelegten Wälzweg zu plausiblen Ergebnissen führt. Deshalb wird in den folgenden Auswertungen die Dauer der Ausschläge als Wälzweg dargestellt.

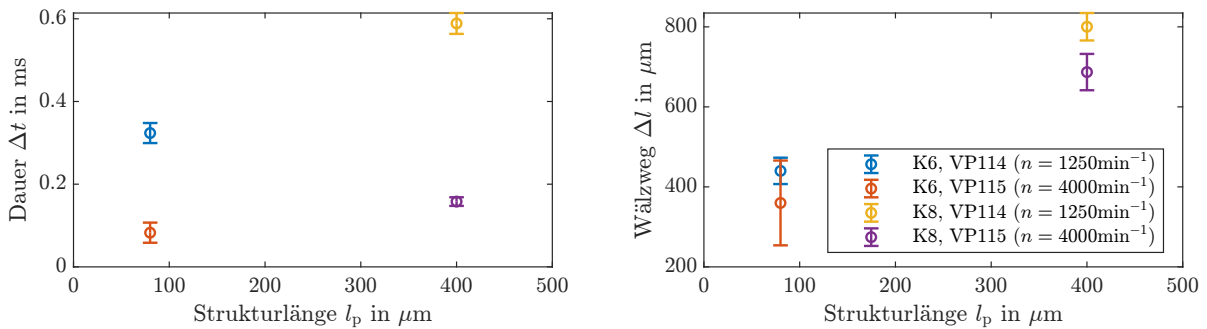


Abbildung 6.26.: Mittelwert und Standardabweichung, jeweils ermittelt über zehn Ausschläge, der Dauer (links) und des Wälzwegs (rechts) in den Konfigurationen K6 und K8 bei den Versuchspunkten VP114 und VP115 ($F_r = 3500 \text{ N}$, $T = 40 \text{ }^\circ\text{C}$, $n = 1250 \text{ min}^{-1}$ bzw. $n = 4000 \text{ min}^{-1}$)

Ausschlagshöhe Abbildung 6.16 zeigt, dass die Höhe der Ausschläge sich zwischen den Strukturvarianten unterscheidet. Auch die Höhe soll deshalb als Metrik untersucht werden. Zunächst muss ein geeignetes Referenzniveau der Impedanz bestimmt werden. Aufgrund der niederfrequenten Schwankungen der Impedanz ist der Mittelwert der gesamten Messung hierfür nicht geeignet. Stattdessen wird der Mittelwert der Impedanz am Beginn und am Ende des Ausschlags

$$Z_{\text{ref}} = \frac{Z(t_2) + Z(t_1)}{2} \quad (6.16)$$

als Referenz verwendet. Die Ausschlagshöhe ist dann die Differenz zwischen dem Maximum der Impedanz im Bereich des Ausschlags $Z(t_m)$ und dem Referenzniveau

$$\Delta Z = Z(t_m) - Z_{\text{ref}}, \quad (6.17)$$

wobei der Zeitpunkt, zu dem das Maximum des Imaginärteils Impedanz auftritt, als t_m bezeichnet wird. Als Metriken werden der Real- und Imaginärteil

$$\Delta \text{Re}(Z) = \text{Re}(\Delta Z) \quad (6.18)$$

und

$$\Delta \text{Im}(Z) = \text{Im}(\Delta Z) \quad (6.19)$$

verwendet. Abbildung 6.27 stellt die Metriken anhand einer beispielhaften Messung dar.

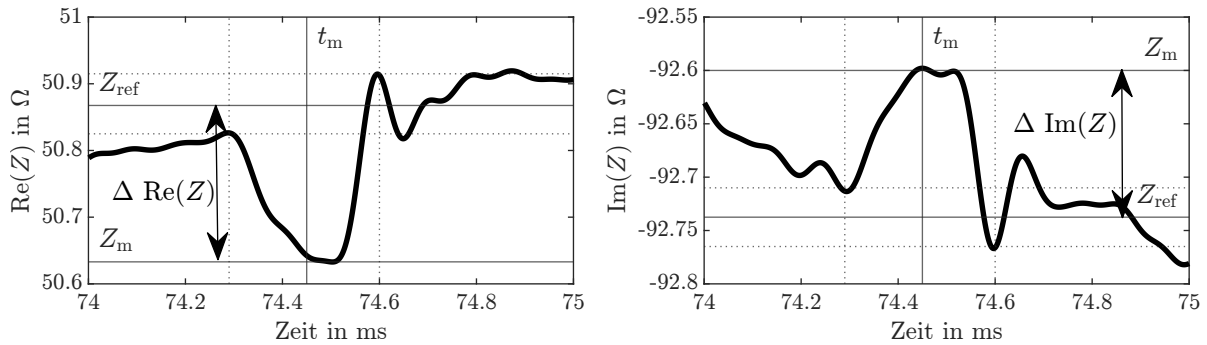


Abbildung 6.27.: Bestimmung von $\Delta \text{Re}(Z)$ und $\Delta \text{Im}(Z)$ in einer beispielhaften Messung

Widerstand und Kapazität In Abschnitt 6.4.1 wurde herausgearbeitet, dass die Umrechnung der Impedanz in Widerstand und Kapazität das Potential bietet, Erkenntnisse über die physikalischen Hintergründe der Ausschläge zu gewinnen. Dabei kann die Kapazität bei ansonsten unveränderten Bedingungen als Maß für die Schmierfilmdicke angesehen werden, vgl. Abschnitt 2.2.2. Deshalb wird auch die Höhe der langsamen Ausschläge des Widerstands und der Kapazität bestimmt. Sie werden analog zur Berechnung der Ausschlagshöhe der Impedanz berechnet, vgl. (6.17). Somit sind die Metriken definiert als

$$\Delta C_p = C_p(t_m) - \frac{C_p(t_2) + C_p(t_1)}{2} \quad (6.20)$$

und

$$\Delta R_p = R_p(t_m) - \frac{R_p(t_2) + R_p(t_1)}{2}. \quad (6.21)$$

6.4.3. Metrik zur Beschreibung schneller Ausschläge

In Abschnitt 6.4.1 wurde festgestellt, dass im Zusammenhang mit der Überrollung von Strukturen auch schnelle Ausschläge auftreten. In der Literatur sind Verfahren zur Auswertung des Widerstandssignals hinsichtlich metallischer Kontakte bekannt, insbesondere der von HEEMSKERK ET AL. eingeführte PCT-Wert ist hier zu nennen [24]. Diese

Verfahren sind prinzipiell auch auf die hier betrachteten Messungen anwendbar. Zur Berechnung des PCT-Wertes muss allerdings ein Grenzwert des Widerstands festgelegt und validiert werden, bei dem von metallischem Kontakt ausgegangen wird. Dieser Implementierungsaufwand ist für die diese Arbeit nicht nötig. Stattdessen ist es zunächst ausreichend, eine tendentielle Aussage darüber zu erhalten, unter welchen Bedingungen schnelle Ausschläge gehäuft auftreten. Deshalb wird lediglich die Häufigkeit schneller Ausschläge betrachtet. Hierfür werden die ersten $n_{a,ges} = 10$ Ausschläge jeder Messung manuell danach klassifiziert, ob in ihnen ein schneller Ausschlag auftritt, und diese Ausschläge als $n_{a,schnell}$ gezählt. Im Unterschied zu allen anderen Metriken, die für jeden einzelnen Ausschlag ausgewertet werden, ist diese Metrik je Messung definiert als die Häufigkeit des Auftretens schneller Ausschläge in allen Ausschlägen der Messung:

$$p_s = \frac{n_{a,schnell}}{n_{a,ges}} \quad (6.22)$$

6.5. Auswertung der Versuche mit variierender Strukturgeometrie

Das übergeordnete Ziel der Untersuchungen in dieser Arbeit ist die Untersuchung der Wälzlagerimpedanz als Werkzeug zur Diagnose von Oberflächenabweichungen in Wälzlagern. Als Beitrag dazu wird in diesem Abschnitt eine Modellvorstellung für den Zusammenhang zwischen der Dauer und Höhe der Ausschläge, quantifiziert durch die in Abschnitt 6.4 definierten Metriken, und der Geometrie sowie weiteren Einflussfaktoren entsprechend Abbildung entwickelt, vgl. Abbildung 6.28. Wie bereits zu Beginn des Kapitels ausgeführt wurde, umfasst das Modell empirisch-quantitative Bestandteile, die auf einer Regressionsanalyse basieren, sowie physikalische Bestandteile in Form von Hypothesen über die Ursachen für die empirisch bestimmten Zusammenhänge und einzelnen daraus abgeleiteten Rechenmodellen. In Abschnitt 6.5.1 bis 6.5.3 wird die Modellierung durchgeführt und in Abschnitt 6.5.4 verifiziert.

Kern der Modellierung sind Regressionsmodelle, die die Metriken in Abhängigkeit der Faktoren beschreiben. Die Metriken werden im Folgenden mit der Kurzschreibweise m_i bezeichnet, d.h. m_i steht für eine der in Abschnitt 6.4 definierten Metriken

$$\{\Delta l, \Delta \text{Im}(Z), \Delta \text{Re}(Z), \Delta C_p, \Delta R_p, p_s\}. \quad (6.23)$$

In gleicher Weise werden mit x_j die Faktoren bezeichnet, d.h. x_j steht für einen der Faktoren

$$\{t_p, l_p, w_p, F_r, T, n, b_k\}. \quad (6.24)$$

Bei der Regressionsanalyse wird der Zusammenhang zwischen einer abhängigen Variable, in diesem Fall den Metriken m_i , und mehreren unabhängigen Variablen, den Faktoren x_j , durch den Zusammenhang

$$m_i = \beta_{i0} + \sum_{j=1}^7 \beta_j x_j + \sum_{j < k} \beta_{jk} x_j x_k \quad (6.25)$$

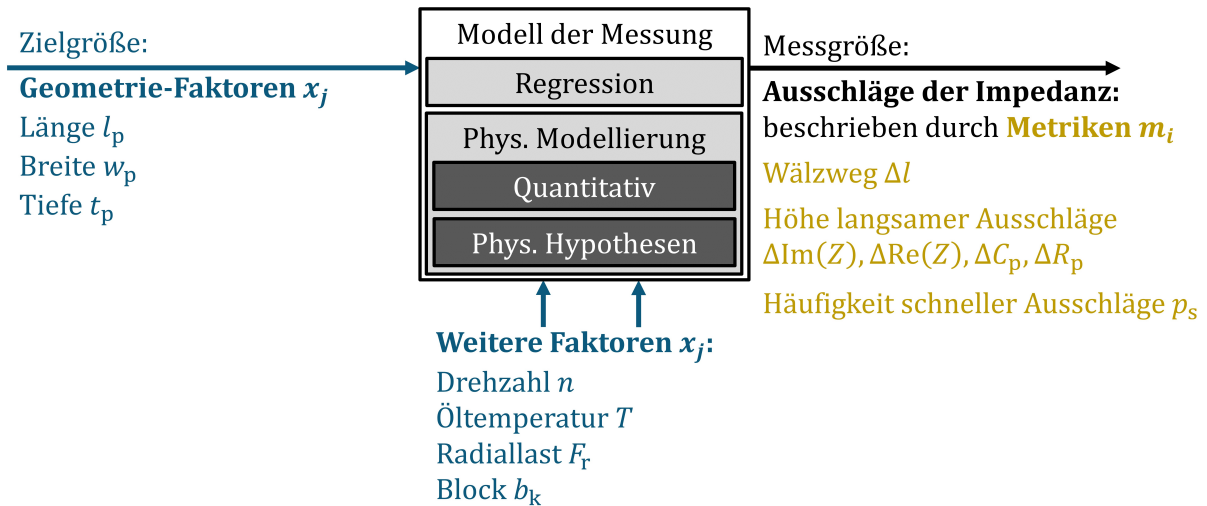


Abbildung 6.28.: Eingangs- und Ausgangsgrößen für Modellierung in Abschnitt 6.5

modelliert. Neben den linearen Wirkungen der Faktoren werden in diesem Modell auch die sogenannten *Zwei-Faktor-Wechselwirkungen* $x_j x_k$ berücksichtigt. Die Regressionsanalyse wird mit dem Softwarepaket MATLAB durchgeführt, wobei die Methode der kleinsten Fehlerquadrate zur Bestimmung der Modellparameter β_j bzw. β_{jk} verwendet wird.

Für ein vertieftes Verständnis der Zusammenhänge werden einige weitere statistische Instrumente verwendet. Im Folgenden werden diese Instrumente, und die mit ihnen verfolgten Untersuchungsziele, zusammengefasst erläutert.

Effekte und Wechselwirkungen Eine ideale Metrik zum Zweck der Zustandsüberwachung würde nur von den Zielgrößen, also den drei die Geometrie beschreibenden Faktoren t_p , l_p und w_p , abhängen und nicht von anderen Faktoren beeinflusst werden. Zudem sollte der Zusammenhang möglichst wenig unsicherheitsbehaftet sein. Einfach und anschaulich ausgedrückt werden diese Abhängigkeiten durch die in der statistischen Versuchsplanung sogenannten *Effekte* und die Unsicherheit der Effekte. Um den *Effekt* X_{ij} , auch als *Haupteffekt* bezeichnet, eines Faktors x_j auf eine Metrik m_i zu ermitteln, wird die Differenz zwischen dem Mittelwert aller Versuche, bei denen der Faktor auf der oberen Stufe $x_{j\oplus}$ stand, und dem Mittelwert aller Versuche, bei denen der Faktor auf der unteren Stufe $x_{j\ominus}$ stand, gebildet. Die Berechnungsvorschrift lautet

$$X_{ij} = \frac{1}{n_{\oplus}} \sum_{j=1}^{n_{\oplus}} m_{ij,\oplus} - \frac{1}{n_{\ominus}} \sum_{j=1}^{n_{\ominus}} m_{ij,\ominus}, \quad (6.26)$$

dabei ist n_{\oplus} bzw. n_{\ominus} die Anzahl der Versuche auf der oberen bzw. unteren Stufe des Faktors [75]. Ein Effekt kann also interpretiert werden als die *mittlere* Wirkung eines Faktors, wobei die Wirkung aller anderen Faktoren herausgemittelt wurde. Die Effekte und die zugeordneten 95 %-Vertrauensintervalle werden in Effektplots dargestellt, vgl. z.B. Abbildung 6.29. Ein Effekt mit positivem Vorzeichen bedeutet, dass sich der Wert

der Metrik erhöht, wenn der Wert des Faktors sich erhöht. Neben den geschätzten Effekten wird auch das 95 %-Vertrauensintervall der Effekte dargestellt, um zu beurteilen, ob Effekte sich statistisch signifikant unterscheiden.

Des Weiteren würde eine ideale Metrik keine Abhängigkeit von weiteren Einflussgrößen aufweisen. Deshalb werden auch die Effekte der Betriebsbedingungen sowie der Blockzugehörigkeit ermittelt, die im Folgenden als Störgrößen bezeichnet werden. Falls diese Größen einen Einfluss haben, so sollte er wenig unsicherheitsbehaftet sein. Dies gilt besonders für die Temperatur T und die Drehzahl n , denn diese können einfach gemessen und deshalb prinzipiell auch kompensiert, d.h. in einem Modell der Auswertung berücksichtigt werden. Je geringer die Unsicherheit eines Effekts im Modell der Messung, umso geringer kann die Unsicherheit des Modells der Auswertung sein, und umso besser kann die Wirkung der Störgrößen damit kompensiert werden. Zu diesem Zweck kommen die bereits vorgestellten Effektplots zum Einsatz.

ANOVA Eine andere, sehr kompakte Darstellung des Beitrags aller Faktoren und Wechselwirkungen zum Modell kann mithilfe der F-Werte erfolgen, die durch die ANOVA-Methode (engl. „Analysis of Variances“) erzeugt werden und deren Bedeutung im Folgenden erklärt wird. Für die mathematische Herleitung der Zusammenhänge wird auf [76] verwiesen, für die Interpretation der Werte ist die folgende anschauliche Erläuterung ausreichend. Zunächst wird für eine Messgröße y die Quadratsumme SS_G der Abweichungen der Messwerte y_i vom Mittelwert aller Messungen \bar{y} berechnet, die durch

$$SS_G = \sum_{i=1}^n y_i - \bar{y} \quad (6.27)$$

definiert ist. SS_G wird auch als *Variabilität* bezeichnet. Die ANOVA-Methode zerlegt nun diese Variabilität in Anteile SS_{F_j} , die durch die Bestandteile des Modells verursacht werden, und einen Anteil SS_E , der durch den statistischen Fehler verursacht wird. Der Rechenweg für diese Zerlegung wird hier nicht dargestellt. Aus den Quadratsumme kann jeweils eine Varianz $S_{F_j}^2$ bzw. S_E^2 berechnet werden. Die F-Werte werden dann für jeden Modellbestandteil, also jeden Faktor und jede Wechselwirkung, berechnet als

$$F_{F_j} = \frac{S_{F_j}^2}{S_E^2}. \quad (6.28)$$

Aus dieser Gleichung geht hervor, dass die F-Werte interpretiert werden können als das Verhältnis der Datenvariabilität, die durch den Faktor j erklärt werden kann, zu der Datenvariabilität, die allein aufgrund der statistischen Streuung zustandekommt. Der Vergleich der F-Werte verschiedener Faktoren liefert eine Information darüber, welcher Anteil der gesamten Variabilität der Daten durch einen bestimmten Faktor verursacht wird. Deshalb werden die F-Werte der Faktoren und Wechselwirkungen verglichen, um ihren Beitrag zum gesamten Modell in einer einfachen Darstellung zu quantifizieren, z.B. in Abbildung 6.30. In der Darstellung werden die Wechselwirkung mit der Kurzschreibweise $x_j:x_k$ bezeichnet. Neben den F-Werten der Faktoren wird auch die kumulierte Summe der Faktoren dargestellt, um zu beurteilen, welcher Anteil des Modells durch die zehn Modellbestandteile mit den stärksten Effekten erklärt werden kann.

Bestimmtheitsmaß Die Werte der Metrik sollten möglichst vollständig durch die Effekte der untersuchten Faktoren erklärt werden, d.h. der Restfehler des Regressionsmodells (6.25) sollte gering sein. Hierfür wird das Bestimmtheitsmaß

$$R^2 = 1 - \frac{SS_F}{SS_G} \quad (6.29)$$

verwendet, das ein Maß dafür ist, welcher Anteil der Gesamtvariabilität der Messwerte SS_G durch das Modell erklärt werden kann.

Normalplot der Residuen Um Aufschluss über die Ursachen der verbleibenden Abweichungen zu erhalten, können die Residuen verwendet werden. Für jede Beobachtung, d.h. in diesem Fall für jeden ausgewerteten Ausschlag, ist das Residuum die Differenz zwischen der Vorhersage des Regressionsmodells und dem tatsächlich bestimmten Wert der Metriken für diesen Ausschlag. Die im Normalplot eingezeichnete Gerade entspricht der erwarteten Verteilung der Residuen im Falle einer Normalverteilung. Wenn die Messwerte weitgehend auf dieser Gerade liegen, so sind die Residuen normalverteilt, d.h. die Streuung besitzt keine systematische Ursache. Weicht der Verlauf der Residuen deutlich von der Gerade ab, so liegt keine Normalverteilung vor, was zu der Frage führt, ob eine nicht erkannte systematische Ursache für die Abweichungen vorliegt. Insbesondere können anhand dieser Darstellung auch einzelne Ausreißer, die von der Verteilung der übrigen Residuen ungewöhnlich abweichen, erkannt werden.

Für die weitere Analyse werden die Metriken in drei Gruppen unterteilt. Der Wälzweg Δl soll die Dauer der langsamen Ausschläge beschreiben. Die Höhe der langsamen Ausschläge wird anhand des Real- und Imaginärteils der Impedanz $\Delta \text{Im}(Z)$ und $\Delta \text{Re}(Z)$ sowie der Kapazität und des Widerstands ΔR_p und ΔC_p quantifiziert. Die dritte Gruppe ist die Häufigkeit schneller Ausschläge p_s . Für die drei Gruppen werden die empirischen und physikalischen Modellierungsschritte in den folgenden Abschnitten durchgeführt.

6.5.1. Wälzweg langsamer Ausschläge

Abbildung 6.29 zeigt die Effekte der sieben Faktoren auf den Wälzweg Δl . Zunächst ist festzuhalten, dass die Vertrauensintervalle der Effekte im Vergleich zur Effektstärke klein sind, d.h. die im Versuch beobachteten Effekte können mit geringer Unsicherheit geschätzt werden. Der Effekt der Strukturlänge l_p dominiert. Die Blockzugehörigkeit b_k , die geometrisch im Wesentlichen einer Glättung der Struktur entspricht, hat keinen signifikanten Effekt. Die anderen fünf Faktoren besitzen signifikante Effekte, wobei die Radiallast F_r den stärksten Effekt besitzt und die Strukturtiefe t_p und -länge w_p nur geringe Effekte.

Um die Wirkungsweise der Faktoren genauer zu verstehen, werden nun nach die nach (6.28) berechneten F-Werte des Regressionsmodells herangezogen. Abbildung 6.30 zeigt die F-Werte der zehn wichtigsten Faktoren bzw. Wechselwirkungen. Die Strukturlänge l_p und die Radiallast F_r wirken nur durch ihre direkten Effekte ohne Wechselwirkung. Die

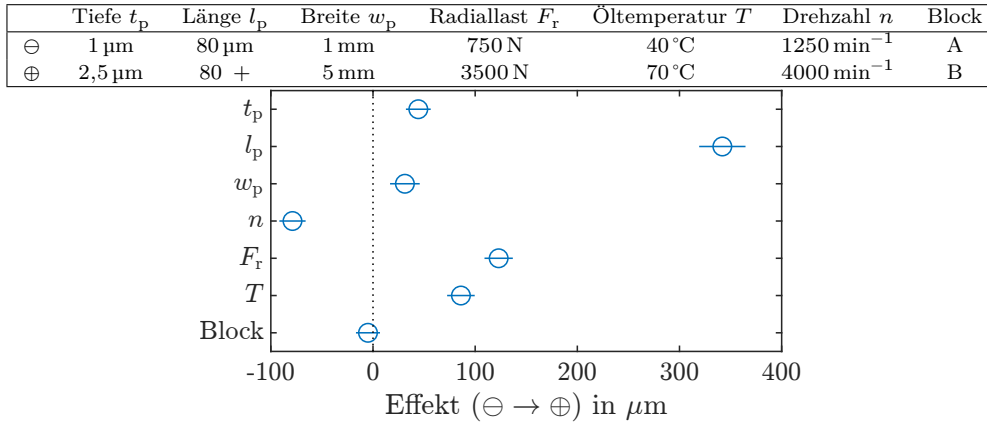


Abbildung 6.29.: Effekte der Faktoren auf Δl

Drehzahl n und die Temperatur T weisen dagegen Wechselwirkungen miteinander und mit der Strukturtiefe t_p auf. Bei der Strukturtiefe sind die Wechselwirkungen mit der Drehzahl und der Temperatur sogar stärker als der Haupteffekt. Wenn die Einflüsse dieser drei Faktoren detaillierter untersucht werden sollen, müssen diese Wechselwirkungen betrachtet werden. Die übrigen Faktoren und Wechselwirkungen haben nur vernachlässigbare Beiträge.

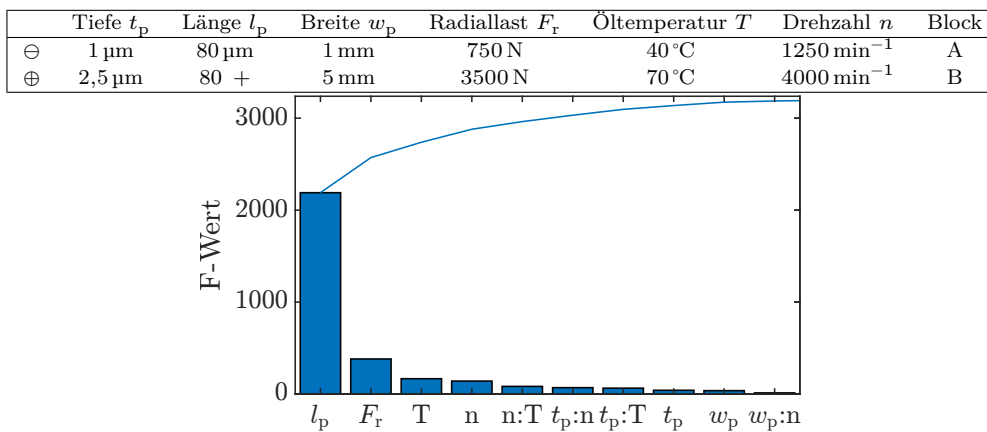


Abbildung 6.30.: Höchste 10 F-Werte des Regressionsmodells für Δl

Das Bestimmtheitsmaß des Regressionsmodells beträgt $R^2 = 0,788$, somit ist eine beträchtliche verbleibende Streuung zu verzeichnen. In den Residuen (Abbildung 6.31) sind nur zwei deutliche Ausreißer sichtbar, aber im Bereich großer und kleiner Residuen eine deutliche Abweichung von der Normalverteilung. Das deutet darauf hin, dass zumindest ein Teil dieser Streuung nicht aufgrund zufälliger Fehler, sondern durch systematische Einflüsse, z.B. Fehler in der Auswertung oder unbekannte Störgrößen, entsteht. Eine mögliche Ursache ist die veränderliche Wälzkörperlast. Die Analyse belegt eindeutig, dass die Lagerbelastung einen Einfluss auf Δl besitzt. Die Belastung, die während der Überrollung im einzelnen Kontakt herrscht, hängt von der Position des Wälzkörpers in

der Lastzone ab, vgl. Abschnitt 2.1. Zwar wird der Einfluss reduziert, indem jeweils nur der höchste Ausschlag jeder Umdrehung ausgewertet wird, dennoch variiert die Position in der Lastzone und damit auch die Wälzkörperlast.

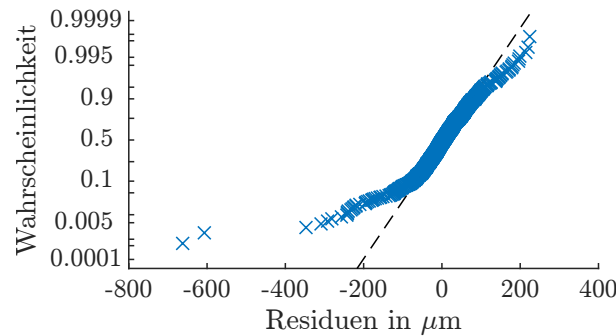


Abbildung 6.31.: Normalplot der Residuen des Regressionsmodells für Δl

Als Zusammenfassung der statistischen Auswertungen kann festgehalten werden, dass der Wälzweg Δl durch die Strukturlänge und Last beeinflusst wird. Die übrigen Störgrößen besitzen nur einen geringen Einfluss, insbesondere besitzt die Blockzugehörigkeit, die eine Veränderung der Mikrogeometrie repräsentiert, nicht messbar ist und damit auch nicht in einem Modell kompensiert werden kann, keinen Effekt. Jedoch ist ein durch das Modell nicht erklärbarer Restfehler vorhanden.

Physikalische Interpretation Dass die Strukturlänge l_p einen Effekt auf Δl besitzt, ist einleuchtend. Je länger die überrollte Struktur ist, desto länger auch die Dauer des Überrollungsereignisses. Auch für den Effekt von F_r gibt es eine physikalische Erklärung. Eine Erhöhung der Last führt zu einer Vergrößerung der Hertz'schen Fläche. Anhand von Abbildung 6.32 wird eine physikalische Erklärungshypothese für diese Effekte erläutert. Die Beeinflussung des EHD-Kontakts durch die Oberflächenstruktur, und damit auch die Beeinflussung der Impedanz durch diese Struktur, beginnt wenn der in Rollrichtung vordere Rand der Hertz'schen Fläche, der um die Länge der kleinen Halbachse b vor dem Wälzkörpermittelpunkt liegt, zum Zeitpunkt t_1 den Rand der Struktur erreicht. In gleicher Weise endet die Beeinflussung und damit auch das Überrollungsereignis, wenn zum Zeitpunkt t_2 der hintere Rand der Hertz'schen Fläche die Struktur wieder verlässt. In dieser Modellvorstellung bewegt sich der Wälzkörper relativ zum Innenring zwischen den Zeitpunkten t_1 und t_2 um eine Strecke

$$\Delta l = 2b + l_p. \quad (6.30)$$

Nach dieser Modellvorstellung sollte der Effekt der Strukturlänge auf den anhand der Impedanz bestimmten Wälzweg genau der Differenz der beiden Faktorstufen der Strukturlänge Δl_p entsprechen, und der Effekt der Radiallast sollte der Differenz zwischen der Abmessung der Hertz'schen Fläche $2b$ auf der Faktorstufe $F_{r\oplus}$ und derjenigen auf der Faktorstufe $F_{r\ominus}$ entsprechen. Die Differenz der gemessenen Strukturlängen beträgt $\Delta l_p = 355 \mu\text{m}$, vgl. Abschnitt 6.4.2, und die Differenz der Hertz'schen Flächen $\Delta(2b) =$

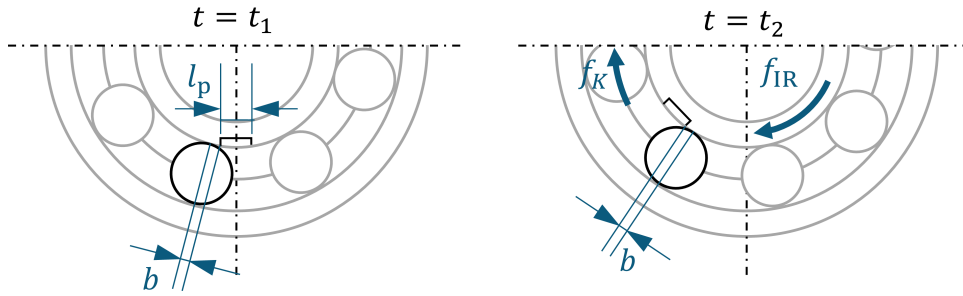


Abbildung 6.32.: Relativbewegung von Innenring und Wälzkörpersatz während eines Überrollungsereignisses

114 μm , vgl. Tabelle 6.2. In Abbildung 6.33 werden diese Werte mit den in den Versuchen beobachteten Effekten verglichen. Die theoretischen Werte liegen innerhalb des Vertrauensintervalls der Effekte, d.h. es gibt keinen statistisch signifikanten Unterschied zwischen den theoretischen und den experimentellen Werten.

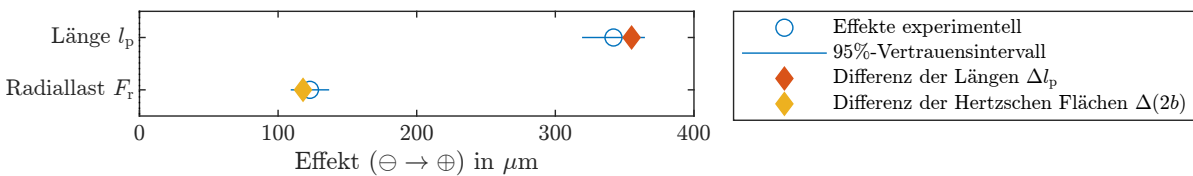


Abbildung 6.33.: Vergleich der rechnerischen Effekte der Strukturlänge l_p und der Radiallast F_r mit dem physikalischen Modell für den Wälzweg.

Die bisherige Analyse beruht auf den Effekten, d.h. der *Änderung* der Metrik aufgrund einer Änderung von Faktoren. Zur Verifikation wird nun noch untersucht, ob auch der *absolute Wert* der Metrik durch das physikalische Modell nach (6.30) erklärt werden kann. Dazu wird die Vorhersage des Regressionsmodells bei den vier möglichen Faktorstufenkombinationen der Radiallast und der Strukturlänge bestimmt, wobei die Einflüsse aller anderen Faktoren gemittelt werden. Diese Werte werden in Abbildung 6.34 mit den Ergebnissen des physikalischen Modells nach (6.30) verglichen. Die Werte des Regressionsmodells liegen durchweg leicht unterhalb der Werte des physikalischen Modells, insgesamt stimmen die Werte aber gut überein. Die Ursache der Abweichung kann nicht weiter untersucht werden. Ein möglicher Grund liegt im Auswertungsverfahren. Die Bestimmung des Wälzweges in den Impedanzsignalen ist zu einem gewissen Grade willkürlich, insbesondere die Bestimmung des Endes des Ereignisses t_2 . Wie in Abschnitt 6.4.2 dargestellt wurde, ist auch nach dem definierten Zeitpunkt t_2 noch eine Beeinflussung des Impedanzsignals durch die Struktur sichtbar. Somit unterschätzt das gewählte Verfahren die tatsächliche Dauer des Ereignisses, was zu der beobachteten Unterschätzung der tatsächlichen Strukturgröße durch das Modell passt.

Fazit Der aus dem Impedanzsignal bestimmte Wälzweg während eines Ausschlags Δl zeigt eine deutliche Abhängigkeit von der Länge der eingebrachten Oberflächenverän-

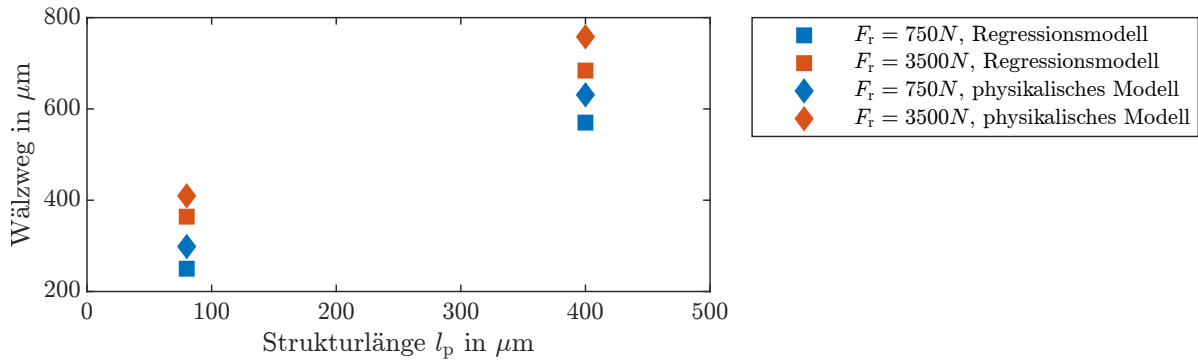


Abbildung 6.34.: Vergleich der Modellvorhersagen des Regressionsmodells und des physikalischen Modells nach (6.30) für den Wälzweg

derungen. Der Einfluss der Strukturbreite und der Strukturtiefe ist gering, der Einfluss der Mikrogeometrie praktisch nicht vorhanden. Die Betriebsbedingungen besitzen einen deutlichen Einfluss, wobei der Effekt der Radiallast physikalisch erklärbar ist, für die Einflüsse von Drehzahl und Temperatur gilt das nicht. Die Streuung der Messwerte ist groß, ein möglicher Erklärungsansatz ist die variierende Position der Struktur in der Lastzone. Ein vorgestelltes physikalisches Modell ist ein guter Ansatzpunkt um, bei bekannter Last, eine direkte Aussage über die Länge der überrollten Struktur abzuleiten. Das Regressionsmodell weist einen signifikanten Restfehler auf, für dessen Ursachen Hypothesen aufgestellt wurden. Für systematische Abweichungen zwischen Regressionsmodell und physikalischem Modell wurde ein Erklärungsansatz vorgestellt, der auf Verbesserungspotenziale bei der Auswertungsmethode hindeutet.

6.5.2. Höhe langsamer Ausschläge

In diesem Abschnitt wird untersucht, wie die Faktoren des Versuchsplans die Höhe langsamer Ausschläge beeinflussen. Sie wird, wie in Abschnitt 6.4.2 dargestellt, beschrieben als Höhe eines Ausschlags in den Signalen des Realteils $\Delta\text{Im}(Z)$ und des Imaginärteils $\Delta\text{Re}(Z)$ der Impedanz, der Kapazität ΔC_p und des Widerstands ΔR_p . In Tabelle 6.6 ist das Bestimmtheitsmaß R^2 für diese vier Metriken dargestellt. Die Werte für die Impedanz und für die Kapazität liegen in einem ähnlichen Bereich, wobei die Kapazität den höchsten Wert aufweist. Das Bestimmtheitsmaß für den Widerstand fällt demgegenüber deutlich ab, hier erklärt das Modell nur 37,7% der Variabilität der Daten.

Metrik	R^2
$\Delta\text{Im}(Z)$	0,845
$\Delta\text{Re}(Z)$	0,882
ΔC_p	0,943
ΔR_p	0,377

Tabelle 6.6.: Bestimmtheitsmaß R^2 für die Metriken der Höhe langsamer Ausschläge

Ein ähnliches Bild ergibt sich in den Effektplots (Abbildung 6.35). Das Verhältnis der Effektstärken zu den Vertrauensintervallen ist für den Widerstand ΔR_p deutlich geringer als bei den anderen Metriken, was einer größeren Unsicherheit der Effekte entspricht. Die Effekte der Faktoren auf Real- und Imaginärteil der Impedanz $\Delta \text{Im}(Z)$ und $\Delta \text{Re}(Z)$ sind sehr ähnlich. Die Ähnlichkeit ist zu erwarten, da bereits bei der qualitativen Analyse in Abschnitt 6.4.1 deutlich wurde, dass die Verläufe des Real- und Imaginärteils $\text{Re}(Z)$ und $\text{Im}(Z)$ beinahe spiegelsymmetrisch sind. Auch die Effekte bzgl. der Kapazität ΔC_p sind ähnlich zu den beiden vorgenannten. Dass die Effekte auf die Impedanz und die Kapazität einerseits und auf den Widerstand andererseits so unterschiedlich sind, ist im Lichte der qualitativen Analyse zu erwarten, denn in Abschnitt 6.4.1 wurde bereits festgestellt, dass der Zeitverlauf der Kapazität im Wesentlichen dem Verlauf des Real- und Imaginärteils der Impedanz folgt, während sich die langsamen Ausschläge im Zeitverlauf des Widerstands R_p nur wenig niederschlagen. Abschließend wird der Effekt der Blockzugehörigkeit betrachtet. Da die Blockzugehörigkeit insbesondere die Glättung der Struktur infolge der Überrollungen während des Versuchs berücksichtigt, ist eine Metrik zu bevorzugen, die unempfindlich bezüglich dieser Störgröße ist. Hinsichtlich dieses Kriteriums ist die Kapazität ΔC_p im Vorteil gegenüber der Impedanz $\Delta \text{Im}(Z)$ und $\Delta \text{Re}(Z)$.

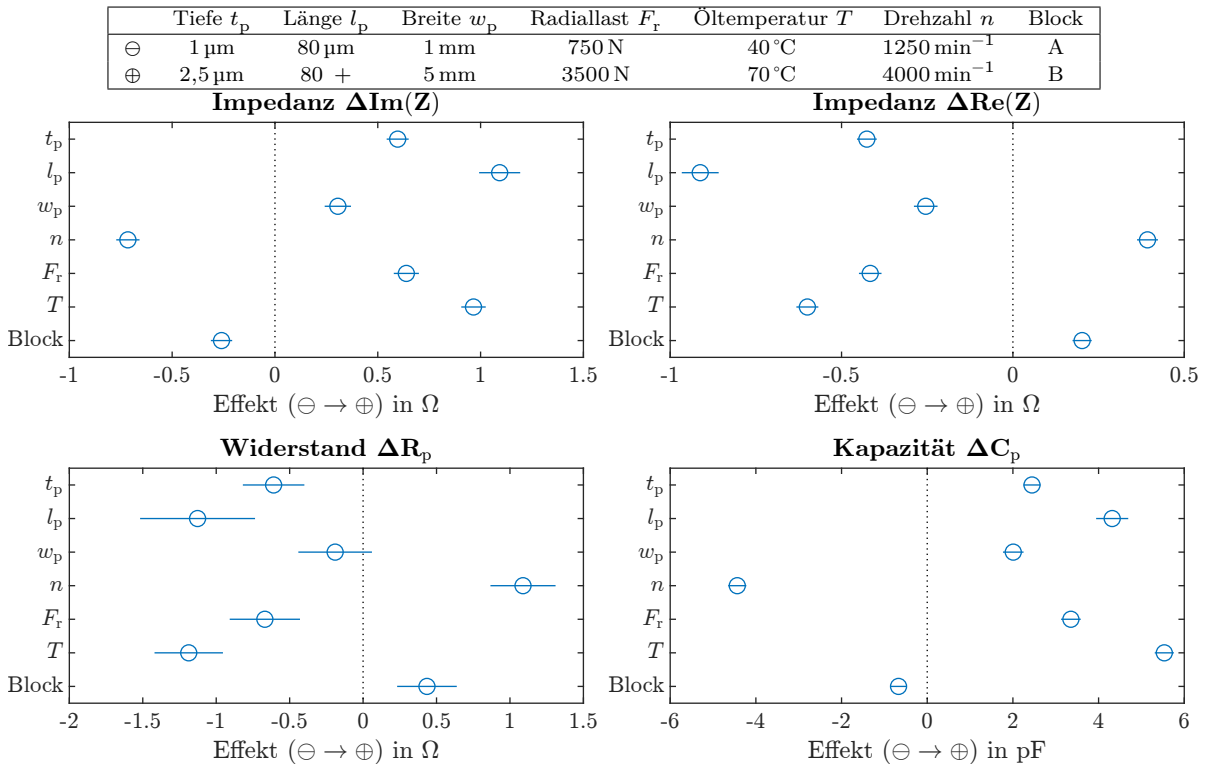


Abbildung 6.35.: Effekte der Faktoren auf die Ausschlagshöhe im Imaginär- und Realteil der Impedanz $\Delta \text{Im}(Z)$ und $\Delta \text{Re}(Z)$, der Kapazität ΔC_p und dem Widerstand ΔR_p .

In Abbildung 6.36 sind die zehn größten F-Werte der Effekte und Wechselwirkungen des Regressionsmodells dargestellt. Bei der Impedanz $\Delta \text{Im}(Z)$ und $\Delta \text{Re}(Z)$ bilden die

Haupteffekte aller sieben Faktoren bereits ca. 90% des Modells. Die Wechselwirkungen sind hier weitgehend vernachlässigbar. Für die Kapazität ΔC_p sind unter den zehn stärksten Effekten die Haupteffekte der Temperatur T , der Strukturlänge l_p , der Drehzahl n und der Radiallast F_r sowie vier Wechselwirkungen dieser Faktoren, außerdem die Strukturtiefe und -breite. Zieht man außerdem das hohe Bestimmtheitsmaß R^2 in Betracht, so lässt sich festhalten, dass die Ausschlagshöhe der Kapazität beinahe ausschließlich von der Temperatur, der Strukturlänge, der Drehzahl und der Radiallast abhängt, die übrigen Ziel- und Störgrößen sowie die verbleibende Streuung sind weitgehend vernachlässigbar.

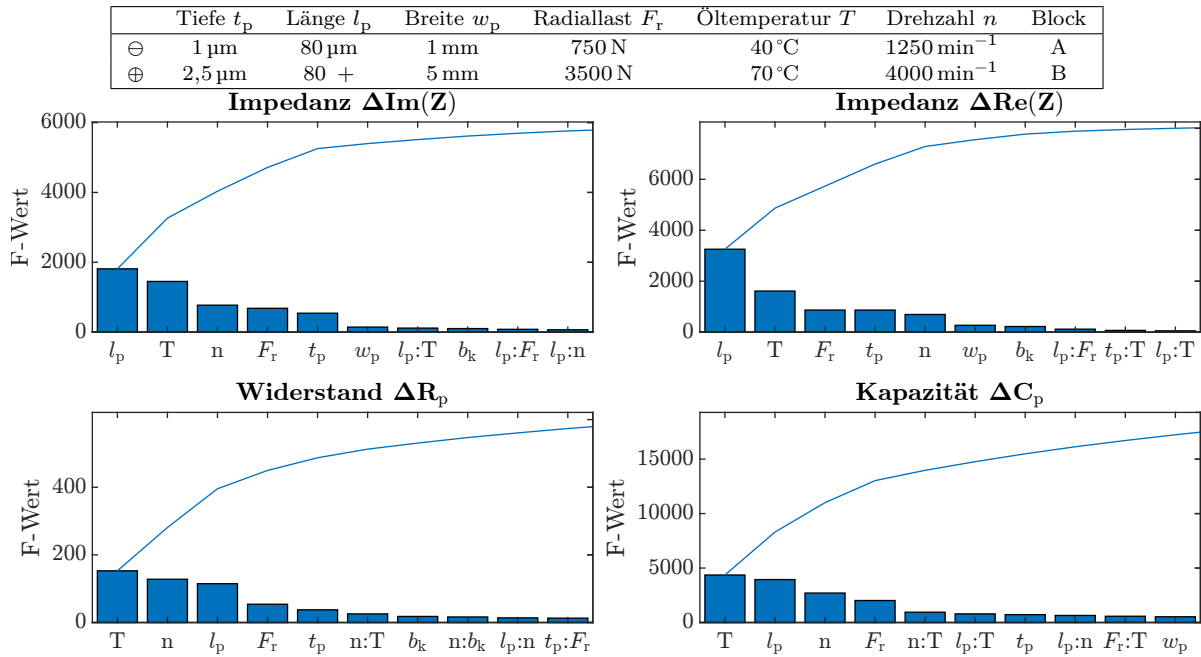


Abbildung 6.36.: Höchste 10 F-Werte der Regressionsmodelle für die Ausschlagshöhe im Imaginär- und Realteil der Impedanz $\Delta\text{Im}(Z)$ und $\Delta\text{Re}(Z)$, der Kapazität ΔC_p und dem Widerstand ΔR_p

Abbildung 6.37 zeigt abschließend die Residuen des Regressionsmodells. Für alle Metriken folgen die Residuen weitgehend einer Normalverteilung, lediglich im Bereich sehr großer und sehr kleiner Residuen treten Abweichung von der Normalverteilung auf. Der Einfluss von Ausreißern auf diese Metriken kann also als gering eingeschätzt werden. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Höhe langsamer Ausschläge der Impedanz und der Kapazität eine geringe Unsicherheit aufweisen und damit prinzipiell zur Entwicklung eines Modells der Auswertung, d.h. zum Rückschluss auf die Geometrie anhand der Ausschlagshöhe, geeignet sind. Die Metrik der Kapazität weist die geringste Unsicherheit auf und hängt beinahe ausschließlich von der Temperatur, der Strukturlänge, der Last und der Drehzahl ab. Damit ist einerseits ein einfacheres Modell als bei den Metriken der Impedanz gegeben, andererseits ist aber ein Rückschluss auf die Breite oder die Tiefe nicht möglich. Alle Ziel- und Störgrößen, auch die Blockzugehörigkeit und

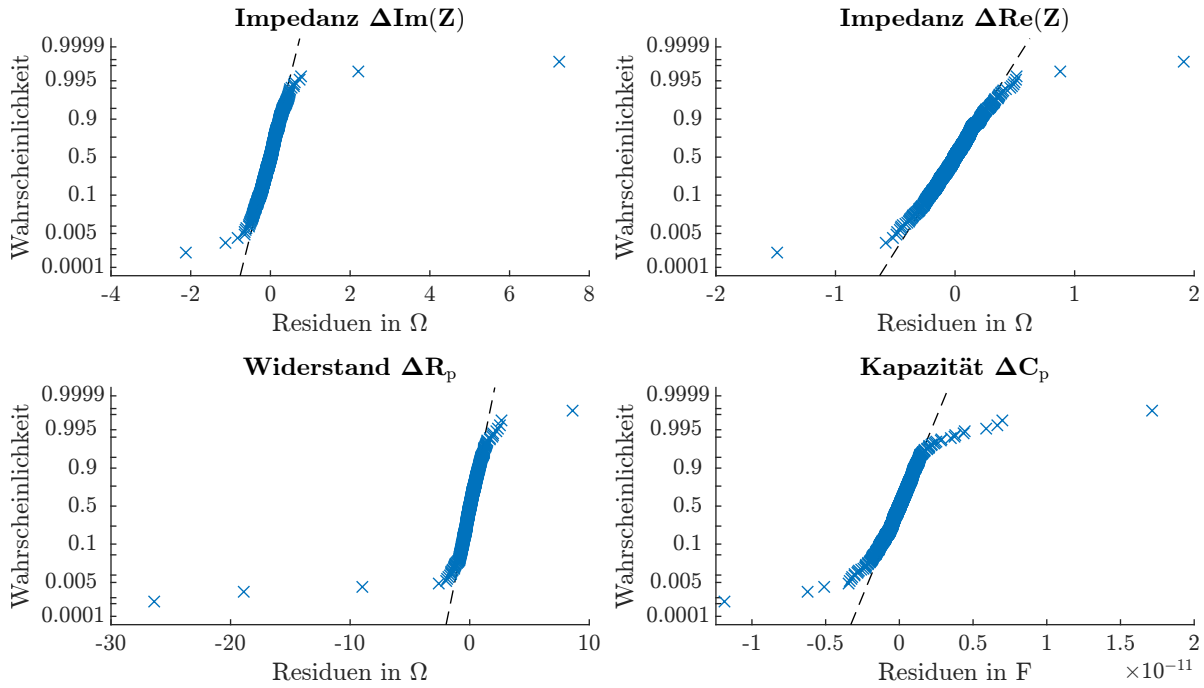


Abbildung 6.37.: Normalplot der Residuen des Regressionsmodells für die Ausschlagshöhe im Imaginär- und Realteil der Impedanz $\Delta\text{Im}(Z)$ und $\Delta\text{Re}(Z)$, der Kapazität ΔC_p und dem Widerstand ΔR_p

damit die Mikrostruktur, haben einen Einfluss auf die Ausschläge des Real- und Imaginärteils der Impedanz. Anhand dieser Metriken können also prinzipiell Rückschlüsse bezüglich aller Zielgrößen gezogen werden, gleichzeitig erschwert die Berücksichtigung vieler Faktoren die Modellbildung. Die Ausschlagshöhe des Widerstands weist eine hohe Unsicherheit auf, sodass sie für den Rückschluss auf die Zielgrößen schlecht geeignet ist.

Physikalische Interpretation Der Real- und Imaginärteil der Impedanz einerseits sowie der Widerstand R_p und die Kapazität C_p andererseits können ineinander umgerechnet werden und drücken daher die gleiche Information aus. Da gleichzeitig Widerstand und Kapazität unterschiedliche physikalische Phänomene – die Leitung von Strom zwischen den Kontaktpartnern bzw. den Aufbau eines elektrischen Feldes – beschreiben, während Real- und Imaginärteil der Impedanz nicht direkt interpretierbar sind, werden im Folgenden nur die Ausschlagshöhe des Widerstands ΔR_p und der Kapazität ΔC_p herangezogen.

Zunächst wird die in Abschnitt 6.4.2 gemachte Beobachtung, dass im Bereich langsamer Ausschläge eine Erhöhung der Kapazität und in einigen Fällen eine Verringerung des Widerstands auftritt, genauer untersucht. Abbildung 6.38 zeigt ein Punktdiagramm von ΔC_p und ΔR_p sowie Histogramme der beiden Metriken, in die Darstellungen geht die Gesamtheit aller ausgewerteten Ausschläge bei allen Faktorstufenkombinationen ein, insgesamt 760 Ausschläge. Es wird deutlich, dass die Ausschläge der Kapazität stets positiv sind. Die Ausschlagshöhe des Widerstands ΔR_p dagegen nimmt positive und negative

Werte an, wobei der Großteil der Werte um Null liegt. Betragsmäßig große Ausschläge des Widerstands ΔR_p treten, abgesehen von einem positiven Ausreißer, nur im negativen Bereich auf. Zieht man das stets vorhandene Rauschen in Betracht, das zu einer Streuung der Werte führt, so ist festzuhalten, dass bei einem Großteil der Messungen tatsächlich keine signifikanten Änderungen des Widerstands auftreten, und dass es in einigen Messungen zu einer Abnahme des Widerstands bei einem Ausschlag kommt, aber nie zu einer Zunahme.

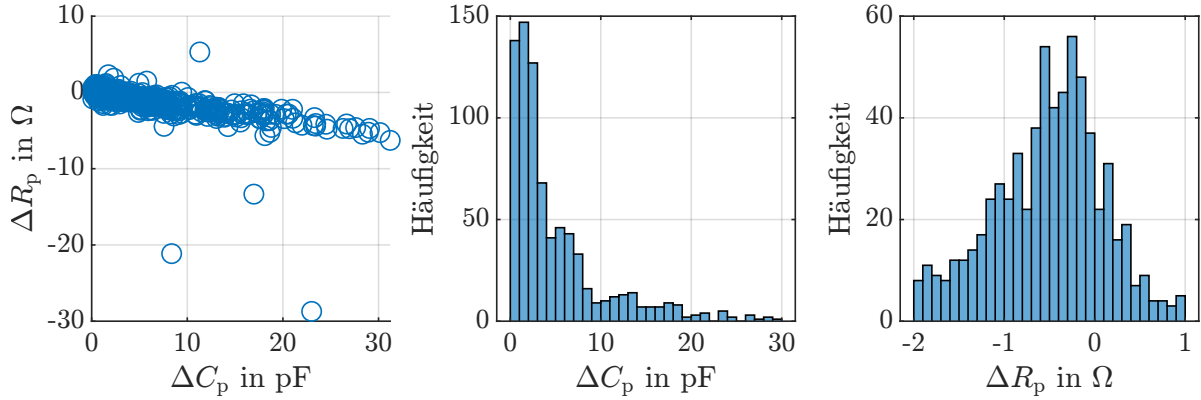


Abbildung 6.38.: Punktdiagramm (links) sowie Histogramme (mitte und rechts) von ΔC_p und ΔR_p für alle ausgewerteten Ausschläge

Zudem fällt in Abbildung 6.38 auf, dass die Ausschlagshöhe des Widerstands und der Kapazität korreliert zu sein scheinen. Diese Korrelation stimmt qualitativ mit dem Stand der Forschung überein. Die Kapazität eines Wälzlagers im EHD-Schmierungszustand folgt der Gesetzmäßigkeit

$$C_p \sim \frac{A_{Hz}}{h_0} \quad (6.31)$$

vgl. [26] und Gleichung (2.6) in Abschnitt 2.2.2. Von PRASHAD und GEMEINDER wird für den Widerstand eine ähnliche Gesetzmäßigkeit angegeben, derzufolge die Proportionalität

$$R_p \sim \frac{h_0}{A_{Hz}} \quad (6.32)$$

gilt, vgl. [46, 27] und Gleichung (2.7) in Abschnitt 2.2.3. Das ist gleichbedeutend mit dem Zusammenhang

$$R_p \sim \frac{1}{C_p}, \quad (6.33)$$

d.h. mit einer Erhöhung der Kapazität geht in gleichem Maße eine Verringerung des Widerstands einher. Die beobachtete Korrelation zwischen positiven Werten von ΔC_p und negativen Werten von ΔR_p steht damit qualitativ im Einklang. Von GEMEINDER wurde zwar gezeigt, dass die tatsächlichen Messwerte des Widerstands um Größenordnungen von der theoretischen Vorhersage nach (2.7) abweichen. Abbildung 6.38 deutet aber darauf hin, die Theorie bei der Überrollung der betrachteten Oberflächenstrukturen zumindest tendentiell gilt.

Nach dieser vergleichenden Analyse sollen nun für die Kapazität mögliche physikalische Erklärungsansätze untersucht werden. Für den Widerstand wird eine detaillierte Untersuchung aufgrund der hohen Unsicherheit der Effekte als nicht zielführend angesehen. Die Ausschläge der Kapazität äußern sich bei den untersuchten Strukturen stets als Anstieg des Signals, d.h. die Kapazität des EHD-Kontakts steigt während der Überrollung der eingebrachten Strukturen. Im etablierten elektrischen Modell des EHD-Kontakts entspricht dies einer Erhöhung der Schmierfilmdicke, einer Vergrößerung der Hertz'schen Fläche oder einer Zunahme des Randeinflusses, d.h. der Kapazität der nicht verformten Geometrie um die Hertz'sche Fläche, vgl. Abschnitt 2.2.2. Die eingebrachten Oberflächenabweichungen liegen im Bereich weniger μm , während der Abstand der Kontaktpartner im Randbereich deutlich größer ist. Aus diesem Grund wird der Randeinfluss als Ursache für die Kapazitätsänderung verworfen. Eine makroskopische Vergrößerung der Hertz'schen Fläche ist ebenfalls nicht zu erwarten, da die Ausprägung der Hertz'schen Flächen neben Materialparametern und Belastung nur von den Krümmungsradien der Kontaktpartner abhängt, und die eingebrachten Oberflächenabweichungen deutlich geringer sind als die Krümmungsradien, vgl. Abschnitt 2.1. Damit verbleibt der Abstand der Kondensatorflächen, also die Schmierfilmdicke, als letzter Erklärungsansatz. Als physikalische Erklärung hierfür können Arbeiten von TEN NAPEL und BOSMA sowie von SCHMIDT herangezogen werden, denen zufolge die Kapazität von EHD-Kontakten mit der Oberflächenrauheit ansteigt [77, 78], vgl. Abschnitt 2.2.2. SCHMIDT führt diesen Anstieg der Kapazität bei rauer Oberfläche auf eine reduzierte Schmierfilmdicke zurück [78]. Nach TEN NAPEL und BOSMA handelt es sich dagegen um einen rein geometrischen Effekt, demzufolge die Kapazität eines Plattenkondensators mit rauer Oberfläche größer ist als bei glatter Plattenoberfläche [77]. Bei beiden Erklärungsansätzen ist die Kapazitätsänderung letztlich auf die geometrische Eigenschaft Oberflächenrauheit zurückzuführen.

Die Ausschläge bei den realen Pittings aus Kapitel 5 sind mit einem Anstieg des Imaginärteils der Impedanz verbunden, bei den Strukturen in diesem Kapitel sinkt der Imaginärteil dagegen. Das deutet darauf hin, dass bei realen Pittings ein anderer physikalischer Mechanismus greift als bei den hier untersuchten Strukturen, und die Ergebnisse hinsichtlich der Höhe langsamer Ausschläge somit nicht auf reale Pittings übertragbar sind. Interessant sind sie allerdings für Schadensmechanismen, die mit einer Erhöhung der Oberflächenrauheit verknüpft sind, insbesondere die Schädigung durch Stromdurchgang, vgl. Abschnitt 2.3.2.

Fazit Alle Metriken zur Charakterisierung langsamer Ausschläge zeigen statistisch signifikante Abhängigkeiten von den im Versuchsplan untersuchten Faktoren. Die Zusammenhänge zum Real- und Imaginärteil der Impedanz sowie zur Kapazität können aufgrund des hohen Signal-Rausch-Verhältnisses mit geringer statistischer Unsicherheit modelliert werden, die Ausschläge des Widerstands sind dagegen sehr klein und in der Modellierung verbleibt eine große Unsicherheit. Für das Verhalten von ΔC_p wurden zwei unterschiedliche Erklärungshypothesen präsentiert, beide führen letztlich auf die höhere Oberflächenrauheit im strukturierten Bereich zurück. Für ein vertieftes Verständnis,

bei dem die physikalischen Hypothesen auch quantitativ mit den Versuchsergebnissen abgeglichen werden, sind weitere experimentelle oder numerische Untersuchungen nötig.

6.5.3. Häufigkeit schneller Ausschläge

In Abbildung 6.39 sind die Effekte auf die Häufigkeit schneller Ausschläge p_s dargestellt. Alle Effekte sind deutlich unsicherheitsbehaftet. Das schlägt sich auch im niedrigen Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,724$ nieder. Das Bestimmtheitsmaß liegt zwar im Bereich des Wertes für die Metrik des Wälzwegs, was zunächst eine geringe Unsicherheit nahelegt. Allerdings sind die Werte nicht direkt vergleichbar, da bei der Bestimmung der Häufigkeit bereits eine Mittelung über 10 Ausschläge stattgefunden hat, vgl. Abschnitt 6.4.3. Im Sinne einer Regression bezüglich der Zielgrößen t_p , w_p und l_p bietet die Metrik aufgrund der großen Unsicherheit nur ein geringes Potential, sie wird deshalb nicht weiter unter statistischen Gesichtspunkten untersucht. Allerdings ist das Auftreten schneller Ausschläge ein interessantes Phänomen, dessen physikalische Bedeutung noch unklar ist. Deshalb wird im Folgenden untersucht, wie die Beobachtungen physikalisch interpretiert werden können.

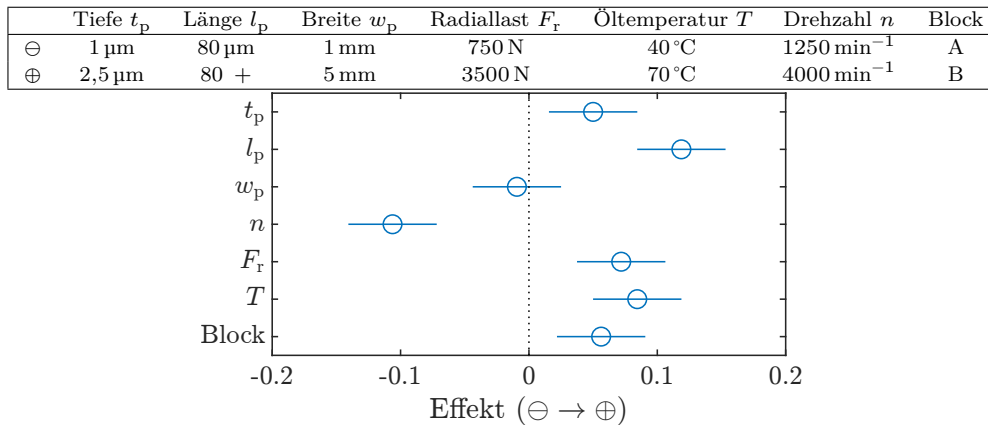


Abbildung 6.39.: Effekte der Faktoren auf die Häufigkeit schneller Ausschläge p_s

Physikalische Interpretation Aus den Effekten bzgl. der Häufigkeit schneller Ausschläge p_s (Abbildung 6.39) geht hervor, dass bei einer größeren Strukturtiefe und -länge, einer höheren Temperatur und einer niedrigeren Drehzahl, einer höheren Last und in Block A mehr schnelle Ausschläge auftreten. Bei der Analyse der langsamen Ausschläge in Abschnitt 6.5.2 wurde bereits herausgearbeitet, dass diese Faktoren vermutlich eine Verringerung der Schmierfilmdicke verursachen. Bereits in Abschnitt 6.4.1 wurde die Vermutung geäußert, dass es sich bei den hier beobachteten schnellen Ausschlägen um metallische Kontakte handelt, die sich nach dem Stand der Forschung als kurzzeitiger Abfall des Widerstands äußern [24], vgl. Abschnitt 2.2.3.

Eine weitere Interpretationsmöglichkeit kann ebenfalls aus dem Stand der Forschung abgeleitet werden. Bei dünnem Schmierfilm kann es bei Überschreiten der Durchbruch-

feldstärke des Schmierstoffs zu elektrischen Durchschlägen kommen, die ebenfalls mit einem Absinken des Widerstands verknüpft sind [30], vgl. Abschnitt 2.3.2.

Wenn es sich bei den beobachteten Ausschlägen tatsächlich um elektrische Durchschläge handelt, müsste eine Erhöhung der Messspannung dazu führen, dass die Durchbruchfeldstärke häufiger überschritten wird und dementsprechend auch schnelle Ausschläge häufiger auftreten. Deshalb wird eine Versuchsreihe mit variierender Messspannungsamplitude \hat{U}_m durchgeführt. Für den Versuch wird die Konfiguration K9 verwendet. Sie gehört zur Versuchsreihe mit variierender Lokalisierung (vgl. Abschnitt 6.6) und besitzt den Vorteil, dass die Struktur auf dem Außenring eingebracht wird und deshalb die Wälzkörperlast bei jeder Überrollung gleich ist. Damit ist es möglich, alle Einflussfaktoren konstant zu halten. Jede Messung wird drei Mal durchgeführt, die Versuchsreihenfolge ist zufällig. Der Versuchsplan kann Anhang B entnommen werden. Für die ersten zehn Ausschläge jeder Messung wird die Häufigkeit schneller Ausschläge unter den 30 Ausschlägen jedes Spannungsniveaus bestimmt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6.40 dargestellt. Der Verlauf von p_s zeigt, dass mit steigender Spannung tatsächlich mehr schnelle Ausschläge auftreten.

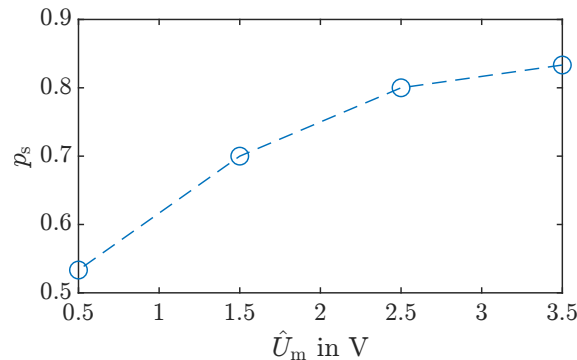


Abbildung 6.40.: Häufigkeit schneller Ausschläge p_s für verschiedene Spannungsniveaus bei Versuchspunkt VP114 ($F_r = 3500$ N, $T = 40$ °C, $n = 1250$ min⁻¹) von Konfiguration K9

Fazit Die Analyse der Effekte und weitere Untersuchungen deuten darauf hin, dass das Auftreten schneller Ausschläge mit einer reduzierten Schmierfilmdicke zusammenhängt. Nach der in der Literatur gängigen Interpretation sind die schnellen Ausschläge auf metallische Kontakte von Rauheitsspitzen zurückzuführen. Die Ergebnisse einer Versuchsreihe mit variabler Spannung zeigen, dass beim verwendeten Versuchsaufbau die Messspannung einen Einfluss auf das Auftreten schneller Ausschläge hat. Das deutet darauf hin, dass es sich bei den schnellen Ausschlägen um elektrische Durchschläge handelt.

6.5.4. Verifikation

Als Abschluss der Modellierung werden nun einige Untersuchungen vorgenommen, um die beiden Aspekte des erarbeiteten Modells – Regressionsmodelle und physikalische Interpretation – zu verifizieren. Die beobachteten Effekte und ihre physikalische Interpretation werden verifiziert, indem geprüft wird, inwieweit sie auch bei einer Struktur mit leicht veränderter Oberfläche auftreten. Die Regressionsmodelle werden verifiziert, indem die Modellvorhersage mit den tatsächlichen Beobachtungen verglichen wird.

Wie in Abschnitt 6.3 dargestellt, weichen die tatsächlich hergestellten Strukturen von den theoretisch in der Versuchsplanung definierten Strukturen ab. Insbesondere entsteht in der Struktur eine Welligkeit, wenn die Länge l_p auf der Stufe \oplus steht. Von dieser Abweichung sind alle Konfigurationen auf Stufe $l_{p\oplus}$ betroffen, also 50 % der Versuche. Deshalb soll in einem Stichversuch überprüft werden, ob die an den welligen Proben erarbeiteten Erkenntnisse auch bei Proben mit einer regelmäßigeren Vertiefung gelten. Indem die bisher abgeleiteten Erkenntnisse mit einer Konfiguration verglichen werden, die eine andere Oberflächenstruktur aufweist, wird das erarbeitete Modell auch verifiziert. Als Basis wird die Konfiguration K8 verwendet, in der die Strukturtiefe, -breite und -länge auf der Stufe \oplus stehen. Lediglich die Konfiguration des Lasers in der Anlagensteuerung wurde verändert und ein um 50 % verringerter Bahnabstand eingestellt. Diese Verifikationskonfiguration wird als K11 bezeichnet. In Abbildung 6.41 sind die Oberflächentopographien dargestellt. Das in der Basiskonfiguration K8 deutlich sichtbare rasterförmige Muster ist auch bei K11 vorhanden, aber die Höhenunterschiede sind schwächer ausgeprägt und räumlich kleiner. Dies spiegelt sich auch darin wieder, dass der arithmetische Mittenrauwert der strukturierten Fläche bei K11 deutlich kleiner ist als bei K8. Das Ziel einer regelmäßigeren Oberflächenstruktur wurde also erreicht.

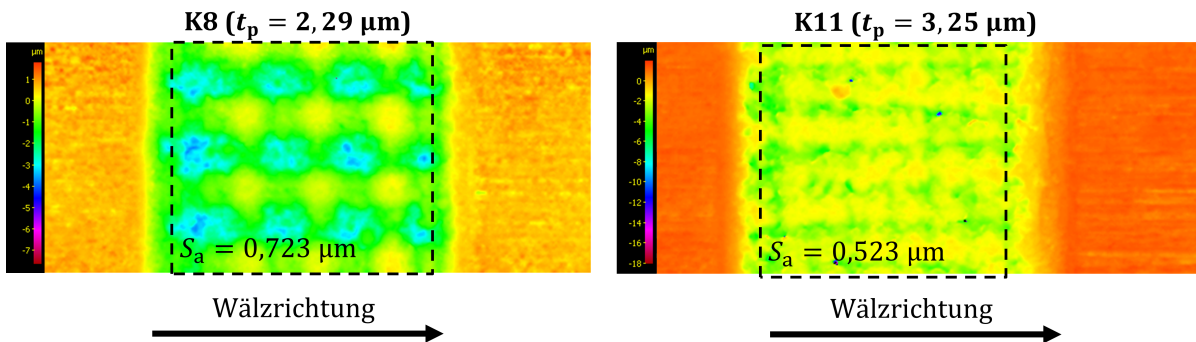


Abbildung 6.41.: Topographie der Strukturen der Konfigurationen K8 und K11 nach Durchführung des Versuchsprogramms, mit Angabe des arithmetischen Mittenrauwertes S_a .

In Abbildung 6.42 ist zunächst der Zeitverlauf des Widerstands R_p und der Kapazität C_p dargestellt. Auffällig ist, dass nun nicht mehr alle Ausschläge durch einen Anstieg der Kapazität gekennzeichnet sind, was bei allen bisher betrachteten Versuchen der Fall war, sondern dass auch Ausschläge mit sinkender Kapazität auftreten, z.B. (1). Diese Ausschläge treten bei Überrollungen am Rand der Lastzone, d.h. mit geringer Wälzkör-

perlast, auf. Der mit (2) bezeichnete Ausschlag weist Merkmale einer Mischform auf. In Abschnitt 6.5.2 wurde herausgearbeitet, dass eine Änderung der Schmierfilmdicke der plausibelste Ansatzpunkt zur Erklärung der Kapazitätsänderungen ist. Eine Kapazitätsabnahme wäre demzufolge mit einer steigenden Schmierfilmdicke verbunden. Da diese Form von Ausschlägen in anderen Strukturvarianten nicht auftritt, können die Hintergründe im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht werden. Eine mögliche Erklärung ist, dass die Wälzkörperlast bei diesen Überrollungen so gering ist, dass der Wälzkörper den Schmierstoff bei geringer Last nicht aus der Vertiefung verdrängt und deshalb während der Überrollung ein große Schmierfilmdicke auftritt. Die größten Ausschläge jeder Umdrehung, z.B. (3), die maßgeblich für die quantitativen Auswertungen in Abschnitt 6.5 sind, zeigen im Vergleich mit Abbildung 6.20, dem Pendant für die Basiskonfiguration, einen ähnlichen Verlauf. Lediglich der in dieser Arbeit nicht näher betrachtete Nebenausschlag (3a) ist nun höher.

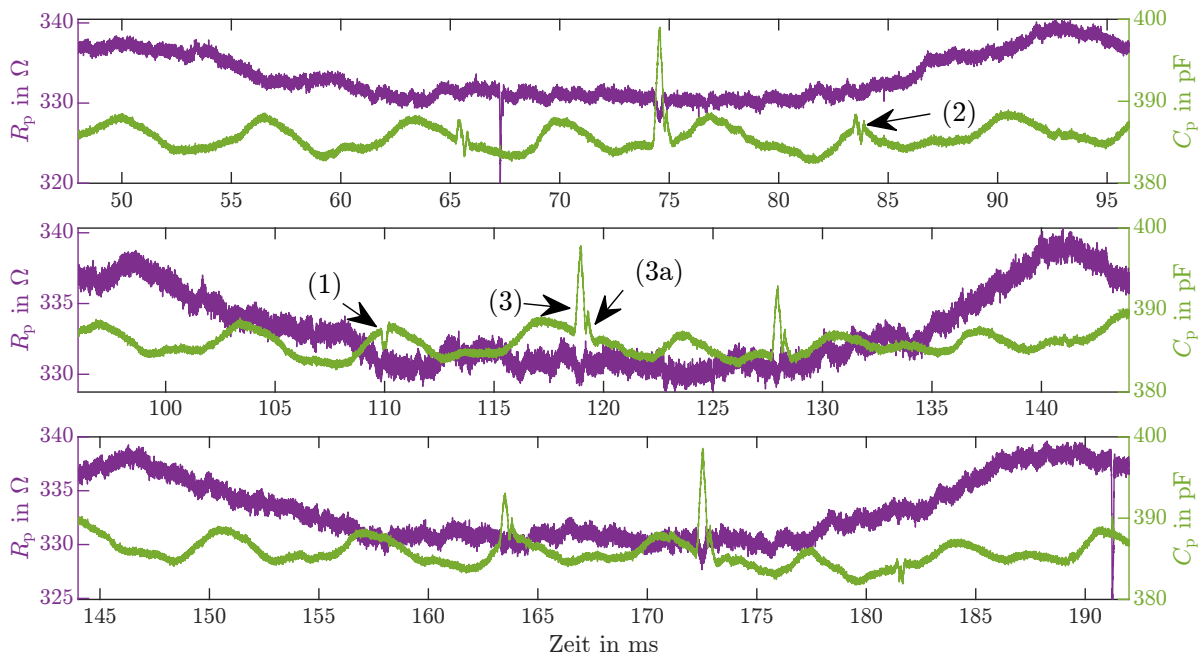


Abbildung 6.42.: Verlauf von R_p und C_p der Konfiguration K11 bei Versuchspunkt VP114 ($F_r = 3500 \text{ N}$, $T = 40^\circ\text{C}$, $n = 1250 \text{ min}^{-1}$). Jede Zeile entspricht einer Umdrehung des Innenrings.

Da das Signal, zumindest für den höchsten Ausschlag jeder Umdrehung, qualitativ dem Signalverlauf der in Abschnitt 6.4 betrachteten Versuche gleicht, können nun auch die in Abschnitt 6.4 definierten Metriken angewandt werden. Ziel dieser Analyse ist zu prüfen, ob die Modellvorstellungen für die Höhe und Dauer der Ausschläge, die in Abschnitt 6.5 entwickelt wurden, auch für die hier betrachtete Verifizierungskonfiguration K11 gültig sind. Dazu werden die Effekte der Betriebsbedingungen Temperatur, Drehzahl und Radiallast sowie der Effekt der Blockzugehörigkeit ermittelt und mit den Effekten verglichen, die bei der Basiskonfiguration auftreten. Sind die Effekte gleich, dann kann davon

ausgegangen werden, dass die Verifizierungskonfiguration den gleichen physikalischen Gesetzmäßigkeiten gehorcht wie die Basiskonfiguration K8.

In Abbildung 6.43 sind die Effekte für beide Konfigurationen und alle Metriken dargestellt. Für die Häufigkeit schneller Ausschläge p_s können keine Effekte bestimmt werden, da diese Metrik je Versuchspunkt berechnet wird und damit zu wenige Datenpunkte zur Verfügung stehen. Die Nennwerte der Strukturbreite, -tiefe und -länge sind für beide Konfigurationen gleich, deshalb weisen sie auch keine Effekte auf. Für alle Metriken gilt, dass die Effekte beinahe aller Faktoren in der Verifizierungsvariante K11 größer sind, allerdings sind die Unterschiede nur für die Höhe langsamer Ausschläge der Impedanz, des Widerstands und der Kapazität statistisch signifikant. Die Vorzeichen und die Größenordnung der Effekte sind für beide Konfigurationen gleich. Somit kann festgehalten werden, dass die Verifizierungskonfiguration ein qualitativ ähnliches, aber quantitativ abweichendes Verhalten aufweist. Daraus kann auch der Schluss gezogen werden, dass die physikalische Modellierung weiterhin gültig ist.

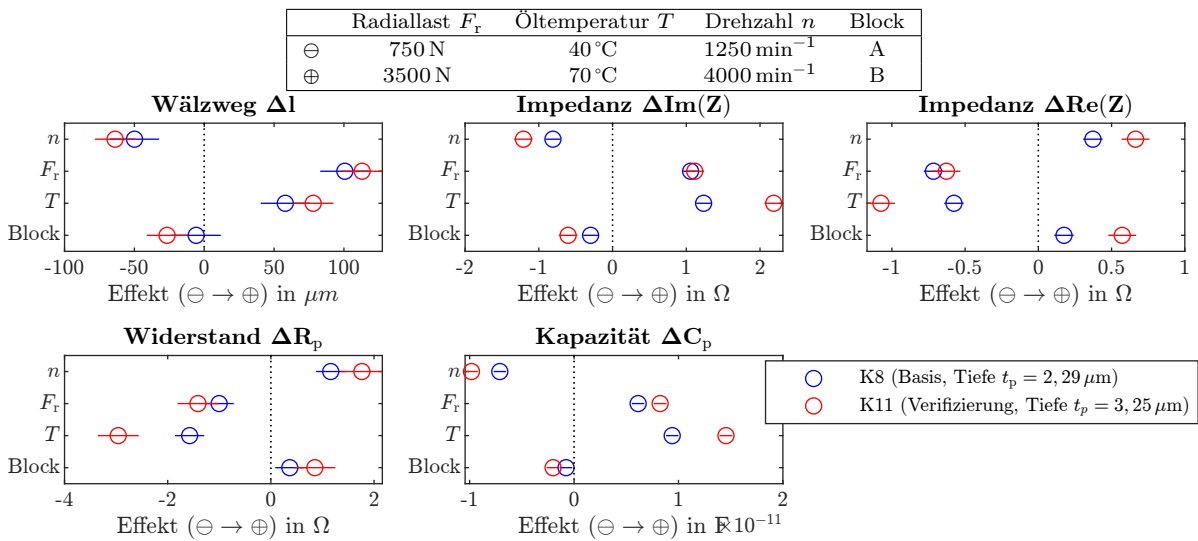


Abbildung 6.43.: Vergleich der Effekte der Radiallast F_r , der Temperatur T , der Drehzahl n und der Blockzugehörigkeit b_k der Basiskonfiguration K8 (blau, Tiefe $t_p = 2,29 \mu\text{m}$) mit der Verifizierungskonfiguration K11 (rot, Tiefe $t_p = 3,25 \mu\text{m}$)

Als letzter Verifikationsschritt soll geprüft werden, ob die Regressionsmodelle, die im Rahmen der Modellierung erarbeitet wurden, die Messwerte der beiden Konfigurationen korrekt vorhersagen. Die Messdaten der Basiskonfiguration wurden bei der Regressionsanalyse einbezogen, dagegen unterscheidet sich die Verifizierungskonfiguration in zwei Aspekten deutlich von den übrigen Konfigurationen: Die Tiefe liegt mit $t_p = 3,25 \mu\text{m}$ außerhalb des Bereichs der für die Regression verwendeten Konfiguration, es handelt sich also in dieser Hinsicht um eine Extrapolation. Der zweite Unterschied ist die Oberflächenstruktur, die keine Wellen aufweist.

Die Modellvorhersagen der Regressionsmodelle für die Metriken werden für die beiden Konfigurationen berechnet, und die Residuen, d.h. die Differenz zwischen den tatsächlich

gemessenen Werten der Metriken und der Modellvorhersage, werden berechnet. Je Versuchspunkt werden zehn Ausschläge ausgewertet, damit liegen je Versuchspunkt auch zehn Residuen vor, die als Punktdiagramm in Abbildung 6.44 aufgetragen sind. Jeder Versuchspunkt entspricht einer Kombination der Betriebsbedingungen Temperatur, Drehzahl und Last, vgl. Anhang B. Anhand dieser Darstellung kann einerseits beurteilt werden, wie stark die Messwerte innerhalb eines Versuchspunkts streuen. Andererseits kann geprüft werden, wie stark die Gesamtheit der Messwerte eines Versuchspunkts von der Modellvorhersage abweicht, was einem systematischen Fehler entspricht. Das Streuungsverhalten ist für beide Konfigurationen ähnlich. Bei den systematischen Abweichungen gibt es dagegen deutliche Unterschiede. Die Residuen der Basiskonfiguration K8 sind in den meisten Versuchspunkten und Metriken um den Wert null verteilt, es gibt also nur geringe systematische Abweichungen zwischen Modell und Messung. Für K11 liegen in vielen Fällen alle Werte der Residuen ober- oder unterhalb von null, hier weicht die Vorhersage des Regressionsmodells also systematisch von den Beobachtungen ab.

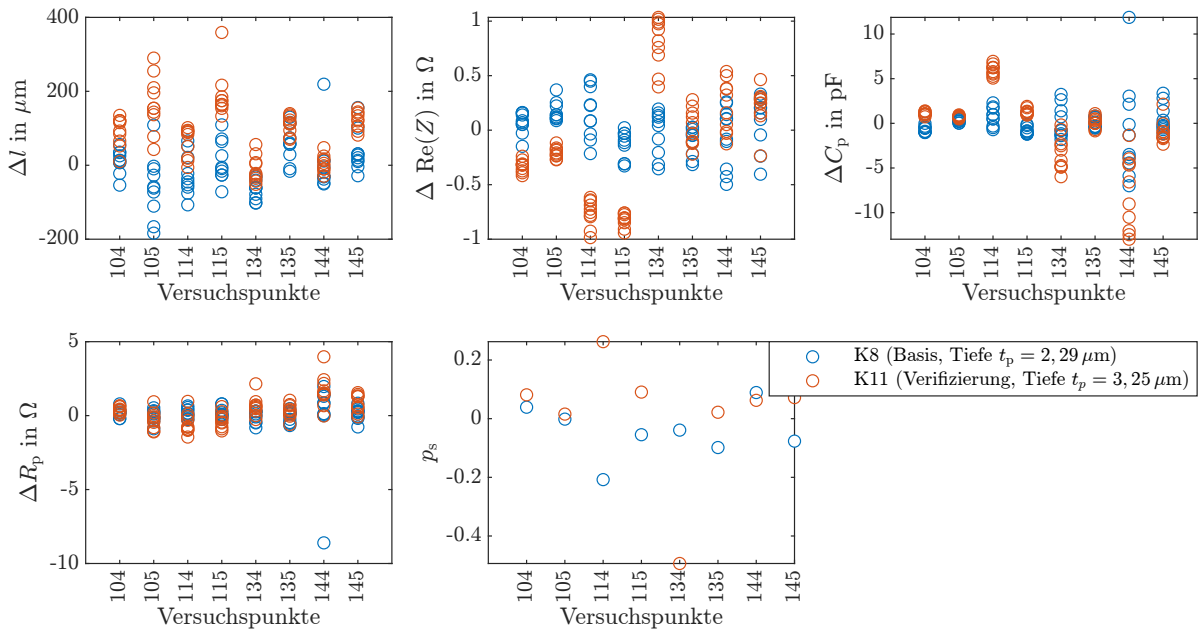


Abbildung 6.44.: Residuen der Metriken für die Konfigurationen K8 und K11

Fazit Das erste Ziel der Untersuchungen dieses Abschnitts war, die aufgestellten Regressionsmodelle zu verifizieren, indem ihre Fähigkeit zur Vorhersage von Messwerten überprüft wird. Dazu wurde für eine Konfiguration (K8), deren Messwerte bereits in die Modellerstellung eingingen, sowie eine weitere Konfiguration (K11), die sich hinsichtlich ihrer Tiefe und Oberflächenbeschaffenheit von den bisher verwendeten Konfigurationen unterscheidet, die Vorhersagen der Regressionsmodelle mit den tatsächlichen Beobachtungen verglichen. Es zeigt sich, dass die Vorhersage für die Konfiguration K8 für die meisten Messungen gut mit den Beobachtungen übereinstimmt, dagegen weist die Konfiguration

K11 systematische Abweichungen auf. Die Ursachen dieser Abweichung können nicht weiter aufgeklärt werden. Denkbar ist, dass die Modelle nicht auf größere Werte von t_p oder auf eine andere Oberflächenbeschaffenheit extrapolierbar sind. Somit ist festzuhalten, dass die Übertragung der erarbeiteten Regressionsmodelle, die Modelle der Messung darstellen, auf andere Geometrien problematisch ist.

Das zweite Ziel war die Überprüfung, ob die Effekte der Betriebsbedingungen, und damit auch ihre physikalische Interpretation, bei der zusätzlich untersuchten Konfiguration K11 mit den bisher erarbeiteten Zusammenhängen übereinstimmen. Hierbei zeigten sich zwar quantitative Abweichungen, aber keine wesentlichen Unterschiede der Richtung und der relativen Stärke der Effekte. Auch der qualitative Vergleich der Zeitsignale zeigt, zumindest für hochbelastete Überrollungen, keine wesentlichen Unterschiede. Damit kann festgehalten werden, dass graduelle Unterschiede auftreten, das Verhalten bei Überrollungen der Struktur durch hochbelastete Wälzkörper aber prinzipiell ähnlich ist.

6.6. Planung der Versuche mit variierender Lokalisierung

Mit den in diesem Abschnitt beschriebenen Versuchen werden zwei Ziele verfolgt. Zum Einen soll untersucht werden, ob und wie sich das Modell, das anhand variierender Oberflächenstrukturen auf dem Innenring gebildet wurde, auf Außenring und Wälzkörper übertragen werden kann. Indem das Modell mit einem Datensatz abgeglichen wird, der nicht zur Modellerstellung verwendet wurde, wird es gleichzeitig verifiziert. Zum Anderen soll als Erweiterung dieses Modells der Messung auch der Einfluss der Lokalisierung auf das Impedanzsignal berücksichtigt werden. Der Aufwand für Versuche mit allen Strukturkonfigurationen, die bereits am Innenring untersucht wurden, ist prohibitiv hoch, deshalb werden die Geometriefaktoren konstant gehalten und nur eine Strukturvariante (Konfiguration K8) untersucht. Diese Struktur wird auf den Außenring und auf einen Wälzkörper aufgebracht und die Impedanz gemessen. Es ergibt sich der in Tabelle 6.7 dargestellte Versuchsplan für die verschiedenen Lokalisierungs-Varianten.

Konfiguration	Prüfling Nr.	Lokalisierung	t_p	l_p	w_p
K8	L92	Innenring	⊖	⊕	⊕
K9	L20	Außenring	⊖	⊕	⊕
K10	L21	Wälzkörper	⊖	⊕	⊕

Tabelle 6.7.: Versuchsplan der Lokalisierungs-Varianten

Das Impedanzmessverfahren, der Lager- und Schmierstofftyp, der Versuchsplan bezüglich der Betriebsbedingungen und die Versuchsdurchführung werden unverändert von der Versuchsreihe am Innenring übernommen, vgl. Abschnitt 6.1 und 6.2. Bei der Konfiguration mit strukturiertem Außenring wird der Außenring so positioniert, dass die Struktur in der Mitte der Lastzone liegt. Als Grundlage für die Auswertung werden, mit der bereits in Abschnitt 6.1.3 beschriebenen Vorgehensweise, die Abmessungen der Hertz'schen Fläche für die beiden Radiallaststufen berechnet, vgl. Tabelle 6.2. In Abbildung 6.45 ist die Versuchsplanung nochmals zusammengefasst.

Faktorstufe	Radiallast	F_r in N	$2b$ in mm	$2a$ in mm
\ominus		750	0,226	2,36
\oplus		3500	0,378	3,95

Tabelle 6.8.: Abmessungen der Hertz'schen Fläche am Kontakt zwischen höchstbelastetem Wälzkörper und Außenring in Abhängigkeit der Belastung

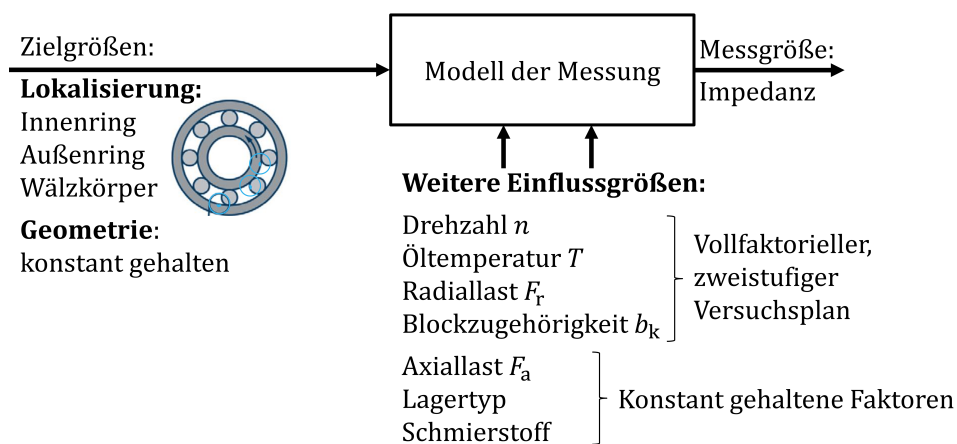


Abbildung 6.45.: Versuchsplanung für die Versuche mit variierender Lokalisierung

6.7. Ergebnisse der Versuche mit variierender Lokalisierung

Bei der Analyse der Versuchsreihe werden zwei Ziele verfolgt. Zum Einen wird, analog zum Vorgehen in den Abschnitten 6.4 und 6.5, eine Modellvorstellung für den Zusammenhang zwischen der Lokalisierung von Oberflächenabweichungen und der Wälzlagerimpedanz hergestellt. Zum Anderen wird geprüft, inwieweit die in Abschnitt 6.5 erarbeiteten Erkenntnisse auch für Oberflächenabweichungen auf den Kugeln und dem Außenring des betrachteten Rillenkugellagers gelten.

6.7.1. Qualitative Analyse

Zunächst werden die Versuchsergebnisse im Zeitbereich betrachtet. Da in Abschnitt 6.5 festgestellt wurde, dass die Darstellung als Widerstand und Kapazität aussagekräftiger ist als die Darstellung als Real- und Imaginärteil der Impedanz, wird im Folgenden R_p und C_p betrachtet. In Abbildung 6.46 wird der Verlauf von Konfiguration K9 (Struktur auf dem Außenring) und in Abbildung 6.47 der Verlauf von K10 (Struktur auf einem Wälzkörper) gezeigt. Die Versuchsbedingungen sind identisch mit dem in Abbildung 6.20 gezeigten Verlauf von K8, sodass ein direkter Vergleich der drei Varianten möglich ist. In allen drei Lokalisierungsvarianten zeigen sich die charakteristischen langsamen und schnellen Ausschläge. Bei der Konfiguration mit Struktur auf einem Wälzkörper treten die Ausschläge, wie bereits am Innenring beobachtet, in Gruppen auf und weisen eine

variable Höhe auf. Im Gegensatz dazu ist die Form und der Abstand der Ausschläge bei einer Struktur auf dem Außenring sehr regelmäßig, was auf die am Außenring konstante Wälzkörperlast zurückgeführt werden kann. Der Verlauf der einzelnen Ausschläge ähnelt qualitativ dem bereits am Innenring beobachteten Verhalten. Die Zeitabstände der Ausschläge entsprechen, wie bereits in Abschnitt 6.4.1 für Strukturen am Innenring beschrieben, ungefähr dem Kehrwert der Überrollfrequenzen an Außenring f_{AR} und Wälzkörpern f_{WK} , was in Abschnitt 6.7.2 genauer untersucht wird.

Um den unregelmäßigen Zeitverlauf der Ausschläge bei strukturiertem Wälzkörper genauer zu beurteilen ist in Abbildung 6.48 der Verlauf der Kapazität nochmals für mehrere Gruppen von Ausschlägen dargestellt. Mit strichlierten Linien sind die entsprechend der Überrollfrequenz theoretisch zu erwartenden Zeitpunkte von Ausschlägen hervorgehoben. Nicht an allen dieser Zeitpunkte ist tatsächlich ein Ausschlag sichtbar, die eindeutig erkennbaren Ausschläge sind numeriert. Längere und kürzere Ausschläge wechseln sich ab, z.B. sind (3a) und (3c) länger als (3b) und (3d). Ein Erklärungsansatz ist, dass die längeren Ausschläge bei einer Überrollung des Außenrings auftreten. Die Länge der Hertz'schen Fläche $2b$ ist am Außenring größer als am Innenring, vgl. Tabelle 6.2 und 6.8. Der Einfluss der Länge der Hertz'schen Fläche auf die Dauer eines Ausschlags wurde bereits in Abschnitt 6.5.1 nachgewiesen, sodass diese Erklärung plausibel ist. Die Dauer der Ausschläge ist auch im Übrigen variabel, z.B. sind die Ausschläge der Gruppe 5 deutlich länger als die übrigen Ausschläge. Möglicherweise ändert sich die Ausrichtung der Struktur aufgrund einer Bohrbewegung der Kugel. Eine Überrollung über die kurze Seite der Struktur l_p würde einen, im Vergleich zu einer Überrollung über die lange Seite der Struktur w_p , kürzeren Ausschlag erklären. Eine genauere Deutung dieses variablen Verhaltens ist anhand der vorhandenen Daten nicht möglich. Festzuhalten ist, dass die Länge, Dauer und Höhe der Ausschläge stark variieren und keine eindeutige Regel hierfür erkennbar ist.

In Abschnitt 6.4.1 wurde festgestellt, dass die Überrollung einer Struktur auf dem Innenring im Frequenzbereich zu einer Anhebung der Innenring-Überrollfrequenz f_{IR} sowie ihrer höheren Ordnungen und der zugeordneten Seitenbänder führt. Deshalb wird auch für die Strukturen auf Außenring und Wälzkörper eine Spektralanalyse durchgeführt, deren Ergebnis in Abbildung 6.49 dargestellt ist. Bei der Konfiguration mit strukturiertem Außenring sind die Außenring-Überrollfrequenz f_{AR} und ihre höheren Ordnungen angehoben, Seitenbänder sind nicht erkennbar. Bei strukturiertem Wälzkörper sind keine diskreten Frequenzen erhöht, aber rund um die Wälzkörper-Überrollfrequenz f_{WK} und ihre höheren Ordnungen ist eine breitbandige Erhöhung des Spektrums sichtbar. Eine mögliche Erklärung ist, dass es sich dabei um verschmierte Seitenbänder handelt. Der Zeitabstand der Gruppen von Überrollungen ist nicht konstant, wie in Abschnitt 6.7.2 gezeigt wird. Dementsprechend werden die Überrollungen nicht durch eine konstante Frequenz moduliert, und es treten auch keine Seitenbänder mit fester Frequenz auf. Für die Erkennung von Schäden ist diese Verschmierung ungünstig. Deshalb werden, wie schon bei der Versuchsreihe mit variabler Geometrie, ausschließlich Ansätze im Zeitbereich für die quantitative Analyse verwendet.

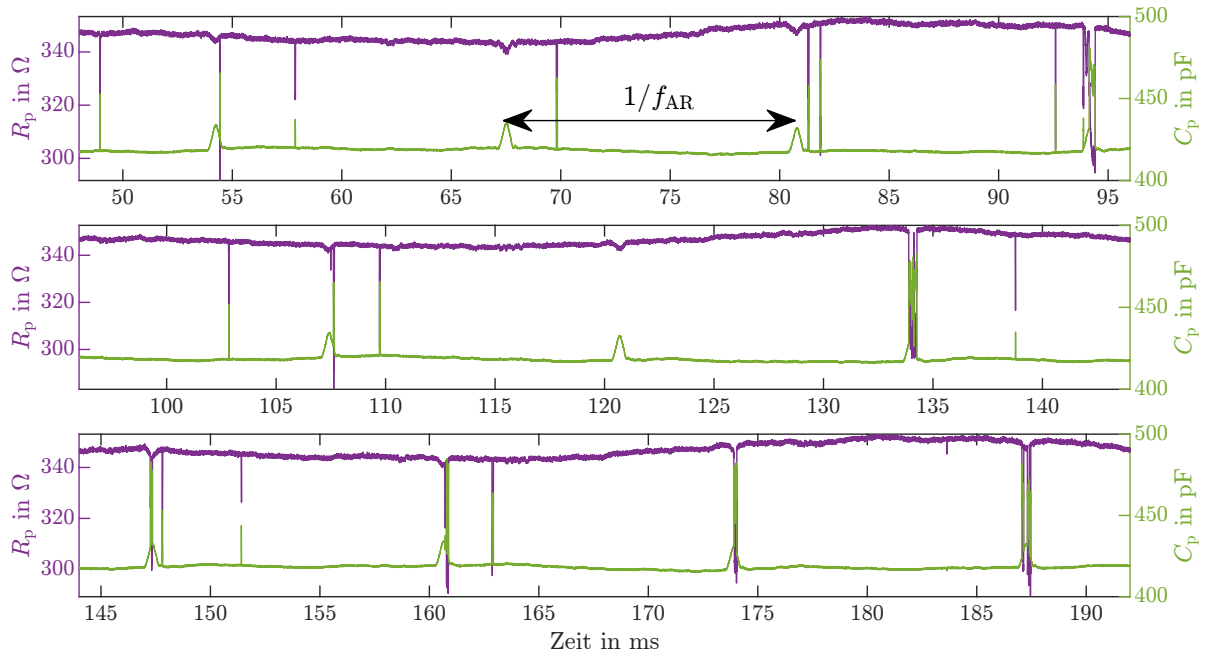


Abbildung 6.46.: Verlauf von R_p und C_p der Konfiguration K9 bei Versuchspunkt VP114 ($F_r = 3500 \text{ N}$, $T = 40^\circ\text{C}$, $n = 1250 \text{ min}^{-1}$). Jede Zeile entspricht einer Umdrehung des Innenrings.

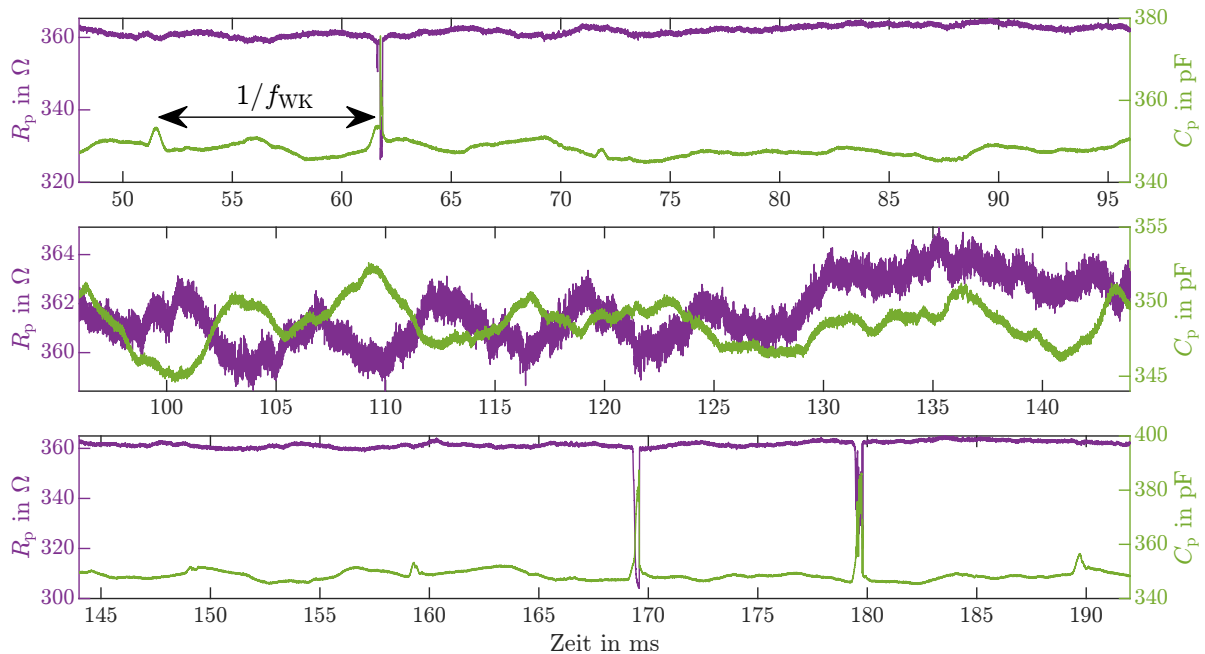


Abbildung 6.47.: Verlauf von R_p und C_p der Konfiguration K10 bei Versuchspunkt VP114 ($F_r = 3500 \text{ N}$, $T = 40^\circ\text{C}$, $n = 1250 \text{ min}^{-1}$). Jede Zeile entspricht einer Umdrehung des Innenrings.

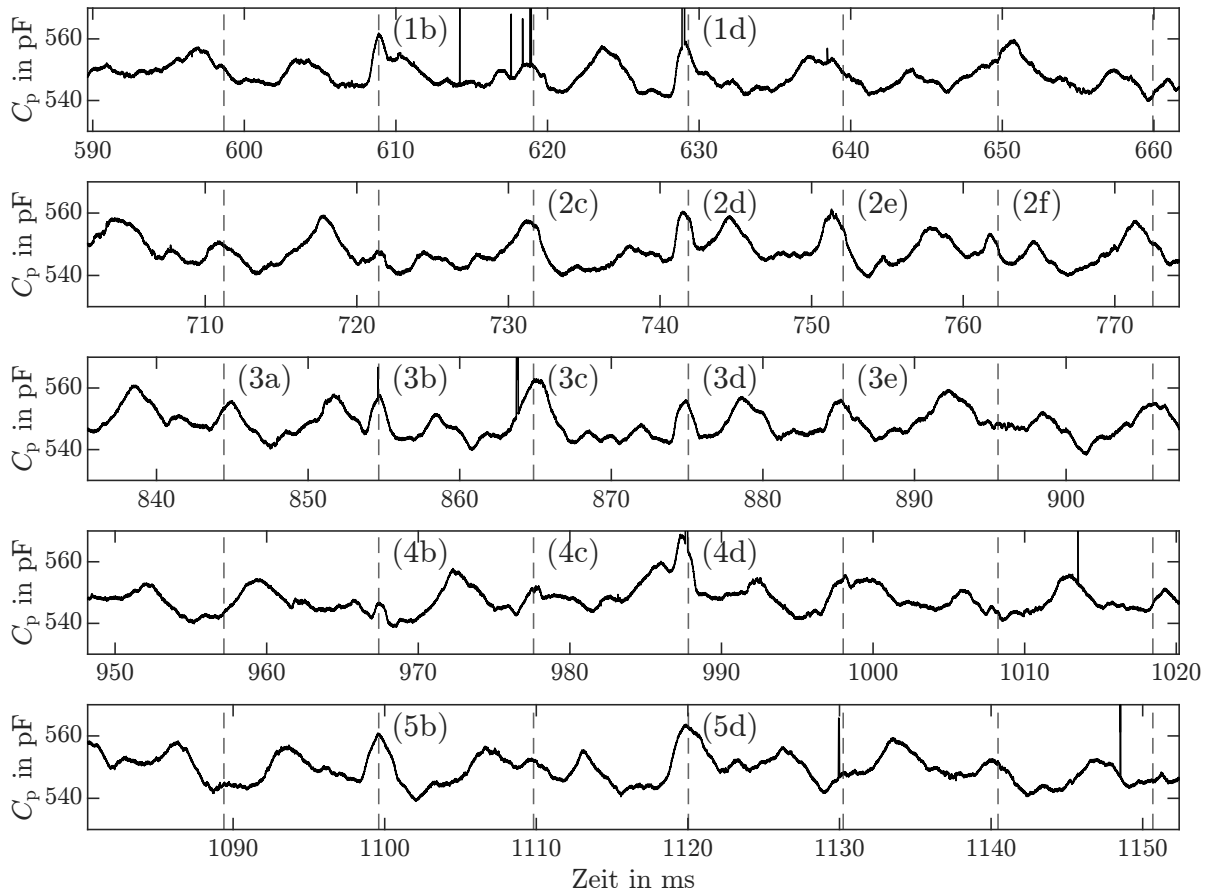


Abbildung 6.48.: Detailansicht mehrerer Gruppen von Ausschlägen in der Konfiguration mit Struktur auf einem Wälzkörper. Jede Zeile entspricht 1,5 Umdrehungen des Innenrings.

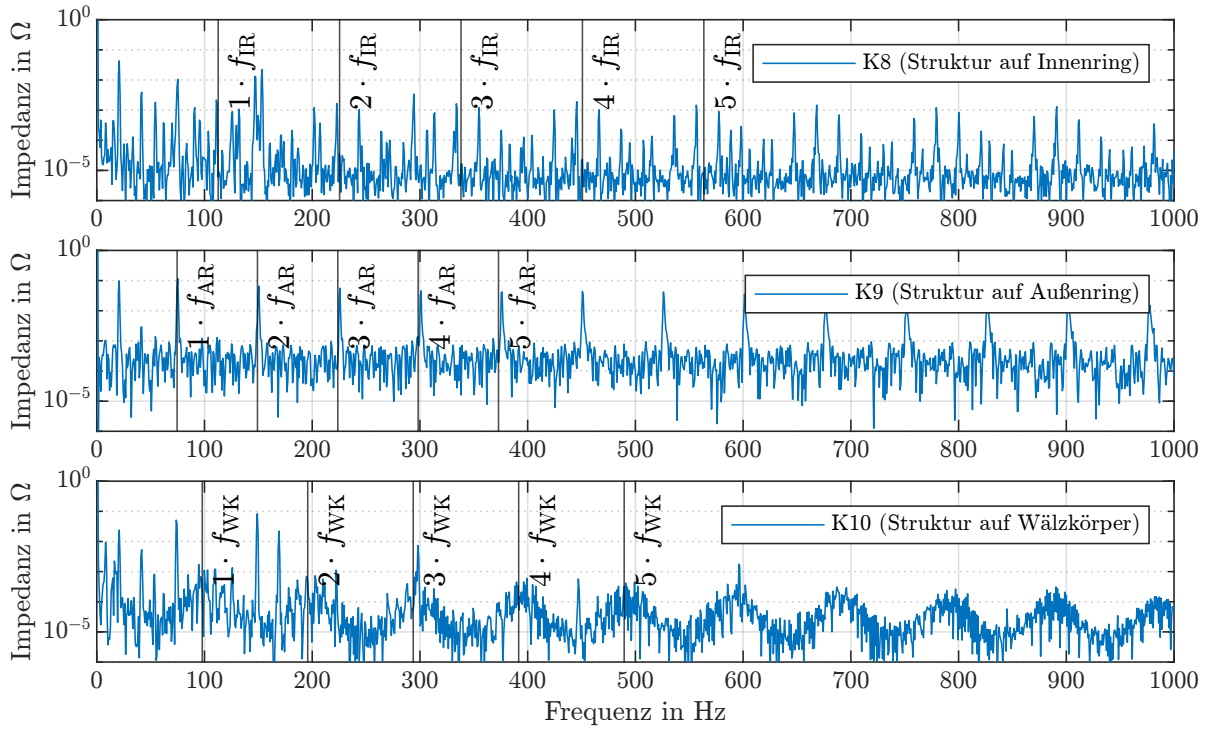


Abbildung 6.49.: Impedanzspektren der Konfigurationen K8, K9 und K10 in Versuchspunkt 114 ($F_r = 3500 \text{ N}$, $T = 40 \text{ °C}$, $n = 1250 \text{ min}^{-1}$)

6.7.2. Quantitative Analyse des Abstands der Ausschläge

Ziel dieses Abschnitts ist die Modellierung des Zusammenhangs zwischen der Lokalisierung von Oberflächenabweichungen und der Impedanz. Wie in Abschnitt 6.4 beschrieben, ist es zweckdienlich, einfache Metriken aus der Impedanz abzuleiten und diese in Bezug zu den Einflussfaktoren des Versuchsplans zu setzen. Da in Abschnitt 6.7.1 bereits gezeigt wurde, dass der Abstand der Ausschläge in Verbindung mit den rechnerischen Überrollfrequenzen steht, wird dieser Ansatz weiter verfolgt. Als Referenz für die Bestimmung des Abstands zweier Ausschläge wird das Ende des Ausschlags t_2 verwendet, vgl. Abbildung 6.24. Genauso möglich wäre die Verwendung des Beginns t_1 oder des Zeitpunkts des Maximums t_m . Hier wird t_2 verwendet, weil dieser Zeitpunkt durch das lokale Minimum des Imaginärteils in den meisten Messungen präzise bestimmt werden kann. Der Zeitabstand t_a für zwei im Datensatz aufeinanderfolgende Ausschläge i und j ist damit

$$t_a = t_{2,j} - t_{2,i}. \quad (6.34)$$

Um den Einfluss der Drehzahl zu kompensieren, wird dieser Wert auf die Drehzahl des Innenrings f_n bezogen und damit für zwei im Datensatz aufeinanderfolgende Ausschläge die dimensionslose Metrik

$$t_a^* = (t_{2,j} - t_{2,i}) f_n \quad (6.35)$$

definiert. Zwei im Datensatz aufeinanderfolgende Ausschläge sind nicht immer auch zwei tatsächlich im Zeitsignal aufeinanderfolgende Ausschläge. Ein Grund liegt in der Auswer-

tung, denn bei den Versuchen mit strukturiertem Innenring wurde immer nur ein Ausschlag je Umdrehung ausgewertet. Zudem macht die Störung des Signals durch schnelle Ausschläge die Bestimmung von t_2 in einigen Fällen unmöglich, diese Ausschläge gehen dann nicht in den Datensatz ein. Abbildung 6.50 zeigt die Werte von t_a^* für alle ausgewerteten Ausschläge der drei betrachteten Konfigurationen. Zudem werden als Referenz die theoretisch erwarteten Überroll-Periodendauern t_{IR}^* , t_{AR}^* und t_{WK}^* , die durch

$$t_{IR}^* = \frac{f_n}{f_{IR}}, \quad t_{AR}^* = \frac{f_n}{f_{AR}} \quad \text{und} \quad t_{WK}^* = \frac{f_n}{f_{WK}} \quad (6.36)$$

definiert sind, und ihre Ordnungen dargestellt. Sie markieren den Abstand der Ausschläge, der aufgrund der rechnerischen Überrollfrequenzen zu erwarten ist. Für die Konfigurationen mit Struktur auf dem Innen- und Außenring liegen alle Werte von t_a^* bei Vielfachen der theoretischen Überroll-Periodendauern, wobei leichte Abweichungen von diesem Raster durch toleranzbedingte Abweichungen der tatsächlichen Überrollfrequenzen von den theoretischen Werten erklärbar sind. Im Gegensatz dazu folgen für die Konfiguration mit strukturiertem Wälzkörper nur die niedrigen Werte von t_a^* dem Raster, die höheren Werte richten sich nicht mehr nach den theoretischen Periodendauern. Der Abstand unmittelbarer Überrollungen, also der Ausschläge innerhalb einer Gruppe, entspricht also ungefähr den theoretisch erwarteten Werten. Über mehrere Überrollungen hinweg schwankt die Überrollfrequenz aber offensichtlich.

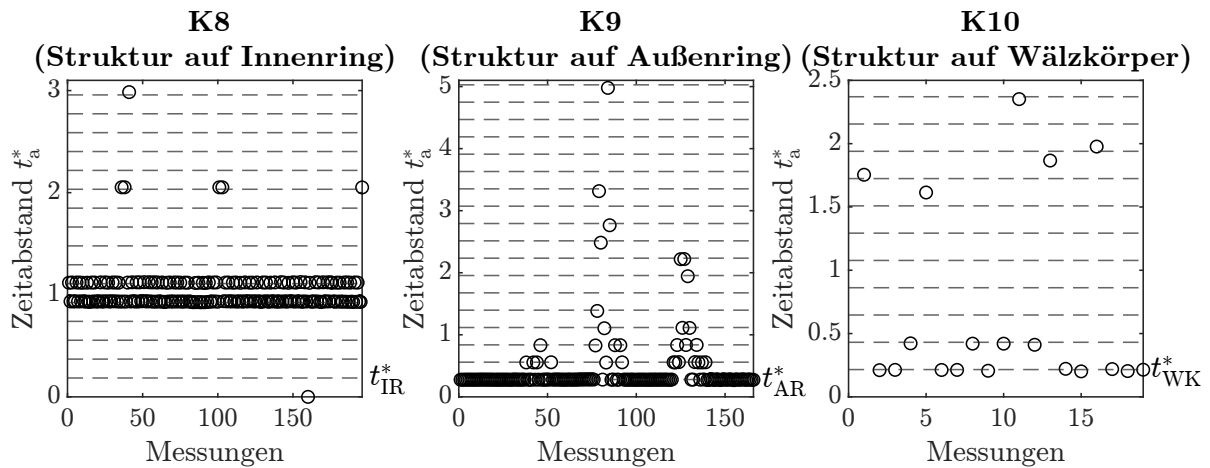


Abbildung 6.50.: Werte von t_a^* für alle ausgewerteten Messungen der Konfigurationen K8, K9 und K10

Abschließend ist festzuhalten, dass mit dem Abstand der Ausschläge ein aussagekräftiges Mittel zur Verfügung steht, um Oberflächenveränderung dem Innen- oder Außenring zuzuordnen. Für Schäden auf den Wälzkörpern ist die Interpretation dieser Metrik erschwert, prinzipiell aber ebenfalls möglich.

6.7.3. Übertragung des Impedanzmodells auf Außenring und Wälzkörper

In diesem Abschnitt soll, analog zum Vorgehen bei der Verifizierung in Abschnitt 6.5.4, geprüft werden, ob die am Innenring erarbeiteten Modellzusammenhänge auch für Oberflächenabweichungen an Außenring und Kugeln gültig sind.

Die qualitative Analyse der Impedanzsignale in Abschnitt 6.7.1 hat bereits gezeigt, dass die Ausschläge bei einer Struktur auf einem Wälzkörper keine regelmäßige Form aufweisen, was vermutlich im Zusammenhang mit Bohrbewegungen der Kugel steht. Auch die Identifikation einer höchstbelasteten Überrollung, wie es für die Versuche mit Strukturen am Innenring möglich war, ist anhand der Daten nicht möglich. Somit ist die Voraussetzung, Überrollungen bei gleichen Verhältnissen als Basis für die Effektanalyse verwenden zu können, für die Konfiguration mit strukturierter Kugel nicht gegeben. Hier kann nur festgehalten werden, dass bei der Überrollung der Struktur charakteristische Ausschläge auftreten, die in ihrem prinzipiellen Verlauf ähnlich zu den bisher untersuchten Ausschlägen sind. Das grundsätzliche physikalische Verhalten ist also vermutlich ähnlich, eine genauere quantitative Untersuchung ist allerdings nicht möglich.

Für die Versuche am Außenring kann dagegen die Effektanalyse durchgeführt werden. Bei der Modellverifikation in Abschnitt 6.5.4 hat sich bereits gezeigt, dass die erarbeiteten Regressionsmodelle als Vorhersagemodelle nicht tauglich sind, aber die Effekte und die physikalische Interpretation auch bei abweichender Strukturgeometrie gültig sind. Deshalb werden im Folgenden nur die Effekte der Betriebsbedingungen und der Blockzugehörigkeit bestimmt.

Abbildung 6.51 zeigt einen Vergleich der Effekte in der Konfiguration K8 (Struktur auf dem Innenring) mit der Struktur K9 (Struktur auf dem Außenring). Bei den Metriken $\Delta\text{Im}(Z)$, $\Delta\text{Re}(Z)$, ΔR_p , und ΔC_p , also der Höhe langsamer Ausschläge, unterscheiden sich die Effektstärken deutlich, aber die Vorzeichen und die relative Stärke der Faktoren ändern sich nicht. Beim Wälzweg Δl unterscheidet sich nur ein Effekt signifikant, es handelt sich um den Effekt der Kraft. Nach dem in Abschnitt 6.5.1 entwickelten physikalischen Modell ist das auch zu erwarten. Dem Modell zufolge sollte der Effekt der Radiallast anhand der Abmessungen der Hertz'schen Fläche berechenbar sein. In Abbildung 6.51 sind deshalb auch die rechnerischen Differenzen der Hertz'schen Fläche am Außen- und Innenring nach Tabelle 6.2 und Tabelle 6.8 dargestellt. Die rechnerischen Effekte liegen innerhalb der Vertrauensintervalle der experimentellen Effekte. Deshalb kann die am Innenring erarbeitete physikalische Erklärung, dass der Effekt der Last auf der Vergrößerung der Hertz'schen Fläche beruht, auch am Außenring als gültig betrachtet werden.

Hinsichtlich der Übertragbarkeit der am Innenring gesammelten Erkenntnisse auf eine Struktur am Außenring und auf einem Wälzkörper können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden: Der qualitative Verlauf aller drei Varianten ist ähnlich, für den Außenring konnte zudem gezeigt werden, dass die Faktoren eine ähnliche Wirkung auf Dauer und Höhe der Ausschläge besitzen. Daraus wird schlussgefolgert, dass das Verhalten prinzipiell den gleichen Gesetzmäßigkeiten folgt. Bezüglich der Dauer von Ausschlägen ist sogar ein quantitativ sehr ähnliches Verhalten zu konstatieren, auch das erarbeitete

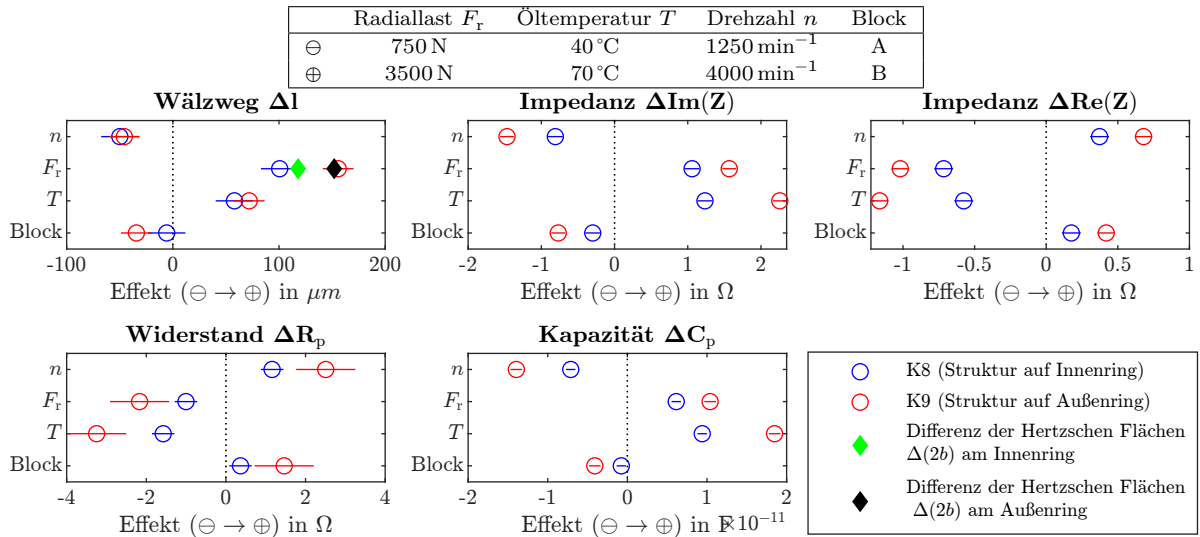


Abbildung 6.51.: Vergleich der Effekte von F_r , T , n und b_k für Konfigurationen K8 (blau) und K9 (rot).

physikalische Modell zur Kompensation des Einflusses der Last konnte bestätigt werden. Bei der Höhe langsamer und schneller Ausschläge treten dagegen deutliche quantitative Abweichungen auf, die anhand der bisherigen Erkenntnisse nicht erklärbar sind.

6.8. Erkenntnisse der Versuche mit künstlichen Oberflächenstrukturen

Das Ziel der in diesem Kapitel beschriebenen Versuche war die Modellierung des Zusammenhangs zwischen der Geometrie und Lokalisierung künstlich eingebrachter Oberflächenabweichungen und der Wälzlagerimpedanz. Die Untersuchung zerfällt in zwei Teile, die Geometrie und die Lokalisierung wurden getrennt untersucht.

Im ersten Teil wird der Zusammenhang zwischen der Geometrie von Oberflächenabweichungen, den Betriebsbedingungen und der Blockzugehörigkeit im Versuchsplan, sowie der Wälzlagerimpedanz untersucht. Ein Ziel der Modellierung war die Erstellung von Regressionsmodellen, die die Werte der Metriken in Abhängigkeit der Einflussparameter vorhersagen können. Zwar konnte innerhalb der verwendeten Datensätze eine hohe Modellgüte erreicht werden, insbesondere für die Höhe langsamer Ausschläge. Die Verifizierung zeigte allerdings, dass die Modelle für eine Struktur mit leicht veränderter Oberfläche und größerer Strukturtiefe nicht mehr gültig sind. Deshalb ist die Übertragbarkeit dieser Modelle auf andere Strukturen oder gar auf reale Schäden äußerst fraglich. Des weiteren wurden durch Analyse der Effekte die wesentliche Einflussgrößen sowie ihre Effektstärken und -unsicherheiten identifiziert, sowie physikalische Hypothesen zu den Wirkmechanismen entwickelt. Die abgeleiteten Erkenntnisse können im Wesentlichen auch nach der Verifizierung aufrechterhalten werden.

- Die Dauer eines Ausschlags, quantifiziert als Wälzweg, hängt hauptsächlich von der Strukturlänge und der Last und zusätzlich von der Drehzahl und Temperatur ab. Die Breite und Tiefe sowie die Mikrogeometrie besitzen nur geringen oder keinen Einfluss. Damit erscheint diese Metrik prinzipiell gut geeignet, um bei konstanten Betriebsbedingungen auf den Fortschritt eines Schadens entlang der Laufbahn zu schließen und bei bekannter Last auch eine direkte Messung der Länge eines Schadens durchzuführen. Eine große, nicht durch die Faktoren und nicht durch rein zufällige Effekte erklärable Streuung der Messergebnisse muss weiter untersucht werden, wobei der Einfluss der Position der Wälzkörper in der Lastzone eine plausible Erklärungshypothese ist. Der Einfluss der Strukturlänge und der Last kann, auch quantitativ, durch ein einfaches physikalisches Modell der Überrollung erklärt werden. Die Erkenntnis gilt für Außenring und Innenring, bei Schäden auf einer Kugel ist die Dauer aufgrund der Bohrbewegung der Kugel deutlich unregelmäßiger.
- Während einer Überrollung steigt die Kapazität. Dies steht im Gegensatz zu den Beobachtungen während der Dauerversuche, vgl. Abschnitt 5.3.2 und ist vermutlich auf die erhöhte Oberflächenrauheit im Bereich der Strukturen zurückzuführen. Der physikalische Hintergrund konnte nicht endgültig geklärt werden, vermutlich ist eine Verringerung der Schmierfilmdicke aufgrund der Oberflächenstruktur zu verzeichnen. Die Kapazität als integrale Größe kann somit Aufschluss über Veränderungen der Schmierfilmdicke in der gesamten Kontaktfläche geben. Der Widerstand des Lagers zeigt nur eine sehr kleine Veränderung während einer Überrollung.
- Das Auftreten schneller Ausschläge wird von einer kleinen Schmierfilmdicke und einer rauen Mikrogeometrie begünstigt. Ob es sich bei den schnellen Ausschlägen um elektrische Durchschläge oder metallischen Kontakt handelt, konnte nicht endgültig geklärt werden. In jedem Fall ist das Auftreten schneller Ausschläge ein Hinweis auf einen geringen Abstand der Rauheitsspitzen der Kontaktpartner. Im Gegensatz zur Kapazität bei langsamen Ausschlägen, die eine integrale Information über den mittleren Abstand der Kontaktpartner gibt, ist ein starker Abfall des Widerstands also ein Hinweis auf eine lokale Änderung der Schmierfilmdicke.

Durch diese Erkenntnisse wird die Forschungsfrage 2 – quantitative und physikalische Zusammenhänge zwischen der Geometrie von Oberflächenabweichungen und der Impedanz – beantwortet.

Im zweiten Teil der Modellierung wurde untersucht, wie die Wälzlagerimpedanz mit der Lokalisierung eines Schadens auf Innenring, Außenring oder Wälzkörper zusammenhängt. Der Ansatzpunkt sind wiederum die Ausschläge, die im Zusammenhang mit Überrollungsereignissen auftreten. Der zeitliche Abstand der Ausschläge kann über die rechnerischen Überrollfrequenzen direkt mit der Lokalisierung des Schadens verknüpft werden. Mit diesen Erkenntnissen ist auch Forschungsfrage 3 – quantitative und physikalische Zusammenhänge zwischen der Lokalisierung von Oberflächenabweichungen und der Impedanz – beantwortet.

Abschließend ist der Gültigkeitsbereich der Erkenntnisse zu würdigen. Aufgrund des gewählten Fertigungsverfahrens ist Rauheit im strukturierten Bereich in der gleichen Größenordnung wie die Strukturtiefe und die Schmierfilmdicke. Reale Pittings sind deutlich tiefer, vgl. Abbildung 5.1. Diese Abweichung äußert sich in den Messergebnissen darin, dass die Kapazität des Kontakts im strukturierten Bereich ansteigt, während sie bei der Überrollung realer Pittings sinkt, vgl. Abbildung 5.5. Das deutet darauf hin, dass bei realen Pittings ein anderer physikalischer Mechanismus zur Impedanzänderung führt und wird im folgenden Kapitel in Abschnitt 7.2 nochmals untersucht.

7. Validierung des Modells anhand der Lebensdauerversuche

In Kapitel 6 wurde ein *Modell der Messung* entwickelt, das die Zusammenhänge zwischen Wälzlagerimpedanz und künstlich eingebrachten Oberflächenstrukturen beschreibt. In diesem Kapitel wird untersucht, ob mithilfe dieses Modells bereits relevante Informationen über Geometrie und Lokalisierung realer Oberflächenschäden aus dem Impedanzsignal abgeleitet werden können. Im Sinne der in Abschnitt 5.5 eingeführten messtechnischen Terminologie wird das Modell damit als *Modell der Auswertung* angewandt und damit, zumindest stichprobenartig, auch hinsichtlich seiner Eignung zum Zweck der Zustandsüberwachung validiert.

Hierfür werden die Versuchsergebnisse der Lebensdauerversuche, die in Kapitel 5 bereits vorgestellt wurden, nochmals mit den Mitteln und Erkenntnissen analysiert, die in Kapitel 6 erarbeitet wurden. In Abschnitt 7.1 werden die Erkenntnisse zum Auftreten schneller Ausschläge auf die Dauerversuche angewendet. Die Metriken zur Beschreibung langsamer Ausschläge werden in Abschnitt 7.2 anhand der Daten des Schadensfortschritts validiert.

7.1. Auftreten schneller Ausschläge in Lebensdauerversuchen

In Abschnitt 6.4.1 und 6.5.3 wurde herausgearbeitet, dass das Auftreten schneller Ausschläge auf einen dünnen Schmierfilm und deshalb auftretende metallische Kontakte oder elektrische Durchschläge zurückzuführen ist. In den Lebensdauerversuchen traten schnelle Ausschläge während der Einlaufphase, kurz vor dem Initialschaden und während des gesamten Schadensfortschritts auf, vgl. Abschnitt 5.3.1 und 5.3.2. Abbildung 7.1 zeigt nochmals das Impedanzsignal zu vier Zeitpunkten für eine repräsentative Messung. Aus den Erkenntnissen von Kapitel 6 können nun physikalische Erklärungen dieser Ausschläge abgeleitet werden.

Wie bereits bei der ersten Analyse der Dauerversuche in Kapitel 5 werden, im Sinne einer kompakten Darstellung, auch in diesem Abschnitt die Analysen beispielhaft nur für ein Lager durchgeführt, die entsprechenden Darstellungen für die übrigen Lager sind in Anhang A.2 zu finden.

In der Einlaufphase und nach dem Initialschaden treten die schnellen Ausschläge beinahe dauerhaft auf, vgl. Abbildung 7.1. Wie in Kapitel 5 bereits beschrieben wurde, ist dieses Verhalten während der Einlaufphase im Einklang mit der Literatur [44, 25], vgl.

Abschnitt 2.2.3. Eine mögliche Erklärung für das Verhalten unmittelbar nach dem Initialschaden ist, dass infolge der Überrollung des scharfkantigen Pittings Eindrückungen mit Randaufwerfungen auf den Wälzkörpern entstehen. Bei der Überrollung dieser Randaufwerfungen kann es dann zu metallischen Kontakten kommen. In späteren Phasen des Schadensfortschritts treten schnelle Ausschläge nur noch zu Beginn und zum Ende des Überrollungsereignisses auf, vgl. Abbildung 7.1. Vermutlich ist zu diesen Zeitpunkten, wenn die Kanten des Pittings überrollt werden, die minimal auftretende Schmierfilmdicke besonders dünn. Diese Erklärung steht im Einklang mit Simulationsergebnissen von PAUSCH, der insbesondere am Ende eines Überrollungsereignisses einen besonders dünnen Schmierfilm beobachtete [68]. Für die regelmäßigen schnellen Ausschläge vor dem Initialschaden kann vor diesem Hintergrund die Vermutung aufgestellt werden, dass zu diesem Zeitpunkt bereits ein erstes kleines Partikel ausgebrochen ist und dadurch eine scharfe Kante entsteht, bei deren Überrollung es zu einem Zusammenbruch des Schmierfilms kommt.

Zusammenfassend ist es es möglich, das Verhalten schneller Ausschläge in den Lebensdauerversuchen anhand der Erkenntnisse aus der Modellierung in Kapitel 6 zu erklären. Zum besseren Verständnis, insbesondere der schnellen Ausschläge vor dem Initialschaden, die möglicherweise einen Frühindikator für die Entstehung von Pittings darstellen, sind weitere experimentelle oder numerische Untersuchungen nötig. Vorschläge hierfür werden in Kapitel 8 diskutiert.

Die Zeitverläufe der übrigen Lager in Anhang A.2 zeigen ein ähnliches Verhalten. Einzelne Abweichungen wurden bereits in Abschnitt 5.3.2 diskutiert und werden an dieser Stelle nicht wiederholt, sondern lediglich das Ergebnis zusammengefasst: Das Einlaufverhalten konnte bei allen Lagern beobachtet werden, das Verhalten bei der Entstehung von Pittings ist weniger einheitlich, insgesamt sind die hier diskutierten Messungen aber repräsentativ für alle Lager. Somit sind auch die Analysen repräsentativ für die fünf in dieser Arbeit durchgeführten Versuche.

7.2. Anwendung der Metriken während des Schadensfortschritts

Bei der ersten Analyse der Dauerversuche wurde in Abschnitt 5.3.2 bereits festgestellt, dass nach dem Auftreten des Initialschadens langsame Ausschläge im Signal auftreten, und dass die Dauer dieser Ausschläge während des Schadensfortschritts ansteigt.

Zunächst werden in Abbildung 7.4 repräsentative Ausschläge zu verschiedenen Zeitpunkten des Schadensfortschritts für Lager 1 gezeigt. Die Ausschläge bestehen einerseits aus den bereits analysierten schnellen Ausschlägen, vgl. Abbildung 7.1. Andererseits ist ein Absinken des Real- und Imaginärteils der Impedanz zu beobachten, das den eigentlichen langsamen Ausschlag bildet. Der Beginn t_1 und das Ende t_2 dieser langsamen Ausschläge sind in den Darstellungen markiert. Entsprechende Darstellungen typischer Ausschläge während des Schadensfortschritts für die Lager 2,3 und 5 sind in Anhang A.3 zu finden. Bei Lager 4 sind zwar Ausschläge im Signal sichtbar, vgl. Abbildung 7.2,

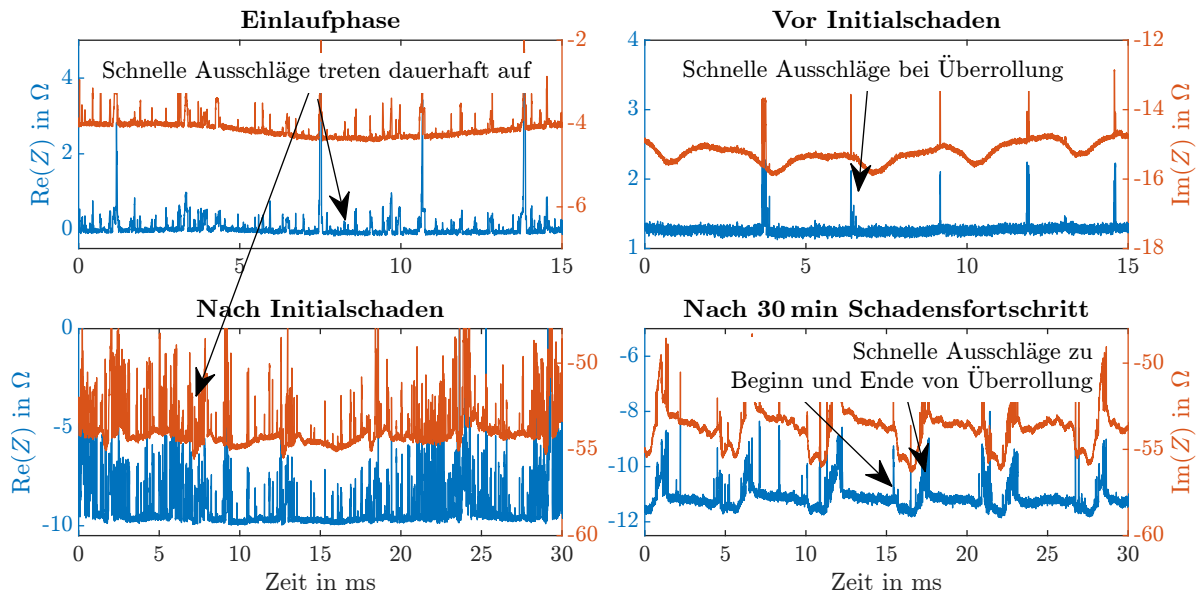


Abbildung 7.1.: Schnelle Ausschläge in verschiedenen Phasen der Wälzlagerlebensdauer (Lager 1)

allerdings kann kein klarer Anfangs- und Endpunkt definiert werden. Deshalb können für den Schadensfortschritt in Lager 4 keine langsamen Ausschläge analysiert werden.

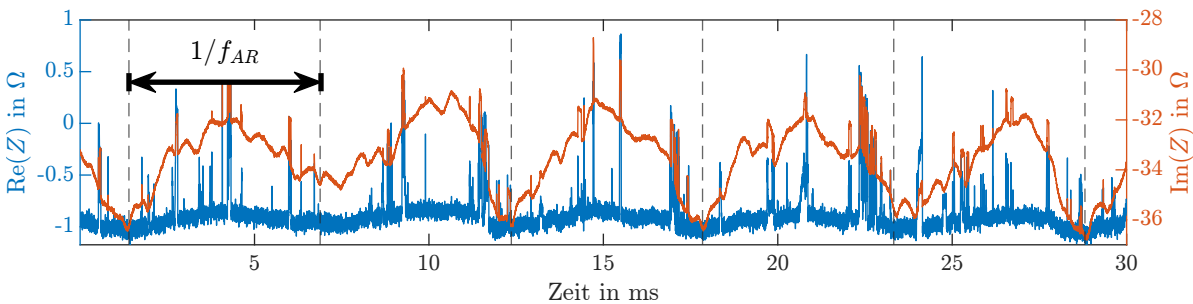


Abbildung 7.2.: Impedanzsignal bei Lager 4 nach 30 min Schadensfortschritt

Ein möglicher Grund für dieses abweichende Verhalten bei Lager 4 liegt in der großen Länge des Schadens, wie im Folgenden erläutert wird. In Abbildung 7.3 ist schematisch ein Schaden dargestellt, dessen Länge l_p größer ist als der Abstand der Wälzkörper. In diesem Fall ist der Schaden permanent im Kontakt mit mindestens einem Wälzkörper. Es ist plausibel, dass in diesem Zustand keine klar abgegrenzten Ausschläge im Impedanzsignal auftreten. Um dies mathematisch zu beschreiben, wird zunächst der Winkel

$$\varphi_{\text{WK}} = \frac{2\pi}{z} \quad (7.1)$$

eingeführt, der den Winkelabstand der Wälzkörper beschreibt, hierbei ist z die Anzahl der Wälzkörper. Der Abstand der Kontaktpunkte zwischen Wälzkörpern und Außenring

l_{WK} kann mit dem Durchmesser des Laufbahndurchmesser des Außenrings d_{AR} zu

$$l_{\text{WK}} = d_{\text{AR}} \cdot \varphi_{\text{WK}} \quad (7.2)$$

berechnet werden. Für den Wälzkörperabstand auf dem Innenring gilt entsprechend

$$l_{\text{WK}} = d_{\text{IR}} \cdot \varphi_{\text{WK}}. \quad (7.3)$$

Ist die Länge des Schadens l_p größer als der Abstand der Wälzkörper l_{WK} , dann ist zu jedem Zeitpunkt mindestens ein Wälzkörper im geschädigten Bereich.

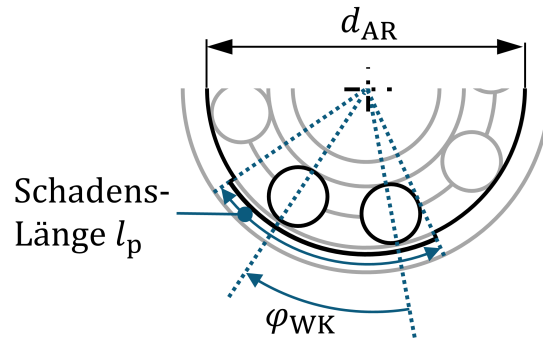


Abbildung 7.3.: Überrollung eines Schadens auf dem Außenring durch zwei Wälzkörper

In Tabelle 7.1 werden die aus Tabelle 5.3 entnommenen Schadenslängen den Wälzkörperabständen gegenübergestellt. Die Wälzkörperabstände wurden mithilfe der in Tabelle C.1 im Anhang angegebenen Werte berechnet. Für Lager 1 und 2 bleibt der Schaden deutlich kleiner als der Wälzkörperabstand. Bei Lager 3, 4 und 5 ist der Schaden größer als der Wälzkörperabstand. Besonders groß ist die Überschreitung bei Lager 4, also dem Lager, in dem keine klar abgrenzbaren Ausschläge festgestellt werden konnten. Möglich ist, dass aufgrund der höheren Last (vgl. hierzu Abschnitt 5.2) der Schaden sehr schnell fortgeschritten ist, und deshalb bereits zu einem frühen Zeitpunkt die Länge des Schadens größer als der Wälzkörperabstand war.

Lfd. Nr. Lager	l_p	l_{WK}
1 (Außenring)	4,54 mm	10,64 mm
2 (Außenring)	5,09 mm	10,64 mm
3 (Innenring)	10,1 mm	7,97 mm
4 (Außenring)	18,3 mm	10,64 mm
5 (Innenring)	8,14 mm	7,97 mm

Tabelle 7.1.: Vergleich der Wälzkörperabstände l_{WK} mit den gemessenen Längen der Pittings l_p nach dem Schadensfortschritt.

Für die langsamen Ausschläge werden nun die Ausschlagshöhe des Real- und Imaginärteils der Impedanz $\Delta\text{Im}(Z)$ und $\Delta\text{Re}(Z)$ sowie die Dauer der Ausschläge als Wälzweg Δl bestimmt. Für jede Messung werden zehn Ausschläge ausgewertet. In den Abbildungen

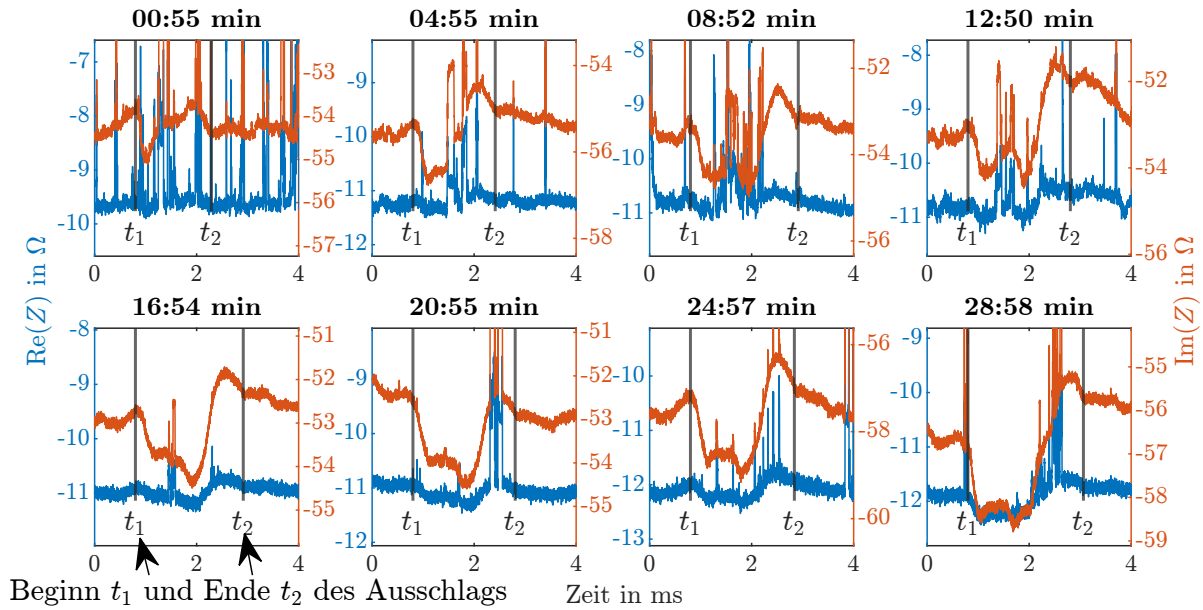


Abbildung 7.4.: Ausschläge während des Schadensfortschritts in Lager 1

sind jeweils der Mittelwert und die Standardabweichung, die über diese zehn Ausschläge ermittelt wurden, dargestellt.

Abbildung 7.5 zeigt zunächst den nach (6.14) bzw. (6.15) berechneten Wälzweg während des Schadensfortschritts für alle durchgeführten Dauerversuche. Der Wälzweg steigt vom Beginn bis zum Ende der Messungen weitgehend monoton an, bei Lager 1 und 2 verläuft der Anstieg dabei nicht kontinuierlich, sondern in Sprüngen, die von Plateauphasen unterbrochen sind. Möglicherweise findet zum Zeitpunkt dieser Sprünge eine Vergrößerung des Pittings statt. In Abschnitt 6.5.1 wurde ein physikalisches Modell entwickelt, das die Erhöhung der Strukturlänge mit der Erhöhung des gemessenen Wälzwegs verknüpft. Entsprechend diesem Modell müsste der anhand der Impedanz bestimmte Wälzweg zu Beginn und Ende des Schadensfortschritts mit den Abmessungen des Pittings zu den jeweiligen Zeitpunkten übereinstimmen. In Abbildung 7.5 werden deshalb auch die vor und nach dem Schadensfortschritt gemessenen Längen der Pittings dargestellt.

Bei Lager 1, 2 und 5 liegen die vor dem Versuch gemessenen Längen der Pittings deutlich unter den aus der Impedanz berechneten Werten. Bei Lager 3 konnten in den ersten Minuten keine markanten Ausschläge identifiziert werden, sodass auch hier keine Übereinstimmung festgestellt werden kann. Eine mögliche Erklärung für die Abweichungen bei den Lagern 1, 2 und 5 ist, dass die Pitting bereits vor der ersten Messung weiter gewachsen sind und die tatsächliche Größe des Pittings während der ersten Messung deshalb nicht mit der gemessenen Größe übereinstimmt. Obwohl Maßnahmen ergriffen wurden, um eine möglichst kurze Zeit zwischen Versuchsstart und erster Impedanzmessung zu erreichen, ist es unvermeidbar, dass vor der ersten Messung bereits einige hundert überrollungen unter hoher Last stattfinden. Um dies zu überprüfen, wurden für Lager 1 weitere Messpunkte zu Beginn des Versuch ausgewertet. Es zeigt sich, dass der gemessene

sene Wälzweg gerade zu Beginn des Versuchs schnell ansteigt, sodass eine Vergrößerung innerhalb der ersten Sekunden zumindest möglich erscheint.

Am Ende des Versuchs stimmen die gemessene Länge der Pittings und der aus dem Impedanzsignal berechnete Wälzweg bei Lager 1 und Lager 2 gut überein. Die Abweichung bei Lager 5 liegt in einem Bereich, der dem Schadensfortschritt in ca. fünf Minuten entspricht. Es ist möglich, dass der Schaden in der Zeit nach der letzten ausgewerteten Messung noch weiter fortgeschritten ist. Die Abweichung bei Lager 3 ist deutlich größer. Ob dies auf einen Schadensfortschritt nach der letzten ausgewerteten Messung zurückzuführen ist, oder ob die im Signal identifizierten Ausschläge nicht durch den Schaden verursacht werden, kann nicht weiter aufgeklärt werden. Die Abweichungen zeigen, dass ein vertieftes Verständnis der entstehenden Ausschläge nötig ist, um abgesicherte Aussagen über den Schadensfortschritt zu treffen. Ansätze für weitere Untersuchungen werden in Kapitel 8 diskutiert.

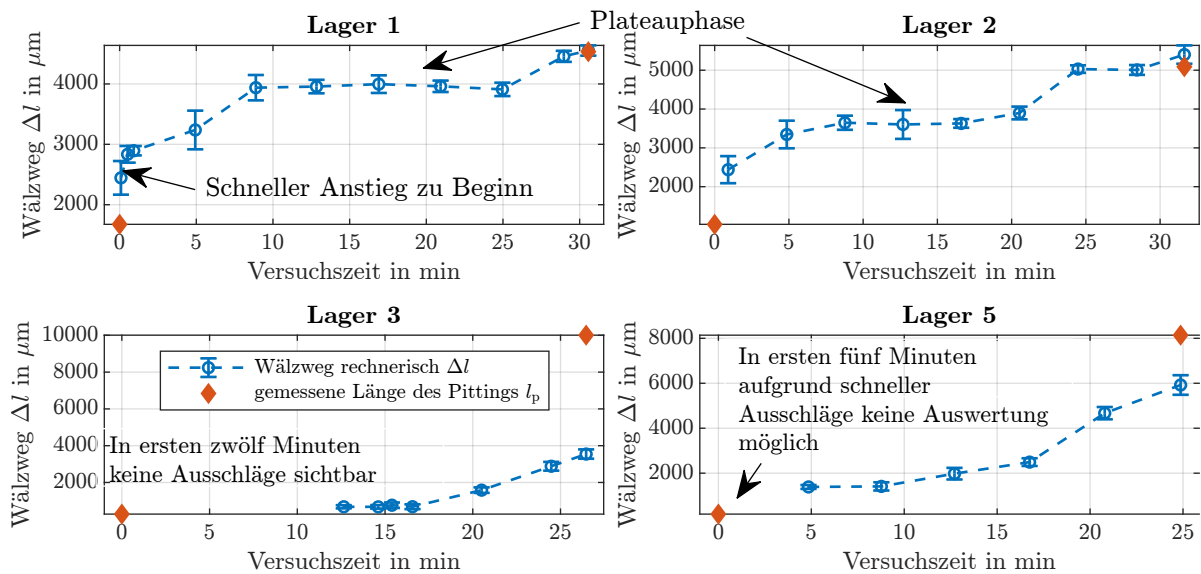


Abbildung 7.5.: Verlauf des Wälzwegs während des Schadensfortschritts für alle durchgeführten Dauerversuche.

Die Höhe der Ausschläge wird in Abbildung 7.6 dargestellt. Bei Lager 1 und Lager 2 ist ein Absinken der Ausschlagshöhen zwischen Beginn und Ende des Schadensfortschritts erkennbar, die Ausschläge werden also stärker. Bei Lager 3 und Lager 5 ist keine Tendenz erkennbar. Das Verhalten von Lager 1 und Lager 2 deutet darauf hin, dass die Ausschlagshöhe unter bestimmten Umständen mit dem Schadensfortschritt verknüpft ist, eine eindeutige Aussage ist hierzu aber nicht möglich.

Abschließend wird nun der zeitliche Abstand der Ausschläge betrachtet. Abbildung 7.7 zeigt den Verlauf des zeitlichen Abstands t_a^* während aller Messungen. In der Abbildung sind zusätzlich die Werte von t_a^* eingetragen, die aufgrund der theoretischen Überrollfrequenzen zu erwarten sind. Sämtliche Werte folgen den theoretisch erwarteten Werten. Somit kann auch bei realen Pittings die Lokalisierung eines Schadens anhand des zeitlichen Abstands der Ausschläge identifiziert werden.

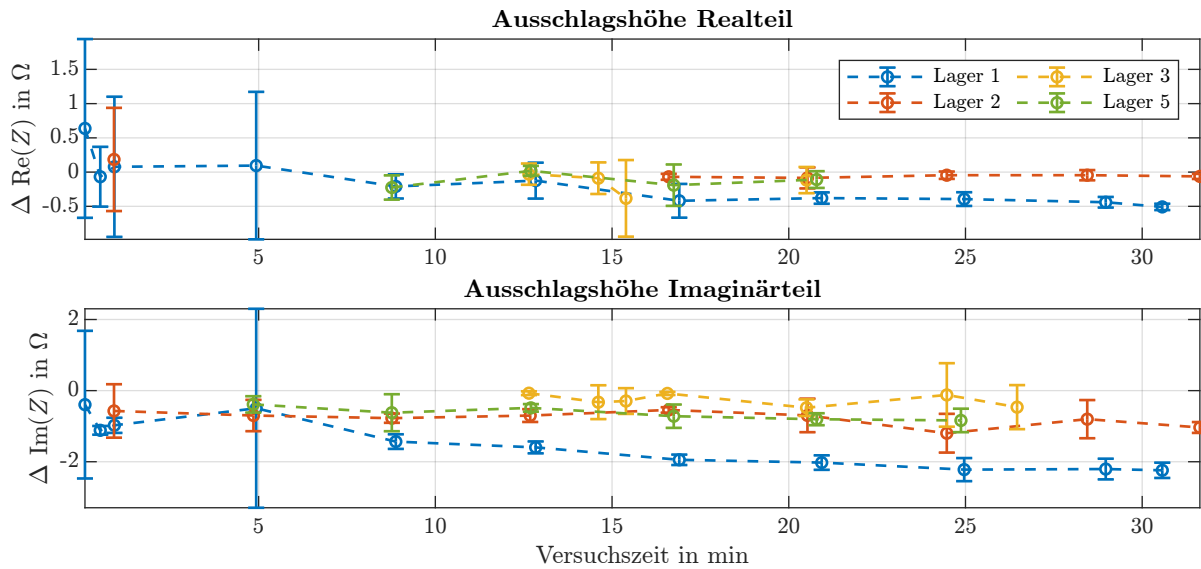


Abbildung 7.6.: Verlauf der Höhe der Ausschläge während des Schadensfortschritts für alle durchgeführten Dauerversuche.

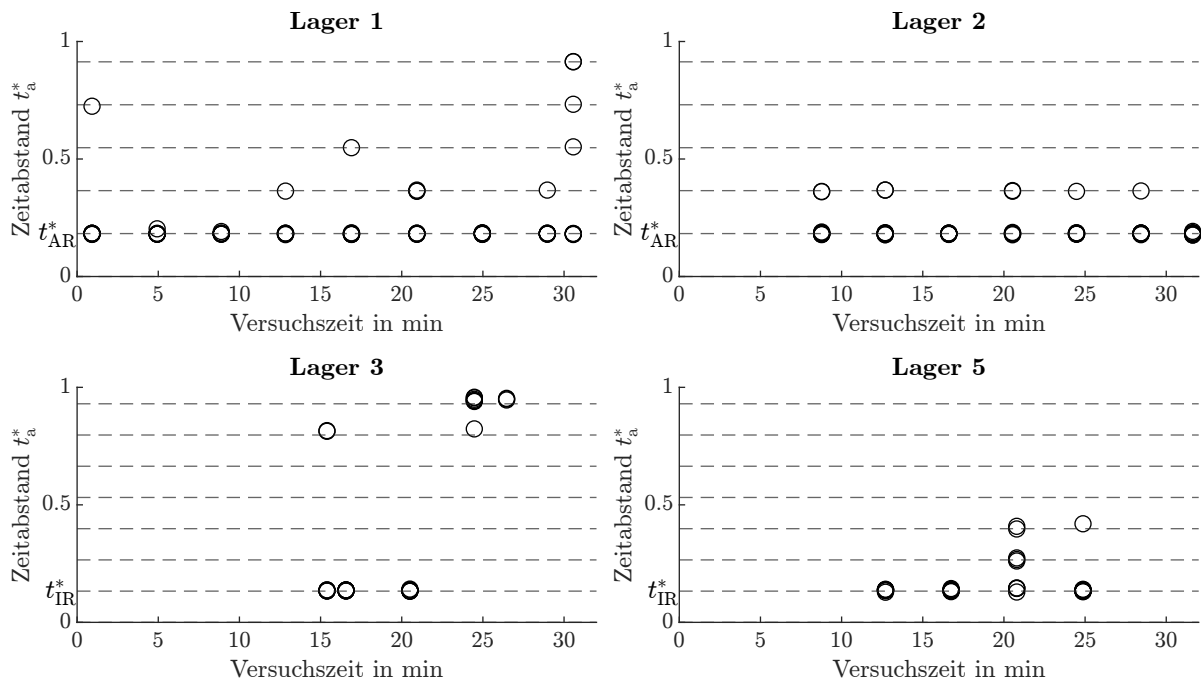


Abbildung 7.7.: Verlauf des zeitlichen Abstands der Ausschläge während des Schadensfortschritts für alle durchgeführten Dauerversuche.

7.3. Erkenntnisse der Validierung

Die Untersuchungen dieses Kapitels dienen der Validierung der Modellierung hinsichtlich Ihrer Anwendbarkeit auf reale Wälzlagerschäden. Durch diese Untersuchung wird auch die letzte Forschungsfrage – Können die Erkenntnisse von FF2 und FF3 auf im realen Lebenslauf eines Rillenkugellagers auftretende Oberflächenveränderungen übertragen werden? – beantwortet.

Zunächst wurden die Erkenntnisse, die bei der Modellierung in Kapitel 6 über das Auftreten schneller Ausschläge in der Wälzlagerimpedanz gesammelt wurden, auf die Dauerversuche angewandt. Es zeigte sich, dass sie geeignet sind, die Beobachtungen in der Einlaufphase sowie vor dem Initialschaden und beim Fortschreiten des Schadens zu erklären. Die Forschungsfrage kann also hinsichtlich der schnellen Ausschläge positiv beantwortet werden.

Im zweiten Schritt wurden die Modelle für den Zusammenhang zwischen Impedanz und der Geometrie sowie Lokalisierung makroskopischer Oberflächenabweichungen auf die Dauerversuche angewandt. Der aus dem Impedanzsignal bestimmte Wälzweg steigt während des Schadensfortschritts monoton an. Er bildet insgesamt den Fortschritt der Schädigung ab, allerdings treten quantitative Abweichungen auf. Hinsichtlich der Dauer von Ausschlägen kann die Forschungsfrage also positiv beantwortet werden.

Der zeitliche Abstand der Ausschläge erweist sich als präzises Maß für die Identifizierung der Lokalisierung von Pittings, damit konnten die Erkenntnisse von Kapitel 6 bestätigt werden. Auch in dieser Hinsicht kann die Forschungsfrage positiv beantwortet werden.

Während des Schadensfortschritts verändert sich auch die Höhe der Ausschläge, allerdings nicht monoton und nicht bei allen Lagern. Hier kann keine eindeutige Aussage darüber getroffen werden, ob Änderungen mit einem Fortschritt des Schadens zusammenhängen. Bereits in Abschnitt 6.5.2 wurde dargestellt, dass der Imaginärteil der Impedanz bei der Überrollung der realen Pittings sinkt, was auf einen dickeren Schmierfilm hindeutet, aber bei der Überrollung der künstlich eingebrachten Oberflächenstrukturen steigt, was auf einen dünneren Schmierfilm hindeutet. Der physikalische Effekt, der in Abschnitt 6.5.2 für die Ausschläge verantwortlich gemacht wurde, kann also die Ausschläge bei der Überrollung realer Pittings nicht erklären. Hinsichtlich der quantitativen Modellierung und der physikalischen Interpretation der Höhe von Ausschlägen muss die Forschungsfrage also negativ beantwortet werden. Im Folgenden wird deshalb ein Ansatz vorgestellt, der das abweichende Verhalten erklären kann.

Das Absinken der Impedanz bei der Überrollung realer Pittings deutet darauf hin, dass eine Vergrößerung des mittleren Abstands der Kontaktpartner auftritt. Diese Erklärung ist plausibel, wenn man die Form der realen Pittings mit den künstlichen Oberflächenstrukturen vergleicht. Abbildung 7.8 zeigt einen Schnitt durch in Lager 1 aufgetretene Pitting im Zustand nach dem Initialschaden. Mit einer Tiefe von 144 μm ist diese Struktur um zwei Größenordnungen tiefer als die künstlich eingebrachten Oberflächenstrukturen. Bei dieser Tiefe ist es – anders als bei der Strukturtiefe von wenigen μm der künstlichen Strukturen – nicht mehr möglich, dass der Wälzkörper auf seiner gesamten Oberfläche einen Abstand von der Oberfläche des Lagerrings in der Größenordnung der Schmierfilmdicke besitzt. Vielmehr werden die Kontaktpartner an einigen Stellen, ins-

besondere den Kanten des Pittings, einen sehr geringen Abstand oder sogar direkten metallischen Kontakt haben, auf der übrigen Fläche wird der Abstand der Kontaktpartner dagegen deutlich größer sein. In Abbildung 7.8 ist dieser Zustand mit maßstäblich modelliertem Kugeldurchmesser, aber unter Vernachlässigung elastischer Verformungen, dargestellt. Der mittlere Plattenabstand des Kondensators, der durch die beiden Körper gebildet wird, ist in diesem Zustand deutlich größer als bei ungestörtem Hertz'schem Kontakt, was die Verringerung der Kapazität, und in der Folge auch die Verringerung des Imaginärteils der Impedanz bei der Überrollung, erklärt.

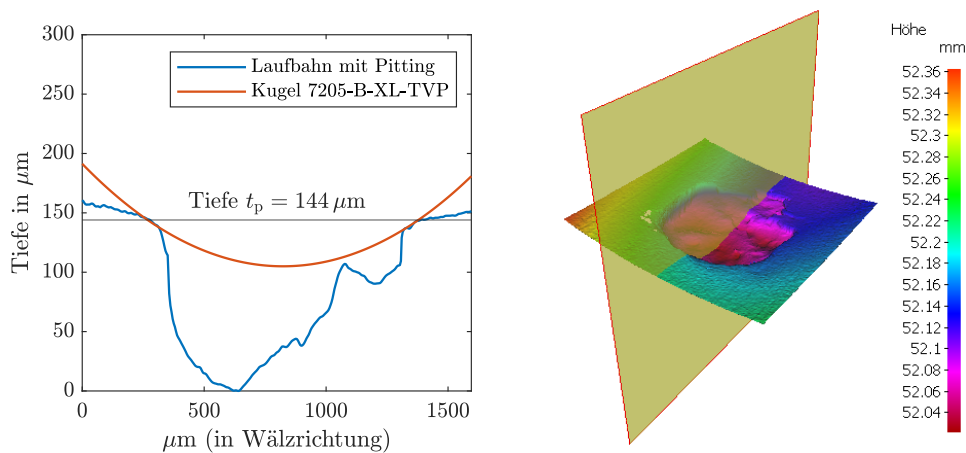


Abbildung 7.8.: Schnitt durch Pitting in Lager 1 mit maßstäblicher Darstellung einer Kugel. Rechts: 3D-Topographie mit Angabe der Schnittebene

Hinsichtlich des Ziels der Modellierung, ein Werkzeug zur Charakterisierung der Geometrie und Lokalisierung von Oberflächenabweichungen in Wälzlagern zu entwickeln, können folgende Feststellungen getroffen werden:

- Die Länge von Pittings ist mit der Dauer von Ausschlägen verknüpft. Indem die Veränderung des Wälzwegs nach Eintritt des Initialschadens verfolgt wird, kann das Fortschreiten des Schadens verfolgt werden. In dieser Hinsicht können bereits konkrete Aussagen über die Geometrie von Pittings getroffen werden.
- Die Höhe der Ausschläge verändert sich ebenfalls während des Schadensfortschritts und ist damit ein Ansatzpunkt für weitere Untersuchungen, ein eindeutiger Zusammenhang zur Geometrie besteht aber nicht.
- Der zeitliche Abstand der Ausschläge ermöglicht die eindeutige Bestimmung der Lokalisierung eines Pittings, auch in diesem Aspekt ist bereits ein praktisch nutzbares Werkzeug gegeben.
- Das Auftreten schneller Ausschläge ist eindeutig mit dem Einlaufen des Lagers verknüpft. Zudem wurde beobachtet, dass bereits vor dem Eintritt des Initialschadens schnelle Ausschläge im Messsignal auftreten. Die Hintergründe sind noch unklar. Da das Ziel jeder Zustandsüberwachung ist, Schäden bereits vor dem Eintritt eines

Initialschadens zu erkennen, sind diese schnellen Ausschläge vor dem Initialschaden ein aussichtsreicher Ansatzpunkt für weitere Untersuchungen zur Nutzung der Wälzlagerimpedanz als Werkzeug zur Zustandsüberwachung.

8. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick auf weitere mögliche Forschungsarbeiten gegeben, um offene Fragen zu beantworten und die Potentiale der Impedanzmessung für die Zustandsüberwachung von Wälzlagern zu heben.

8.1. Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde untersucht, wie die elektrische Impedanz als Werkzeug zur Untersuchung von Oberflächenabweichungen in Wälzlagern verwendet werden kann, der Zweck solcher Untersuchungen ist die Diagnose von Oberflächenschäden, z.B. Pittings. Ausgangspunkt der Arbeit ist der Stand der Forschung. In Kapitel 2 wurde herausgearbeitet, dass die Oberflächenrauheit einen bekannten Einfluss auf den Widerstand des Wälzlagers, und damit auch auf die Wälzlagerimpedanz besitzt, dass aber keine Erkenntnisse zur Auswirkung makroskopischer Oberflächenabweichungen auf die Impedanz vorliegen. Solche makroskopischen Abweichungen in Form von Pittings stehen deshalb im Fokus der experimentellen Untersuchungen, deren Planung und methodischer Aufbau in Kapitel 3 beschrieben wird. Aufgrund der kurzen Dauer der Überrollungsereignisse von Pittings ist eine Impedanzmessung mit hoher Abtastrate nötig, deren Aufbau in Kapitel 4 beschrieben wird. Die Impedanzmessung wurde in zwei Varianten umgesetzt. Für die Dauerversuche in Kapitel 5 wird die Isolierschicht des Prüfstands als Spannungsteiler verwendet, um die Impedanz von zwei Prüflagern gleichzeitig bestimmen zu können. Hierbei treten Messfehler auf, die in Abschnitt 5.4 auf Unsicherheiten bei parasitären Eigenschaften des Versuchsaufbaus zurückgeführt werden. Die Messfehler beeinträchtigen allerdings nicht die Auswertung der Ausschläge, die bei der Überrollung von Pittings auftreten. Für die Strukturversuche in Kapitel 6 wird ein elektrisch einfacher Aufbau verwendet, der auf einer Messung des Stroms basiert und nur ein Prüflager gleichzeitig vermessen kann. In diesem Aufbau konnte eine für die Zwecke dieser Arbeit zuverlässige Messung realisiert werden, sodass hiermit eine zuverlässige hochfrequente Impedanzmessung gegeben ist.

In Kapitel 5 werden die Ergebnisse von Lebensdauerversuchen vorgestellt, bei denen die Impedanz während der gesamten Lebensdauer, inklusive des Schadensfortschritts nach Entstehung eines ersten Pittings, gemessen wurde. In der Einlaufphase treten *schnelle Ausschläge* im Impedanzsignal auf, dieses Verhalten entspricht den Erwartungen nach dem Stand der Forschung. Bei der Entstehung von Pittings sind Ausschläge im Impedanzsignal bereits zu erkennen, bevor die Schwingungsüberwachung des Prüfstands einen Schaden erkennt. Nach dem Initialschaden sind im Signal deutliche *langsame Ausschlä-*

ge zu erkennen, deren Dauer im Verlauf des Schadensfortschritts zunimmt. Aufgrund dieser Beobachtungen kann in Abschnitt 5.5 die Hypothese aufgestellt werden, dass die Analyse von Ausschlägen der Wälzlagerimpedanz als Werkzeug zur Bestimmung der geometrischen Eigenschaften und der Lokalisierung (Außenring, Innenring, Wälzkörper) von Oberflächenabweichungen in Wälzlagern verwendet werden kann.

Um diese Hypothese zu untersuchen, wurde in Kapitel 6 systematisch untersucht, wie sich künstlich eingebrachte Oberflächenstrukturen mit unterschiedlicher Geometrie und unterschiedlicher Lokalisierung auf die *langsamen Ausschläge* im Impedanzsignal auswirken. Dabei zeigte sich, dass unter EHD-Schmierungsbedingungen anhand der Dauer der Ausschläge die Länge der künstlich eingebrachten Strukturen bestimmt werden kann, und anhand des zeitlichen Abstands der Ausschläge die Zuordnung zu Außenring, Innenring oder Wälzkörpern möglich ist. Die Höhe der Ausschläge ändert sich ebenfalls bei Veränderungen der Strukturgeometrie, die Zusammenhänge sind aber nicht eindeutig und nicht umkehrbar, sodass ein Rückschluss auf die geometrischen Eigenschaften nicht möglich ist. Zudem wurde in Kapitel 6 auch der physikalische Hintergrund der schnellen Ausschläge untersucht. Hierbei zeigte sich, dass bei einer hohen Amplitude der Messspannung die Häufigkeit schneller Ausschläge steigt. Dies deutet darauf hin, dass schnelle Ausschläge entgegen dem Stand der Forschung nicht nur auf metallische Kontakte von Rauheitsspitzen, sondern auch auf elektrische Durchschläge bei der Annäherung von Rauheitsspitzen zurückzuführen sind.

Die Modelle aus Kapitel 6 werden in Kapitel 7 auf die Versuchsdaten der Lebensdauerexperimente angewendet. Es zeigt sich, dass mithilfe dieser Modelle tatsächlich Aussagen über die Überrollung realer Pittings getroffen werden können. Zum einen kann das Auftreten schneller Ausschläge bei der Überrollung eines Pittings so gedeutet werden, dass kurzzeitig eine sehr geringe Schmierfilmdicke auftritt. Zum anderen kann aus der Dauer langsamer Ausschläge auf die Vergrößerung der Länge des Pittings beim Schadensfortschritt geschlossen werden. Für drei der fünf untersuchten Lager wird dabei eine quantitativ plausible Übereinstimmung zwischen den tatsächlichen Abmessungen der Schäden und den aus der Impedanz bestimmten Schadenslänge erreicht, bei zwei weiteren Lagern können zwar Ausschläge festgestellt werden, aber keine quantitative Übereinstimmung. Die Zuordnung von Schäden zu Außen- und Innenring anhand des Abstands der Ausschläge ist eindeutig möglich. In Kapitel 6 wird zudem herausgearbeitet, dass die langsamen Ausschläge in den Strukturversuchen und in den Lebensdauerexperimenten von unterschiedlichen physikalischen Mechanismen verursacht werden. In beiden Fällen werden die Ausschläge auf eine veränderte Schmierfilmdicke zurückgeführt. In den Strukturversuchen verringert sich die Schmierfilmdicke aufgrund der Oberflächenrauheit, in den Lebensdauerexperimenten tritt aufgrund der deutlich anderen geometrischen Verhältnisse eine vergrößerte Schmierfilmdicke auf. Daraus kann abgeleitet werden, dass Schäden, die zu einer Veränderung der Schmierfilmdicke führen, durch die Analyse von Ausschlägen der Wälzlagerimpedanz prinzipiell erkannt und hinsichtlich ihrer Geometrie und Lokalisierung vermessen werden können.

Die Hypothese, dass die Analyse von Ausschlägen der Wälzlagerimpedanz als Werkzeug zur Bestimmung der geometrischen Eigenschaften und der Lokalisierung (Außenring, Innenring, Wälzkörper) von Oberflächenabweichungen in Wälzlagern verwendet werden

kann, wurde somit für die in dieser Arbeit untersuchten Bedingungen bestätigt. Die hochfrequente Impedanzmessung ist damit prinzipiell für die Zustandsüberwachung von Wälzlagern geeignet. Im Gegensatz zur Schwingungsüberwachung spiegelt die Impedanz direkt und ohne Effekte aus dem Übertragungspfad die Verhältnisse im EHD-Kontakt wieder. Sie ist deshalb besonders geeignet für Anwendungen, in denen die Schwingungssignale zu schwach ausgeprägt sind. Dies betrifft z.B. langsamlaufende Lager, vgl. Abschnitt 2.4.1. Die Validierung in Kapitel 7 zeigte aber auch, dass dieses Werkzeug nur in einem Teil der Versuche plausible Ergebnisse lieferte. Damit wird die Motivation für zukünftige weitere Untersuchungen geliefert, die im folgenden Abschnitt skizziert werden.

8.2. Ausblick

Für Folgearbeiten können zwei Aspekte in den Blick genommen werden. Der erste Aspekt ist weitere Grundlagenforschung zu den Zusammenhängen zwischen Oberfläche und der Impedanz von EHD-Kontakten, um die bei den Versuchen in dieser Arbeit aufgetretenen Unsicherheiten durch andere Versuchsaufbauten und numerische Untersuchungen zu reduzieren und damit klare Erkenntnisse zu generieren.

- Der in Kapitel 6 verfolgte Ansatz künstlicher Schäden hat zu verwertbaren Ergebnissen geführt. Allerdings zeigte sich, dass die erreichte Strukturtiefe nicht repräsentativ für reale Pitting ist. Die Verwendung anderer, z.B. spanender, Fertigungsverfahren kann zu Ergebnissen führen, die besser auf reale Pittings übertragbar sind.
- Alle Versuche in dieser Arbeit wurden an Wälzlagern mit Stahlwälzkörpern durchgeführt. In dieser Konfiguration sind mehrere Wälzkontakte elektrisch parallel geschaltet. Die Impedanz des Lagers hängt damit von den elektrischen Eigenschaften aller Kontakte ab, Änderungen der Impedanz können nicht mehr klar einem Kontakt zugeordnet werden, was z.B. bei der Überrollung sehr langer Schäden problematisch ist. Durch eine Modifikation des Lagers, bei der nur ein Stahlwälzkörper montiert wird und die übrigen Wälzkörper aus Keramik ausgeführt werden, wie in den Versuchen von JABLONKA ET AL. in [26] umgesetzt, kann diese Unsicherheit eliminiert werden. Eine andere Möglichkeit ist die Untersuchung am Einzelkontakt, z.B. in einem Kugel-Scheibe-Prüfstand oder einem Zwei-Scheiben-Prüfstand.
- Eine weitere Schwäche von Versuchen am vollständigen Wälzlager ist, dass die Oberfläche während der Versuche nicht zugänglich ist. Für eine Untersuchung der Oberfläche muss das Lager demontiert werden, was einerseits die Häufigkeit von Kontrollmessungen der Geometrie begrenzt, andererseits zeigte sich in Kapitel 5, dass es nach der Neumontage zu einem erneuten Einlaufen kommt. Eine Möglichkeit, um diese Unsicherheiten zu vermeiden, sind Versuche am Einzelkontakt. Bei Zwei-Scheiben-Prüfständen oder Kugel-Scheibe-Prüfständen sind die Kontaktflächen ohne Demontage zugänglich. Im Fall von Dauerversuchen bietet sich

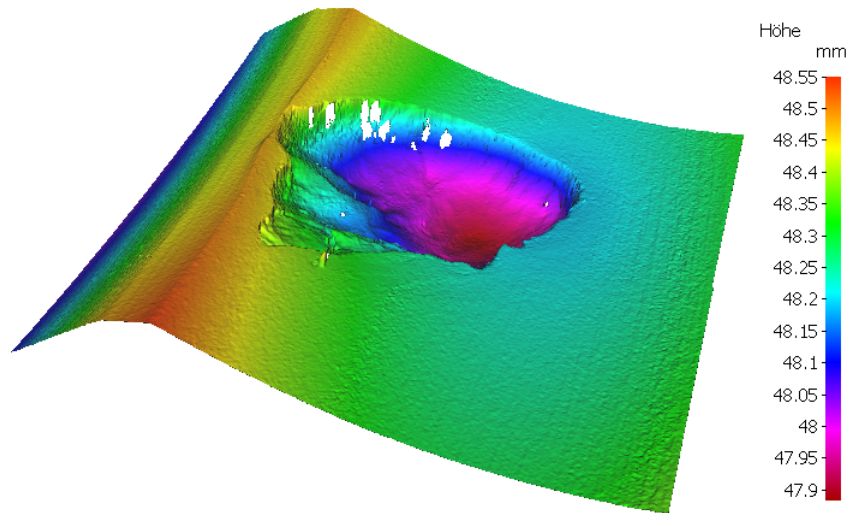
hierbei auch das Potential, durch ständige optische Kontrollmessungen den Oberflächenzustand vor dem Herausbrechen eines Pittings zu erfassen und die in Abschnitt 7.1 aufgeworfene Frage zu beantworten, ob die beobachteten Ausschläge durch die Überrollung eines ersten Anrisses verursacht werden und tatsächlich als Frühindikatoren eines Ausfalls dienen können.

- In Abschnitt 6.5.3 wurde die Frage aufgeworfen, ob die beobachteten schnellen Ausschläge, abweichend von der in der Literatur etablierten Interpretation als metallische Kontakte, auch durch elektrische Durchschläge verursacht werden können. Hier kann z.B. die Oberflächenstruktur, in der sich elektrische Durchschläge als Krater niederschlagen, Hinweise liefern.
- Um das physikalische Verständnis zu verbessern, können numerische Untersuchungen dienen. Dabei ist eine Kopplung der Elastohydrodynamik mit den elektrischen Feldgleichungen, wie von NEU ET AL. in [65] beschrieben, sinnvoll um die Bildung des elektrischen Feldes und besonders das Auftreten elektrischer Durchschläge bei der Überrollung abbilden zu können. Die in dieser Arbeit gewonnenen Versuchsdaten können zur Validierung der Simulationen dienen.

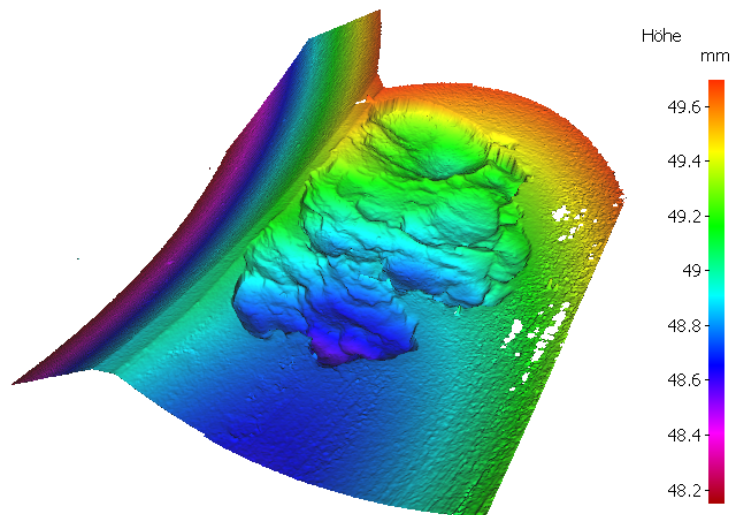
Der zweite Ansatzpunkt für die weitere Forschung ist die Verallgemeinerung der Ergebnisse. Im Sinne eines überschaubaren Versuchsprogramms wurden in dieser Arbeit nur Kugellager betrachtet und die Untersuchungen auf zwei Lagertypen beschränkt. Die Gültigkeit auf anderen Größenskalen und bei Lagern mit Linienkontakt ist zu überprüfen. Darüber hinaus können auch andere EHD-Kontakte in den Blick genommen werden. Auch bei Verzahnungen sind Pittings ein weitverbreitetes Schadensbild [2], sodass die Impedanzmessung auch hier ein nützliches Anwendungsfeld finden kann.

A. Versuchsdaten der Dauerversuche

A.1. Abbildungen der entstandenen Pittings

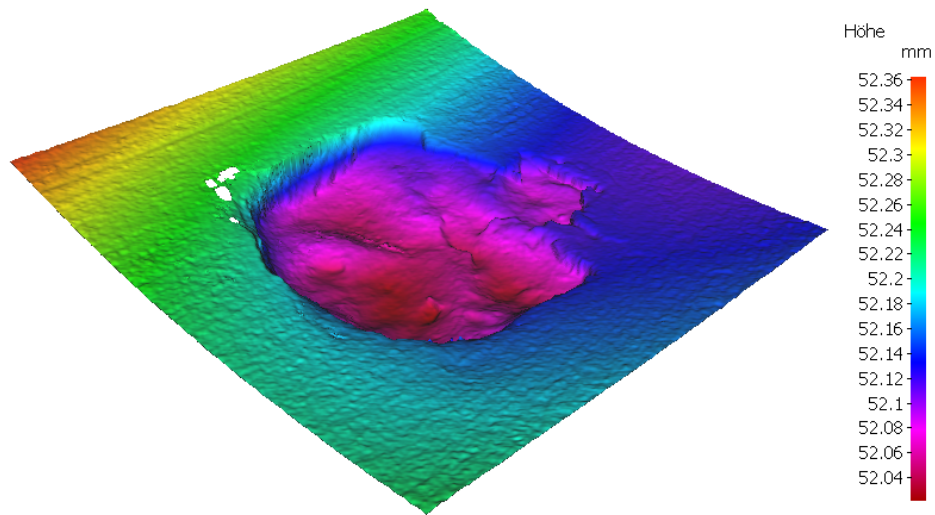


(a) Initialschaden

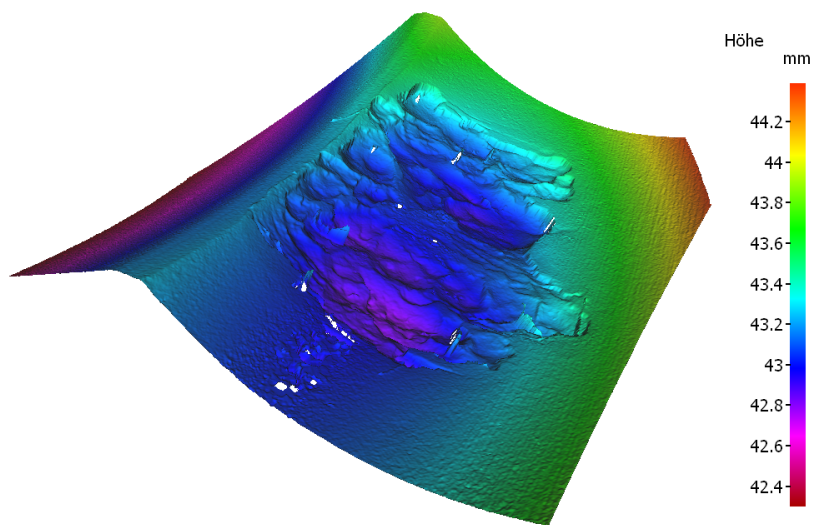


(b) Nach Schadensfortschritt

Abbildung A.1.: Pitting in Lager 1

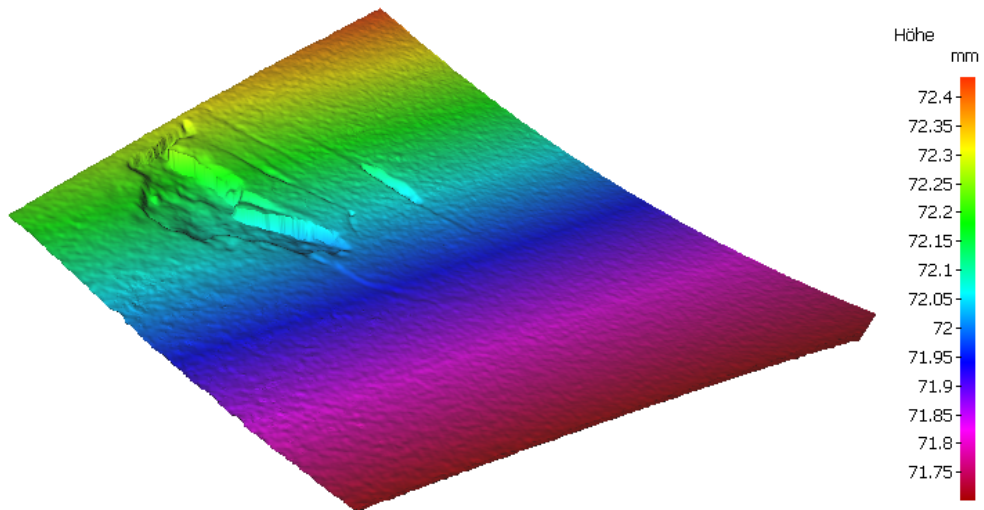


(a) Initialschaden

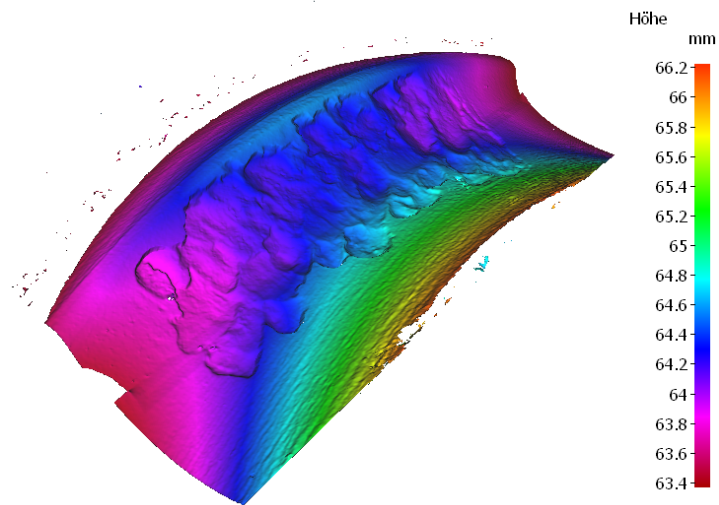


(b) Nach Schadensfortschritt

Abbildung A.2.: Pitting in Lager 2

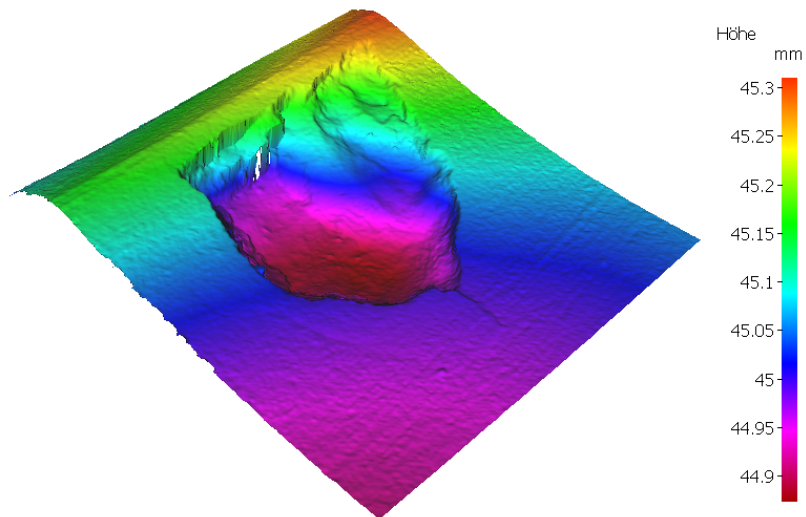


(a) Initialschaden

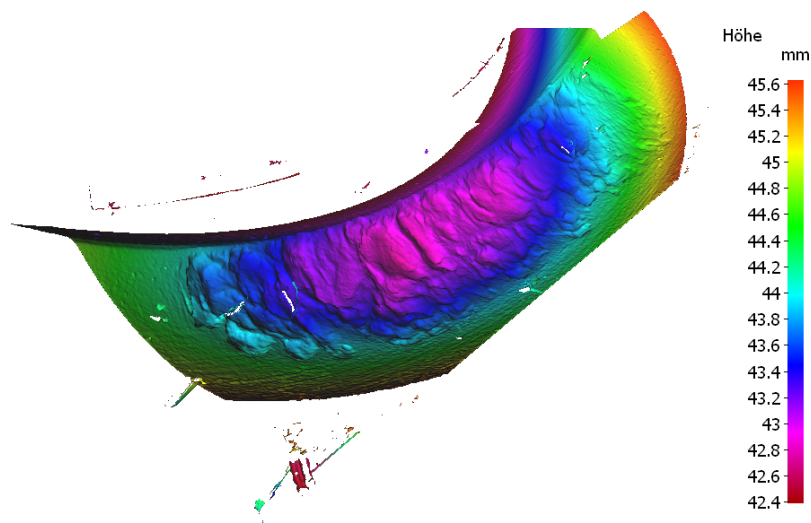


(b) Nach Schadensfortschritt

Abbildung A.3.: Pitting in Lager 3

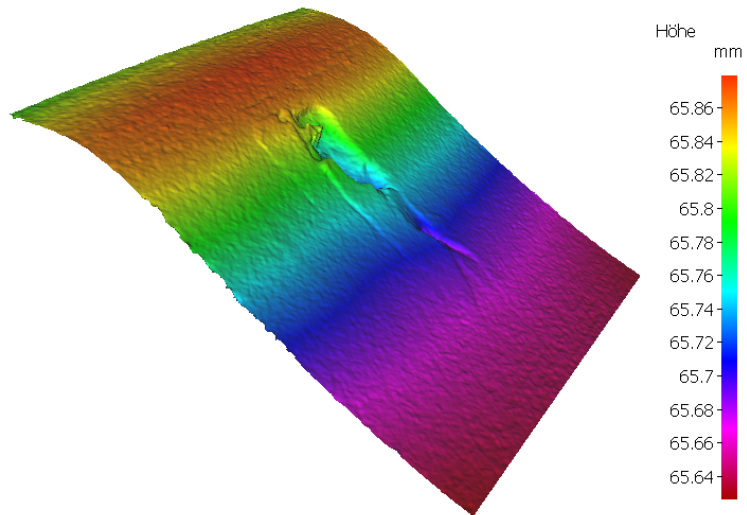


(a) Initialschaden

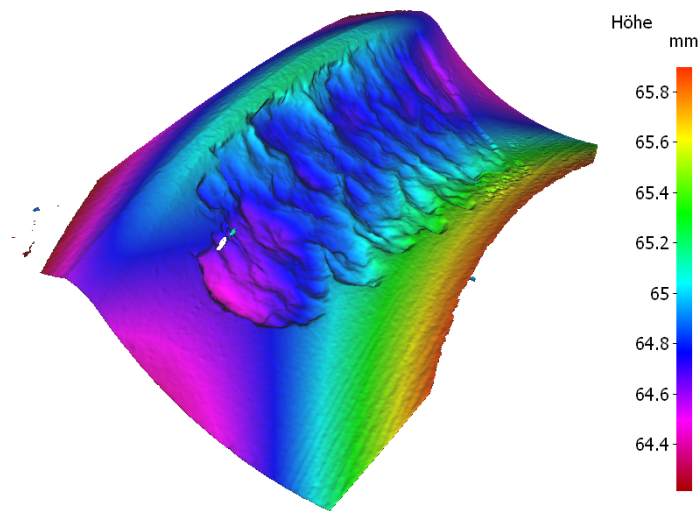


(b) Nach Schadensfortschritt

Abbildung A.4.: Pitting in Lager 4



(a) Initialschaden



(b) Nach Schadensfortschritt

Abbildung A.5.: Pitting in Lager 5

A.2. Impedanzsignale aller Lager

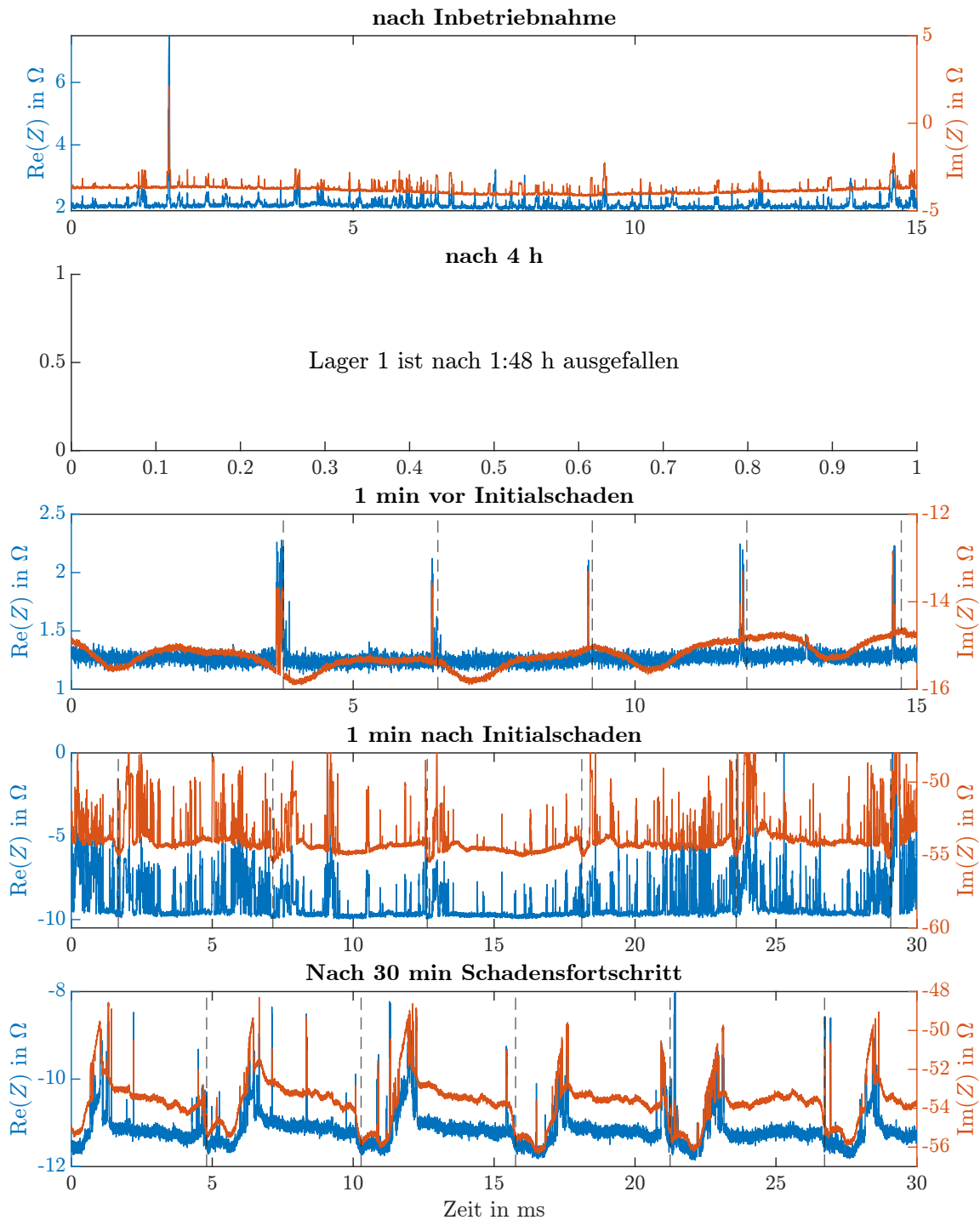


Abbildung A.6.: Zeitsignale der Impedanz zu verschiedenen Zeitpunkten für Lager 1. Der Abstand der markierten Zeitpunkte entspricht der Überrollfrequenz am Außenring f_{AR}

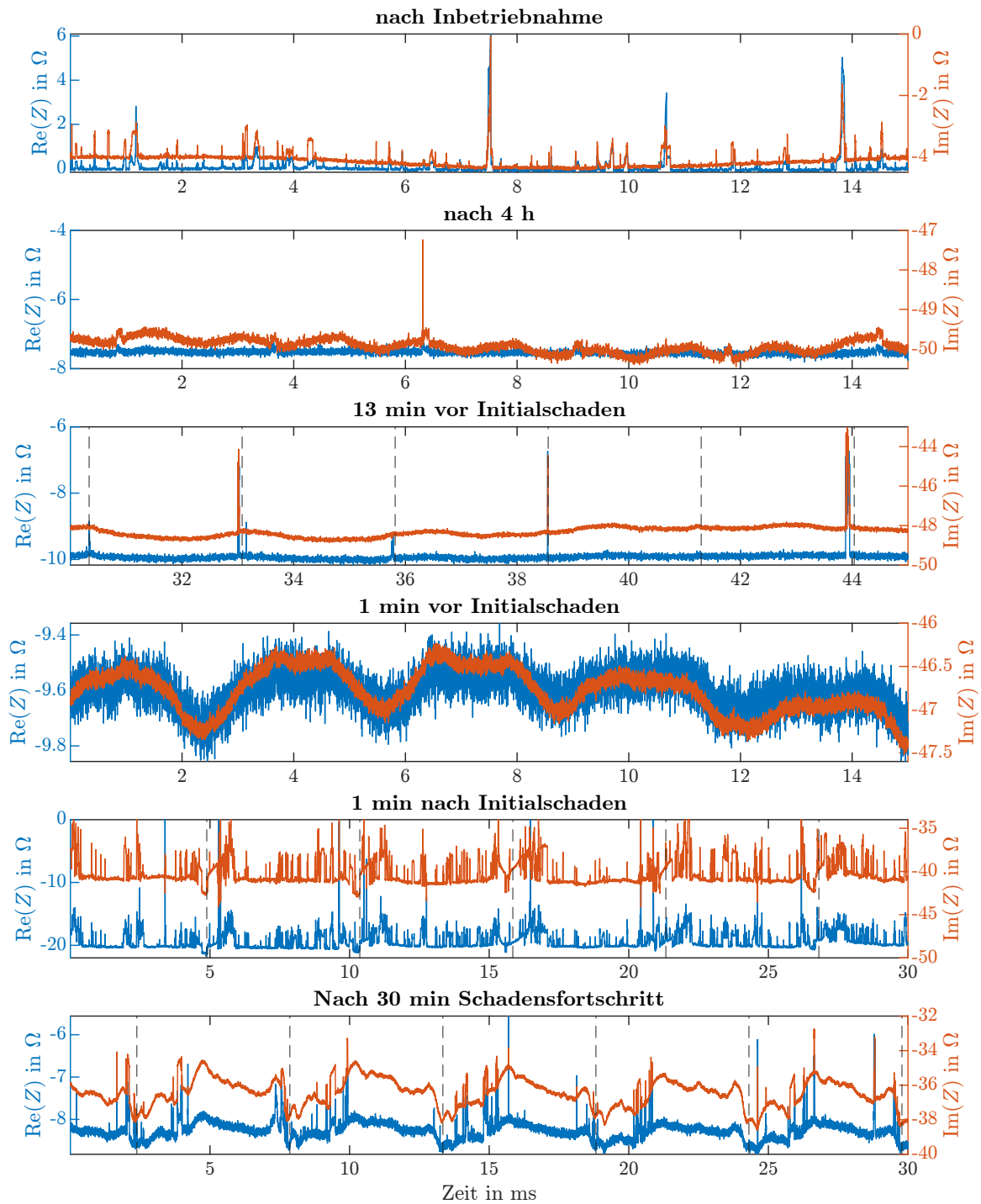


Abbildung A.7.: Zeitsignale der Impedanz zu verschiedenen Zeitpunkten für Lager 2. Der Abstand der markierten Zeitpunkte entspricht der Überrollfrequenz am Außenring f_{AR}

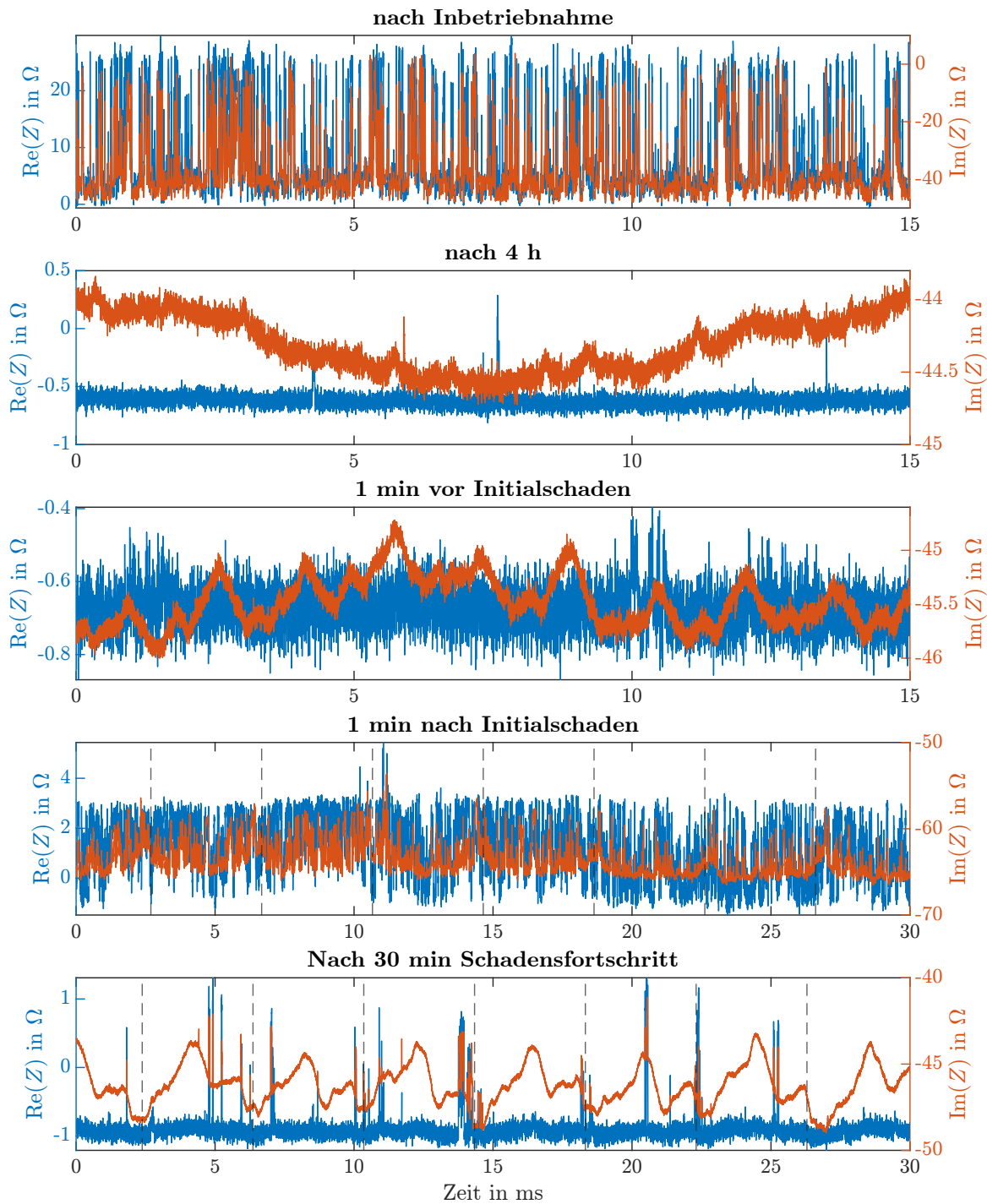


Abbildung A.8.: Zeitsignale der Impedanz zu verschiedenen Zeitpunkten für Lager 3. Der Abstand der markierten Zeitpunkte entspricht der Überrollfrequenz am Innenring f_{IR}

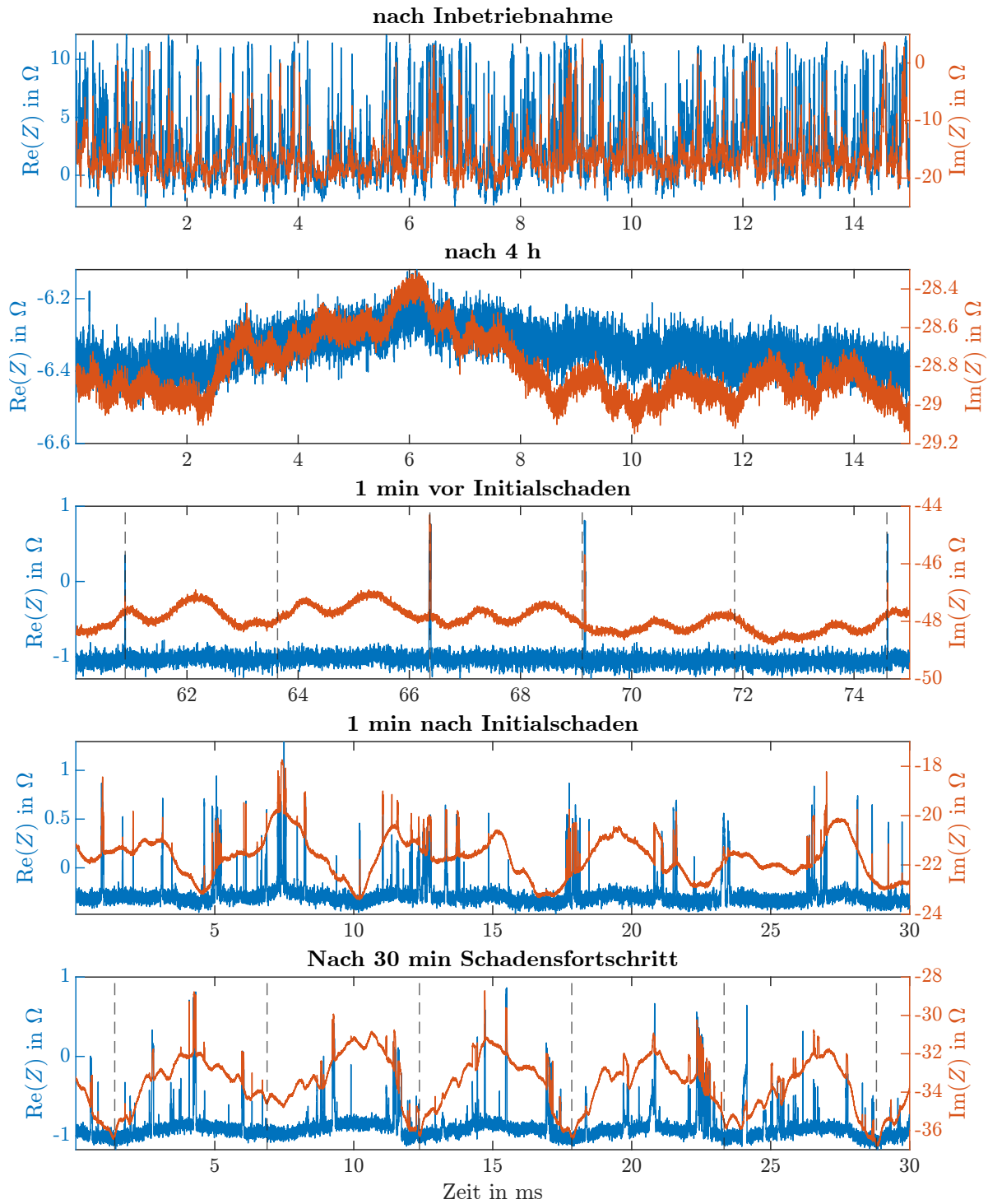


Abbildung A.9.: Zeitsignale der Impedanz zu verschiedenen Zeitpunkten für Lager 4. Der Abstand der markierten Zeitpunkte entspricht der Überrollfrequenz am Außenring f_{AR}

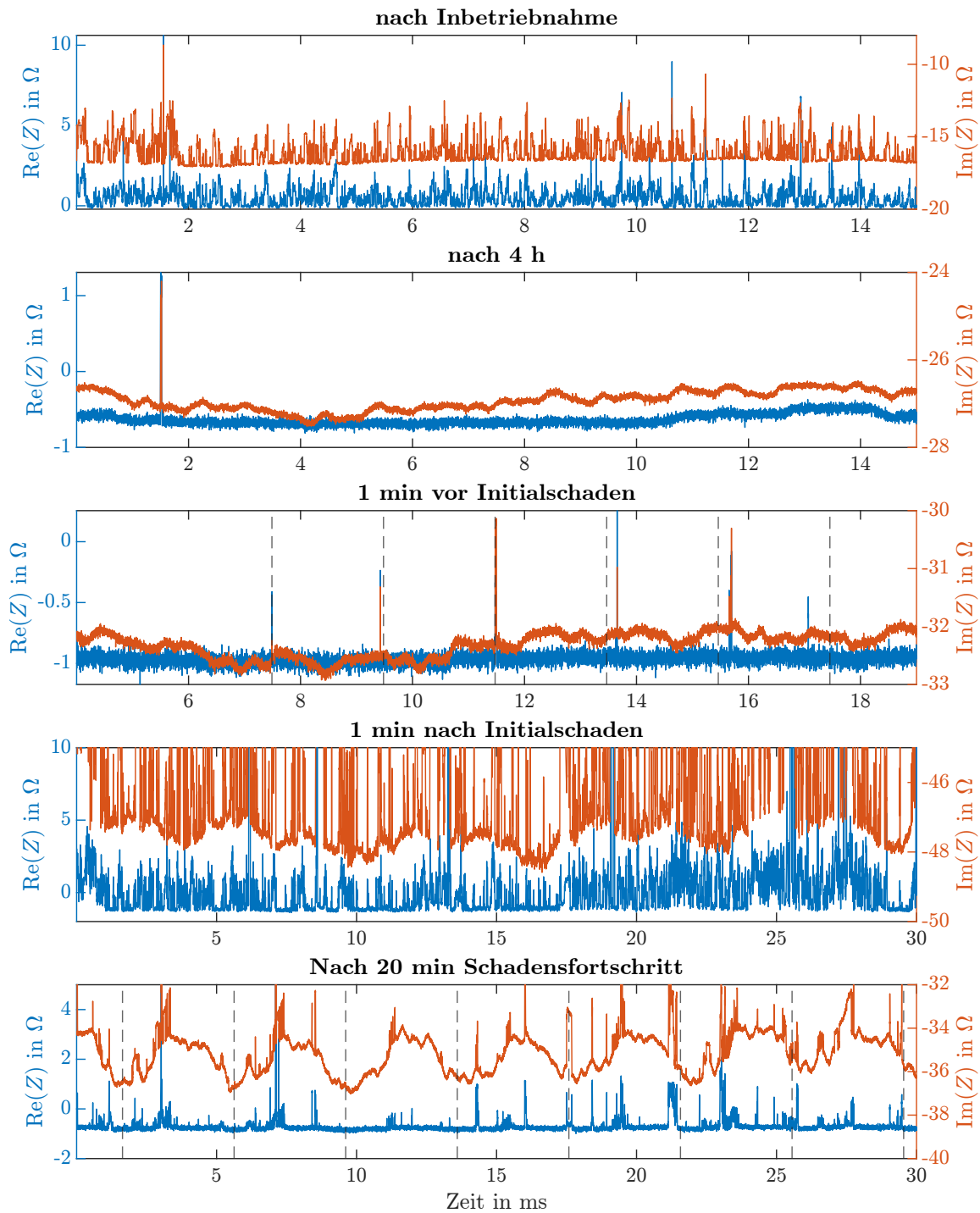


Abbildung A.10.: Zeitsignale der Impedanz zu verschiedenen Zeitpunkten für Lager 5. Der Abstand der markierten Zeitpunkte entspricht der Überrollfrequenz am Innenring f_{IR}

A.3. Ausschläge während Schadensfortschritt

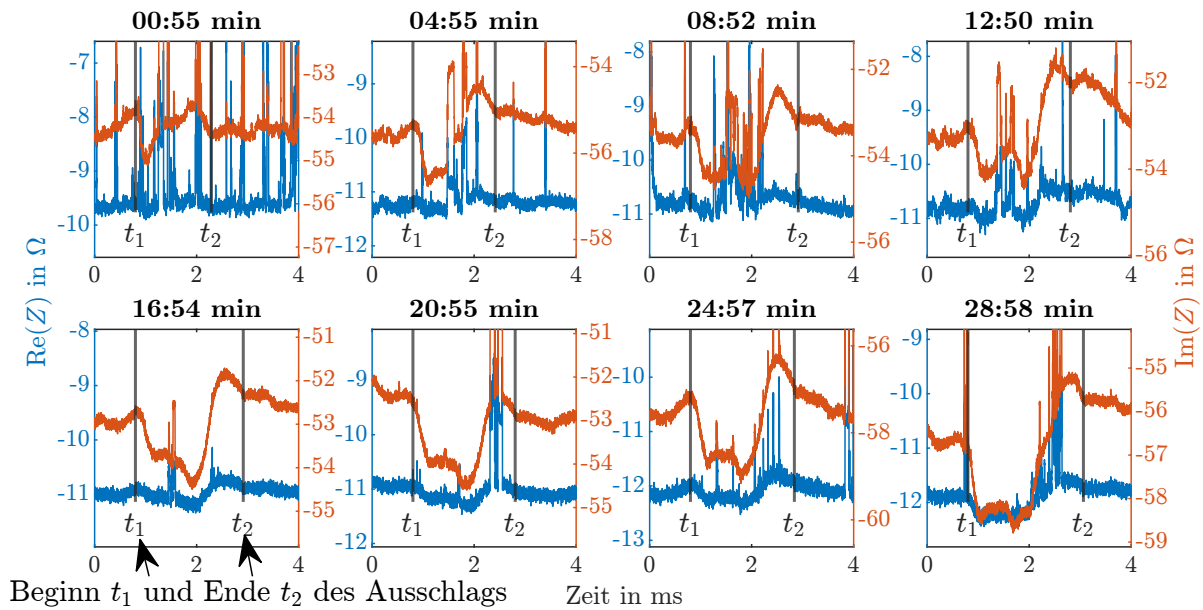


Abbildung A.11.: Ausschläge während des Schadensfortschritts in Lager 1

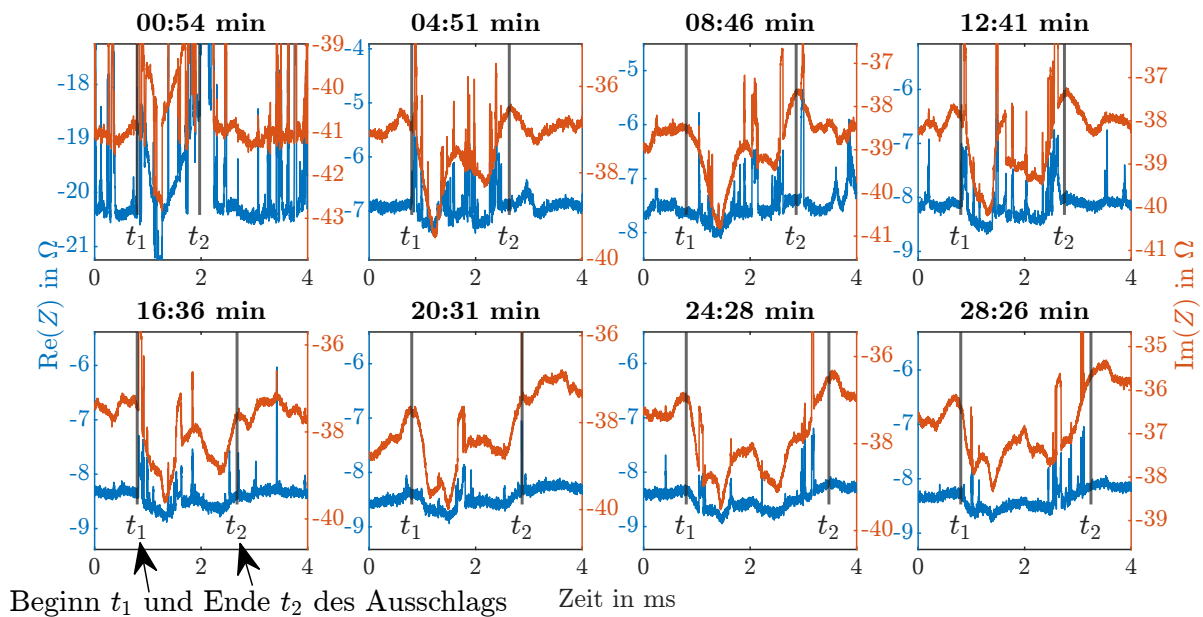


Abbildung A.12.: Ausschläge während des Schadensfortschritts in Lager 2

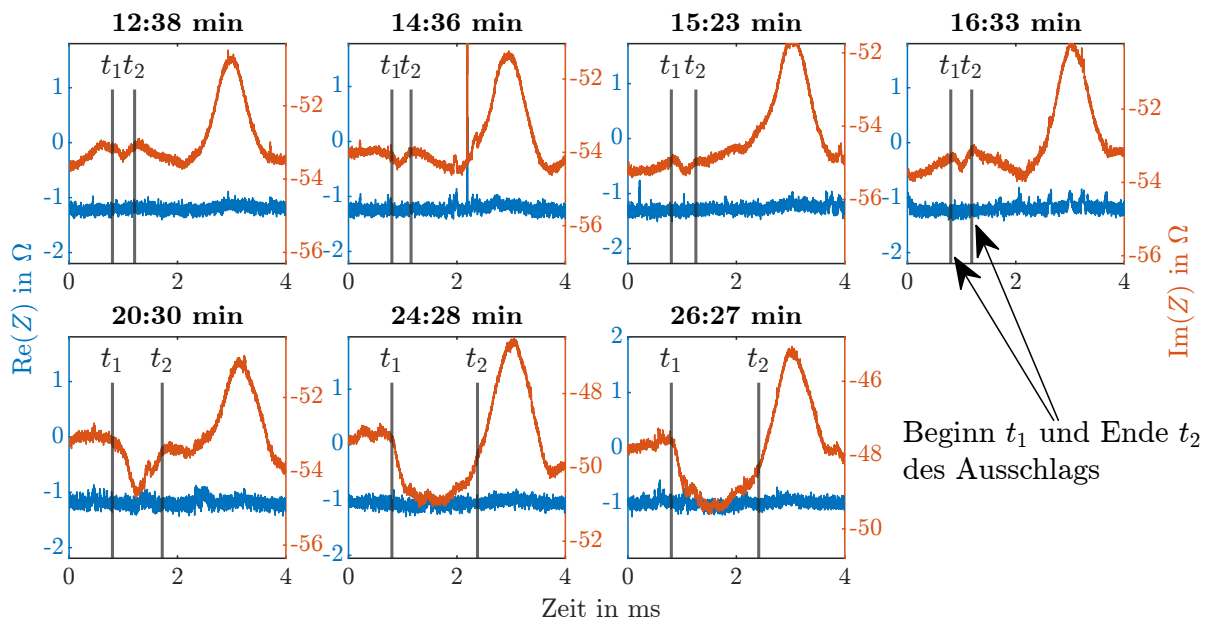


Abbildung A.13.: Ausschläge während des Schadensfortschritts in Lager 3

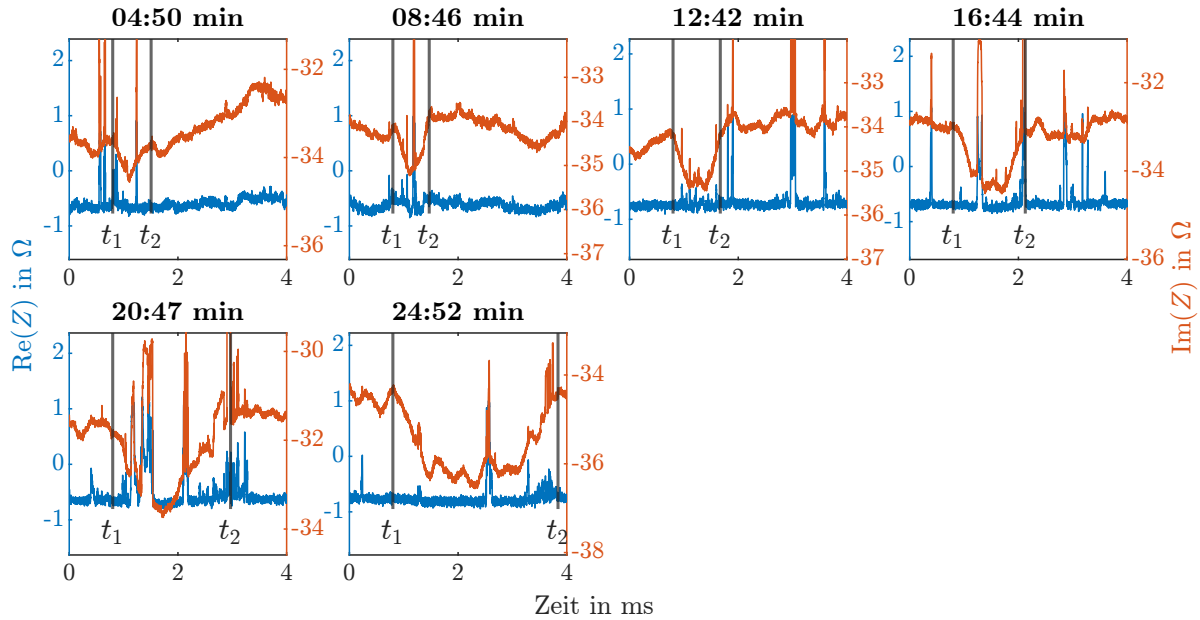


Abbildung A.14.: Ausschläge während des Schadensfortschritts in Lager 5

A.4. Mittelwert, Kurtosis und Standardabweichung vor Initialschaden

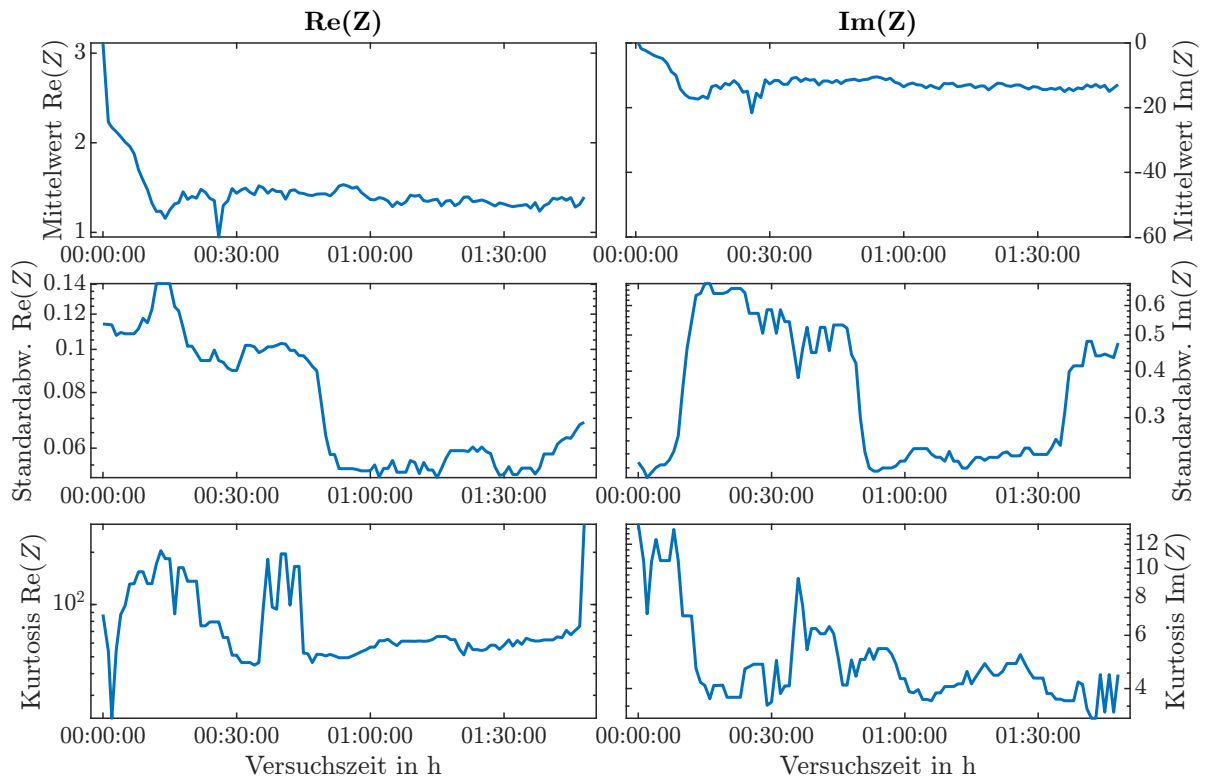


Abbildung A.15.: Mittelwert, Kurtosis und Standardabweichung von Real- und Imaginärteil der Impedanz zwischen Beginn des Versuchs und Eintritt des Initialschadens für Lager 1. Für Standardabweichung und Kurtosis ist der Median über zehn Messungen dargestellt.

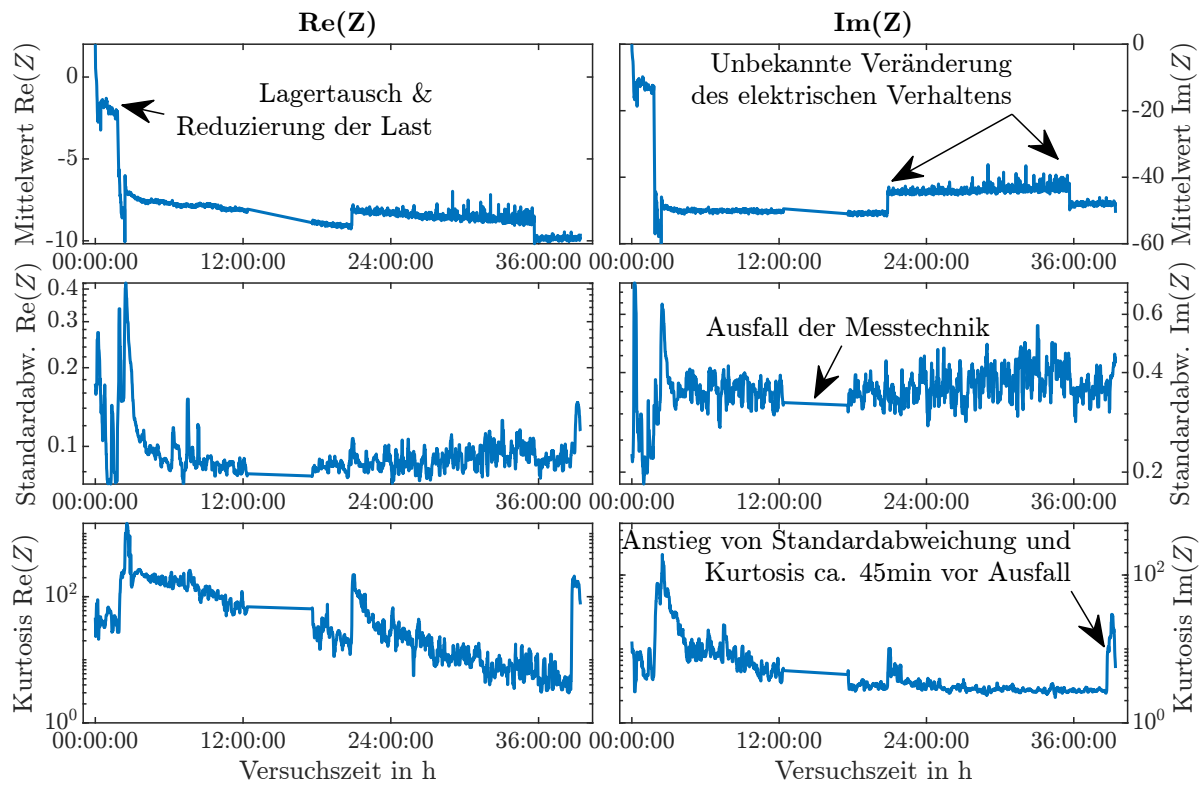


Abbildung A.16.: Mittelwert, Kurtosis und Standardabweichung von Real- und Imaginärteil der Impedanz zwischen Beginn des Versuchs und Eintritt des Initialschadens für Lager 2. Für Standardabweichung und Kurtosis ist der Median über zehn Messungen dargestellt.

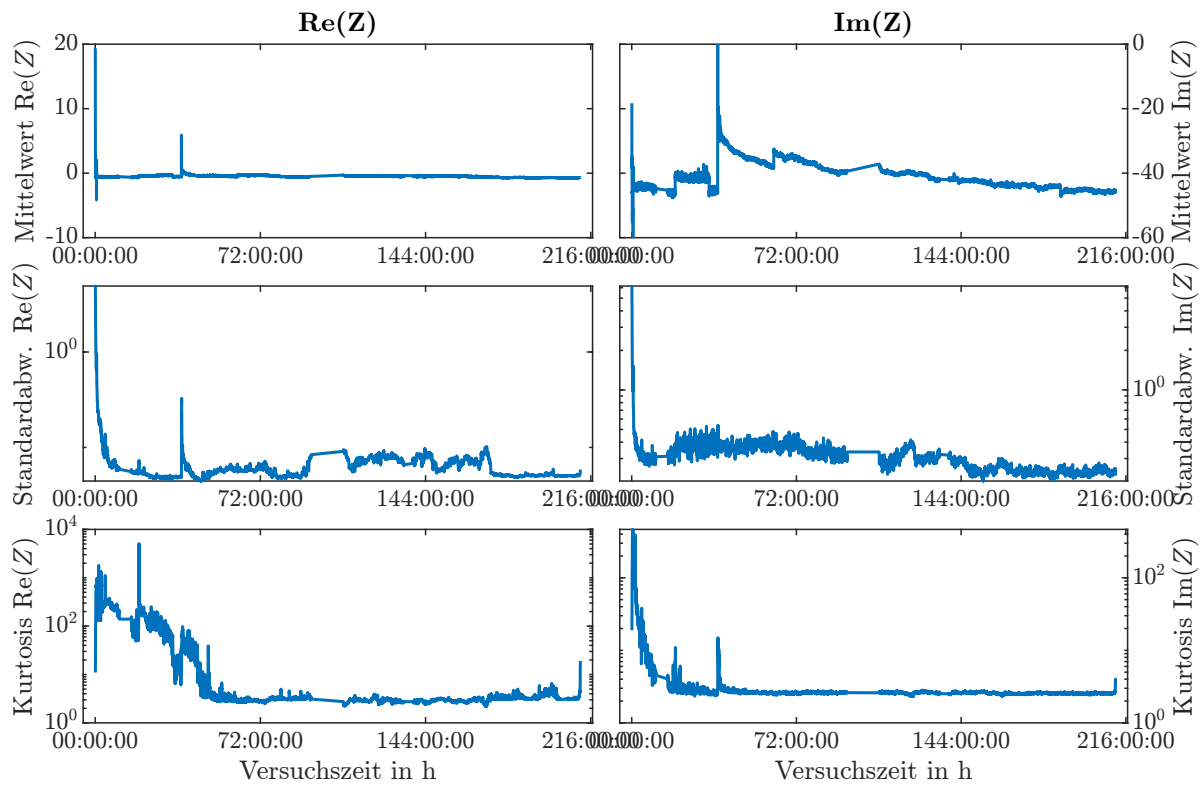


Abbildung A.17.: Mittelwert, Kurtosis und Standardabweichung von Real- und Imaginärteil der Impedanz zwischen Beginn des Versuchs und Eintritt des Initialschadens für Lager 3. Für Standardabweichung und Kurtosis ist der Median über zehn Messungen dargestellt.

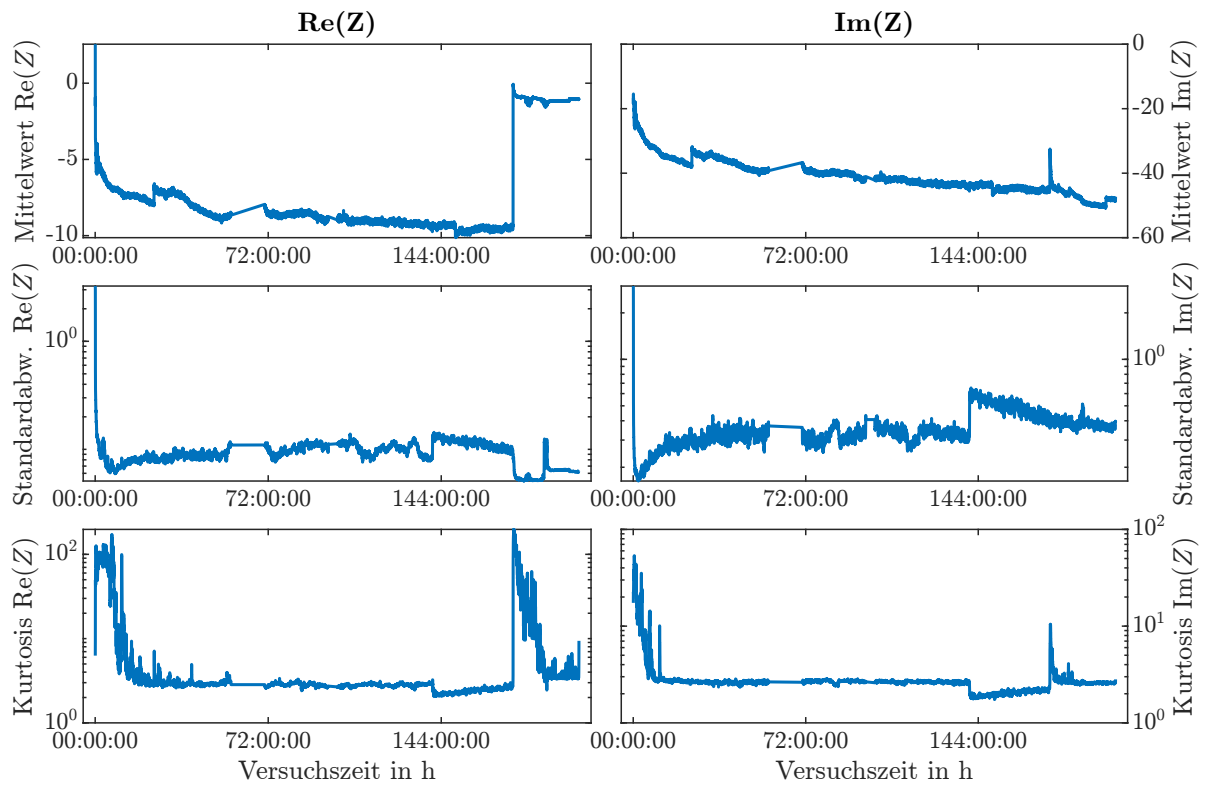


Abbildung A.18.: Mittelwert, Kurtosis und Standardabweichung von Real- und Imaginärteil der Impedanz zwischen Beginn des Versuchs und Eintritt des Initialschadens für Lager 4. Für Standardabweichung und Kurtosis ist der Median über zehn Messungen dargestellt.

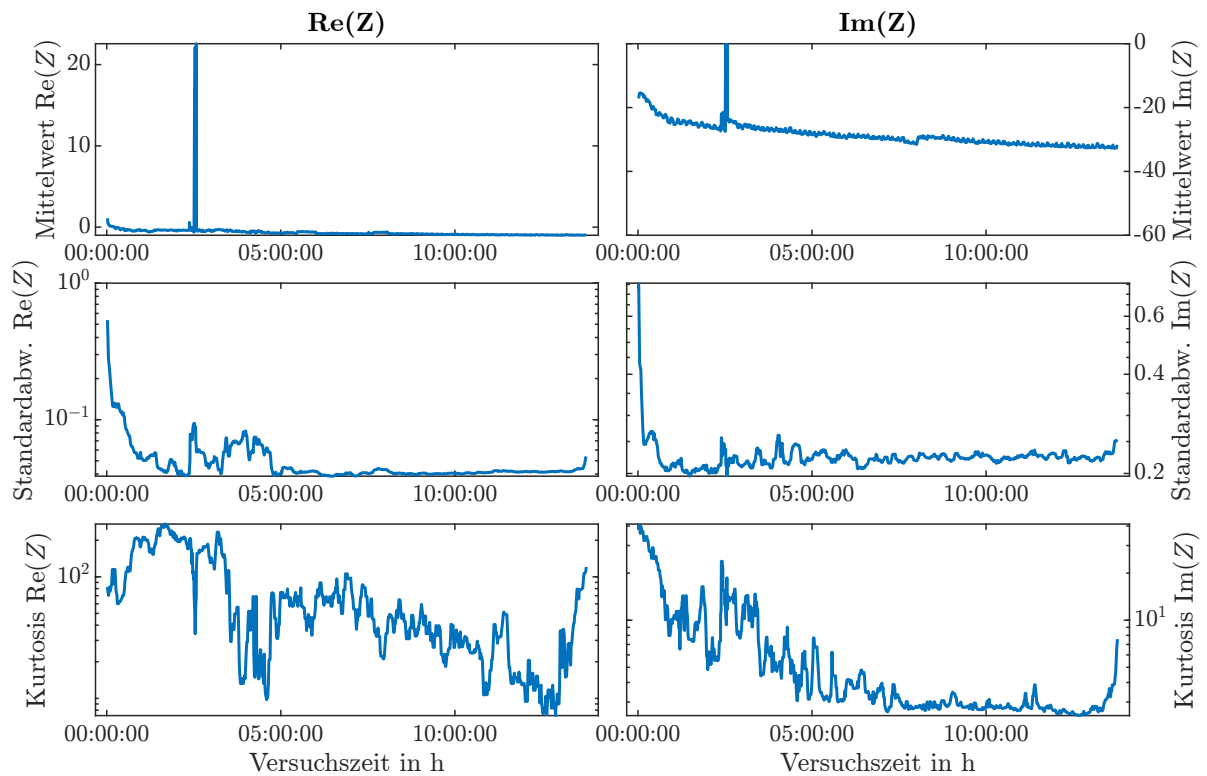


Abbildung A.19.: Mittelwert, Kurtosis und Standardabweichung von Real- und Imaginärteil der Impedanz zwischen Beginn des Versuchs und Eintritt des Initialschadens für Lager 5. Für Standardabweichung und Kurtosis ist der Median über zehn Messungen dargestellt.

B. Versuchspläne

Versuchspunkt (VP)	Drehzahl n in min^{-1}	Radiallast F_r in N	Öltemperatur T in $^{\circ}\text{C}$	Amplitude der Messspannung \hat{U}_m in V
Block A				
1445	1250	3500	70	0,5
1443	1250	3500	70	2,5
1444	1250	3500	70	1,5
1442	1250	3500	70	3,5
Block B				
1443	1250	3500	70	2,5
1445	1250	3500	70	0,5
1444	1250	3500	70	1,5
1442	1250	3500	70	3,5
Block C				
1442	1250	3500	70	3,5
1445	1250	3500	70	0,5
1444	1250	3500	70	1,5
1443	1250	3500	70	2,5

Tabelle B.1.: Versuchsplan für Variation der Messspannung

Versuchspunkt (VP)	Drehzahl n in min^{-1}	Radiallast F_r in N	Öltemperatur T in $^{\circ}\text{C}$
Block A			
112	125	3500	40
111	40	3500	40
103	400	700	40
115	4000	3500	40
114	1250	3500	40
105	4000	700	40
102	125	700	40
113	400	3500	40
101	40	700	40
104	1250	700	40
142	125	3500	70
132	125	700	70
134	1250	700	70
143	400	3500	70
141	40	3500	70
133	400	700	70
145	4000	3500	70
135	4000	700	70
131	40	700	70
144	1250	3500	70
Block B			
101	40	700	40
114	1250	3500	40
113	400	3500	40
112	125	3500	40
104	1250	700	40
115	4000	3500	40
102	125	700	40
105	4000	700	40
103	400	700	40
111	40	3500	40
135	4000	700	70
132	125	700	70
141	40	3500	70
145	4000	3500	70
133	400	700	70
131	40	700	70
143	400	3500	70
142	125	3500	70
134	1250	700	70
144	1250	3500	70

Tabelle B.2.: Betriebsbedingungen in Strukturversuchen

C. Geometrieparameter der verwendeten Lager

	FAG	SKF
	7205-B-XL-TVP	6205 TN9/C3
Laufbahndurchmesser des Innenrings d_{IR} in mm	32,98	34,50
Laufbahndurchmesser des Außenrings d_{AR} in mm	44,02	42,50
Anzahl der Wälzkörper	9	13

Tabelle C.1.: Geometrieparameter der verwendeten Lager

Literatur

- [1] C. Papenfuss, „Ist prädiktive Instandhaltung die Killer-App für das Industrial Internet of Things?“, *Industrie 4.0 Management*, S. 57–60, 2017.
- [2] R. B. Randall, *Vibration-based condition monitoring: Industrial, aerospace, and automotive applications*. Chichester, West Sussex, U.K und Hoboken, NJ: Wiley, 2010, ISBN: 9780470747858. DOI: 10.1002/9780470977668.
- [3] S. Foulard, S. Rinderknecht und M. Ichchou, „Real-time and on-line lifetime monitoring system for automotive transmissions - Application to a manual transmission“, in *The 14th IFToMM World Congress*, Taipei, Taiwan, 2015.
- [4] P. Manner, *Motorspindeln von Werkzeugmaschinen: Bauweise - Schäden - Reparatur (Vortrag)*, Metz, 7.5.2010.
- [5] Schaeffler Technologies AG & Co. KG, *Condition Monitoring Praxis: Handbuch zur Schwingungs-Zustandsüberwachung von Maschinen und Anlagen*, 1. Auflage. 2019, ISBN: 978-3-7830-0419-9.
- [6] G. Vorwerk-Handing, T. Gwosch, S. Schork, E. Kirchner und S. Matthiesen, „Classification and examples of next generation machine elements“, *Forschung im Ingenieurwesen*, Jg. 84, Nr. 1, S. 21–32, 2020, ISSN: 0015-7899. DOI: 10.1007/s10010-019-00382-1.
- [7] S. Schork, S. Gramlich und E. Kirchner, „Entwicklung von Smart ME: Ansatz der smarten Ausgleichkupplung“, in *Design for X - Beiträge zum 27. DfX-Symposium*, D. Krause, K. Paetzold und S. Wartzack, Hrsg., Bd. 2016, Hamburg: TuTech Verlag, 2016, S. 181–192, ISBN: 978-3-946094-09-8.
- [8] S. Vogel und E. Kirchner, „Konstruieren mit Smart Machine Elements - Einfluss von Bauteiltoleranzen und Uneindeutigkeit“, in *Design for X - Beiträge zum 28. DfX-Symposium*, D. Krause, K. Paetzold und S. Wartzack, Hrsg., Hamburg: TuTech Verlag, Oktober 2017, S. 311–323, ISBN: 978-3-946094-20-3.
- [9] S. Glück und S. Häuslein. (2018). Sensor-Lagerlösung in der Anwendung, Adresse: <https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/sensor-lagerloesung-in-der-anwendung-a-703901/>.
- [10] A. Harder und E. Kirchner, „Untersuchung der sensorischen Eigenschaften von Gleitlagern“, in *Dresdner Maschinenelemente Kolloquium*, B. Schlecht, Hrsg., Dresden: Sierke Verlag, 2019, S. 533–542.

-
- [11] M. Neu, A. Harder und E. Kirchner, „Sensorische Eigenschaften von Wälz- und Gleitlagerungen: Beherrschen von Unsicherheiten von und durch die Zusatzfunktion“, in *13. VDI Fachtagung Gleit- und Wälzlagerungen*, Bd. 2348, Schweinfurt: VDI Verlag GmbH, 2019, S. 183–192.
- [12] International Standards Organisation, *ISO 15243:2017: Rolling Bearings - Damage and failures - Terms, characteristics and causes*, 2017.
- [13] G. Niemann, H. Winter, B.-R. Höhn und K. Stahl, *Maschinenelemente 1*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019, ISBN: 978-3-662-55481-4. DOI: 10.1007/978-3-662-55482-1.
- [14] T. Schirra, „Phänomenologische Betrachtung der sensorisch nutzbaren Effekte am Wälzlager – Einfluss unbelasteter Wälzkörper auf das elektrische Impedanzmodell“, Dissertation, TU Darmstadt, 2021.
- [15] E. Kirchner, *Maschinenelemente und Mechatronik II*, 5. überarbeitete Auflage. Düren: Shaker, 2020, ISBN: 9783844072846.
- [16] T. A. Harris, *Rolling bearing analysis*, 4. New York: Wiley, 2001, ISBN: 0-471-35457-0.
- [17] H. Dahlke, *Handbuch Wälzlager-Technik: Bauarten, Gestaltung, Betrieb*. Wiesbaden: Vieweg, 1994, ISBN: 9783663019725.
- [18] B. Schlecht, *Maschinenelemente 2: Getriebe, Verzahnungen und Lagerungen*, 1. Auflage. München: Pearson Studium, 2009, ISBN: 9783863265489.
- [19] H. Czichos und K.-H. Habig, Hrsg., *Tribologie-Handbuch: Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik*, 4., vollst. überarb. u. erw. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015, ISBN: 978-3-8348-1810-2. DOI: 10.1007/978-3-8348-2236-9.
- [20] H. Wittel, D. Jannasch, J. Voßiek und C. Spura, *Roloff/Matek Maschinenelemente*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019, ISBN: 978-3-658-26279-2. DOI: 10.1007/978-3-658-26280-8.
- [21] E. Kirchner, *Leistungsübertragung in Fahrzeuggetrieben*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007, ISBN: 978-3-540-35288-4. DOI: 10.1007/978-3-540-35292-1.
- [22] R. Glovnea, M. Furtuna, Y. Nagata und J. Sugimura, „Electrical Methods for the Evaluation of Lubrication in Elastohydrodynamic Contacts“, *Tribology Online*, Jg. 7, Nr. 1, S. 46–53, 2012. DOI: 10.2474/trol.7.46.
- [23] S. M. Albahrani, D. Philippon, P. Vergne und J. M. Bluet, „A review of in situ methodologies for studying elastohydrodynamic lubrication“, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, Jg. 230, Nr. 1, S. 86–110, 2016, ISSN: 1350-6501. DOI: 10.1177/1350650115590428.
- [24] R. S. Heemskerk, K. N. Vermeiren und H. Dolfma, „Measurement of Lubrication Condition in Rolling Element Bearings“, *ASLE Transactions*, Jg. 25, Nr. 4, S. 519–527, 1982. DOI: 10.1080/05698198208983121.

-
- [25] R. Tuomas und O. Isaksson, „Measurement of lubrication conditions in a rolling element bearing in a refrigerant environment“, *Industrial Lubrication and Tribology*, 2009. DOI: 10.1108/00368790910940419.
- [26] K. Jablonka, R. Glovnea und J. Bongaerts, „Quantitative measurements of film thickness in a radially loaded deep-groove ball bearing“, *Tribology International*, Jg. 119, S. 239–249, 2018, ISSN: 0301679X. DOI: 10.1016/j.triboint.2017.11.001.
- [27] Y. Gemeinder, „Lagerimpedanz und Lagerschädigung bei Stromdurchgang in umrichter gespeisten elektrischen Maschinen“, Dissertation, TU Darmstadt, 2016.
- [28] E. C. Wittek, „Charakterisierung des Schmierzustandes im Rillenkugellager mit dem kapazitiven Messverfahren“, Dissertation, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, 2017.
- [29] A. Furtmann, „Elektrisches Verhalten von Maschinenelementen im Antriebsstrang“, Diss., Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, 2017. DOI: 10.15488/8972.
- [30] B. Radnai, Y. Gemeinder, T. Kiekbusch, B. Sauer und A. Binder, „Schädlicher Stromdurchgang: Untersuchung des Schädigungsmechanismus und der zulässigen Lagerstrombelastung von Wälzlagern in E-Motoren und Generatoren verursacht durch parasitäre hochfrequente Lagerströme“, *FVA-Heft 1127, Forschungsvorhaben Nr. 650 I*, 2016.
- [31] M. A. Masen, C. H. Venner, P. M. Lugt und J. H. Tripp, „Effects of Surface Micro-Geometry On the Lift-Off Speed of an EHL Contact“, *Tribology Transactions*, Jg. 45, Nr. 1, S. 21–30, 2002, ISSN: 1040-2004. DOI: 10.1080/10402000208982517.
- [32] A. Rosenkranz, B. Martin, S. Bettscheider, C. Gachot, H. Kliem und F. Mücklich, „Correlation between solid–solid contact ratios and lubrication regimes measured by a refined electrical resistivity circuit“, *Wear*, Jg. 320, S. 51–61, 2014, ISSN: 0043-1648. DOI: 10.1016/j.wear.2014.08.018.
- [33] T. Maruyama, M. Maeda und K. Nakano, „Lubrication Condition Monitoring of Practical Ball Bearings by Electrical Impedance Method“, *Tribology Online*, Jg. 14, Nr. 5, S. 327–338, 2019. DOI: 10.2474/tro1.14.327.
- [34] S. Schnabel, P. Marklund, I. Minami und R. Larsson, „Monitoring of Running-in of an EHL Contact Using Contact Impedance“, *Tribology Letters*, Jg. 63, Nr. 3, S. 1–10, 2016, ISSN: 1573-2711. DOI: 10.1007/s11249-016-0727-2.
- [35] M. Ibrahim, „The Study of Oil Films between the Teeth of Running Spur Gears“, Dissertation, Imperial College of Science and Technology, 1961.
- [36] A. Dyson, „Investigation of the Discharge-Voltage Method of Measuring the Thickness of Oil Films Formed in a Disc Machine under Conditions of Elastohydrodynamic Lubrication“, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, Jg. 181, Nr. 1, S. 633–652, 1966, ISSN: 0020-3483.

-
- [37] A. W. Crook, „The lubrication of rollers“, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, Jg. 250, Nr. 981, S. 387–409, 1958, ISSN: 0080-4614. DOI: 10.1098/rsta.1958.0001.
- [38] P. Brüser, „Untersuchung über die elastohydrodynamische Schmierfilmdicke bei elliptischen Hertzschen Kontaktflächen“, Dissertation, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 1972.
- [39] J. Bethke, *Entwicklung einer praktisch einsetzbaren Messtechnik für die Schmierfilmdicke in Wälzlagern und anderen realen tribologischen Systemen*, Ser. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 1, Konstruktionstechnik, Maschinenelemente. Düsseldorf: VDI-Verl., 1992, Bd. 203, ISBN: 3-18-140301-6.
- [40] M. Barz, „Schmierfilmbildung in fettgeschmierten schnellaufenden Spindellagern“, Dissertation, Leibniz Universität Hannover, 1996.
- [41] K. Jablonka, R. Glovnea und J. Bongaerts, „Evaluation of EHD films by electrical capacitance“, *ASLE Transactions*, Jg. 45, Nr. 38, S. 385–301, 2012, ISSN: 0569-8197. DOI: 10.1088/0022-3727/45/38/385301.
- [42] M. J. Furey, „Metallic Contact and Friction between Sliding Surfaces“, *ASLE Transactions*, Jg. 4, Nr. 1, S. 1–11, 1961. DOI: 10.1080/05698196108972414.
- [43] T. E. Tallian, Y. P. Chiu, D. F. Huttenlocher, J. A. Kamenshine, L. B. Sibley und N. E. Sindlinger, „Lubricant Films in Rolling Contact of Rough Surfaces“, *ASLE Transactions*, Jg. 7, Nr. 2, S. 109–126, 1964. DOI: 10.1080/05698196408972041.
- [44] J. Lord und R. Larsson, „Film-forming capability in rough surface EHL investigated using contact resistance“, *Tribology International*, Jg. 41, Nr. 9, S. 831–838, 2008, ISSN: 0301679X. DOI: 10.1016/j.triboint.2007.11.006.
- [45] P. M. Lugt, R. W. M. Severt, J. Fogelströ und J. H. Tripp, „Influence of surface topography on friction, film breakdown and running-in in the mixed lubrication regime“, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, Jg. 215, Nr. 6, S. 519–533, 2001, ISSN: 1350-6501. DOI: 10.1243/1350650011543772.
- [46] H. Prashad, *Tribology in electrical environments*. Amsterdam: Elsevier, 2006, Bd. 49, ISBN: 9780444518804.
- [47] T. Harriehausen und D. Schwarzenau, *Moeller Grundlagen der Elektrotechnik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020, ISBN: 978-3-658-27839-7. DOI: 10.1007/978-3-658-27840-3.
- [48] T. Maruyama und K. Nakano, „In Situ Quantification of Oil Film Formation and Breakdown in EHD Contacts“, *Tribology Transactions*, Jg. 61, Nr. 6, S. 1057–1066, 2018, ISSN: 1040-2004. DOI: 10.1080/10402004.2018.1468519.
- [49] *Wälzlagerpraxis: Handbuch zur Gestaltung und Berechnung von Wälzlagerungen*, 4. Aufl. [vollst. überarb.] Mainz: Vereinigte Fachverl., 2015, ISBN: 978-3-7830-0401-4.

-
- [50] M. N. Kotzalas und T. A. Harris, „Fatigue Failure Progression in Ball Bearings“, *Journal of Tribology*, Jg. 123, Nr. 2, S. 238–242, 2001, ISSN: 0742-4787. DOI: 10.1115/1.1308013.
- [51] L. Rosado, N. H. Forster, K. L. Thompson und J. W. Cooke, „Rolling Contact Fatigue Life and Spall Propagation of AISI M50, M50NiL, and AISI 52100, Part I: Experimental Results“, *Tribology Transactions*, Jg. 53, Nr. 1, S. 29–41, 2009, ISSN: 1040-2004. DOI: 10.1080/10402000903226366.
- [52] L. Piske, „Experimentelle Untersuchung strominduzierter Wälzlagerschäden“, Bachelor-Arbeit, TU Darmstadt, 2020.
- [53] A. Muetze, „Bearing Currents in Inverter-Fed AC-Motors“, Dissertation, TU Darmstadt, 2003.
- [54] A. K. Jardine, D. Lin und D. Banjevic, „A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance“, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Jg. 20, Nr. 7, S. 1483–1510, 2006, ISSN: 08883270. DOI: 10.1016/j.ymssp.2005.09.012.
- [55] C. Anger, „Hidden semi-Markov Models for Predictive Maintenance of Rotating Elements“, Dissertation, TU Darmstadt, 2018.
- [56] W. Zhou, T. G. Habetler und R. G. Harley, „Bearing Condition Monitoring Methods for Electric Machines: A General Review“, in *IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, 2007*, Piscataway, NJ: IEEE Service Center, 2007, S. 3–6, ISBN: 978-1-4244-1061-3. DOI: 10.1109/DEMPED.2007.4393062.
- [57] de Azevedo, H. D. M., A. M. Araújo und N. Bouchonneau, „A review of wind turbine bearing condition monitoring: State of the art and challenges“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 56, S. 368–379, 2016, ISSN: 1364-0321.
- [58] A. Rai und S. H. Upadhyay, „A review on signal processing techniques utilized in the fault diagnosis of rolling element bearings“, *Tribology International*, Jg. 96, S. 289–306, 2016, ISSN: 0301679X. DOI: 10.1016/j.triboint.2015.12.037.
- [59] P. Sopcik und D. O’Sullivan, „Anforderungs-Katalog für MEMS-Sensoren“, *Elektronik*, Nr. 8, S. 16–21, 2020.
- [60] B. van Hecke, J. Yoon und D. He, „Low speed bearing fault diagnosis using acoustic emission sensors“, *Applied Acoustics*, Jg. 105, S. 35–44, 2016, ISSN: 0003-682X. DOI: 10.1016/j.apacoust.2015.10.028.
- [61] L. Renaudin, F. Bonnardot, O. Musy, J. B. Doray und D. Rémond, „Natural roller bearing fault detection by angular measurement of true instantaneous angular speed“, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Jg. 24, Nr. 7, S. 1998–2011, 2010, ISSN: 08883270. DOI: 10.1016/j.ymssp.2010.05.005.
- [62] B. T. Holm-Hansen und R. X. Gao, „Vibration Analysis of a Sensor-Integrated Ball Bearing“, *Journal of Vibration and Acoustics*, Jg. 122, Nr. 4, S. 384–392, 2000, ISSN: 1048-9002. DOI: 10.1115/1.1285943.

-
- [63] C. K. Tan, P. Irving und D. Mba, „A comparative experimental study on the diagnostic and prognostic capabilities of acoustics emission, vibration and spectrometric oil analysis for spur gears“, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Jg. 21, Nr. 1, S. 208–233, 2007, ISSN: 08883270. DOI: 10.1016/j.ymsp.2005.09.015.
- [64] Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN ISO 281/A2: Dynamische Tragzahlen und nominelle Lebensdauer: Änderung 2, Lebensdauerbeiwert a_{xyz}* , September 2001.
- [65] M. Neu, J. Wenzel und E. Kirchner, „Efficient methods for elastohydrodynamic simulations of ball bearing contacts“, in *61. Tribologie-Fachtagung 2020*, 2020.
- [66] H. Liu, S. Shah und W. Jiang, „On-line outlier detection and data cleaning“, *Computers & Chemical Engineering*, Jg. 28, Nr. 9, S. 1635–1647, 2004, ISSN: 0098-1354. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2004.01.009.
- [67] I. Křupka, M. Hartl, L. Urbanec und J. Čermák, „Single dent within elastohydrodynamic contact - comparison between experimental and numerical results“, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, Jg. 221, Nr. 6, S. 635–644, 2007, ISSN: 1350-6501. DOI: 10.1243/13506501JET276.
- [68] M. Pausch, *Untersuchung des Einflusses von definiert gefertigten Mikrostrukturen auf Schmierfilmbildung und Kontaktpressung in hoch belasteten Wälzkontakten: Zugl.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2012*, Als Ms. gedr, Ser. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 1, Konstruktionstechnik, Maschinenelemente. Düsseldorf: VDI-Verl., 2013, Bd. 417, ISBN: 9783183417018.
- [69] H. Hügel und T. Graf, *Laser in der Fertigung*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2009, ISBN: 978-3-8351-0005-3. DOI: 10.1007/978-3-8348-9570-7.
- [70] S. Heidenblut, R. Kessel, K.-D. Sommer und A. Weckenmann, „Ein Modellbildungskonzept für die praxisgerechte Bestimmung der Messunsicherheit (A Modelling Concept for Practice-Oriented Evaluation of Measurement Uncertainty)“, *tm - Technisches Messen*, Jg. 74, Nr. 10, S. 221, 2007, ISSN: 0171-8096. DOI: 10.1524/teme.2007.74.10.494.
- [71] S. Vogel, „Das Lastpfad und Knotenmodell - Eine Erweiterung des C&C² Ansatzes zur Bewertung von Ersatzgrößen in der Produktentwicklung mechatronischer Systeme“, Dissertation, TU Darmstadt, 2021.
- [72] G. Vorwerk-Handing, „Erfassung systemspezifischer Zustandsgrößen - Physikalische Effektkatalogie zur systematischen Identifikation potentieller Messgrößen“, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2021.
- [73] M. Weschta, „Untersuchungen zur Wirkungsweise von Mikrostrukturen in elastohydrodynamischen Gleit/Wälz-Kontakten: Research into the mode of action of microtextures in elastohydrodynamic rolling-sliding contacts“, Diss., 2017.

-
- [74] H. Stachowiak, *Allgemeine Modelltheorie*. Wien: Springer, 1973, ISBN: 978-3-7091-8328-1.
- [75] C. Gundlach, *Entwicklung eines ganzheitlichen Vorgehensmodells zur problemorientierten Anwendung des statistischen Versuchsplanung: Zugl.: Kassel, Univ., Diss, 2004*. Kassel Univ. Press, 2004, ISBN: 3899580680.
- [76] D. C. Montgomery, *Design and analysis of experiments*, 10. Hoboken, NJ: Wiley, 2020, ISBN: 9781119492474.
- [77] W. E. ten Napel und R. Bosma, „The Influence of Surface Roughness on the Capacitive Measurement of Film Thickness in Elastohydrodynamic Contacts“, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, Jg. 185, Nr. 1, S. 635–639, 1970, ISSN: 0020-3483.
- [78] U. Schmidt, „Die Schmierfilmbildung in elastohydrodynamisch beanspruchten Wälzkontakten unter Berücksichtigung der Oberflächenrauheit“, Dissertation, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, 1985.
- [79] T. Schirra, G. Martin, S. Puchtler und E. Kirchner, „Electric impedance of rolling bearings - Consideration of unloaded rolling elements“, *Tribology International*, Jg. 158, S. 106927, 2021, ISSN: 0301679X. DOI: 10.1016/j.triboint.2021.106927.

Eigene Veröffentlichungen

- [80] G. Martin, S. Schork, S. Vogel und E. Kirchner, „MME – Potentiale durch mechatronische Maschinenelemente: MME – Potentials of Mechatronic Machine Elements“, *Konstruktion*, Jg. 70, Nr. 01-02, S. 71–75, 2018, ISSN: 0720-5953.
- [81] E. Kirchner, G. Martin und S. Vogel, „Sensor Integrating Machine Elements – Key to In-Situ Measurements in Mechanical Engineering“, in *23rd International Seminar on High Technology*, K. Schützer, Hrsg., Piracicaba, Brasilien, 2018, S. 37–49.
- [82] Y. Koch, G. Martin, E. Kirchner, D. Quirnheim Pais und R. Slatter, „Feasibility study of measuring Instantaneous Angular Speed of Spur Gears with Magnetoresistive Sensors“, in *9th International Conference on Gears*, München, 2021.
- [83] S. Vogel, G. Martin, T. Schirra und E. Kirchner, „Robust Design for Mechatronic Machine Elements - How Robust Design Enables the Application of Mechatronic Shaft-Hub Connection“, in *DESIGN 2018*, Glasgow: The Design Society, 2018, S. 3033–3040. DOI: 10.21278/idc.2018.0203.
- [84] D. Großkurth und G. Martin, „Intelligenter Zahnriemen“, in *20. GMA/ITG-Fachtagung Sensoren und Messsysteme 2019*, Wunstorf, Germany: AMA Service GmbH, 2019, ISBN: 978-3-9819376-0-2.

-
- [85] C. Czwick, G. Martin, R. Anderl und E. Kirchner, „Cyber-Physische Zwillinge“, *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Jg. 115, Nr. special, S. 90–93, 2020, ISSN: 0947-0085. DOI: 10.3139/104.112310.
- [86] T. Schirra, G. Martin und E. Kirchner, „Feasibility Study of Impedance Analysis for Measuring Rolling Bearing Loads“, in *74th STLE Annual Meeting*, 2019.
- [87] T. Schirra, G. Martin und E. Kirchner, „Design of and with sensing machine elements using the example of a sensing rolling bearing“, in *International Conference on Engineering Design 2021*, 2021.
- [88] T. Schirra, G. Martin, S. Vogel und E. Kirchner, „Ball Bearings as Sensors for Systematical Combination of Load and Failure Monitoring“, in *Proceedings of the DESIGN 2018 15th International Design Conference*, 2018, S. 3011–3022. DOI: 10.21278/idc.2018.0306.
- [89] G. Martin, T. Schirra und E. Kirchner, „Experimental High Frequency Analysis of the Electric Impedance of Rolling Bearings“, in *Bearingworld 2020*, 2020.
- [90] G. Martin, S. Vogel, T. Schirra, G. Vorwerk-Handing und E. Kirchner, „Methodical Evaluation of Sensor Positions for Condition Monitoring of Gears“, in *Proceedings of NordDesign 2018*, P. Ekströmer, S. Schütte und J. Ölvander, Hrsg., Linköping, 2018.
- [91] T. Schirra, G. Martin und E. Kirchner, „Untersuchung elektrischer Eigenschaften von Wälzlagern zur Entwicklung eines Sensorlagers“, in *13. VDI-Fachtagung Gleit- und Wälzlagerungen 2019*, 2019, S. 367–372, ISBN: 9783180923482.
- [92] G. Vorwerk-Handing, G. Martin und E. Kirchner, „Integration of Measurement Functions in Existing Systems: Retrofitting as Basis for Digitalization“, in *Proceedings of NordDesign 2018, Linköping, Sweden, 14th - 17th August 2018*, P. Ekströmer, S. Schütte und J. Ölvander, Hrsg., 2018.

Betreute studentische Arbeiten

2017

T. Chamonin, „Entwurf des Getriebes für einen elektrischen Radnabenantrieb“, Bachelor-Thesis

A. Weyand, „Ermittlung der Anwendungspotentiale smarter Passfedern durch Analyse stellvertretender Nutzungsprozesse“, Bachelor-Thesis

2018

R. Breimann, „Untersuchung der Eignung der elektrischen Impedanz zur Bestimmung von Lagerlasten“, Bachelor-Thesis

C. Erz, J. Janer Dommel, S. Kianpoor, Y. Rauschenbach, Y. Regev, „Entwicklung von Messkonzepten für die Zustandsüberwachung von Zahnriemen“, Advanced Design Project

P. Gross, „Experimentelle Untersuchung von Sensorpositionen für die Zustandsüberwachung von Verzahnungen“, Bachelor-Thesis

S. Humpe, „Experimentelle Untersuchung eines Verschleißüberwachungssystems für Großwälzlager“, Master-Thesis

R. Welches, „Entwicklung eines mikroinvasiven Messsystems zur Erfassung von Radkräften in einem Formula Student Fahrzeug“, Master-Thesis

2019

L. Collien, „Recherche zu Bewertungsmethoden für Datenqualität im Condition Monitoring“, Studienarbeit

B. Rübsamen, „Konstruktion eines Prüfstands für sensorintegrierende Zahnriemen“, Master-Thesis

A. Schuhmann, „Bewertung von Condition-Monitoring-Systemen für Kreiselpumpen in der chemischen Industrie“, Bachelor-Thesis

2020

S. Brajkovski, „Entwicklung einer Impedanzmessmethode für sensorintegrierende Wälzlager“, Bachelor-Thesis

S. Giebisch, „Untersuchung der Eignung magnetoresistiver Sensorik zur Zustandsüberwachung von Stirnverzahnungen“, Bachelor-Thesis

D. Schmidt, „Ermittlung der Eigenfrequenzen von Zahnriemen mithilfe neuronaler Netze“, Bachelor-Thesis

F. Schymski, „Simulationsbasierte Auslegung eines Prüfstands für sensorintegrierende Zahnriemen“, Master-Thesis

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Georg Martin
Geburtsdatum: 21. Juni 1989
Geburtsort: Wiesbaden
Nationalität: Deutsch

Ausbildung und beruflicher Werdegang

6.2008 Abitur, Taunusschule Bad Camberg
10.2008 – 1.2013 Studium des Maschinenbaus (B.Sc. Mechanical and Process Engineering) an der Technischen Universität Darmstadt und der Universidade de São Paulo
4.2013 – 1.2016 Studium des Maschinenbaus (M.Sc. Mechanical and Process Engineering) an der Technischen Universität Darmstadt
6.2016 – 11.2020 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Produktentwicklung und Maschinenelemente (pmd) der Technischen Universität Darmstadt