

Editor: Clemens Gühmann

Rudolf Lück

Überwachung hybrider Schrägkugellager in Luftfahrttriebwerken



Rudolf Lück

**Überwachung hybrider Schrägkugellager
in Luftfahrttriebwerken**

Die Schriftenreihe *Advances in Automation Engineering*
wird herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Clemens Gühmann.

Rudolf Lück

**Überwachung hybrider Schrägkugellager
in Luftfahrttriebwerken**

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

Universitätsverlag der TU Berlin, 2018

<http://verlag.tu-berlin.de>

Fasanenstr. 88, 10623 Berlin

Tel.: +49 (0)30 314 76131 / Fax: -76133

E-Mail: publikationen@ub.tu-berlin.de

Zugl.: Berlin, Techn. Univ., Diss., 2018

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Clemens Gühmann

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Stephan Staudacher (Universität Stuttgart)

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Roland Werthschützky (Technische Universität Darmstadt)

Die Arbeit wurde am 17. Juli 2018 an der Fakultät IV unter Vorsitz von Prof. Dr.-Ing. Reinhold Orglmeister erfolgreich verteidigt.

Diese Veröffentlichung ist urheberrechtlich geschützt.

Umschlagfoto: Rolls-Royce Deutschland 2017

Druck: docupoint GmbH

Satz/Layout: Rudolf Lück

ISBN 978-3-7983-3021-4 (print)

ISBN 978-3-7983-3022-1 (online)

ISSN 2509-8950 (print)

ISSN 2509-8969 (online)

Zugleich online veröffentlicht auf dem institutionellen Repositorium der Technischen Universität Berlin:

DOI 10.14279/depositonce-7283

<http://dx.doi.org/10.14279/depositonce-7283>

Danksagung

Diese Arbeit ist während meiner Zeit bei Rolls-Royce Deutschland, einem Hersteller von Triebwerken und Komponenten für die zivile und militärische Luftfahrt, in einem Forschungsprojekt zu neuen Lagertechnologien entstanden. Die Betreuung an der TU Berlin erfolgte durch Prof. Dr.-Ing. Clemens Gühmann, dem ich für die Diskussionen und Ratschläge danke. Prof. Dr.-Ing. Stefan Staudacher und Prof. Dr.-Ing. habil. Roland Werthschützky danke ich für die Übernahme der Gutachten und das Interesse an meiner Arbeit. Für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes danke ich Prof. Dr.-Ing. Reinhold Orglmeister.

Der Firma Rolls-Royce Deutschland danke ich für die Genehmigung die Daten zur Anfertigung einer Dissertation verwenden zu können.

Insbesondere Dank an:

Dr. rer. nat. Peter Hackenberg (RRD), Dr. Ing. Ralf von der Bank (RRD),
Dilay Dil (RWTH Aachen), Bastian Herrmann (TU Berlin),
Björn Petersen (TU Berlin), David Hassler (ETH Zürich),
Simon Wieloch (TU Berlin), Maurice Preidel (TU Berlin),
Zain Tariq (TU Cottbus), Viet Duc Tran (TU Berlin),
Matthias Matzkau (TU Braunschweig) und Theodora Tzortzoglou (TU Berlin).

Für die Durchsicht der Arbeit danke ich Dr. Ing. Dragoljub Surdilovic vom IPK-Berlin.

Der Firma FAG Aerospace GmbH & Co. KG einem Unternehmen der Schaeffler Gruppe danke ich für die hervorragende Zusammenarbeit.

Insbesondere Dank an: Dr. Ing. Edgar Streit und Patrick Mirring.

Die Arbeit wurde erstellt im Rahmen des Luftfahrt Forschungsprogramms LUFO, VEROLAT Förderkennzeichen 20T0912A und VERLAT-FP Förderkennzeichen 20T1119A.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Abstract

A concept to monitor hybrid angular ball bearings is presented. Interactions of damaged balls with the steel raceways are shown. Weak points in calculating ball spinning speeds are discussed and methods to improve this are proposed. Results based on sensors measuring structure borne noise are compared to results of vibration sensors and metal particle sensors. It is shown that a detection of bearing failures is possible at an early stage of degradation. A concept for a live time model that estimates the remaining time after detecting a bearing failure is delivered. The governing parameters to estimate remaining life after detecting a bearing failure are identified. A concept of a self-monitoring unit is introduced.

Kurzfassung

Es wird ein Konzept zur Überwachung hybrider Schrägkugellager für Hauptwellen von Luftfahrttriebwerken vorgestellt. Gezeigt wird die Auswirkung der Interaktion geschädigter keramischer Wälzkörper mit den Stahllaufringen. Es werden Schwachstellen bei der Berechnung von Kugelrotationsfrequenzen besprochen und Möglichkeiten, die Resultate der Berechnung zu verbessern. Im Vergleich werden Vorteile bei der Erfassung von Lagerschäden durch die Messung von Körperschall gegenüber der Messung von Vibrationen oder der Messung von Metallpartikeln im Öl gezeigt. Nachgewiesen wird, dass eine Erkennung von Lagerschäden zu einem frühen Zeitpunkt im Schädigungsprozess möglich ist. Ein besonderer Wert wird auf Möglichkeiten der Entwicklung eines Lebensdauermodells gelegt, um die verbleibende Lebenszeit eines Lagers nach der Erkennung eines Lagerschadens abschätzen zu können. Eingegangen wird auf eine fortlaufende Eigendiagnose der Überwachungseinheit.

Inhaltsverzeichnis:

Danksagung	V
Abstract	VII
Kurzfassung	IX
Inhaltsverzeichnis	XI
Abbildungsverzeichnis	XIV
Nomenklatur	XVII
Abkürzungsverzeichnis	XX
Erklärung von Begriffen	XXII

1	Einleitung	1
1.1	Hybride Schrägkugellager in Flugtriebwerken	2
1.2	Motivation zur Überwachung hybrider Kugellager	3
1.3	Stand der Forschung und Technologie	3
1.4	Ziel der Arbeit	5
1.5	Beschreibung des Vorgehens	6
2	Vorversuche	8
2.1	Messungen an einem Validierungs-Kerntriebwerk	8
2.1.1	Sensorpositionen am Triebwerk	8
2.2	Piezoelemente zur Messung von Überroll- und Körperschallsignalen	11
2.2.1	Bestimmung der Durchmesser der Piezoelemente	11
2.3	Messungen an einem Kleinlagerprüfstand	12
2.3.1	Vorversuche zur Stabilität der Kugelrotationsachse	15
2.3.2	Versuche zur Erkennung von Ausbrüchen auf Kugeln	16
2.3.3	Versuche zur Risserkennung auf keramischen Kugeln	22
2.4	Resultate der Vorversuche	26
3	Kinematik des Schrägkugellagers	27
3.1	Kontaktmechanik im Schrägkugellager	27
3.1.1	Kontakt der Kugel zur Laufbahn	27
3.1.2	Reibung in den Kontaktflächen	28
3.1.3	Pressungsellipse mit symmetrischen Differenzgeschwindigkeiten	29

3.1.4	Pressungsellipse mit asymmetrischen Differenzgeschwindigkeiten.....	31
3.2	Einfluss der Kugelrotationsachse	32
3.2.1	Stabilität der Kugelrotationsachse	32
3.2.2	Schadüberrollfrequenzen in der Literatur	35
3.2.3	Betrachtung zum Beta-Winkel der Kugelrotationsachse	36
3.2.4	Die Laufringkontrolltheorie detailliert betrachtet.....	40
3.2.5	Periodische Änderungen der Kugelrotationsachse	43
3.2.6	Berechnung der Frequenzen zur Bestimmung von Fehlermerkmalen.....	48
3.3	Messungen an Hauptwellenlagern auf dem Großlager-Prüfstand AN58.....	50
3.3.1	Instrumentierung Hauptwellenlager.....	53
3.3.2	Standardflugzyklen.....	55
3.3.3	Messungen zur Kugelrotationsfrequenz f_B	56
3.3.4	Unbestimmbare Systemzustände im Lager	59
3.3.5	Einfluss γ -Winkel auf die Käfigrotationsfrequenz.....	66
3.4	Häufigkeit einer Schadüberrollung bei Kugelschäden	69
3.4.1	Stabilisierung der Schadüberrollung auf der Kugel.....	69
3.4.2	Überrollbänder am Schrägkugellager	71
3.4.3	Messungen zu Überrollraten bei Kugelschäden.....	73
3.5	Ergebnisse zum Verhalten von Schrägkugellagern.....	75
4	Schadensfortschritt und Erkennbarkeit.....	77
4.1	Schäden auf keramischen Kugeln	78
4.1.1	Schadensfortschritt in keramischen Kugeln.....	78
4.1.2	Schadensfortschrittsversuche mit keramischen Kugeln	80
4.1.3	Erkennung kritischer Rissgrößen bei der Produktion	87
4.2	Schäden auf Stahllaufbahnen.....	87
4.2.1	Laufbahnschäden aufgrund von Kugelschäden.....	88
4.2.2	Laufbahnschäden durch Fremdkörper	91
4.3	Verbleibende Lebenszeit eines Lagers nach einem Schadenseintritt.....	92
4.3.1	Verbleibende Lebenszeit nach Kugelschäden.....	92
4.3.2	Verbleibende Lebenszeit nach Laufbahnschäden	95
4.3.3	Abschätzung der verbleibenden Lebenszeit.....	98
4.4	Bestimmung der Axialkraft im Schrägkugellager.....	101
4.4.1	Instrumentierung axiale Lastmessung	101
4.4.2	Vortest zur Generierung von Referenzwerten.....	103
4.4.3	Näherungsfunktion über Referenzwerte	104
4.4.4	Messungen zur Validierung und Diskussion der Axiallastschätzung	106
4.5	Schätzung der Schadensgröße auf einer Kugel	108
4.6	Zusammenfassung, Schadenserkennung und Schadfortschrittserkennung...	115

5	Überwachung von Schrägkugellagern in Luftfahrtantrieben.....	117
5.1	Eignung der getesteten Sensoren zur Triebwerksüberwachung.....	117
5.1.1	Fehlererkennung Körperschall-, Vibrations- und Metallpartikelsensoren	117
5.1.2	Vorteil Messung Körperschall gemeinsam mit Überrollverformung.....	120
5.1.3	Messung ferromagnetischer Partikel mit EMCD.....	123
5.1.4	Temperatursensoren zur Erkennung von Schäden im Kugellager.....	132
5.2	Signalauswertung der Piezoelemente.....	132
5.2.1	Fensterfunktion über die Datenreihen	133
5.2.2	Trennung der Piezosignale in Körperschall- und Überrollsignale.....	133
5.2.3	Auswertung von Seitenbändern.....	136
5.2.4	Hüllkurvenbildung über abklingende Eigenschwingungen des Lagers.....	137
5.2.5	Übersicht der Signalverarbeitung.....	139
5.3	Ergebnisse, Erkennung von Schäden in Schrägkugellagern.....	141
5.3.1	Erkennung von Kugelschäden.....	141
5.3.2	Erkennung von Innenringschäden	142
5.3.3	Erkennung von Außenringschäden.....	143
5.3.4	Eigendiagnose der Lagerüberwachungseinheit.....	145
5.3.5	Plausibilitätsprüfung der Sensorsignale	148
6	Ergebnisse und Ausblick.....	149
6.1	Ergebnisse.....	149
6.2	Ausblick.....	150
7	Anhang.....	157
7.1	Ableitung der Gleichung (3.8)	157
7.2	Ableitung der Gleichung (3.15)	158
7.3	Ableitung der Gleichung (3.16) und (3.17).....	161
7.4	Statisches Gleichgewicht der Kräfte im Kontaktpunkt.....	162
7.5	Berechnung des β -Winkels	163
7.6	Berechnung der Kugelrotationsfrequenz f_B (siehe Gleichung (3.16))	163
7.7	Berechnung Frequenzfenster der Kugelrotationsfrequenzen f_B	163
7.8	MATLAB-Erweiterung Curve Fitting Toolbox, Erklärung der Ausgaben	164
7.9	Materialien der Prüflager	165
7.10	Piezoelemente	167
7.11	Sensoren	168
7.12	Chassis für Messkarten	169
7.13	Messkarten.....	169

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 0.1: Übersicht zu den Bezeichnungen am Schrägkugellager.....	XX
Abbildung 1.1: Festlager einer Hochdruckwelle im Triebwerk.....	1
Abbildung 2.1: Instrumentierung des Demonstrator-Kerntriebwerks.....	9
Abbildung 2.2: Vergleich der Spektren der Sensorsignale.....	10
Abbildung 2.3: Spindelukellager der Firma FAG.....	13
Abbildung 2.4: Instrumentiertes Kleinlager auf dem Prüfstand MGG12.....	14
Abbildung 2.5: Positionen und Angaben zu den Sensoren am Kleinlager.....	15
Abbildung 2.6: Kugel mit 9,5 mm Durchmesser mit künstlich eingebrachtem Schaden von 0,55 mm Durchmesser.....	16
Abbildung 2.7: Schaden mit 0,55 mm Durchmesser.....	17
Abbildung 2.8: Mit einem Beschleunigungssensor erkannter Schaden.....	18
Abbildung 2.9: Mit einem Piezoelement PIC 255 erkannter Schaden.....	19
Abbildung 2.10: Mit einem elektrodynamischen Sensor erkannter Schaden.....	21
Abbildung 2.11: Mit einem Piezoelement PIC 255, P 45 erkannter Schaden.....	23
Abbildung 2.12: Mit einem Schwingenspulensensor SG4 erkannter Schaden.....	25
Abbildung 3.1: Kontaktfläche zwischen Kugel und Außenring.....	28
Abbildung 3.2: Kontaktarten zwischen den Kugeln und den Laufbahnen.....	29
Abbildung 3.3: Symmetrisches Profil der Differenzgeschwindigkeiten.....	30
Abbildung 3.4: Asymmetrisches Profil der Differenzgeschwindigkeiten.....	31
Abbildung 3.5: Verlauf eines magnetisierten Punktes auf einer rotierenden Kugel.....	33
Abbildung 3.6: Verlauf eines magnetisierten Punktes auf einer rotierenden Kugel.....	33
Abbildung 3.7: Orientierung der Kugelrotationsachse (β -Winkel).....	37
Abbildung 3.8: Orientierung der Kugelrotationsachse (β -Winkel).....	37
Abbildung 3.9: Orientierung der Kugelrotationsachse (β -Winkel).....	38
Abbildung 3.10: Vergleich Außenring-Kontrolltheorie mit Messwerten.....	39
Abbildung 3.11: Drehung der Kugel um die Flächennormalen („Bohren“).....	41
Abbildung 3.12: Bei Außenringkontrolle entsteht „Bohren“ ω_{IPN} am Innenring.....	42
Abbildung 3.13: Qualitativer Verlauf der Differenzgeschwindigkeiten v_{diff}	42
Abbildung 3.14: Bei Innenringkontrolle entsteht „Bohren“ ω_{OPN} am Außenring.....	43
Abbildung 3.15: Querschnitt durch ein Schrägkugellager mit Kontaktpunkten.....	44
Abbildung 3.16: Fortlaufende Änderung der Orientierung der Kugelrotationsachse.....	45
Abbildung 3.17: Umlauf des Drehimpulses $L_{B,abrol}$ mit dem Moment $M_{B,tan}$	46
Abbildung 3.18: Die Wirkung der Drallstabilisierung verringert den β -Winkel und bewirkt damit eine erhöhte Winkelgeschwindigkeit der Kugel ω_B	47
Abbildung 3.19: Prüfkopf mit angebautem Hydraulikzylinder.....	51
Abbildung 3.20: Großlagertestrigg bei der Firma FAG.....	52
Abbildung 3.21: Instrumentiertes Großlager für einen Test.....	53
Abbildung 3.22: Piezoelemente auf der Stirnseite des Lagers.....	54
Abbildung 3.23: Lagerkäfig mit den gefrästen Stegen und den induktiven Sensoren.....	54
Abbildung 3.24: In den Versuchen verwendeter Standardflugzyklus.....	55
Abbildung 3.25: Gemessene Kugelrotationsfrequenzen f_B von Stahlkugeln.....	56
Abbildung 3.26: Gemessene Kugelrotationsfrequenzen f_B keramischer Kugeln.....	57

Abbildung 3.27: Vergleich berechneter und gemessener Käfigfrequenzen f_C	58
Abbildung 3.28: Verlauf Außenringtemperatur ϑ_C im Standardflugzyklus.	60
Abbildung 3.29: Verlauf Außenringtemperatur ϑ_C im Standardflugzyklus.	60
Abbildung 3.30: Bereiche nicht erkannter 0,55 mm Kugelschäden.....	62
Abbildung 3.31: β -Winkel der Kugelrotationsachsen berechnet.....	63
Abbildung 3.32: Kugelrotationsfrequenzen f_B über den Käfigfrequenzen f_C	64
Abbildung 3.33: Kugelrotationsfrequenzen f_B über den Käfigfrequenzen f_C	65
Abbildung 3.34: Gegensätzliche Änderungen der Kugelrotationsfrequenzen f_B	67
Abbildung 3.35: Lagerkäfig mit Verdrehung der Kugelrotationsachse.....	68
Abbildung 3.36: Auffälligkeiten bei Käfigen von Triebwerkslagern.	69
Abbildung 3.37: Möglicher Mechanismus für stabile Überrollung eines Kugelschad..	70
Abbildung 3.38: Beispiel zum Verhältnis von Überrollbändern auf einer Kugel.	72
Abbildung 3.39: Erkannte Überrollungen eines Kugelschadens.....	73
Abbildung 3.40: Erkannte Überrollungen eines Kugelschadens.....	73
Abbildung 3.41: Amplituden des Überrollsignals U_{UE}	74
Abbildung 4.1: Schadensfortschritt und Erkennbarkeit eines Schadens.	77
Abbildung 4.2: Typischer Rissverlauf unter der Oberfläche einer keram. Kugel.....	79
Abbildung 4.3: FEM Simulation der Prüfanordnung für Einzelkugelversuche.	80
Abbildung 4.4: Einzelkugelprüfstand bei FAG.	81
Abbildung 4.5: Riss auf der Oberfläche der keramischen Kugel.....	82
Abbildung 4.6: Kugel mit Schaden in einem Einzelkugelprüfstand.....	82
Abbildung 4.7: Nach 150 Stunden bei 2300 MPa und anschließend 150 Stunden	83
Abbildung 4.8: Vor dem erneuten Test bei 3800 MPa.....	83
Abbildung 4.9: Vor weiteren 450 Stunden bei 3800 MPa.....	84
Abbildung 4.10: Schliffpositionen in 0,1 mm Abständen.	84
Abbildung 4.11: Ausrichtung der Risse, bezogen auf die überrollte Bahn.....	85
Abbildung 4.12: Rissfortschritte in keramischen Kugeln in Abhängigkeit von der Pressung und der Überrollhäufigkeit über den Schaden.	86
Abbildung 4.13: C-förmiger Riss bei Testbeginn unterhalb der Erkennungsgrenze..	87
Abbildung 4.14: Keramische Kugel mit künstlich eingebrachtem Schaden, mit 0,55 mm Durchmesser.	89
Abbildung 4.15: Vergrößerte Abbildung eines künstlich eingebrachten Schadens mit 0,55 mm Durchmesser.	89
Abbildung 4.16: Geschädigter Innenring nach Testlauf mit einem Ausbruch.....	89
Abbildung 4.17: Typischer Schadensverlauf im hybriden Kugellager bei einem Anfangsschaden auf einer keramischen Kugel und messtechnische Möglichkeiten der Erkennung.	90
Abbildung 4.18: Spanabtrag aus einer Lagerlaufbahn.....	91
Abbildung 4.19: Lagerlaufbahn nach der Überrollung.	92
Abbildung 4.20: Metallabtrag aus den Laufflächen (M50-NIL).	93
Abbildung 4.21: Verlauf des Abtrages von Metallpartikeln.....	94
Abbildung 4.22: Vorschädigung der Innenringe..	96
Abbildung 4.23: 3D-Profil eines Eindrucks.	96
Abbildung 4.24: Künstlich eingebrachte Innenringschäden an 4 Positionen.....	97
Abbildung 4.25: Metallabtrag bei vorgeschädigten Laufbahnen.	97

Abbildung 4.26: Ausfallzeiten bei unterschiedlichen Laufring Qualitäten	98
Abbildung 4.27: Modell zur Schätzung der verbleibenden Lebenszeit	99
Abbildung 4.28: Positionen der piezoelektrischen Sensorelemente.....	102
Abbildung 4.29: Axialkraft F_{axial} und Wellenfrequenz f_s während des Vortests.	103
Abbildung 4.30: Näherungsfunktion über die Referenzwerte.....	105
Abbildung 4.31: Messung der Axiallast mit den Piezoelementen.....	106
Abbildung 4.32: Abweichungen (Solllast - Messwerte) Piezoelemente #1 bis #6.	107
Abbildung 4.33: Exemplarisch gemessene, relative, verbleibende Lebensdauern.....	108
Abbildung 4.34: Über dem Umfang eines Lageraußenringes gemessen.	109
Abbildung 4.35: Max. Amplitude Überrollsignal U_{UE}	110
Abbildung 4.36: Amplituden von Eigenschwingungen U_{Eig}	110
Abbildung 4.37: Erkannte Schadgrößen auf keramischen Kugeln.....	111
Abbildung 4.38: Degradierung des Piezo-Elementes 3 nach 30 und 64 Stunden.	112
Abbildung 4.39: Schätzung der abklingenden e-Funktion mit der Methode a).	113
Abbildung 4.40: Hüllkurvenspektrum der abklingenden Eigenschwingungen.	114
Abbildung 4.41: Gute Trennung der Schadgrößen auf keramischen Kugeln.....	114
Abbildung 5.1: Vergleich der zuverlässigen Zeitpunkte der Schaderkennung.	118
Abbildung 5.2: FEM Simulation zeigt die Verformungen eines Lageraußenringes..	121
Abbildung 5.3: Signale bei Reiseflugbedingungen.....	122
Abbildung 5.4: Am Lageraußenring gemessene, abklingende Schwingung.....	123
Abbildung 5.5: Prinzipbild eines EMCD.....	124
Abbildung 5.6: Aufbau EMCD mit Steckbuchse und Prüfnetzwerk..	124
Abbildung 5.7: Funktionstrennung Messung und BITE durch Dioden.....	125
Abbildung 5.8: Funktionstrennung Messung und BITE durch Kondensatoren.	125
Abbildung 5.9: Einzelkugelprüfstand, Widerstandsverlauf an den Kontakten.....	127
Abbildung 5.10: Prüfstand AN 58, Widerstand an den Kontakten des EMCD.	128
Abbildung 5.11: Prüfstand AN 58, Verlauf des Widerstandes an den Kontakten.	129
Abbildung 5.12: EMCD mit dem Besatz kleiner Metallspäne 0,22 g..	131
Abbildung 5.13: Magnetfilter mit dem Besatz kleiner Metallspäne 2,82 g.....	132
Abbildung 5.14: Impulse durch Schadüberrollungen; angeregte, abklingende Eigenschwingung und Hüllkurvenwiederhol frequenz der Signale.	138
Abbildung 5.15: Übersicht über den Ablauf der Auswertung der Signale.	139
Abbildung 5.16: Übersicht der Signale bei der Auswertung.....	140
Abbildung 5.17: Erkannte Merkmale eines Kugelschadens.....	142
Abbildung 5.18: Erkannte Merkmale eines Innenringschadens.	143
Abbildung 5.19: Möglicher Außenringschaden.	144
Abbildung 5.20: Im Zeitbereich erkannter Außenringschaden.....	144
Abbildung 5.21: Gut-Zustand, Signal eines Piezoelementes bei der Überrollung.....	146
Abbildung 5.22: Schlecht-Zustand, Nullstellen und Abstände sind unregelmäßig.....	146
Abbildung 5.23: Schlecht-Zustand, Amplitude zu klein.....	147
Abbildung 5.24: Widerstands- Diodennetzwerk für die Funktionsüberprüfung.	147
Abbildung 7.1: Konstruktion zu der Gleichung (3.8).....	157
Abbildung 7.2: Ableitung Gleichung (3.15).....	158
Abbildung 7.3: Konstruktion der Winkel für die Gleichung (3.15).....	160
Abbildung 7.4: Temperaturabhängigkeit der Spannungs-Konstanten g_{33} und $-g_{31}$	168

Nomenklatur:

a_I	[m]	Große Halbachse der Kontaktellipse Kugel zu Laufbahn innen
a_O	[m]	Große Halbachse der Kontaktellipse Kugel zu Laufbahn außen
b_I	[m]	Kleine Halbachse der Kontaktellipse Kugel zu Laufbahn innen
b_O	[m]	Kleine Halbachse der Kontaktellipse Kugel zu Laufbahn außen
c_L	[m s ⁻¹]	Ausbreitungsgeschwindigkeit der Longitudinalwelle
$\vec{e}_N$		Flächennormale
E	[Pa]	Elastizitätsmodul
E_1, E_2	[Pa]	Elastizitätsmodule der unterschiedlichen Materialien
f	[s ⁻¹]	Frequenz
f_B	[s ⁻¹]	Rotationsfrequenz der Kugel, entspricht der Überrollfrequenz bei Kugelschaden
f_C	[s ⁻¹]	Käfigfrequenz
$f_{C,max,Rei}$	[s ⁻¹]	Maximale Käfigfrequenz bei Reisefluggeschwindigkeit
f_I	[s ⁻¹]	Überrollfrequenz am Innenring oder bei Innenringschaden
f_O	[s ⁻¹]	Überrollfrequenz über eine Sensorposition am stillstehenden Außenring oder Überrollfrequenz bei einem Außenringschaden
$f_{UE,7}$	[s ⁻¹]	7 harmonische Frequenz der Kugelüberrollfrequenz
f_S	[s ⁻¹]	Wellenfrequenz
$f_{S,max}$	[s ⁻¹]	Maximale Wellenfrequenz
f_{stop}	[s ⁻¹]	Eckfrequenz im Stoppband des Hochpassfilters
f_{pass}	[s ⁻¹]	Eckfrequenz im Durchlassband des Hochpassfilters
$\vec{F}_{axial}$	[N]	Kraft axial
$\vec{F}_{cent}$	[N]	Zentrifugalkraft auf die Kugeln
$\vec{F}_{fr,N}$	[N]	Coulombsche Reibung aufgrund der Normalkraft
$\vec{F}_{fr,tan O}$	[N]	Reibung tangential zum Außenringradius
$\vec{F}_{fr,tan I}$	[N]	Reibung tangential zum Innenringradius
$\vec{F}_N$	[N]	Normalkraft
$\vec{F}_{N,O}$	[N]	Normalkraft auf Kugel am Außenring
$\vec{F}_{N,I}$	[N]	Normalkraft auf Kugel am Innenring
$\vec{F}_{fr}$	[N]	Kraft durch einen Reibungsvorgang
$\vec{F}_z$	[N]	Kräfte in Richtung der z-Achse
g_{31}, g_{33}	[Vm/N]	Piezoelektrische Spannungskonstanten siehe 7.10
IP		Kontaktpunkt Kugel Laufbahn Innenring
IT		Konstruktionspunkt, Tangente Wälzkörperkontakt Innenring
IT		Konstruktionspunkt, Tangente Wälzkörperkontakt Innenring
J_B	[kg m ²]	Rotationsträgheitsmoment der Kugel
k_B		Anzahl der Kugeln im Käfig des Kugellagers
$K_{Fr,Sp}$		Koeffizient fluide Reibung
l	[m]	Länge
$\vec{L}$	[kg·m ² ·s ⁻¹]	Drehimpuls
$\vec{L}_B$	[kg·m ² ·s ⁻¹]	Drehimpuls Kugel
$d\vec{L}_{B,abroll}$	[kg·m ² ·s ⁻¹]	Differentieller Drehimpuls auf die Kugel
$\vec{L}_{B,abroll}$	[kg·m ² ·s ⁻¹]	Drehimpuls Kugel durch Antrieb
$\vec{L}_{B,abroll,radial}$	[kg·m ² ·s ⁻¹]	Drehimpuls radiale Komponente

$\vec{L}_{B,abroll,axial}$	[kg·m ² ·s ⁻¹]	Drehimpuls axiale Komponente
M		Konstruktionspunkt Rotationsachse Wälzkörper
M_B		Masse Kugel
$\vec{M}_{fr}$	[Nm]	Moment aus dem Radius der Kugel und der Kraft bei der Reibung
$\vec{M}_{B,tan}$	[Nm]	Moment entspricht dem Gyromoment $\vec{M}_g$
$\vec{M}_g$	[Nm]	Gyromoment in der Wirkung auf die Kugel
$\vec{M}_{OP}$	[Nm]	Drehmomente im Kontaktpunkt am Außenring
$\vec{M}_R$	[Nm]	Drehmoment aus der Reibung
$\vec{M}_{R,abroll}$	[Nm]	Drehmoment aus der Abrollbedingung
n_B	[min ⁻¹]	Kugeldrehzahl um die Kugelachse
n_C	[min ⁻¹]	Käfigdrehzahl des Lagers
n_i	[min ⁻¹]	Drehzahl des Lagerinnenringes
n_s	[min ⁻¹]	Wellendrehzahl entspricht der Drehzahl des Lagerinnenringes
N		Ordnung
OP		Kontaktpunkt Kugel Laufbahn Außenring
OT		Konstruktionspunkt, Tangente Wälzkörperkontakt Außenring
P_Z	[Pa]	Druck senkrecht auf der Pressungsellipse
Q	[C]	Ladung
r_m	[m]	Radius Lagerachse zur Drehachse der Kugel beim Umlauf = $d_m/2$ Teilkreisradius/2
r_{IP}	[m]	Abstand Kontaktpunkt innen zur Kugelrotationsachse
r_{IR}	[m]	Abstand Kontaktpunkt innen zur Lagerachse
r_{OP}	[m]	Abstand Kontaktpunkt außen zur Kugelrotationsachse
r_{OR}	[m]	Abstand Kontaktpunkt außen zur Lagerachse
R_{CI}	[m]	Umfangsradius der Lagerringe am Kontaktpunkt
$R_{CI,O}$	[m]	Umfangsradius der Lagerringe am Kontaktpunkt außen
$R_{CI,I}$	[m]	Umfangsradius der Lagerringe am Kontaktpunkt innen
R_B	[m]	Kugelradius = $D_B/2$
R_O	[m]	Radius der Lagerlaufbahn in Querrichtung (Schmiegung) außen
R_I	[m]	Radius der Lagerlaufbahn in Querrichtung (Schmiegung) innen
$\vec{R}_{B,IP}$	[m]	Radiusvektor der Kugel zum Kontaktpunkt am Innenring
$\vec{R}_{B,OP}$	[m]	Radiusvektor der Kugel zum Kontaktpunkt am Außenring
$u_a(t)$	[V]	Resultierendes Signal
$u_m(t)$	[V]	Auf die Trägerfrequenz $\cos(\omega t + \phi)$ modulierte Signal
U	[V]	Spannung in Volt
U_{UE}	[V]	Spannung, Amplitude des Überrollsignals, gemessen mit Piezoelement
$\hat{U}_{UE}$	[V]	Spannung, maximale Amplitude des Überrollsignals, gemessen mit Piezoelement
U_{Eig}	[V]	Spannung, Amplitude einer Eigenschwingung, gemessen mit Piezoelement
$\hat{U}_{Eig}$	[V]	Spannung, maximale Amplitude einer Eigenschwingung, gemessen mit Piezoelement
$U_{Eig,norm}$	[V]	Spannung, normierte Amplitude einer Eigenschwingung (normiert mit maximaler Überrollamplitude $\hat{U}_{UE}$)
$\hat{U}_{max}$	[V]	Scheitelwert maximale Spannung
$\vec{v}_{diff}$	[m s ⁻¹]	Differenzgeschwindigkeit in der Pressungsellipse zwischen Kugel und Laufbahn

$v_{diff,x}$	[m s ⁻¹]	Differenzgeschwindigkeit in x-Richtung in der Pressungsellipse zwischen Kugel und Laufbahn mit Piezoelement
$\vec{v}_B$	[m s ⁻¹]	Geschwindigkeit der Kugel in Umlaufrichtung im Lager
$\vec{v}_{BI}$	[m s ⁻¹]	Geschwindigkeit der Kugel am Kontaktpunkt zum Innenring
$\vec{v}_C$	[m s ⁻¹]	Käfiggeschwindigkeit entspricht der mittleren Bahngeschwindigkeit der Kugeln
$\vec{v}_{IR}$	[m s ⁻¹]	Geschwindigkeit Innenring
α_I	[°]	Kontaktwinkel innen
α_{nom}	[°]	Nominaler Kontaktwinkel am Außenring (Mittlerer Auslegungs- und Betriebspunkt)
α_o	[°]	Kontaktwinkel außen
β	[°]	Winkel zwischen der Kugelrotationsachse und der Lagerachse
γ	[°]	Yaw-Winkel der Kugelrotationsachse in Umlaufrichtung der Kugel
λ_L	[m]	Wellenlänge
ε	[µm]	Schwerpunktverschiebung der Kugel
ϑ	[°C]	Temperatur
μ_{fr}		Reibungskoeffizient
$\mu_{fr,Coul}$		Reibungskoeffizient für trockene Reibung (Coulombsche Reibung)
ν_1, ν_2		Poisson-Zahlen, (Querkontraktionszahl)
ρ	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$	Dichte des Materials
$\vec{\omega}_B$	$\left[\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right]$	Winkelgeschwindigkeit um die Rotationsachse der Kugel im Käfigsystem
$\vec{\omega}_C$	$\left[\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right]$	Winkelgeschwindigkeit Lagerkäfig im Ortsfesten System
$\vec{\omega}_{IP}$	$\left[\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right]$	Winkelgeschwindigkeit, Rotation der Kugel relativ zum Innenring
$\vec{\omega}_{IPT}$	$\left[\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right]$	Winkelgeschwindigkeit, Tangentialanteil von $\vec{\omega}_{IP}$
$\vec{\omega}_{IPN}$	$\left[\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right]$	Winkelgeschwindigkeit, Normalanteil von $\vec{\omega}_{IP}$
$\vec{\omega}_{OP}$	$\left[\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right]$	Winkelgeschwindigkeit, Rotation der Kugel relativ zum Außenring
$\vec{\omega}_{OPT}$	$\left[\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right]$	Winkelgeschwindigkeit, Tangentialanteil von $\vec{\omega}_{OP}$
$\vec{\omega}_{OPN}$	$\left[\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right]$	Winkelgeschwindigkeit, Normalanteil von $\vec{\omega}_{OP}$ im Umlauf im Lager um die Lagerachse
$\vec{\omega}_P$	$\left[\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right]$	Winkelgeschwindigkeit Präzession, Kreiselgesetze
$\vec{\omega}_S$	$\left[\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right]$	Winkelgeschwindigkeit der Welle

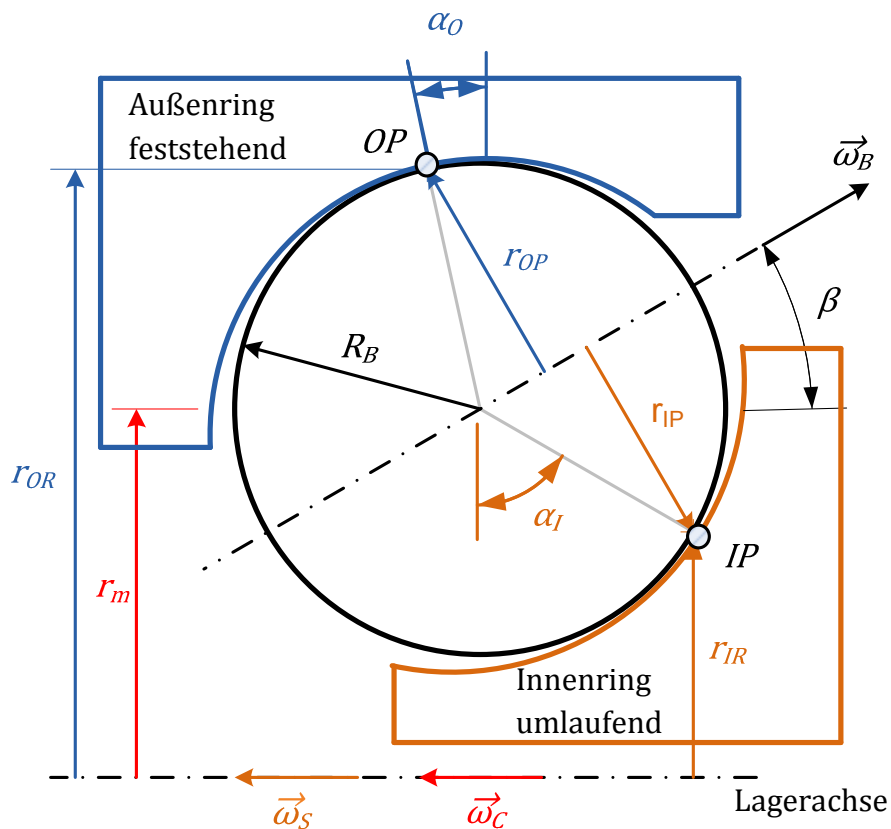


Abbildung 0.1: Übersicht zu den Bezeichnungen am Schrägkugellager.

Die Darstellung in der Abbildung 0.1 ist eine prinzipielle Darstellung und zeigt einen Zweipunktkontakt eines Schrägkugellagers. In dieser prinzipiellen Darstellung ist eine Umkehrung der axialen Kraft nicht möglich.

Bei den in dieser Arbeit behandelten Schrägkugellagern handelt es sich um Dreipunktlager, bei denen eine Umkehr der axialen Kräfte möglich ist. Die Schrägkugellager werden jedoch aus Vereinfachungsgründen als Zweipunktlager dargestellt.

Abkürzungsverzeichnis

A090	Beschleunigungssensor auf Messposition 90°
A180	Beschleunigungssensor auf Messposition 180°
A270	Beschleunigungssensor auf Messposition 270°
AN58	Lagerprüfstand für Triebwerkswellenlager [FAG Schweinfurt]
BSF	Rotationsfrequenz um die Kugelachse (<i>Ball Spin Frequency</i>)
BITE	Überprüfung der Eigenfunktion (<i>Build In Test Equipment</i>)
DH	<u>D</u> oppel <u>g</u> ehärtete Oberfläche

DoE	Design of Experiment
DRESP	Drehschwingungssimulationsprogramm der Forschungsvereinigung für Antriebstechnik FVA, Frankfurt
EMCD	Partikelsensor (<i>Electric Magnetic Chip Detector</i>): An einem Magneten anhaftende ferromagnetische Partikel werden über die elektrische Leitfähigkeit der Partikel bewertet.
FEM	Methode kleinster Elemente (<i>Finite Elemente Methode</i>)
ETOPS	Erweiterte Einsatzbefähigung für Flugzeuge mit zwei Triebwerken (<i>Extended-range Twin-engine Operational Performance Standards</i>)
EHD	Elasto Hydro Dynamisch
FVA	Forschungsvereinigung Antriebstechnik
LRU	Austauschbare Einheit (<i>Line Replaceable Unit</i>)
MATLAB	Programmiersprache zur Realisierung mathematisch-physikalischer Aufgaben
M50	Stahl, Durchhärter, siehe Materialien der Prüflager Kapitel 7.9
M50NiL	Stahl, Einsatzhärtung, siehe Materialien der Prüflager Kapitel 7.9
M50NiL-DH	Stahl, Duplex-Härtung, siehe Materialien der Prüflager Kapitel 7.9
MED	Minimale Entropie Entfaltung (<i>Minimum Entropy Deconvolution</i>)
MGG12	Lagerprüfstand für Kleinlager [FAG Schweinfurth]
NI	National Instruments
P045	Piezoelement auf Messposition 45°
P135	Piezoelement auf Messposition 135°
P225	Piezoelement auf Messposition 225°
P315	Piezoelement auf Messposition 315°
PB06	Versuch (<i>Predamaged Ball</i>) mit einem künstlichen Ausbruch von Ø 1,0 mm auf der Kugel
PB07	Versuch (<i>Predamaged Ball</i>) mit einem künstlichen Ausbruch von Ø 0,55 mm auf einer keramischen Kugel
Q180	Rolls-Royce eigenes Lager Simulationsprogramm, beruht auf den Gleichungen von Harris [1]
QDM	Sensor zur Messung ferromagnetischer Partikel im Öl arbeitet mit einem Lubriclone Partikel Separator Hersteller Firma Eaton
RRD	Rolls-Royce Deutschland
Si ₃ N ₄	Keramik aus Siliziumnitrid, siehe Materialien der Prüflager, siehe Kapitel 7.9
V000_SG4	Schwingspulensensor (Elektrodynamischer Sensor) auf Messposition 0°
VEROLAT	LUFO Programm, Verbesserung von Lagerauslegungen, speziell von hybriden Lagern
VERLAT-FP	LUFO Folgeprogramm, Verbesserung von Lagerauslegungen

Erklärung von Begriffen

Außenringkontrolle	Ausdruck aus der Laufringkontrolltheorie: Um die Flächennormale der Kugel in der Kontaktfläche zum Außenring findet keine Drehung der Kugel statt.
ANSYS Workbench	FEM Simulations-Software
Bohren	Begriff für die Rotation einer Kugel um die Flächennormale in der Kontaktfläche zwischen Kugel und Lauffläche.
Design Modeler	Konstruktions-Software für mechanische Teile
GASTOPS	Kanadischer Hersteller von Überwachungssensoren
Geteilte Kontrolle	Ausdruck aus der Laufringkontrolltheorie: Um beide Flächennormalen in den Kontaktflächen der Kugel zum Innen- und Außenring findet eine Drehung der Kugel statt.
Innenringkontrolle	Ausdruck aus der Laufringkontrolltheorie: Um die Flächennormale der Kugel in der Kontaktfläche zum Innenring findet keine Drehung der Kugel statt.
Kugelpassierfrequenz	Frequenz der Passage von Kugel an einer Position am Außenring
Kerntriebwerk	Verdichter, Brennkammer und Turbine
Lagerluft	Spiel der Kugeln zwischen den Laufringen Kennwert für das Design eines Lagers. Die Lagerluft ist entscheidend für eine mögliche Neuausrichtung der Kugeln im Lager bei Last- und Drehzahländerungen.
Laufringkontrolle	Entsprechend den Theorien in der Literatur, z.B. Jones [2], Harris [3], Außen- oder Innenringkontrolle
Lubriclone Partikel Separator	Leitet das rücklaufende Öl in Spiralen im Kreis, so dass in der Mitte der Spirale die Luft entweichen kann. Metallpartikel sammeln sich ganz außen in einer Rinne der Spirale, die zu dem messenden Sensor führt.
Mechanical Methode a)	Programm zur Definition von Randbedingungen Verwendet das Maximum der auftretenden Amplituden der Eigenschwingungen $\hat{U}_{Eig}$, dividiert durch das Maximum der Amplituden aus der Überrollverformung $\hat{U}_{UE}$.
Methode b)	Ermittlung der Amplituden der Eigenschwingungen U_{Eig} mit Hilfe des Hüllkurvenspektrums (Grundschiwingung der Eigenfrequenz plus zwei Harmonische addiert) dividiert durch den Mittelwert der Amplituden aus der Überrollverformung U_{UE} der defekten Kugel aus demselben Datensatz, mit dem das Hüllkurvenspektrum bestimmt wurde.
Piezoelement	Messelemente, ohne Gehäuse, auf piezoelektrischer Basis
Pressungsellipse	Kontaktfläche zwischen einer Kugel und der Lagerlauffläche unter Berücksichtigung der Elastizität der Kugel und der Laufflächen.
Rollpunkt	Die Differenzgeschwindigkeit $\vec{v}_{diff}$ zwischen Kugeloberfläche und Laufringen ist gleich Null, kein Gleiten.

Schräggugellager	Lager zur Aufnahme axialer und radialer Kräfte. Bei 3-Punkt-Lagern kann die axiale Kraftrichtung wechseln.
Sperrluft	Wird durch Labyrinth-Dichtungen in ölführende Teile eines Triebwerks gedrückt, um das Öl am Austreten zu hindern.
α -Winkel	Winkel zwischen den Flächennormalen der Pressungsflächen Kugel, Innen- und Außenring, zur Lagerachse.
β -Winkel	Winkel zwischen Kugelrotationsachse und Lagerachse.
γ -Winkel	Winkel beschreibt die Abweichung der Kugelrotationsachse von der Lagerachse in Umlaufrichtung (Yaw-Winkel).

1 Einleitung

Triebwerke für Luftfahrtanwendungen sollen immer leichter und dabei effizienter werden. Dies wird unter anderem dadurch erreicht, dass immer höhere Drehzahlen für Axialverdichter und Turbinen gewählt werden. Deshalb werden immer robustere und höher belastbare Lager benötigt. Da klassische Stahllager die Grenzen der mechanischen Belastbarkeit erreicht haben, müssen andere Wege gegangen werden. Ein Weg ist die Verwendung hybrider Lager, wobei die Lagerlaufringe aus Stahl bestehen und die Kugeln aus technischer Keramik (Si_3N_4). Diese Art der Keramik ist seit einiger Zeit im Einsatz, jedoch wurden die Zusammensetzung der Keramikbestandteile und der Herstellungsprozess immer weiter verfeinert, so dass nun technisch ausgereifte Produkte mit hoher Haltbarkeit und einem festgeschriebenen Produktionsprozess zur Verfügung stehen. Der Einsatz hybrider Kugellager bringt deutliche Vorteile (Kapitel 1.1) gegenüber reinen Stahllagern.

Schäden in Form von Ausbrüchen auf den Oberflächen der keramischen Kugeln werden – im Hinblick auf die Interaktion der geschädigten keramischen Kugeln mit den metallischen Lagerlauflächen – als kritisch angesehen. Die Erkennung von Schäden an keramischen Kugeln und der Ablauf des Schadensfortschritts an den Laufbahnen sind bisher in der Literatur nicht hinreichend beschrieben.

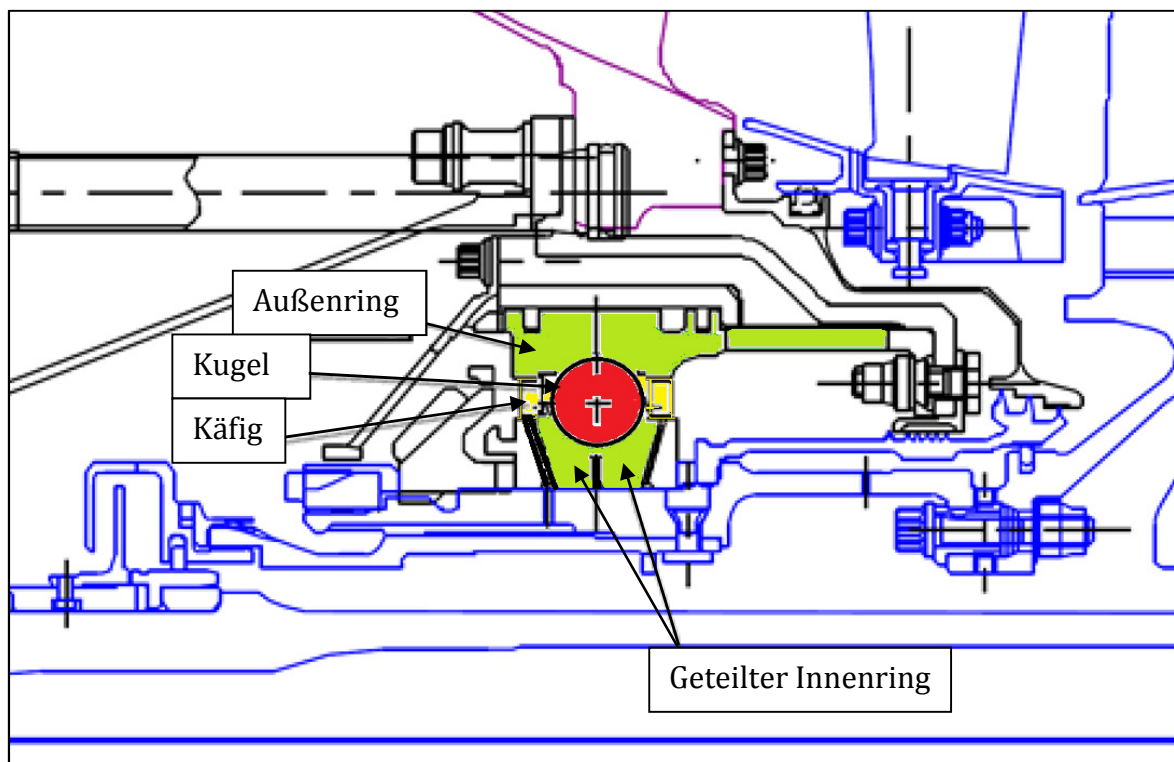


Abbildung 1.1: Festlager einer Hochdruckwelle im Triebwerk.

Um die Risiken der neuen Materialkombination zu adressieren, wird der Bedarf von Sensoren und Verfahren zur frühen Erkennung von Kugelschäden untersucht. In die-

ser hier vorliegenden Arbeit werden Versuche durchgeführt, die eine Aussage über eine minimal erreichbare Restlaufzeit nach der Erkennung eines Schadens unterstützen. Die Restlaufzeit soll dabei idealerweise eine planbare Überholung eines Triebwerks ermöglichen. Um einen in der Serie anwendbaren Einsatz einer Überwachung hybrider Schrägkugellager in Flugzeugtriebwerken zu unterstützen, werden Sensoren und Methoden auf eine Eignung hin untersucht. Für eine zuverlässige Anwendung in der Luftfahrt ist weniger die Komplexität von Hardware und Methoden gefragt als eher deren Einfachheit und somit Robustheit.

In der Abbildung 1.1 ist das Festlager einer Hochdruckwelle in einem Flugzeugtriebwerk dargestellt. Dieses Lager ist im Stillstand ein Dreipunktlager mit zwei Kontaktpunkten am Innenring und einem Kontaktpunkt am Außenring. Durch eine im Lagerdesign festgelegte radiale Lagerluft können sich die Kugeln im Betrieb in der Position ausrichten und das Lager läuft dann als Zweipunkt Schrägkugellager. Diese Lager können sowohl radiale als auch axiale Kräfte aufnehmen. Die axialen Kräfte können bei dieser Lagerart in beide Richtungen aufgenommen werden.

Im Betrieb gibt es einen Kontaktpunkt am Innenring und einen Kontaktpunkt am Außenring des Lagers. Die Kontaktpunkte der Kugel am Innen- und Außenring bestimmen die Rotationsfrequenzen des Lagerkäfigs und der Kugeln. Die Kontaktpunkte und damit die Kontaktwinkel zwischen den Kugeln und den Laufflächen verändern sich in Abhängigkeit von den externen Kräften und den Wellenfrequenzen.

Der Außenring des Lagers ist über Streben mit der feststehenden Struktur des Triebwerks verbunden. Der Innenring des Lagers ist fest mit der Welle des Hochdruckverdichters verbunden. Der Innenring ist geteilt, um die Montage des Lagers zu ermöglichen und durch den Spalt eine optimale Ölversorgung zu gewährleisten.

1.1 Hybride Schrägkugellager in Flugtriebwerken

Keramische Wälzkörper haben im Vergleich zu Stahl-Wälzkörpern eine Reihe von Vorteilen. Keramik hat eine geringe Affinität zu Stahl. Dies schließt die Gefahr einer Kaltverschweißung der Kugeloberflächen mit den Lagerlaufflächen aus. Die Paarreibung von Keramik zu Stahl ist geringer als die von Stahl zu Stahl. Daraus resultierend ergibt sich eine bessere Haltbarkeit beim Auftreten von Mangelschmierung. Durch die geringere Dichte der Keramik ist die Fliehkraft und damit die Rollreibung geringer. Keramische Kugeln sind korrosionsbeständig, elektrisch isolierend und nicht magnetisch. Durch die elektrische Isolation des Außenringes zum Innenring können keine laufbahnschädigenden elektrischen Ströme über die Kugeln fließen.

Durch die höhere Steifigkeit ist die Druckellipse der Kugel im Kontakt zu den Laufflächen kleiner und damit die Flächenpressung höher. Dies kann jedoch durch die Wahl eines größeren Kugeldurchmessers und einer engeren Schmiegun g zwischen Kugel und Laufbahnen ausgeglichen werden.

1.2 Motivation zur Überwachung hybrider Kugellager

Es soll gezeigt werden, dass eine Überwachung hybrider Schrägkugellager Risiken vermindern kann und damit die Vorteile hybrider Schrägkugellager genutzt werden können.

Als Ausgangspunkt in dieser Arbeit wird angenommen, dass es durch geschädigte keramische Kugeln, aufgrund der hohen Härte der Keramik (Si_3N_4), zu einer schnellen Schädigung der Lagerlauflächen kommen kann.

Aus diesem Grunde ist es vorteilhaft, neben den Lauflächen den Zustand der keramischen Kugeln im Betrieb überwachen zu können. Schäden an den keramischen Kugeln sollen möglichst früh erkannt werden, um eine ausreichende Reaktionszeit für zu ergreifende Wartungs- oder Reparaturmaßnahmen zur Verfügung zu haben.

1.3 Stand der Forschung und Technologie

Gegenwärtig werden Wellenlager in zivilen Flugzeugen nicht direkt am Lager überwacht. Eine Überwachung wird bisher nur bei einigen Triebwerken durch Beschleunigungsaufnehmer über den Stützstreben der Lager vorgenommen. An dieser Position wirken allerdings viele Nebengeräusche aus anderen Quellen des Triebwerks auf die Sensoren ein, was zu einem schlechten Signal-Rausch-Verhältnis führt. Die bisher bei Triebwerken zur Überwachung verwendeten Beschleunigungsaufnehmer weisen nur eine geringe Frequenz-Bandbreite auf. Dies führt zu Einschränkungen bei der messtechnischen Erfassung von Eigenschwingungen, die durch eine Überrollung von Lagerschäden angeregt werden und zur Erkennung von Lagerschäden dienen. Daher ist es mit bisherigen Messkonfigurationen nicht möglich, Überrollungen von Schäden in einem Schrägkugellager in einem frühen Stadium zu erkennen.

Zum Thema „Überwachung von Kugellagern“ gibt es Artikel und Abschnitte in Büchern, z.B. Eschmann [4], Harris [1], Harris [3], Brändlein [5], Dempsey [6]. Allerdings befasst sich nur eine begrenzte Anzahl von Autoren mit den Besonderheiten schnell-drehender hybrider Schrägkugellager. Insbesondere besteht Forschungsbedarf zum Verhalten keramischer Kugeln in schnell-drehenden hybriden Schrägkugellagern. Dempsey [6] berichtet, dass in defekten Lagern bei der Generierung von Partikeln zwischen hybriden und reinen Stahllagern keine Unterschiede zu erkennen seien. Diese Sichtweise würde nahelegen, dass bei einer Überwachung auf der Grundlage von Metallpartikeln im Öl kein Handlungsbedarf bei der Einführung hybrider Lager bestünde. Kawamura [7] geht auf die Kinematik von Stahlkugeln in einem schnell-drehenden Schrägkugellager ein. Er magnetisiert eine Stahlkugel und verfolgt über Hallsensoren die Orientierung der Kugelachse in Relation zur Lagerachse. Entgegen der verbreiteten Laufringkontrolltheorie, die auch von Harris [1] vertreten wird, kommt Kawamura in seinem Artikel [7] zu abweichenden Ergebnissen bezüglich der Orientierung der Kugelrotationsachse im Lager. Kawamura [7] weist den Verlauf der Kugelrotationsachse im Umlauf durch Messungen nach und zeigt, dass die Annahmen der Laufringkontrolltheorie nicht durchgängig vertreten werden können. Hamrock [8] kommt zu der Aussage, dass die Laufringkontrolltheorie nur für die Betrachtung

trockener Lagerkontakte geeignet ist. Bei Kawamura [7] werden Schadstellen in Kugeln eingebracht und analysiert, ob dies einen Einfluss auf die sich einstellenden Kugelrotationsachsen hat. Shi [9] benutzt zur Erkennung von Lagerfehlern das Hüllspektrum von Wavelet Transformationen. Es ist in der Literatur bei Harris [3] und Gupta [10], nicht abschließend geklärt, ob ein Sensor direkt am Lager zur Erkennung früher Lagerschäden notwendig ist oder ein Sensor an einer gut zugänglichen Stelle ausreicht (LRU). Hea [11] schlägt eine Fuzzy-Logik vor, um optimale Wavelet-Parameter zu finden, mit denen die Fehlercharakteristik eines Lagers hervorgehoben werden kann. Fei [12] verwendet die Kurtosis für Daten, die über einen Vibrationsaufnehmer gemessen werden, um frühe Lagerschäden zu erkennen. Dabei baut er ein Modell auf, um die Kurtosis schätzen zu können. El-Thalj [13] verwendet Ultraschall und gibt an, damit schon Risse in den Laufbahnen erkennen zu können, bevor es zu einem Ausbruch von Material kommt. Hoffmann [14] überwacht Wälzlager mit Hilfe von Faser-Bragg-Gittern als Sensoren über mechanische Dehnung.

Gegenwärtig werden zur Erkennung von Schäden in Flugtriebwerken überwiegend Metallpartikel-Sensoren zur Überprüfung des Öls eingesetzt (siehe Dempsey [6]). Zur Erkennung ferromagnetischer Partikel im Öl werden bisher MCD, EMCD, QDM und MetalScan-Sensoren und Systeme verwendet. Ein MCD ist ein einfacher Magnet im Ölkreislauf, der in festgelegten Intervallen auf Anlagerungen ferromagnetischer Partikel manuell kontrolliert wird. Die Prozedur ist aufwendig und wegen der Zeitabstände zwischen den manuellen Kontrollen für die Anzeige akuter Vorfälle ungeeignet. Ein EMCD ist eine Weiterentwicklung eines MCD, welcher um Kontakte erweitert wurde. Die Kontakte werden durch die Ansammlung ferromagnetischer Partikel überbrückt. Dadurch ist es möglich, eine Veränderung des Widerstandes zwischen den Kontakten zu messen. Nachteilig ist, dass einzelne kleine Partikel nur schwer nachweisbar sind. Ein Widerstandsnetzwerk, das zur Kontrolle der Funktion des EMCD dient (BITE), verhindert eine höhere Auflösung bei der Messung des Partikelbelages. Das MetalSCAN Oil-Debris-Monitoring-System der Firma GASTOPS erfasst ferromagnetische und elektrisch leitende Partikel beim Durchgang durch Spulen, die mit den Wicklungen um die Ölleitung angeordnet sind. Dabei kann zwischen ferromagnetischen und nur elektrisch leitenden Partikeln unterschieden werden. Einzelne kleine Partikel können nicht erfasst werden. Der QDM Sensor der Firma Eaton arbeitet mit einem Partikel-Separator. Der Partikel-Separator funktioniert über eine Ölleitung, die in Spiralen gelegt ist. Beim Durchlaufen der Spirale werden die Partikel über die Zentrifugalkraft der Dichte nach separiert. Dadurch reichern sich die dichten metallischen Bestandteile in einer äußeren Rinne in der Spirale des Separators an. Am Ende des Separators befindet sich in der Rinne ein Magnet, der die ferromagnetischen Partikel sammelt. An dem Magneten befindet sich ein Sensor, der Veränderungen im magnetischen Feld misst und somit die Menge der ferromagnetischen Partikel bestimmen kann. Ein Nachteil des Sensors ist, dass bei einer Veränderung der Lage ferromagnetischer Partikel im magnetischen Feld es zu fehlerhaften Messungen kommen kann. Zudem können einzelne kleine ferromagnetische Partikel nicht durch das System erfasst werden. Herkert [15] beschreibt die radioaktive Behandlung einer Kugeloberfläche. Nach einem Versuch wird der Abrieb der Lagerkomponenten im Öl gemessen.

1.4 Ziel der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist eine frühe und zuverlässige Erkennung eines Schadens in hybriden Schrägkugellagern. Es sollen die in der Literatur nicht ausreichend geklärten, offenen Fragestellungen bearbeitet und erkannte Lücken geschlossen werden.

Insbesondere besteht Forschungsbedarf bei der notwendigen Sicherheit in der Überwachung von Lagern in Flugtriebwerken bezüglich der frühesten sicher erkennbaren Schäden in Kombination mit einer notwendigen hohen Zuverlässigkeit bei Schadausagen. Es müssen Lücken geschlossen werden zu Möglichkeiten einer robusten, einfachen fortlaufenden Selbstüberwachung der Diagnosefunktionen. Weiterhin besteht Forschungsbedarf zu Möglichkeiten der Abschätzung der verbleibenden Betriebszeit nach der Erkennung eines Schadens im Lager.

Es besteht Forschungsbedarf, geeignete Positionen und Sensortypen am Triebwerk für die Überwachung von Hauptwellenlagern zu bestimmen. Hierzu sollen Messdaten von Beschleunigungssensoren auf gegenwärtig verwendeten Positionen auf einem Triebwerk mit Messdaten von Sensoren an Positionen direkt am Lager verglichen werden. Verschiedene Sensortypen sollen auf eine Eignung zur Messung von frühen Lagerschäden geprüft werden.

Es soll eine Bestimmung von Schadensmerkmalen für die jeweiligen Lagerschäden durchgeführt werden. Dazu besteht Forschungsbedarf zur Lagerkinematik von schnelldrehenden hybriden Schrägkugellagern, speziell zum dynamischen Verhalten von keramischen Kugeln in diesen Lagern.

Es besteht Forschungsbedarf zum Schädigungsverhalten hybrider Lager, speziell sind Forschungslücken bei der Interaktion geschädigter keramischer Kugeln mit den metallischen Laufflächen der Lagerringe zu schließen. Im Rahmen der Arbeit soll die Versagensmechanik der Lagerkomponenten hybrider als auch traditioneller Schrägkugellager untersucht werden. Das bisher nur unzureichend untersuchte Bruchverhalten von keramischen Kugeln aus Si_3N_4 Keramik (Siliziumnitrid) und ein sich aus Schäden auf den keramischen Kugeln ergebender sekundärer Fehlerfortschritt im Lager soll untersucht werden.

Die Forschungsarbeiten sollen die Entwicklung eines luftfahrttauglichen Konzeptes zur Überwachung hybrider schnelldrehender Schrägkugellager von Triebwerks-Hauptwellen ermöglichen. Beim Aufbau des Systems sind luftfahrtspezifische Besonderheiten zu berücksichtigen. Das gesamte Überwachungssystem soll einfach und robust gehalten werden.

1.5 Beschreibung des Vorgehens

An Flugzeugtriebwerken werden aus Kosten, Gewichts- und Wartungsgründen möglichst wenige Sensoren gewünscht. Von Seiten der Triebwerksentwickler besteht die Forderung, Sensoren auf Triebwerken möglichst zu vermeiden. Falls Sensoren benötigt werden, sollen möglichst in Luftfahrtanwendungen eingeführte Sensoren an etablierten, leicht zugänglichen Stellen vorgesehen werden. Deshalb wird untersucht, ob bisher schon verwendete Sensoren für die Erfassung früher Lagerschäden ausreichend sind. Im Kapitel 2.1.1 erfolgen Messungen an etablierten, leicht zugänglichen Positionen für Sensoren am Triebwerk. Die Qualität der Sensorsignale an diesen Positionen wird verglichen mit Signalen von Sensoren, die direkt am Lager angebracht sind.

Auf einem Kleinlagerprüfstand (siehe Kapitel 2.3) werden die Möglichkeiten zur Erkennung von Ausbrüchen in den Kugeln sowie zur Erkennung von Rissen (siehe Kapitel 2.3.3) in keramischen Kugeln untersucht. Es erfolgen erste Versuche zu der in dieser Arbeit verfolgten Annahme, dass die Rotationsachsen der Kugeln beim Umlauf im Schrägkugellager eine weitgehende Stabilität aufweisen und die Kugeloberflächen auf stabilen Bahnen überrollt werden. In den Versuchen wird das Verhalten keramischer und stählerner Kugeln betrachtet.

In triebwerksnahen Prüfaufbauten (siehe Abbildung 3.19 und Abbildung 3.20), werden Versuche mit Triebwerkshauptwellenlagern durchgeführt. Die Versuchsbedingungen sollen eine Übertragbarkeit der Resultate auf ein Triebwerk unterstützen. Die Lageraußenringe (siehe Kapitel 3.3.1) werden mit einer geeigneten Sensorik versehen, welche die Erfassung eingebrachter Kugel- und Laufbahnschäden ermöglicht.

Im Kapitel 3.2 wird geprüft, ob die in der Literatur aufgeführten kinematischen Beziehungen geeignet sind, Schadüberrollfrequenzen im schnelllaufenden Schrägkugellager zuverlässig bestimmen zu können. Dabei wird die in dieser Arbeit vertretene Annahme untersucht, dass die Messung der Käfigrotationsfrequenzen einen wesentlichen Beitrag zur Erkennung von Lagerschäden liefern kann. Im Kapitel 3.2.1 wird die in dieser Arbeit vertretene Annahme untersucht, dass die Rotationsachsen von Kugeln in einem Triebwerkshauptwellenlager eine ausreichende Stabilität aufweisen und die Kugeln damit stabil auf einer Bahn auf den Kugeloberflächen überrollt werden. Stabile Überrollungen auf Bahnen (siehe Abbildung 3.38) der Kugeloberflächen sind die Bedingung dafür, dass Kugelschäden zu regelmäßigen Signalen führen und als messbare Frequenzen erfassbar sind.

Es wird eine Erkennung von Rissen in der Keramik von Kugeln und die Erkennung kleiner Ausbrüche auf der Oberfläche von Kugeln in Versuchen auf Großlagerprüfständen (AN 58) untersucht. Dazu werden Kugeln mit künstlichen Schädigungen versehen.

An Einzelkugelprüfständen (siehe Kapitel 2.1.1) erfolgen Versuche zum Schadensfortschrittsverhalten bei keramischen als auch traditionellen Stahlkugeln. Dazu wird ein beschleunigter Schadensverlauf an künstlich vorgeschädigten Kugeln durch erhöhte Pressungen provoziert (siehe Kapitel 4.1.1).

Im Kapitel 4 werden Versuche zum Schadensfortschritt auf den Laufflächen durchgeführt. Es soll die Annahme überprüft werden, dass Schäden auf den Metallaufflächen

durch die Einwirkung von Fremdkörpern oder in einer Sekundärschädigung durch defekte Kugeln verursacht werden. Untersucht wird dazu die Interaktion künstlich vorgeschädigter Kugeln mit den Laufflächen der Lager (4.2.1) und die sich daraus ergebenden Signaturen bei den verwendeten Sensoren. Speziell wird die Annahme überprüft, ob geschädigte keramische Kugeln die kritischsten Schäden in hybriden Kugellagern sind.

Zur Vorhersage von verbleibenden Betriebszeiten nach einem erkannten Eintritt eines Lagerschadens werden Möglichkeiten zum Aufbau eines Schadensfortschrittsmodells erörtert (Kapitel 4.3.3). Dazu werden Elemente wie Lastschätzung am stillstehenden Außenring (Kapitel 4.4) und eine Initialschadenserkennung auf Kugeln behandelt (Kapitel 4.5).

Die Erprobung und Auswahl von Sensoren und Methoden soll den späteren Einsatz in einem Triebwerk unterstützen (siehe Kapitel 5.1). Ziel ist es, ein robustes System zur Lagerüberwachung aufzubauen. Die Sensortypen (siehe Kapitel 5.1.2) und die Sensorpositionen werden so ausgewählt, dass möglichst viele Informationen durch wenige Sensoren bereitgestellt werden können.

Es werden Methoden zur Erkennung von Schadüberrollungen erprobt (siehe Kapitel 5.2.4). Bei den Schadüberrollungen werden angeregte Strukturresonanzen gemessen und mittels einer Analyse der Hüllkurvenwiederhol frequenzen den Schadensursachen im Lager zugewiesen. Die Lagerüberwachungseinheit soll eine Eigendiagnosefunktion zur Verfügung stellen (siehe Kapitel 5.3.4). Die zur Erkennung der Schadensfälle gefundenen Signaturen und Verfahren sollen so aufbereitet werden, dass ein Einsatz in Flugtriebwerken zur Überwachung von Schrägkugellagern der Hauptwellen möglich wird. Die Zeit von der Erkennung eines Schadens bis zum Ausfall des Lagers soll ausreichen, um planbare Maßnahmen für Wartungen treffen zu können.

2 Vorversuche

Es wird die in dieser Arbeit getroffene Annahme überprüft, dass Lager- und Wellensignale mit Beschleunigungssensoren an gegenwärtig etablierten Positionen auf Triebwerken nicht erkennbar sind. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sollen die Notwendigkeit von Sensoren direkt am Lager zeigen.

Es werden verschiedene Sensortypen bei der Erkennung von Frühschäden im Schrägkugellager erprobt und die Ergebnisse miteinander verglichen. Es erfolgt eine Untersuchung, ob im Betrieb eines Schrägkugellagers bereits Risse in keramischen Kugeln erkannt werden können.

Stabile Kugelrotationsachsen beim Umlauf von Kugeln in Schrägkugellagern sind von grundlegender Bedeutung für eine Erkennung potentieller Schäden auf den Kugeloberflächen und eine Grundlage für die Fortführung dieser Arbeit. Ein instabiles Verhalten der Kugelrotationsachsen im Lager und damit eine irreguläre Laufbahn auf den Kugeloberflächen würde die Überwachung von beginnenden Kugelschäden im laufenden Kugellager nicht zulassen. Deshalb wird die in dieser Arbeit vertretene These überprüft, dass die Rotationsachsen der Kugeln, beim Umlauf der Kugeln im Lager, sich weitgehend stabil verhalten und damit stabile Bahnen auf den Kugeloberflächen überrollt werden.

2.1 Messungen an einem Validierungs-Kerntriebwerk

Auf einem Validierungs-Kerntriebwerk wird in Voruntersuchungen überprüft, welche Sensorpositionen und Sensortypen für die Überwachung von Schrägkugellagern geeignet und notwendig sind. Dazu werden Versuche zur messtechnischen Erfassbarkeit von Lagersignalen durchgeführt. Die Erkennung von Schadsignaturen zu einem frühen Zeitpunkt der Schädigung eines Lagers bedingt eine ausreichende Qualität der Signale von den Sensoren an den Lagern. Es wird davon ausgegangen, dass beginnende Schäden an einem Lager nur kleine Signalamplituden verursachen.

2.1.1 Sensorpositionen am Triebwerk

Es wird untersucht, ob zur Erkennung von Lagersignalen ein Sensor direkt an einem Schrägkugellager angebracht werden muss oder ein Sensor an einer leicht zugänglichen Position im Triebwerk ausreichend zur Messung von Lagersignalen ist. Dazu erfolgen Messungen an dem Außenring eines ungeschädigten Festlagers des axialen Verdichters eines Validierungs-Kerntriebwerkes (siehe Abbildung 2.1).

Für die Messungen direkt am Lager wird eine Dehnungsmessbrücke benutzt, die auf den Federstegen des Kugellagers angebracht ist (siehe Abbildung 2.1). Im Lager ist eine geringe Unwucht der Hauptwelle ausreichend, um eine periodische Kraft mit der Wellenfrequenz und deren harmonischen Schwingungen zu erzeugen.

Vergleichend erfolgen Messungen an der Außenseite einer Befestigungsstrebe des Lagers. Diese Position ist bereits etabliert für die Anbringung von Beschleunigungssensoren an Triebwerken. Es wird untersucht, ob mit einem breitbandigen Beschleu-

nigungsaufnehmer (siehe Anhang 7.11) an dieser Position (siehe Abbildung 2.1) Auswirkungen der periodischen Kräfte im Lager in ausreichender Qualität gemessen werden können.

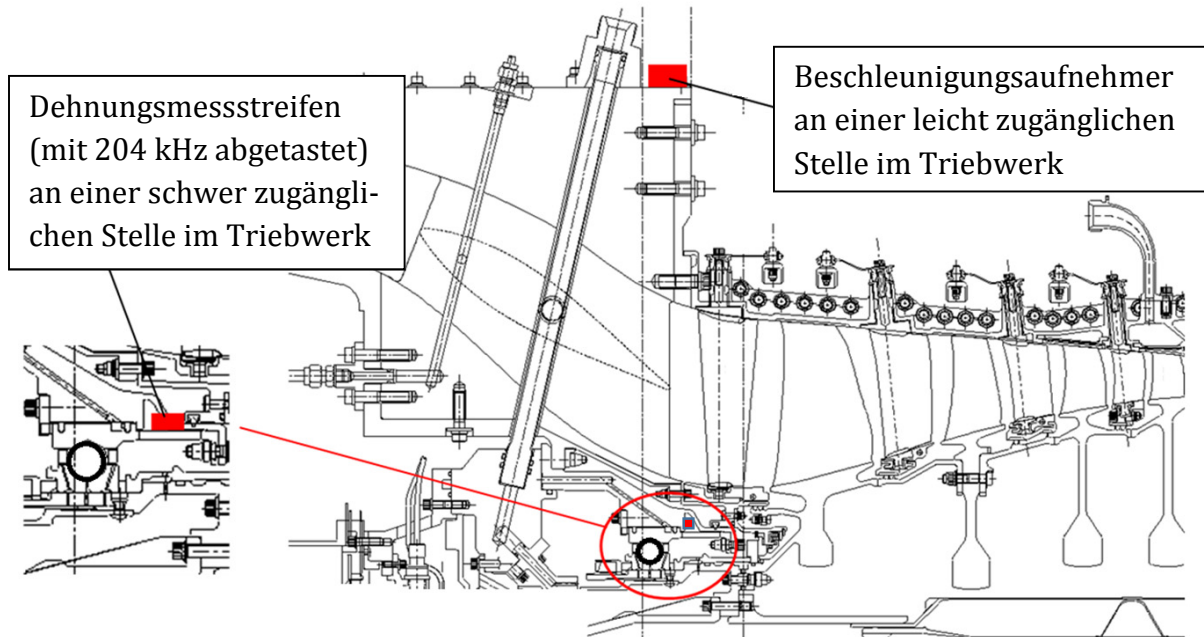


Abbildung 2.1: Instrumentierung des Demonstrator-Kerntriebwerks [Bild RRD].

Auf einem Flugzeugtriebwerk ist mit Störeinflüssen unterschiedlichster Art auf die Signale von Sensoren zu rechnen. Es treten zu den Signalen der Sensoren unkorrelierte Störungen als auch korrelierte Störungen auf.

Es soll eine möglichst umfassende Information über das entstehende Frequenzspektrum gewonnen werden. Deshalb wird bei der zur Verfügung stehenden Messtechnik die höchste mögliche Abtastfrequenz von 204kHz gewählt. Bewertet wird vergleichend die Lesbarkeit der Sensorsignale an den beiden Positionen des Triebwerks. Der Versuch wird durchgeführt bei einer Wellenfrequenz von 159,6 Hz.

Die für die Erkennung von Lagerschäden relevanten Bereiche im Frequenzspektrum ergeben sich aus den durch Schadüberrollungen angeregten Eigenschwingungen und den Überrollfrequenzen über Lagerschäden. Für das Beispiel eines Außenringschadens ergibt sich die Schadüberrollfrequenz aus der Käfigfrequenz multipliziert mit der Kugelanzahl. Die Käfigfrequenz kann näherungsweise mit der halben Wellendrehzahl angenommen werden. Somit kommt man bei einer Abschätzung auf die halbe Wellendrehzahl mal Anzahl der Kugeln. Die Eigenresonanzen, die durch die Schadüberrollungen angeregt werden können, hängen von der Geometrie, der Befestigung des Lagers und den Materialien des Lagers ab.

Die Amplituden im Frequenzbereich beider Sensoren werden bei der Grundfrequenz der Verdichterwelle auf den Wert 1 normiert. In der Abbildung 2.2 (oberes Diagramm) sind die Signale der Dehnmessbrücke zu sehen.

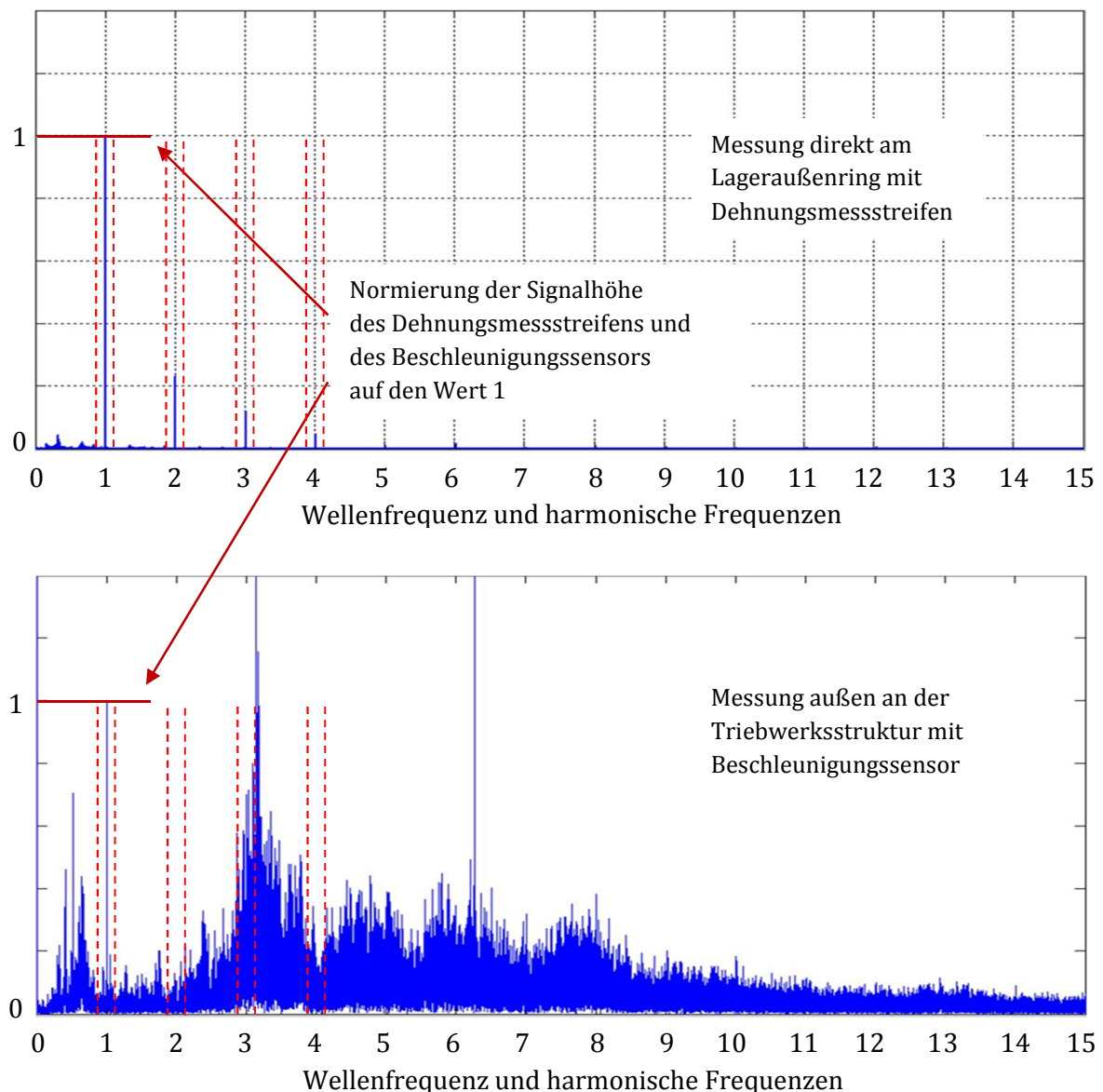


Abbildung 2.2: Vergleich der Spektren der Sensorsignale: (Diagramm oben) Gemessen, direkt am Lageraußenring mit Dehnungsmessbrücke. (Diagramm unten) Gemessen außen an der Struktur des Triebwerks mit Beschleunigungssensor Endevco 7240C, 30 kHz [1EA].

Die direkt am Lager befestigte Dehnungsmessbrücke wird mit 204 kHz abgetastet und zeigt nahezu störungsfrei die Wellenfrequenz der Hochdruckwelle bis zu hohen harmonischen Frequenzen (Abbildung 2.2 oberes Diagramm).

In der Abbildung 2.2 (unteres Diagramm) sind die Signale eines Beschleunigungssensors dargestellt, der außen an den Befestigungsstreben der Triebwerksstruktur angebracht ist. Der im Frequenzspektrum für die Überwachung von Lagern relevante Bereich (siehe Kapitel 3.2.6) ist besetzt durch Signale mit hoher Energie von Schwingungen, die aus anderen Triebwerkselementen eingetragen werden. Schon die zweite Harmonische der Wellenfrequenz ist nicht mehr zu erkennen. Beginnende Lager-

schäden erzeugen sehr viel kleinere Signalamplituden als eine Unwucht in einer Triebwerkshauptwelle. Deshalb kann die Aussage getroffen werden, dass beginnende Lagerschäden mit einem Beschleunigungssensor, außen an den Befestigungsstreben der Triebwerksstruktur, nicht erkennbar sind. Es ist somit eine Messung direkt am Lager notwendig, um die erforderliche Qualität und Bandbreite der Signale zu bekommen, die notwendig ist, um Aussagen über den Lagerzustand treffen zu können. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden die Versuche mit Piezoelementen weitergeführt, da diese Vorteile in der Messung hoher Frequenzen bereitstellen und zusätzlich Überrollsignale liefern, die wichtige Informationen bereitstellen. Auf die Vorteile bei der Verwendung von Piezoelementen wird später im Kapitel 5.1.2 eingegangen.

2.2 Piezoelemente zur Messung von Überroll- und Körperschallsignalen

Es sollen zur Überwachung von Flugtriebwerken, alternativ zu Beschleunigungssensoren oder konfektionierten Körperschallsensoren, Piezoelemente auf eine Anwendbarkeit zur Lagerüberwachung getestet werden. Piezoelemente sind klein, leicht und können sowohl Körperschall als auch die Überrollung von Kugeln als Spannungssignal messen.

Gewählt werden Piezoelemente der Firma PI-Ceramic vom Typ PIC 255 und PIC 300. Eine Übersicht der Kenngrößen der verwendeten Piezokeramiken finden sich im Anhang 7.10. Es können sowohl das Überrollsignal als auch die im Signal enthaltenen Körperschallsignale ausgewertet werden. Die Körperschallsignale werden unter anderem durch Schadüberrollungen erzeugt. Überrollsignale auf dem Außenring entstehen bei der Überrollung der Sensorposition durch die Kugeln. Überrollsignale beinhalten die Frequenz der Kugelüberrollungen und damit die Käfigfrequenz f_C . Mit der Kenntnis der Käfigfrequenz f_C kann die auf die Kugeln wirkende Fliehkraft berechnet werden.

Die maximal zulässige Temperatur der ausgewählten Piezoelemente PIC 255 beträgt 175°C, dies entspricht der Hälfte der vom Hersteller angegebenen Curietemperatur. Diese Temperatur ist für die anstehenden Versuche nicht völlig ausreichend, da erwartet wird, dass die Temperaturen im Lager höhere Werte erreichen können. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass die Piezoelemente für den Zeitraum der Versuchsabläufe eine ausreichende Lebensdauer zur Verfügung stellen. Die Piezoelemente werden für die Durchführung der Versuche auf den Außenringen der Lager verklebt (siehe Abbildung 2.4 und Abbildung 2.5).

2.2.1 Bestimmung der Durchmesser der Piezoelemente

Die aktive Messfläche eines für die Anwendung geplanten Piezoelementes sollte nicht größer als die halbe minimale Wellenlänge bei der maximal möglichen Messfrequenz sein. Es muss vermieden werden, dass die Signalamplitude am Sensor negativ beeinflusst wird. Es wird davon ausgegangen, dass bei der Überrollung eines Schadens im Lager Longitudinalwellen die Signale zu den Sensoren übertragen. Longitudinalwel-

len haben in Stahl eine Phasengeschwindigkeit c_L von etwa 5000 m/s. Durch die Wahl der Messkarten (siehe Anhang 7.13) beträgt die Abtastfrequenz 200 kHz und damit ist die maximal mögliche Messfrequenz kleiner als 100 kHz.

$$\lambda_L = \frac{c_L}{f} \quad (2.1)$$

Als Ergebnis der Rechnung ergibt sich eine Wellenlänge von 50 mm bei 100 kHz und $\lambda_L/2$ zu 25 mm. Daraus folgert, dass bis zu einer maximalen Messfrequenz von 100 kHz ein geplanter Sensordurchmesser von maximal 10 mm nahezu keine Verminderung in der Messempfindlichkeit verursacht, da dieser Wert unter der berechneten, minimalen halben Wellenlänge von 25 mm liegt.

2.3 Messungen an einem Kleinlagerprüfstand

Es werden Kleinlagerversuche durchgeführt mit dem Ziel zu überprüfen, ob Kugelschäden in einem frühen Stadium messtechnisch erfassbar sind. Die Kleinlagerversuche sollen Versuche für die Triebwerkshauptwellenlager vorbereiten und eine gezielte Planung von Versuchsbedingungen unterstützen. Dabei sollen die Signale und Fähigkeiten verschiedener Sensortypen und Bauarten miteinander verglichen werden. Kleinlagerversuche bieten den Vorteil, dass eine Vielzahl von Versuchen mit einer guten Kosten-Nutzenrelation durchgeführt werden können.

Zur Verfügung steht der Kleinlagerprüfstand MGG 12 der Firma FAG (siehe Abbildung 2.4) in einer Umgebung mit geringen Störeinflüssen wie externen Vibrationen oder störenden elektromagnetischen Wellen. Der Prüfstand verfügt über eine variable Wellendrehzahl bis zu 1800 min^{-1} . Die Axiallast auf das Testlager kann bis zu 2000 N, die Radiallast bis zu 500 N jeweils stufenlos verstellt werden. Der Kleinlagerprüfstand MGG 12 kann nicht die volle Drehzahl und Last eines Prüfstandes für Triebwerkshauptwellenlager zur Verfügung stellen. So kann mit maximal 10 % der geforderten maximalen Drehzahl von Triebwerkslagern der Verdichter-Hauptwelle gearbeitet werden. Es ist zu beachten, dass eine Übertragbarkeit der Ergebnisse der Kleinlagerversuche auf Großlager nicht in allen Punkten gegeben sein wird.

Für die Versuche wird ein handelsübliches Spindelschräggugellager der Firma FAG verwendet. Dieser Lagertyp hat üblicherweise 32 Kugeln. Es werden 16 der 32 Kugeln entfernt, um die Pressung auf die verbleibenden Kugeln zu erhöhen und damit den Pressungen in einem Triebwerkslager möglichst nahe zu kommen.

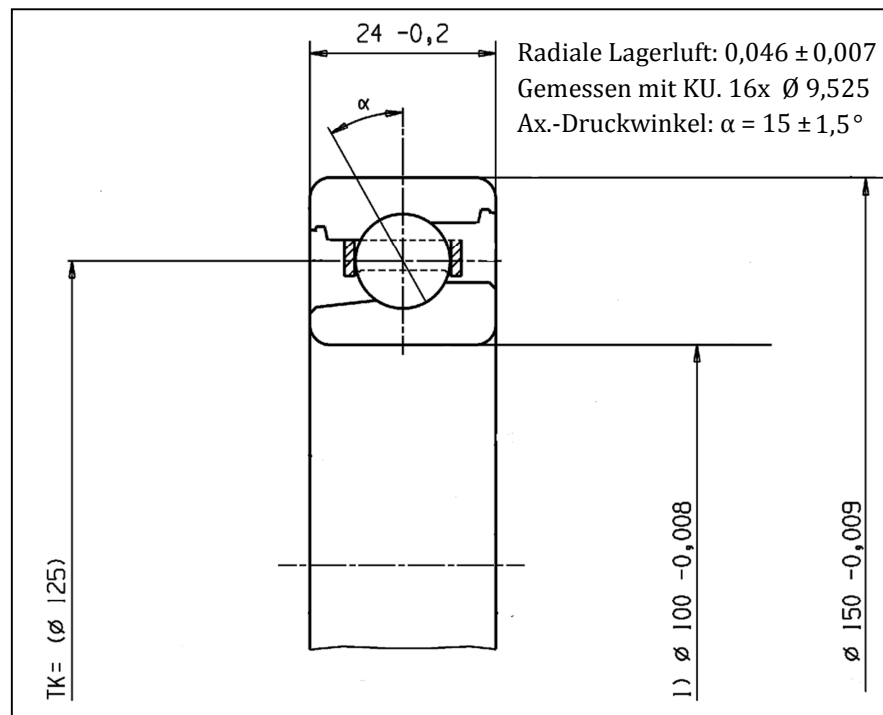


Abbildung 2.3: Spindelkugellager der Firma FAG verwendet für Kleinlagerversuche am MGG12-Prüfstand [Bild FAG].

Die gemessenen Schadüberrollfrequenzen werden mit Werten aus theoretischen Berechnungen (siehe Kapitel 3.2.6) verglichen.

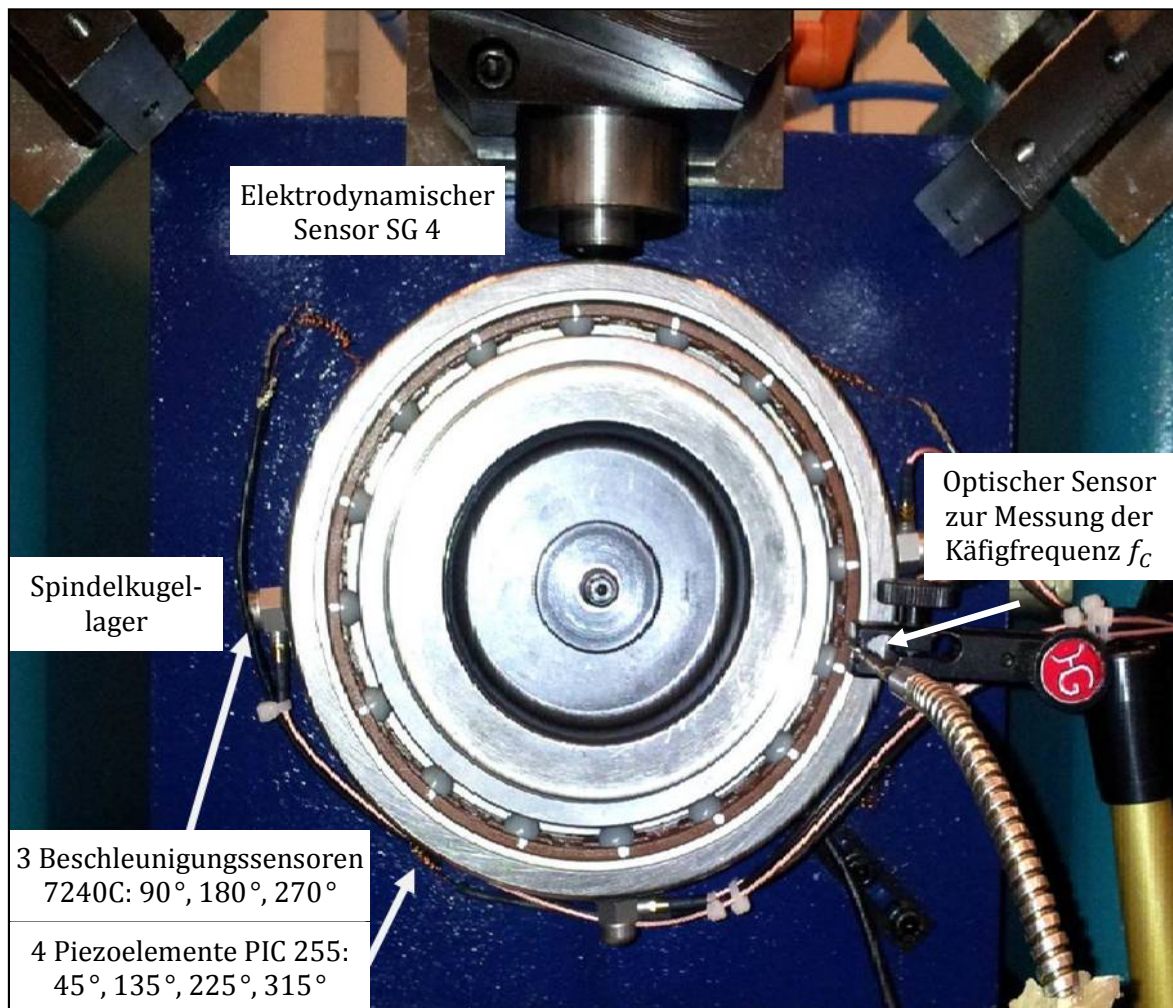


Abbildung 2.4: Instrumentiertes Kleinlager auf dem Prüfstand MGG12 [Bild FAG].

Die Abbildung 2.4 zeigt ein instrumentiertes Spindelkugellager auf dem Kleinlagerprüfstand MGG12. Auf dem Umfang des Außenringes des Lagers werden vier Piezoelemente als Körperschall- und Verformungssensoren, ein elektrodynamischer Beschleunigungssensor und drei piezoelektrische Beschleunigungssensoren angebracht. Auf dem Lagerkäfig wird über jeder Kugel eine weiße Markierung aufgebracht. Zur Messung der Käfigfrequenz f_c wird ein laseroptisches System verwendet, das die weißen Markierungen abtastet.

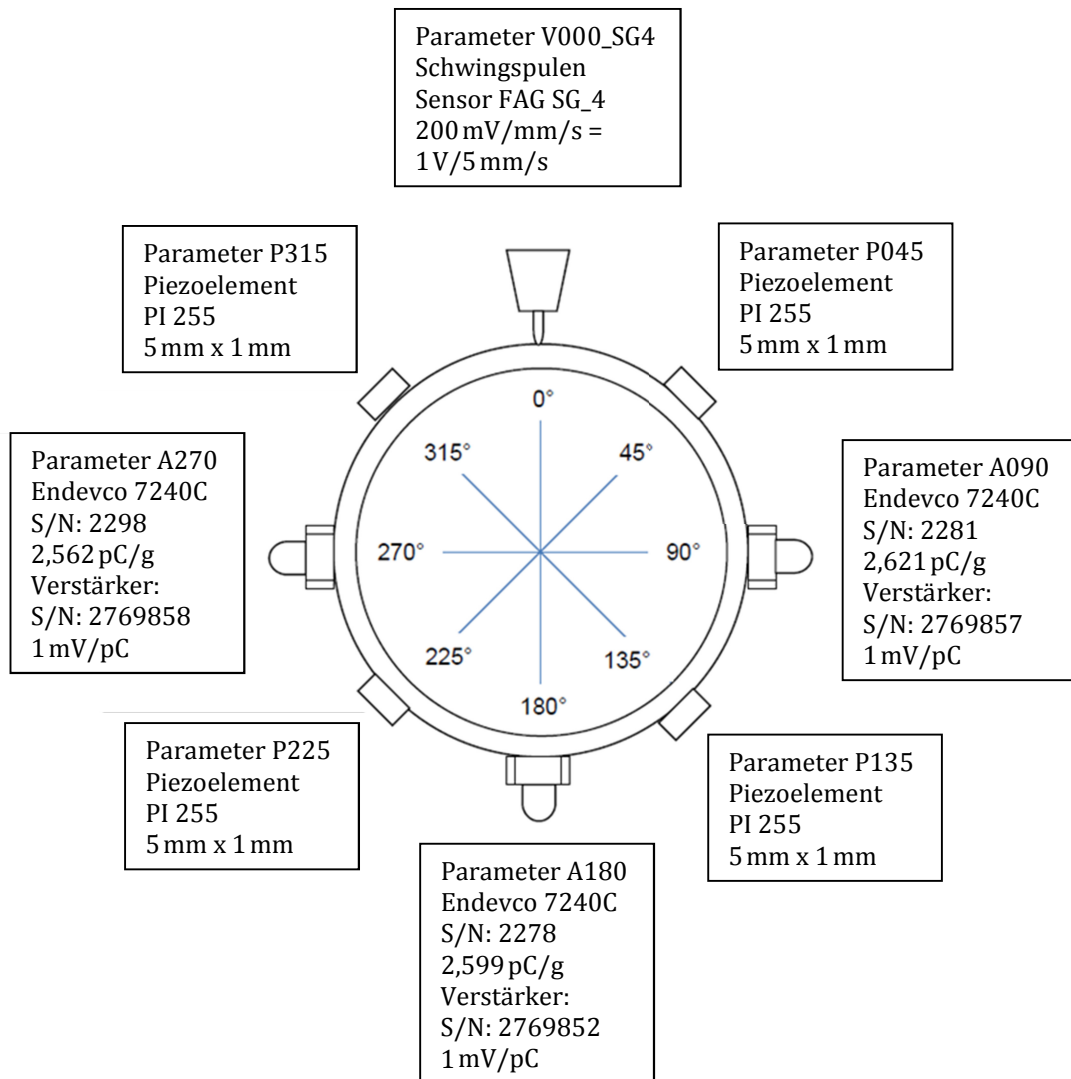


Abbildung 2.5: Positionen und Angaben zu den Sensoren am Kleinlager (siehe auch Abbildung 2.4) [Bild RRD].

2.3.1 Vorversuche zur Stabilität der Kugelrotationsachse

Es soll in Versuchen überprüft werden, ob die Kugeln in Schrägkugellagern mindestens abschnittsweise auf stabilen Bahnen auf den Kugeloberflächen überrollt werden. Methoden zur direkten messtechnischen Erfassung der Orientierung von Kugelrotationsachsen in Schrägkugellagern sind für keramische Kugeln mit vertretbarem Aufwand nicht verfügbar.

Es werden Versuche zum Überrollverhalten von Kugeln in Schrägkugellagern durchgeführt. Eine keramische Kugel, mit einem 0,55 mm Ausbruch, wird mit Gold beschichtet, um zu erkennen, ob sich eine stabile Überrollung auf der Kugeloberfläche nachweisen lässt. Als Ergebnis des Versuches zeigt sich eine schmale Spur über den Ausbruch auf der Oberfläche der Kugel (siehe Abbildung 2.6). Die Kugeloberfläche wird, zumindest abschnittsweise, auf einer stabilen Bahn überrollt. Damit ist ein

Nachweis erbracht, dass die Kugel mit einer bestimmaren Kugelrotationsachse im Lager umläuft.

Es ergibt sich somit eine nachvollziehbare Schadüberrollfrequenz. Dies ist eine Grundlage für das weitere Vorgehen in dieser Arbeit.

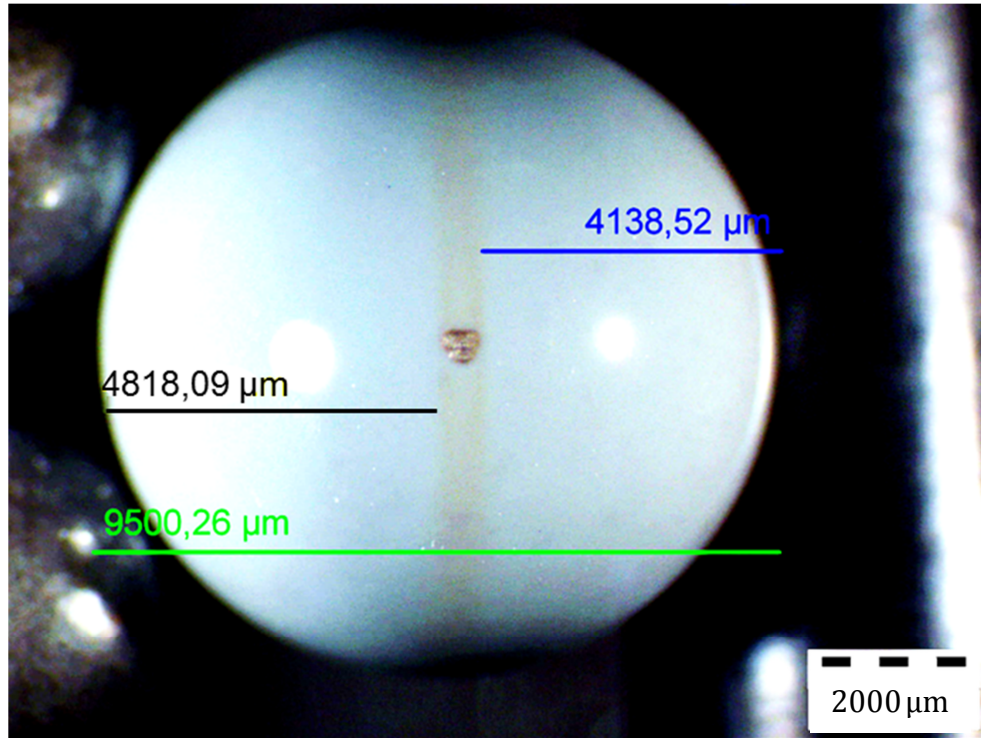


Abbildung 2.6: Kugel mit 9,5 mm Durchmesser mit künstlich eingebrachtem Schaden von 0,55 mm Durchmesser. Ein goldfarbener Streifen (Mitte, senkrechter Verlauf) bestätigt eine stabile Überrollung der Kugel [Bild FAG].

2.3.2 Versuche zur Erkennung von Ausbrüchen auf Kugeln

Es wird untersucht, ob Schäden auf den Kugeln im Betrieb des Lagers durch Sensoren erkannt werden können. Dazu wird das Lager mit Sensoren instrumentiert (siehe Abbildung 2.4). Es werden die Signale von 3 unterschiedlichen Sensortypen (siehe Abbildung 2.5) miteinander verglichen.

Es erfolgen Versuche auf dem Kleinlagerprüfstand MGG 12 mit Spindelkugellager (siehe Abbildung 2.3). In die keramischen Kugeln werden mit einem Laser Oberflächenschäden von 0,55 mm Durchmesser eingebracht (siehe Abbildung 2.7).

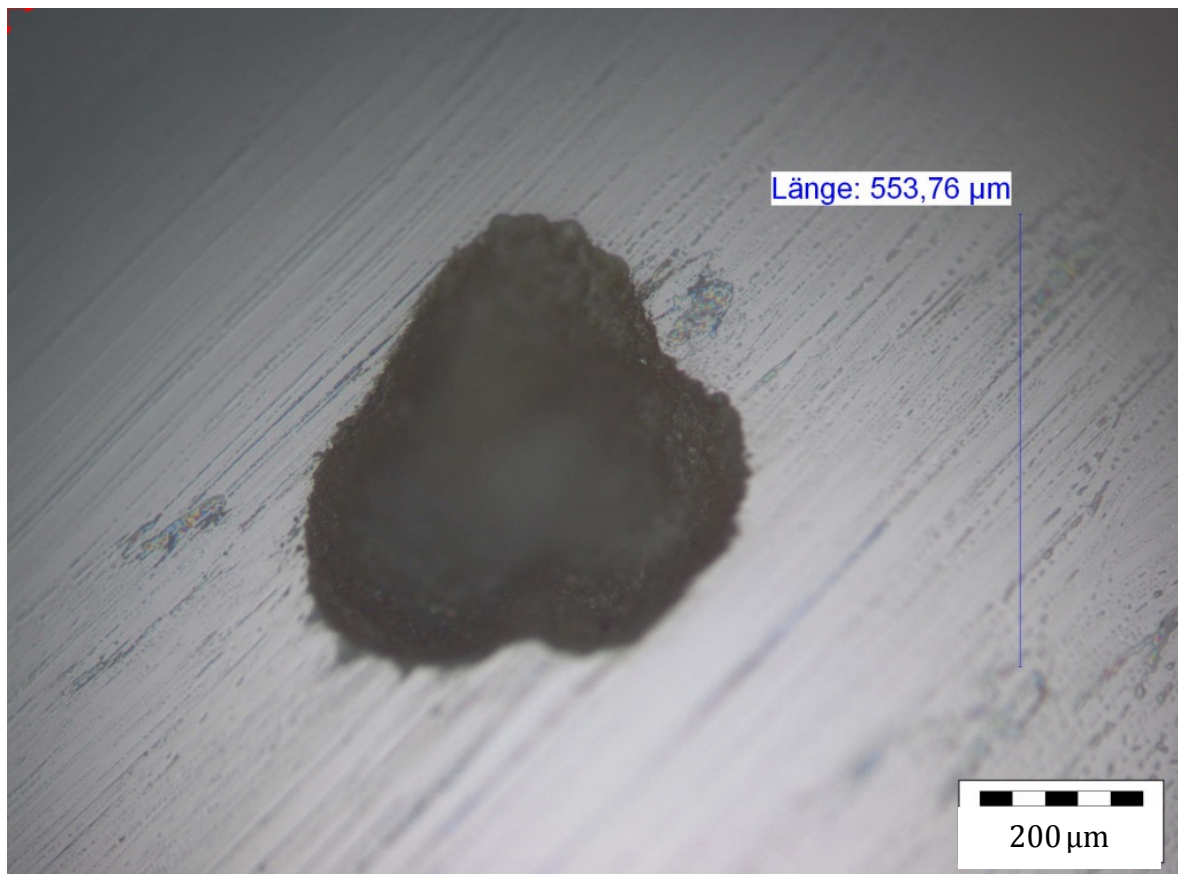


Abbildung 2.7: Schaden mit 0,55 mm Durchmesser, Vergrößerung der Abbildung 2.6 [Bild FAG].

Um einen besseren Vergleich zwischen den Messergebnissen der Sensortypen durchführen zu können, werden die Amplituden der verschiedenen Sensoren auf den Wert 1 normiert.

Entscheidend für die Erkennung eines Lagerfehlers ist die Erkennung der zu dem Fehler gehörigen Merkmale. Bei den in den Abbildung 2.8 bis Abbildung 2.12 untersuchten Kugelschäden ergeben sich die typischen Merkmale in den Hüllkurvenspektren. Die typischen, sich im Spektrum wiederholenden Frequenzbereiche werden mit roten gestrichelten Linien gekennzeichnet. Diese Muster der Signalverläufe der Hüllkurvenspektren bilden über den gesamten Frequenzbereich die Merkmale eines Kugelschadens. Eine genaue Darstellung des Vorgehens bei der Signalauswertung erfolgt im Kapitel 5.2 und 5.3. Auffällig ist die geringe Amplitude der kleinsten Frequenz in den Hüllkurvenspektren. Dies resultiert daraus, dass die Schäden auf den Kugeln durch die geringen Drehzahlen der Lager bei den Kleinlagerversuchen sowohl am Innen- als auch am Außenring überrollt werden. Die genauen Zusammenhänge werden im Kapitel 3.4.2 erläutert.

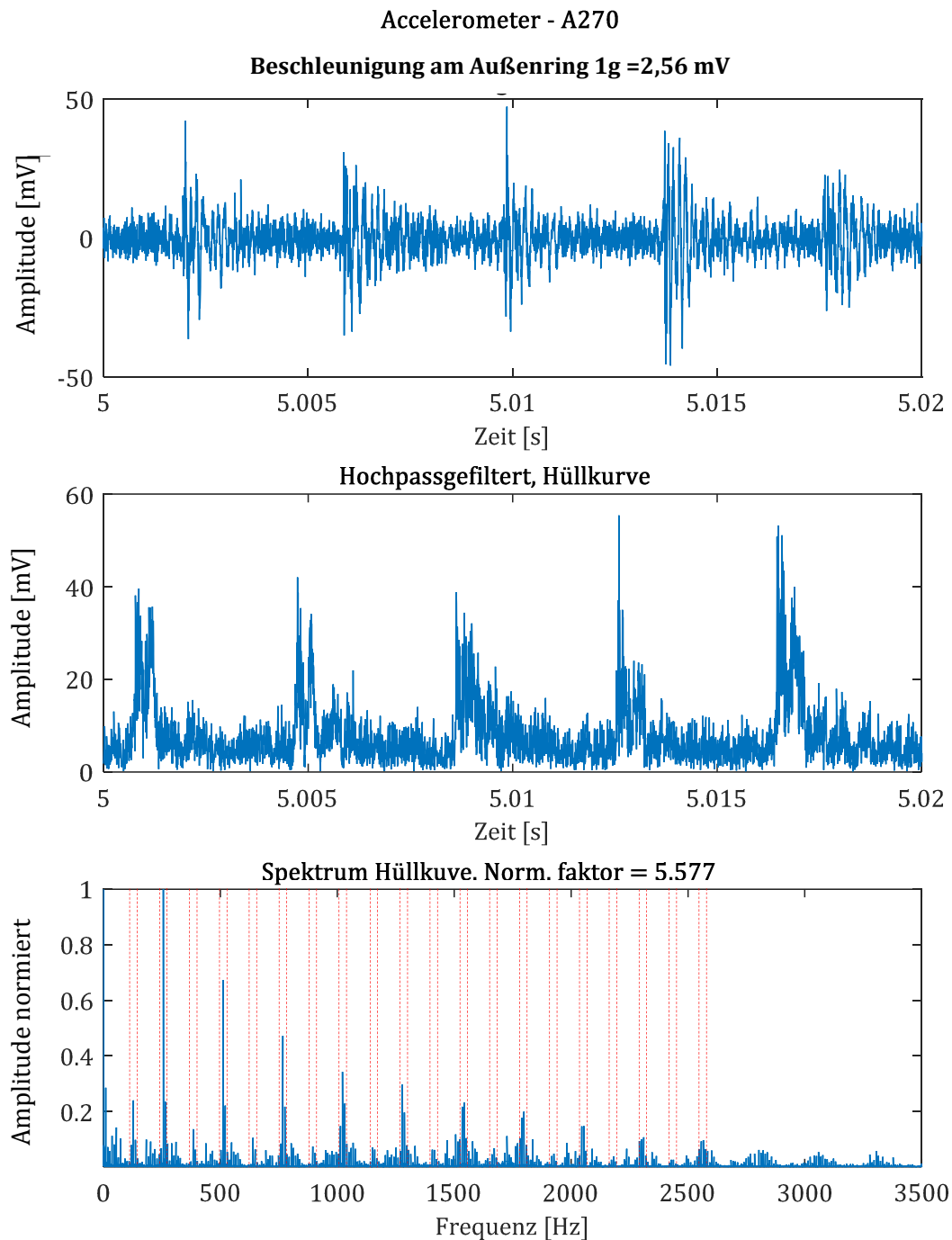


Abbildung 2.8: Mit einem Beschleunigungssensor (siehe Abbildung 2.5, A270) erkannte Merkmale eines Kugelschadens (Diagramm unten, gestrichelte rote Linien). Erkannt wird hier die Schadstelle auf einer keramischen Kugel. Wellenfrequenz 19,5 Hz, radiale Kraft 342 N, axiale Kraft 1830 N, Schaddurchmesser 0,55 mm, Abtastfrequenz 200 kHz, Hochpassfilter 3000 Hz. Das obere Diagramm zeigt die abklingenden Eigenschwingungen. Die Signalbereiche zwischen den abklingenden Eigenschwingungen entsprechen dem Signalverlauf einer ungeschädigten Kugel.

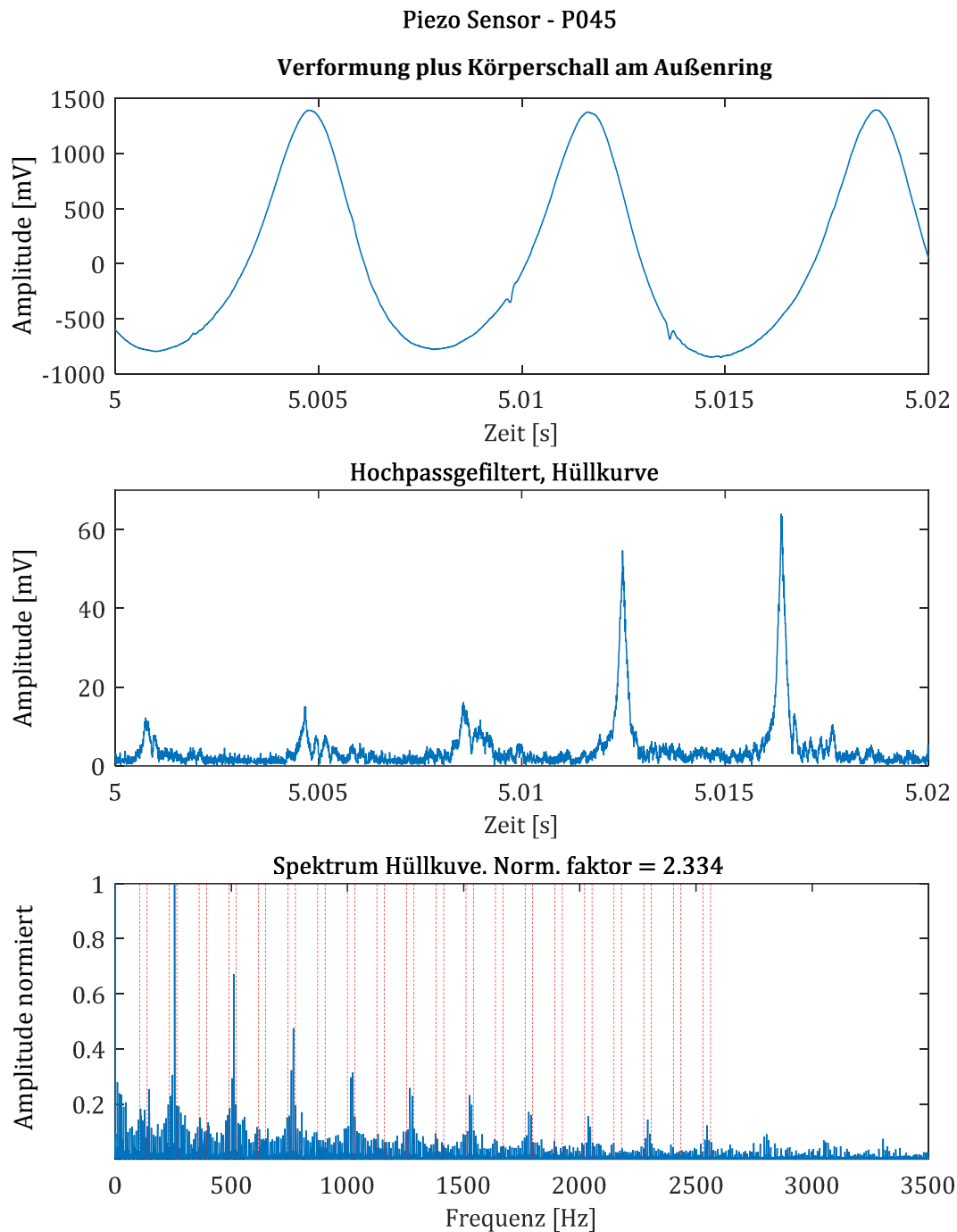


Abbildung 2.9: Mit einem Piezoelement PIC 255 (siehe Abbildung 2.5, P 45) erkannte Merkmale eines Kugelschadens (Diagramm unten, gestrichelte rote Linien). Erkannt wird hier die Schadstelle auf einer keramischen Kugel. Wellenfrequenz 19,5 Hz, radiale 342 N, axiale Kraft 1830 N, Schaddurchmesser 0,55 mm, Abtastfrequenz 200 kHz, Hochpassfilter 3000 Hz. Das obere Diagramm zeigt die Überrollsignale der Kugel über die Sensorposition auf dem Außenring. Das Signal ohne die minimalen Einschnitte im Verlauf entspricht dem Signalverlauf einer ungeschädigten Kugel.

Hinweis zum Ausgangssignal der Piezoelemente:

Die maximale Verformung auf den Außenringen im Bereich der angebrachten Piezoelemente bewegt sich in der Größenordnung von μm . Die bezeichneten Ausgangsspannungen der Piezoelemente, an den Diagrammen dieser Sensorart, geben nur eine Größenordnung im Vergleich unterschiedlicher Überrollungen an. So kann z.B. die Größenordnung der Spannungssignale bei der Überrollung von Fehlstellen oder Rissen in den keramischen Kugeln unterschieden werden. Eine genaue Zuordnung der Spannungsausgangssignale der Piezoelemente zu bestimmten Verformungen an der Position der Piezoelemente kann gegenwärtig nicht vorgenommen werden. Verschiedene Parameter wie die Orientierung der Piezoelemente bei der Anbringung auf den Außenringen, der Einfluss der Verklebung (Schichtdicke und Elastizität des gewählten Klebers) müssten standardisiert werden, um aufwendige Einzelkalibrierungen zu vermeiden. Genaue Verformungswerte sind für den Fortgang dieser Arbeit nicht wichtig, da es nur auf relative Spannungssignale bei den Überrollverformungen und den Amplituden der Eigenschwingungen ankommt.

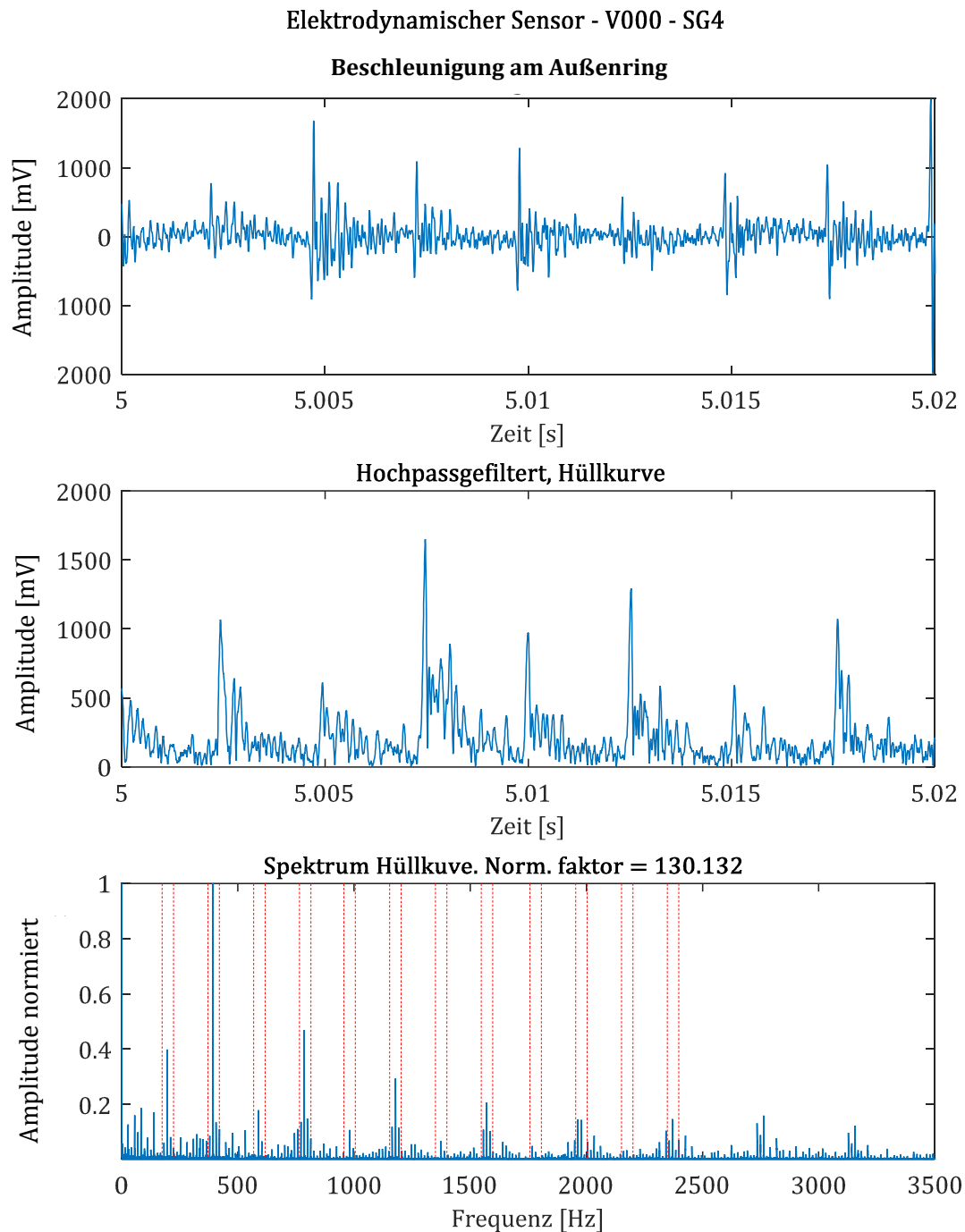


Abbildung 2.10: Mit einem elektrodynamischen Sensor (siehe Abbildung 2.5, SG4) erkannte Merkmale eines Kugelschadens (Diagramm unten, gestrichelte rote Linien). Erkannt wird hier die Schadstelle auf einer keramischen Kugel. Wellenfrequenz 30 Hz, radiale Kraft 100 N, axiale Kraft 946 N, Schaddurchmesser 0,55 mm, Abtastfrequenz 200 kHz, Hochpassfilter 3000 Hz.

In den Diagrammen der Abbildung 2.8 bis Abbildung 2.10 ist zu erkennen, dass die Amplituden der spektralen Anteile (gestrichelten roten Linien) beginnend bei den Kugelrotationsfrequenzen abwechselnd kleine und hohe Amplitude aufweisen. Die

Ursache für die unterschiedlichen Amplitudenhöhen ist die abwechselnde Überrollung des Kugelschadens am Innen- und Außenring. Da der Sensor jeweils am stillstehenden Außenring befestigt ist, ist die Amplitude bei einer Überrollung des Schadens am Außenring höher. Die Anregung, die bei der Schadüberrollung am Innenring entsteht, wird über die Kugeln auf den Außenring übertragen. Deshalb ist bei einer Schadüberrollung am Innenring die Signalamplitude kleiner. Zusätzlich kommt bei dem spektralen Anteil der doppelten Frequenz (Überrollung am Innen- und Außenring) der harmonische Anteil der einfachen Frequenz zum Amplitudenanteil der Spektrallinie der doppelten Frequenz hinzu.

Mit allen 3 Sensortypen (siehe Abbildung 2.5) sind die künstlichen Ausbrüche auf den Kugeln (siehe Abbildung 2.8 bis Abbildung 2.10) anhand der Überrollfrequenzen und deren Harmonischen gut zu erkennen. Dies bedeutet für die weitere Arbeit, dass alle Sensortypen grundsätzlich zur Fehlererkennung in Hybridlagern eingesetzt werden könnten. Allerdings bieten Piezoelemente neben der Möglichkeit der Fehlererkennung über Körperschall noch die Möglichkeit der Erkennung der Überrollung durch die Kugeln, woraus die Käfigfrequenz bestimmt werden kann (siehe Kapitel 5.1.2). Aus diesem Grund werden Piezoelemente für eine spätere Anwendung am Triebwerk favorisiert.

2.3.3 Versuche zur Risserkennung auf keramischen Kugeln

Es wird überprüft, ob Risse in keramischen Kugeln bei der Überrollung im Lager erkannt werden können. Eine Technologie zur erfolgreichen Erkennung von Rissen auf keramischen Kugeln in hybriden Schrägkugellagern ist vorteilhaft, da angenommen wird, dass in der Keramik die Bildung von Rissen lange vor einem Ausbruch beginnt. Dadurch kann ein Kugelschaden in einem frühen Stadium erkannt werden. Somit wird Zeit für planbare Reparaturen gewonnen.

Vermutet wird, dass es bei der Erkennbarkeit einer Überrollung von Rissen auf einer Kugel durch Körperschall entscheidend ist, in welcher Orientierung ein Riss überrollt wird. Angenommen wird, dass sich bei einer Überrollung quer zu der Orientierung eines Risses durch die Kompression des Materials vor dem Riss, eine kleine Stufe bildet. Bei der Überrollung dieser Stufe auf der Kugel, im Kontakt mit den Laufflächen, könnten somit Eigenresonanzen angeregt werden.

Wird ein Riss in Längsrichtung überrollt, dann werden beide Seiten des Risses gleichermaßen komprimiert und es entsteht keine Stufe, die bei der Überrollung ein Körperschallsignal anregen kann.

Es werden Versuche zu Risserkennung auf dem Kleinlager-Prüfstand MGG12 (siehe Abbildung 2.4) durchgeführt. Für die Versuche wird eine keramische Kugel mit einem künstlich eingebrachten C-förmigen Riss mit einem Radius von $234,3\text{ }\mu\text{m}$, einem Öffnungswinkel von $94,6^\circ$ und einer Risslänge von $387,6\text{ }\mu\text{m}$ verwendet. In den Versuchen werden die Überrollsignale, über den Riss auf der Kugel, durch einen elektrodynamischen Sensor (Schwingspule), ein Piezoelement und einen Beschleunigungssensor gemessen (siehe Abbildung 2.5).

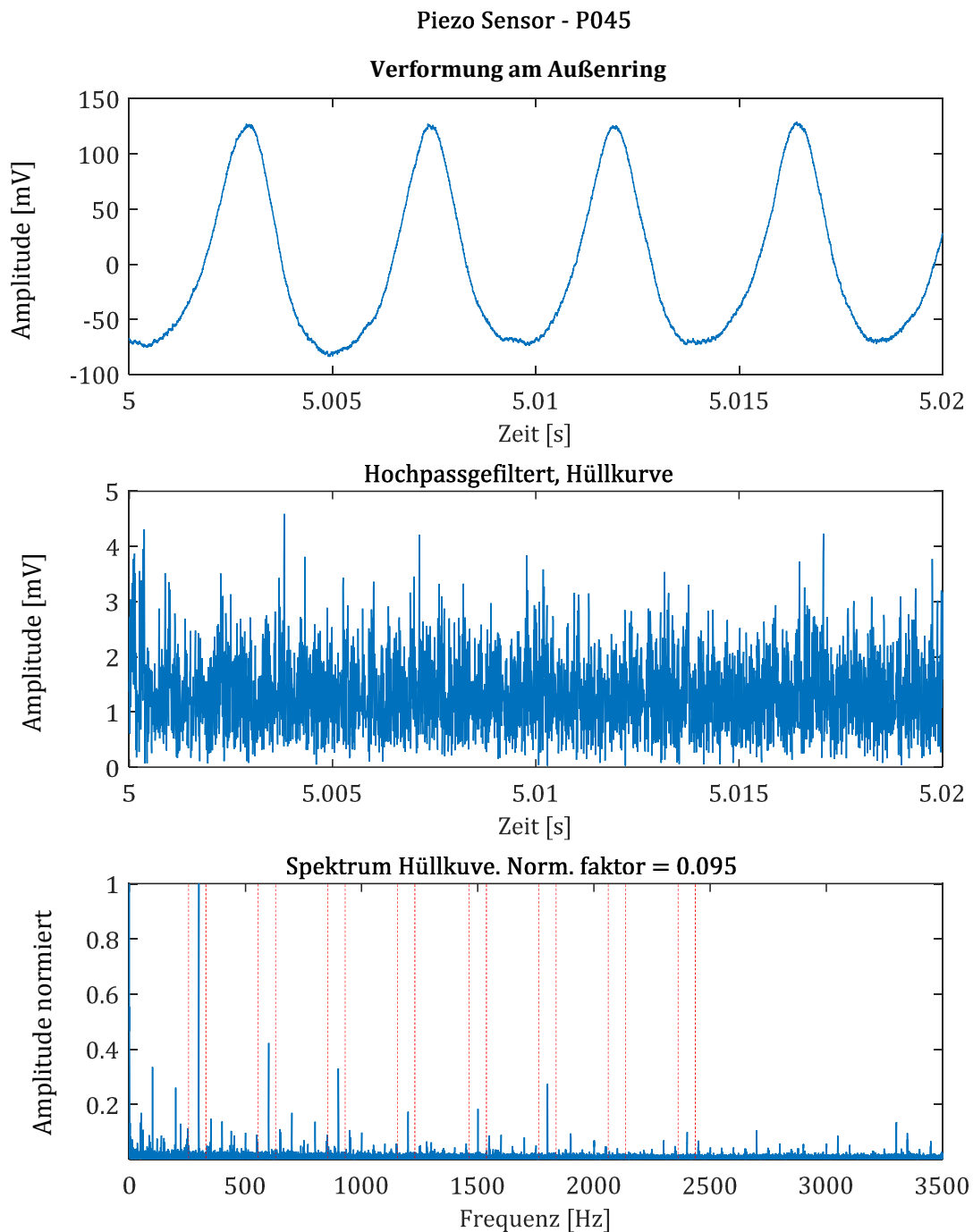


Abbildung 2.11: Mit einem Piezoelement PIC 255, P 45 (siehe Abbildung 2.5) erkannte Merkmale eines Kugelschadens (Diagramm unten, gestrichelte rote Linien). Erkannt wird hier ein Riss auf einer keramischen Kugel. Wellenfrequenz 30 Hz, radiale Kraft 0 N, axiale Kraft 478 N, Schmierung Petroleum, Abtastfrequenz 200 kHz, Hochpassfilters 3000 Hz.

Auf einem Prüfstand in einer Laborumgebung (siehe Abbildung 2.4) sind Risse auf keramischen Kugeln in hybriden Schrägkugellagern erkennbar. Bei der Bestimmung der Eigenschwingungen aus den Messwerten lässt das auftretende Nutz-/Rausch-

signalverhältnis eine Erkennung von Rissen in der Keramik der Kugeln grundsätzlich zu. Aufgrund der Merkmale ist eine Unterscheidung zwischen Rissen und Ausbrüchen nicht möglich. Eine Unterscheidung wäre hier nur über die relative Amplitude des Hochpass gefilterten Signales möglich (siehe Beispiel 4.5, Schätzung der Schadensgröße auf einer Kugel).

Es wird gezeigt, dass die Erkennung der Überrollung eines Risses mit Sensoren unterschiedlicher Bauart möglich ist. Allerdings kommen alle in den Versuchen verwendeten Sensoren (siehe Abbildung 2.5) an die Grenzen der messtechnischen Erfassbarkeit. Das in der Abbildung 2.11 (Bild unten) verwendete Piezoelement zeigt keine auswertbaren Seitenbänder an, die durch die Amplitudenmodulation entstehen (vergleiche Muster bei einem Ausbruch aus einer Kugel in der Abbildung 2.9). Dies bedeutet, dass nur Signale von Schadüberrollungen in der unmittelbaren Nähe des am Außenring angebrachten Piezoelementes gemessen werden können. Signale in einer größeren Entfernung sind schon so stark gedämpft, dass diese nicht mehr erkannt werden.

Ungeschädigte Kugeln ergeben ein Signal für die Hochpass gefilterte Hüllkurve vergleichbar dem der Abbildung 2.11 (Mittleres Bild). Der in dieser Abbildung dargestellte Schaden ist so gering, dass dieser visuell nicht mehr von dem Signal einer ungeschädigten Kugel unterschieden werden kann.

2.3.3.1 Optimierung der Risserkennung

Die Erkennung von Rissen auf keramischen Kugeln beruht auf der Extraktion der typischen Merkmale eines Kugelschadens. Dies geschieht im einfachen Fall über die Hochpassfilterung der Signale von den Sensoren auf den Lagerringen und der Bildung der Hüllkurvenwiederholfrequenz der angeregten Eigenschwingungen (siehe Kapitel 5.2).

Entscheidend für die Erkennung von Rissen ist der Signal-/Rauschabstand. Die Störungen sind nicht gleichmäßig im Frequenzband verteilt, durch eine gezielte Filterung kann das Nutz-Rauschsignalverhältnis verbessert werden. Dies ist möglich durch die Verwendung eines Bandpassfilters. Dabei sollte die Durchlassfrequenz des Bandpasses auf die bei der Schadüberrollung angeregte Eigenfrequenz und der Schadüberrollfrequenz des hybriden Lagers abgestimmt sein. Um die Vorteile von Bandpassfiltern ausschöpfen zu können, müssen diese in den Filterfrequenzen mit den Drehzahlen der Lagerkomponenten mit verändert werden. Nachteil ist ein höherer Rechenaufwand im Vergleich zu einem Hochpass-Filter, der bei einer Online-Filterung am Triebwerk berücksichtigt werden muss. Zudem muss bei der Verwendung eines Bandpasses die Frequenz der Eigenschwingung der angeregten Struktur genauer bekannt sein als bei der Verwendung eines Hochpass-Filters.

Hochpassfilter haben den Vorteil, dass bei einer ungenauen Kenntnis der zu betrachtenden Frequenzen die Auslegung so erfolgen kann, dass die Eckfrequenz unterhalb der kleinsten zu erwartenden Schadfrequenzen der Lagerkomponenten gesetzt werden kann.

Zu beachten ist, dass bei der Überrollung eines Risses auf der Kugel (Abbildung 2.12) die Größenordnung der Amplitude deutlich kleiner ist, als die Amplitude bei der Überrollung eines Ausbruchs auf der Kugel (Abbildung 2.9). Die Stopp-Frequenz des Bandpassfilters (siehe Anhang Kapitel 7.7) sollte so gesetzt werden, dass alle harmonischen Frequenzen des Kugelüberrollsignals möglichst gedämpft werden (siehe Kapitel 5.2.2.1.).

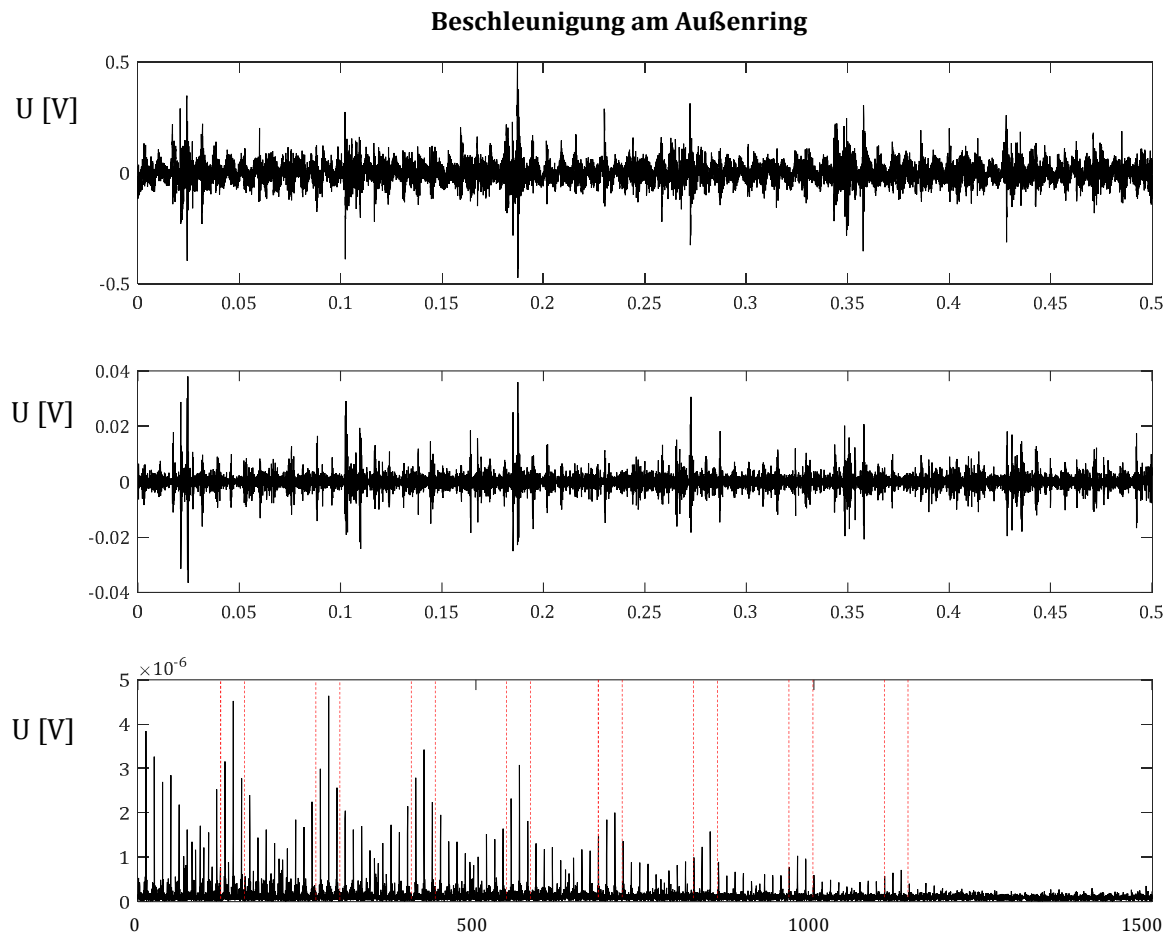


Abbildung 2.12: Mit einem Schwingspulensensor SG4 (siehe Abbildung 2.5) erkannte Merkmale eines Kugelfehlers (Diagramm unten, gestrichelte rote Linien). Erkannt wird hier ein Riss auf einer keramischen Kugel. Wellenfrequenz 30 Hz, radiale Kraft 0 N, axiale Kraft 2000 N, Schmierung Petroleum, Abtastfrequenz 200 kHz, Bandpassfilter Mittenfrequenz 4,5 kHz, Durchlassbandbreite 1,56 KHz [6EA]. Das mittlere Diagramm zeigt die bandpassgefilterte Hüllkurvenwiederholungsfrequenz. Das untere Diagramm zeigt das Spektrum der Hüllkurvenwiederholungsfrequenz.

2.4 Resultate der Vorversuche

Die Vorversuche bringen wesentliche Erkenntnisse:

- Es wird nachgewiesen, dass die Notwendigkeit besteht, Sensoren direkt am Lager zu installieren.
- Es wird gezeigt, dass eine Erkennung von Rissen in der Oberfläche von Keramikugeln möglich ist.
- Ein Nachweis für eine stabil überrollte Bahn auf der Oberfläche einer keramischen Kugel kann erbracht werden.
- Es wird gezeigt, dass eine Erkennung von Ausbrüchen aus der Oberfläche von Keramikugeln mit unterschiedlichen Sensoren möglich ist.
- Es wird gezeigt, dass durch die Verwendung von Piezoelementen zusätzliche wichtige Informationen bereitgestellt werden können.

3 Kinematik des Schrägkugellagers

Ziel dieses Kapitels ist es, ein gutes Verständnis für das kinematische Verhalten von Schrägkugellagern aufzubauen. Die Berechnungen zu Schadüberrollfrequenzen von Lagerschäden sollen so weit verstanden werden, dass es möglich ist, mit gemessenen Hüllkurvenspektren Lagerschäden zu bestimmen und diese den Lagerkomponenten zuzuweisen.

Die kinematischen Zusammenhänge in Schrägkugellagern werden detailliert betrachtet. Dabei wird besonders auf die Abhängigkeit der Kugelrotationsfrequenzen von Last- und Drehzahlbedingungen eingegangen. Ohne die Kenntnis der Kugelrotationsfrequenzen ist eine frühe Erkennung von Kugelschäden während des Betriebes nicht zuverlässig möglich. In den in dieser Arbeit durchgeführten Versuchen sind die Kugelrotationsfrequenzen nur bei geschädigten Kugeln messtechnisch erfassbar.

Für die rechnerische Bestimmung der Schadüberrollfrequenzen muss die Orientierung der Kugelrotationsachse in Relation zur Lagerachse bekannt sein.

3.1 Kontaktmechanik im Schrägkugellager

Es werden Zusammenhänge im Kontakt der Kugeln mit den Laufflächen aufgezeigt. Die Änderungen der Radien aufgrund der elastischen Verformung der Kugeln sowie der Laufbahnen werden in dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Es wird angenommen, dass aufgrund der hohen Pressungen kein Schlupf zwischen den Kugeln und den Laufringen vorhanden ist.

3.1.1 Kontakt der Kugel zur Laufbahn

Bei Kugellagern bilden sich im Kontaktbereich zwischen den Kugeln und den Laufringen Pressungsellipsen aus. Diese können über die Hertzsche Pressung beschrieben werden. Die Betrachtung von Pressungsellipsen ist relevant für die Überrollung von Schäden im Lager. Dabei sind die räumlichen Abmessungen der Pressungsellipse in Relation zu den räumlichen Abmessungen des Schadens von Interesse. Es ist entscheidend, ob ein Schaden voll oder teilweise von der Pressungsellipse überrollt wird. Dies beeinflusst die plastische Verformung des Materials und damit den Schadensfortschritt. Zudem ist von Interesse, ob ein Schaden auf der Kugeloberfläche einen Einfluss auf das Abrollverhalten der Kugel hat.

Die Länge und Breite der Pressungsellipsen sind abhängig von den jeweiligen Radien der Kugeln und den Lagerlaufflächen sowie den Elastizitätsmoduln der beteiligten Werkstoffe. Die Gleichungen (3.1) und (3.2) berücksichtigen unterschiedliche Radien und Elastizitätsmoduln. In den Pressungsellipsen ergibt sich eine Druckverteilung, bei der der Druck in der Mitte der Ellipse am größten ist und zum Rand der Ellipse hin abnimmt.

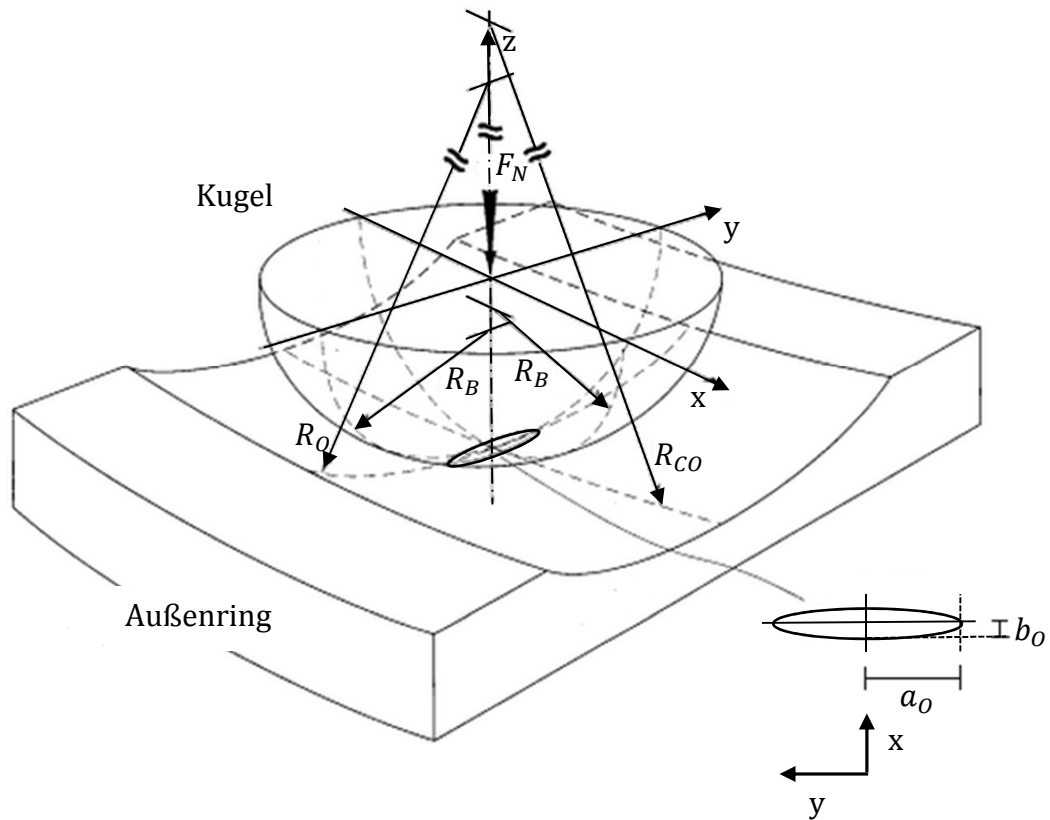


Abbildung 3.1: Kontaktfläche zwischen Kugel und Außenring, Stachowiak [16].

Berechnung der Halbachsen der Kontaktellipsen nach Shigley [17]

$$a_{o,I} = \sqrt[3]{\frac{3 F_N \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)}{8 \left(\frac{1}{2 R_B} + \frac{1}{2 R_{o,I}} \right)}} \quad (3.1)$$

$$b_{o,I} = \sqrt[3]{\frac{3 F_N \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)}{8 \left(\frac{1}{2 R_B} \pm \frac{1}{2 R_{CO,CI}} \right)}} \quad (3.2)$$

Der Ausdruck im Nenner der Gleichung (3.2) bekommt ein positives Vorzeichen für die Berechnung am Außenring und ein negatives Vorzeichen für die Berechnung am Innenring.

3.1.2 Reibung in den Kontaktflächen

Der Kontakt zwischen der Kugel und den Laufringen ist ein typisches tribologisches System. Das Zwischenmedium zwischen den Kontaktpartnern ist meist Öl oder Fett.

Es gibt unterschiedliche Arten der Bewegung zwischen den Kugeln und den Laufringen: Gleiten, Rollen und Bohren (Jacobs [18]).

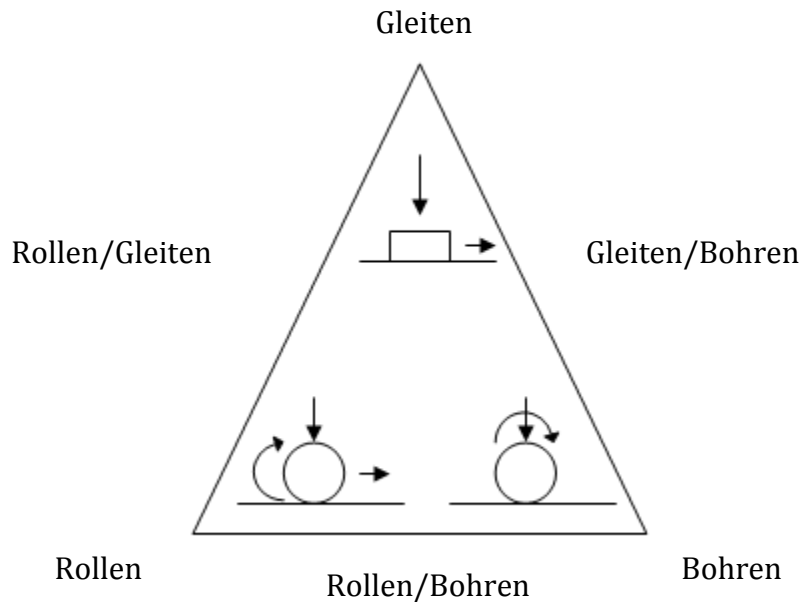


Abbildung 3.2: Kontaktarten zwischen den Kugeln und den Laufbahnen, Jacobs [18].

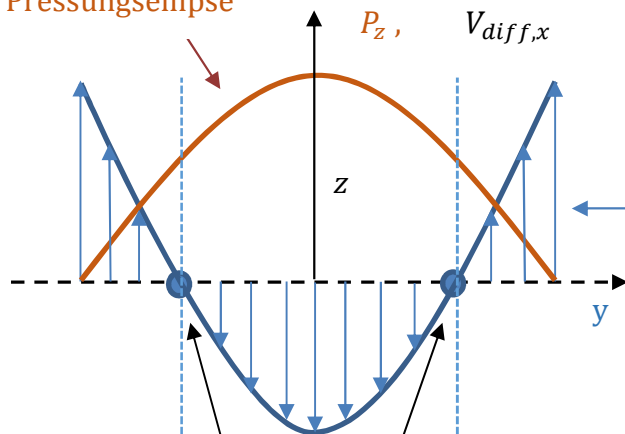
Ein vollflächiger Rollkontakt ist in einem Schrägkugellager nicht möglich, es gibt immer einen Gleit- und einen Bohranteil, Harris [3]. Reibung in einem Lager tritt in den Pressungsellipsen (siehe 3.1.1) (Kontaktflächen der Kugel zu den Lagerlaufbahnen) auf. In den Pressungsellipsen kommt es zu einer Relativbewegung der Kugeloberfläche zu den Laufflächen des Lagers. Gleitreibung tritt im Kontaktbereich in Umfangsrichtung des Lagers auf sowie bei der Drehung der Kugel um die Flächennormale (Bohrreibung). Das Zustandekommen der Bohrbewegung wird im Kapitel 3.2.4 aufgezeigt. Die Bohrreibung wird als Drehmoment angegeben.

Eine geschwindigkeitsabhängige Reibung entsteht in der relativen Bewegung der Kugelflächen zu den Laufflächen. Einen Einfluss auf die geschwindigkeitsabhängige Reibung haben der Umfang der Ölumströmung der Kugeln und der Luftanteil im Öl. Durch eine nicht umfassende Berücksichtigung der Reibung können z.B. Fehler in den Berechnungen der Käfigfrequenzen zustande kommen (siehe Abbildung 3.25). Reibungseffekte sind ein umfassendes eigenes Thema (siehe Klotzbach [19], Jacobs [18]).

3.1.3 Pressungsellipse mit symmetrischen Differenzgeschwindigkeiten

Im Kontaktbereich zwischen den Kugeln und den Laufringen bildet sich eine Pressungsellipse aus. Nach der Laufring-Kontrolltheorie gibt es um die Flächennormale der Pressungsellipse auf dem „kontrollierten“ Laufring keine Drehung (kein Bohren) (siehe Kapitel 3.2.4). In diesem Fall hat eine Pressungsellipse zu der z-Achse der Ellipsen ein symmetrisches Profil von Differenzgeschwindigkeiten.

Druck P_z über der
langen Hauptachse
der Pressungsellipse

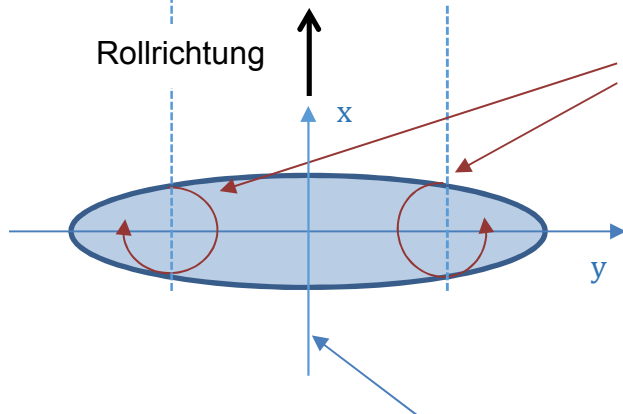


Gleiten zwischen Kugelober-
fläche und Lagerlaufbahn,
dargestellt sind die Diffe-
renzgeschwindigkeiten
 $V_{diff,x}$ auf der großen Haupt-
achse der Pressungsellipse.

Rollpunkte $\vec{V}_{diff,x} = 0$

Gleitlinien um die Rollpunkte
in der Pressungsellipse

Rollrichtung



**Pressungsellipse quer
zur Rollrichtung**

Hauptachse

Symmetrieachse in Laufrichtung
der Pressungsellipse

Abbildung 3.3: Oberes Bild: Symmetrisches Profil der Differenzgeschwindigkeiten $V_{diff,x}$ und Druckverteilung P_z in der Pressungsellipse zwischen Kugel und Laufring.

Unteres Bild: Pressungsellipse in der Draufsicht.

Harris [1], Dempsey [6], Brändlein [5], Eschmann [4].

Es ergibt sich ein Profil von Differenzgeschwindigkeiten, die das Gleiten der Oberflächen der Kugeln zu den Lauflächen beschreiben. In der Abbildung 3.3 ist der Druck P_z und das Profil der Differenzgeschwindigkeiten $V_{diff,x}$ entlang der waagrechten Hauptachse einer Pressungsellipse dargestellt. In der Pressungsellipse ist die Pressung aufgrund der Kugelform des Wälzkörpers in der Mitte am höchsten und nimmt zum Rand hin ab. Der Radius der Kugel um die Kugelrotationsachse ist im mittleren Bereich der Pressungsellipse größer als in den Randbereichen der Pressungsellipse, deshalb ergibt sich hier eine höhere Geschwindigkeit der Kugeloberfläche in Relation zu der Lagerlaufbahn.

Rollpunkte stellen sich über das Gleichgewicht zwischen den entgegengerichteten Kräften der Gleitreibungen an zwei Punkten ein, Jürgensmeyer [20]. Es ergeben sich Gleitlinien (Abbildung 3.3) um die sich einstellenden Rollpunkte in der Pressungsellipse.

3.1.4 Pressungsellipse mit asymmetrischen Differenzgeschwindigkeiten

Im Kontaktbereich zwischen den Kugeln und den Laufringen bildet sich eine Pressungsellipse aus. In diesem Fall hat eine Pressungsellipse zu der z-Achse der Ellipsen ein asymmetrisches Profil von Differenzgeschwindigkeiten (siehe auch Abbildung 3.13).

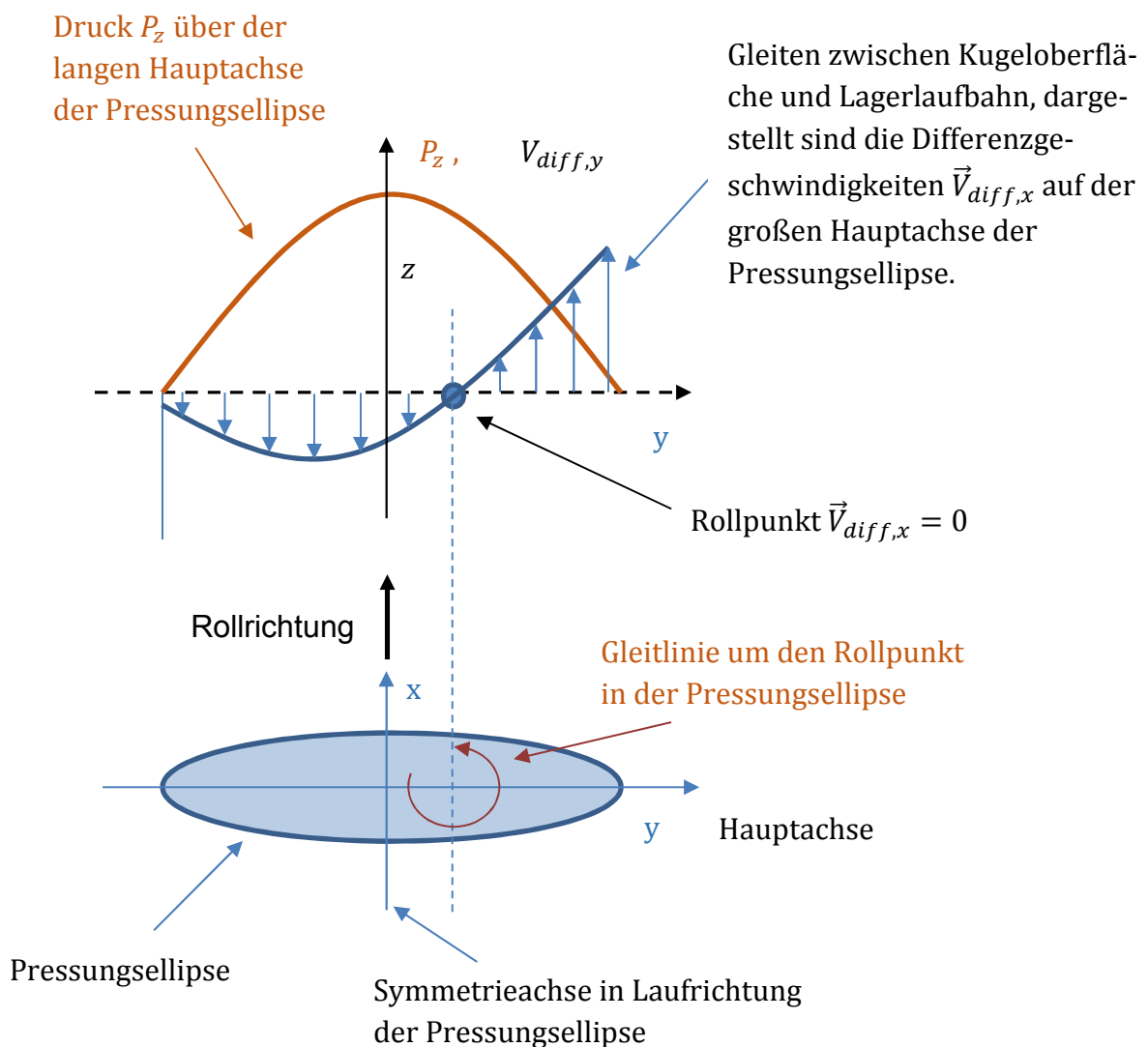


Abbildung 3.4, oberes Bild: Asymmetrisches Profil der Differenzgeschwindigkeiten $V_{diff,x}$ und Druckverteilung P_z in der Pressungsellipse zwischen Kugel und Laufring.

Unteres Bild: Pressungsellipse in der Draufsicht. Harris [1].

Nach der Laufring-Kontrolltheorie gibt es auf dem „nicht kontrollierten“ Laufring um die Flächennormale der Pressungsellipse eine Drehung (Bohren) (siehe Kapitel 3.2.4).

3.2 Einfluss der Kugelrotationsachse

Die Orientierung der Kugelrotationsachse ist eine bestimmende Größe für die Kugelrotations- und Käfigfrequenzen.

3.2.1 Stabilität der Kugelrotationsachse

Harris [3] und Jones [2] gehen bei der Betrachtung der Lagerkinematik von Schrägkugellagern von der Laufringkontrolltheorie (englisch „Race Control“ Theorie) aus.

Wird das Kräfte- und Momentengleichgewicht in den Kontaktpunkten einer Kugel zu den Laufbahnen aufgestellt, stellt sich heraus, dass die Gleichungen (siehe Anhang 7) unterbestimmt sind. Somit sind die Gleichungen nur lösbar, wenn zusätzliche Annahmen getroffen werden. Diese zusätzlichen Annahmen werden über die Laufringkontrolltheorie getroffen. Dabei wird die Lauffläche, bei der es kein Bohren (keine Drehung um die Flächennormale in der Kontaktfläche zwischen Kugel und Laufringen) gibt, als „kontrolliert“ definiert. Mit dem Verweis auf empirische Versuchsergebnisse wird beschrieben, dass entweder am Innen- oder am Außenring kein Bohren auftritt, jedoch keine Kombination der beiden.

Die Innenringführung tritt nach den Literaturangaben bei kleinen Drehzahlen, die Außenringführung bei großen Drehzahlen auf. Durch die Laufringkontrolltheorie wird versucht die Orientierung der Kugelrotationsachse zur Lagerachse zu beschreiben (siehe Abbildung 3.11 bis Abbildung 3.14).

Im Gegensatz zu Harris [3] führt Gupta [10] aus, bei gut geschmierten Lagern würde die Laufringkontrolltheorie nicht funktionieren, es könne im Kontaktpunkt um beide Flächennormalen zur gleichen Zeit eine Rotation (Bohren) geben. Bei Yamamotu [21] und Touma [22] wird das theoretische Verhältnis der Kugelwinkelgeschwindigkeiten ω_B zu den Käfigwinkelgeschwindigkeiten ω_C beschrieben. In der Arbeit von Kawamura [7] werden Untersuchungen zu der Gültigkeit der Laufringkontrolltheorie durchgeführt. Es werden theoretische Betrachtungen zu der Orientierung der Kugelrotationsachse mit Resultaten von Messergebnissen abgeglichen. Kawamura [7] bestimmt messtechnisch die Ausrichtung der Kugelrotationsachsen beim Umlauf der Kugeln im Schrägkugellager mit magnetisierten Stahlkugeln. Der Verlauf der Magnetisierung auf den Kugeln (Abbildung 3.6) wird mittels orthogonal zueinander angebrachter Hall-Elemente bestimmt. Kawamura [7] führt an Kugeln Versuche zur Veränderung der Trägheitshauptachse durch. Dazu entnimmt er durch kleine Bohrungen Material an einer Stelle der Kugeln.

Für einen Versuch (Abbildung 3.5) wird durch die Entnahme von Material aus der Kugeloberfläche eine Schwerpunktverschiebung von $\varepsilon = 0,3 \mu\text{m}$ erreicht. Für einen weiteren Versuch (Abbildung 3.6) erfolgt die Entnahme von Material auf der Kugeloberfläche mit einer Schwerpunktverschiebung von $3 \mu\text{m}$. Die Abbildung 3.5 und Ab-

Abbildung 3.6 zeigen die beiden getesteten Lastfälle von 392 N und 588 N mit den Trajektorien eines Punktes auf den rotierenden Kugeloberflächen. In den Abbildungen nimmt die Wellenfrequenz von links nach rechts zu (800 min^{-1} bis 12000 min^{-1}).

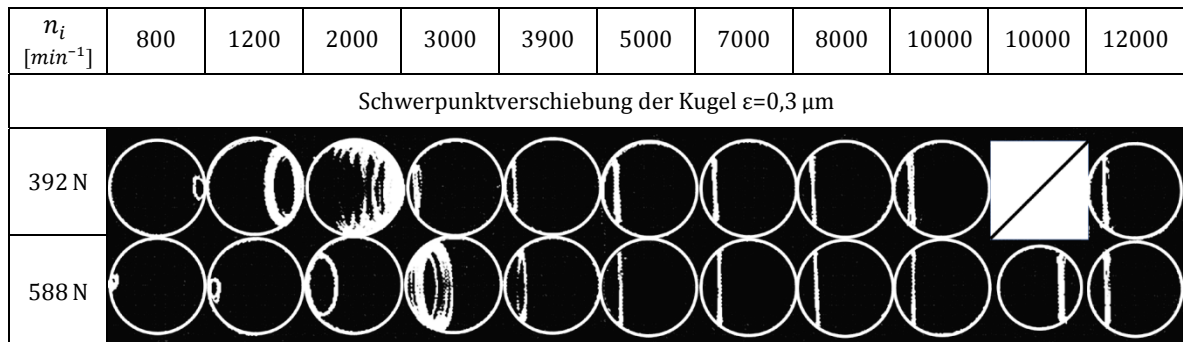


Abbildung 3.5: Verlauf eines magnetisierten Punktes auf einer rotierenden Kugel, mit einer Schwerpunktverschiebung von $0,3 \mu\text{m}$, Kawamura [7].

In der Abbildung 3.5 ist zu erkennen, dass sich angefangen bei geringen Drehzahlen von 800 min^{-1} bis 3900 min^{-1} die Trajektorie des umlaufenden Pols der magnetisierten Kugel noch verändert. Beginnend bei 3900 min^{-1} stabilisiert sich die Trajektorie des magnetisierten Punktes auf der Kugel. Dieses Verhalten gilt für beide aufgenommenen Lastfälle (392 N und 588 N). Bei 10000 min^{-1} scheint Kawamura [7] ein Fehler unterlaufen zu sein so dass die Darstellung bei dieser Frequenz und dem Lastfall von 392 N nicht beachtet werden sollte. Die auf der Kugel eingebrachte Fehlstelle dreht sich nach Kawamura [7] auch bei höheren Drehzahlen um die Kugelrotationsachse, ohne dass die Fehlstelle die klare Tendenz zeigt, mit der Kugelrotationsachse zu fluchten. Dies bedeutet eine Schwerpunktverschiebung um $0,3 \mu\text{m}$ verändert die Rotationsträgheitsachsen nicht so stark, dass dies einen merkbaren Einfluss auf die sich einstellende Kugelrotationsachse hat.

Kawamura [7] führt einen weiteren Versuch (Abbildung 3.6) durch, bei dem Material aus der Oberfläche einer Kugel entnommen wird, die zu einer Schwerpunktverschiebung von $3 \mu\text{m}$, heraus aus der geometrischen Mitte der Kugel, führt.

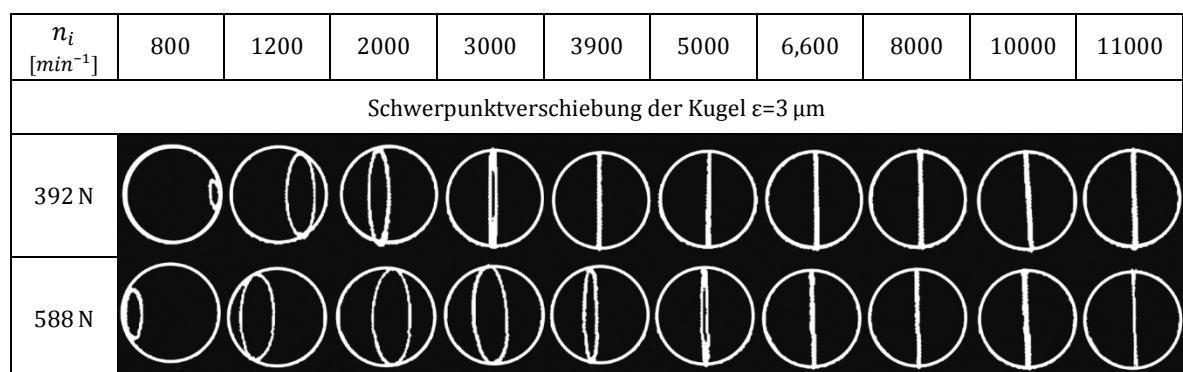


Abbildung 3.6: Verlauf eines magnetisierten Punktes auf einer rotierenden Kugel mit einer Schwerpunktverschiebung von $3 \mu\text{m}$, Kawamura [7].

In der Abbildung 3.6 ist zu erkennen, dass bis zur Drehzahl von 3900 min^{-1} ebenfalls die Trajektorie des magnetisierten Bereichs auf der Kugel keine stabile Trajektorie zeigt. Erst ab einer Drehzahl von 3900 min^{-1} zeigt sich ein stabiler Umlauf des magnetisierten Bereichs auf der Kugel. Die auf der Kugel eingebrachte Fehlstelle dreht sich nach Kawamura [7] auf die Kugelrotationsachse und damit aus einer möglichen Überrollbahn der Schadstelle heraus.

Es erfolgt ein Vergleich des Verhaltens der in dieser Arbeit verwendeten künstlich geschädigten Kugeln mit den geschädigten Kugeln von Kawamura [7]. Dabei wird betrachtet, inwieweit die in dieser Arbeit erzielten Schwerpunktverschiebungen mit den erreichten Schwerpunktverschiebungen bei Kawamura [7] vergleichbar in der Auswirkung sind. Zur besseren Vergleichbarkeit der Effekte der Schwerpunktverschiebung wird der Wert der Schwerpunktverschiebung auf den Durchmesser der verwendeten Kugeln normiert. Werden die Werte des 2,2 mm Schadens in den hier durchgeführten Versuchen normiert und mit den Werten von Kawamura verglichen, wird festgestellt, dass der 2,2 mm Schaden etwas über der Schwerpunktverschiebung von $0,03 \mu\text{m}$ von Kawamura, jedoch deutlich unter der Schwerpunktverschiebung von $3 \mu\text{m}$ von Kawamura liegt.

Versuche Prüfstand AN58 Schadgrößen [mm]	Absolute Schwerpunkt- verschiebung [μm]	Schwerpunktverschiebung normiert auf Kugeldurch- messer
0,55	0,0573	2,2563E-06
1,00	0,2249	8,8564E-06
2,20	0,9825	3,8681E-05

Tabelle 3.1: Ergebnisse dieser Arbeit zur Schwerpunktverschiebung der Kugel.

Schaden dreht sich aus Überrollung heraus	Absolute Schwerpunkt- verschiebung [μm]	Schwerpunktverschiebung normiert auf Kugeldurch- messer
ja	3,00	1,5741E-04
nein	0,30	1,5741E-05

Tabelle 3.2: Ergebnisse von Kawamura [7] zur Schwerpunktverschiebung der Kugel.

In der hier vorgestellten Arbeit hat der größte künstlich auf die Oberfläche einer keramischen Kugel eingebrachte Schaden einen Durchmesser von 2,2 mm und eine Tiefe von 0,2 mm. Dies ergibt bei keramischen Kugeln mit einem Durchmesser von 25 mm und einer Dichte von $3,44 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ eine Schwerpunktverschiebung von $0,0573 \mu\text{m}$ und normiert auf den Kugeldurchmesser eine Schwerpunktverschiebung

von 2,2563E-06. Die Ergebnisse der hier durchgeführten Arbeit zeigen, dass diese Schwerpunktverschiebung nicht ausreicht, um die Rotationsträgheitsmomente derart zu beeinflussen, dass sich der eingebrachte Kugelschaden aus der Bahn der Überrollung herausdreht und mit der Kugelrotationsachse fluchtet.

Die relativen Schwerpunktverschiebungen der in dieser Arbeit verwendeten geschädigten Kugeln sind nur bei der Kugel mit einem 2,2 mm Schaden (3,8681E-05) größer als die Schwerpunktverschiebung von 0,3 µm (1,5741E-05), der Kugel von Kawamura (siehe Tabelle 3.1 und Tabelle 3.2).

3.2.2 Schadüberrollfrequenzen in der Literatur

In der Lagerliteratur, z.B. Randall [23], sind oft vereinfachte Verhältnisse für Schadüberrollfrequenzen bei Schrägkugellagern angegeben. Es wird die Annahme getroffen, dass die umlaufenden Kugeln masselos und damit keiner Fliehkraft ausgesetzt sind. Bei masselosen Kugeln sind der Innenwinkel α_I und der Außenwinkel α_O gleich groß (siehe Abbildung 3.7). Die Drallstabilisierung der Kugelrotationsachse und die Reduzierung des β -Winkel beim Umlauf der Kugel im Schrägkugellager sind nicht berücksichtigt. Für eine detaillierte Behandlung schnelllaufender Schrägkugellager ist diese Betrachtung jedoch nicht ausreichend und kann zu Fehlern bei der Bestimmung und Zuordnung von Lagerschäden führen.

Mit einer vereinfachten Betrachtung (Kugel ohne Masse) ergeben sich die Beziehungen (3.3) bis (3.6), dargestellt in der Abbildung 3.7. Diese Gleichungen sind aufgestellt nach Angaben von Randall [23] und auf die Nomenklatur dieser Arbeit abgeändert.

Aus der Annahme einer masselosen Kugel folgt: $\alpha = \alpha_O = \alpha_I = \beta$

Die Käfigfrequenz f_C ergibt sich zu:

$$f_C = \frac{f_s}{2} \left(1 - \frac{R_B}{r_m} \cos \alpha \right) \quad (3.3)$$

Das Produkt der Käfigfrequenz mit der Anzahl der Kugeln k ergibt die Überrollfrequenz f_O am Außenring, dies entspricht der Schadüberrollfrequenz am Außenring.

$$f_O = k \frac{f_s}{2} \left(1 - \frac{R_B}{r_m} \cos \alpha \right) \quad (3.4)$$

Der Innenring wird ebenfalls von allen Kugeln überrollt. Es entsteht die Überrollfrequenz f_I , dies entspricht der Schadüberrollfrequenz am Innenring.

$$f_I = k \frac{f_s}{2} \left(1 + \frac{R_B}{r_m} \cos \alpha \right) \quad (3.5)$$

Die Rotation der Kugel um die Kugelachse ergibt die Rotationsfrequenz f_B , diese Frequenz entsteht bei einem Kugelschaden.

$$f_B = \frac{f_S \cdot r_m}{2 \cdot R_B} \left(1 - \left(\frac{R_B}{r_m} \cos \alpha \right)^2 \right) \quad (3.6)$$

Im weiteren Verlauf dieses Kapitels wird die Betrachtung schnelllaufender hybrider Schrägkugellager vertieft. Dies soll es ermöglichen, genauere Abschätzungen von Schadfrequenzen für Schrägkugellager vorzunehmen.

3.2.3 Betrachtung zum Beta-Winkel der Kugelrotationsachse

Es wird der Zusammenhang zwischen der Orientierung der Kugelrotationsachsen und den Kugelrotationsfrequenzen aufgezeigt. Dabei wird auf die Abhängigkeiten der Kontaktbedingungen zwischen Kugel und Laufbahnen eingegangen. Die Orientierung der Kugelrotationsachsen ist ursächlich mitverantwortlich für die sich einstellenden Überrollfrequenzen f_B über Kugelschäden. Zur Berechnung von Überrollfrequenzen über einen Schaden auf einer Kugel im Schrägkugellager sind in der Literatur nicht viele Hinweise zu finden. In der Literatur ([3], [2]) wird von Innen- oder Außenring geführten Kugeln gesprochen. Dieser Theorie liegen allerdings nur empirische Untersuchungen zugrunde. Dabei wird beruhend auf der Beobachtung von Beharrungszuständen die Orientierung der Kugelrotationsachse beschrieben.

Es werden die Zusammenhänge und Abhängigkeiten betrachtet, unter denen sich die β -Winkel und die Kontaktwinkel α_O und α_I zwischen den Kugeln und den Laufringen der Kugelrotationsachsen einstellen. Die Einstellung der Kontaktwinkel α_O und α_I geschieht über das Kräfte- und Momentengleichgewicht im Kugellager.

Die Fliehkraft ändert den Kontaktwinkel α_O am Außenring. Ein geringfügig veränderter Kontaktwinkel am Innenring α_I ergibt sich aus den Gleichgewichtsbedingungen der Kräfte im Lager. Die Fliehkraft führt dazu, dass die Kontaktwinkel am Innenring α_I und am Außenring α_O nicht mehr übereinstimmen. Zudem führt die Rotation der Kugel um die Kugelrotationsachse während des Umlaufes im Lager zu einer Stabilisierung der Orientierung der Kugelrotationsachse (siehe Abbildung 3.9). In der Folge verkleinert sich der Winkel β zwischen der Kugelrotationsachse und der Lagerachse.

Es erfolgt die Betrachtung einer masselosen Kugel und den sich dabei einstellenden Kontaktwinkeln im Vergleich zu einer massebehafteten Kugel unter Berücksichtigung der auf die Kugel wirkenden Fliehkraft. Im nächsten Schritt wird eine Änderung des β Winkels der Kugelrotationsachse aufgrund der Drallstabilisierung der Kugel betrachtet.

In Abbildung 3.7 bis Abbildung 3.9 ist dargestellt, wie sich die Abstandsverhältnisse der Radien r_{IP} und r_{OP} in Abhängigkeit vom β -Winkel verändern. Der Kontaktpunkt der Kugel am Innenring des Lagers und damit die Geschwindigkeit $\vec{v}_{IR}$ ändern sich nur geringfügig durch eine Neuausrichtung der axialen Position des Innenringes aufgrund der veränderten Kontaktposition am Außenring. Die Geschwindigkeit $\vec{v}_{IR}$ des Innenringes an der Berührfläche zur Kugel ergibt sich über den Radius r_{IR} und die Winkelgeschwindigkeit $\vec{\omega}_S$ des Innenringes. Bei hohen Kräften und damit hohen Flächenpressungen kann von einem Abrollen der Kugel ohne Schlupf ausgegangen werden. Die Kugeloberfläche und der Kontaktpunkt am Innenring haben somit bei Schlupffreiheit dieselbe Geschwindigkeit.

$$\vec{v}_{BI} = \vec{v}_{IR} \quad (3.7)$$

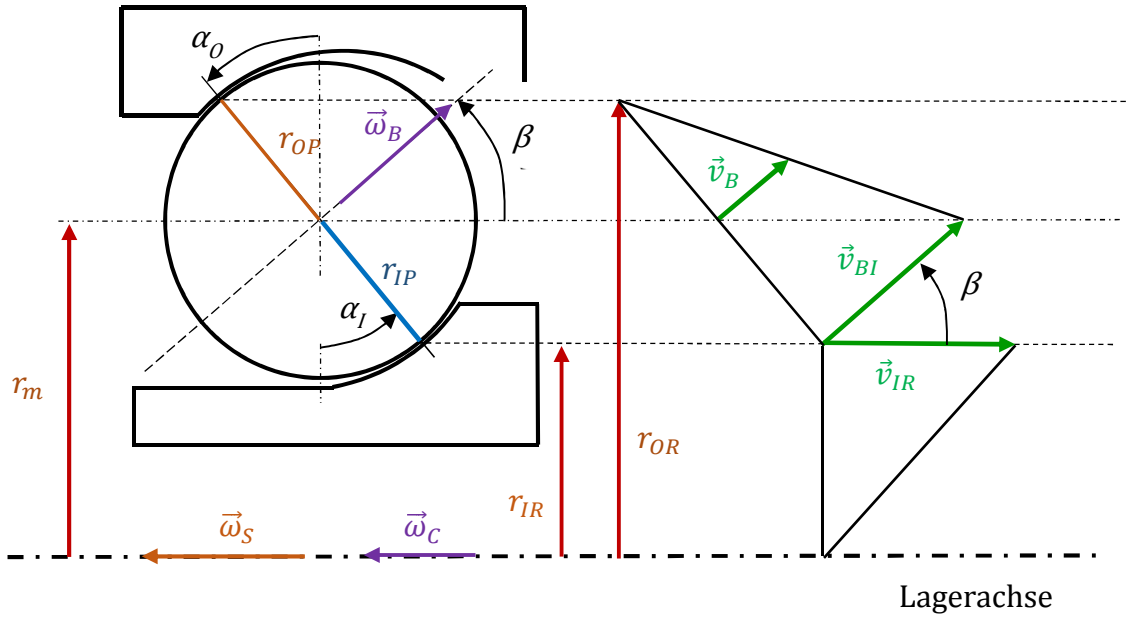


Abbildung 3.7: Orientierung der Kugelrotationsachse (β -Winkel)
Annahme, Kugel ohne Masse, $\alpha_O = \alpha_I = \beta$.

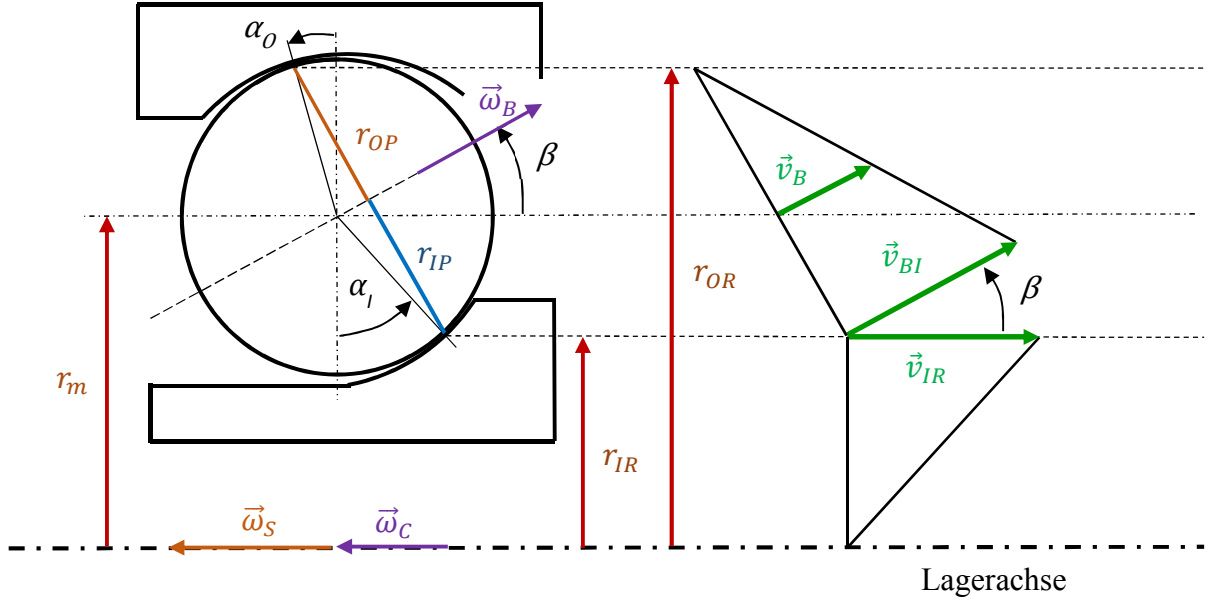


Abbildung 3.8: Orientierung der Kugelrotationsachse (β -Winkel), Kugel
massebehaftet, mit Wirkung der Fliehkraft auf die Kugel, $\alpha_O \neq \alpha_I \neq \beta$.

Die Geschwindigkeit der Kugeloberfläche am Kontaktpunkt zum Außenring ist bei einem stillstehenden Außenring gleich Null. Die Verbindungslinie von $\vec{v}_{BI}$ am Innen-

The diagram illustrates the geometry and forces on a roller bearing. On the left, a cross-section of a roller is shown within a housing. Key parameters include:

- r_m : Radius of the roller.
- r_{OP} : Radius from the roller center to the point of contact with the outer ring.
- r_{IP} : Radius from the roller center to the point of contact with the inner ring.
- α_o and α_i : Angles defining the contact points relative to the vertical centerline.
- $\vec{\omega}_B$: Angular velocity vector of the roller.
- β : Angle between the dashed centerline and the line connecting the contact points.
- $\vec{\omega}_S$ and $\vec{\omega}_C$: Angular velocity vectors of the shaft and cage, respectively.

 On the right, a vector triangle is shown with vertices at the contact points. The vectors are:

- $\vec{v}_B$: Velocity vector at the outer contact point.
- $\vec{v}_{BI}$: Relative velocity vector between the outer and inner contact points.
- $\vec{v}_{IR}$: Velocity vector at the inner contact point.
- r_{OR} and r_{IR} : Radii from the roller center to the outer and inner contact points, respectively.
- β : The angle between the vectors $\vec{v}_{BI}$ and $\vec{v}_{IR}$.

 The label "Lagerachse" (bearing axis) is positioned at the bottom right, indicating the reference axis for the coordinate system.

Kawamura [7] führt Untersuchungen zum β -Winkel der Kugelrotationsachse durch. In der Abbildung 3.10 (links) ist das Verhältnis ω_B/ω_C der gemessenen Kugelwinkelgeschwindigkeit ω_B zu der gemessenen Käfigwinkelgeschwindigkeit ω_C über Umdrehungen pro Minute n_i [rpm] dargestellt. Die gemessenen Werte sind mit Punkten und Dreiecken gekennzeichnet. In den Versuchen wird mit zwei Lasten gearbeitet, 392 N (dargestellt als schwarze gefüllte Punkte) und 588 N (dargestellt als Dreiecke). Die theoretisch ermittelten Werte sind für unterschiedliche Reibbeiwerte μ bei 392 Newton mit Strichpunkt Linien dargestellt, bei 588 Newton mit durchgezogenen Li-

nien. Die theoretischen Werte der Außenringkontrolle (Theoretical Outer Race Control) sind entsprechend den beiden Lasten 392 Newton mit Strichpunkt Linien (obere Linie) und 588 Newton mit durchgezogenen Linien (untere Linie) dargestellt.

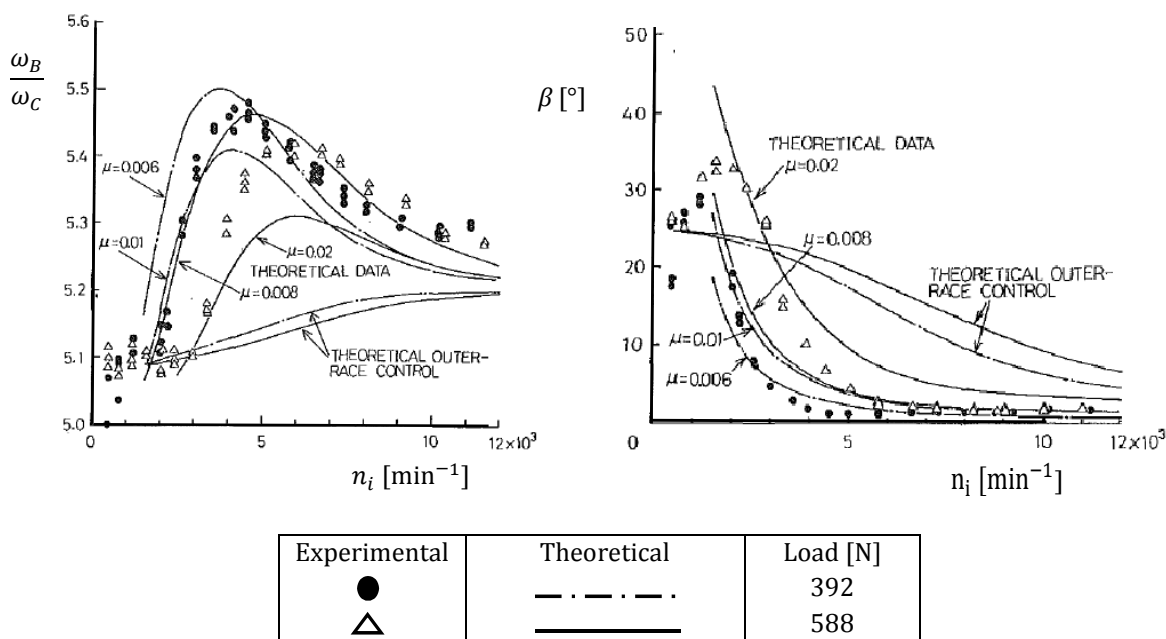


Abbildung 3.10, links: ω_B/ω_C , Vergleich Außenring-Kontrolltheorie mit Messwerten, rechts: β -Winkel, Vergleich Außenring-Kontrolltheorie mit Messwerten, Kawamura [7].

In der rechten Graphik der Abbildung 3.10 ist der β -Winkel der Kugelrotationsachse zur Lagerachse dargestellt. Die mit „theoretical data μ “ bezeichneten Linien zeigen berechnete Werte bei unterschiedlichen Reibungskoeffizienten. Der Autor beschreibt nicht, wie diese Berechnungen erfolgten. In der Abbildung 3.10 ist zu erkennen, dass im Drehzahlbereich von 2000 min^{-1} bis 10000 min^{-1} Abweichung der gemessenen Werte zu den berechneten Werten nach der Außenring-Kontrolltheorie (Outer Race Control) vorhanden sind. Bei dem Versuch hatte die Stahlkugel einen Versatz des Schwerpunktes der Kugel von $3 \mu\text{m}$ zur geometrischen Mitte der Kugel. Dies hat auf die Betrachtung des β -Winkels und das Verhältnis ω_B/ω_C keinen Einfluss.

Abbildung 3.10 zeigt, dass die Kugelachse bei kleinen Drehzahlen unterhalb 2000 min^{-1} nicht stabil ist (siehe Abbildung 3.10), die Dreiecke und Punkte haben in der zeitlichen Abfolge noch keine klare Ordnung. Viele Bereiche der Kugeloberfläche kommen kurzzeitig in Kontakt mit den Laufringoberflächen. Das Verhalten in diesen Bereichen kann die Ausbildung einer bestimmten stabilen Kugelrotationsachse beeinflussen. Im Kapitel 3.4.1 wird eine mögliche Erklärung für die Ursache einer stabilen Überrollung eines Kugelschadens dargestellt.

3.2.4 Die Laufringkontrolltheorie detailliert betrachtet

Die Laufringkontrolltheorie (Jones [2], Harris [3],) wird im Folgenden mit Skizzen im Detail besprochen. Es werden die Winkelgeschwindigkeiten der Kugeln in den Kontaktflächen erörtert. Dabei wird auf das Rollen in Umlaufrichtung $\vec{\omega}_{OP}$, $\vec{\omega}_{IP}$ und das Bohren der Kugel $\vec{\omega}_{OPN}$, $\vec{\omega}_{IPN}$ um die Flächennormalen eingegangen. Eine Drehung der Kugel um die Flächennormale zur Kontaktfläche wird als „Bohren“ bezeichnet. Bohrmomente der Kugel zum Innen- und Außenring sind bei Schrägkugellagern immer vorhanden. Es kommt zur Rotation der Kugeln um die Flächennormalen im Kontaktbereich zu den Lauflächen, wenn ein bestimmtes „Haltmoment“ überschritten wird. Dieses Haltmoment resultiert aus der Normalkraft auf eine Kugel und der sich ergebenden Reibung.

In der Abbildung 3.11 bis zur Abbildung 3.14 werden die Winkelgeschwindigkeiten $\vec{\omega}_{OPT}$, $\vec{\omega}_{IPT}$ der Kugeln im Kontaktbereich in Anteile mit Rollen in Umlaufrichtung $\vec{\omega}_{OP}$, $\vec{\omega}_{IP}$ und Drehungen $\vec{\omega}_{OPN}$, $\vec{\omega}_{IPN}$ um die Flächennormalen (Bohren) zerlegt. Dabei werden die Regeln der Vektoraddition benutzt und in die Graphiken übertragen.

Im Punkt M schneidet sich die Rotationsachse des Wälzkörpers mit der Rotationsachse des Lagers. Die gestrichelten Konstruktionslinien zwischen den Kontaktpunkten des Wälzkörpers mit den Laufringen und dem Punkt M definieren eine mögliche Kontaktlinie auf der ein reines Rollen in Umlaufrichtung $\vec{\omega}_{OP}$, $\vec{\omega}_{IP}$ der Kugel ohne eine Drehung um eine Flächennormale $\vec{\omega}_{OPN}$, $\vec{\omega}_{IPN}$ möglich ist. Dies ist zum Beispiel bei Kegelrollen im kompletten Linienkontakt der Fall. Die Tangenten an die Kontaktpunkte des Innen- und Außenringes geben die Abrollbedingungen $\vec{\omega}_{OPT}$, $\vec{\omega}_{IPT}$ in den Kontaktflächen wieder. Die Abrollbedingung der Tangente wird zerlegt in reines Rollen in Umlaufrichtung $\vec{\omega}_{OP}$, $\vec{\omega}_{IP}$ und eine Drehung um die Flächennormalen $\vec{\omega}_{OPN}$, $\vec{\omega}_{IPN}$ in den Kontaktpunkten.

Für Schrägkugellager gilt für die Konstruktion der Rollbedingungen ohne Bohren: Schneidet sich eine Tangente an die Kontaktflächen der Kugel (am Außen- oder Innenring) mit der Verlängerung der Kugelrotationsachse auf der Verlängerung der Lagerachse, dann liegt Außen- oder Innenringführung vor. (siehe Abbildung 3.12 und Abbildung 3.14). In diesen Punkten finden dann kein „Bohren“ am Innen- oder Außenring statt.

Liegt reines Rollen in Umlaufrichtung $\vec{\omega}_{OP}$, $\vec{\omega}_{IP}$ vor, dann kann um diesen Bereich in Laufrichtung von einem symmetrischen Pressungsprofil (siehe Abbildung 3.3) ausgegangen werden.

Die Verhältnisse von Außen- und Innenringführung sind skizziert. Aus Anschaulichkeitsgründen werden masselose Kugeln angenommen. Dies bedeutet, die Betrachtungen werden ohne den Einfluss der Fliehkräfte auf die Kugeln vorgenommen.

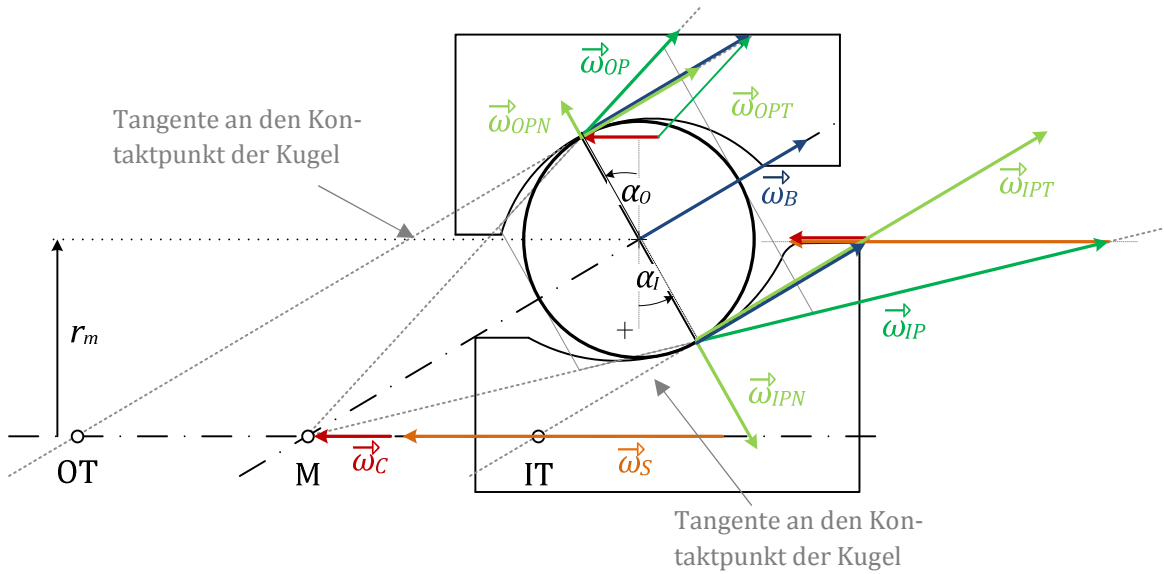


Abbildung 3.11: Drehung der Kugel um die Flächennormalen („Bohren“) am Innen- ($\vec{\omega}_{IPN}$) und am Außenring ($\vec{\omega}_{OPN}$), Brändlein [5].

$\vec{\omega}_{OPN}$, $\vec{\omega}_{IPN}$ sind die Drehwinkelgeschwindigkeiten um die Flächennormalen im Kontaktpunkt der Kugel zu den Laufflächen. Bei einer Hemmung von $\vec{\omega}_{OPN}$, $\vec{\omega}_{IPN}$ in den Kontaktflächen durch Reibung führt dies zu einem sogenannten „Bohrmoment“.

Bei der Annahme von Außenringkontrolle, siehe Abbildung 3.12, ergibt sich der β -Winkel der Rotationsachse der Kugel zur Lagerachse.

$$\beta = \text{atan} \left(\frac{\sin \alpha_o}{\frac{R_B}{r_m} + \cos \alpha_o} \right) \quad (3.8)$$

Die Ableitung dieser Gleichung findet sich im Anhang Kapitel 7.1

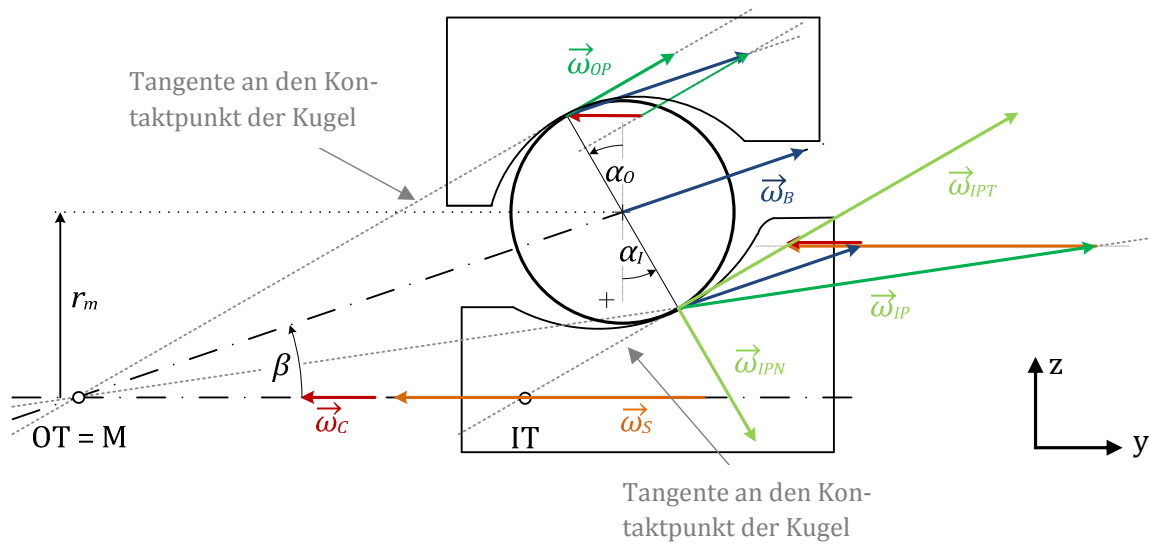


Abbildung 3.12: Bei Außenringkontrolle entsteht „Bohren“ $\vec{\omega}_{IPN}$ am Innenring. Die $\vec{\omega}_{OPN}$ Komponente am Außenring ist gleich Null.

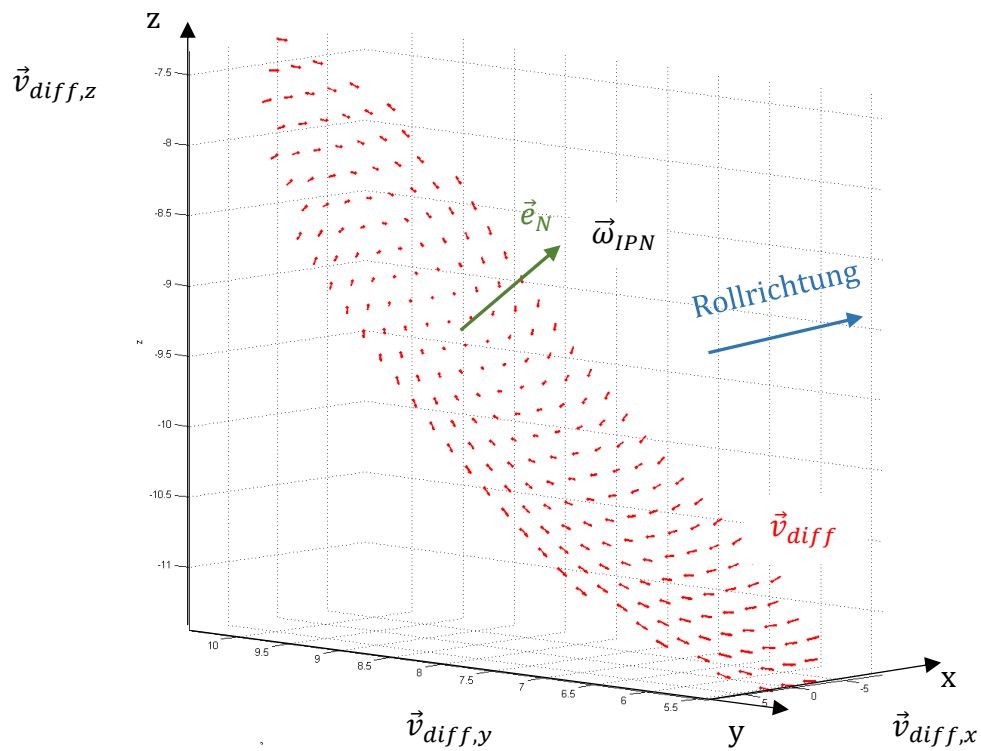


Abbildung 3.13: Qualitativer Verlauf der Differenzgeschwindigkeiten $\vec{v}_{diff}$ in einer Pressungsellipse am Innenring bei Außenringkontrolle.

Die Abbildung 3.13 zeigt „Bohren“ am Innenring bei Außenringkontrolle. Dargestellt sind die Differenzgeschwindigkeiten $\vec{v}_{diff}$ in der Pressungsellipse zwischen der Kugel und dem Innenring. Zu sehen ist, dass eine Rotation $\vec{\omega}_{IPN}$ um die Flächennormale $\vec{e}_N$ zwischen der Kugel und dem Innenring auf der Pressungsellipse stattfindet. Die roten Pfeile in der Abbildung 3.13 zeigen die Richtung der Differenzgeschwindigkeiten $\vec{v}_{diff}$ für unterschiedliche Positionen (x, y, z) auf einem Innenring an.

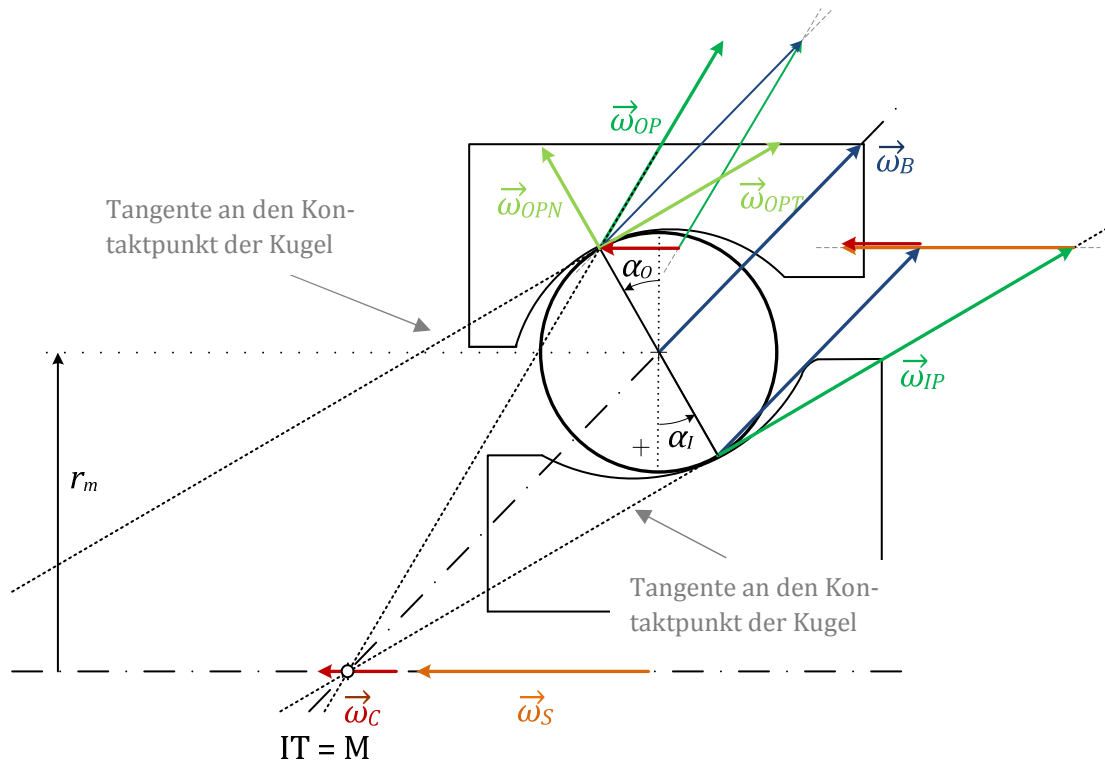


Abbildung 3.14: Bei Innenringkontrolle entsteht „Bohren“ $\vec{\omega}_{OPN}$ am Außenring. Die $\vec{\omega}_{IPN}$ Komponente am Innenring ist gleich Null.

3.2.5 Periodische Änderungen der Kugelrotationsachse

Bei hohen Rotationsgeschwindigkeiten der Kugeln im Lager hat die Drallstabilisierung einen merkbaren Einfluss auf die Orientierung der Kugelrotationsachsen. Die Kugelrotationsachsen erfahren beim Umlauf der Kugeln im Schrägkugellager eine fortlaufende Änderung der Orientierung. Der Antrieb der Kugelrotation erfolgt über die Punkte IP und OP (siehe Abbildung 3.15). Die Orientierung der Rotationsachsen der Kugeln im Lager stellt sich senkrecht zu den Kontaktpunkten OP und IP ein. Die Kontaktwinkel α_I und α_O der Kugeln zu den Lagerlaufbahnen stellen sich entsprechend den äußeren sowie den inneren Kräften des Kugellagers ein (siehe Abbildung 3.15).

Der Einfluss der Orientierung der Kugelrotationsachsen und der Zusammenhang mit der Wirkung des Gyromomentes auf die Kugelrotationsachsen soll im Folgenden gezeigt werden. Durch den Antrieb über die Kontaktpunkte OP und IP ändern die Kugeln beim Umlauf im Lager periodisch die Orientierung der Kugelachse (siehe Abbildung 3.16).

Für Schrägkugellager ergeben sich bei einer gegebenen externen Last, beim Umlauf der Kugeln im Lager, aus der Orientierung und Schmiegun der Laufbahnen die maximale Winkeländerung 2β der Kugelrotationsachsen (siehe Abbildung 3.16). Die Geometrie eines Schrägkugellagers bewirkt durch die Kontaktpunkte OP und IP auf die Kugel einen Drehimpuls $\vec{L}_{B,abroll}$.

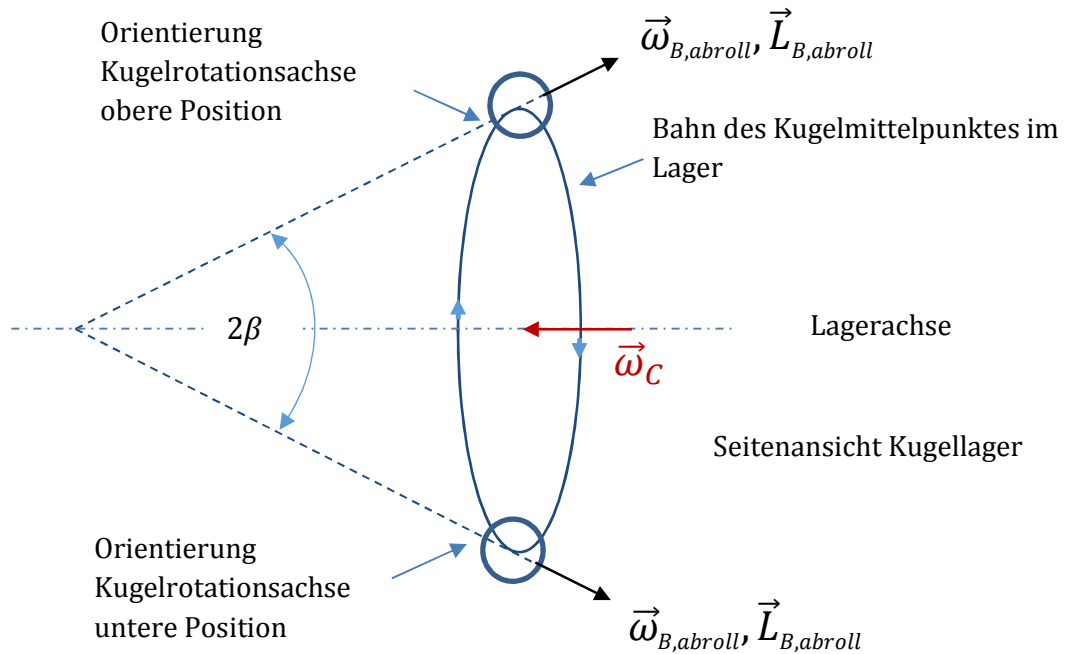


Abbildung 3.16: Fortlaufende Änderung der Orientierung der Kugelrotationsachse beim Umlauf der Kugel im Lager.

Für die Drehimpulse der Kugeln ergibt sich:

$$\vec{L}_{B,abroll} = J_B \vec{\omega}_{B,abroll} \quad (3.9)$$

Zur Verdeutlichung des Vorganges wird der Drehimpuls $\vec{L}_{B,abroll}$ in eine axiale Komponente $\vec{L}_{B,abroll,axial}$ und eine radiale Komponente $\vec{L}_{B,abroll,radial}$ zerlegt. Die axiale Komponente parallel zur Lagerachse bewirkt beim Umlauf der Kugel im Lager kein Drehmoment auf die Kugel. Die radiale Komponente $\vec{L}_{B,abroll,radial}$ des Drehimpulses $\vec{L}_{B,abroll}$ soll mit der Kugel in der Bahn im Kugellager umlaufen. Dieser Umlauf der Orientierung der Kugelrotationsachse mit dem Drehimpuls $\vec{L}_{B,abroll,radial}$ benötigt

einen differentiellen Drehimpulsanteil $d\vec{L}_{B,tan}$ tangential zur Umlaufrichtung der Kugel (siehe Abbildung 3.17).

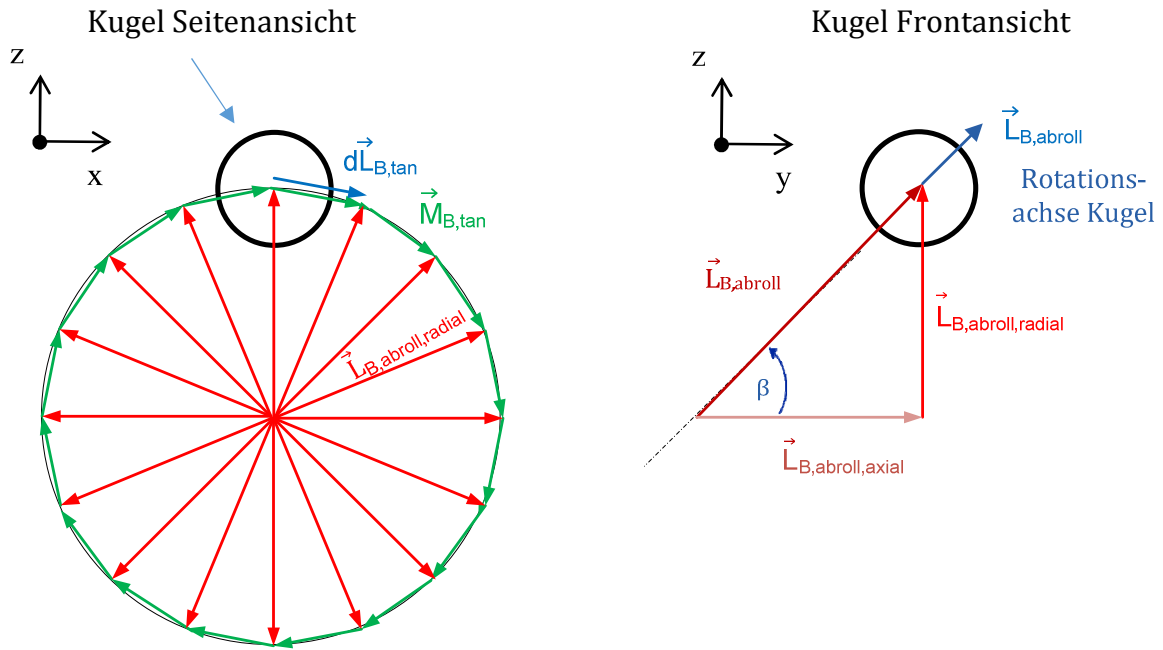


Abbildung 3.17: Umlauf des Drehimpulses $\vec{L}_{B,abroll}$ mit dem Moment $\vec{M}_{B,tan}$.

Der additive Drehimpulse $d\vec{L}_{B,tan}$ in der Zeit dt ergibt ein tangential wirkendes Drehmoment $\vec{M}_{B,tan}$.

$$\vec{M}_{B,tan} = \frac{d\vec{L}_{B,tan}}{dt} \quad (3.10)$$

Ohne das Drehmoment $\vec{M}_{B,tan}$ ist ein Umlauf der Kugelrotationsachse wie in der Abbildung 3.17 gezeigt nicht möglich. Eine fortlaufende, aufgezwungene Kreisbewegung des Drehimpulses der Kugel $\vec{L}_B$ kann nur über Reibung im Kontaktbereich (siehe Abbildung 3.1) aufgebracht werden, daraus ergibt sich (3.11).

$$\vec{M}_{fr} = \vec{M}_{B,tan} \quad (3.11)$$

Das Moment $\vec{M}_{fr}$ vergrößert den β -Winkel der Kugelrotationsachse zur Lagerachse (siehe Abbildung 3.15).

$$\vec{M}_{fr} = \vec{F}_{fr,tan O} \cdot R_B + \vec{F}_{fr,tan I} \cdot R_B \quad (3.12)$$

Aus der Trägheit der Kugel J_B ergibt sich eine Drallstabilisierung mit dem Moment $\vec{M}_g$.

$$\vec{M}_g = \vec{\omega}_C \times \vec{L}_B \quad (3.13)$$

Das Moment $\vec{M}_g$ steht senkrecht auf der von $\vec{\omega}_C$ und $\vec{\omega}_B$ aufgespannten Ebene. Das Moment $\vec{M}_g$ bewirkt eine Stabilisierung der Kugelrotationsachse in der Projektion auf den Schnitt des Lagers in der Abbildung 3.15 parallel zur Lagerachse. Zugleich bewirkt das Moment $\vec{M}_g$, dass die Kugelrotationsachse in der Abbildung 3.15 aus der Blattebene „herauskommt“. Dies bewirkt eine schräge Orientierung der Kugelachse in Umlaufrichtung der Kugel im Lager (siehe auch Kapitel 3.3.5). Es stellt sich ein Gleichgewicht ein.

$$\vec{M}_g = -\vec{M}_{fr} \quad (3.14)$$

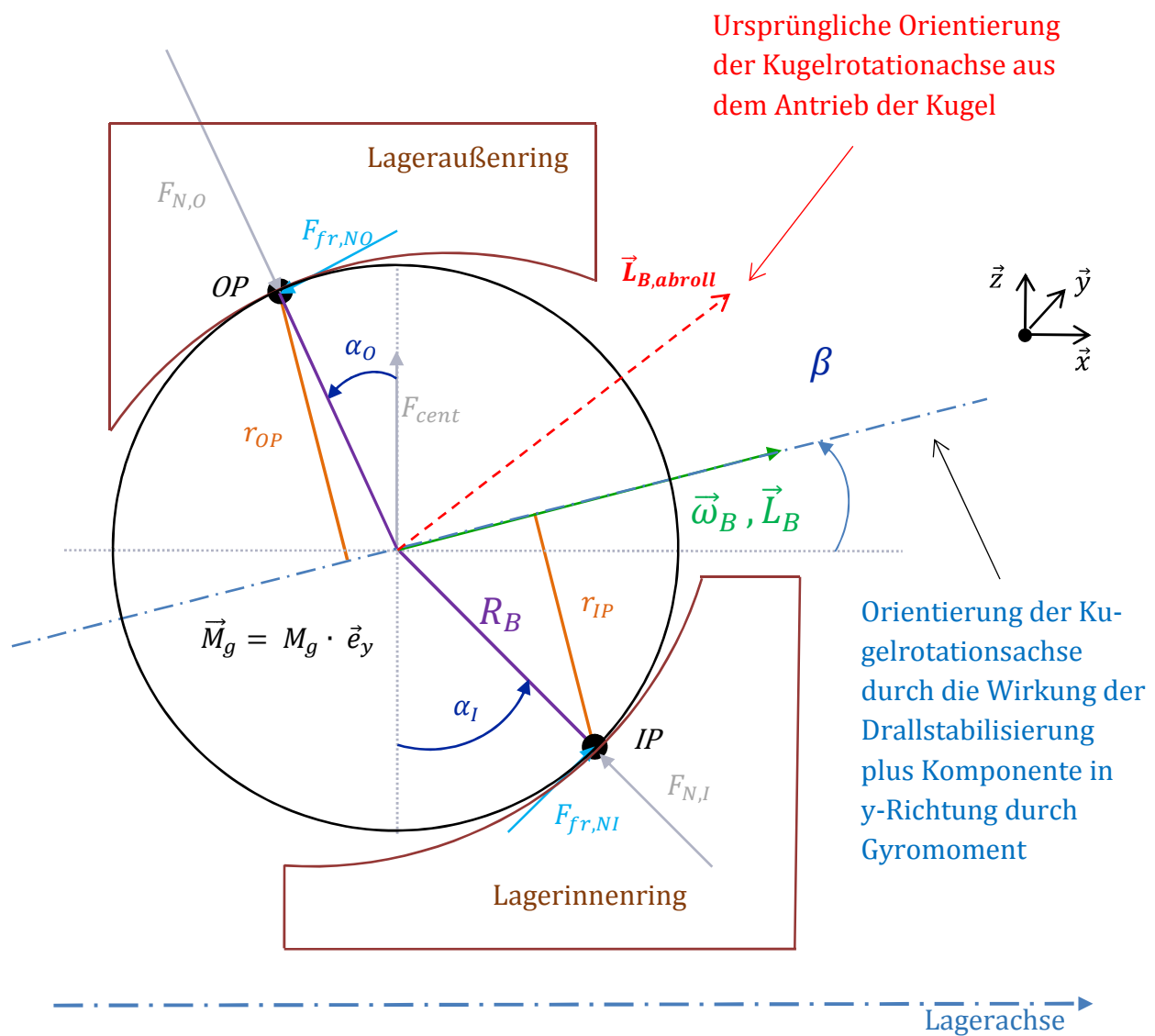


Abbildung 3.18: Die Wirkung der Drallstabilisierung verringert den β -Winkel und bewirkt damit eine erhöhte Winkelgeschwindigkeit der Kugel $\vec{\omega}_B$.

Dadurch dass sich die Rotationsachse der Kugel in der Projektion der Lagerdarstellung in der Abbildung 3.15 zur Parallelen des Lagers ausrichtet, ändern sich die Abstände der Kugelrotationsachse zu den Kontaktpunkten IP und OP in der Abbildung 3.18 (siehe auch Abbildung 3.9). Daraus resultiert, dass sich die Winkelgeschwindigkeit $\vec{\omega}_B$ der Kugel sowie die Bahngeschwindigkeit der Kugel im Lager und damit auch die Winkelgeschwindigkeit $\vec{\omega}_C$ verändern. Weiterhin führt die Ausrichtung der Kugelrotationsachse parallel zur Lagerachse zu unsymmetrischen Bedingungen (Jürgensmeyer [20]) in den Pressungsellipsen (siehe 3.1.4).

3.2.6 Berechnung der Frequenzen zur Bestimmung von Fehlermerkmalen

Die analytische Bestimmung der Überrollfrequenzen soll es ermöglichen, in den Frequenzspektren von Messungen am stillstehenden Lageraußenring mögliche Kugelschäden aufzufinden. Da bei hybriden Lagern Kugelschäden eine besondere Rolle spielen, wird der Betrachtung von Kugelschäden besondere Aufmerksamkeit gewidmet. Die Überrollfrequenzen über Kugelschäden im Schrägkugellager werden in Abhängigkeit von Lasten und Drehzahlen bestimmt. Kugelschäden werden sich mit der Überrollfrequenz f_B über den Schaden zeigen. Zusätzlich tritt durch den unterschiedlichen Abstand des Kontakts der Schadstelle mit dem Außenring eine Amplitudenmodulation auf. Diese bewirkt Seitenbänder im Abstand der Umlauffrequenz des Käfigs. $\pm f_C$ zur Überrollfrequenz der Kugel f_B .

Mit in der Literatur geläufigen Beziehungen (Methode 1) und 2)), werden Berechnungen der Kugelrotationsfrequenzen f_B durchgeführt. Die Ergebnisse der Berechnungen werden mit Resultaten von Simulationsprogrammen verglichen (Methode 3) und 4)). Anschließend werden die Ergebnisse der Berechnungen und der Simulationen mit den Messergebnissen (siehe Abbildung 3.25 und Abbildung 3.26) verglichen. Wird von den Bedingungen der Außenringkontrolle ($\vec{\omega}_{OPN} = 0$) ausgegangen (siehe Abbildung 3.11 und Abbildung 3.12), ergibt sich aus der Rotationsfrequenz f_S der Welle mit der Gleichung (3.15) die Kugelrotationsfrequenz f_B .

$$f_B = \frac{f_S}{\frac{R_B \cos(\beta - \alpha_O)}{r_m + R_B \cos \alpha_O} + \frac{R_B \cos(\alpha_I - \beta)}{r_m - R_B \cos \alpha_I}} \quad (3.15)$$

Die Ableitung der Gleichung (3.15) findet sich im Anhang Kapitel 7.6. Im Gegensatz zu der Gleichung (3.6) sind in der Gleichung (3.15) die unterschiedlichen Kontaktwinkel am Außenring α_O und am Innenring α_I berücksichtigt. Weiterhin ist in der Gleichung (3.15) die Orientierung β der Kugelrotationsachse (Gleichung (3.8)) zur Lagerachse mit in die Berechnung einbezogen.

In der Gleichung (3.15) sind die Auswirkungen der Deformation der Kugel und der Laufflächen beim Überrollen in den Kontaktzonen vernachlässigt. Ebenfalls nicht enthalten ist ein möglicher Yaw-Winkel γ der Kugelrotationsachse in Umlaufrichtung der Kugel (siehe Kapitel 3.2.5 und 3.3.5).

Wird die Käfigdrehzahl f_c gemessen, kann die Kugelrotationsfrequenz f_B aus der Käfigfrequenz f_c mit der Gleichung (3.16) berechnet werden.

$$f_B = f_c \frac{r_m + R_B \cos \alpha_o}{R_B \cos(\beta - \alpha_o)} \quad (3.16)$$

Die Ableitung dieser Gleichung findet sich im Anhang Kapitel 7.3.

1) Methode: Berechnung nach Wang [24]:

Verwendung der Außenringkontrolltheorie unter der Berücksichtigung der Verhältnisse am Innenring (Wang [24]), Berechnung des β -Winkel mit der Gleichung (3.8) und der Überrollfrequenz f_B über den Kugelschaden nach Gleichung (3.16) unter Verwendung der gemessenen Käfiggeschwindigkeit (siehe Anhang 7.7).

Mit der Methode 1) wird bei hybriden Lagern (siehe Abbildung 3.26) die Untergrenze der Kugelrotationsfrequenz f_B , aus dem Frequenzspektrum der gemessenen Daten bestimmt.

2) Methode: Berechnung nach Wang [24] mit β -Winkel gleich Null

Wie Methode 1), jedoch wird der β -Winkel auf null gesetzt und unter Verwendung der gemessenen Käfigfrequenzen f_c in die Gleichung (3.16) eingesetzt.

Mit der Methode 2) wird (siehe Abbildung 3.26) die Obergrenze der Kugelrotationsfrequenz f_B aus dem Frequenzspektrum der gemessenen Daten bestimmt (siehe Anhang 7.7).

3) Methode: Berechnung mit dem Programm Q180.

Das Programm Q180 basiert auf den Gleichungen von Harris [1]. Die Axiallast $\vec{F}_{axial}$ und die Wellenfrequenz f_s werden als Eingangsgrößen eingegeben. Die Käfigfrequenz f_c kann nicht als Eingangsgröße in das Programm eingegeben werden. Das Programm Q180 kann wahlweise eine Berechnung auf der Grundlage folgender Ansätzen durchführen:

Außenringkontrolle, Innenringkontrolle, geteilte Kontrolle oder minimaler Reibverlust im Kontaktbereich der Pressungsellipse. Das Programm berechnet abhängig von den gewählten Bedingungen und der Geometrie des Lagers die Käfigfrequenzen f_c und die Kugelrotationsfrequenzen f_B .

4) Methode: Berechnung mit dem Programm ADORE

ADORE ist ein Lagersimulationsprogram von Gupta [10] und arbeitet mit einem elasto-hydrodynamischen Modell (EHD). Lediglich der Startwert bei der Simulation wird nach den Bedingungen der Außenringkontrolltheorie berechnet. Die Käfiggeschwindigkeiten f_c werden in der Simulation berechnet und können nicht als Eingangsgrößen eingegeben werden.

Anmerkung: Mit der Methode 4) (ADORE von Gupta [10]), kann der Standardzyklus nicht als zusammenhängender Verlauf nachgefahren werden, da ohne Eingriffe in die Programmierung eine Berechnung der wechselnden Axiallasten und Wellendrehzahl-

len nicht möglich ist. Deshalb wird an ausgewählten Betriebspunkten eine Berechnung mit konstanten Parametern bis zum Erreichen eines stationären Zustandes durchgeführt.

Werte für die Einbeziehung der Axialkraft $\vec{F}_{axial}$ können bei einer Anwendung am Triebwerk nur aus einer Lastschätzung am Schrägkugellager oder über vorgegebene, abgespeicherte Werte aus einer Tabelle kommen.

Es erfolgen Berechnungen der Schadüberrollfrequenzen über den Innenring f_I und den Außenring f_O in der Abhängigkeit von den Käfigfrequenzen f_C . Zur Erkennung von Innenring- oder Außenringschäden ist die Kenntnis der Käfigfrequenzen f_C notwendig. Die Ermittlung der Käfigfrequenzen f_C kann über die Gleichung (3.17) erfolgen.

Käfigfrequenz f_C aus der Wellenfrequenz f_S berechnet:

$$f_C = \frac{f_S}{\left(1 - \frac{(r_m + R_B \cos \alpha_O)(R_B \cos(\alpha_I - \beta))}{(R_B \cos(\beta - \alpha_O))(r_m - R_B \cos \alpha_I)}\right)} \quad (3.17)$$

Die Ableitung dieser Gleichung findet sich im Anhang Kapitel 7.3.

Schadüberrollfrequenz f_I bei einem Innenringschaden:

$$f_I = k(f_S - f_C) \quad (3.18)$$

Schadüberrollfrequenz f_O bei einem Außenringschaden:

$$f_O = k f_C \quad (3.19)$$

3.3 Messungen an Hauptwellenlagern auf dem Großlager-Prüfstand AN58

Ziel ist es, das Verhalten vollmaßstäblicher Schrägkugellager für Triebwerkswellenlager zu testen. Es soll das Schadensfortschrittsverhalten im Lager bei vorgeschädigten Kugeln verstanden werden. Dabei werden hybride als auch traditionelle Stahllager mit jeweils vorgeschädigten keramischen oder stählernen Kugeln getestet. Außer den Prüfläufen mit geschädigten Kugeln erfolgen Versuche mit geschädigten Lagerlaufbahnen am Innen- und Außenring der Lager. Damit soll der Fortgang eines Schadens auf den Laufbahnen möglichst genau verstanden werden. Mit den Testreihen soll ermittelt werden, welche Sensoren zur Überwachung von Hybridlagern geeignet sind. Bei der Auswahl der zu Testzwecken eingesetzten Sensoren werden Sensoren gewählt, die potentiell für eine Serienanwendung in Frage kommen.

Die am Kleinlagerprüfstand gewonnenen Ergebnisse (Kapitel 2.3) sollen mit Triebwerkslagern auf dem Prüfstand AN 58 validiert und mit theoretischen Werten vergli-

chen werden. Ferner soll die Kinematik der Schrägkugellager mit den dazugehörigen Schädüberrollfrequenzen verstanden werden.

Der Prüfstand für Triebwerkslager besteht aus einem stationären Antrieb, einem Prüfkopf mit den jeweiligen Testlagern und einem Hydraulikzylinder zur Verstellung der axialen Kraft. Es kann eine Wellendrehzahl von bis zu 15.000 min^{-1} erreicht werden. Über den Hydraulikzylinder können bis zu 150 kN axiale Kräfte auf das Schrägkugellager aufgebracht werden. Die Wellenfrequenz und die Axialkraft können am Prüfstand gemessen und stufenlos geregelt werden. Der Prüfkopf ist so gefertigt, dass die Testlager mit einem geringen Aufwand getauscht werden können. Zur axialen Abstützung befindet sich ein Gegenlager der gleichen Bauart im Prüfkopf. Der Aufbau der Testumgebung ist so gestaltet, dass diese die Bedingungen im Flugzeugtriebwerk möglichst genau nachstellt. Auf dem Prüfstand können Standardbetriebszyklen für Triebwerke nachgefahren werden (siehe Abbildung 3.24). Die Ergebnisse der Prüfläufe mit den Wellenlagern von Triebwerken werden im Kapitel 3.3.3 dargestellt.

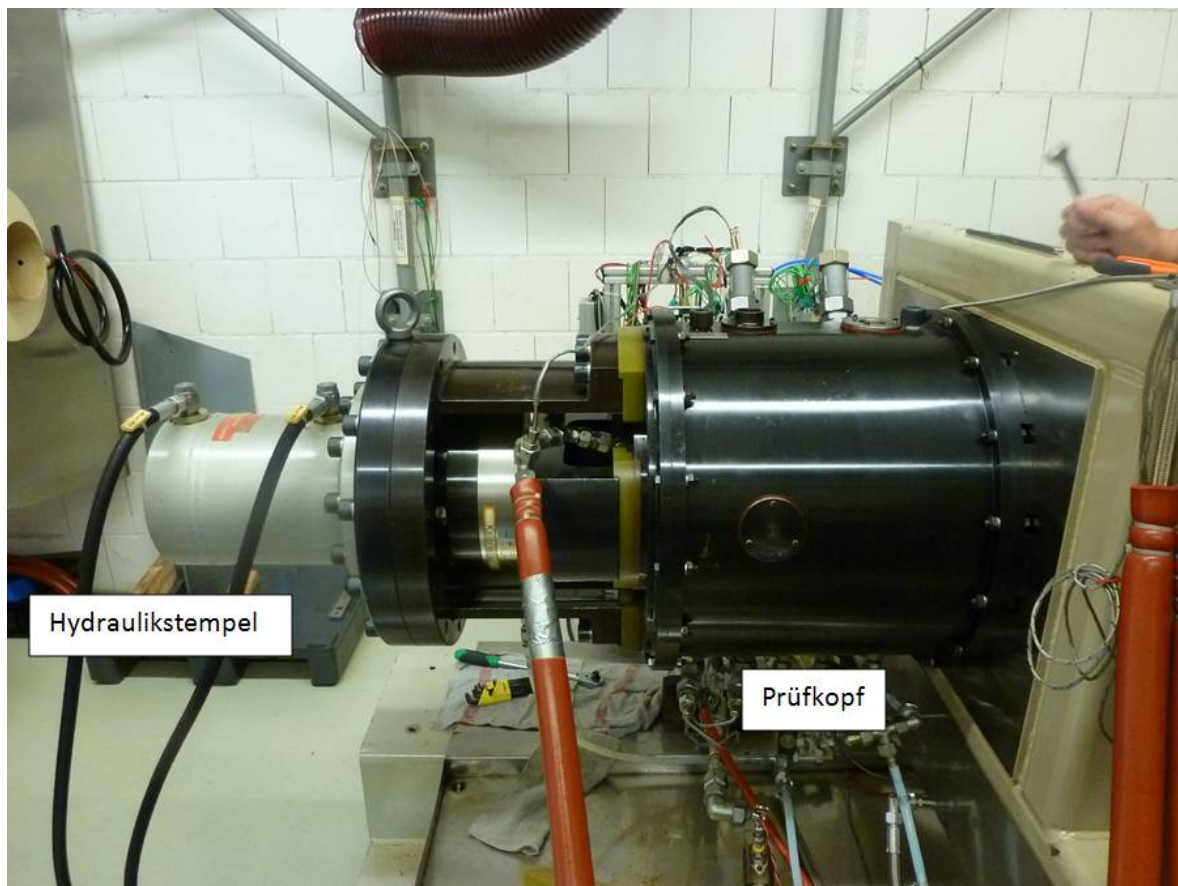


Abbildung 3.19: Prüfkopf mit angebautem Hydraulikzylinder für eine Axiallastverstellung [Bild FAG].

In der Abbildung 3.19 und der Abbildung 3.20 ist der Prüfstand AN58 für Triebwerkshauptwellenlager bei FAG in Schweinfurt zu sehen. In der Mitte der Abbildung

3.19 (schwarz) befindet sich der Prüfkopf mit dem Testlager im Inneren. An dem Prüfkopf ist ein hydraulischer Zylinder (weiß) mit den Zuführungsleitungen für Hydrauliköl angebracht.

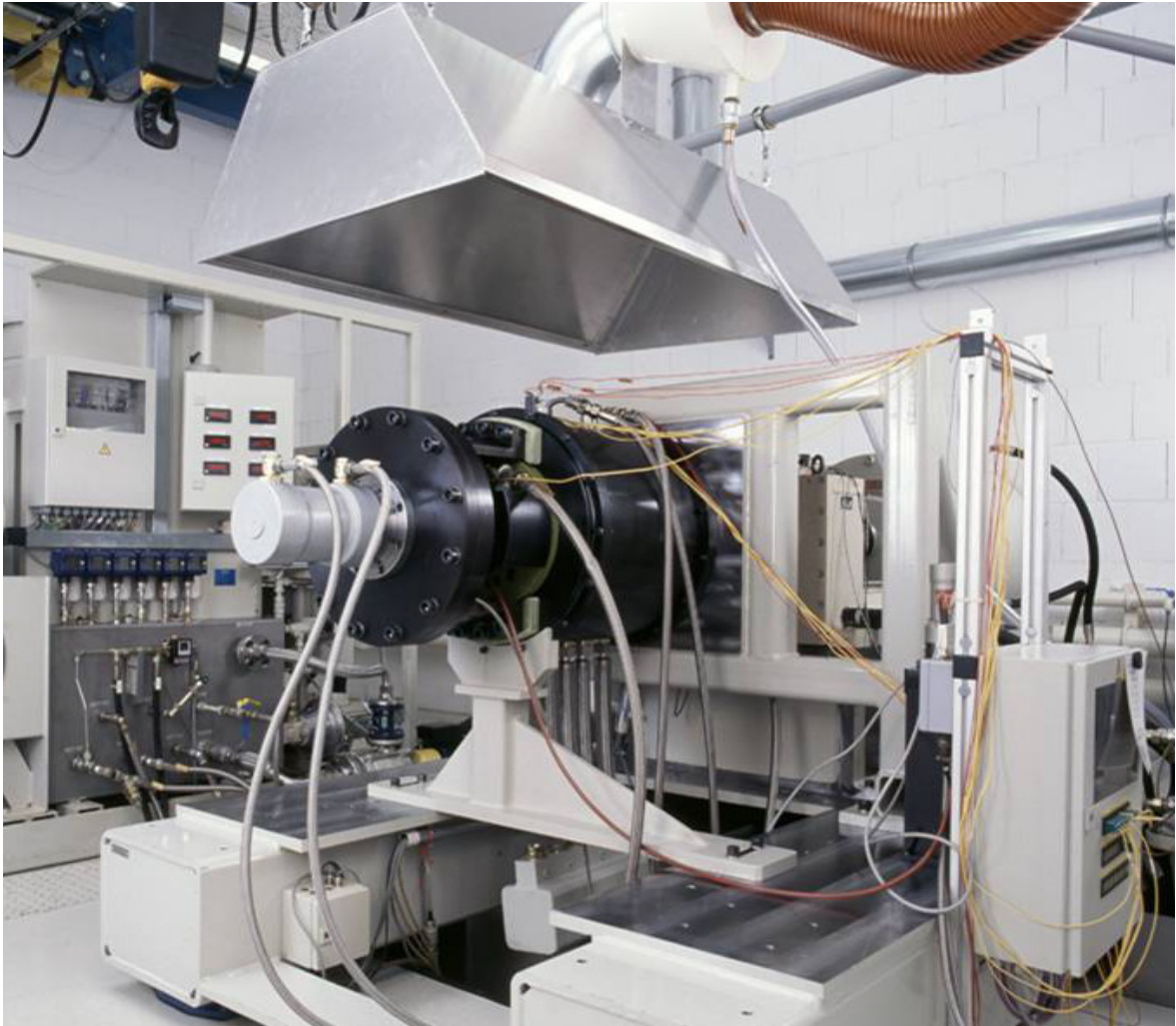


Abbildung 3.20: Großlagertestrigg bei der Firma FAG [Bild FAG].

3.3.1 Instrumentierung Hauptwellenlager

Gemessen werden soll der Druckpunktumlauf der Kugeln (Sensor 1), die Käfiggeschwindigkeit (Sensor 4), der Rundlauf der Welle (Sensor 3), Überrollte Schäden oder Partikel im Lager (Sensor 1, Sensor 2 und Sensor 5) und die Temperatur am Außenring des Lagers (Sensor 6).

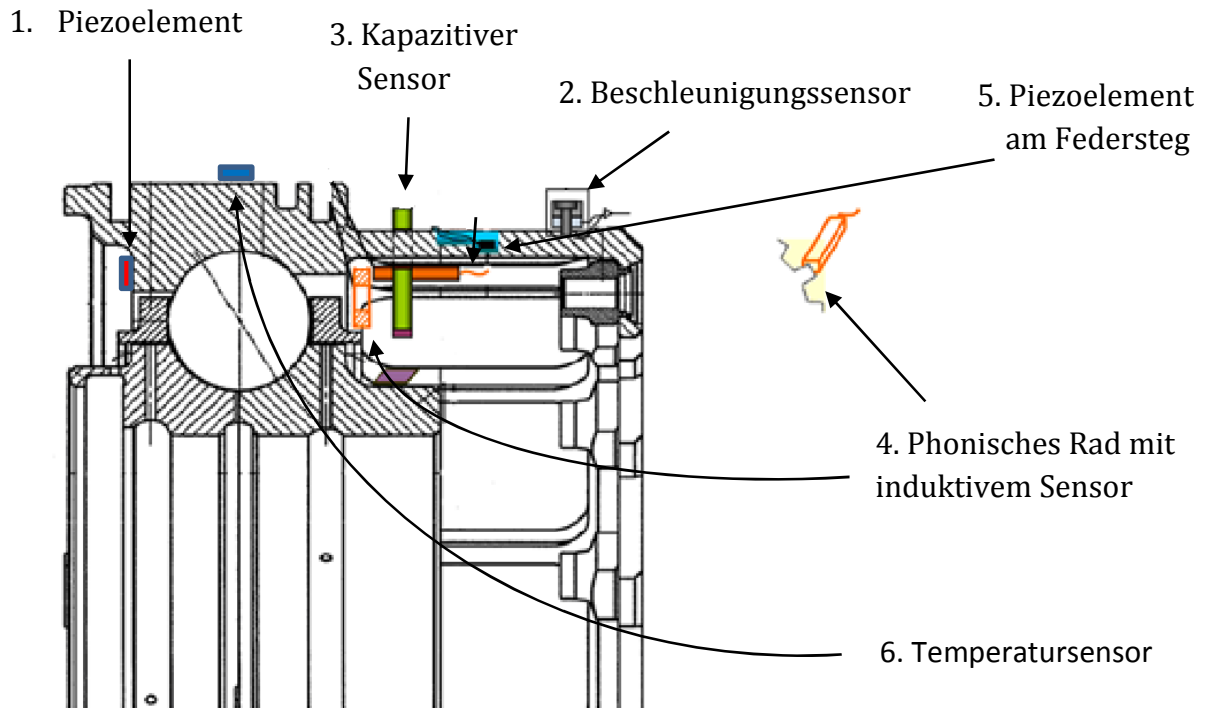


Abbildung 3.21: Instrumentiertes Großlager für einen Test auf einem Großlagerprüfstand [EA1],[EA15].

1. Piezoelement an der Stirnseite des Schrägkugellagers im Lastpfad
2. Beschleunigungssensor zur Messung von Radialbeschleunigungen
3. Kapazitiver Sensor zur Messung einer Wellenunwucht
4. Phonisches Rad mit induktivem Sensor, Messung der Käfiggeschwindigkeit
5. Piezoelement am Federsteg des Lagers
6. Temperatursensor

Der Lageraußenring ist im Lastpfad an der Stirnseite mit Piezoelementen (1) versehen. Diese ermöglichen die Erfassung der Überrollung durch die Kugeln und damit die Messung der Kugelpassierfrequenz $k \cdot f_c$. Durch die Messung der Überrollung der Kugeln ist eine fortlaufende Selbstüberwachung der Überwachungseinheit möglich (siehe Kapitel 5.3.4). Die Piezoelemente erfassen zudem den bei einer Überrollung eines Schadens entstehenden Körperschall.

Der ferromagnetische Lagerkäfig wird seitlich so mit Einfräsungen versehen, dass über der Mitte einer Käfigtasche jeweils ein metallener Steg stehen bleibt. Diese Stege

bilden ein phonisches Rad (siehe Abbildung 3.21, Punkt 4). Ein Zahn in dem phonischen Rad ist kürzer gehalten als die übrigen Zähne. Durch induktive Sensoren wird somit eine Messung der Drehzahl und der Phasenlage des Lagerkäfigs ermöglicht. Auf der Außenseite des Außenringes des Lagers sind Beschleunigungssensoren angebracht. Diese Sensoren messen die Beschleunigungen in radialer Richtung.



Abbildung 3.22: Piezoelemente auf der Stirnseite des Lagers

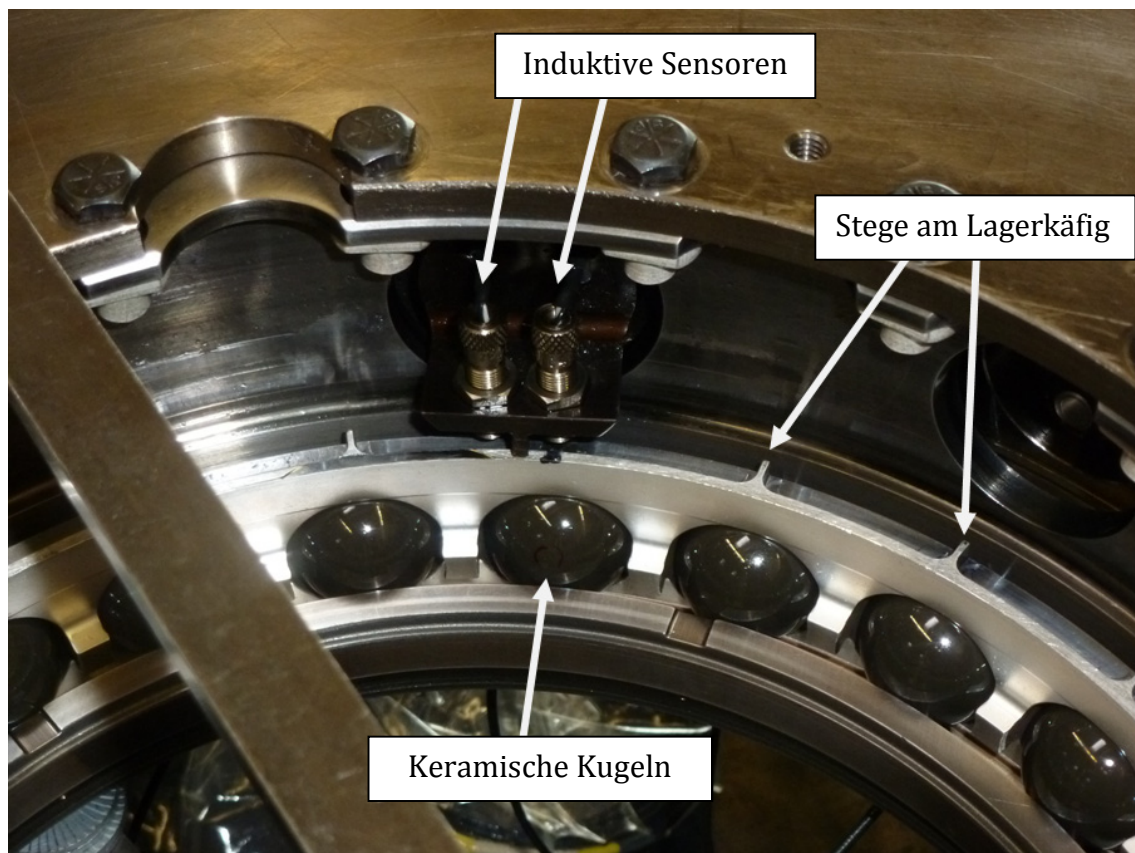


Abbildung 3.23: Lagerkäfig mit den gefrästen Stegen und den induktiven Sensoren [Bild FAG].

3.3.2 Standardflugzyklen

Für die messtechnischen Untersuchungen an Triebwerkshauptwellenlagern auf dem Prüfstand AN58 wird ein vordefiniertes Profil von Last- und Drehzahlverläufen verwendet. In diesem Profil (Abbildung 3.24) werden alle wichtigen Flugphasen untergebracht. Dieses Profil wird in der Folge als Standardzyklus bezeichnet.

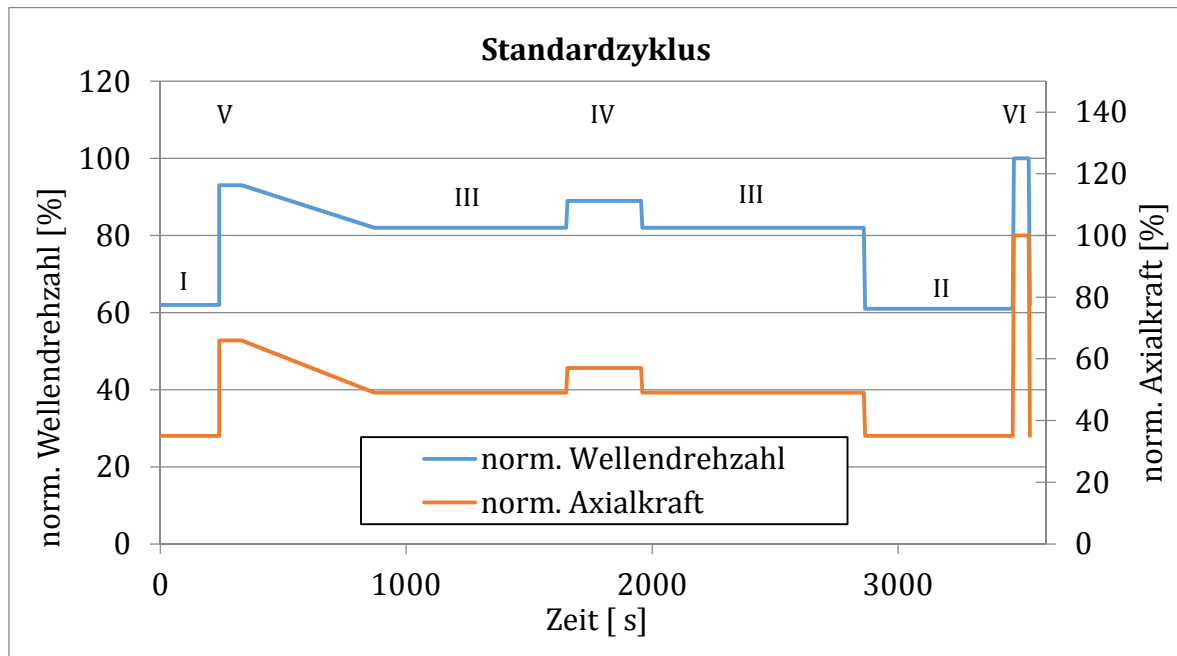


Abbildung 3.24: In den Versuchen verwendeter Standardflugzyklus [EA1].

Im Standardzyklus der Abbildung 3.24 sind die Flugzyklen nicht in der chronologischen Reihenfolge eines realen Betriebes abgebildet. Die Römischen Ziffern kennzeichnen die Abschnitte der Flugzyklen. Diese Flugphasen werden in den aufgeführten Versuchen zyklisch wiederholt durchlaufen.

Nr.	Flugphase	Wellenfrequenz [%]	Axiallast [%]
I	Leerlauf	62	35
II	Sinkflug	61	35
III	Reiseflug	82	49
IV	Steigflug	89	57
V	Start	94	66
VI	Maximaler Schub	100	100

Tabelle 3.3: Übersichtsliste der verschiedenen Flugphasen

3.3.3 Messungen zur Kugelrotationsfrequenz f_B

In diesem Abschnitt werden Abweichungen gemessener von berechneten Kugelrotationsfrequenzen (siehe Kapitel 3.2.6) untersucht. Die Messungen erfolgen an Schrägkugellagern für Triebwerks-Hauptwellen auf dem Prüfstand AN58 (siehe Kapitel 3.3). Für die Untersuchungen wird das in der Abbildung 3.24 vordefinierte Profil von Last- und Drehzahlverläufen verwendet. Es erfolgen Prüfläufe mit künstlich in die Kugeloberfläche eingebrachten Schäden. Bei den durchgeführten Versuchen werden Schäden mit einem Durchmesser von 2,2 mm, 1,0 mm und 0,55 mm in Keramik- und Stahlkugeln eingebracht. Um einen Vergleich zum Verhalten geschädigter Stahlkugeln zu bekommen, wird eine Stahlkugel mit einem Schaden von 2,2 mm getestet.

Zur Eingrenzung der Kugelrotationsfrequenzen in den Abbildung 3.25 und Abbildung 3.26 wird aus dem Kapitel 3.2.6 die Methode 1) für die Berechnung der Untergrenze und die Beziehung 2) für die Berechnung der Obergrenze der Frequenzen verwendet.

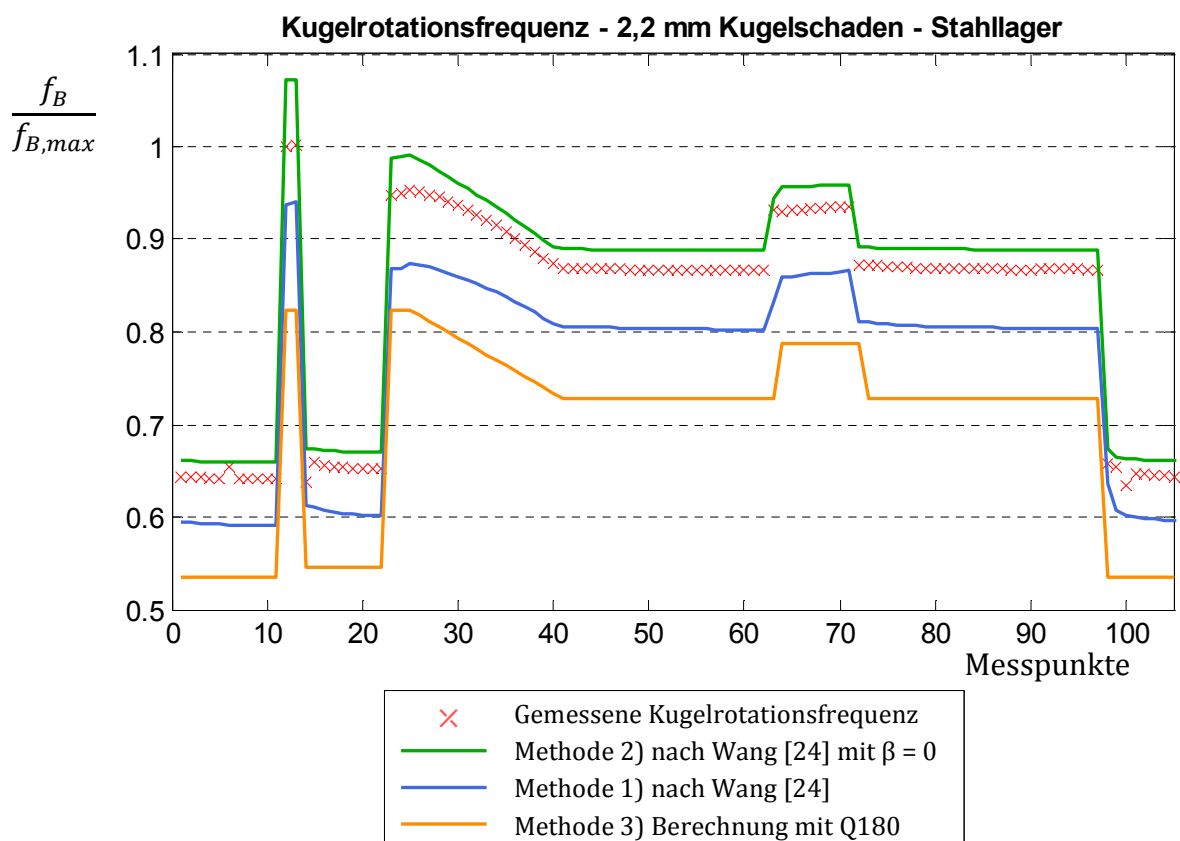


Abbildung 3.25: Gemessene Kugelrotationsfrequenzen f_B von Stahlkugeln im Vergleich zu berechneten Werten [2EA].

In der Abbildung 3.25 (grüne Linie) ist zu erkennen, dass die Berechnungen der Kugelrotationsfrequenzen nach Wang [24] mit $\beta = 0$ ca. +7 % über den gemessenen Werten (rote Kreuze) liegen. Die blaue Linie mit den Berechnungen nach Wang [24] zeigt einen Verlauf der ca. -20 % unter den Messwerten liegt. Durch diese beiden Berechnungen lässt sich der Verlauf der Messwerte ausreichend gut eingrenzen. Für diese

Berechnungen werden die gemessenen Käfigfrequenzen (siehe Abbildung 3.21) verwendet. Die Berechnung der Kugelrotationsfrequenzen erfolgt mit einfachen Beziehungen (siehe Kapitel 3.2.6).

Das Programm Q180 (Methode 3)) berücksichtigt fluide Reibungseffekte und berechnet die Kontaktwinkel detaillierter als in den vergleichsweise einfachen Berechnungen der Methoden 1) und 2) im Kapitel 3.2.6, dennoch liegen die berechneten Werte mit -40 % unterhalb den gemessenen Werte.

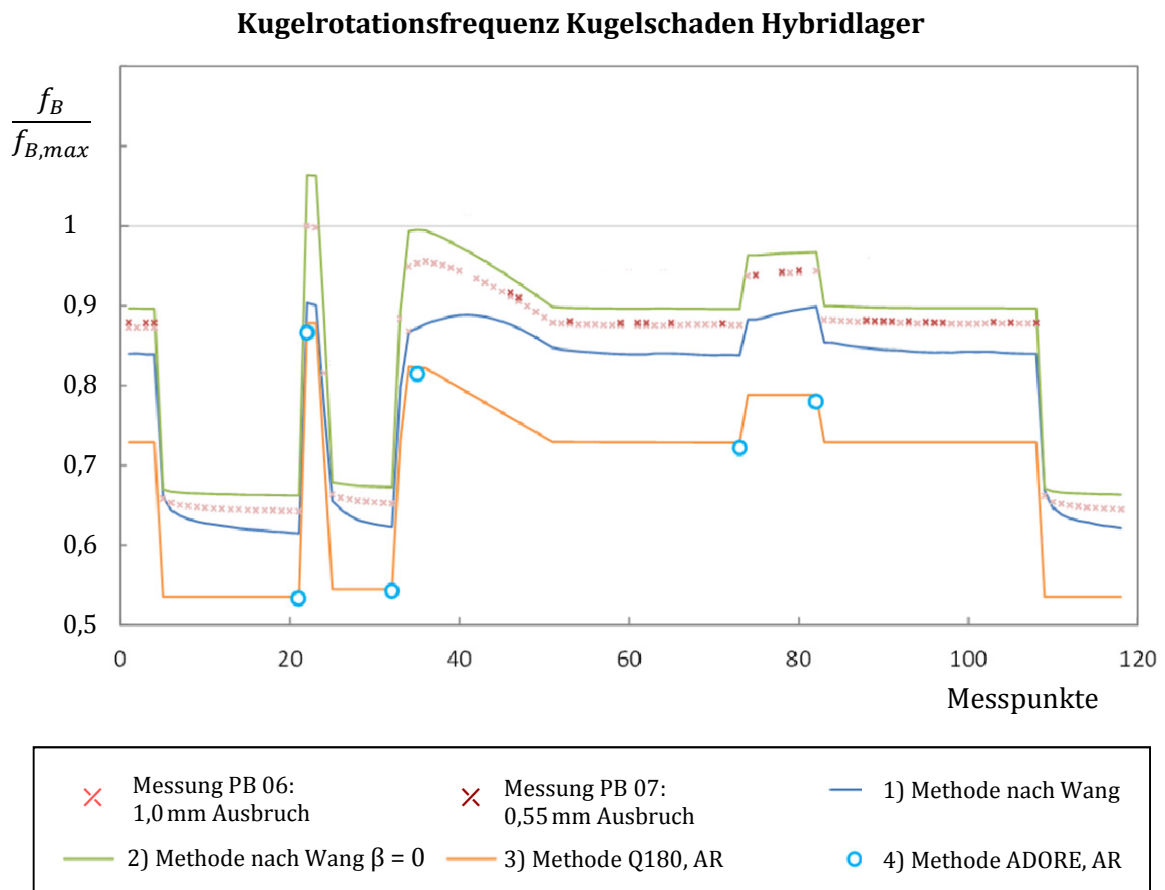


Abbildung 3.26: Gemessene Kugelrotationsfrequenzen f_B keramischer Kugeln im Vergleich zu berechneten Werten [2EA], (AR = Außenringkontrolle).

In der Abbildung 3.26 werden die Messungen aus den Versuchen PB 06 (1,0 mm Ausbruch, hellrote Kreuze) und PB07 (0,55 mm Ausbruch, dunkelrote Kreuze) dargestellt. Die grüne Linie zeigt das Berechnungsergebnis der Kugelrotationsfrequenz nach Wang (Methode 2) bei gemessener Käfiggeschwindigkeit und der Annahme der Orientierung der Kugelrotationsachse parallel zur Lagerachse ($\beta = 0$). Die berechneten Werte liegen etwa +5 % über den gemessenen Werten. Die blaue Linie zeigt das Berechnungsergebnis der Kugelrotationsfrequenz nach Wang, Methode 1) bei gemessener Käfig- und Wellenfrequenz. Die berechneten Werte liegen ca. 9 % unter den gemessenen Werten.

Die Simulation nach Methode 4) (Programm Adore von Gupta [10], blaue Kreise), liegen mit ca. -40 % ebenfalls deutlich unterhalb der gemessenen Werte (rote Kreuze).

Die Methoden 3) und 4) sind aufwendige Simulationen, in den einfachen Beziehungen der Methoden 1) und 2) sind dagegen Details wie Reibungseffekte und Gyromomente nicht berücksichtigt. Dennoch stimmen die Ergebnisse der einfachen Beziehungen der Methoden 1) und 2) besser mit den Messungen überein. Der Grund dafür ist die Verwendung der gemessenen Käfigfrequenzen bei den Methoden 1) und 2).

Anmerkung: Die Methode 4 nach Gupta [10] benutzt als Startwerte für die Simulation nach EHD Werte, die sich nach der Berechnung der Außenringkontrolle ergeben. Da die Methoden 3 und 4 dieselben Ergebnisse bei der Simulation zeigen, besteht die Möglichkeit, dass die Simulation mit ADORE ein Gleichgewicht im EHD-Bereich nicht erreicht hat.

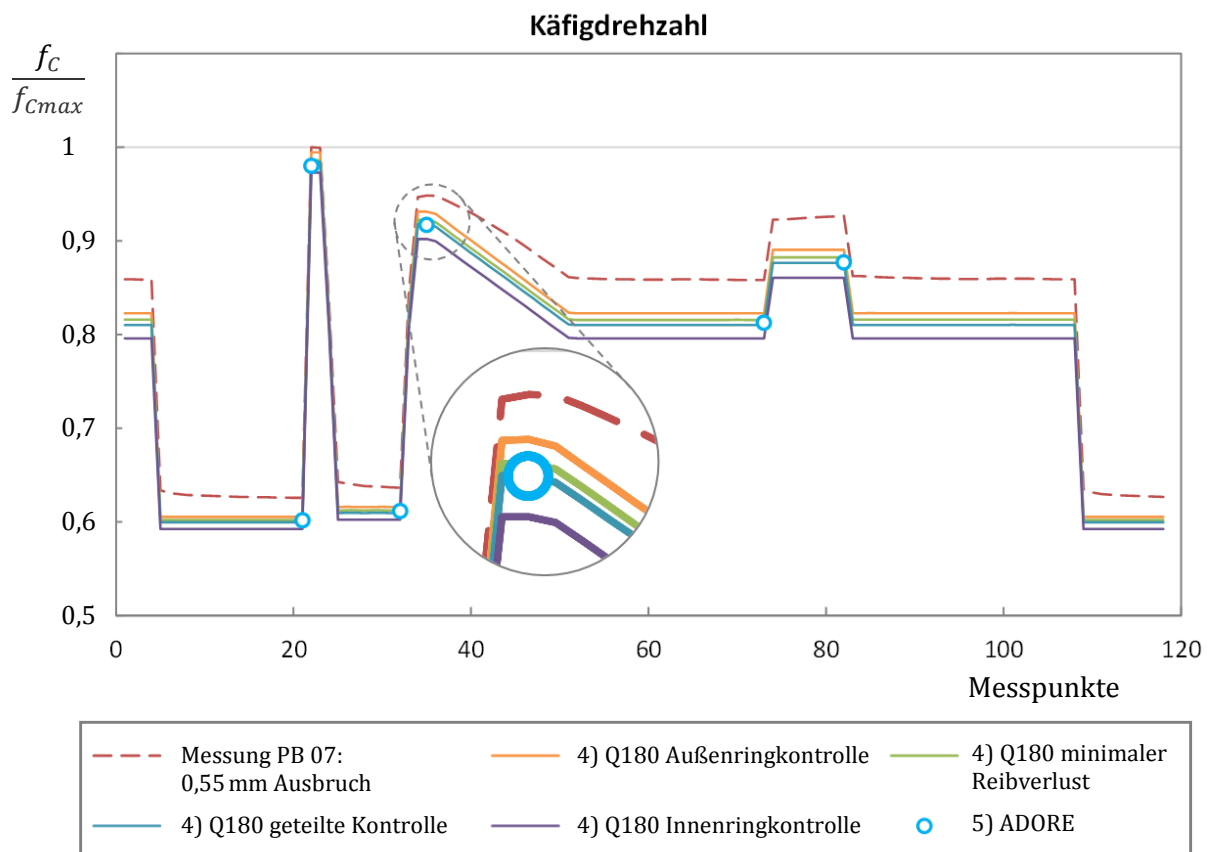


Abbildung 3.27: Vergleich berechneter und gemessener Käfigrotationsfrequenzen f_c im Hybridlager.

Zur Untersuchung der Abweichungen der Simulationen der Käfigfrequenzen f_c (Methode 3) und 4)) von den Messungen der Käfigfrequenzen f_c werden die Ergebnisse in der Abbildung 3.27 dargestellt und mit den Messwerten der Messung PB 07 (0,55 mm Ausbruch) verglichen. Die Simulationen der Käfigfrequenzen f_c ergeben mit -10 % bis zu -18 % deutlich zu geringe Werte im Vergleich zu den Messergebnissen. Die Verwendung der gemessenen Käfigrotationsfrequenzen f_c (Methode 1) und 2)) bei der Bestimmung der Kugelrotationsfrequenzen f_B verbessert die Genauigkeit der Berechnungen (siehe Abbildung 3.25 und Abbildung 3.26). Die Messung der Käfigfre-

quenz f_c an Schrägkugellagern stellt allerdings einen höheren messtechnischen Aufwand dar.

3.3.4 Unbestimmbare Systemzustände im Lager

Die Drehzahlen der Kugeln und Käfige im Kugellager sowie die Orientierung der Kugelachsen zeigen bei Last- oder Drehzahländerungen der Welle oder Änderungen der Temperaturverteilung im Lager lange Übergangszeiten bis zum Erreichen neuer, stationärer Betriebspunkte. In diesen Zeiträumen können Unsicherheiten bei der Bestimmung von Lagerschäden auftreten. Eine eindeutige Bestimmung von Frequenzbereichen, in denen typische Muster von Lagerfehlern auftreten, ist in diesen Zeiträumen nicht zuverlässig möglich. Es sollen daher Zustandsänderungen im Lager erkannt werden und die Erfassung und Auswertung von Messdaten in diesen Zeiträumen unterdrückt werden. Auf diese Weise sollen mögliche Falschaussagen durch die Auswertelogik vermieden werden.

3.3.4.1 Auswertung von Messungen während Temperaturänderungen im Lager

Temperaturgradienten zwischen Innen- und Außenring bewirken eine merkbare Änderung im radialen Lagerspiel („Lagerluft“). Ein Schrägkugellager reagiert empfindlich auf eine Veränderung des radialen Lagerspiels. Schon Veränderungen im μm Bereich machen sich in der Käfig- und Kugelrotationsfrequenz bemerkbar.

Es werden zwei Messreihen im Vergleich durchgeführt. Eine Messreihe startet mit einem auf Raumtemperatur abgekühlten Versuchsaufbau. Eine weitere Messreihe startet nach dem Erreichen einer stabilen mittleren Betriebstemperatur. In den Versuchen werden jeweils nach einem Neustart des Prüfstandes zwei Standardflugzyklen durchfahren (siehe Abbildung 3.24). Ausgewertet werden jeweils nur die Bereiche aus den Flugzyklen III mit der Wellendrehzahl bei Reisegeschwindigkeit (siehe Tabelle 3.3). Gemessen werden die Käfigfrequenzen und die Temperaturen am Außenring. Die Innenringtemperatur kann nicht gemessen werden, sodass eine Temperaturverteilung der Lagerkomponenten zueinander nur geschätzt werden kann. Das zugeführte Öl kommt vorgeheizt mit einer Temperatur von 110°C in das Lager des Prüfstandes. Bewertet werden die Variationen (siehe Abbildung 3.28 und Abbildung 3.29), jeweils rechtes Bild) der gemessenen Käfigrotationsfrequenzen f_c innerhalb der Flugzyklen III (Reisegeschwindigkeit).

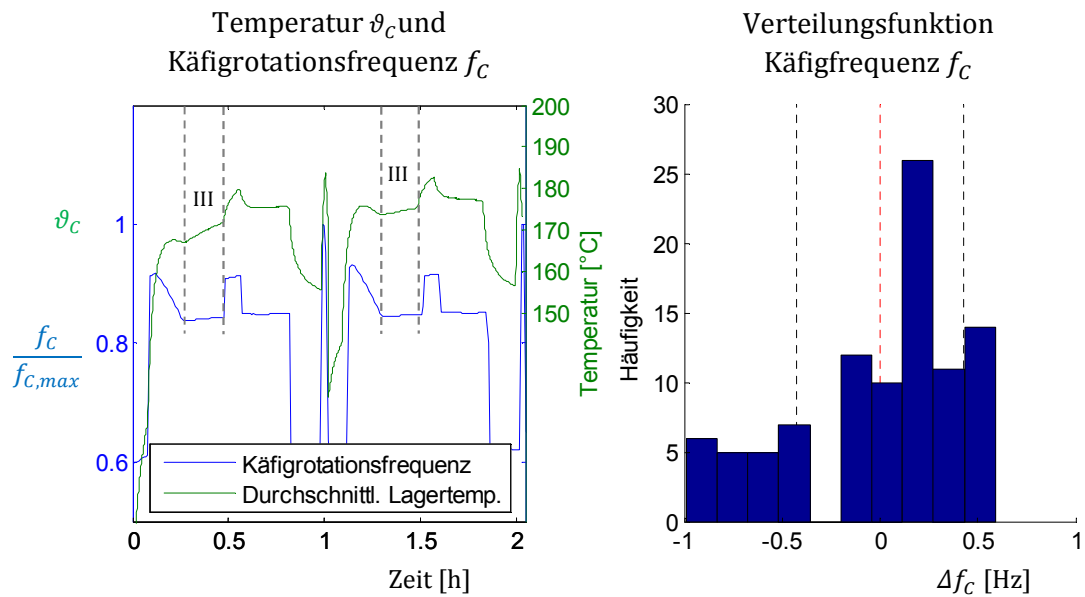


Abbildung 3.28: Bild links, Verlauf Außenringtemperatur ϑ_C im Standardflugzyklus
Bild rechts, Verteilungsfunktion der Käfigrotationsfrequenz f_C nach dem Einschalten des kühlen Prüfstandes (Flugzyklus III, Reiseflug).

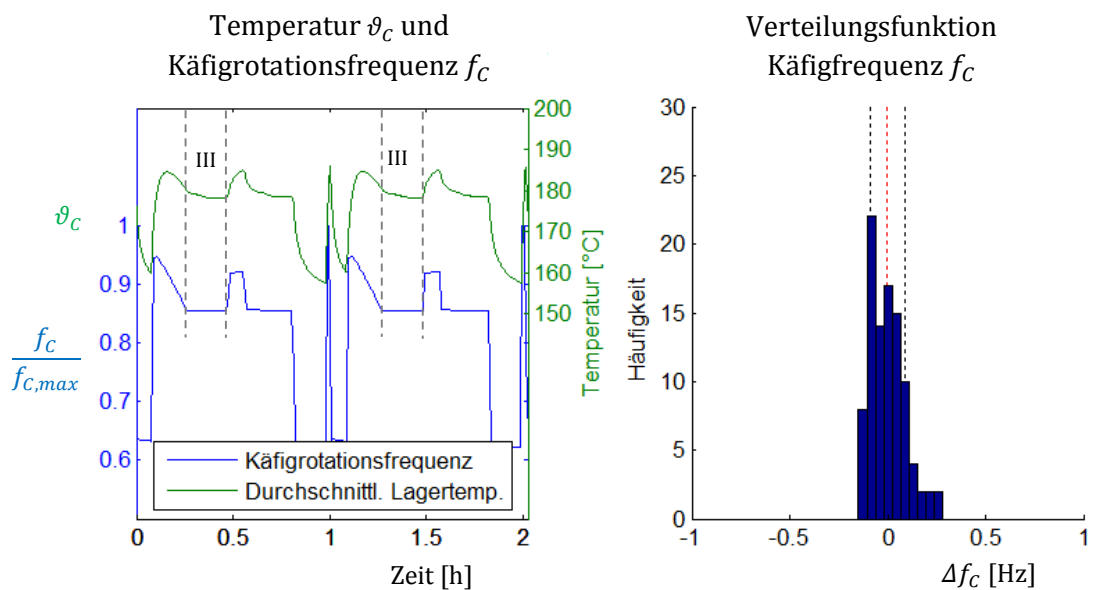


Abbildung 3.29: Bild links, Verlauf Außenringtemperatur ϑ_C im Standardflugzyklus
Bild rechts, Verteilungsfunktion der Käfigrotationsfrequenz f_C nach einer Betriebszeit von 3 Stunden des Prüfstandes (Flugzyklus III, Reiseflug).

In der Abbildung 3.28 und der Abbildung 3.29 (jeweils im Bild links) ist die Abhängigkeit der Käfigrotationsfrequenz f_C von der Variation der Außenringtemperatur ϑ_C (grüne obere Linie) erkennbar. Für die Darstellung der Variation der Käfigrotations-

frequenzen f_C (in den Abbildungen rechts) werden Messwerte aus den Reiseflugabschnitten (III) zweier Flugzyklen verwendet. In den Ordinaten ist die Anzahl der jeweiligen Käfigrotationsfrequenzen in den Reiseflugabschnitten (III) dargestellt. Die Norm $f_{C,max}$ ist bezogen auf die maximal auftretende Käfigrotationsfrequenz im Abschnitt III der Flugzyklen (Reisegeschwindigkeit).

In der Abbildung 3.29 ist zu erkennen, dass nach dem Erreichen der mittleren Betriebstemperatur die Variation der Käfigrotationsfrequenz f_C in den Reiseflugabschnitten (III) geringer ist als die Variation der Käfigrotationsfrequenz f_C in der Abbildung 3.28.

Angenommen wird, dass es sich bei den dargestellten Auswirkungen um den Einfluss der Temperaturverteilung im Lager handelt. Am Prüfstand wird das zugeführte Öl vorgeheizt, jedoch ist die Temperatur von Außen- und Innenring noch nicht angeglichen, dies führt zu Auswirkungen auf die Radialluft im Lager. Der unterschiedliche Temperatúrausdehnungskoeffizient des Stahls der Laufringe und der Keramik der Kugeln führt zu weiteren Änderungen der Radialluft im Lager. Dieser Radiallufteinfluss beeinflusst direkt den Kontaktpunkt der Kugel mit den Lagerringen. Damit ändert sich die Kugelrotationsfrequenz f_B und daraus resultierend die Käfigrotationsfrequenz f_C .

In der hier gezeigten Anwendung eines Triebwerkslagers können die Zeiten zum Erreichen neuer stationärer Betriebspunkte bis zu 30 Minuten und länger betragen. In diesen Übergangszeiten ist die Bestimmung einer Schadüberrollfrequenz im Lager nicht ohne weiteres möglich. Eine messtechnische Erfassung der Systemzustände oder eine ausreichend genaue Simulation in den transienten Übergängen wird gegenwärtig, im Betrieb von Flugzeugtriebwerken, als nicht realisierbar angesehen. Somit können mit vertretbarem Aufwand während der Übergangszeiten keine zuverlässigen Angaben über den Systemzustand eines Lagers gemacht werden. Damit ist eine zuverlässige Früherkennung von Schäden in diesen Übergangszeiten nicht möglich. Übergangszeiten in denen die Rotationsfrequenzen der Kugeln die neuen stationären Betriebspunkte nicht erreicht haben, sind daher von der Bewertung der Daten auszunehmen.

3.3.4.2 Auswertungen von Messungen während Änderungen von Drehzahlen oder Lasten

Während oder direkt nach Drehzahl- oder Laständerungen im Lager ist die Bestimmung von Systemzuständen mit Unsicherheiten behaftet. Dadurch kann es zu Problemen bei der Auswertung von Schadsignalen der Lager kommen. Bei der Erkennung von Schadüberrollungen kommt es abhängig von der Schadgröße zu unterschiedlichen Nutz-/Rauschsignalverhältnissen. Es wird geprüft, ob es während der Änderung von Zustandsgrößen im Lager möglich ist, Fehlstellen auf Kugeln messtechnisch zu erfassen. Es wird untersucht, ob eine Erkennung kleiner Schadstellen auf Kugeloberflächen möglich ist. Für den Fall, dass die spektralen Bereiche der Schadsignaturen nicht mit ausreichender Genauigkeit bestimmt werden können oder der Nutz-/Störsignalabstand nicht ausreicht, sind die Schadsignaturen nicht erkennbar.

In der Abbildung 3.30: (oberes Bild, 0,55 mm Fehlstelle auf der Kugel) ist zu erkennen, dass während oder nach Last- oder Drehzahländerungen (gekennzeichneten Abschnitten 1 bis 4) nur wenige Überrollungen eines Schadens auf der Kugel erkannt werden können. In der Abbildung 3.30: (Unteres Bild, 1,0 mm Fehlstelle auf der Kugel) ist zu erkennen, dass eine Erkennung des Kugelschadens auch in den Übergangsbereichen (gekennzeichneten Abschnitten 1 bis 4) möglich ist.

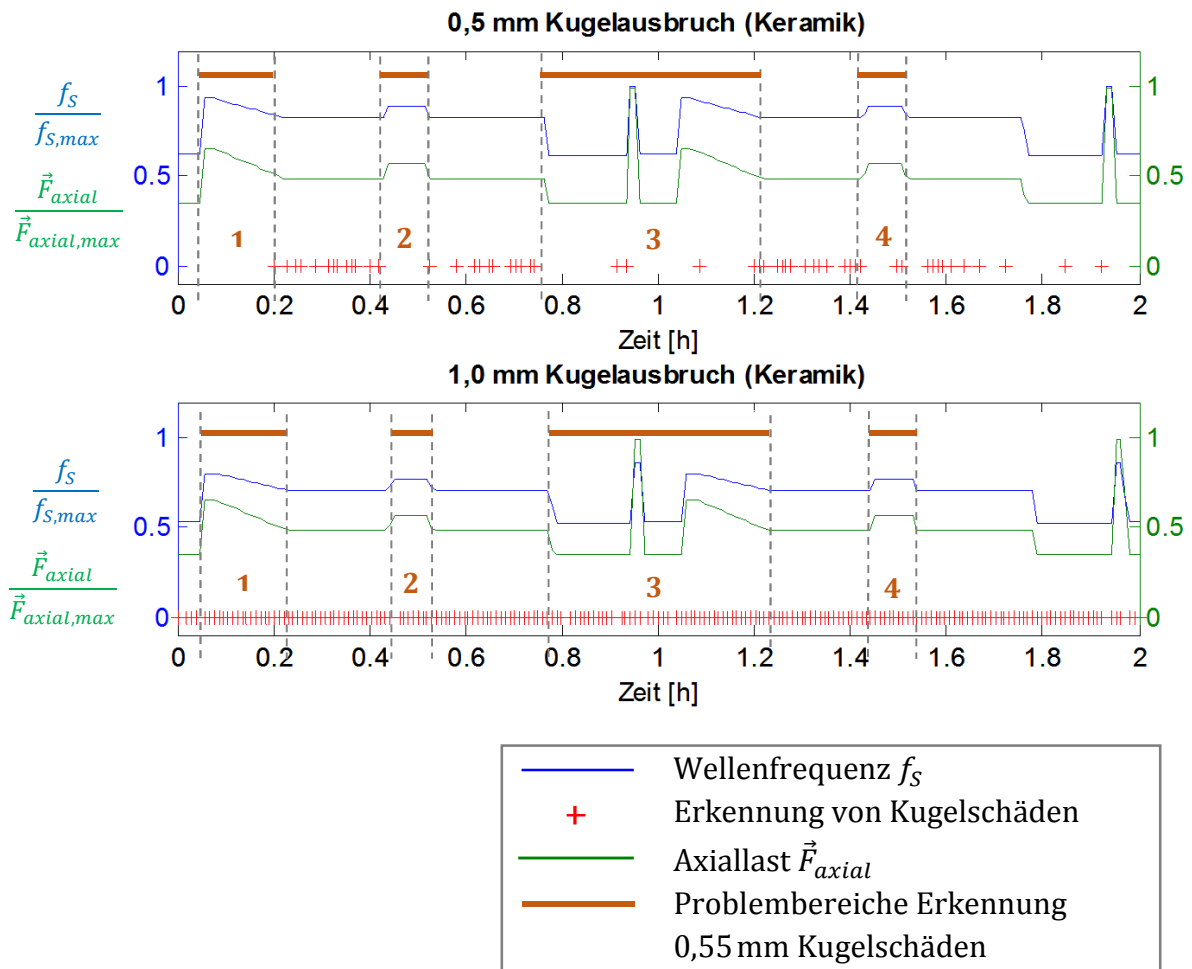


Abbildung 3.30: Bereiche nicht erkannter 0,55 mm Kugelschäden, im Vergleich zu erkannten 1,0 mm Kugelschäden (Keramikkugeln) während oder kurz nach Drehzahl- und Laständerungen.

Die Abbildung 3.30 zeigt eine Abhängigkeit der Erkennung von Kugelschäden von Schadensgrößen auf den Kugeln. In den Übergangszeiträumen ist bei kleinen Fehlern (0,5 mm Durchmesser) eine Erkennung der Merkmale eines Kugelfehlers in den Auswertebereichen im Spektrum nicht zuverlässig möglich. In der Anwendung am Triebwerk sollten deshalb die Zeiten während oder kurz nach Lastwechseln von einer Fehlererkennung am Lager ausgenommen werden, um die Gefahr von Falschaussagen zu vermeiden. Die Erkennung von Kugelschäden ist im Kapitel 5.3 beschrieben.

3.3.4.3 Streuung der β -Winkel der Kugelrotationsachsen

Es soll der Zusammenhang der β -Winkel der Kugelrotationsachsen mit den Käfigfrequenzen f_c gezeigt werden. Dazu werden zu gemessenen Käfigrotationsfrequenzen f_c die zugehörigen β -Winkel der Kugelrotationsachsen berechnet. Die Darstellung der Achswinkel β über den Käfigrotationsfrequenzen f_c verdeutlicht die Streuung der Messpunkte besser als die Darstellung der Kugelrotationsfrequenzen f_B über den Käfiggeschwindigkeiten. Verwendet werden Messdaten aus Versuchen mit einem Triebwerkshauptwellenlager auf dem Prüfstand AN 58 mit einem 2,2 mm Ausbruch aus der Oberfläche einer keramischen Kugel. Für die Messungen werden die Flugzyklen (siehe Abbildung 3.24) wiederholt bis zum Ausfall des Lagers durchfahren. Die Gruppen von Messdaten in der Abbildung 3.31 sind entsprechend den verschiedenen Flugphasen mit I bis VI (siehe Tabelle 3.3) gekennzeichnet.

Um eine Aussage der Streuung der β -Winkel über den zeitlichen Verlauf der Messungen zeigen zu können, sind die Messpunkte in den Farben von Blau bis Rot angegeben. Blau steht dabei für Messungen aus dem Beginn der Versuche und Rot für Messungen am Ende der Versuche. Dies ermöglicht es, die Abhängigkeit der Streuung der gerechneten Achswinkel von der fortschreitenden Schädigung der Lagerringe darzustellen. Zu erkennen ist, dass die Streuung der β -Winkel mit der Zunahme der Schädigung auf den Laufringen zunimmt. Die Streuung der β -Winkel ist zudem abhängig von den jeweiligen Abschnitten der Flugzyklen.

Neigungswinkel der Kugelrotationsachse - 2,2 mm Kugelvorschädigung - Hybridlager

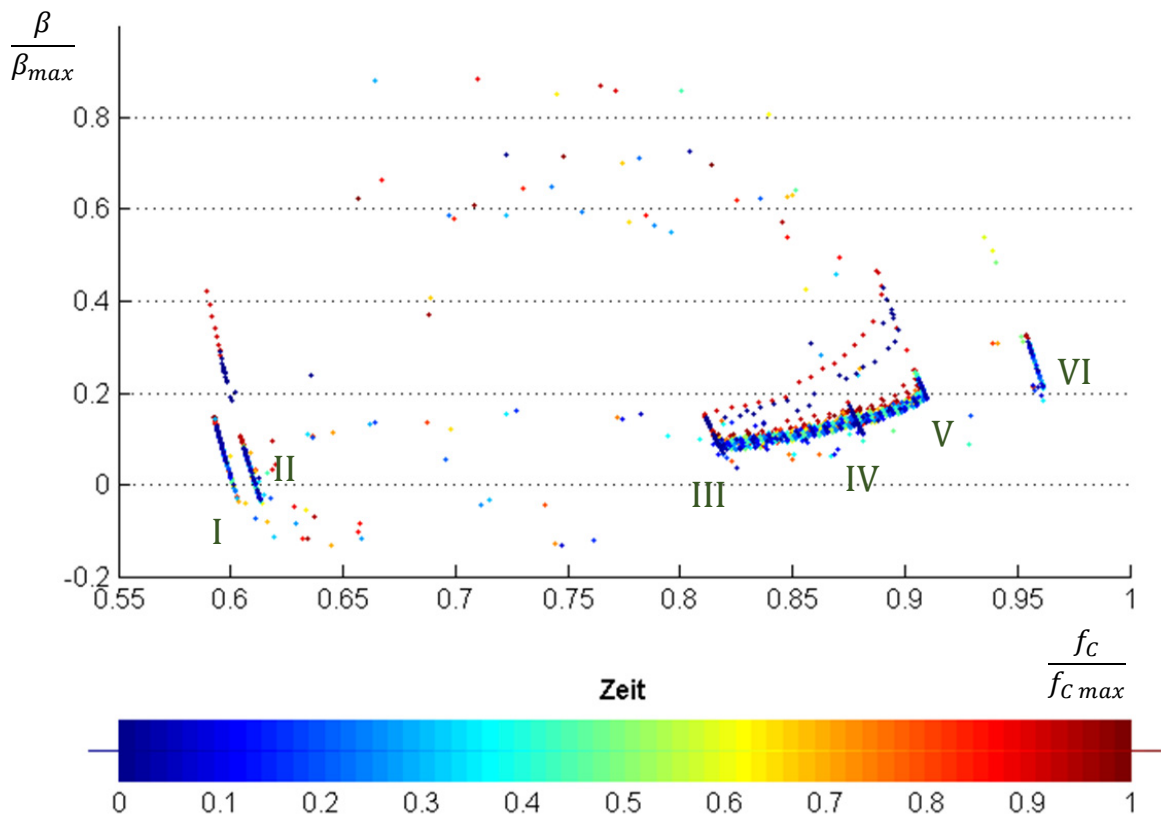


Abbildung 3.31: β -Winkel der Kugelrotationsachsen berechnet aus gemessenen Käfigfrequenzen f_c .

3.3.4.4 Abhängigkeit des Überrollverhaltens von Schadensgrößen auf den Kugeln

Durch Versuche soll geprüft werden, ob unterschiedliche Schadensgrößen auf keramischen Kugeln das Überrollverhalten über einen Kugelschaden beeinflussen. Es erfolgen vergleichend Versuche mit einem 0,55 mm und einem 2,2 mm Schaden auf keramischen Kugeln. Es werden Flugzyklen (siehe Abbildung 3.24) mit den verschiedenen Drehzahlen und Lasten bis zum Ausfall der Lager wiederholt durchfahren. Die blauen Farben kennzeichnen den Beginn, die roten Farben das Ende der Versuchsreihen. Die gemessenen Kugelüberrollfrequenzen f_B werden über den gemessenen Käfigrotationsfrequenzen f_C aufgetragen und die sich ergebenden Werte bei den unterschiedlichen Kugelschäden miteinander verglichen.

Zwischen dem Verlauf der Kugelrotationsfrequenzen f_B über den Käfigrotationsfrequenzen f_C bei einem Schaden von 0,55 mm im Durchmesser auf der Keramikugel (Abbildung 3.33) und einem Schaden von 2,2 mm (Abbildung 3.32) ist kein erkennbarer Unterschied vorhanden.

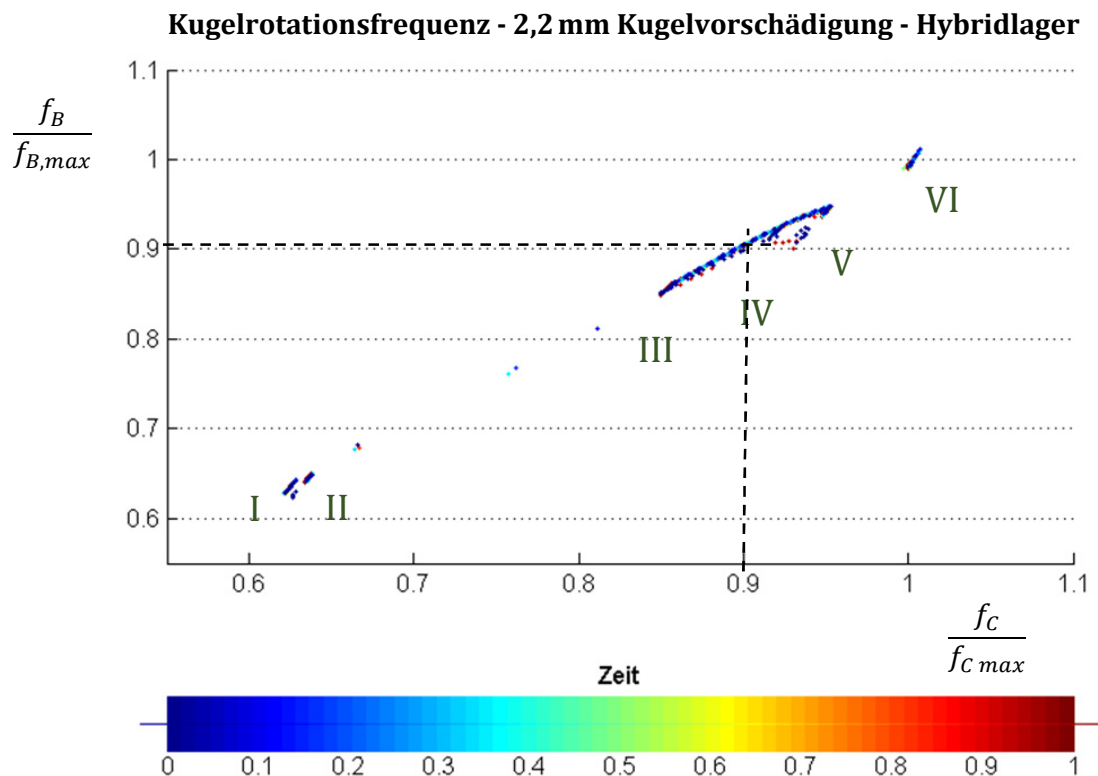


Abbildung 3.32: Kugelrotationsfrequenzen f_B über den Käfigrotationsfrequenzen f_C bei 2,2 mm Kugelschaden.

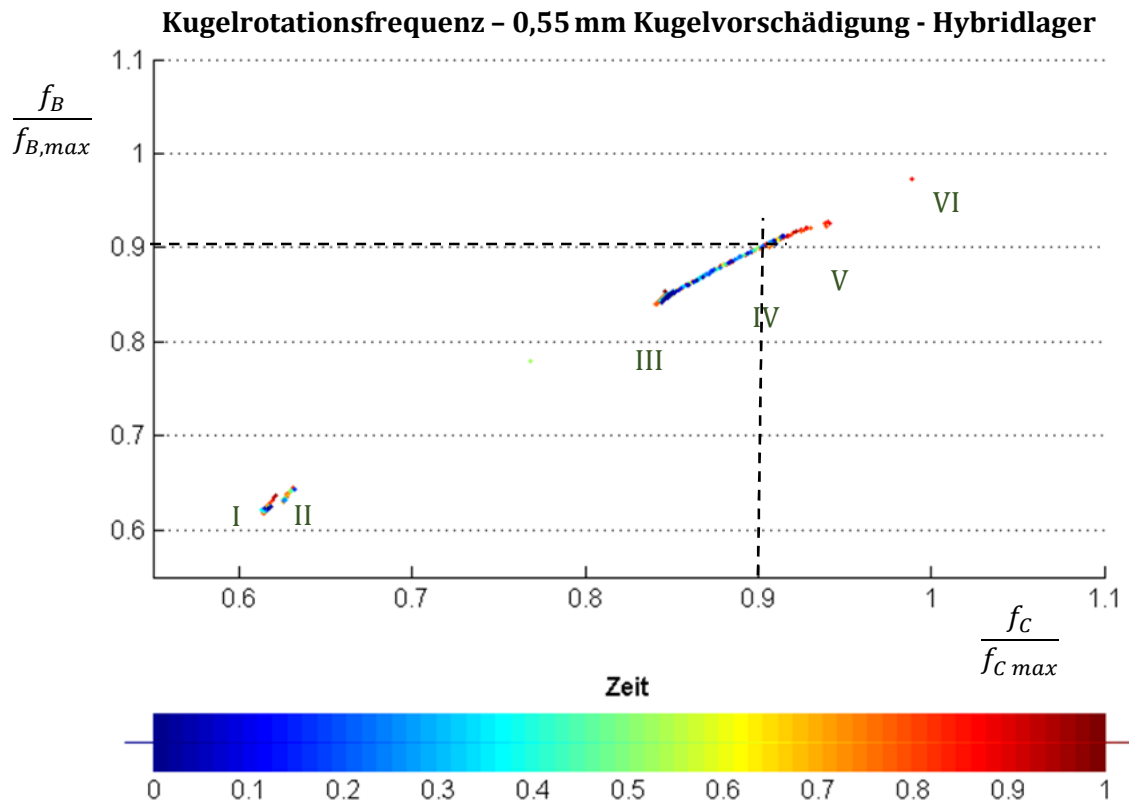


Abbildung 3.33: Kugelrotationsfrequenzen f_B über den Käfigrotationsfrequenzen f_C bei 0,55 mm Kugelschaden.

3.3.4.5 Zyklische Änderung der Kontaktwinkel beim Kugelumlauf

Der Kontaktwinkel der Kugeln hängt ab von dem Verhältnis der axialen zu der radialen Last. Durch das Einbringen einer externen radialen Last (Wellengewicht) auf das Lager verändern sich die Kontaktwinkel über dem Umfang am Außenring. Beim Durchlaufen der Kugeln durch die Lastzone eines Schrägkugellagers erfolgt eine zyklische Änderung der Kontaktwinkel. Aufgrund der veränderten Kontaktwinkel durch die vergrößerte radiale Kraft durchläuft die Kugel in der Lastzone einen längeren Weg. Beim Eintritt der Kugeln in die Lastzone des Lagers bremsen diese den Käfig. Nach dem Durchlauf der Kugeln durch die Lastzone des Lagers treiben die Kugeln den Käfig an. Aus der Summe der Einwirkungen der Kugeln auf den Käfig ergibt sich die Käfigfrequenz f_C .

Ein anderer Einfluss auf das zyklische Verhalten beim Umlauf ($2\pi r_m$) der Kugeln im Lager wird durch den Einfluss eines radialen Spiels („Lagerluft“) zwischen Innen- und Außenring hervorgerufen.

Durch beide Einflüsse ändert sich die Bahn, auf der die Kugeln zyklisch auf dem Außenring umlaufen. Diese zyklischen Einwirkungen auf die Kugeln werden bei den Betrachtungen in dieser Arbeit vernachlässigt, da diese bei dem geringen Gewicht der drehenden Teile des Versuchsaufbaus keinen großen Einfluss ausüben. Die Berücksichtigung dieser Einwirkungen wäre mit einem hohen Aufwand verbunden, dem kein Nutzen entgegensteht. In den Versuchen bewirken diese Einflüsse eine nicht

feststellbare „Verschmierung“ der Werte im Spektrum, die zur Bestimmung der Merkmale von Lagerschäden benötigt werden.

3.3.5 Einfluss γ -Winkel auf die Käfigrotationsfrequenz

Es werden Auffälligkeiten im Verhältnis der Kugel- zu den Käfigrotationsfrequenzen untersucht. Die Erwartung ist, dass sich diese beiden Größen bei Drehzahl- oder Laständerungen synchron zueinander verhalten. Beobachtet wird, dass dies nicht immer der Fall ist und in bestimmten Situationen die beiden Größen sich sogar gegensätzlich zueinander verändern können.

Durchgeführt wird ein Versuch, bei dem die Wellenfrequenz stufenweise variiert wird (siehe Abbildung 3.34). Innerhalb der markierten, schwarz gestrichelten Bereiche in der Abbildung 3.34 ist an dem Verlauf der Käfigrotationsfrequenz f_C gegenüber dem Verlauf der Kugelrotationsfrequenz f_B zu erkennen, dass diese Signale gegensätzlich verlaufen können. In der Vergrößerung der Diagramme rechts ist zu erkennen, dass beim ersten Abfall der Käfigrotationsfrequenz f_C (hellblaue Linie, oberes rechtes Bild) bei 720 s die Kugelrotationsfrequenz f_B (grüne Kreise, unteres rechtes Bild) ansteigt. Beim zweiten Abfall der Käfigrotationsfrequenz f_C (hellblaue Linie, oberes rechtes Bild) bei 760 s (hellblaue Linie, oberes rechtes Bild) sinken die Käfigrotationsfrequenz f_C und die Kugelrotationsfrequenz f_B gleichermaßen. Dies bedeutet, die Signale der Käfigrotationsfrequenz f_C und die Signale der Kugelrotationsfrequenz f_B können sich gegensätzlich zueinander verändern.

Die Kugelrotationsfrequenz f_B korreliert demnach nicht eindeutig mit der Käfigrotationsfrequenz f_C . Es gibt zwei Möglichkeiten für dieses Verhalten. Die erste Möglichkeit ist, dass die Kugel schlupft, die zweite Möglichkeit ist, dass die Kugel eine additive seitliche Rollkomponente enthält (siehe Abbildung 3.36 und Abbildung 3.35). Schlupf ist allerdings nicht mit den Messergebnissen in Einklang zu bringen, da die Kugelrotationsfrequenz f_B einmal höher und das andere Mal niedriger wird.

Es gibt somit Hinweise darauf, dass die Kugel nicht ausschließlich in der Umfangsrichtung rollt, sondern zusätzlich eine additive seitliche Rollkomponente hat. Harris [3] hält diese zusätzliche seitliche Rollkomponente für vernachlässigbar. In der Literatur wird von Hirano [25] die Abweichung der Orientierung der Kugelachse von der Orientierung der Lagerachse in Umfangsrichtung erwähnt. Kawakita [26] geht von einer Abweichung des Kugelachswinkels in Umfangsrichtung von bis über 30° aus. Die Untersuchung an einem gebrauchten Lagerkäfig (siehe Abbildung 3.36) gibt einen Hinweis darauf, dass es einen γ -Winkel der Kugelrotationsachse zu der Lagerachse gibt.

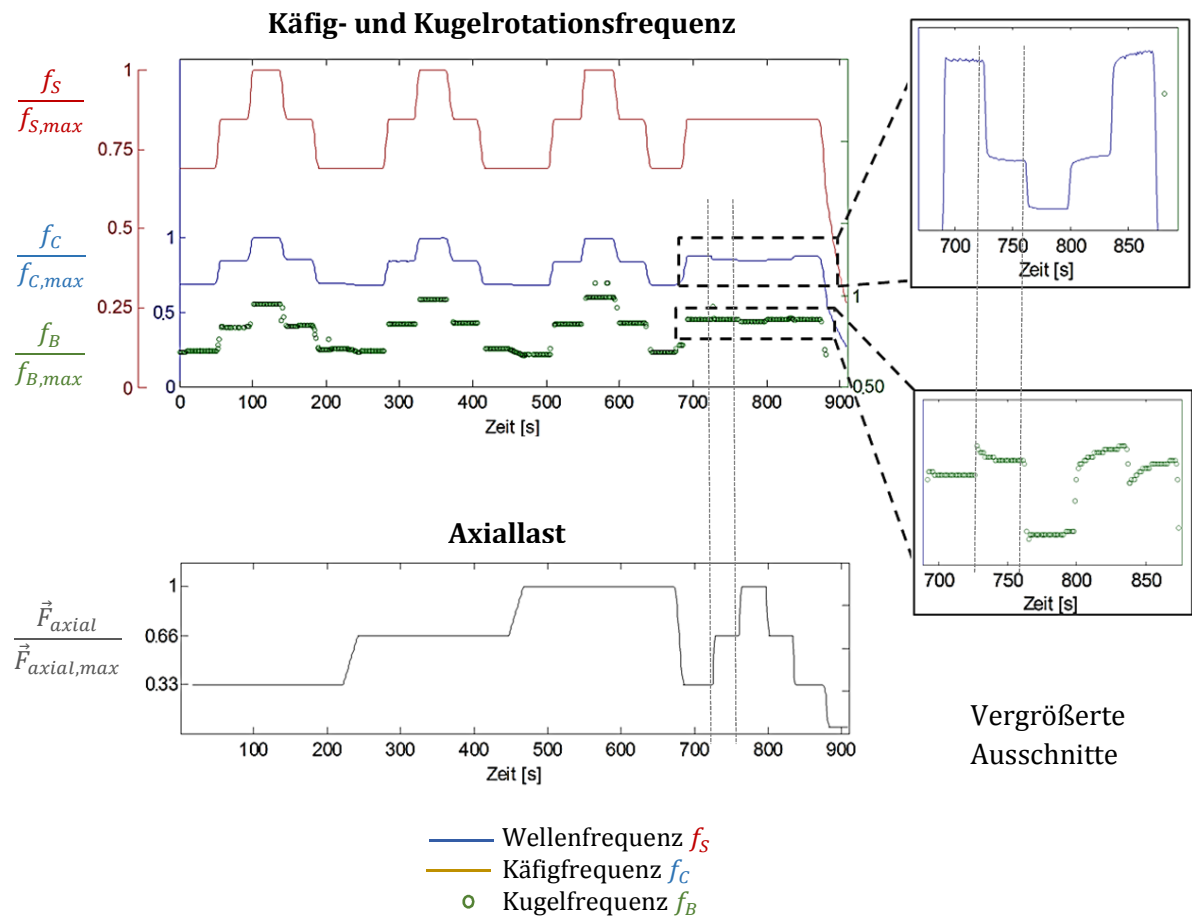


Abbildung 3.34: Gegensätzliche Änderungen der Kugelrotationsfrequenzen f_B im Verhältnis zu den Käfigrotationsfrequenzen f_c .

3.3.5.1 Beobachtung an Käfigen aus Triebwerks-Schräggugellagern

Die Messung eines γ -Winkels (Yaw) in einem laufenden Triebwerk ist gegenwärtig mit einem vertretbaren Aufwand nicht möglich. Um dennoch Hinweise auf die Ausrichtung der Kugelrotationsachse in einem Hauptwellen-Schräggugellager zu bekommen, werden gebrauchte, ausgebaute Triebwerkslager untersucht.

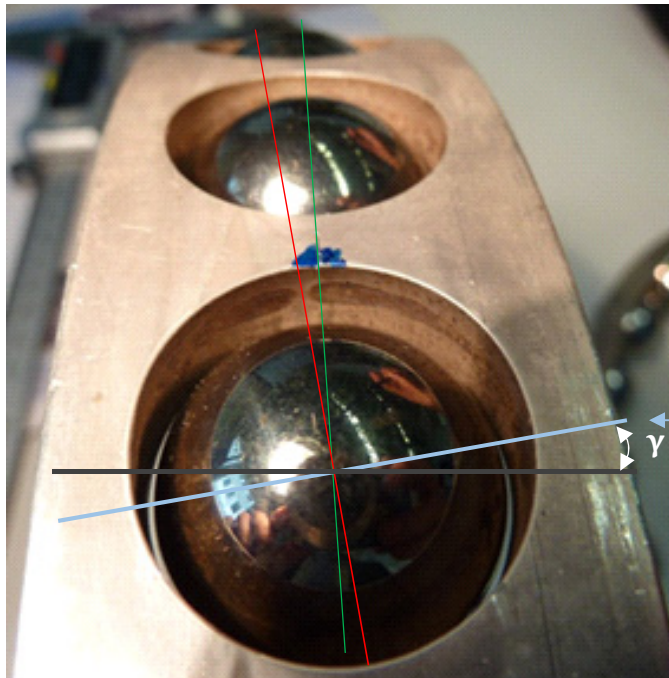
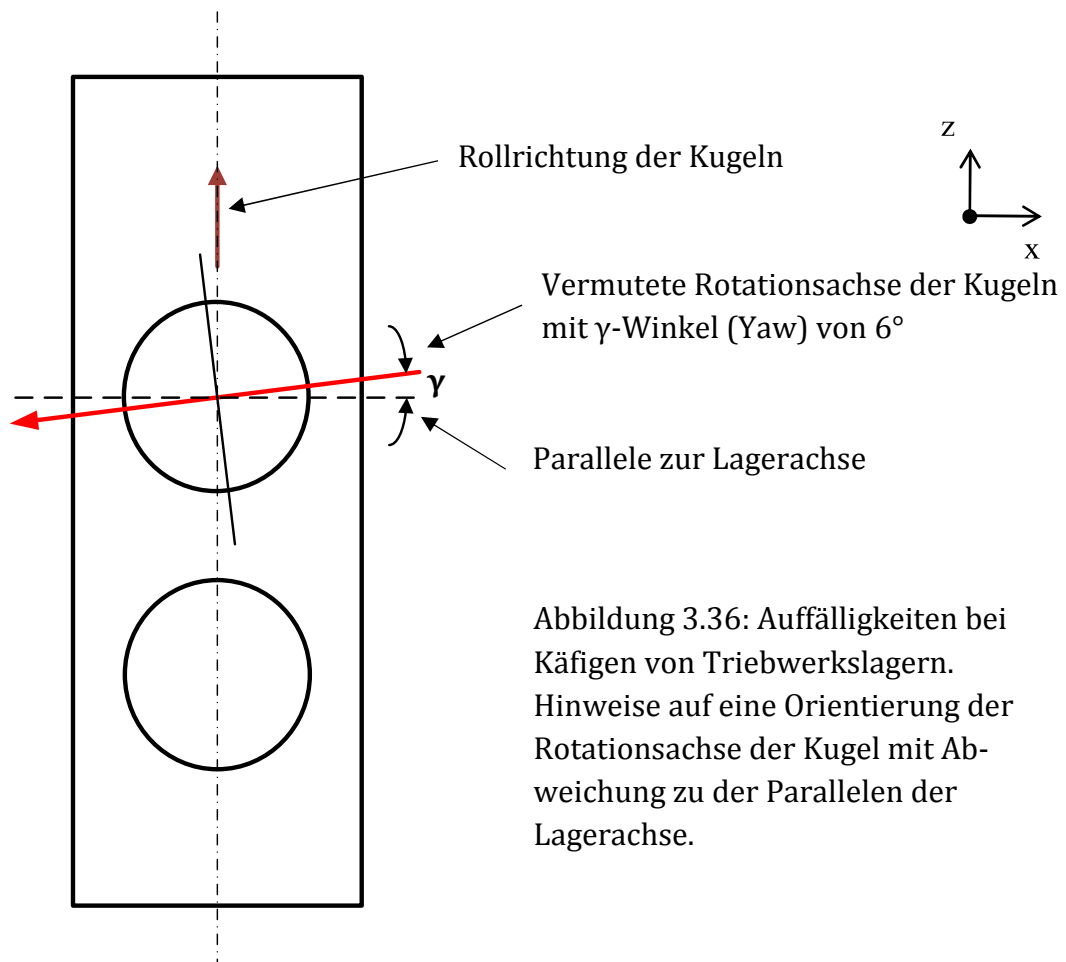


Abbildung 3.35: Lagerkäfig mit Verdrehung der Kugelrotationsachse bezogen auf die Drehrichtung des Käfigs.

Vermutete Lage der Kugelrotationsachse mit γ -Winkel (Yaw).

Das Lager mit dem in der Abbildung 3.35 gezeigten Käfig lief über eine längere Zeit in einem Flugzeugtriebwerk als Festlager eines Axialverdichters. Die Käfigtasche wird in der geometrischen Mitte gekennzeichnet. An den Innseiten der Käfigtaschen befinden sich regelmäßige, in allen Käfigtaschen sich wiederholende Verfärbungen. Verfärbungen mit vergleichbaren Strukturen werden bei mehreren gebrauchten Lagerkäfigen gefunden. Es wird davon ausgegangen, dass sich diese Verfärbungen durch chemische Reaktionen von Bestandteilen des Öls (siehe FAG [27]) mit der Beschichtung der Lagerkäfige bilden. Die Verfärbungen der Ablagerungen müssten vorwiegend bei den vorherrschenden Reisefluggeschwindigkeiten des Triebwerks entstanden sein.

Zu erwarten wären in der Laufrichtung der Kugeln symmetrische Verfärbungen (grüne Linie). Dazu würde eine Kugelrotationsachse gehören, die durch schwarze Linie dargestellt ist. Werden die sichtbaren Verfärbungen auf den Innenseiten der Käfigtasche mit einer Symmetrielinie versehen (rote Linie), liegt die zugehörige Kugelrotationsachse senkrecht zu der Symmetrie der Verfärbungen (hellblaue Linie). Es ergibt sich ein γ -Winkel (Yaw) von ca. 6° als Abweichung der Orientierung der Kugelrotationsachse zur Lagerachse.



3.4 Häufigkeit einer Schadüberrollung bei Kugelschäden

Die stabile Überrollung eines Schadens auf der Kugel ermöglicht die messtechnische Erfassung der Kugelrotationsfrequenz f_B . Die Häufigkeit der Überrollung eines Lagerschadens ist ein entscheidender Parameter für die Fortschrittsgeschwindigkeit des Schadens. Die Überrollraten über Kugelschäden sind von grundsätzlicher Bedeutung für Folgeschäden auf den Lagerlaufflächen und damit für die verbleibende Restlaufzeit der Lager nach dem Eintritt von Kugelschäden. Bei Hybridlagern ist die Überrollhäufigkeit eines Schadens auf der keramischen Kugel maßgeblich für die verbleibende Lebensdauer des Lagers, da die defekte Kugel die stählernen Laufflächen des Lagers in kurzer Zeit schädigen kann. Eine hohe Überrollrate eines Schadens bewirkt eine hohe Geschwindigkeit bei der Schadenszunahme auf den Laufflächen. Daher ist es sinnvoll, die Überrollhäufigkeit über einen Kugelschaden messtechnisch zu erfassen.

3.4.1 Stabilisierung der Schadüberrollung auf der Kugel

Es gibt Hinweise darauf, dass ein Kugelausbruch eine fortlaufende Schadüberrollung unterstützt. Der erhöhte „Grip“ der Kugeloberfläche im Schadbereich könnte die Ausbildung einer Vorzugs-Rotationsachse der Kugeln begünstigen.

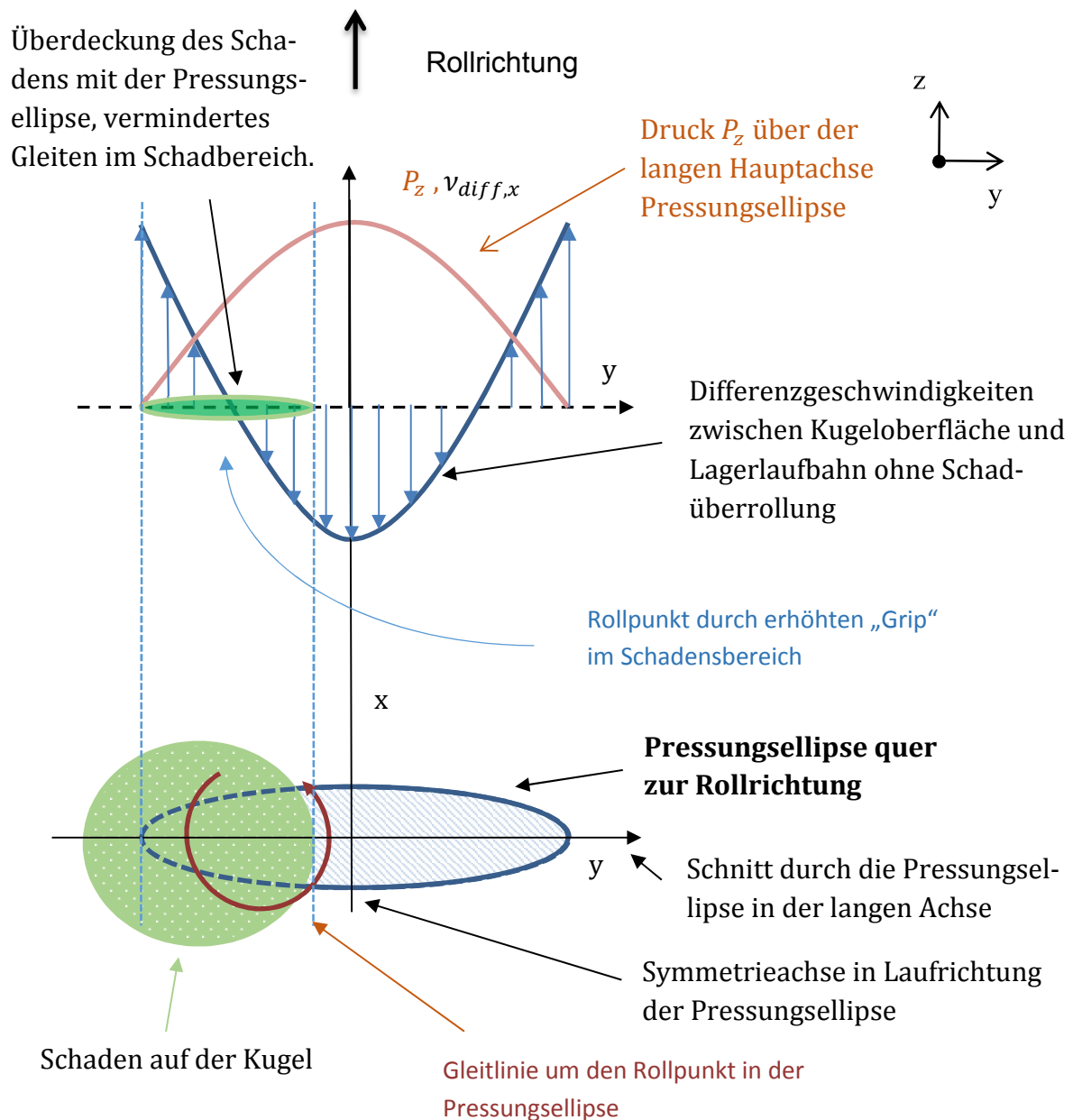


Abbildung 3.37: Möglicher Mechanismus für stabile Überrollung eines Kugelschadens.

In der Abbildung 3.37 wird ein möglicher Mechanismus für eine stabile Überrollung eines Kugelschadens im Schrägkugellager vorgestellt. Dieser Mechanismus könnte eine fortlaufende, zyklische Überrollung eines Schadens auf einer Kugel erklären. Ein Ablauf für das beobachtete Verhalten könnte eine angenommene Überrollung des Schadens auf der Kugel am Rande der Pressungsellipse in Abbildung 3.37 sein. Die Kante des Schadens auf der keramischen Kugel dringt in die Laufbahn ein und erschwert somit das Gleiten der Oberflächen der Kugel über der Lauffläche der Lager- ringe. Dies kann ein Drehmoment um den geschädigten Bereich auf der Kugel bewirken. Die einsetzende Drehung um den Schadbereich bringt den Massenmittelpunkt der Kugel hinter den Schaden auf der Kugel. Dieser Vorgang wiederholt sich bei jeder Überrollung. Dies kann dazu führen, dass sich das Überrollverhalten über die Schad-

stelle gewissermaßen stabilisiert. Die Reibung während dieses Vorganges bewirkt eine Dämpfung und verhindert so ein Überspringen.

Zur Untersuchung dieser Annahme werden auf einem Kleinlagerprüfstand (siehe Kapitel 2.3) einfache Versuche durchgeführt. Dabei wird jeweils im stillstehenden Schrägkugellager die Orientierung des Schadens auf einer Kugel mehrfach manuell geändert. Es wird überprüft, ob sich nach dem Einschalten des Prüfstandes die Schadstelle auf der Kugel ohne äußere Einwirkung in die überrollte Bahn auf der Kugel begibt und sich die Überrollung der Schadstelle stabilisiert.

Im Ergebnis der Versuchsreihe ergibt sich wiederholt eine permanente Überrollung des Ausbruchs auf der Kugel. Die Überrollung der Schadstelle ist deutlich über eine verstärkte, akustische Wiedergabe des Signals des elektrodynamischen Sensors SG_4 (Abbildung 2.5) über einen Lautsprecher zu hören. Die Schadüberrollung tritt wiederholt jeweils einige Sekunden nach dem Einschalten des Prüfstandes vor dem Erreichen der Nenndrehzahl auf. In langen Abschnitten der Versuchsreihen kommt es zu einer nahezu hundertprozentigen Überrollung von Schäden auf keramischen Kugeln. Ein finaler Beweis der Zusammenhänge bei der Stabilisierung der Schadüberrollung ist gegenwärtig nicht möglich.

In der Laufringkontrolltheorie wird beschrieben, dass bei niedrigen Drehzahlen die Innenringkontrolle (Abbildung 3.14) und bei höheren Drehzahlen die Außenringkontrolle (Abbildung 3.12) vorherrscht. Es muss ein Übergangsbereich zwischen diesen beiden Betrachtungen existieren. Bei Kawamura [7] wird festgestellt, dass eine Kugel bis zur Drehzahl von 2000 min^{-1} keine finale Stabilität der Kugelrotationsachse aufweist. Es ist in der Abbildung 3.5 bei diesen Drehzahlen keine klare gerade Linie auf der Kugel zu erkennen, welche eine stabile Lage der Kugelrotationsachse anzeigen würde. Dies bedeutet, dass verschiedene Bereiche der Kugeloberfläche in Kontakt mit den Laufflächen kommen können. Somit wird auch ein geschädigter Teil der Kugeloberfläche in Kontakt mit den Lagerlaufflächen kommen.

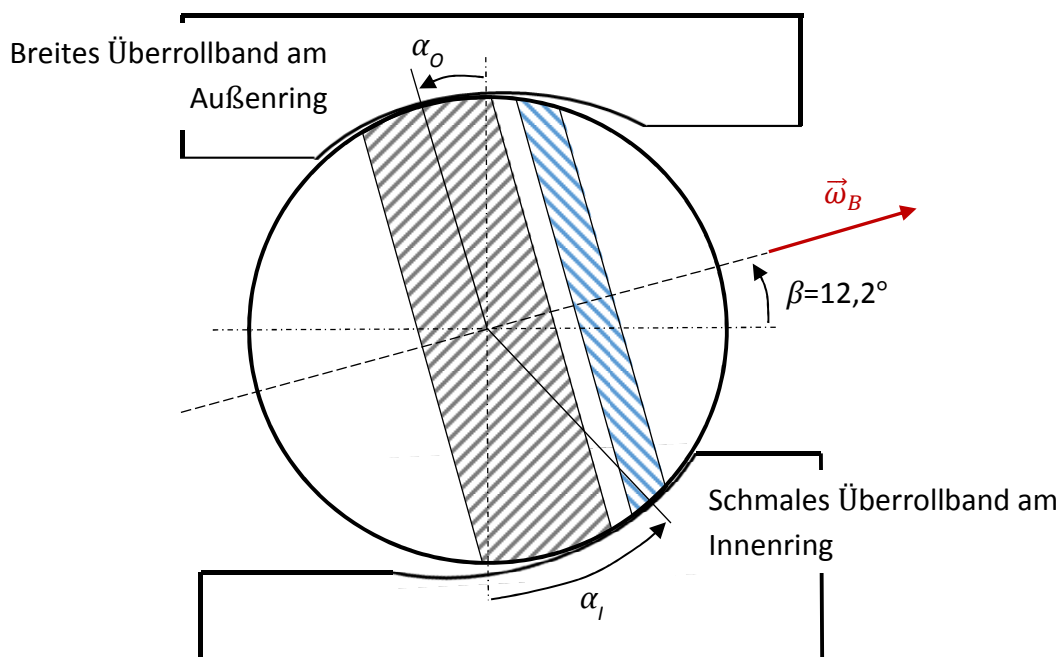
3.4.2 Überrollbänder am Schrägkugellager

Die theoretische Überrollhäufigkeit eines Schadens ist abhängig von der Größe des Schadens in Relation zu dem Gebiet der Hertzschen Pressung im Kontaktbereich (siehe Kapitel 3.1.1). Bei geringeren Drehzahlen können sich die Überrollbänder noch überlappen, dies ist der Fall bei den Versuchen auf dem Kleinlagerprüfstand MGG 12. Bei Versuchen auf dem Prüfstand AN 58 ergeben sich bei höheren Drehzahlen auf den Kugeln, jeweils auf der inneren und der äußeren Laufbahn, zwei völlig getrennte Überrollbänder der beiden Pressungsellipsen (siehe Abbildung 3.38). Dabei ist eine nahezu parallele Ausrichtung der Orientierung der Kugelrotationsachse in Relation zur Lagerachse mit einem kleinen β -Winkel gegeben (siehe Abbildung 3.31).

Bei geringer werdenden Drehzahlen nähern sich die Überrollbänder einander an und überlappen sich dann. Bei sehr geringen Drehzahlen liegen die Überrollbänder übereinander. Wie in Abbildung 3.38 zu erkennen ist, ergeben sich zwei unterschiedlich breite Überrollzonen (siehe Kapitel 3.1.1). Das äußere Überrollband ist aufgrund der besseren Schmiegunz zu dem Laufring im Außenkontakt der Kugel und der Wirkung

der Fliehkraft wesentlich breiter. Die breitere Zone, die den Kontakt der Kugel mit dem Außenring beschreibt ergibt rein aufgrund der geometrischen Größe eine höhere Wahrscheinlichkeit der Überrollung auf dieser Spur. Grundsätzlich könnte ein Defekt auf einer Kugel in der Abfolge am Innen- und am Außenring überrollt werden, was dann im Signal eines Sensors zur Verdopplung der Frequenz bei einer Kugelumdrehung führen würde. Eine Überrollung eines Schadens alternativ am Innen- oder am Außenring führt dagegen zur Abbildung der Rotationsfrequenz der Kugel am messenden Sensor. Ist bei konstanten Bedingungen eine konstante Frequenz der Kugelüberrollung messbar, kann von einer stabilen Achslage der Kugel im Lager ausgegangen werden.

In der Abbildung 3.38 sind die Überrollbänder für ein reales Beispiel in den Verhältnissen korrekt wiedergegeben. Die Berechnung der Überrollbänder erfolgt nach den Beziehungen der Gleichung (3.1) und der Gleichung (3.2) im Kapitel 3.1.1. Das breitere Band gibt den Kontakt zum Außenring wieder, das schmalere Band zeigt den Kontaktstreifen zum Innenring.



Winkel Außenringkontakt:	$\alpha_o = 10,5^\circ$
Gr. Halbachse Kontaktellipse:	$a_o = 4,038 \text{ mm}$
Winkel Innenringkontakt:	$\alpha_i = 47,8^\circ$
Kl. Halbachse Kontaktellipse:	$a_i = 2,77 \text{ mm}$

Abbildung 3.38: Beispiel zum Verhältnis von Überrollbändern auf einer Kugel.

3.4.3 Messungen zu Überrollraten bei Kugelschäden

Es finden Versuche mit Hybridlagern zur Erfassung der Überrollhäufigkeit von Kugelschäden auf dem Prüfstand AN 58 statt. Für die Versuche werden Lager von Triebwerkshauptwellen verwendet. Es werden wiederholt Flugzyklen (siehe 3.3.2) durchgeführt. Die messtechnischen Erfassungen der Schadüberrollungen erfolgen am Außenring der Lager mit Piezoelementen des Typs PIC 255 (siehe Anhang 7.10). Die Kugeln werden mit einem Laser an den Oberflächen mit künstlichen Fehlstellen von 0,55 mm und 2,2 mm Durchmesser geschädigt. Die künstlichen Fehlstellen in den Keramikugeln weisen eine Tiefe von ca. 0,2 mm auf. Diese Größenordnung von Fehlstellen auf keramischen Kugeln können auch bei realen Ausbrüchen, unter hohen Lasten, beobachtet werden (siehe Abbildung 4.9).

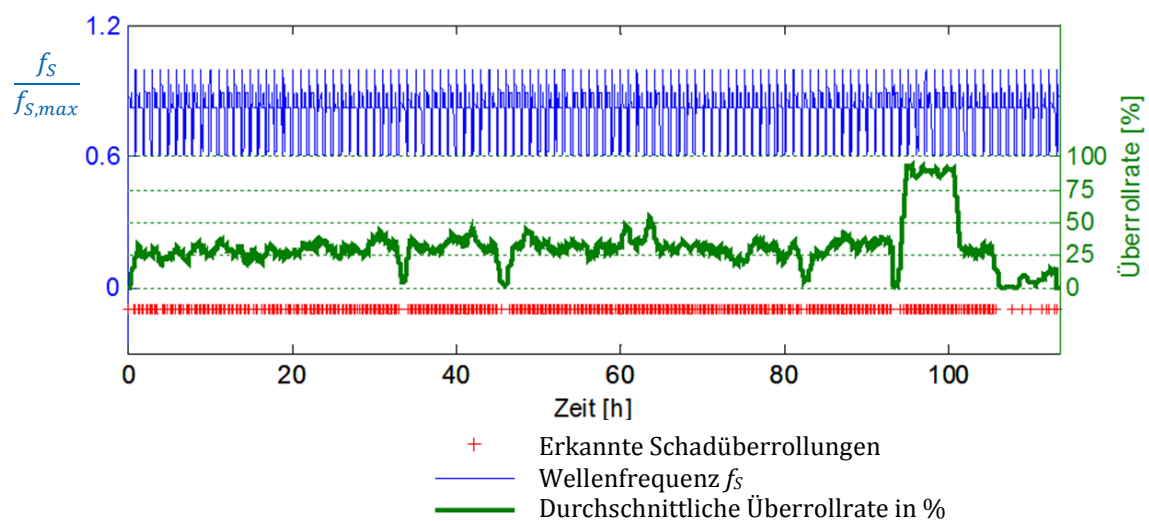


Abbildung 3.39: Erkannte Überrollungen eines Kugelschadens bei einer Schadgröße von 0,5 mm auf einer keramischen Kugel.

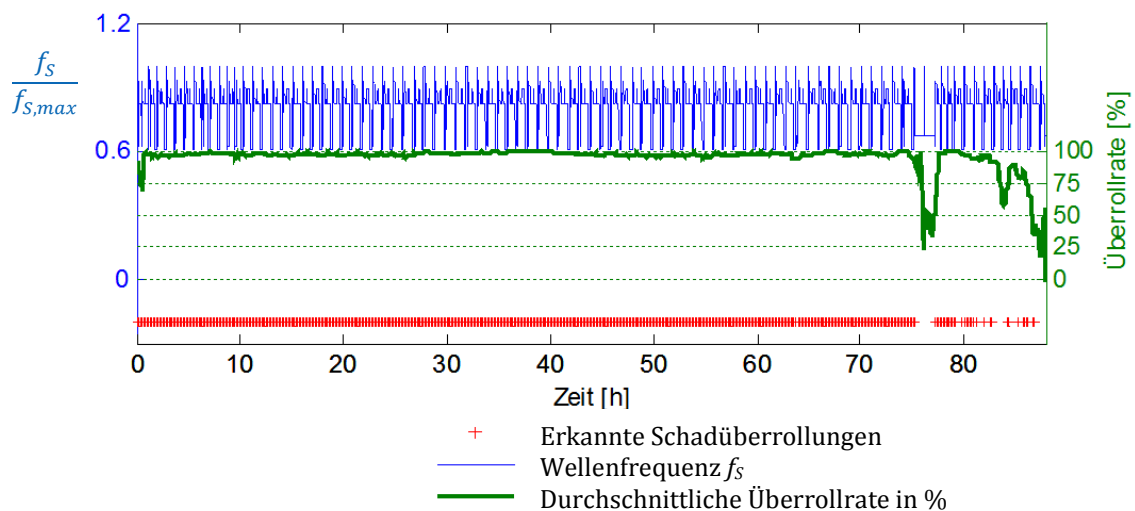


Abbildung 3.40: Erkannte Überrollungen eines Kugelschadens bei einer Schadgröße von 2,2 mm auf einer keramischen Kugel.

In den Messungen wird gezeigt, dass es zu abschnittswise stabilen Überrollungen eines Schadens auf den Kugeln kommen kann. In der Abbildung 3.39 bis zur Abbildung 3.41 sind erkannte Schadüberrollungen auf Kugeloberflächen durch rote „Plus“-Zeichen dargestellt. Zur Darstellung der durchschnittlich erkannten Überrollraten werden grüne Linien verwendet. Diese zeigen den Gleitenden Mittelwert der erkannten Überrollungen für 100 aufeinanderfolgende Kugelrotationen an.

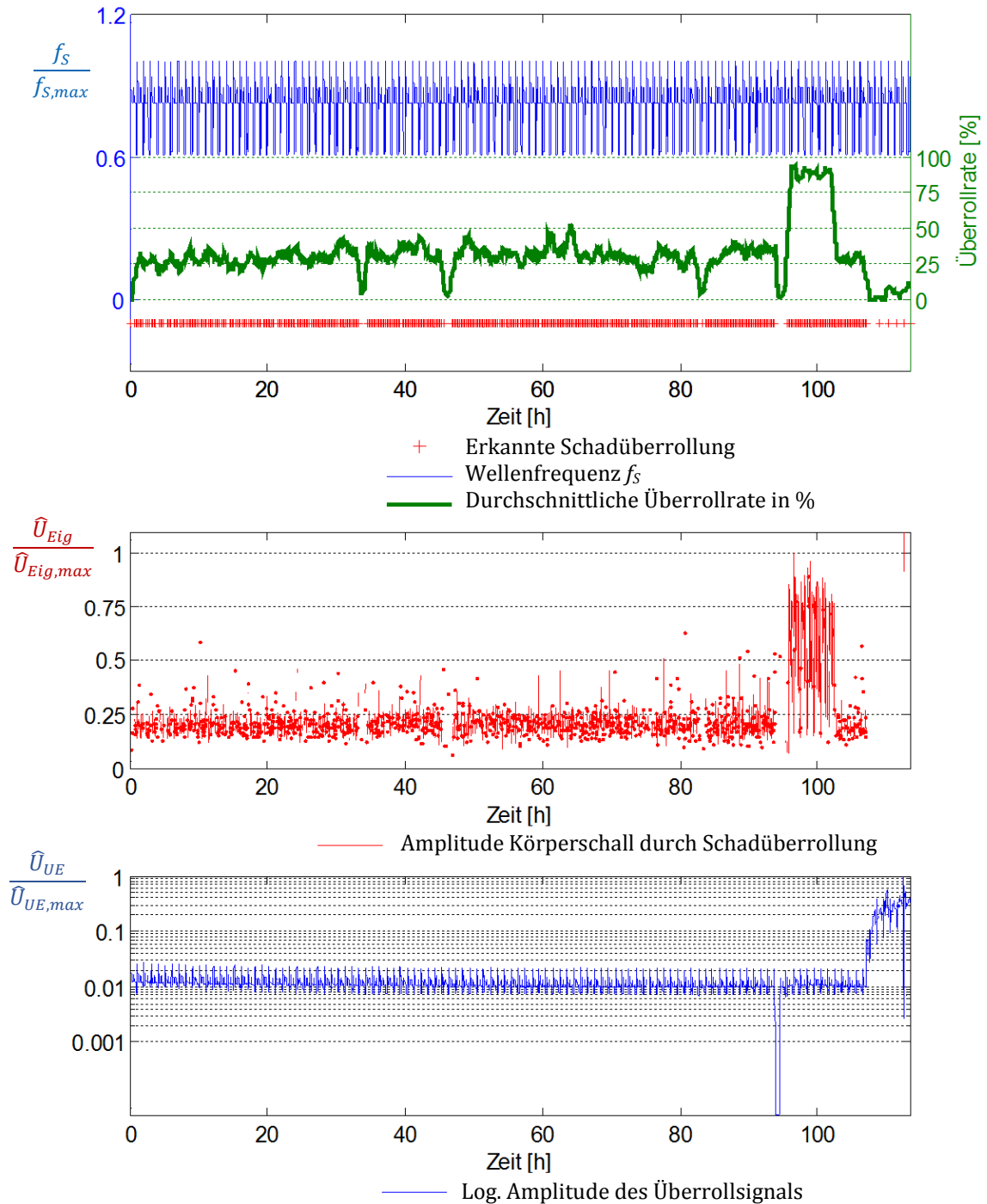


Abbildung 3.41: Amplituden des Überrollsignals $\hat{U}_{UE}$ (Bild unten) und des Schadsignals $\hat{U}_{Eig}$ (Bild Mitte) bei einem 0,5 mm Kugelschaden.

Die Abbildung 3.41 zeigt die Überrollung eines 0,5 mm Schadens auf einer keramischen Kugel. Im oberen Diagramm zeigt die blaue Kurve sich wiederholende Standard-Flugzyklen. Die erkannten Überrollungen des Kugelschadens sind durch rote Kreuze dargestellt. Die dunkelgrüne Kurve stellt den Mittelwert der erkannten Schadüberrollungen über 100 Messpunkte dar. Der Bezugspunkt bei der Prozentangabe bildet die theoretische Maximalanzahl von möglichen Schadüberrollungen auf der Kugeloberfläche.

In dem mittleren Diagramm ist in Rot der Amplitudenverlauf des hochpassgefilterten Schadsignals dargestellt. Es werden in der Darstellung Mittelwerte über 1 Sekunde gebildet. Eine deutliche Erhöhung des bei der Schadüberrollung auf der Kugeloberfläche erzeugten Körperschalls ist nach etwa 95 Stunden zu erkennen. Nach ca. 120 Stunden ist der Schadensfortschritt auf den Laufringen so weit fortgeschritten, dass eine Erkennung des Körperschalls nicht mehr möglich ist.

Im unteren Diagramm der Abbildung 3.41 sind mit der blauen Kurve die Amplituden dargestellt, die bei der Überrollung der Sensorposition im Lastbereich entstehen. Es wurde eine logarithmische Darstellung gewählt. Bei den Messpunkten wird der Mittelwert über 1 Sekunde gebildet. Zu erkennen ist, dass die exponentiell aufgetragene Überrollamplitude ab der ca. 110 Stunde im Versuch sehr stark ansteigt. Dies lässt darauf schließen, dass die Schädigung auf den Lagerlauflächen ein kritisches Maß erreicht hat und die Kugeln beim Durchlaufen der geschädigten Lauflächen sehr starke Beschleunigungen erfahren. Die hohen Beschleunigungen am Ende des Versuches führen zur Abschaltung des Prüfstandes in der 114 Stunde.

Die bei der Auswertung verwendeten Methoden sind im Kapitel 5.2 beschrieben.

Die Schädigung auf den Laufringen ist so weit fortgeschritten, dass Überrollung der Schäden zu hohen Amplituden führt. In diesem Zeitabschnitt sind die auf die Kugel einwirkenden Erschütterungen so hoch, dass eine Erkennung der Überrollung der Schadstelle auf der Kugel nicht mehr möglich ist (siehe oberes Diagramm in der Abbildung 3.41).

Untersuchungen der geschädigten Laufringe nach dem Test ergeben, dass Schädigungen auf Bereichen der Laufbahnen vorhanden sind, die durch die Kugelkontakte im Versuch bei den durchlaufenen Kontaktwinkeln nicht erreicht werden konnten. Die Vermutung ist, dass die massiven Schäden zum Ende des Versuches auf den Lauflächen bei der Überrollung durch die Kugeln starke Vibrationen verursachen und es dadurch axiale Bewegungen der geschädigten Kugel im Lager gibt. Dadurch kann es zu Schäden in Bereichen der Lauflächen kommen, die bei den vorhandenen Druckwinkeln sonst nicht erreicht werden könnten.

3.5 Ergebnisse zum Verhalten von Schrägkugellagern

In dieser Arbeit wird nachgewiesen, dass sich bei schnelllaufenden Schrägkugellagern die Kugelrotationsachsen weitgehend stabil beim Umlauf im Lager verhalten. Diesbezügliche Ergebnisse von Kawamura [7] werden bestätigt. Annahmen, eine leichte Exzentrizität der Kugeln würde ausreichen, um Kugelrotationsfrequenzen ungeschädigter Kugeln bestimmen zu können, werden in dieser Arbeit nicht bestätigt. Die Mes-

sung von Kugelrotationsfrequenzen ist nach den Ergebnissen dieser Arbeit nur bei geschädigten Kugeln bei der Überrollung eines Kugelschadens möglich. Basierend auf den in dieser Arbeit gemessenen Abweichungen der Kugelrotationsfrequenzen von den Berechnungen stellt die Laufring-Kontrolltheorie nach Jones [2] keine befriedigenden Ergebnisse bereit, um Merkmale von Lagerfehlern im Frequenzspektrum sicher bestimmen zu können. Es kann gezeigt werden, dass die Verwendung gemessener Käfigfrequenzen die Berechnung von Schadüberrollfrequenzen in Schrägkugellagern wesentlich verbessert. Damit ist in ausreichender Genauigkeit die Bestimmung einer oberen und unteren Frequenz möglich, um typische Merkmale von Fehlern im Spektrum der Hüllkurven der angeregten Eigenschwingungen maskieren zu können. Es wird gezeigt, dass an Triebwerkshauptwellenlagern eine Messung der Käfigfrequenzen mit einfachen Piezoelementen auf den stillstehenden Lagerringen möglich ist. Für hohe Drehzahlen wird gezeigt, dass die Annahme eines β -Winkels $= 0$ die beste Annäherung an gemessene Kugelrotationsfrequenzen ermöglicht.

Bei einem Triebwerks-Hauptwellenlager kann ein Ausbruch von 0,55 mm Durchmesser auf der Kugeloberfläche sicher erkannt werden. Es wird nachgewiesen, dass sich Kugelschäden bis zu einer Größe von 2,2 mm Durchmesser und 0,2 mm Tiefe nicht aus der Überrollbahn auf der Kugel herausdrehen. Dies stimmt mit Ergebnissen von Kawamura [7] überein. Kawamura zeigt, dass sich Kugelschäden erst ab einer bestimmten Größe aus der Überrollbahn auf der Kugel herausdrehen. Messungen in dieser Arbeit zeigen, dass es zu stabilen Überrollungen einer Fehlstelle auf einer Kugel kommen kann (siehe Kapitel 3.4). Es wird gezeigt, dass Messungen und Auswertungen von Signalen zur Bestimmung von Lagerfehlern in Bereichen von Last-, Drehzahl- oder Temperaturänderungen vermieden werden sollten.

4 Schadensfortschritt und Erkennbarkeit

In den Kapiteln 4.1 und 4.2 werden Lagerschäden und der Schadensfortschritt von Lagerkomponenten sowie die Interaktion geschädigter Lagerkomponenten behandelt. Der Abschnitt 4.3 befasst sich mit Methoden zur Abschätzung der verbleibenden Lebenszeit nach der Erkennung eines Schadens bis zum endgültigen Ausfall eines Lagers. Die verbleibende Zeit ist für Luftfahrtanwendungen eine wichtige Größe, deshalb ist eine möglichst frühe Erkennung eines Schadens von grundsätzlicher Bedeutung. Das Schadensausmaß soll begrenzt bleiben, um die Kosten der Instandsetzung niedrig halten zu können. Eine geschätzte verfügbare Restlaufzeit nach einer Schadenserkennung sollte ausreichend sein, um Reparaturmaßnahmen geplant durchführen zu können, damit ein kostengünstiger Betrieb unterstützt werden kann. Forderungen zu einer frühen Fehleraussage bestehen auch in der Unterstützung erweiterter Operationsbedingungen (ETOPS). Schadprozesse und die physikalischen Zusammenhänge der Degradierung an betroffenen Komponenten müssen verstanden werden.

Das Bruch- und Verschleißverhalten hybrider Schrägkugellager ist bisher nur unzureichend untersucht worden. Von besonderer Wichtigkeit ist die Interaktion geschädigter Keramikwälzkörper mit den stählernen Laufringen.

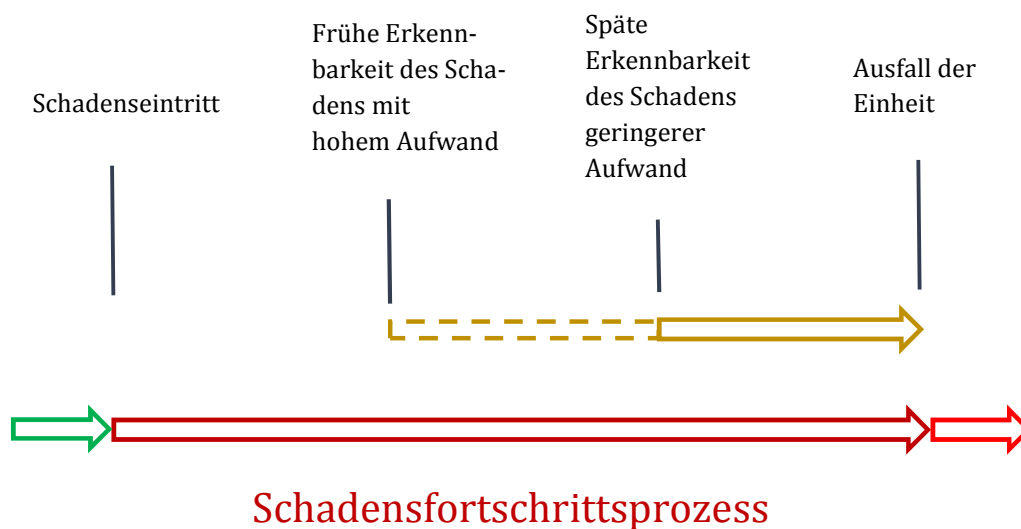


Abbildung 4.1: Schadensfortschritt und Erkennbarkeit eines Schadens.

Mit der Kenntnis der Lagerlasten (siehe Kapitel 4.4) kann auf den Schub eines Triebwerks und die Geschwindigkeit der Degradierung von Triebwerkskomponenten geschlossen werden. Durch die Schätzung der Schadensgröße auf einer keramischen Kugel, aus den Sensorsignalen, kann auf eine mögliche Gesamtdauer der verbleibenden Lagerlaufzeit geschlossen werden (siehe Kapitel 4.5).

Bei Strahltriebwerken gibt es einen engen Zusammenhang zwischen Drehzahlen, Betriebsbedingungen und axialen Lasten auf den Triebwerkshauptwellen. Abweichun-

gen dieser Zusammenhänge weisen auf eine Degradierung von Komponenten des Verdichters, der Turbinen oder der Luftschraube des Niederdrucksystems hin. Es wird davon ausgegangen, dass am Lager auftretende Nominallasten nicht zu plastischen Verformungen und damit zu Schäden führen. Dagegen können überhöhte Lasten zu plastischen Verformungen und damit zu Schäden am Lager führen.

Zur Bestimmung der verbleibenden Lebenszeit nach dem Eintritt eines Schadens ist es notwendig, zuverlässige, robuste Indikatoren für den jeweiligen Schadensfortschritt zu identifizieren und die geeignetste Messtechnik zu etablieren.

Die in einem zeitlichen Ablauf aufeinander folgenden Schadstufen (siehe Abbildung 4.1) sind je nach Art der Schädigung mit unterschiedlichen Messtechniken erkennbar. Abhängig vom Schädigungsgrad verbleiben nach der Erkennung eines Schadens unterschiedlich lange Zeiten bis zum Ausfall des Lagers. Eine Festlegung, ab welchem Verhalten ein Lager als schadhaft angesehen wird, sollte von Experten für die jeweilige Anwendung getroffen werden. Von dem Zeitpunkt des Eintretens einer Schädigung bis zur möglichen messtechnischen Erkennung eines Schadens kann ein unbestimmter Zeitraum liegen. Meist ist die frühe Erkennung eines Schadens mit einem höheren messtechnischen Aufwand verbunden. Die frühesten eindeutig erkennbaren Merkmale im Schadprozess sind zu untersuchen. Auf dieses Ziel ausgerichtet sollen geeignete Sensoren und Auswerteverfahren definiert und erprobt werden. Es wird einen späten Zeitpunkt im Schadensfortschritt geben, zu dem ein Schaden mit meist einfachen messtechnischen Mitteln erkannt werden kann.

4.1 Schäden auf keramischen Kugeln

Nahezu alle Schäden auf keramischen Kugeln beginnen mit einer Rissbildung in der keramischen Struktur. Hohe Scher- oder Schubspannungen (Hadfield [28]) auf der keramischen Kugeloberfläche führen zur potentiellen Bildung von Rissen in der Keramik. Risse wachsen bevorzugt entlang der Stresslinien an Einschlüssen und Inhomogenitäten im Kristallgitter. Die Inhomogenitäten liegen in der Struktur der Keramik der Kugeln. Eine Besonderheit bei Keramiken ist, dass es zu einem sogenannten Gitterversatz der kristallinen Struktur im Aufbau der Keramik kommen kann, Kleber [29]. Dies ist kein eigentlicher Schaden, wäre jedoch ein erster möglicher Hinweis auf zu hohe Lasten und mögliche spätere Schäden in der belasteten Keramik. Ein Riss in einer keramischen Kugel führt noch nicht zu massiven Folgeschäden auf den Lageraufläufen. Zwischen einer Rissbildung und dem Ausbruch von Material aus einer keramischen Kugel liegt eine längere Zeitspanne. Deshalb ist es von Vorteil, Risse in Wälzkörperkeramiken zu erkennen, bevor es zum Ausbruch von Material aus keramischen Kugeln kommt.

4.1.1 Schadensfortschritt in keramischen Kugeln

Die Ausbildung eines Schadens in der Keramik einer Kugel beginnt mit der Bildung eines initialen Risses meist entlang einer Inhomogenität oder Fehlstelle an der Ober-

fläche, Lugovy [30]. Die Risse setzen sich beginnend vom Primärschaden unter der Oberfläche fort. Aufgrund der Kerbwirkung (lokale, geometrisch bedingte Spannungsspitzen) am Ende von Rissen und an Stellen, an denen sich die Rissrichtungen abrupt ändern, bilden sich bevorzugt neue, seitliche Risse. Wenn Risse ein Gebiet an der Kugeloberfläche vollständig umschließen, kommt es zu Ausbrüchen.

Bei der Annahme initialer Risse in keramischen Kugeln wird von C-förmigen Rissen ausgegangen. Diese Annahme beruht auf der Art des Herstellungsvorgangs der keramischen Kugeln, bei dem die Kugeln aufeinanderprallen können. Wenn sich die Kugeln jeweils genau in der Mitte treffen, kann der Aufprall zweier keramischer Kugeln auf den Kugeln Risse als konzentrische Ringe erzeugen. Treffen sich die Kugeln leicht versetzt von der Mitte ergibt dies C-förmige Risse an der Oberfläche der Kugeln.

Der nach außen sichtbare Teil eines Risses in einer keramischen Kugel zeigt nur einen eingeschränkten Teil des Schadens. Der maßgebliche Schaden liegt in der Struktur unter der Oberfläche der Kugel (siehe Abbildung 4.2). Dieser ist wesentlich für die Abschätzung eines potentiellen Schadensfortschritts. Gegenwärtig kann zur Beurteilung von Rissen in einer keramischen Kugel nur die auf der Oberfläche sichtbare geschädigte Struktur verwendet werden. Damit ist es nur begrenzt möglich, auf den weiteren Rissverlauf unter der Oberfläche zu schließen. Deshalb sind Schadaussagen, die über Größen von Oberflächenrissen getroffen wurden, nur begrenzt aussagekräftig.

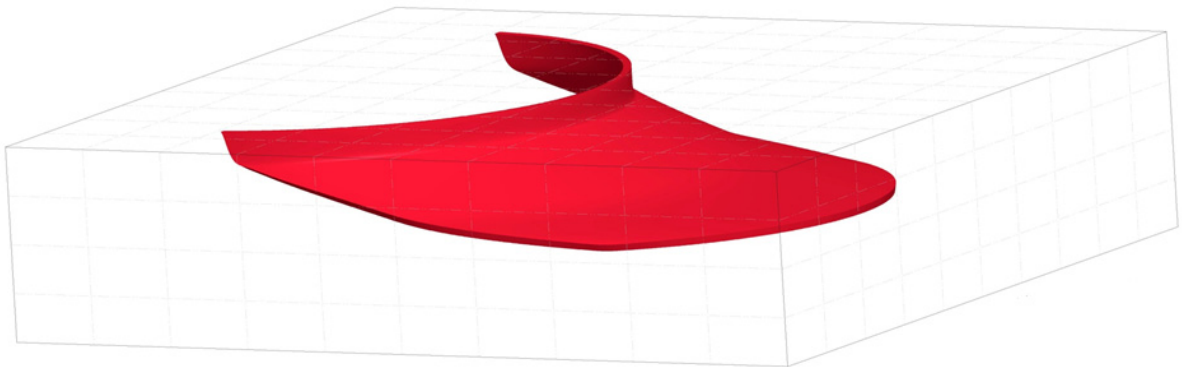


Abbildung 4.2: Typischer Rissverlauf unter der Oberfläche einer keramischen Kugel, nach der Einbringung eines C förmigen Risses auf der Oberfläche [Bild FAG].

Wünschenswert wäre es, Risse im Verlauf unter der Oberfläche messtechnisch darzustellen. Dazu wird ein 3 D-Röntgengerät mit einer Auflösung von $2\text{ }\mu\text{m}$ für technische Diagnosen erprobt. Die Versuche zur messtechnischen Darstellung der Bruchstruktur unter der Oberfläche keramischer Kugeln sind allerdings nicht erfolgreich. Eine mögliche Erklärung wäre, dass Röntgenstrahlen die minimalen Lufteinschlüsse in einem schmalen, gebogenen Riss nur schlecht abbilden können. Versuche mit Kontrastmitteln sind nicht erfolgreich, da Kontrastmittels nicht tief genug in die Risse eindringen. Am erfolgversprechendsten sind Ultraschall basierte Verfahren. Es können gegenwärtig keine Angaben gemacht werden, wie gut die erreichbare Auflösung und Genauig-

keit Ultraschall basierter Verfahren bei der Erkennung von Rissen in keramischen Kugeln sein können.

4.1.2 Schadensfortschrittsversuche mit keramischen Kugeln

Zum besseren Verständnis des Schadensfortschritts in keramischen Kugeln sind Versuche unverzichtbar. Das Schadensfortschrittsverhalten künstlich geschädigter keramischer Kugeln wird deshalb auf einem Prüfstand geprüft. Dabei werden einzelne keramische Kugeln mit und ohne künstliche Vorschädigung untersucht.

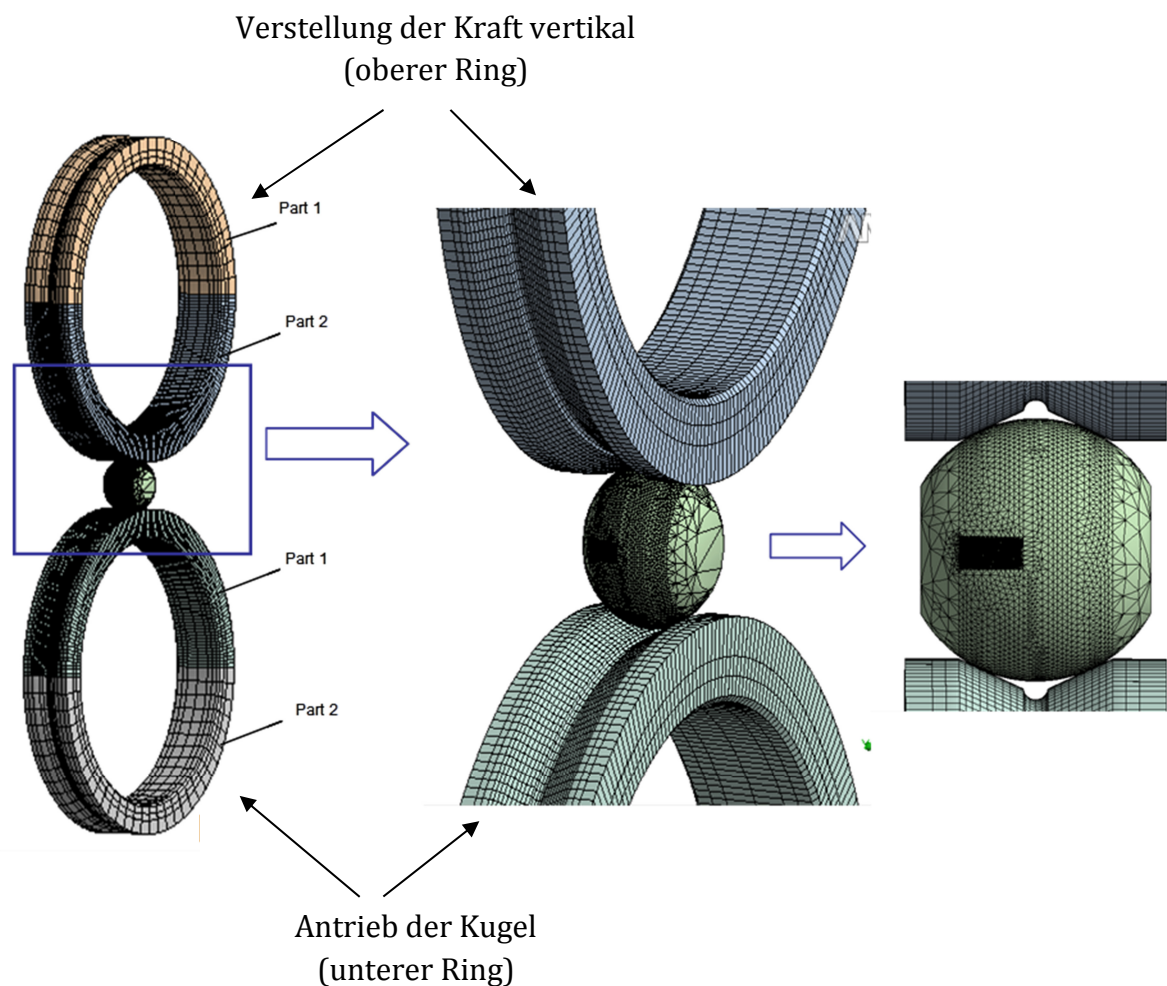


Abbildung 4.3: FEM Simulation der Prüfanordnung für Einzelkugelversuche [1EA], [3EA].

Eine Kugel rotiert zwischen zwei sich drehenden Scheiben mit einem V-förmigen Einschnitt (siehe Abbildung 4.3). Eine Scheibe bildete den Antrieb, über die zweite Scheibe wird die vertikale Position und damit die Kraft auf die Kugel verstellt. Stege vor und hinter der Kugel halten die Kugel in der Position zwischen den Scheiben (siehe Abbildung 4.4).

Zum Betrieb der Kugeln im Einzelkugelprüfstand werden die Seiten der Kugeln abgeschliffen, um ein Hauptträgheitsmoment zu erhalten, das eine stabile Lage der Kugelrotationsachsen ermöglicht. Damit werden im Kontakt mit den Lauflächen die Überrollung einer stabilen Bahn auf der Kugel und eine stabile Überrollung eingebrachter Schäden auf der Kugel erreicht.

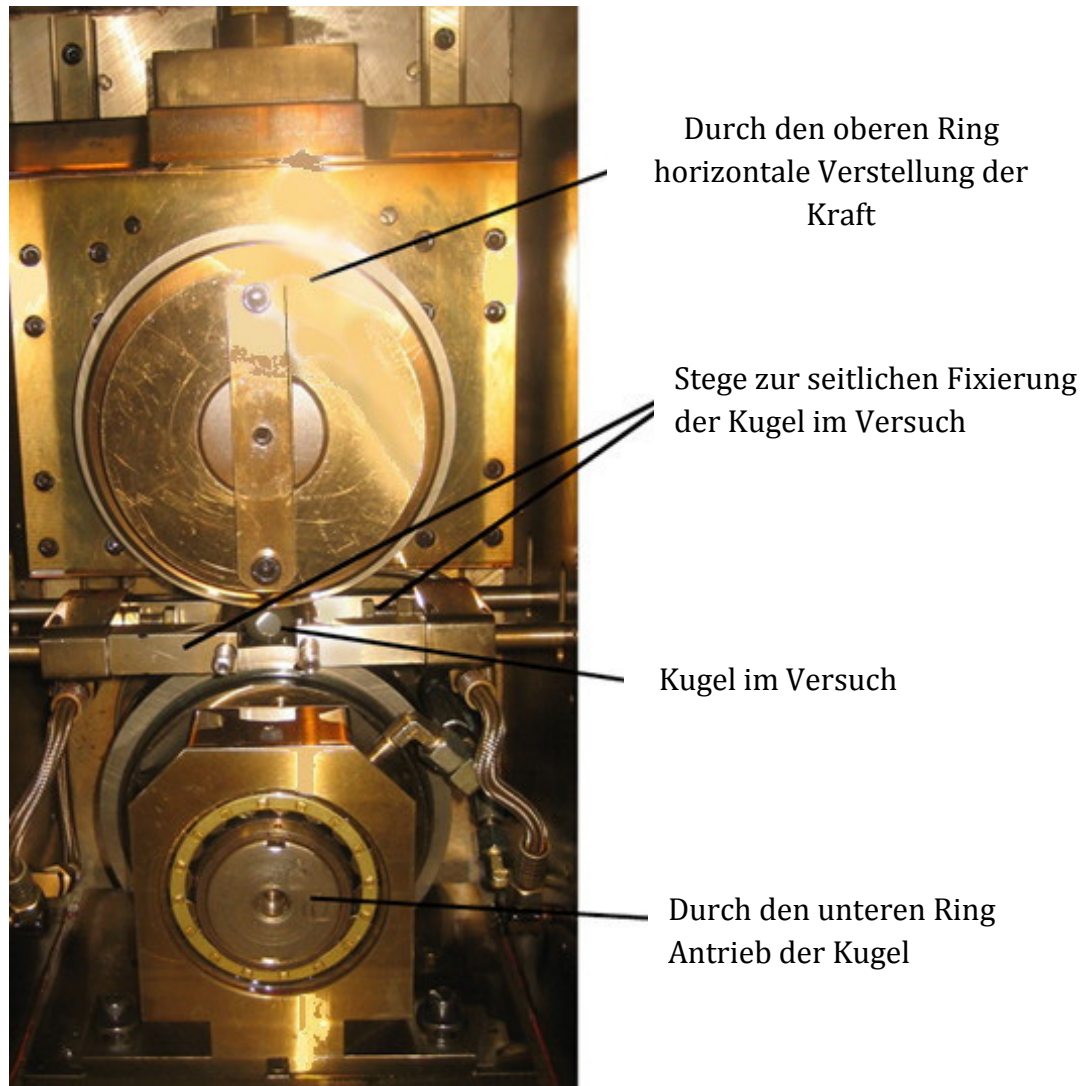


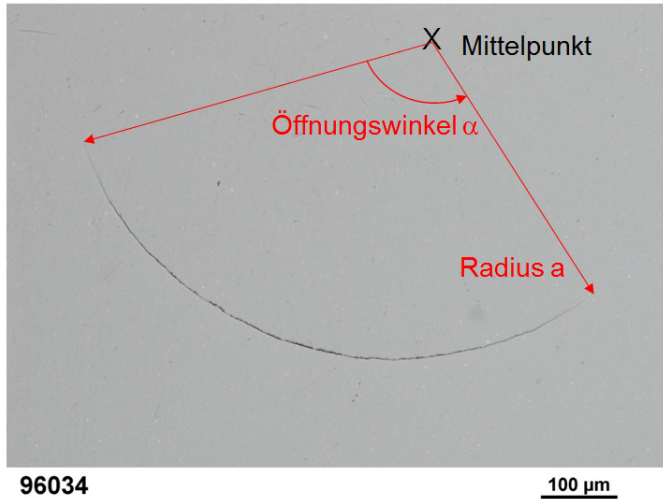
Abbildung 4.4: Einzelkugelprüfstand bei FAG [Bild FAG].

In der Abbildung 4.4 ist der Aufbau des Einzelkugelprüfstandes sowie die Anordnung der Kugel dargestellt.

Die Versuche werden auf Einzelkugel-Prüfständen (siehe Abbildung 4.4) durchgeführt. Keramische Kugeln werden mit C-förmigen Rissen unterschiedlicher Größen und Orientierungen (siehe Abbildung 4.11) vorgeschädigt. Es werden überhöhte Lasten gefahren, um ein Versagen in überschaubaren Zeitabschnitten zu erzwingen. Die-

se überhöhten Lasten treten im Flugbetrieb üblicherweise nicht auf. Die Versuche laufen in den jeweiligen Versuchsabschnitten kontinuierlich mit konstanten Pressungen bis zum Ausbruch von Material aus den Kugeln. Gemessen wird die Risszunahme über der Zyklenanzahl der Schadüberrollungen.

Oberfläche



Verlauf in der Tiefe

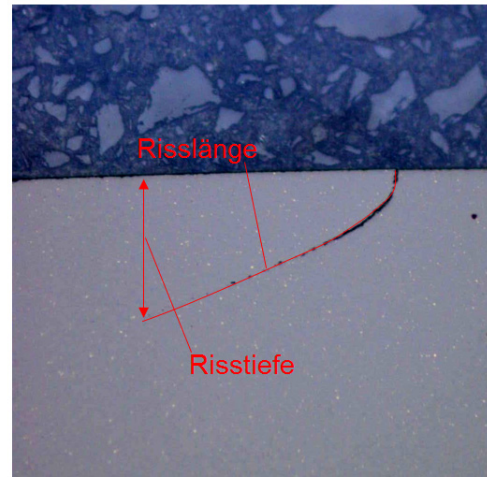


Abbildung 4.5: Riss auf der Oberfläche der keramischen Kugel und im Schnittbild [Bild FAG].

Die seitlich abgeschliffenen Kugeln (siehe Abbildung 4.6) werden mit Markierungen auf den abgeschliffenen Flächen versehen, welche mit einem Laser abgetastet werden. Dadurch ist eine genaue Angabe von Überrollzyklen auf den Kugeln möglich.

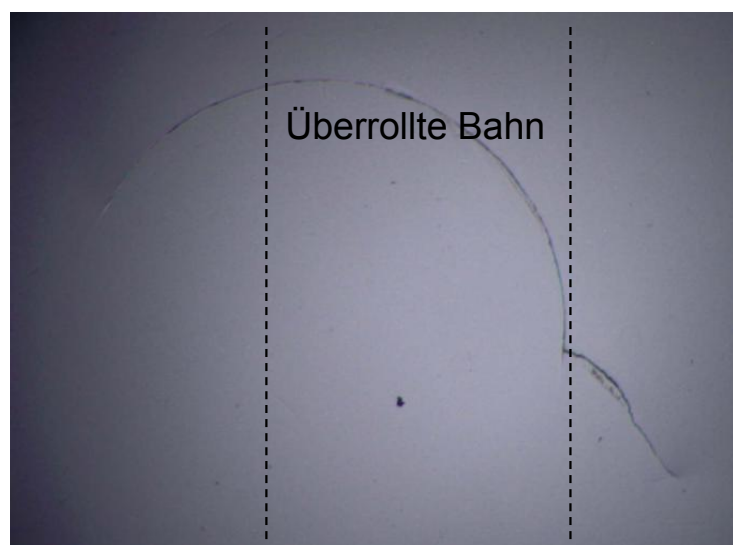
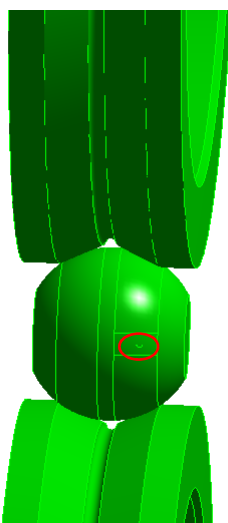


Abbildung 4.6: Bild links: Kugel mit Schaden in einem Einzelkugelprüfstand [EA 15]. Bild rechts: Überrollte Bahn auf der Kugel [Bild FAG].

Die Vorschädigung der keramischen Kugeln wird mit einem hohen technischen Aufwand betrieben. Dennoch ist es nur begrenzt möglich, eine definierte reproduzierbare Vorschädigung einer Kugel zu erreichen. Daraus ergibt sich ein Problem mit der Vergleichbarkeit der Resultate der Versuche, da eine unbekannte Eingangsvarianz die Ergebnisse beeinflusst. Da diese Eingangsgröße in die Versuche messtechnisch nicht erfasst werden kann, bleibt eine Unsicherheit bei der Auswertung der Versuche.

Das Wachstum von Rissen bis zum Ausbruch von Material aus der Keramik einer Kugel soll mit der Abbildung 4.7 bis zur Abbildung 4.9 gezeigt werden.

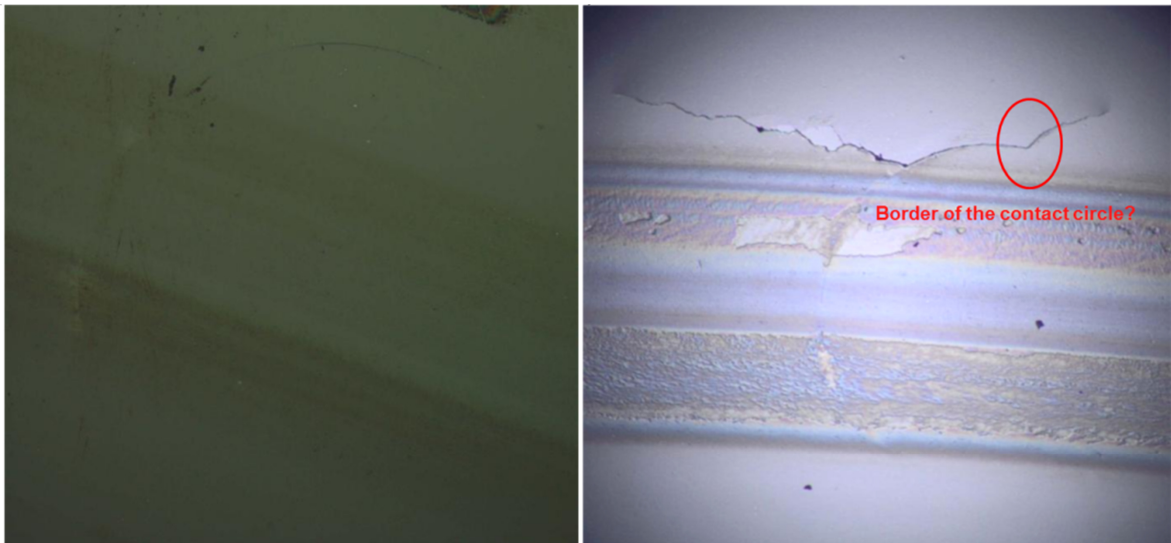


Abbildung 4.7: Links: Nach 150 Stunden bei 2300 MPa und anschließend 150 Stunden bei 3000 MPa.
Rechts: Nach weiteren 150 Stunden Laufzeit bei 3800 MPa [Bild FAG].

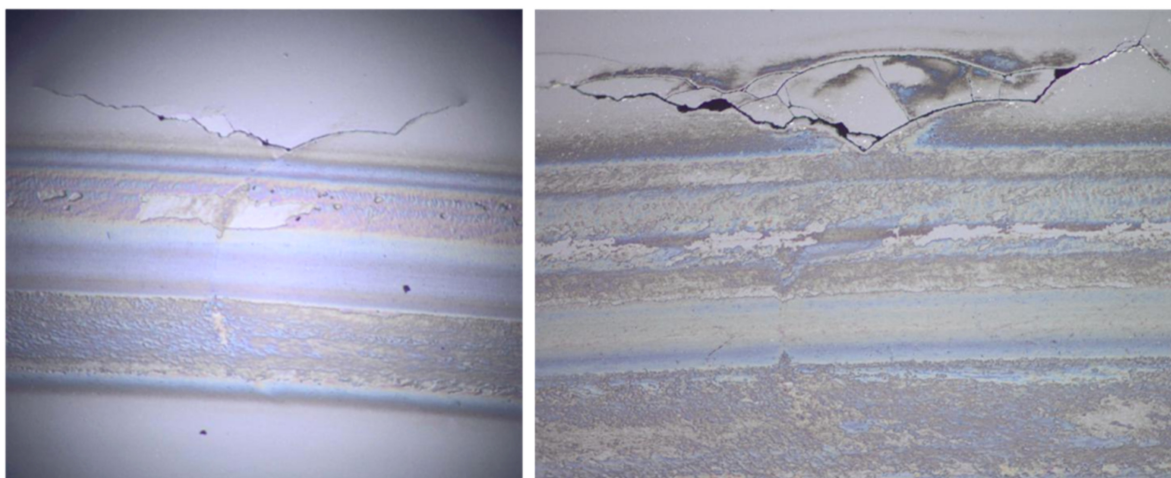


Abbildung 4.8: Links: Vor dem erneuten Test bei 3800 MPa.
Rechts: Nach weiteren 300 Stunden bei 3800 MPa [Bild FAG].

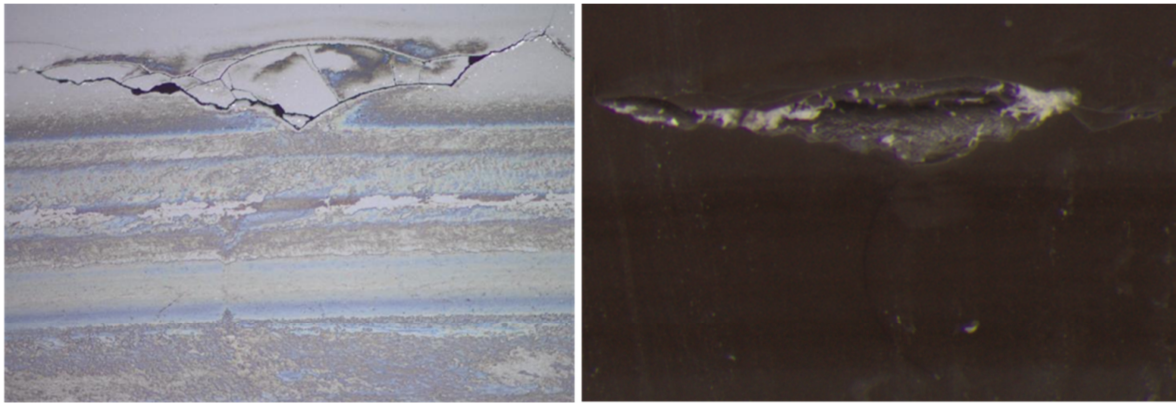


Abbildung 4.9: Links: Vor weiteren 450 Stunden bei 3800 MPa.

Rechts: Nach weiteren 450 Stunden bei 3800 MPa [Bild FAG].

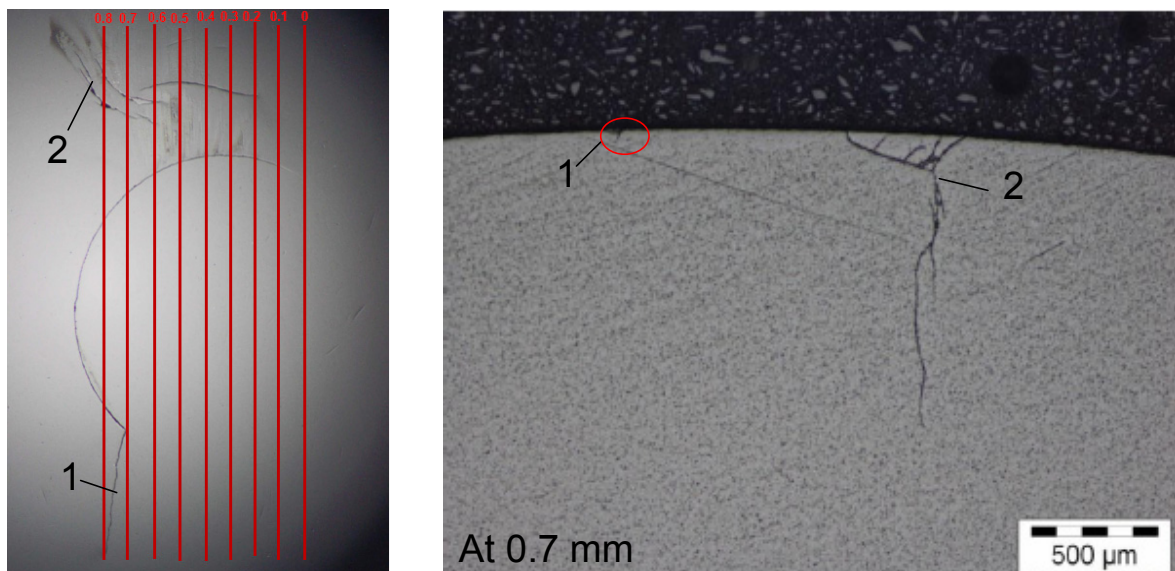


Abbildung 4.10: Links: Schliffpositionen in 0,1 mm Abständen;

Rechts: Schliffbild mit fortgeschrittenem Rissnetzwerk aus Einzelkugel Prüfungen, großer C-Riss, Hertzsche Pressung 2800 MPa, nach Laufzeit von 75 h [Bild FAG].

Aus den Schliffbildern in der Abbildung 4.10 geht hervor, dass sich ein Riss relativ tief (Größenordnung von 1 mm) in eine keramische Kugel fortsetzen kann.

Bei den durchgeführten Versuchen wird beobachtet, dass eine vorgeschädigte Keramikugel sich bei zyklischer Belastung im Fortschritt des Schadens ähnlich verhält wie eine Metallkugel mit einem Anfangsschaden. Ermüdungsprozesse aufgrund zyklischer Beanspruchungen bei Stahl sind bekannt, Ermüdungsreaktionen bei Keramik aufgrund zyklischer Beanspruchungen hingegen sind wegen des völlig andersartigen

Aufbaus der Keramik nicht möglich. Dennoch ergeben sich im Versagensprozess gewisse Parallelen zum Versagen von Stahl bei Ermüdung.

Liegt die Pressungsfläche neben einem Riss, ändert sich die wirksame Federsteifigkeit. Bei der Belastung auf einer Seite des Risses liefert der Bereich auf der anderen Seite des Risses keinen Beitrag zur Unterstützung der belasteten Fläche. Somit kommt es zu einer erhöhten Kompression der belasteten Stelle neben einem Riss. Der Verlauf des Stressfeldes im Material ändert sich bei jeder Erweiterung eines Risses. Die stärkere Kompression führt durch die höhere Belastung zur Erweiterung der Bruchlinie oder zur Generierung weiterer Nebenbruchlinien. Die Bruchlinien vernetzen sich in der fortlaufenden Überrollung im geschädigten Bereich. Tritt eine Vernetzung der Risse in der Art auf, dass durch die vernetzten Bruchlinien ein kompletter Bereich auf der Oberfläche umschlossen wird, kommt es zum Ausbruch von Material.

Bei einem Einzelkugelprüfstand kann die Orientierung, mit der der Riss überrollt wird, durch die Position des Risses und die Orientierung zum Hauptträgheitsmoment vorgegeben werden.

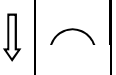
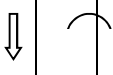
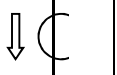
Position-1	Position-2	Position-3	Position-4
			

Abbildung 4.11: Ausrichtung der Risse, bezogen auf die überrollte Bahn.

Es werden verschiedene Risslängen mit unterschiedlichen Orientierungen der Risse (siehe Abbildung 4.11) untersucht. Die Versuche werden mit jeweils stufenweise erhöhten Pressungen durchgeführt. Versuche zur Gewinnung von Ergebnissen wie diese in Abbildung 4.12 abgebildet sind, sind aufwendig und daher nur in begrenztem Umfang durchführbar.

Eine Schwierigkeit bei der Durchführung von Versuchen zu den Rissfortschritten ist, Versuchsabläufe definiert zu unterbrechen. Wünschenswert wäre es Versuche, wie in der Abbildung 4.12 dargestellt, jeweils nach einer bestimmten Anzahl von Überrollungen zu unterbrechen und den jeweiligen Rissfortschritt zu messen. Dazu müssen die Versuche unterbrochen und anschließend neu gestartet werden. Durch die abgeschliffenen Seiten der Kugeln besteht bei einem Start der Versuche ein Risiko, die Kugeln wiederholt in einer stabilen Lage zu überrollen. Ein Neustart der Versuche ist aufwendig und es ist nicht feststellbar, bei welcher Zyklanzahl ein Rissfortschritt erfolgt ist und zu welchem Zeitpunkt der Versuch unterbrochen werden sollte.

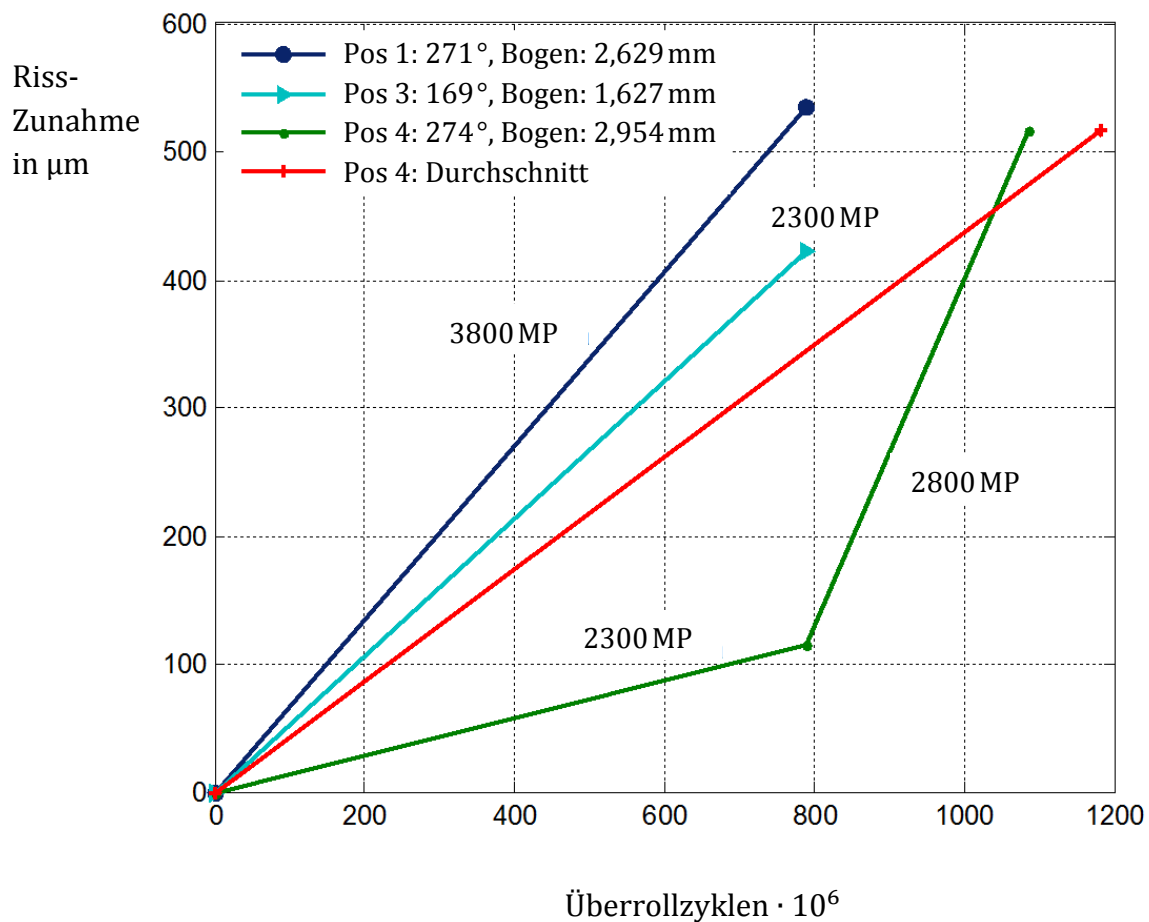


Abbildung 4.12: Rissfortschritte in keramischen Kugeln in Abhängigkeit von der Pressung und der Überrollhäufigkeit über den Schaden [3EA].

Wird die Risslänge nur am Anfang und Ende eines Versuches gemessen, dann kann zwischen den beiden Punkten nur linear interpoliert werden. Aussagen zu einer eventuellen Beschleunigung eines Risswachstums innerhalb eines betrachteten Zeitraumes können dann nicht getroffen werden. Die Erkennung eines nichtlinearen Risswachstums über der Anzahl der überrollten Zyklen ist somit nicht möglich. In der Abbildung 4.12 ist ein Zusammenhang des Rissfortschritts mit der Pressung zu erkennen. In dem Fall mit 2300 MPa und 2800 MPa (Abbildung 4.12, Position 4, grüne Linie) wurde der Versuch nach 800 10^6 Lastzyklen unterbrochen und mit einer erhöhten Pressung von 2800 MPa fortgeführt. Zu erkennen ist das beschleunigte Risswachstum nach der Erhöhung der Pressung.

Ein Verständnis des Zusammenhanges zwischen den Pressungen und den möglichen Zyklenzahlen bei den Überrollungen ist wichtig für eine spätere Skalierung der Ergebnisse und Übertragung der Ergebnisse auf Nominallasten. Resultate, die bei erhöhten Pressungen in kurzer Zeit erzielt wurden, sollen auf längere Zeiten unter Nominalbedingungen übertragen werden können. Eine Skalierung von Ergebnissen eines Rissfortschritts bei keramischen Kugeln ist allerdings nur in bedingtem Umfang zielführend. Bei Pressungen unter Nominalbedingungen eines Triebwerklagers werden Rissfortschritte an keramischen Kugeln nur bei großen initialen Rissen beobachtet.

4.1.3 Erkennung kritischer Rissgrößen bei der Produktion

Ein wichtiger Aspekt bei der Betrachtung eines Rissfortschritts in einer keramischen Kugel ist die Größe eines Risses zu Beginn einer Schädigung. Gefunden werden muss die Schadgröße auf einer Kugel, ab der kein Wachstum eines Schadens unter den gegebenen Lasten stattfindet. Ein solcher möglicher initialer Schaden auf einer keramischen Kugel ist dann für die vorgesehene Anwendung unkritisch. Es muss ein sicheres Verfahren etabliert werden, um Schäden bis zu dieser maximal zulässigen Größe sicher erkennen zu können. Kugeln mit größeren Anfangsschäden müssen dann im Produktionsverlauf aussortiert werden.

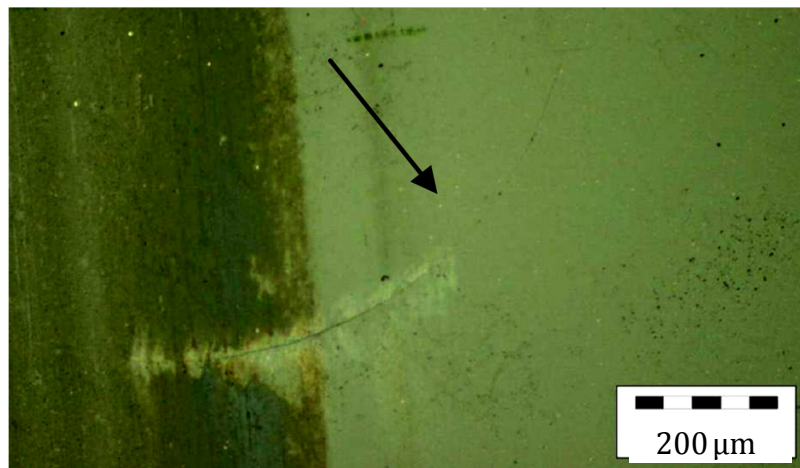


Abbildung 4.13: Dieser C-förmige Riss war bei Testbeginn unterhalb der Erkennungsgrenze [Bild FAG].

Der in der Abbildung 4.13 gezeigte Riss war vor dem Testbeginn mit einem optischen Mikroskop nicht erkennbar. Da der Riss erst nach dem Test erkannt wird, kann nicht nachvollzogen werden, ob der Riss während des Tests gewachsen ist. Der kurze Riss ist in dieser Länge durch Zufall entstanden. Eine gezielte Generierung von Rissen dieser Länge ist gegenwärtig technisch nicht möglich.

4.2 Schäden auf Stahl Laufbahnen

Betrachtet werden Schäden und der Schadensfortschritt auf Metall-Laufbahnen von Hybridlagern. Bei traditionellen Stahllagern sind die stählernen Kugeln die Schwachstelle in Lagern. Bei Hybridlagern wird davon ausgegangen, dass Innenringschäden und nicht die Kugeln die Schwachstelle in Lagern bilden. Lager werden üblicherweise derart ausgelegt, dass in der vorbestimmten Lebenszeit keine messbare Degradierung auftritt. Beim Überrollen ungeschädigter Lagerlaufbahnen durch ungeschädigte Kugeln ist die Flächenpressung nicht ausreichend, um plastische Verformungen auf der Oberfläche der Lagerlaufbahnen zu bewirken. Treten hohe Flächenpressungen

durch geschädigte Kugeln oder durch die Überrollung von Fremdkörpern auf, kann es zu plastischen Verformungen auf den Lagerlaufbahnen kommen. Diese Verformungen können die Lebenszeit des Lagers reduzieren.

Wird von Anfangsschädigungen im Metall der Lagerlaufbahnen wie Rissen oder Fehlstellen ausgegangen, ändert sich die Lastverteilung beim zyklischen Überrollen des Schadens gegenüber der ungeschädigten Komponente. Das ungeschädigte Gebiet wird abschnittsweise stärker komprimiert als zuvor bei einer Laufbahn ohne Schaden. Diese stärkere Kompression kann zur Erweiterung des Schadens führen.

4.2.1 Laufbahnschäden aufgrund von Kugelschäden

Eine durch einen Ausbruch geschädigte keramische Kugel verursacht im weiteren Betrieb Folgeschäden auf den Laufringen eines hybriden Lagers. Überrollungen durch defekte Kugeln verursachen in der Interaktion mit Lagerlauflächen unter der Oberfläche eine Kaltverfestigung der Stahlstruktur. Dabei bewirkt eine scharfe Kante am Rande eines Ausbruchs auf der Kugel eine hohe Pressung auf die Laufbahnen. Diese hohe Pressung bewirkt, dass das Material den dauerelastischen Bereich verlässt und es zu einer plastischen Verformung kommt. Dadurch entstehen bleibende Verformungen, die bei erneuten Überrollungen durch den Kugelschaden immer wieder verlagert und neu verformt werden. Dies geschieht sehr oft in unterschiedliche Richtungen. Es kommt zur Kaltverfestigung und anschließend zu einer Versprödung der derart überrollten Lauflächen. Die wachsende Sprödigkeit in den Metalllauflächen begünstigt in der Folge die Neigung zur Rissbildung. Diese beginnt nicht sichtbar unter den Oberflächen der Laufringe. Begonnene Risse vernetzen sich zu Rissgebilden, die immer mehr zusammenwachsen, bis ein Gebiet auf der Lagerlaufläche vollständig von Rissen umgeben ist. In der Folge kann es dann zu Ausbrüchen aus den Lauflächen kommen.

Untersucht werden die Auswirkungen einer künstlich geschädigten keramischen Kugel auf die metallischen Lagerlauflächen. In die Oberfläche einer keramischen Kugel wird ein Schaden von 0,55 mm Durchmesser und 0,2 mm Tiefe eingebracht (siehe Abbildung 4.14, Abbildung 4.15). Das Einbringen der künstlichen Fehlstelle in die Kugel erfolgt durch das Ausbrennen mit Hilfe eines Lasers. Der Versuch erfolgt mit Standardflugzyklen (Abbildung 3.24) bis zum Ausfall des Lagers.

Bei den geschädigten keramischen Kugeln wird davon ausgegangen, dass die bei der künstlichen Schädigung entstandenen Kanten der Fehlstellen einem auf natürliche Weise entstandenen Ausbruch nahekommen (siehe Abbildung 4.9).

Schäden auf den Lauflächen bilden sich in einer Art aneinanderhängenden Grübchen aus (siehe Abbildung 4.16). Das Material der Ausbrüche aus diesen Grübchen findet sich im Öl wieder und kann mit Metallpartikelsensoren messtechnisch erfasst werden. Allerdings ist zu diesem Zeitpunkt der Schaden schon sehr weit fortgeschritten. Es ist deshalb ein früherer Zeitpunkt zur Erkennung eines Schadens im Lager angeraten (siehe Abbildung 4.21 und Kapitel 5.1.1).

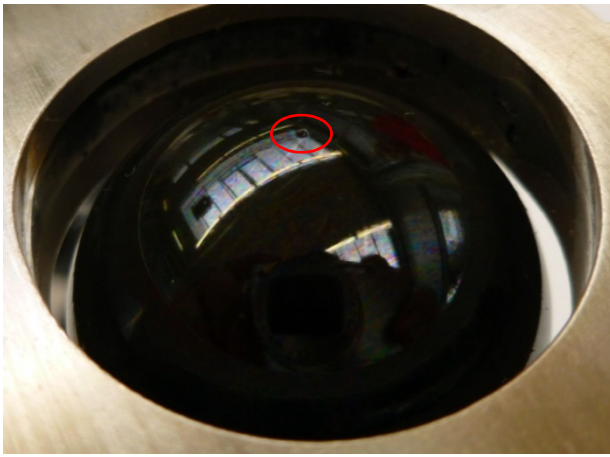


Abbildung 4.14: Keramische Kugel mit künstlich eingebrachtem Schaden, mit 0,55 mm Durchmesser innerhalb des roten Kreises [Bild FAG].

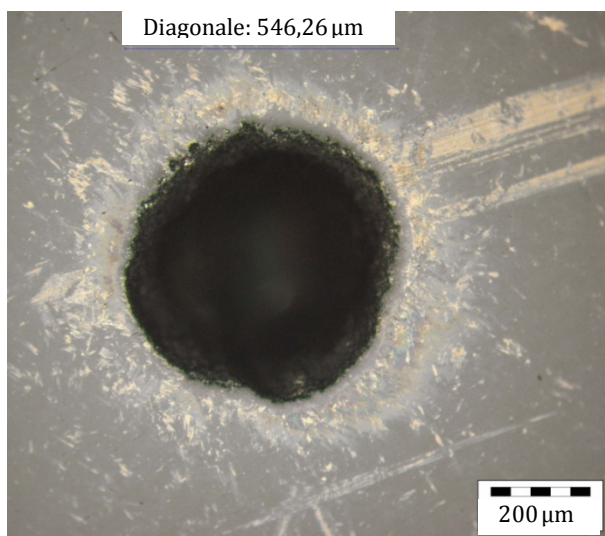


Abbildung 4.15: Vergrößerte Abbildung eines künstlich eingebrachten Schadens mit 0,55 mm Durchmesser (siehe Abbildung 4.14) [Bild FAG].

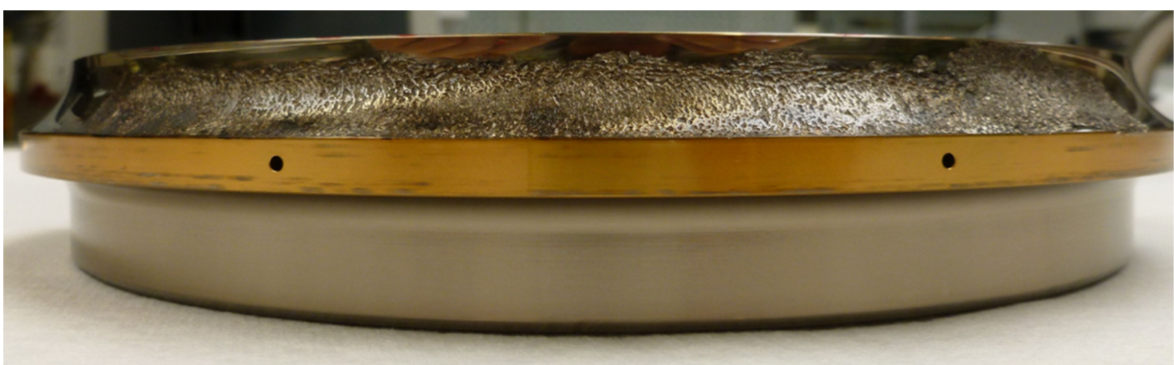


Abbildung 4.16: Geschädigter Innenring nach Testlauf mit einem Ausbruch in der Oberfläche der Keramikugel mit 0,55 mm Durchmesser [Bild FAG].

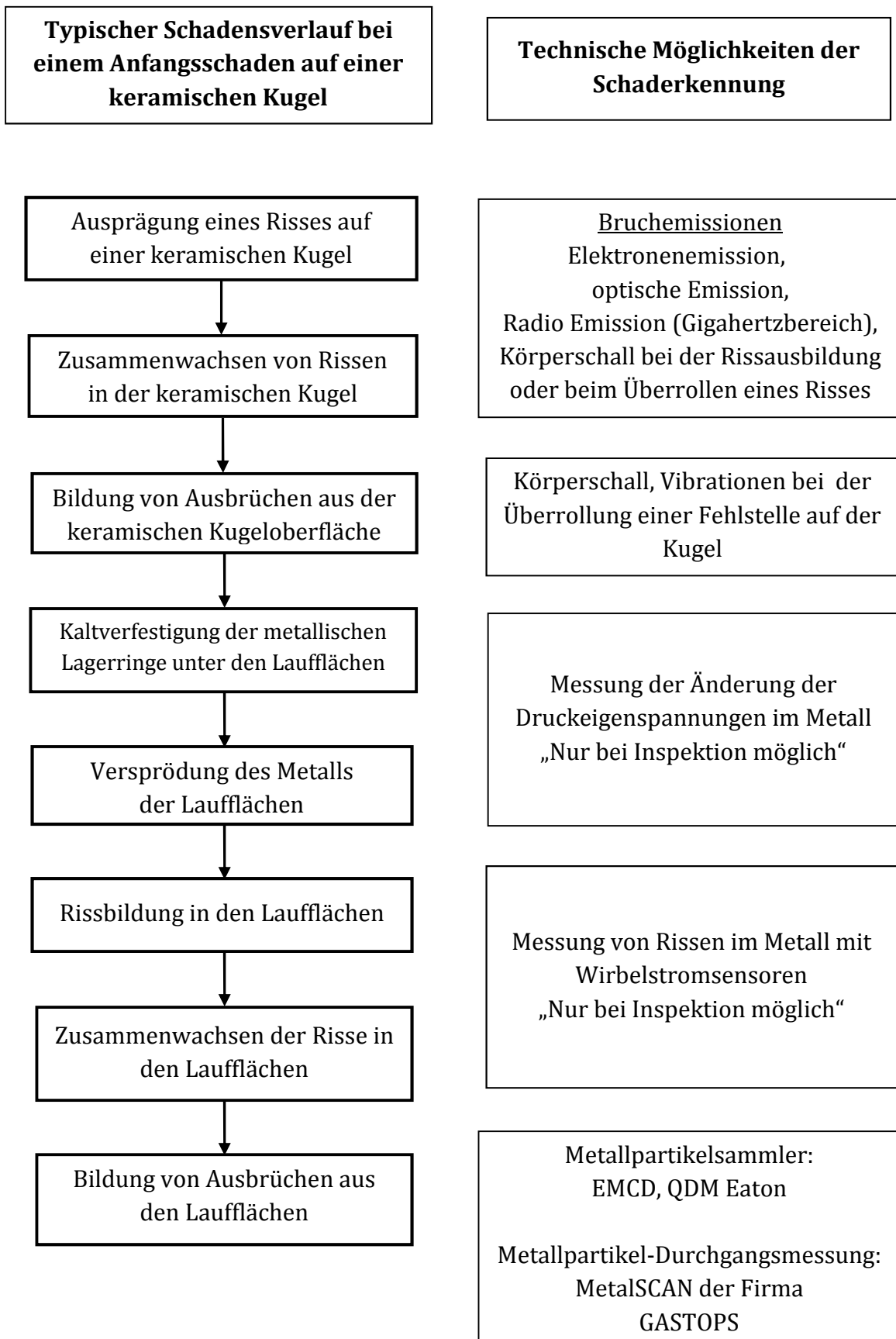


Abbildung 4.17: Typischer Schadensverlauf im hybriden Kugellager bei einem Anfangsschaden auf einer keramischen Kugel und messtechnische Möglichkeiten der Erkennung.

4.2.1.1 Spanabtrag aus den Lagerlaufbahnen

In einigen Fällen kann es zum Abtrag langer Späne aus den Lagerlauflächen kommen. Es wird angenommen, dass diese Art von Spänen durch ein zeitweises Gleiten einer keramischen Kugel auf der Kante eines Ausbruchs zustande kommt. Die Vermutung ist, dass es während einer Änderung von Systemzuständen zu solchen Vorgängen kommen kann, wie diese z.B. bei Last- oder Drehzahlwechseln vorkommen.

Die Erzeugung dieser Art von Spänen ist nach den hier vorliegenden Erkenntnissen nicht der dominierende Schadensmechanismus bei der Degradierung der Lagerlaufbahnen. Allerdings können lange Späne dieser Art bei Metallpartikel-Erkennungssystemen im Öl wie einem EMCD sehr schnell zu einer Indikation führen. Ein langer Span kann dabei die Kontakte eines EMCDs spontan verbinden. Dies muss bei der Auswertung einer Indikation eines EMCDs berücksichtigt werden.

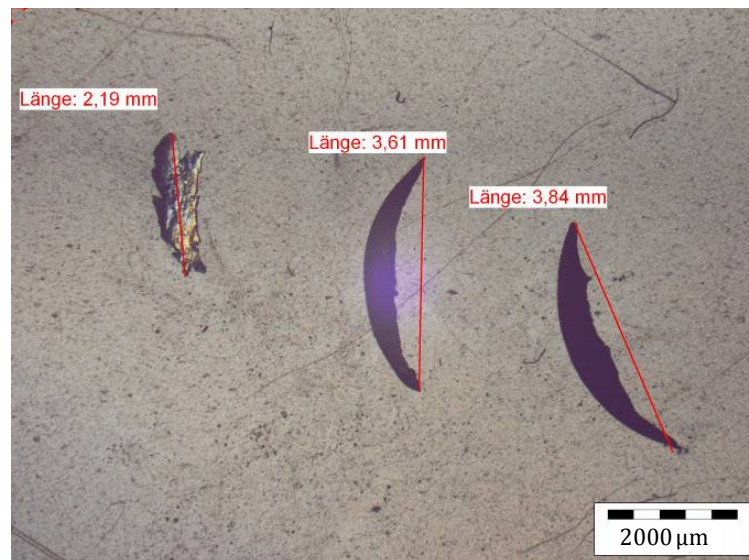


Abbildung 4.18: Spanabtrag aus einer Lagerlaufbahn [Bild FAG].

4.2.2 Laufbahnschäden durch Fremdkörper

Im Betrieb eines Triebwerks können harte Partikel über die „Sperrluft“ bei Labyrinth-Dichtungen ins Öl eingetragen werden. Zur Untersuchung der Folgeschäden bei hybriden Lagern mit keramischen Kugeln wird Fett mit eingemischten Korundpartikeln in den Größen 0,1mm bis 0,2mm in das Lager eingebracht. Partikel dieser Größe werden bei Serviceuntersuchungen im Ölkreislauf von Flugzeugtriebwerken gefunden. Das Lager wird mit den Korundpartikeln für einige Minuten mittels Standardflugzyklen (3.3.2) betrieben. Erkannt werden sollen Art und Umfang der Schäden.



Abbildung 4.19: Lagerlaufbahn nach der Überrollung von ins Lager eingebrachten Korundpartikeln [Bild FAG].

Die keramischen Kugeln werden nicht sichtbar beschädigt, dies kann auf die hohe Härte der Keramik zurückgeführt werden. Die Korundpartikel werden teilweise in die Laufbahnoberfläche „eingewalzt“ oder hinterlassen sichtbare Spuren auf den Lauflächen. Die Eindringtiefe der Partikel in die Lagerlaufbahn hängt von der Größe der Partikel und den Materialeigenschaften der Lagerlaufbahnen ab.

Für die möglichen Schadprozesse im Lager bedeutet dieses Ergebnis, dass eine Schädigung der keramischen Kugeln durch Fremdkörper eher unwahrscheinlich ist.

4.3 Verbleibende Lebenszeit eines Lagers nach einem Schadenseintritt

Die verbleibende Lebensdauer nach dem Eintritt eines Lagerschadens hängt von Materialeigenschaften der Lagerkomponenten, der Überrollhäufigkeit über den Schaden, der Last bei der Überrollung und der Größe des Anfangsschadens ab.

4.3.1 Verbleibende Lebenszeit nach Kugelschäden

Es soll ein Zusammenhang zwischen Schadgrößen auf keramischen Kugeln mit Restlaufzeiten hybrider Lager bei unterschiedlichen Qualitäten der Stahllaufbahnen der Lager gefunden werden. Es werden Versuche mit unterschiedlichen Schadgrößen auf keramischen Kugeln und unterschiedlichen Qualitäten der Lauflächen durchgeführt. Die Versuche erfolgen mit Triebwerks-Hauptwellenlagern auf dem Prüfstand AN58 mit Standardflugzyklen (siehe Kapitel 3.3.2).

Bei einem Anfangsschaden auf einer Kugel wird davon ausgegangen, dass sich dieser in der Interaktion mit den Lauflächen nicht vergrößert. Jede Erweiterung eines Aus-

bruchs auf einer keramischen Kugel erzeugt wieder neue scharfe Kanten. Bleibt die Größe eines Schadens auf einer keramischen Kugel hingegen in der Größe bestehen, kann es, bei der Verwendung harter Stahllaufflächen, zur Abstumpfung der scharfen Kanten des Ausbruchs kommen. Dieser Umstand kann die verbleibende Lebensdauer der metallischen Laufbahnen in der Interaktion mit einem Kugelschaden verlängern (siehe Abbildung 4.21).

Ein Ölpartikelsensor ist direkt in der Ölrücklaufleitung hinter dem Lager eingebaut. Die Messung ferromagnetischer Partikel erfolgt mit einem MetalSCAN Sensor der Firma GASTOPS. Beim Durchfluss von Öl durch den Sensor wird bestimmt, ob ferromagnetische oder elektrisch leitfähige Partikel vorhanden sind. Ferromagnetische Partikel werden erkannt über die Änderung der magnetischen Kopplung zwischen zwei Spulen.

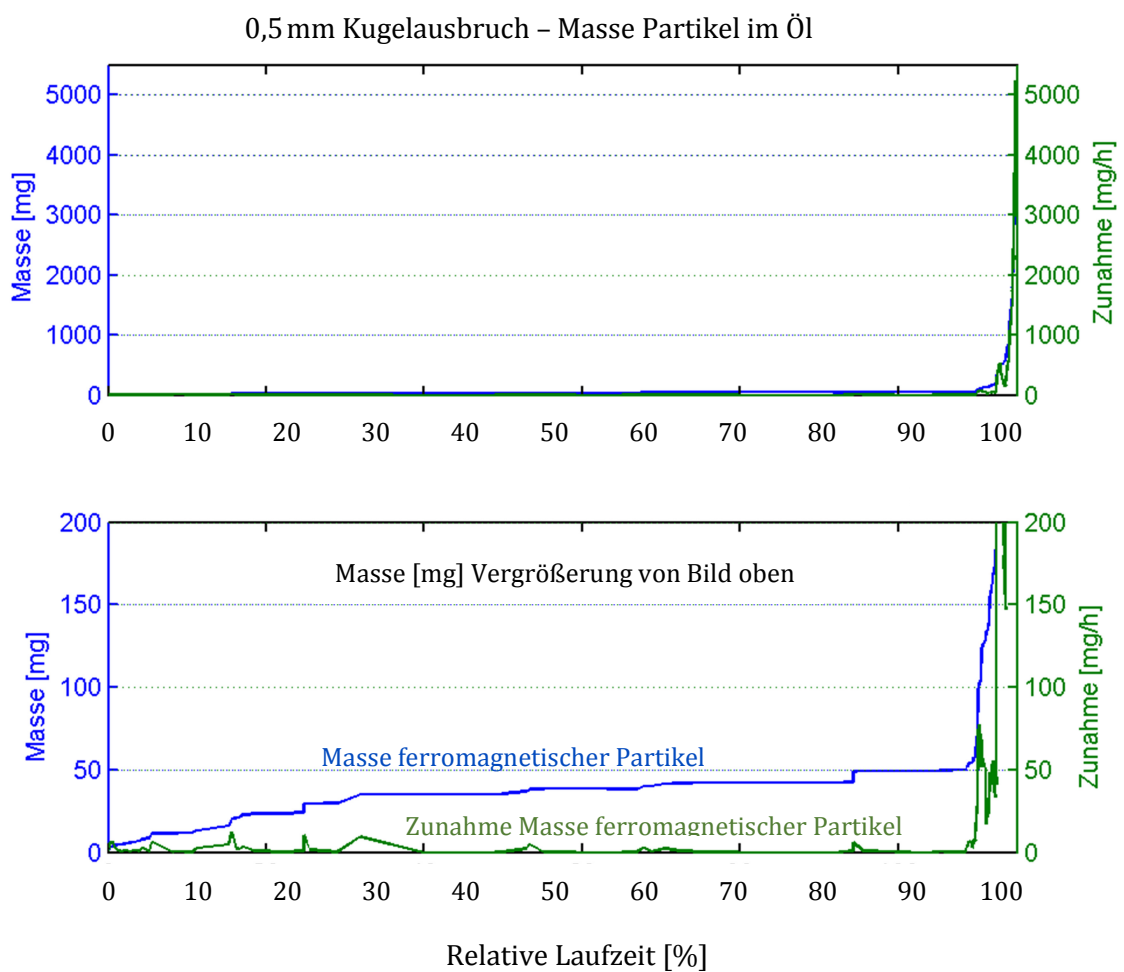


Abbildung 4.20: Diagramm oben: Metallabtrag aus den Laufflächen (M50-NiL).
Diagramm unten: Vergrößerter Amplitudenverlauf des Metallabtrages [Bild FAG].

Das hybride Lager, das für die Versuche in der Abbildung 4.20 benutzt wurde, fiel nach 114 Stunden aus. Gezeigt wird der Metallabtrag aus den Laufflächen durch eine mit einem 0,5 mm Ausbruch geschädigte keramische Kugel. Zu sehen ist, dass die Er-

kennung des Metallabtrages keine zuverlässige Früherkennung des Schadens bereitstellen kann. Erst kurz vor dem Ausfall des Lagers kann eine eindeutige Indikation eines Lagerschadens erfolgen.

Entsprechend dem in der Abbildung 4.20 dargestellten Versuchsablauf erfolgen Versuche (siehe Abbildung 4.21) mit unterschiedlichen Schadgrößen auf den Kugeln, unterschiedlichen Lagerring- und Kugelmaterien und unterschiedlichen Bearbeitungsmethoden der Lagerkomponenten (siehe Tabelle 4.1).

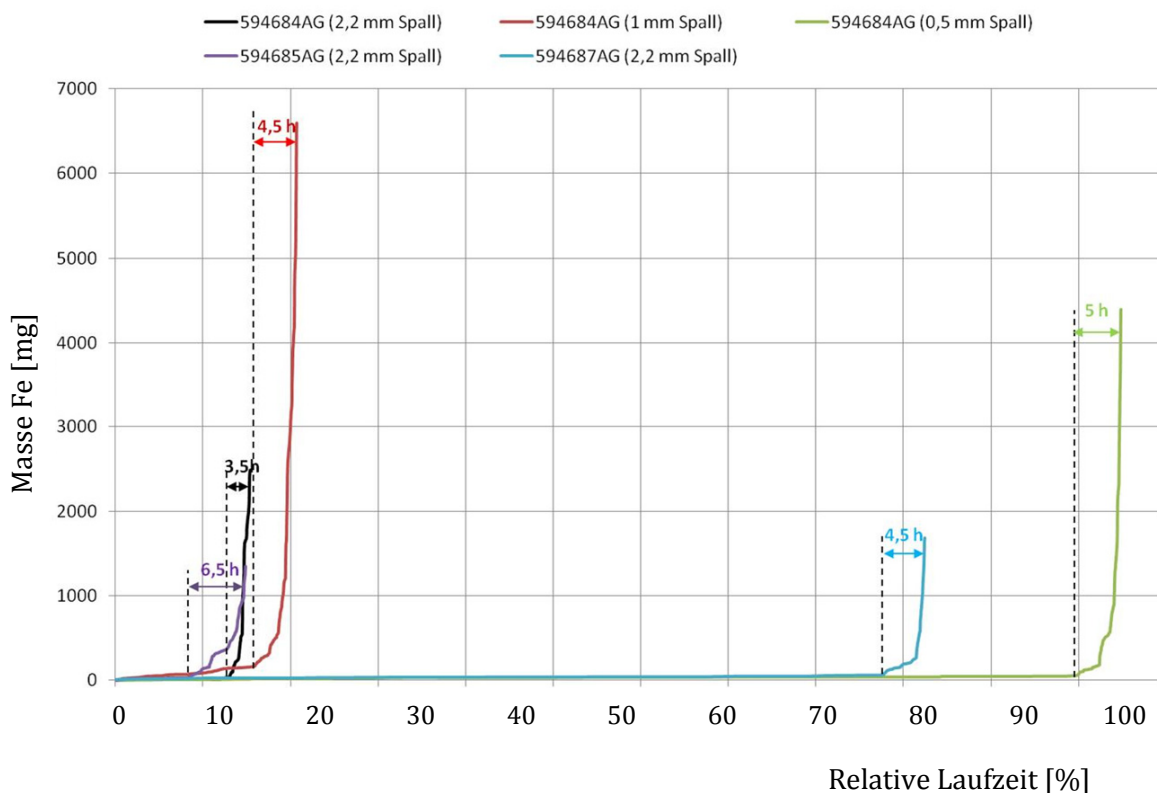


Abbildung 4.21: Verlauf des Abtrages von Metallpartikeln bei unterschiedlichen Größen einer Fehlstelle auf der Keramikugel und unterschiedlichen Ringmaterialien [Bild FAG].

Teile-Nummer	Kugel-material	Innenring-material	Außenring-material	Schaden s [mm]	Restlaufzeit	Relative Laufzeit [%]	Linien-farbe
594685AG	Si3N4	M50Ni	M50Ni	2,2	6,5	10,53	lila
594684AG	Si3N4	M50Ni	M50	2,2	3,5	10,53	schwarz
594684AG	Si3N4	M50Ni	M50	1,0	4,5	17,54	braun
594687AG	Si3N4	M50Ni DH	M50Ni DH	2,2	4,5	81,58	blau
594684AG	Si3N4	M50Ni	M50	0,5	3,5	100	grün

Tabelle 4.1: Materialinformationen zu der Abbildung 4.21.

In der Tabelle 4.1 sind die relativen Restlaufzeiten nach dem messtechnischen Erfassen der ersten ferromagnetischen Partikel angegeben. Die Zusammensetzung des Stahls der Lagerlaufflächen sowie die Behandlungsmethoden der Oberflächen der Laufbahnen haben einen entscheidenden Einfluss auf das Schadensfortschrittsverhalten der Laufbahnen. Die Ergebnisse in der Abbildung 4.21 zeigen, dass unabhängig von der Größe der auf die Kugel eingebrachten Ausbrüche, der Wahl des Laufringmaterials oder der metallurgischen Behandlung der Laufflächen die Zeitspanne vom Beginn eines zunehmenden Metallabtrages bis zum Ausfall der Lager zwischen 3,5 und 6,5 Stunden liegt. Zwischen einem möglichen, zuverlässigen Nachweis von Metallpartikeln im Öl bis zum Ausfall des Lagers liegt nur eine geringe Anzahl von Stunden. Diese Ergebnisse sind wiederholbar und durchaus repräsentativ.

Es kann somit festgestellt werden, dass eine messtechnische Erkennung des Metallabtrages von Laufringen nur eine sehr späte Warnung bereitstellen kann. Für das Überwachungssystem eines Flugtriebwerks, das ausschließlich den Metallabtrag zur Fehlerindikation verwendet, ist die Zeitspanne der verfügbaren Vorwarnzeit sehr kurz. Für den Fall, dass ein Lagerüberwachungssystem geplant wird, sollte der Nachweis von Metallabtrag nicht als einzige Überwachungsmöglichkeit für ein hybrides Lager vorgesehen werden. Der Nachweis von Metallpartikeln im Öl sollte nur zur Absicherung anderer Messgrößen dienen, um eine gesicherte Schadaussage treffen zu können. Eine Schaderkennung für hybride Lager sollte zuverlässige Schadaussagen zu einem deutlich früheren Zeitpunkt bereitstellen können, als dies mit einem Metallpartikelsensor möglich ist.

4.3.2 Verbleibende Lebenszeit nach Laufbahnschäden

Es soll in Versuchen gezeigt werden, dass bei geschädigten Lagerlaufbahnen nur eine begrenzte verbleibende Lebensdauer der Lager zur Verfügung steht. Es werden Versuche auf dem Prüfstand AN58 mit Triebwerks-Hauptwellenlagern durchgeführt. In vergleichenden Versuchen werden Laufringe aus Stahl M50, M50NiL und M50NiL-DH getestet. Bei den Versuchen werden Kugeln aus Stahl M50 oder Keramik Si_3N_4 verwendet.

Die Laufflächen der Innenringe werden mit künstlichen Eindrücken vorgeschädigt (siehe Abbildung 4.22 und Abbildung 4.23). Die Schäden werden paarweise in Lastrichtung axial versetzt und in Umfangsrichtung über die Lagerlaufbahn verteilt eingebracht (siehe Abbildung 4.24). Die Eindrücke werden in einem Abstand in Umfangsrichtung so positioniert, dass sich diese in der Schadensausbreitung nicht gegenseitig beeinflussen. Mit der abgestuften axialen Anordnung dieser Schädigungen soll sichergestellt werden, dass bei jedem Kontaktwinkel eine Überrollung eines Schadens erfolgt. In den Versuchen werden Standardzyklen (siehe Abbildung 3.24) wiederholt durchfahren. Es wird untersucht, wie sich die künstlich eingebrachten Vorschädigungen vergrößern und zum Ausfall des Lagers führen.

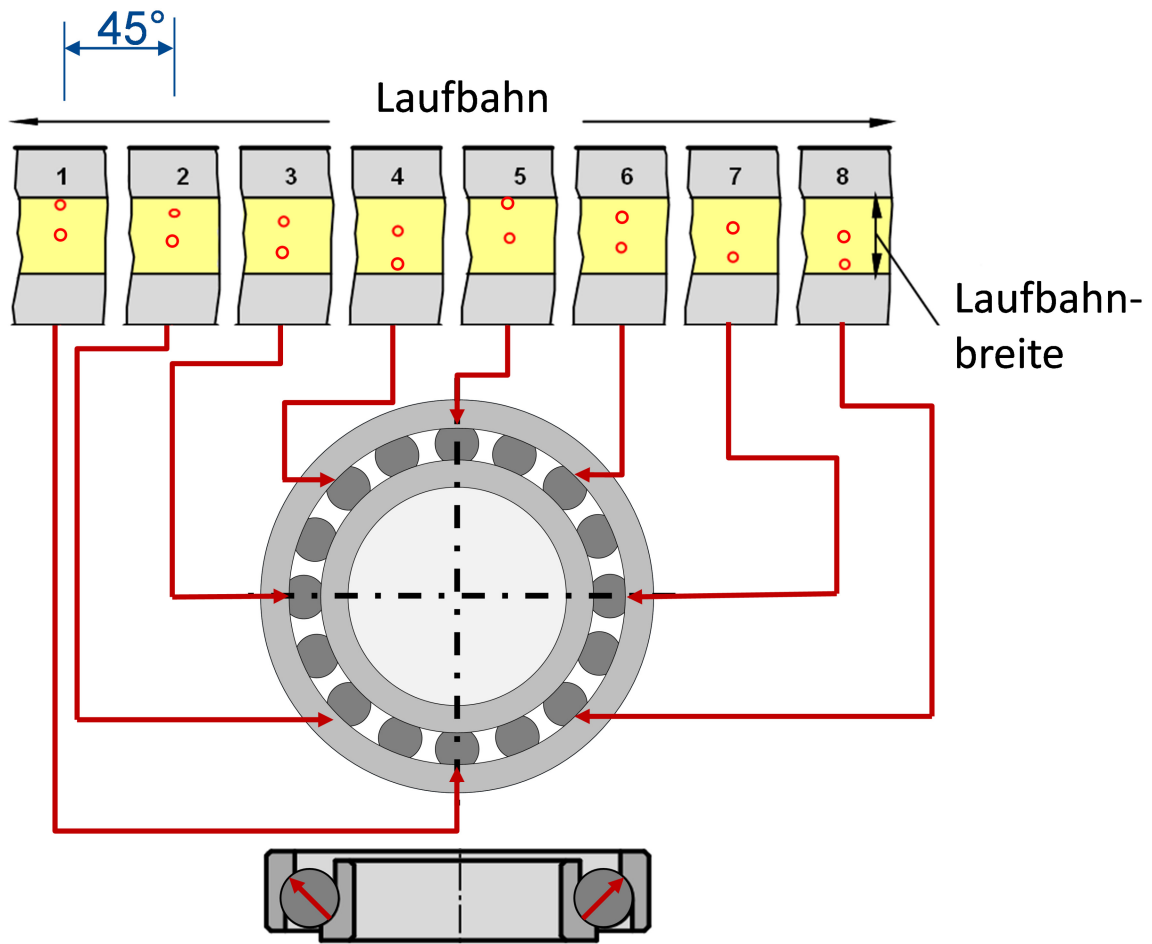


Abbildung 4.22: Vorschädigung der Innenringe [Bild FAG].

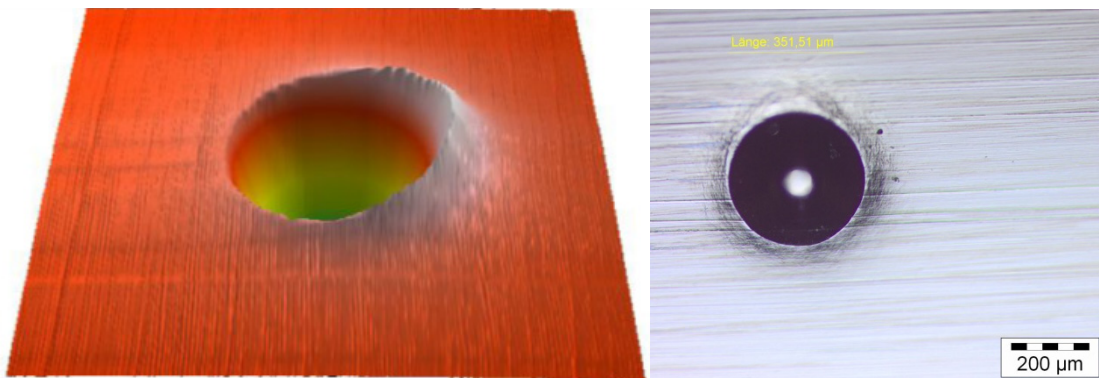


Abbildung 4.23: Bild links, 3D-Profil eines Eindrucks.

Bild rechts, Foto eines Laufbahneindrucks [Bilder FAG].

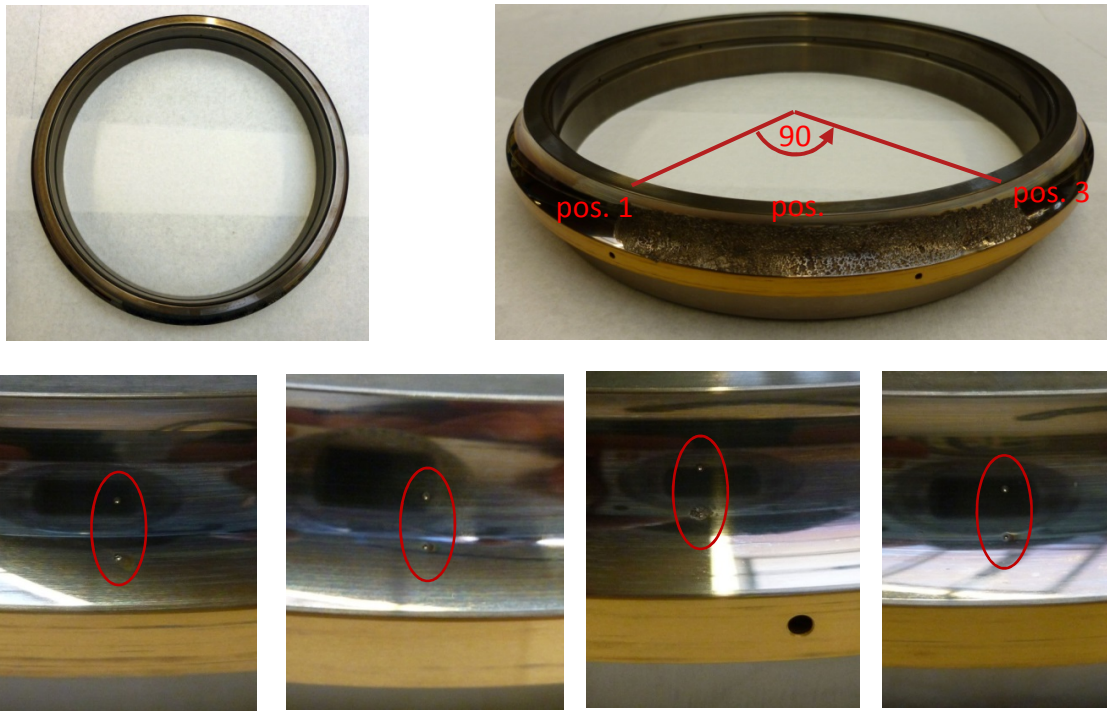


Abbildung 4.24: Bild unten, künstlich eingebrachte Innenringschäden an 4 Positionen. Bild oben, der Schadensfortschritt am Ende des Versuches [Bild FAG].

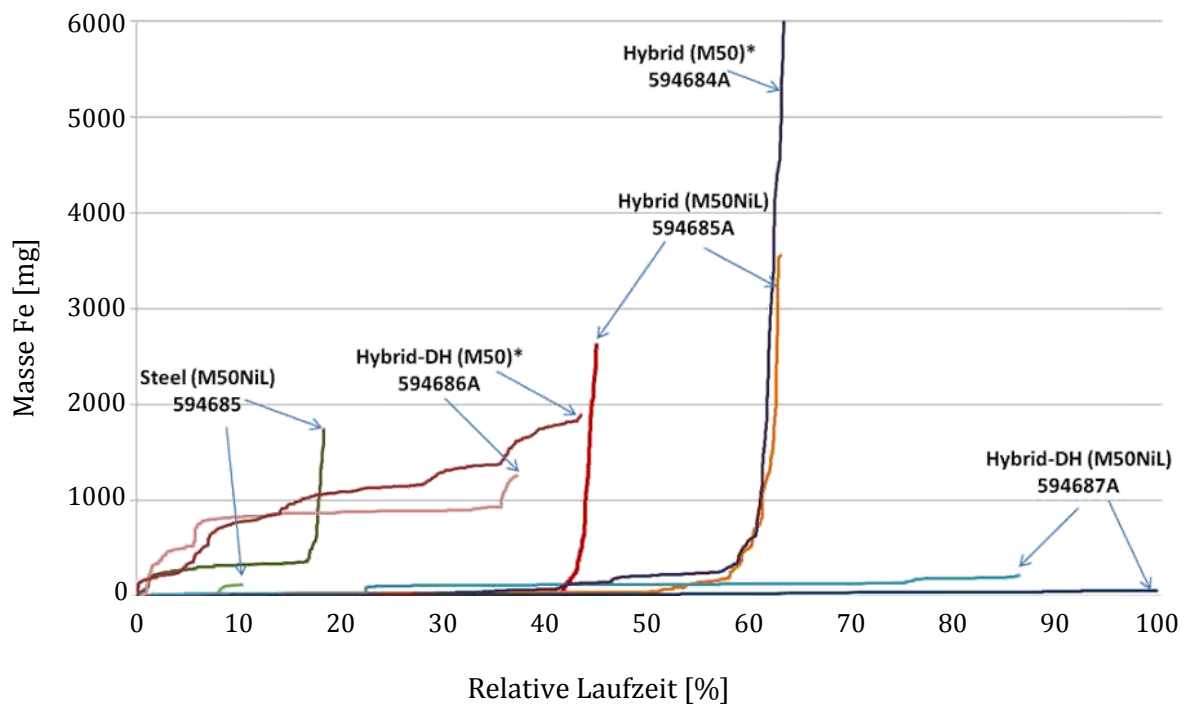


Abbildung 4.25: Metallabtrag bei vorgeschädigten Laufbahnen [Bild FAG].

Während der Versuche wird die erzeugte Menge von Metallabtrag aus den Lagerlauf-
flächen mit dem MetalSCAN System der Firma Gastops gemessen. In der Abbildung
4.25 ist in Versuchen der Verlauf des Metallabtrages bei unterschiedlichen Stahl Qua-
litäten mit vorgeschädigten Lagerringen dargestellt.

	Außenring Material	Innenring Material	Kugel Material	Relative Laufzeit [%]	Geschädigte Komponente
594684A#1	M50*	M50NiL	Si ₃ N ₄	100	OR
594685#1	M50NiL	M50NiL*	M50	9,78	IR
594685#2	M50NiL	M50NiL*	M50	17,93	IR
594685A#1	M50NiL	M50NiL*	Si ₃ N ₄	43,48	IR
594685A#2	M50NiL	M50NiL*	Si ₃ N ₄	59,78	IR
594686A#1	M50-DH*	M50NiL-DH	Si ₃ N ₄	58,70	OR
594686A#2	M50-DH*	M50NiL-DH	Si ₃ N ₄	68,48	OR
594687A#1	M50NiL-DH	M50NiL-DH*	Si ₃ N ₄	84,78	IR
594687A#2	M50NiL-DH	M50NiL-DH*	Si ₃ N ₄	98,91	IR

*Vorgeschädigte Komponente

Abbildung 4.26: Ausfallzeiten bei unterschiedlichen Laufring Qualitäten
[Tabelle FAG].

Als Fazit wird festgestellt, dass die verbleibende Lebensdauer eines Lagers nach einer
Schädigung der Laufbahnen von den eingesetzten Stählen und den Bearbeitungsver-
fahren für die Oberflächenbeschaffenheit der Stähle abhängt. In der Abbildung 4.25
ist zu erkennen, dass Anfangsschäden auf den Lauflächen bei Hybridlagern unkriti-
scher sind als bei reinen Stahllagern. Angenommen wird, dass die harten ungeschä-
digten keramischen Kugeln die Anfangsschäden in einer gewissen Weise glätten kön-
nen.

4.3.3 Abschätzung der verbleibenden Lebenszeit

Es werden Methoden zur Abschätzung der verbleibenden Lebenszeit eines hybriden
Lagers nach dem Eintritt eines Schadens erörtert.

4.3.3.1 Schätzung der verbleibenden Lebenszeit modellbasiert

Eine Methode zur Abschätzung der verbleibenden Lebenszeit nach dem Eintritt eines
Lagerschadens bietet der Aufbau eines Modells, das die verbleibende Lebenszeit des
Lagers beinhaltet. Die verfügbare Lebenszeit wird aus Daten der gesamten Trieb-
werksflotte ermittelt. Die aktuelle Lebenszeit wird anhand des Verlaufes der Ein-
gangsgrößen heruntergerechnet. Die Eingangsgrößen sind die Überrollhäufigkeit, die

Last bei der Schadüberrollung, die Anfangsgröße des Schadens, die Temperatur der Lagerkomponenten. Der Anfangswert der verbleibenden Lebenszeit hängt ab von dem Zeitpunkt der Schaderkennung (siehe Abbildung 4.1). Feste Eingangswerte sind die Materialeigenschaften der Lagerkomponenten.

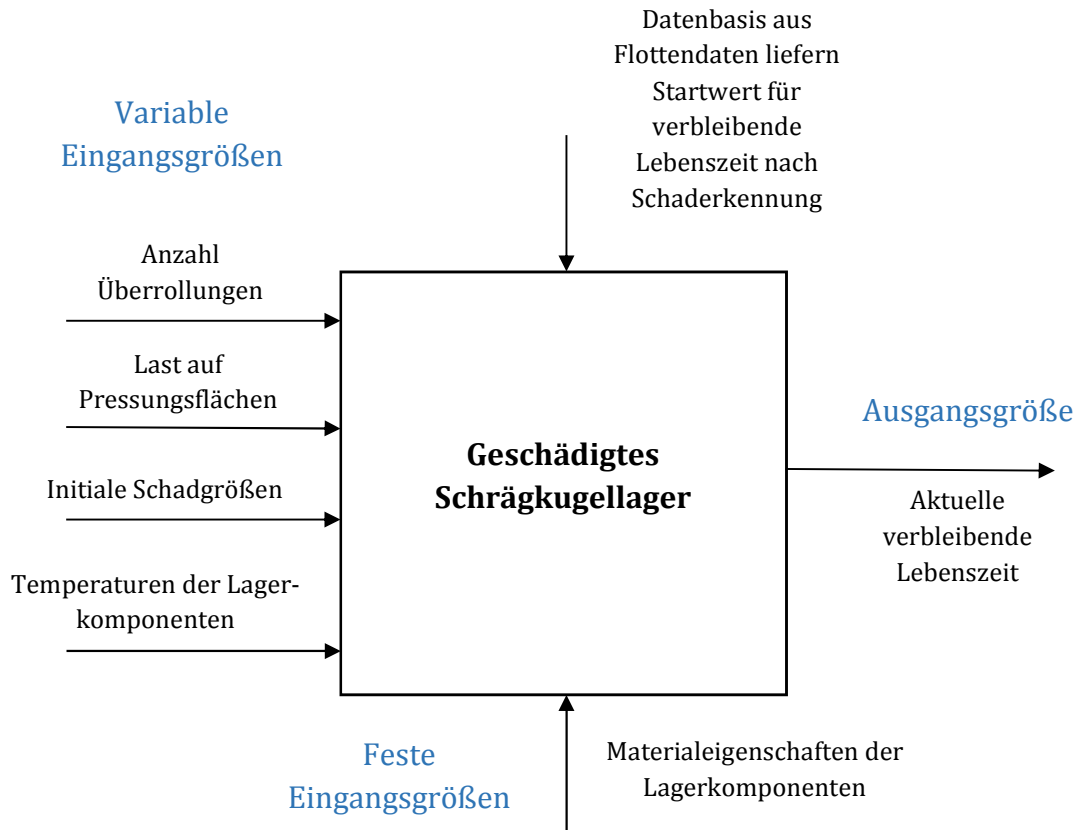


Abbildung 4.27: Modell zur Schätzung der verbleibenden Lebenszeit.

Ein Modell sollte aus den genannten Eingangsgrößen eine Schätzung für die verbleibende Lebenszeit eines Lagers bereitstellen. Dabei sollte ein Unsicherheitsfaktor für die gelieferte Aussage mit berechnet werden. Die Erkennung eines Lagerschadens und die Zuordnung des Schadens zu der Lagerkomponente (siehe 5.3) sind die Vorbedingungen für eine Schätzung. Der Startwert für die verbleibende Lebenszeit nach einer Schaderkennung wird aus den Eingangsgrößen und den Materialeigenschaften der Lager ermittelt.

Die Überrollamplituden und Frequenzen aus den Piezoelementen ermöglichen die Bestimmung der Lagerlast (siehe Kapitel 5.2). Eine andere Möglichkeit besteht darin, die Last aus zuvor ermittelten Tabellenwerten zu bestimmen. Der Nachteil hierbei ist, dass die Degradierung eines Triebwerks nur schwer in Tabellen abgebildet werden kann. Die messtechnische Erfassung der Häufigkeit von Schadensüberrollungen bei Kugelschäden wird im Kapitel 3.4 behandelt. Ein Vorgehen für die Schätzung der initialen Schadgröße auf einer keramischen Kugel aus Messsignalen wird im Kapitel 4.5 gezeigt. Die Größe eines Kugelschadens könnte aus den Amplituden der hochpassgefilterten Körperschallsignale geschätzt werden [8EA]. Die Angaben zu den Materialei-

genschaften der Lagerkomponenten müssen Bearbeitungsverfahren für die Oberflächen der Laufbahnen (Härten usw.) enthalten. Angaben zu den in dieser Arbeit verwendeten Materialien finden sich im Anhang 7.9. Der Einfluss der Temperaturen auf die Materialien der Lagerkomponenten ist zu berücksichtigen.

4.3.3.2 Schätzung der verbleibenden Lebenszeit über den Signalverlauf

Eine andere Möglichkeit, die verbleibende Lebensdauer eines Lagers nach dem Eintritt eines Schadens zu bestimmen ist, den Verlauf der Schadsignale über der Zunahme des Schadens auszuwerten.

Ausgewertet wird die Veränderung der Signalthöhe und die Veränderung der erkannten Überrollhäufigkeit über einen Lagerschaden (siehe Kapitel 5.3.2 und 5.3.3).

Aus empirisch ermittelten Erfahrungen und der Messung, der Zunahme der Amplitude und der Anzahl erkannter Schadüberrollungen wird die verbleibende Restlaufzeit des Lagers geschätzt. Der Einfluss der Lagermaterialien ist bei diesem Vorgehen in den empirisch gewonnenen Vergleichsdaten bereits enthalten.

Eine Erweiterung ist durch den Aufbau einer triebwerksübergreifenden Datenbasis denkbar. Es könnten Daten von bereits stattgefundenen Schadensereignissen in eine globale Datenbasis eingebaut werden. Die Daten der Sensorsignale vergleichbarer Schadfälle können die Qualität von Vorhersagen über einen Schadensverlauf verbessern. Das gezielte Sammeln von Daten für eine spätere Anwendung auf artgleichen Triebwerken sollte schon in der Planung eines Triebwerksprojektes vereinbart werden.

4.3.3.3 Fazit, Methoden zur Abschätzung der verbleibenden Lebenszeit nach Erkennung eines Schadens

Eine Abschätzung der verbleibenden Lebenszeit nach einem Schadenseintritt über den Verlauf von Schadsignalen kann schon unmittelbar nach der Einführung eines neuen Triebwerks erfolgen.

Eine Abschätzung der verbleibenden Lebenszeit, die modellbasiert stattfindet, ist erst nach der Gewinnung von Vergleichsdaten und dem Aufbau einer ausreichenden Datenbasis durchführbar. Zu beachten ist, dass nur Fehlerfälle zu einer Datenbasis beitragen können. Wird von wenigen Lagerfehlern ausgegangen, dann kann der Aufbau einer Datenbasis einen langen Zeitraum benötigen.

Die Kombination einer modellbasierten Herangehensweise mit der Erkennung der aktuellen Schadzunahme durch den Verlauf der Sensorsignale könnte zu einer optimierten Aussage über eine verbleibende Lebenszeit nach einem Schadenseintritt einer Lagerkomponente beitragen.

4.4 Bestimmung der Axialkraft im Schrägkugellager

Die Kenntnis der Last bei der Überrollung eines Lagerschadens ist eine der notwendigen Komponenten, um eine Abschätzung der verbleibenden Lebensdauer nach dem Eintritt eines Lagerschadens abgeben zu können. In einer Machbarkeitsstudie wird untersucht, ob mit den Signalen von am Lageraußenring installierten Piezoelementen (siehe Abbildung 4.28) eine Bestimmung axialer Lasten möglich ist.

Durch das Abrollen der Kugeln auf den Laufflächen wird eine zyklische Last aufgebracht (siehe Abbildung 5.3). Die bei der Überrollung der Außenringe auftretenden Verformungen werden an die angebrachten Piezoelemente weitergegeben. Die Verformung der Piezoelemente ist abhängig von der Masse der Kugeln M_B , der Umlauffrequenz der Kugeln f_C im Lager und dem radialen Umlaufradius r_m der Kugeln im Schrägkugellager. Es ergibt sich der Kontaktpunkt OP mit dem Kontaktwinkel α_O auf dem Radius r_{OR} .

Im Rahmen der durchgeführten Versuche kommt es zu Temperaturänderungen von 126°C bis 209°C. Bei einem verwendeten Ringmaterial von M50 Stahl bedeutet eine Temperaturänderung von $\Delta 83^\circ\text{K}$ eine Veränderung des Elastizitätsmoduls um 1,56%. Der Temperatureinfluss auf das Piezoelement vom Typ PIC 255 ist in Kapitel 7.10 dargestellt. Für diese Untersuchung wird der Temperatureinfluss auf die Elastizität der Lageraußenringe vernachlässigt. Ebenfalls wird der Einfluss der Temperatur auf die Piezoelemente nicht berücksichtigt.

4.4.1 Instrumentierung axiale Lastmessung

Es wird die in der Abbildung 4.28 dargestellte Instrumentierung für ein Triebwerks-Hauptwellenlager gewählt. Der Lageraußenring wird für den Versuch an der Stirnseite mit Sensorelementen an den vorgegebenen Positionen bestückt (siehe Tabelle 4.2). Zusätzlich zu den Sensoren an der Stirnseite des Außenringes wird ein Sensor an den Federstegen des Lagers angebracht (siehe Abbildung 3.21).

Es werden die Qualität und Amplitude der Sensorsignale in Abhängigkeit von den radialen Positionen der Sensorelemente auf der Stirnseite des Lageraußenringes überprüft. Dazu werden geringfügig unterschiedliche radiale Positionen für Sensorelemente auf der Stirnseite des Lageraußenringes gewählt. Die Anbringung von Sensorelementen innerhalb und außerhalb der Lastzone soll Hinweise auf die Veränderung des Lastvektors beim Durchlaufen der Lastzone liefern.

Es werden die Piezoelemente PIC 255 und PIC 300 (siehe Kapitel 7.10) für diese Anwendung verwendet.

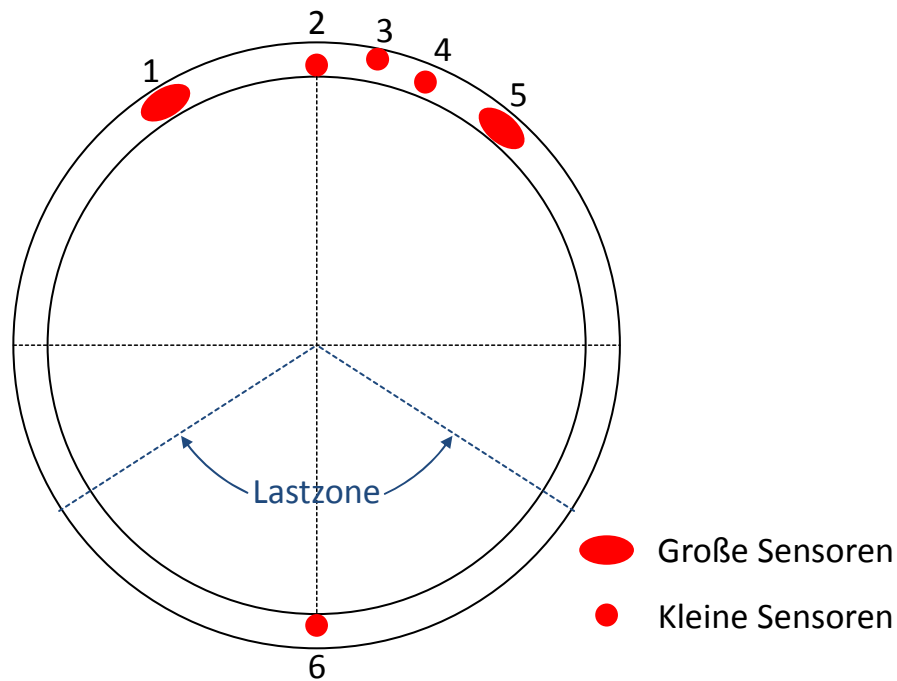


Abbildung 4.28: Positionen der piezoelektrischen Sensorelemente auf der Stirnseite des Außenrings mit radialen Variationen des Abstandes der Sensorelemente zur Lagerachse und Positionen innerhalb und außerhalb der Lastzone des Lagers [7EA].

Positionen der piezoelektrischen Sensorelemente:			
ID	Piezoelement	Größe	Position der Befestigung auf dem Ring der Stirnseite
1	PIC300	6x10 mm	Radial mittige Platzierung (großes Sensorelement)
2	PIC255	Ø4 mm	Radial geringerer Abstand zur Lagerachse
3	PIC255	Ø4 mm	Radial größerer Abstand zur Lagerachse
4	PIC255	Ø4 mm	Radial mittige Platzierung (kleines Sensorelement)
5	PIC255	6x10 mm	Radial mittige Platzierung (großes Sensorelement)
6	PIC255	Ø4 mm	Radial geringerer Abstand zur Lagerachse Position in der Lastzone
7	PIC255	Ø4 mm	Auf den Federstegen des Lagers angebracht, siehe Abbildung 3.21

Tabelle 4.2: Beschreibung der im Versuch verwendeten Sensoren und Positionen [7EA].

4.4.2 Vortest zur Generierung von Referenzwerten

Für eine spätere Lastschätzung an einem Hauptwellenlager werden in einem Vortest Referenzwerte generiert. Auf dem Prüfstand AN58 werden die Wellenfrequenzen f_s stufenweise bis 250 Hz und die axialen Lasten $\vec{F}_{axial}$ stufenweise bis 100 kN verfahren. Die axialen Lasten werden durch einen hydraulischen Lastzylinder im Versuchsaufbau (siehe Abbildung 3.19 und Abbildung 3.20) aufgebracht. Es werden aus den Signalen der Piezoelemente die Käfigfrequenzen f_c und die Höhe der Amplituden ermittelt. Die Messungen erfolgen im Abstand von 35 Sekunden für eine Sekunde. Jede Sekunde ergibt in der Mittelung einen Datenpunkt.

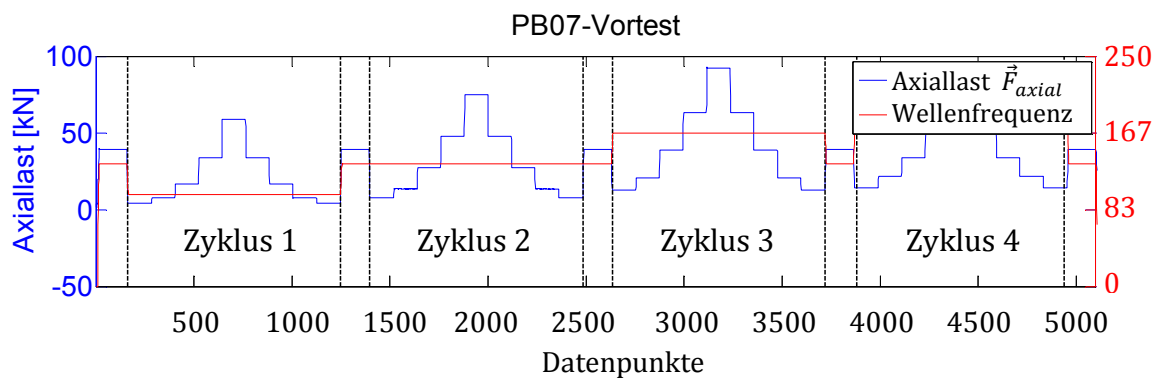


Abbildung 4.29: Axialkraft $\vec{F}_{axial}$ und Wellenfrequenz f_s während des Vortests zur Gewinnung von Referenzwerten.

Die Käfigfrequenzen f_c ergeben sich aus den gemessenen Überrollfrequenzen der Kugeln aus den Signalen der Piezoelemente. Die gewünschten Referenzwerte werden 3 mal angefahren und die Mittelwerte der dabei gemessenen Werte gebildet. Als Referenzwerte werden die Käfigfrequenzen f_c , die Überrollamplituden der Piezoelemente und die axial aufgebrachten Kräfte abgespeichert. Die abgespeicherten Werte der Referenzmessungen ermöglichen einen Vergleich mit aktuellen Betriebszuständen. Die Referenzwerte aus den einzelnen Datensätzen können in Tabellen übernommen werden. Aus diesen Tabellen können bei einer anschließenden Anwendung über eine Interpolation zwischen oder Extrapolation außerhalb der Tabellenwerte die axialen Kräfte ermittelt werden. Eine andere Möglichkeit der Bestimmung der axialen Kräfte mit Hilfe der zuvor gemessenen Referenzwerte besteht darin, die zusammengehörigen Datensätze als „Stützpunkte“ für eine zu bildende Näherungsfunktion zu verwenden. Dabei kann über ein „Kleinstes Quadrate“ Verfahren eine Näherungsfunktion zu den zuvor gemessenen Referenzwerten gebildet werden.

Bei der Auswahl der Referenzwerte zur Bildung der Stützpunkte für die Näherungsfunktion wird auf eine möglichst gleichmäßige Verteilung der Stützpunkte über dem späteren Arbeitsbereich geachtet, damit die aus der Näherungsfunktion über den Arbeitsbereich gewonnenen Werte eine gleichbleibende Güte aufweisen.

Aus Kostengründen wird der Prüfstandslauf zur Generierung der Referenzwerte gemeinsam mit einem Lebensdauerversuch gefahren. Daraus ergeben sich Einschränkungen bei der Auswahl der möglichen Referenzwerte, da der Lebensdauerversuch durch die Generierung von Referenzwerten möglichst nicht beeinflusst werden soll. Ein vorzeitiger Ausfall des Lagers soll vermieden werden. Hohe Lasten können somit nur in reduziertem Umfang gefahren werden. Somit können die Referenzpunkte nicht optimal gewählt werden. Für eine spätere Anwendung sollte zur Generierung der Referenzpunkte eine geeignete Auswahl von Drehzahlen und Lasten in statistisch ausreichender Anzahl gefahren werden. Eine optimale Auswahl der Referenzpunkte könnte mit der Hilfe einer statistischen Versuchsplanung (DoE) getroffen werden.

4.4.3 Näherungsfunktion über Referenzwerte

Es wird eine Näherungsfunktion über die gemessenen Referenzwerte (siehe Abbildung 4.30) der Eingangsgrößen gebildet. Eingangsgrößen sind die Axialkraft $\vec{F}_{axial}$ auf den Lageraußenring, die Umlauffrequenz f_c der Kugeln und die Amplitude eines Piezoelementes.

Für die Machbarkeitsuntersuchung der Lastschätzung wird ein einfaches Polynom 2 ter Ordnung verwendet.

$$f(C, P) = F = a + b \cdot C + c \cdot P + d \cdot C \cdot P + e \cdot C^2 + f \cdot P^2 \quad (4.1)$$

Dabei wird die Amplitude $\hat{U}_{UE}$ eines Piezoelementes als P, die Käfigfrequenz f_c als C und die Axiallast $\vec{F}_{axial}$ als F angenommen. Die bei der Ermittlung der Referenzwerte unterrepräsentierten Bereiche im höheren Lastbereich werden durch eine manuelle Gewichtung angehoben, um bei einer Validierung eine möglichst gleichbleibende Abweichung der Näherungsfunktion von den gemessenen Werten über dem gesamten Arbeitsbereich zu erhalten. Vor der Bildung der Näherungsfunktion erfolgt eine Plausibilitätsprüfung der gemessenen Referenzwerte. Nicht konsistente Werte, wie hohe Axiallasten bei fehlenden Amplituden der Sensorsignale, werden nicht berücksichtigt.

Zur Berechnung der Näherungsfunktionen wird die *MATLAB*-Erweiterung *Curve Fitting Toolbox* (Version: R2010b) verwendet. Es werden Werte für die Güte der Näherungsfunktion berechnet, Adj. R-Square (*Degrees of Freedom Adjusted R-Square*) und RMSE (*Root Mean Squared Error*).

Die Nummern #1 bis #6 bezeichnen die jeweils verwendeten Piezoelemente (siehe Tabelle 4.2).

Piezoelement	#1	#2	#4	#6
Adj. R-Square	0,9432	0,8957	0,9680	0,7959
RMSE	4,6273	6,2678	3,4748	8,7685

Tabelle 4.3: Gütefaktoren der Näherungsfunktionen aus dem PB06-Vortest [7EA].

Piezoelement	#3	#4	#5	#6
Adj. R-Square	0,9565	0,9153	0,9655	0,9841
RMSE	5,3324	7,4431	4,7519	3,2270

Tabelle 4.4: Gütefaktoren der Näherungsfunktionen aus dem PB07-Vortest [7EA].

Die erreichte Güte dieser Schätzungen mit einfachen Polynomen wird als ausreichend betrachtet. Allerdings sollten für weitergehende Arbeiten Näherungsfunktionen verwendet werden, die bei Extrapolationen nur zu geringen Abweichungen führen.

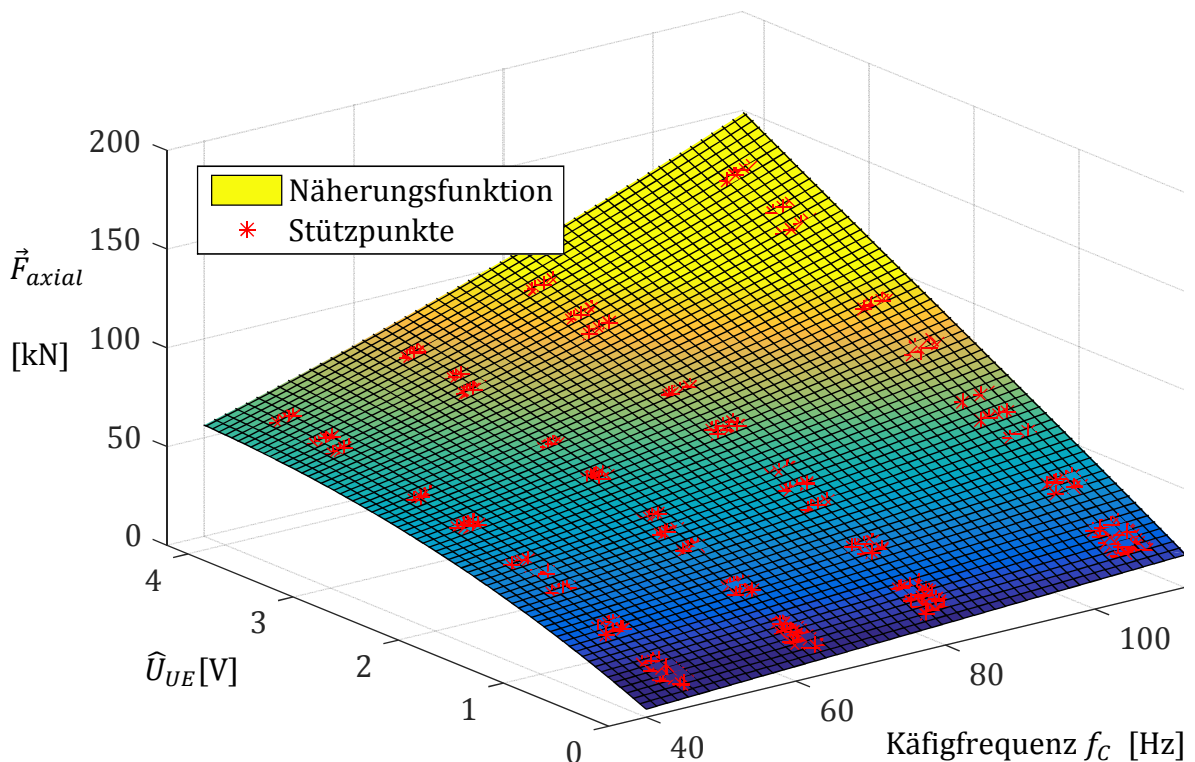


Abbildung 4.30: Näherungsfunktion über die Referenzwerte (rote Punkte) aus den Vorversuchen (siehe Kapitel 4.4.2). $\hat{U}_{UE}$ [V] ist die bei der Überrollung der Sensorelemente entstehende Amplitude in Volt, mit der Käfigfrequenz f_c [7EA].

Bei einer künftigen Verwendung von Piezoelementen für eine derartige Anwendung muss sichergestellt werden, dass deren Ausgangssignale eine ausreichende Stabilität bezüglich Temperaturen, Vibrationen und anderen Einflüssen aufweisen.

4.4.4 Messungen zur Validierung und Diskussion der Axiallastschätzung

Es erfolgen Messungen zur Validierung mit Standardflugzyklen (Kapitel 3.3.2). Die Messungen erfolgen im Abstand von 35 Sekunden für jeweils eine Sekunde. Jede Sekunde ergibt in der Mittelung einen Messpunkt. Um bei der Messung der Lasten Sensoren und Positionen untereinander vergleichen zu können, werden Sensoren unterschiedlicher Größe und Beschaffenheit an unterschiedlichen Positionen installiert (Abbildung 4.28). Die Messwerte werden mit den Piezoelementen #1 bis #6 aufgenommen. Es werden entsprechend der mit den Signalen der Piezoelemente ermittelten Amplituden und Überrollfrequenzen die zugehörigen Axialkräfte auf der Näherungskurve (Abbildung 4.30) ermittelt und mit den Sollgrößen der Axialkräfte verglichen. Bei hohen Lasten kommt es zu einer Abweichung (Abbildung 4.32) von den realen vorgegebenen axialen Lasten um 20 %. Referenzwerte für hohe Lasten können nur eingeschränkt angefahren werden, da nachfolgende Versuche nicht durch einen vorzeitigen Verschleiß beeinflusst werden sollen. Dies führt in der Folge erwartungsgemäß zu Abweichungen der geschätzten Werte von den gemessenen Referenzwerten in den höheren Lastbereichen.

Die Empfindlichkeit der Sensorelemente der Serie PIC 255 zeigt gute Ergebnisse bei der Erkennung von Überrollungen durch die Kugeln. Die getesteten Elemente dieser Serie mit einer großen Grundfläche von 6x10 mm (Piezoelement #5), zeigen die besten Ergebnisse. Auch die Piezoelemente an den Federstegen des Lagers (siehe Abbildung 3.21) zeigen noch eine Überrollung durch die Kugeln. Allerdings sind die Signale des Piezoelementes #7 undeutlich, weshalb diese nicht im Diagramm (Abbildung 4.31) dargestellt werden.

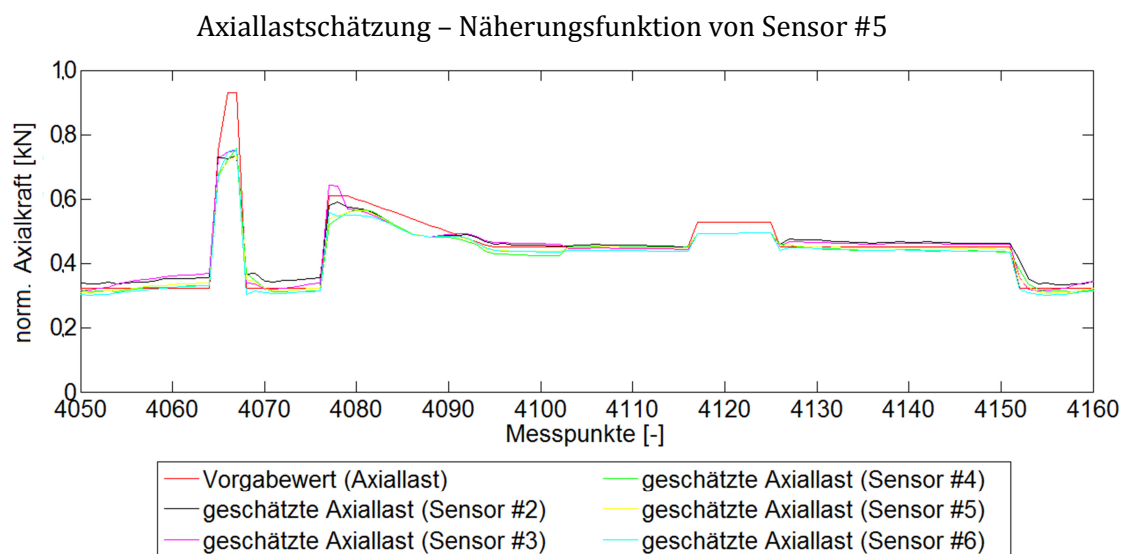


Abbildung 4.31: Messung der Axiallast mit den Piezoelementen #1 bis #6 [7EA].

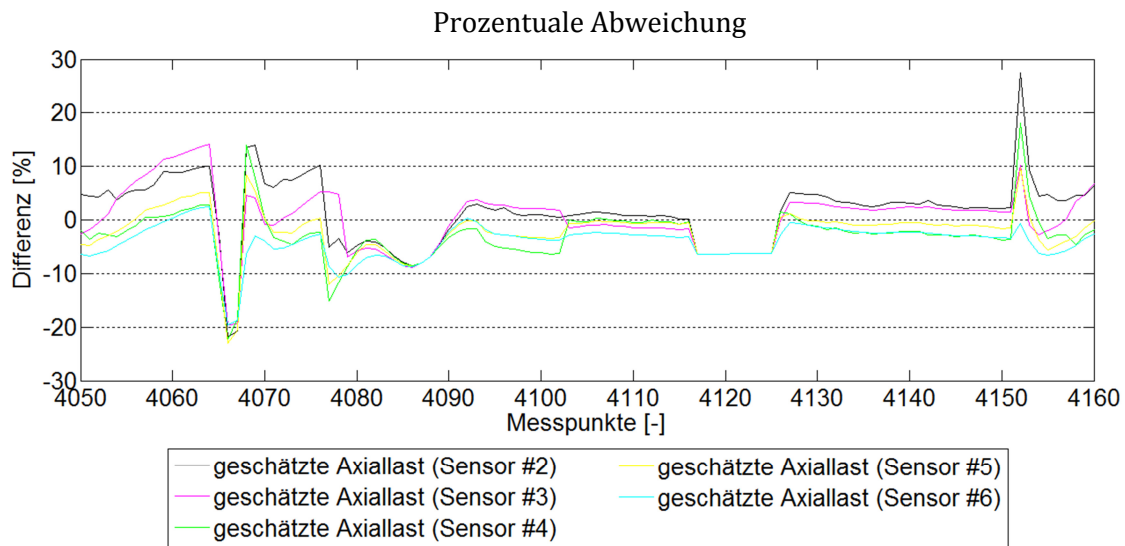


Abbildung 4.32: Abweichungen (Solllast - Messwerte) Piezoelemente #1 bis #6 [7EA].

Ein Teil der in Abbildung 4.32 erkennbaren Abweichungen der geschätzten von den gemessenen Werten kommt durch die nicht berücksichtigten Temperatureinflüsse zustande. In späteren Anwendungen müssen die Temperaturabhängigkeit des Piezomaterials wie auch die Temperaturabhängigkeit des Elastizitätsmoduls des Lagermaterials berücksichtigt werden. Die Temperatur an einem Außenring kann im Betrieb in einem Flugzeugtriebwerk von -40°C (beim Start in kalter Umgebung) bis zur Temperatur von $+220^{\circ}\text{C}$ im Fehlerfall gehen. Es sollte eine geeignetere Näherungsfunktion für die Bildung der Referenz gewählt werden. Die Näherungsfunktion sollte das physikalische Verhalten möglichst abbilden, um größere Abweichungen bei Extrapolationen zu vermeiden. Die Stützpunkte für die Bildung der Näherungsfunktion sollten so gewählt werden, dass die zu bildende Näherungsfunktion das Arbeitsgebiet umfassend abdeckt und zu erwartende Fehler über dem Arbeitsgebiet gleichmäßig verteilt sind.

Eine weitergehende Optimierung der Sensorpositionen mit den Sensortypen PIC 255 und PIC 300 wird nicht vorgenommen, da diese Sensortypen nicht ausreichend temperaturfest sind. Es wird eine Degradierung der Ausgangssignale bei den erreichten Betriebstemperaturen festgestellt. Für Produktionsanwendungen sind diese Piezoelemente durch geeignetere Typen zu ersetzen. Eine vielversprechende Alternative bieten Piezoelemente auf der Langasit Basis. Diese Piezoelemente haben eine deutlich bessere Temperaturfestigkeit. Allerdings haben die Piezoelemente der Langasitgruppe eine deutlich reduzierte Empfindlichkeit. Eine weitere Alternative könnten piezoresistive Sensorelemente bieten. Dabei handelt es sich um keramische Elemente, die kleinste leitfähige Kanäle in der Keramik besitzen. Diese Elemente verändern durch von außen angelegte Verformungen den inneren Widerstand. Zur Implementierung einer produktionstechnischen Lösung sind weitere Arbeiten notwendig.

Manöverlasten wirken nicht gleichmäßig über den Umfang eines Lagers. Sollen diese Lasten erfasst werden, dann sind mindestens zwei Piezoelemente über dem Umfang des Lagers 90° zueinander versetzt notwendig.

Alternativ zur Bestimmung einer Funktion für die axialen Lasten kann auch eine Funktion für die Gesamlasten (radiale plus axiale Kräfte) der Kugeln auf die Laufflächen bestimmt werden.

4.5 Schätzung der Schadensgröße auf einer Kugel

Versuche mit geschädigten keramischen Kugeln (siehe Kapitel 4.3.1) zeigen, dass primäre Schadensgrößen auf einer keramischen Kugel ursächlich für die verbleibende Lebenszeit eines Lagers verantwortlich sein können. Es wird nachgewiesen, dass bei kleinen Kugelschäden eine längere Restlaufzeit nach Erkennung eines Schadens vorhanden ist als bei größeren Kugelschäden (siehe Abbildung 4.33). Bei einem Kugelschaden von 0,5 mm wird die verbleibende Laufzeit des Lagers auf 100 % gesetzt. Im Vergleich dazu beträgt die verbleibende Laufzeit bei einem Schaden von 1,0 mm 20 %, bei einem Schaden von 2,2 mm 13,4 %.

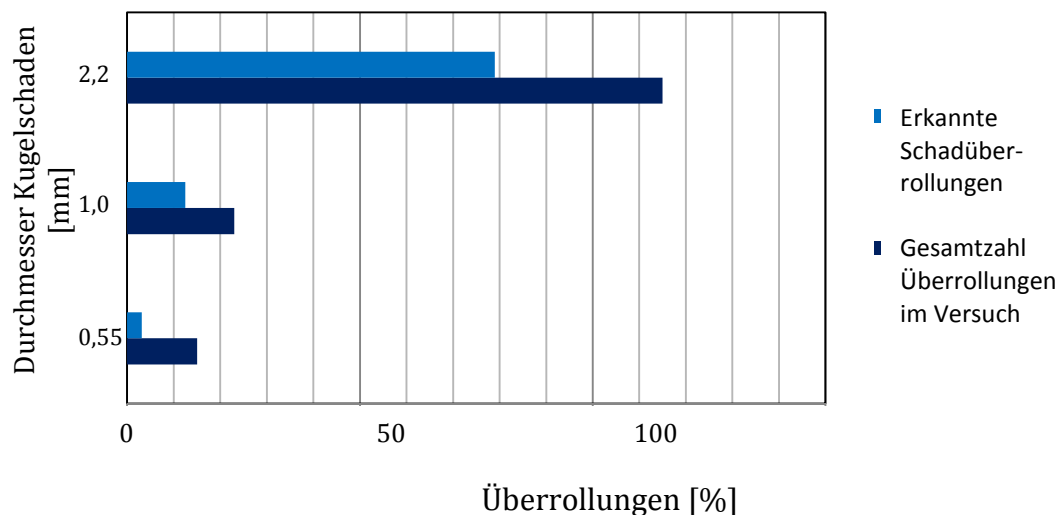


Abbildung 4.33: Exemplarisch gemessene, relative, verbleibende Lebensdauern hybrider Lager bei geschädigten keramischen Kugeln [8EA].

Für die Abschätzung der verbleibenden Laufzeit nach der Erkennung eines Schadens ist es von Vorteil, im Betrieb des Lagers den Schadensumfang auf einer Kugel durch Messungen abschätzen zu können.

Es werden Möglichkeiten untersucht, Schadgrößen auf keramischen Kugeln aus den Signalen der Schadüberrollungen bestimmen zu können. Es erfolgen Messungen mit Piezoelementen (siehe Kapitel 7.10). Gemessen werden die Amplituden der Überrollsignale und die bei der Schadüberrollung angeregten Amplituden der Eigenschwin-

gungen (siehe Kapitel 5.2.2). Diese werden nach der Höhe der Amplituden, den Frequenzen und den Abklingzeitkonstanten ausgewertet.

Um Abhängigkeiten von einer möglichen Degradierung der Sensorelemente oder Veränderungen der Messstrecke zu reduzieren, werden die Amplituden der Überrollsignale der Piezoelemente als Referenzgrößen definiert. Die Amplituden der Eigenschwingungen $\hat{U}_{Eig}$ werden auf die Amplituden der Überrollsignale $\hat{U}_{UE}$ normiert.

Zu berücksichtigen ist dabei, dass die Überrollsignale $\hat{U}_{UE}$ ungedämpft gemessen werden können, die durch Schadsignale angeregten Amplituden der Eigenschwingungen $\hat{U}_{Eig}$ sind hingegen abhängig von der Entfernung der Signalquelle zum Sensor.

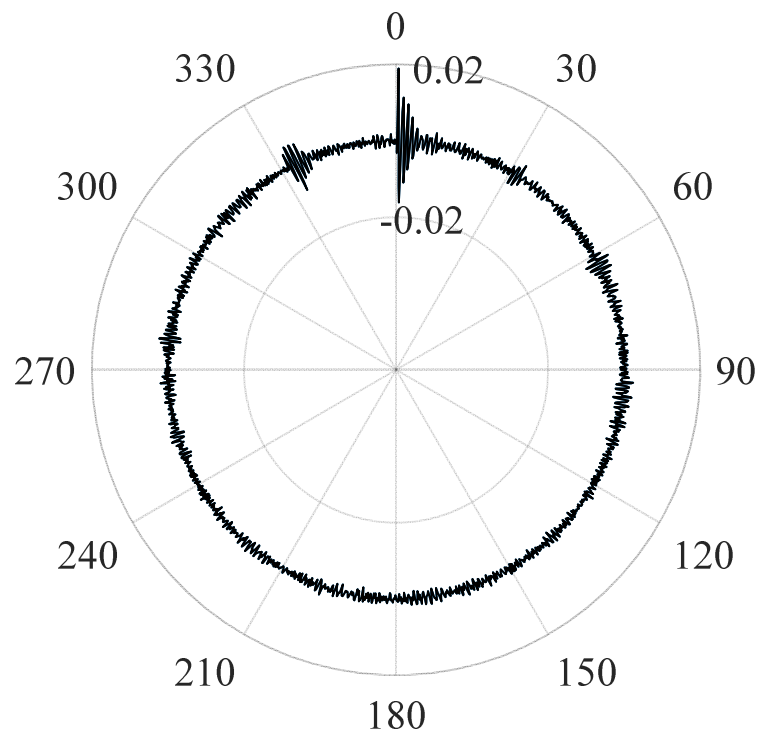


Abbildung 4.34: Über dem Umfang eines Lageraußenringes an der Position 0 gemessener Amplitudenverlauf der abklingenden Eigenschwingungen. Keramische Kugel mit Schaden auf der Kugeloberfläche, Schaddurchmesser 1,0 mm, Schadtiefe 0,2 mm [8EA].

Es werden Methoden zur Erkennung unterschiedlicher Schadgrößen auf den Kugeln getestet. Dabei wird die Qualität bei der Trennung unterschiedlicher Schadgrößen auf der Grundlage von Signalen von Piezoelementen überprüft.

Methode a): Verwendet das Maximum der auftretenden Amplituden der Eigenschwingungen $\hat{U}_{Eig}$, dividiert durch das Maximum der Amplituden aus der Überrollverformung $\hat{U}_{UE}$. Die Annahme dabei ist, dass das Maximum einer Amplitude der Eigenschwingungen $\hat{U}_{Eig}$ bei einer Schadüberrollung eines Kugelschadens in unmittelbarer Nähe des Sensorelementes erzeugt wird (siehe Abbildung 4.35). Bei einer Vielzahl von Überrollungen ist die Wahrscheinlichkeit gegeben, dass eine gute Signalpaa-

ung zu finden ist (siehe Abbildung 4.35 und Abbildung 4.36). Die Amplitude der Eigenschwingungen $\hat{U}_{Eig}$ wird aus dem Signal der Piezo-Sensorelemente am Lageraußenring gewonnen (siehe 5.2.2).

Kugelumlaufsignal und max. gemessene Eigenschwingung

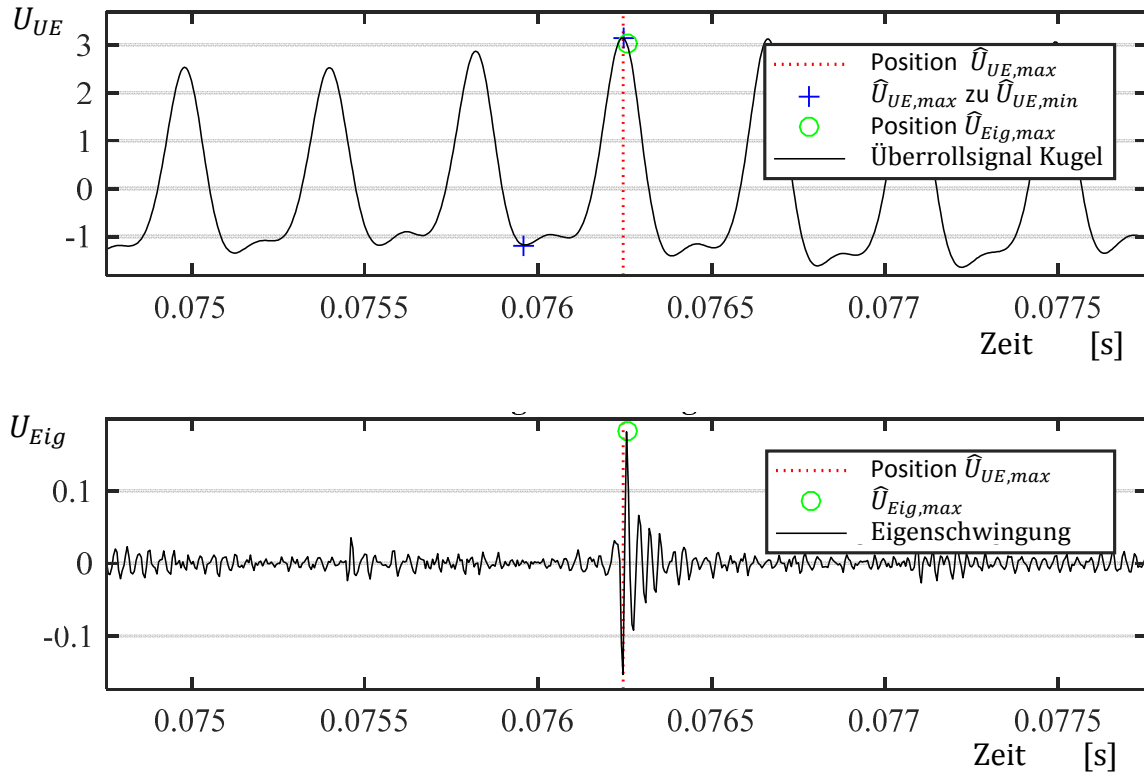


Abbildung 4.35: Bild oben: Max. Amplitude Überrollsignal $\hat{U}_{UE}$, entspricht dem halben Abstand zwischen den blauen Kreuzen. Der grüne Punkt im oberen Bild zeigt die Position der Messung der Eigenschwingung in Relation zu der maximalen Amplitude des Überrollsignals $\hat{U}_{UE}$. Bild unten: Max. Amplitude der Eigenschwingung $\hat{U}_{Eig}$ [8EA].

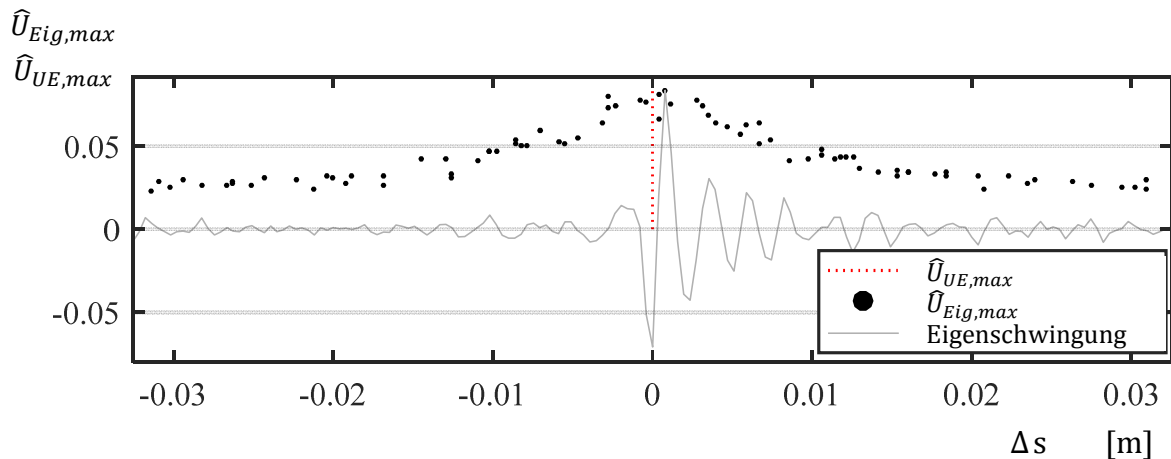


Abbildung 4.36: Amplituden von Eigenschwingungen $\hat{U}_{Eig}$ in Abhängigkeit des Abstands Δs zum Maximum der Amplitude $\hat{U}_{Eig}$ [8EA].

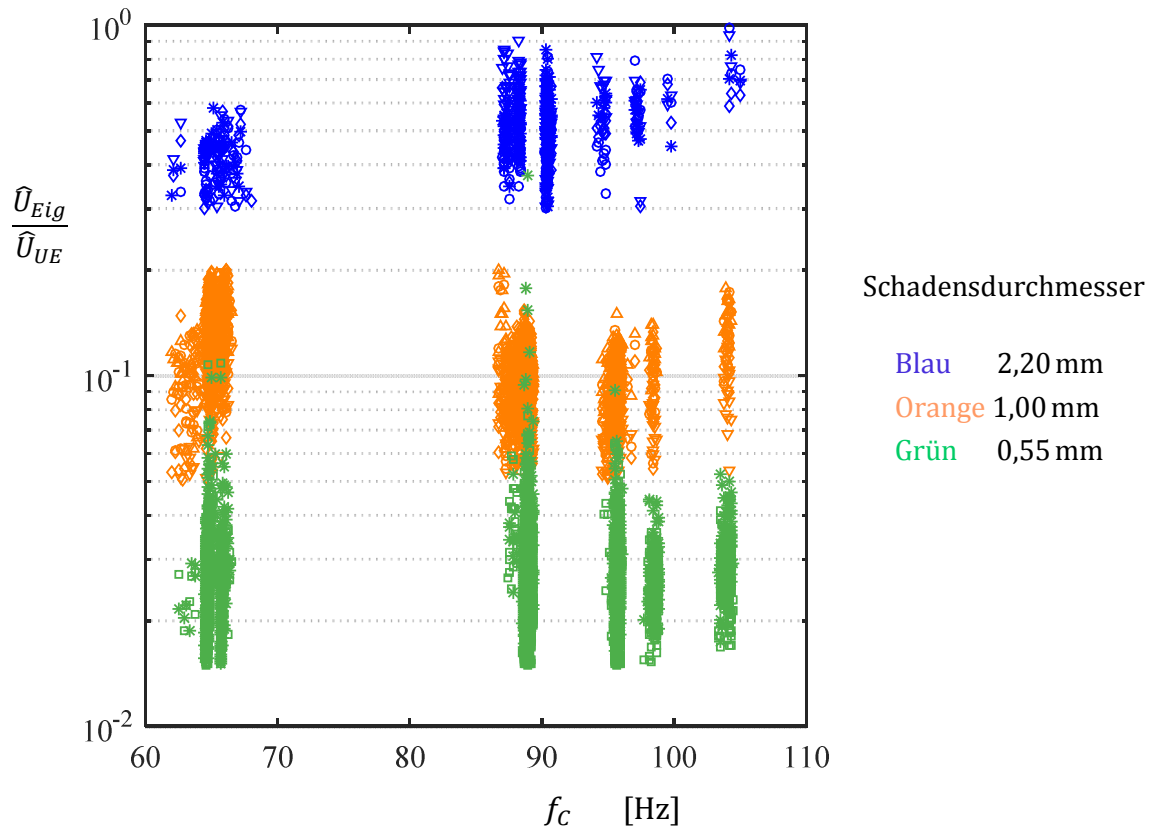


Abbildung 4.37: Erkannte Schadgrößen auf keramischen Kugeln mit der Methode a).
Berechnung, maximale Amplitude der Eigenschwingung $\hat{U}_{Eig}$ dividiert durch die maximale Amplitude des Überrollsignals $\hat{U}_{UE}$ [8EA].

Bei Schadgrößen auf den keramischen Kugeln von 2,2 mm (Abbildung 4.37 und Abbildung 4.41) degradieren die Laufringe sehr schnell, so dass für diese Schadgröße nur Daten in reduziertem Umfang erzeugt werden können.

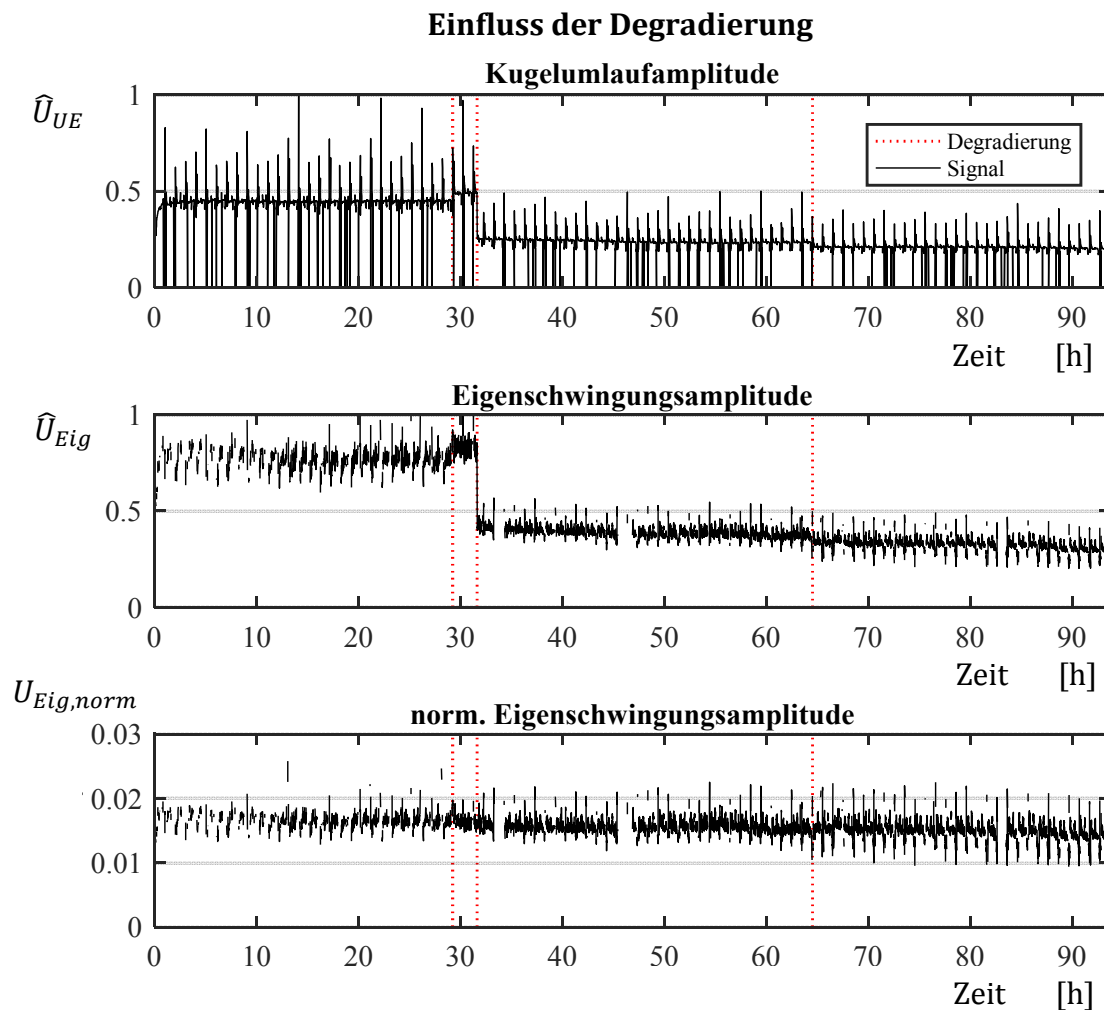


Abbildung 4.38: Degradierung des Piezo-Elementes 3 nach 30 und 64 Stunden (rote gepunktete Linien), mit Auswirkung auf die Amplituden der Überrollamplitude und der Eigenschwingung.

Kompensation der degradierten Eigenschwingungsamplitude (Mittleres Bild) durch Normierung auf die degradierte Überrollamplitude (Bild oben).

Ergebnis (Bild unten): Durch die Normierung der Eigenschwingung ist die Degradierung des Sensors nicht mehr zu erkennen [8EA].

Würde der nicht korrigierte Verlauf der Eigenschwingungsamplitude aus dem mittleren Bild der Abbildung 4.38 verwendet werden, wäre eine Schätzung der Schadgröße nicht mehr möglich. Der hier gezeigte Fall einer Degradierung des Sensorelementes stellt einen extremen Fall dar, der in einer realen Applikation so nicht auftreten sollte. Dennoch kann mit diesem Beispiel gezeigt werden, wie die notwendige Robustheit durch dieses Vorgehen gesteigert werden kann.

Eigenschwingung vor und nach der Degradierung des Piezoelementes PIC 255

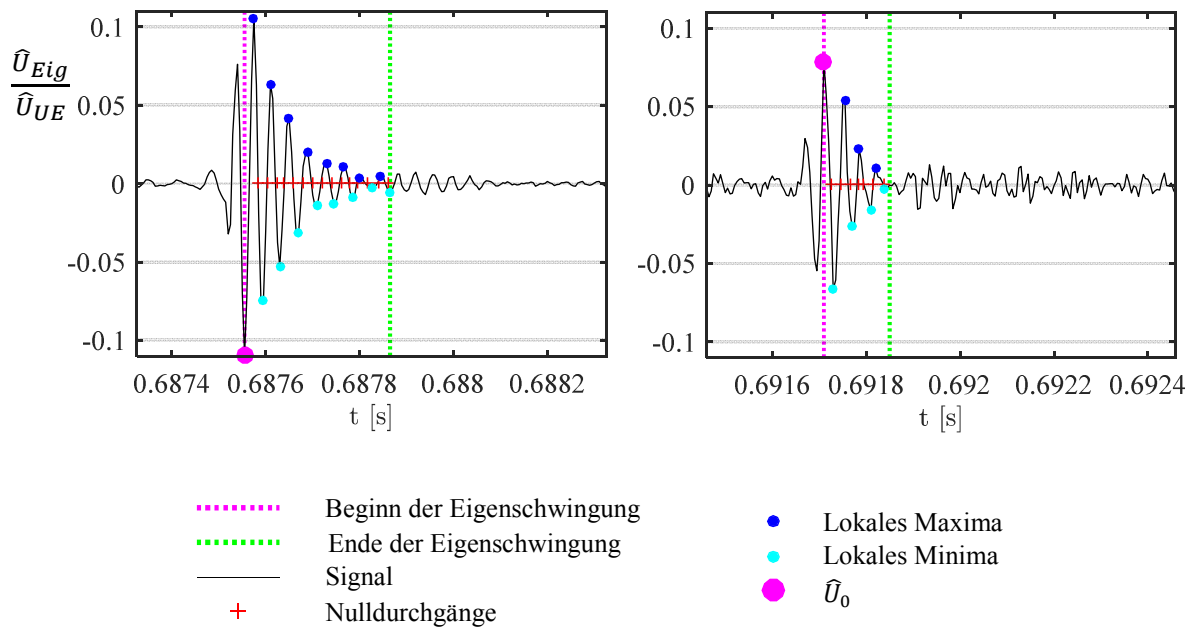


Abbildung 4.39: Schätzung der abklingenden e-Funktion mit der Methode a) [8EA].

Das Ende der erkannten abklingenden Eigenschwingungen in der Abbildung 4.39 (grüne gepunktete Linie) wird erkannt, indem auf Äquidistanz der Nulldurchgänge geprüft wird.

Eine weitere Methode b) ermittelt die Amplituden der Eigenschwingungen U_{Eig} mit Hilfe des Hüllkurvenspektrums (siehe Kapitel 5.2.4). Dabei ist zu beachten, dass diese Amplituden aus der gesamten Datenreihe ermittelt werden.

In dieser Ausführung werden im Spektralbereich die Grundschiwingung der Eigenfrequenz und zwei harmonische Schwingungen der Eigenfrequenz addiert um einen Kennwert für die Höhe der Amplituden der Eigenfrequenz U_{Eig} zu erhalten. Die Anzahl der harmonischen Frequenzen, die Verwendung finden können, hängt ab von dem in der Messanordnung vorhandenen Nutz/Rauschsignalverhältnis.

Um eine Norm für die aus den Hüllkurven ermittelten Werte zu bekommen, wird der Mittelwert der maximalen Amplituden aus der Überrollverformung U_{UE} der defekten Kugel aus demselben vollständigen Datensatz bestimmt, mit dem das Hüllkurvenspektrum bestimmt wurde.

Die Amplitude des Mittelwertes der Eigenschwingung (Amplitude der Hüllkurve) und die Amplitude des Mittelwertes der Überrollsignale gehören zu unterschiedlichen Positionen der Entstehung.

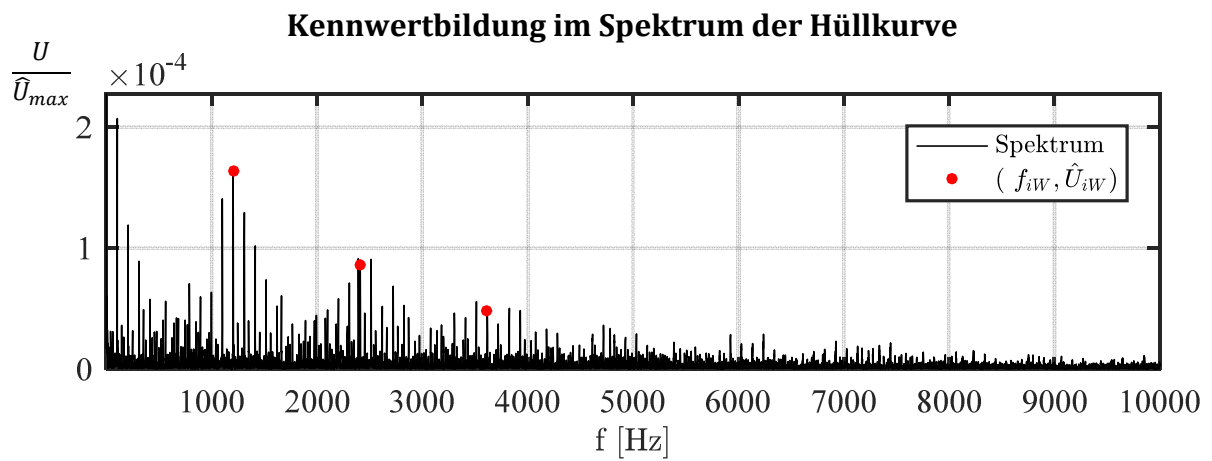


Abbildung 4.40: Hüllkurvenspektrum der abklingenden Eigenschwingungen. Drei Punkte dienen zur Bestimmung der Kennwerte für die Amplitude der Eigenfrequenzen [8EA].

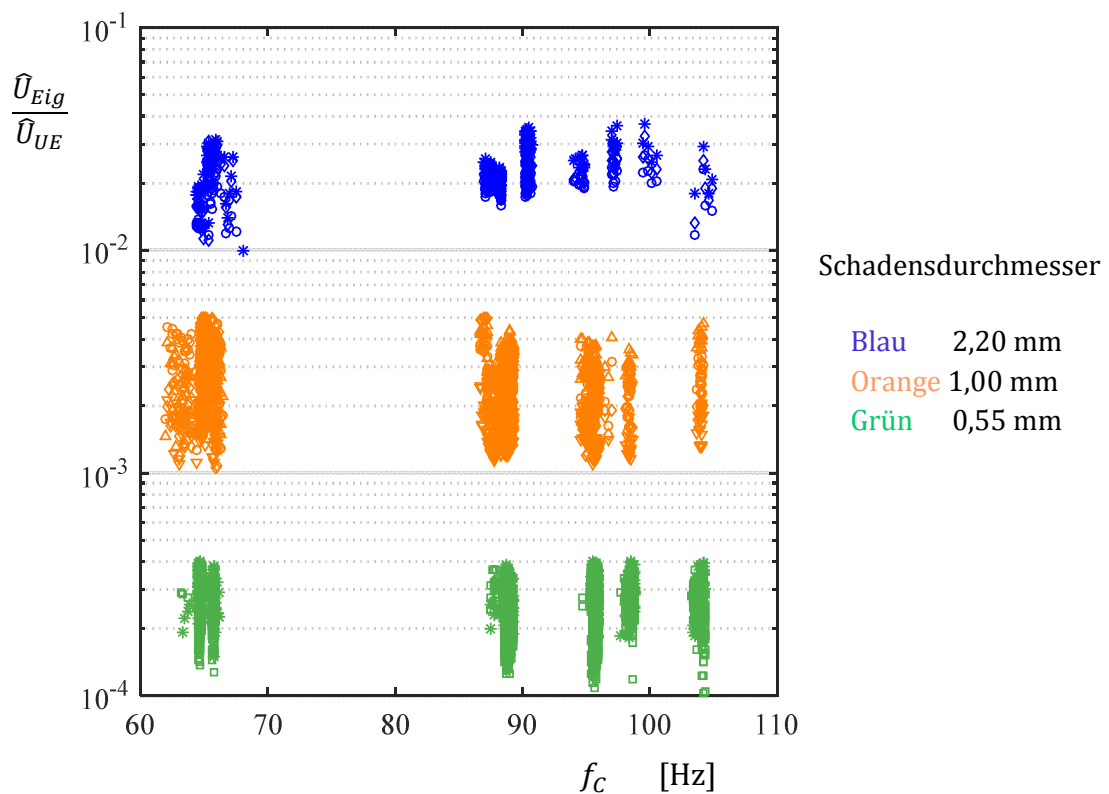


Abbildung 4.41: Gute Trennung der Schadgrößen auf keramischen Kugeln mittels der Methode b), Amplituden der Hüllkurven [8EA].

Es werden 3 Versuche mit unterschiedlichen Schadgrößen auf der Oberfläche von keramischen Kugeln durchgeführt. Als Sensorelemente werden Piezoelemente des Typs PIC 255 (siehe Kapitel 7.10) verwendet.

Die Amplituden der Hüllkurven der Eigenschwingungen werden auf die Mittelwerte der Überrollamplituden normiert.

In der Abbildung 4.41 ist zu erkennen, dass eine gute Trennung der Schadgrößen auf den Kugeln erreicht werden kann. Die Schadgrößen auf den Kugeln von 0,5 mm, 1,0 mm und 2,2 mm werden unterschieden.

Die gute Trennung bei der Verwendung der Methode b), der Verwendung der Amplitude der Hüllkurve zur Darstellung der Amplitude der Eigenschwingungen U_{Eig} , kann zum Teil damit erklärt werden, dass bei kleineren Schäden die angeregten Eigenschwingungen nicht mehr vom kompletten Lageraußenring an der Position des Piezoelementes aufgenommen werden können. Dadurch wird der Mittelwert der Amplitude über die gesamte Datenreihe kleiner. Von den größeren Schäden hingegen werden jeweils über einen größeren Anteil des Lagerringes Eigenschwingungen erfasst. Der Nachteil der Methode b) ist, dass Erfahrungswerte von erkannten Schäden schwer auf andere Lagertypen übertragbar sind.

Bei der Methode a) wurden die jeweiligen Maximalwerte an einer Position in Relation gesetzt. Bei der Methode b) ergeben sich durch die Verwendung der Hüllkurve zur Berechnung der Amplituden der Eigenschwingungen Werte, die aus Schadüberrollungen aus dem gesamten Lager gebildet werden. Die Überrollwerte stammen jedoch ausschließlich von der Position des Sensors, da die Verformungen der Kugelüberrollung außerhalb eines engen Gebietes um die Sensorposition nicht erfasst werden.

4.6 Zusammenfassung, Schadenserkennung und Schadfortschrittserkennung

Der Fokus der hier vorgestellten Arbeit liegt auf der Erkennung von Schäden auf den keramischen Kugeln. Laufringschäden und eine Erkennung von Laufringschäden in hybriden Lagern stellen kein neues unbekanntes Element dar.

Die Annahme, bei hybriden Lagern seien Anfangsschäden auf keramischen Kugeln eine kritische Größe, wird in Versuchen bestätigt. Es wird gezeigt, dass Schäden auf keramischen Kugeln, bedingt durch die hohe Härte der Kugeln, massive Folgeschäden auf den Lagerlaufbahnen provozieren können. Dagegen können frühe Schäden an den stählernen Laufbahnen der Lager durch harte keramische Kugeln zum Teil wieder geglättet werden.

Es besteht die Forderung, dass ein Kugelschaden so früh wie möglich erkannt werden soll, um eine weitreichende Beschädigung eines Lagers und den Ausfall eines Triebwerks zu vermeiden.

Die Materialdaten des verwendeten Lagerstahls und dessen Oberflächenbehandlung sind von zentraler Bedeutung für den Schadensverlauf auf den Laufringen der Lager.

Bei mehrfach gehärteten Laufbahnen kann an geschädigten keramischen Kugeln beobachtet werden, dass sich die Kanten von Ausbrüchen nach einiger Laufzeit leicht abrunden, was über die Schadkantenkontakte zu reduzierten Flächenpressungen führt. Mögliche Abrundungen der Kanten von Ausbrüchen hängen von dem Verhältnis der Härte der Keramik der Kugeln zur Härte der Laufbahnen ab.

Ein Schadensfortschritt auf den keramischen Kugeln kann Konsequenzen für den Schadensverlauf auf den Laufbahnen haben. Bei fortschreitenden Schäden auf keramischen Kugeln treten immer wieder neue scharfe Bruchkanten auf. Dadurch kann es über die scharfe Kante eines Kugelschadens fortlaufend zu konstant hohen Flächenpressungen und damit zu plastischen Verformungen auf den Laufbahnen kommen.

Für den Fall, dass ein Kugelschaden im Betrieb zunimmt, kann unter nominalen Belastungen davon ausgegangen werden, dass eine Schadenszunahme auf den metallischen Laufflächen deutlich schneller voranschreitet, als die Schadenszunahme auf keramischen Kugeln.

Da natürliche, reproduzierbare Ausbrüche in keramischen Kugeln nicht erzeugt werden können, werden in den Prüfläufen durch Laserabtrag geschädigte Kugeln verwendet. Eine künstliche Schädigung keramischer Kugeln durch einen Materialabtrag mit Lasern muss kritisch hinterfragt werden. Diese vorgeschädigten Kugeln sind nur zum Teil repräsentativ für natürlich entstandene Kugelschäden. Natürlich entstandene Ausbrüche in keramischen Kugeln sind dadurch gekennzeichnet, dass neben einem Ausbruch immer ein Rissnetzwerk verbleibt, das das Wachsen weiterer Risse begünstigt. In der Folge sind dann weitere Ausbrüche möglich.

Eine Abschätzung der verbleibenden Lebenszeit eines Lagers nach der Erkennung eines Lagerschadens ist möglich. In dieser Arbeit werden Elemente vorgestellt, die den Aufbau eines Modells für die Abschätzung einer Restlebensdauer nach der Erkennung eines Schadens ermöglichen sollen. Erste Versuche zur Lastschätzung im Lager und zur Erkennung einer initialen Schadgröße bei einem Kugelausbruch sind erfolgreich.

Die Verwendung von Piezoelementen und deren Positionierung an einer Stelle des Lagers, an der die Überrollverformung gemessen werden kann, hat den Vorteil, dass aus diesen Signalen die Käfiggeschwindigkeit bestimmt werden und eine Validierung der Überwachungskette durchgeführt werden kann.

5 Überwachung von Schrägkugellagern in Luftfahrtantrieben

Ziel ist die Erstellung eines Konzeptes zur Überwachung von hybriden Schrägkugellagern in Luftfahrtantrieben. Dargestellt wird die Leistungsfähigkeit der ausgewählten Sensoren. Besprochen werden die Verfahren zur Bearbeitung der gemessenen Signale. Betrachtet wird die Zuordnung von Signaturen der Sensorsignale zu spezifischen Lagerfehlern. Erörtert werden Möglichkeiten einer Selbstüberwachung der Diagnoseeinheit. Zur Darstellung der Überwachungsfunktionen werden Messdaten ausgewertet, die an geschädigten Hauptwellenlagern auf dem Prüfstand AN 58 aufgenommen wurden.

5.1 Eignung der getesteten Sensoren zur Triebwerksüberwachung

Ein Auswahlkriterium für die in diesem Projekt eingesetzten Sensoren und Piezoelemente (siehe Anhang 7.10 und 7.11) ist eine potentielle Tauglichkeit für einen späteren Einsatz im Triebwerk. Die Sensoren und Sensorelemente, die in den Versuchen die beste Eignung für eine Anwendung im Triebwerk zeigen, sollen für einen Einsatz in der Produktion weiter betrachtet werden. Die betreffenden Sensoren müssen den Anforderungen an eine Serientauglichkeit genügen. Diese Anforderungen betreffen u.a. Zuverlässigkeit, Temperaturfestigkeit, Langlebigkeit, Vibrationsfestigkeit, ein geringes Gewicht und Ölbeständigkeit. An Sensoren, die im Lagergehäuse eines Schrägkugellagers einer Triebwerkshauptwelle verbaut werden sollen, kommen die Anforderungen nach geringen Abmaßen hinzu. Im Rahmen der in dieser Arbeit geleisteten Untersuchungen können nur grundsätzliche Eignungsmerkmale der Sensoren betrachtet werden. Die für eine Serienanwendung notwendigen Ergänzungen und Abänderungen an den Sensoren sollen den späteren Lieferanten der Sensoren überlassen werden. Um durch Messungen eine ausreichend zuverlässige Aussage über den Zustand eines überwachten Lagers zu gewährleisten, sollten mindestens zwei Sensoren gewählt werden, die auf unterschiedlichen physikalischen Messprinzipien beruhen und unabhängige Informationen liefern.

5.1.1 Fehlererkennung Körperschall-, Vibrations- und Metallpartikelsensoren

Es werden die bei einem Versuch an einem Triebwerkshauptwellenlager am Prüfstand AN 58 aufgenommen Sensorsignale miteinander verglichen. Dabei werden Piezoelemente, Vibrationssensoren und Metallpartikelsensoren (ODM System MetalSCAN der Firma GASTOPS) bezüglich der Leistungsfähigkeit bei der frühen Erkennung eines Kugelschadens bewertet. Es wird eine keramische Kugel mit einem Schaddurchmesser von 0,55 mm verwendet (siehe Abbildung 4.15). Der Vibrationssensor und das Piezoelement sind angebracht, wie in der Abbildung 3.21 abgebildet. Der Ölpartikelsensor ist in die Ölrücklaufleitung des Lagers integriert. Es erfolgt ein Vergleich der qualitativen Messergebnisse der Sensoren sowie der zeitlichen Abstufung in der Schaderkennung.

Der Prüflauf, dargestellt durch den Verlauf der auf den Maximalwert normierten Wellenfrequenzen f_s (blaue Linien der oberen Bilder in der Abbildung 5.1), besteht aus einer Folge typischer Standardflugzyklen (siehe Abbildung 3.24).

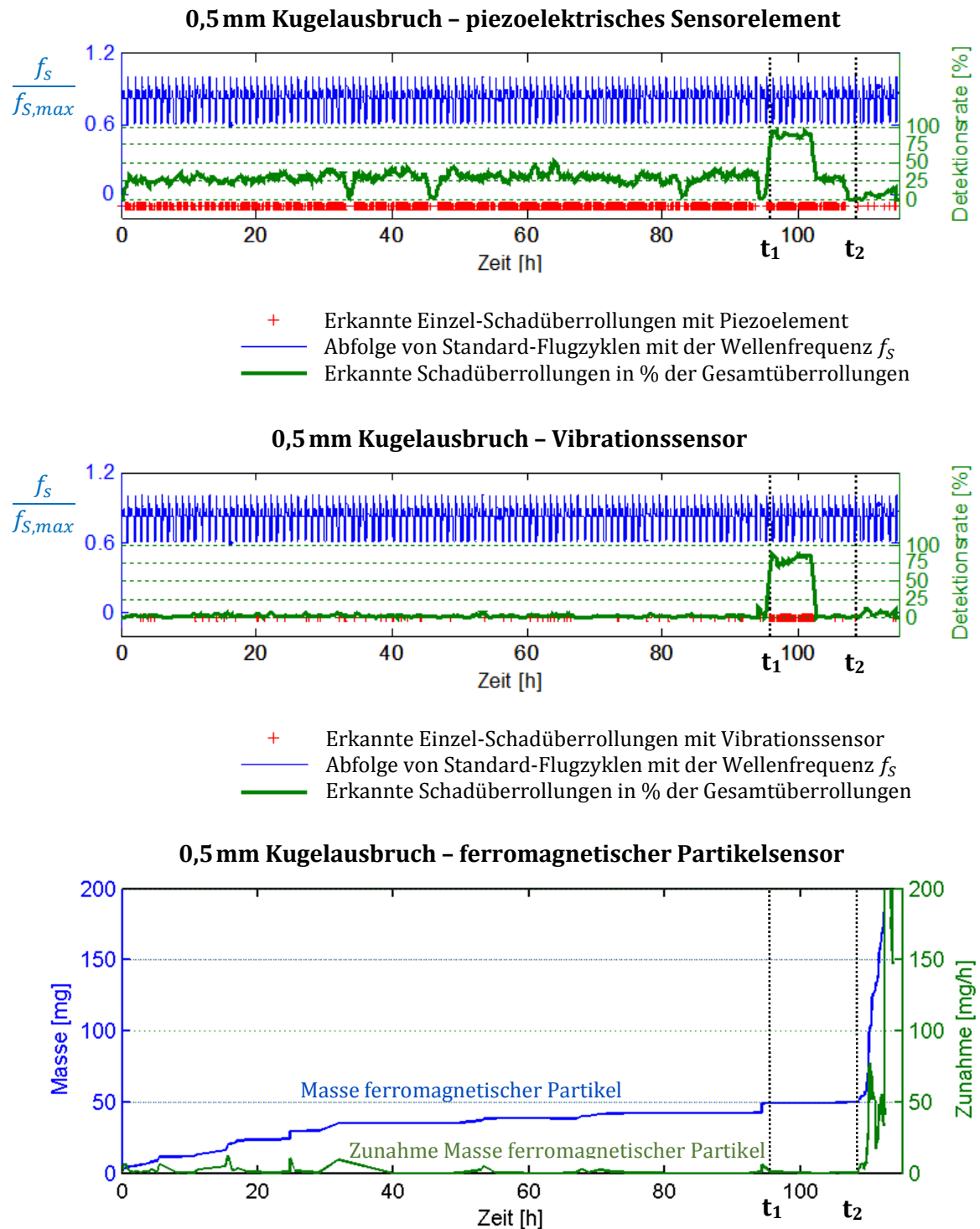


Abbildung 5.1: Vergleich der zuverlässigen Zeitpunkte der Schaderkennung Körperschallsensor (Piezoelement), Vibrationssensor und Metallpartikelsensor (ODM System MetalSCAN der Firma GASTOPS).

In der Abbildung 5.1 ist der Verlauf einer fortlaufenden Schädigung der Laufflächen eines Schrägkugellagers dargestellt. Die roten Kreuze in den oberen beiden Bildern zeigen die von den Sensoren erkannten Schadüberrollungen auf der vorgeschädigten keramischen Kugel [4P]. Die grüne Line zeigt dabei den Prozentsatz der erkannten Schadüberrollungen auf der Kugel an, basierend auf der Gesamtzahl der theoretisch möglichen Überrollungen. Das untere Bild zeigt die Zunahme von ferromagnetischen Partikeln in der Ölrücklaufleitung.

Die Auswertungen der Sensorsignale (Abbildung 5.1) ergeben unterschiedliche Erkennungszeitpunkte durch die eingesetzten Sensoren. Das Piezoelement (Überroll- und Körperschallsensor) ermöglicht die sofortige Erkennung des Kugelschadens. Der Vibrationssensor stellt erst zum Zeitpunkt t_1 (ca. nach 95 Stunden) eine klare Indikation eines Kugelschadens zur Verfügung. Der Sensor zur Erkennung von Metallpartikeln (MetalSCAN der Firma GASTOPS) zeigt erst kurz vor dem Ausfall des Lagers zum Zeitpunkt t_2 (ca. nach 110 Stunden) ein eindeutiges Signal. Die angezeigte Masse ferromagnetischer Partikel, vor dem Zeitpunkt t_2 , kann nicht für eine eindeutige Indikation einer kritischen Menge von Metallpartikeln verwendet werden, da im Ölkreislauf ein geringer Anteil von Metallpartikeln permanent vorhanden sein kann. Der Versuch läuft bis zum Ausfall des Lagers 114 Stunden.

Zu beachten ist, dass bei der Verwendung von Überwachungskomponenten, die auf der Detektion ferromagnetischer Partikel im Öl beruhen, ein Problem mit magnetisierten Bauteilen eines Triebwerks bestehen kann. Kleine ferromagnetische Teile können sich an magnetisierten Bauteilen absetzen und gelangen damit nicht oder verzögert in den Ölkreislauf. In der Folge würde eine Fehlermeldung spät oder gar nicht erfolgen.

Durch die in Abbildung 5.1 dargestellten Messungen wird gezeigt, dass ein Schaden auf einer Keramikkugel mit einem auf einem Lageraußenring angebrachten Piezoelement deutlich früher erkannt werden kann als mit einem Vibrationssensor auf dem Außenring. Aus diesem Grund werden in den weiteren Versuchen Körperschallsensoren eingesetzt. Die Überlegenheit der Körperschallsensoren hat zwei Gründe. Die Bandbreite von Körperschallsensoren ist deutlich höher als die von Vibrationssensoren, da keine zusätzliche träge Masse beschleunigt werden muss. Zudem ist die Empfindlichkeit von Vibrationssensoren auf piezoelektrischer Basis mit hoher Bandbreite schlecht. Dies liegt daran, dass die Eigenfrequenz eines Vibrationssensors nicht innerhalb des Messbereiches liegen sollte. Deshalb müssen kleine Quarze verwendet werden, da diese die Eigenresonanzen bei höheren Frequenzen aufweisen. Kleine Quarze haben jedoch eine geringere Empfindlichkeit.

Die Beschreibung der Methoden bei der Erkennung eines Kugelschadens ist im Kapitel 5.2 aufgeführt.

5.1.2 Vorteil Messung Körperschall gemeinsam mit Überrollverformung

Ein im Lastpfad eines Lageraußenringes eingesetztes Piezoelement, z.B. PIC 255 (Abbildung 3.21), liefert neben dem Körperschallsignal, das bei der Überrollung eines Schadens im Lager entsteht ein Signal, das durch die Verformung des Lageraußenringes an der Sensorposition bei der Überrollung durch eine Kugel entsteht. Damit sind zusätzlich zu einer Schaderkennung über den Körperschall Informationen über die Passierfrequenz der Kugeln und damit der Käfigfrequenz f_c vorhanden.

Das Piezoelement soll im Lastpfad der zyklischen Überrollungen angebracht sein. Es wird bei der Messung der Überrollungen jeweils nur eine Kugel erfasst, da nur eine Kugel bei der Überrollung der Piezoposition eine Verformung am Piezoelement bewirkt. Somit wird eine gute Signalqualität bei der Messung der Kugelpassierfrequenz erreicht. Werden die Amplituden der Überrollsignale kalibriert, dann ist zudem eine Lastschätzung mit den Piezoelementen möglich (siehe Abbildung 4.31).

Die Körperschallsignale, die bei einer Schadüberrollung entstehen, sind aus dem gesamten Lager an einer Sensorposition messbar. Die Amplituden der durch eine Schadüberrollung erzeugten Signale werden geringer bei größerem Abstand zur Sensorposition.

Durch ein geringes Gewicht sowie ein geringes Volumen sind die Piezoelemente leicht in Lager integrierbar. Probleme gibt es bisher mit der Langzeitstabilität der Sensorelemente auf piezoelektrischer Basis. Die bisher verwendeten piezoelektrischen Sensorelemente PIC 255 verlieren bei höheren Temperaturen teilweise die Polarisierung, was zu starken Einbußen bei den Signalamplituden führt.

5.1.2.1 Messung der Verformung des Außenringes bei der Überrollung

Durch die umlaufende Kontaktpressung der Kugeln auf die Laufbahn des Lageraußenringes ergibt sich eine zyklische Verformung (Abbildung 5.2) an der Position des Piezoelementes (Abbildung 3.21). In dem Piezoelement verursachen die Verformungen Ladungsverschiebungen, die als Spannung gemessen werden können (siehe Abbildung 5.3). Der Verlauf dieser Spannung gibt die Überrollfrequenz der Kugeln wieder. Die Amplitude des Überrollsignals enthält eine Aussage über die Höhe der Pressung bei der Überrollung.

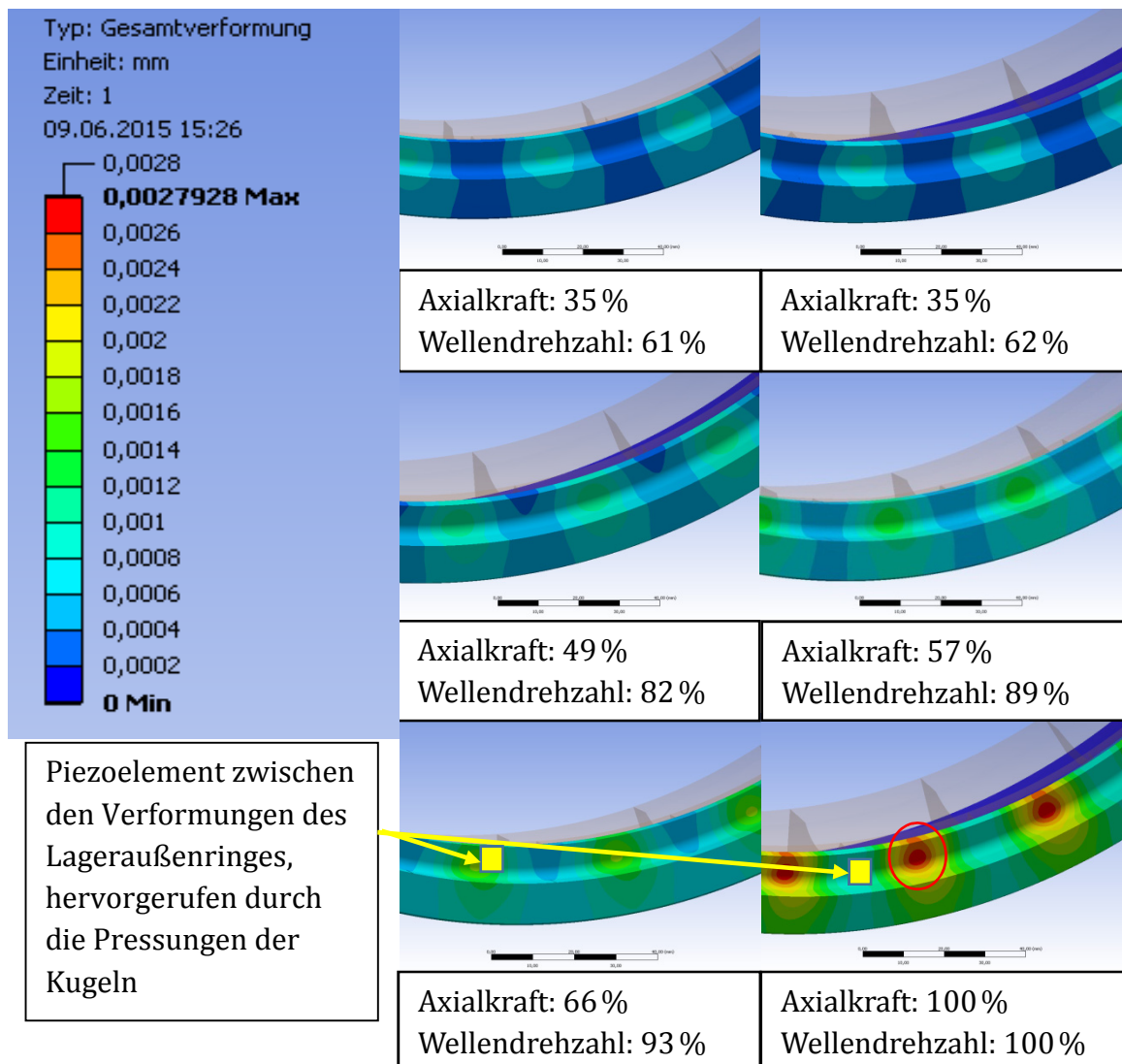


Abbildung 5.2: Die FEM Simulation zeigt die Verformungen eines Lageraußenringes durch die Pressungen der Kugeln auf die Laufflächen [7EA].

Um sichere Messungen der Überrollungen zu gewährleisten, sollte sich das Piezoelement im Lastpfad der zyklischen Überrollbeanspruchung (siehe Abbildung 5.2) befinden.

Die in der Abbildung 5.2 dargestellte Struktur wurde mit der Software *ANSYS Workbench* (Version 14.0) erzeugt. Mit dem integrierten Konstruktionsprogramm *Design Modeler* wurde das Modell des Lageraußenringes konstruiert. Mit dem ebenfalls integrierten Programm *Mechanical* wurde die Definition der Randbedingungen, des Netzes und der numerischen Auswertung vorgenommen. *ANSYS Workbench* stellt in einem gesonderten Modul innerhalb des Programms die Möglichkeit zur Verfügung, die verwendeten Materialien zu definieren [7EA].

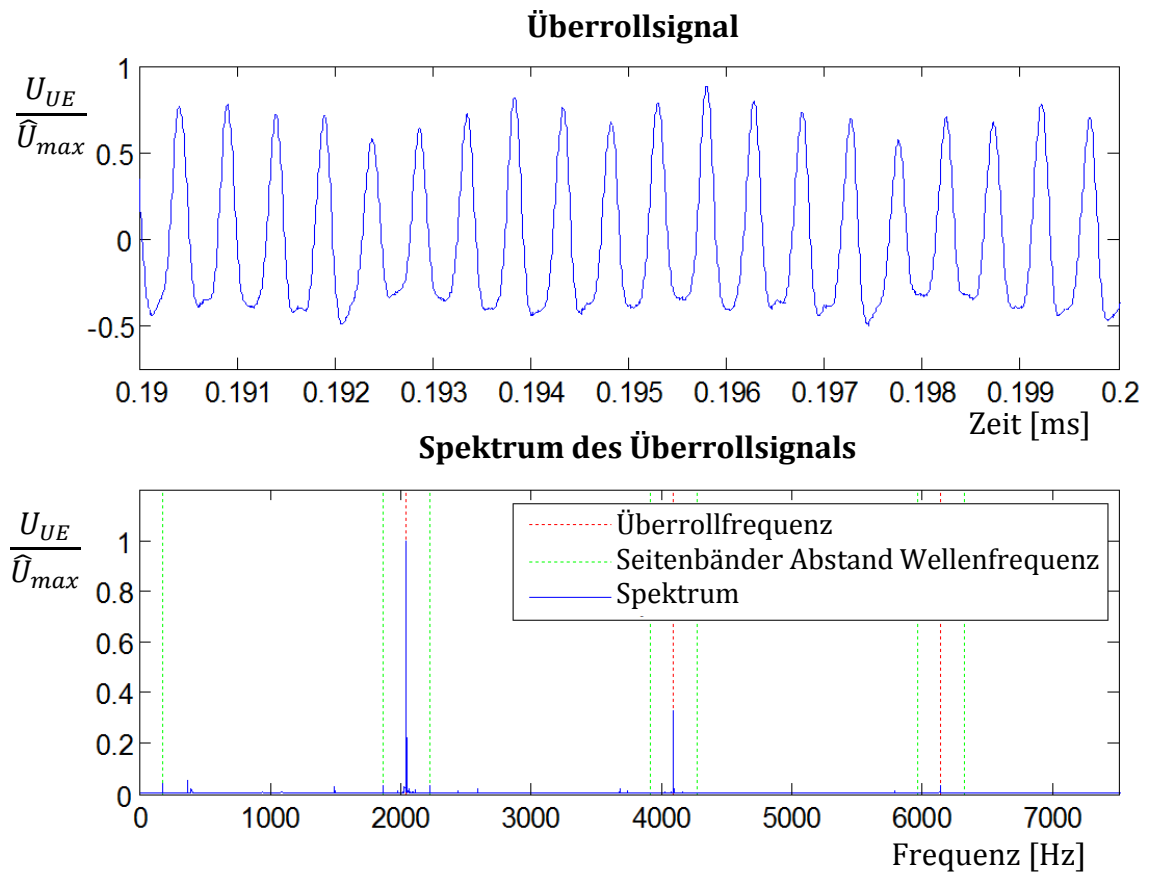


Abbildung 5.3: Signale bei Reiseflugbedingungen, Abschnitt III des Standard-Flugzyklus (Abbildung 3.24)

Oberes Bild: Signalverlauf eines Piezoelementes im Zeitbereich beim Überrollen der Sensorposition im Lastpfad.

Unteres Bild: Harmonische Signalanteile im Frequenzbereich mit den Seitenbändern aus der Wellenfrequenz f_s .

Der Versuch (Abbildung 5.3) wird auf dem Prüfstand AN 58 mit einem Triebwerks-hauptwellenlager durchgeführt. Die Wellenfrequenz beträgt 174 Hz, die eingebrachte axiale Last beträgt 45 kN. In der Abbildung 5.3 oben ist das bei der Überrollung des Messelementes PIC 255 generierte Signal dargestellt. Das untere Bild in der Abbildung 5.3 zeigt das zugehörige Spektrum. Die dargestellten Seitenbänder resultieren aus der Unwucht einer nicht exakt ausgewuchteten Welle.

5.1.2.2 Messungen des Körperschalls bei der Schadüberrollung im Lager

In der Abbildung 5.4 ist das mit einem Piezoelement gemessene Signal einer angeregten abklingenden Eigenschwingung dargestellt.

Zu beachten ist, dass die Laufzeit des bei der Schadüberrollung erzeugten Körperschalls eine andere ist als die Laufzeit der bei der Überrollverformung erzeugten Signale.

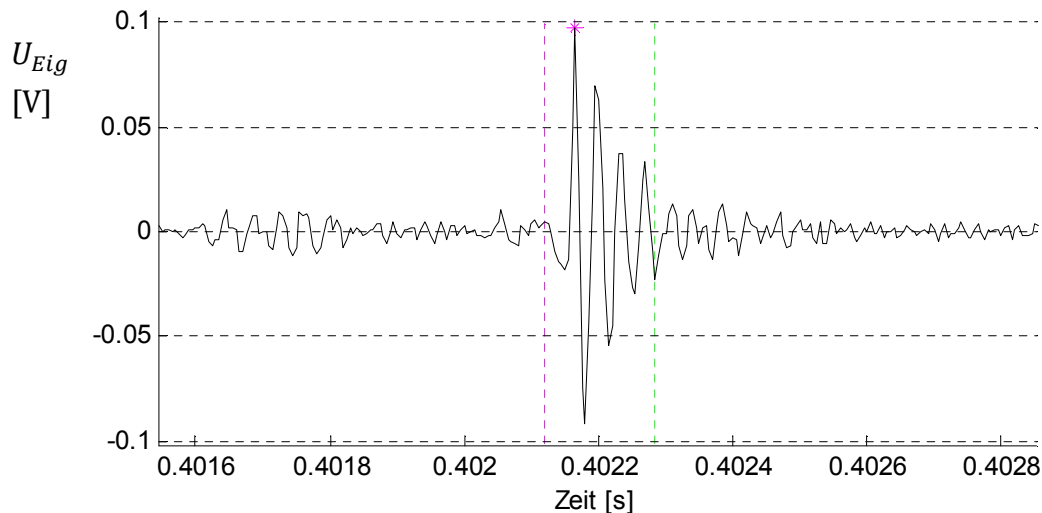


Abbildung 5.4: Am Lageraußenring gemessene, abklingende Schwingung einer angeregten Eigenfrequenz.

5.1.3 Messung ferromagnetischer Partikel mit EMCD

Um bei der Feststellung eines Fehlers eine ausreichende Sicherheit zu erreichen, ist die auf einem Sensor beruhende Informationsbasis problematisch. Die Hinzunahme zusätzlicher, unabhängiger Informationen erhöht die Sicherheit und hilft, fehlerhafte Aussagen zu vermeiden. Diese Informationen sollten auf Sensoren basieren, denen andere physikalische Größen zugrunde liegen. Deshalb ist für eine spätere potentielle Serienanwendung neben einem Piezoelement mindestens eine weitere Messgröße notwendig. In Triebwerksanwendungen verbreitet sind klassische EMCDs (Electric Magnetic Chip Detektor). Diese Sensoren können in der bisherigen handelsüblichen Bauart allerdings nicht verwendet werden, da die Messempfindlichkeit und der Zeitpunkt einer möglichen Aussage nicht akzeptabel sind.

5.1.3.1 Prinzip klassischer EMCD

Ein klassischer EMCD besteht aus einem Magneten und Metallscheiben an den Enden des Magneten. Die elektrisch leitfähigen Metallscheiben sind nach außen mit einer externen Auswerteeinheit verbunden, welche den Widerstand im Messkreis bestimmt.

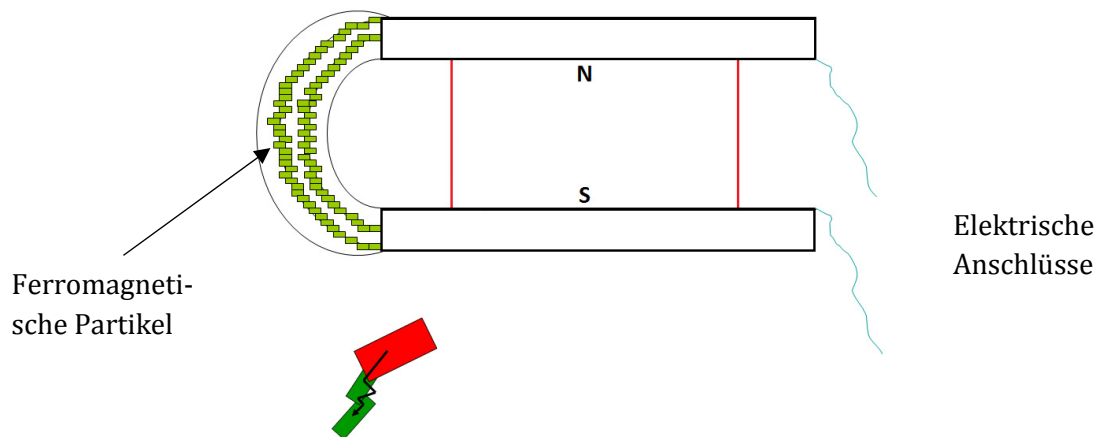


Abbildung 5.5: Prinzipbild eines EMCD. Magnet mit Nordpol und Südpol sowie zwei ferromagnetischen Platten als elektrische Kontakte.

Bei einem EMCD lagern sich Partikel an den ferromagnetischen Platten über den Verlauf der magnetischen Feldlinien an. Die Summe der Übergangswiderstände ergibt den Gesamtwiderstand über die Kontakte.

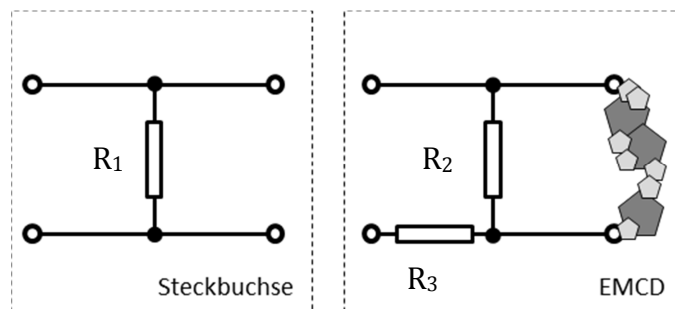


Abbildung 5.6: Aufbau EMCD mit Steckbuchse und Prüfnetzwerk.

Um am EMCD eine fortlaufende Funktionsprüfung durchführen zu können, ist ein Widerstandsnetzwerk (Built In Test, BITE Test) eingebaut. BITE Widerstände haben die Aufgabe, einfache Fehler in den Zuleitungen oder im Sensor anzuzeigen. Dies geschieht über die Wahl bestimmter Widerstandswerte und die Kontrolle der Werte im Betrieb.

In der Abbildung 5.6 ist ein einfaches Widerstandsnetzwerk dargestellt. Ein Widerstand (R_1) im Stecker des EMCD soll die Signalleitungen überbrücken, ein Widerstand

$(R_2 + R_3)$ im EMCD ist parallel dazu geschaltet. Damit ist es möglich zu erkennen, ob der Stecker in den EMCD eingesteckt ist. Über unterschiedliche diskrete Widerstandswerte, die im Auswertegerät erkennbar sind, kann so festgestellt werden, ob die Steckverbindung zum EMCD eingesteckt ist oder ein Kurzschluss der Leitungen zum Gehäuse vorliegt.

5.1.3.2 Prinzip verbesserter, modifizierter EMCD

Die Beschaltung durch die BITE Widerstände (siehe Abbildung 5.6) wirkt sich nachteilig aus, da ein niederohmiger Prüf Widerstand parallel zu der Ansammlung der Metallpartikel an den Kontakten wirkt. Es ist daher bei der bisherigen Beschaltung nicht möglich, beginnende hochohmige Überbrückungen durch die Metallpartikel über die Kontakte am EMCD messtechnisch zu bestimmen.

Vorgeschlagen und implementiert wird ein verbesserter, modifizierter EMCD, bei dem die Messung der Leitfähigkeit der angelagerten ferromagnetischen Partikel und die Funktionsprüfung (BITE Netzwerk) getrennt sind.

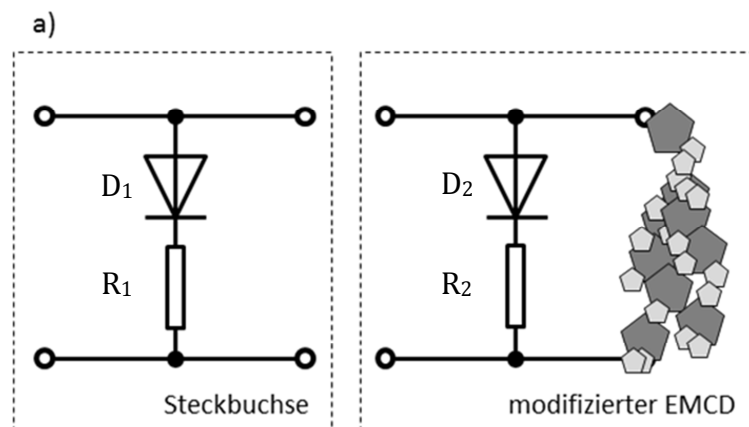


Abbildung 5.7: Funktionstrennung Messung und BITE durch Dioden.

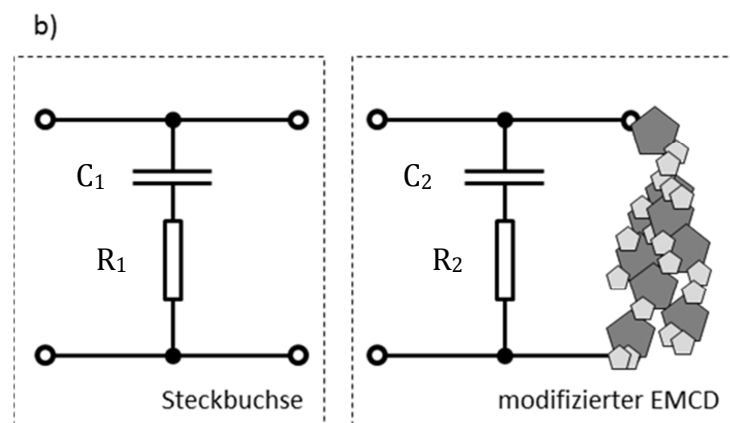


Abbildung 5.8: Funktionstrennung Messung und BITE durch Kondensatoren.

Bei Versuchen wird festgestellt, dass bei einem Kugelschaden kleine Metallpartikel von den Laufflächen abgetragen werden. Sollen auch kleine Partikel messtechnisch durch einen EMCD erfasst werden können, muss sichergestellt werden, dass dieser in der Lage ist, diese Partikel als Summe an dem Magneten des EMCD zu erkennen. Das Widerstandsnetzwerk verhindert jedoch eine frühe Indikation von Partikeln. Zu Prüfzwecken verwendete Widerstände liegen parallel zu dem Widerstand, der sich aus den anliegenden Partikeln ergibt. Die Prüfwiderstände sind um Größenordnungen niederohmiger als eine beginnende Überbrückung der Kontakte durch Metallpartikel. Deshalb ist eine beginnende Überbrückung der Kontakte durch leitfähiges ferromagnetisches Material bei einem konventionellen EMCD nicht zu erkennen.

Um den Nachteil eines konventionellen EMCD zu umgehen, wird das Prüfnetzwerk (BITE-Test) von der eigentlichen Messung der Leitfähigkeit der ferromagnetischen Partikel funktionell getrennt. Dies geschieht durch die Verwendung von Dioden oder Kondensatoren im BITE-Netzwerk (siehe Abbildung 5.12). Es kann dann durch Umschalten der Polarität oder den Wechsel von Gleich- auf Wechselspannung vom Prüfbetrieb (BITE) auf den Messbetrieb umgeschaltet werden. Diese Umschaltung kann in periodischen Abständen im Betrieb erfolgen. Ein modifizierter EMCD ist in der Lage, eine fortlaufende Anheftung ferromagnetischer Partikel durch die Zunahme der elektrischen Leitfähigkeit zu bestimmen. Es ist auch eine Aussage über die Anheftung kleiner Metallpartikel möglich. Durch die Messung der Steigung der Leitfähigkeit und die zuvor gesammelten Informationen über das Anlagerungsverhalten von Partikeln an den EMCD können Aussagen über die Partikelgrößen getroffen werden. Das Anlagerungsverhalten von Partikeln an einen EMCD in der Strömung des Öls muss zuvor in Versuchen ermittelt werden. Dies soll in der Einbauposition im Ölkreislauf des Triebwerks erfolgen (siehe 5.1.3.3). Nach dem Einbau eines EMCD in den Ölkreislauf soll eine Versuchsreihe mit unterschiedlichen Partikelgrößen gefahren werden.

5.1.3.3 Messungen des Widerstandes durch Metallpartikel am modifizierten EMCD

Das folgende Bild wurde mit einer vorgeschädigten keramischen Kugel an einem Einzelkugelprüfstand aufgenommen.

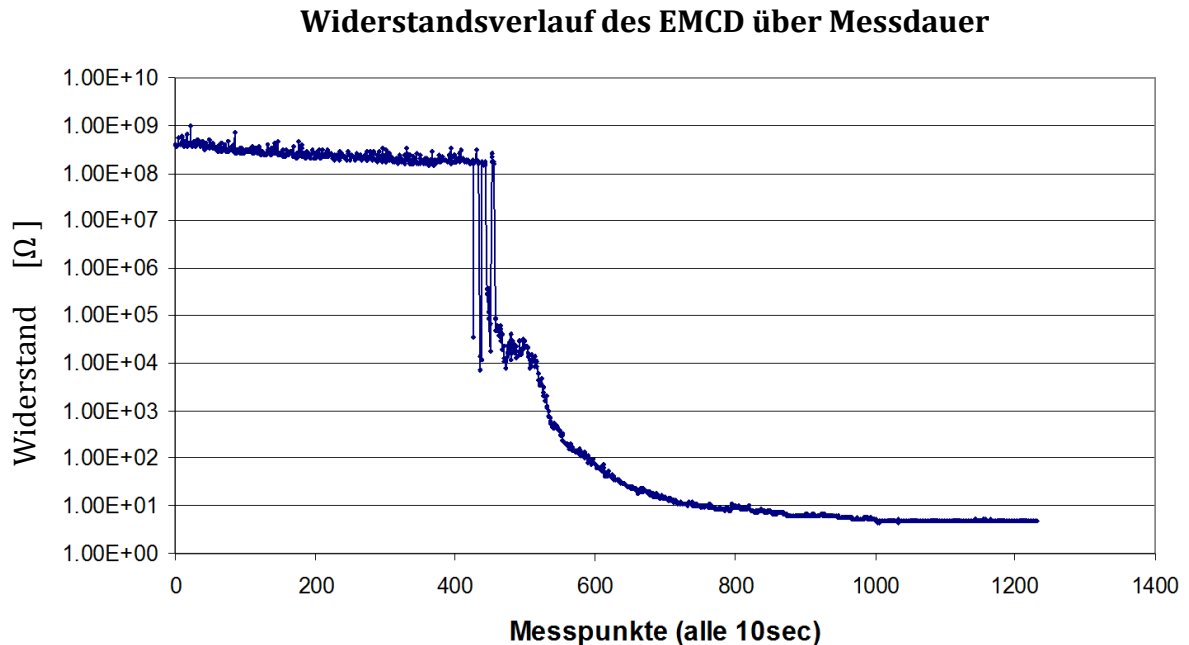


Abbildung 5.9: Einzelkugelprüfstand, Widerstandsverlauf an den Kontakten des EMCD bei kleinen Metallpartikeln im Öl (Größenordnung der Partikel 4 μm bis 10 μm) [1EA].

Die Abbildung 5.9 zeigt einen Versuch an einem Einzelkugelprüfstand mit einer geschädigten keramischen Kugel zwischen zwei Metallscheiben (siehe Abbildung 4.3 und Abbildung 4.4). Dabei werden kontinuierlich kleine ferromagnetische Partikel aus den Metallscheiben abgetragen. Diese Partikel kommen in den Ölkreislauf und werden durch den Magneten des EMCD angezogen. Über die Kontakte des EMCD wird der elektrische Widerstand über die Partikel gemessen. Die Widerstandskurve verläuft umso flacher, je kleiner die Partikel sind. Wiederholungen der Messung ergeben, dass die Ergebnisse repräsentativ sind. Es lässt sich ein robuster Bereich für das Triggern von Meldungen definieren. Dies ist zu erkennen in der Abbildung 5.9 im Bereich bei 4000 s. Die Erkennung keramischer Partikel im Öl ist nicht erforderlich. Es erfolgte eine Patentanmeldung [3P] des modifizierten EMCD.

Es erfolgen Versuche mit geschädigten und ungeschädigten Triebwerkshauptwellenlagern auf dem Prüfstand AN 58. Erfahrungswerte zeigen, dass geschädigte Lager je nach Schadigungsgrad eine höhere Temperatur aufweisen als ungeschädigte Lager. Die Temperaturen des Stützlagers in der Prüfanordnung werden als Referenz verwendet und mit den Temperaturen des Testlagers verglichen. Der Temperaturunterschied zwischen Referenz- und Testlager gibt einen Hinweis auf die vorliegende Schädigung im Lager. Überprüft wird der Verlauf des Widerstandes über dem EMCD. Es wird davon ausgegangen, dass der Widerstand über dem EMCD zu dem Zeitpunkt im Versuchsverlauf abnimmt, wenn der Temperaturunterschied zwischen Referenz- und Testlager ansteigt.

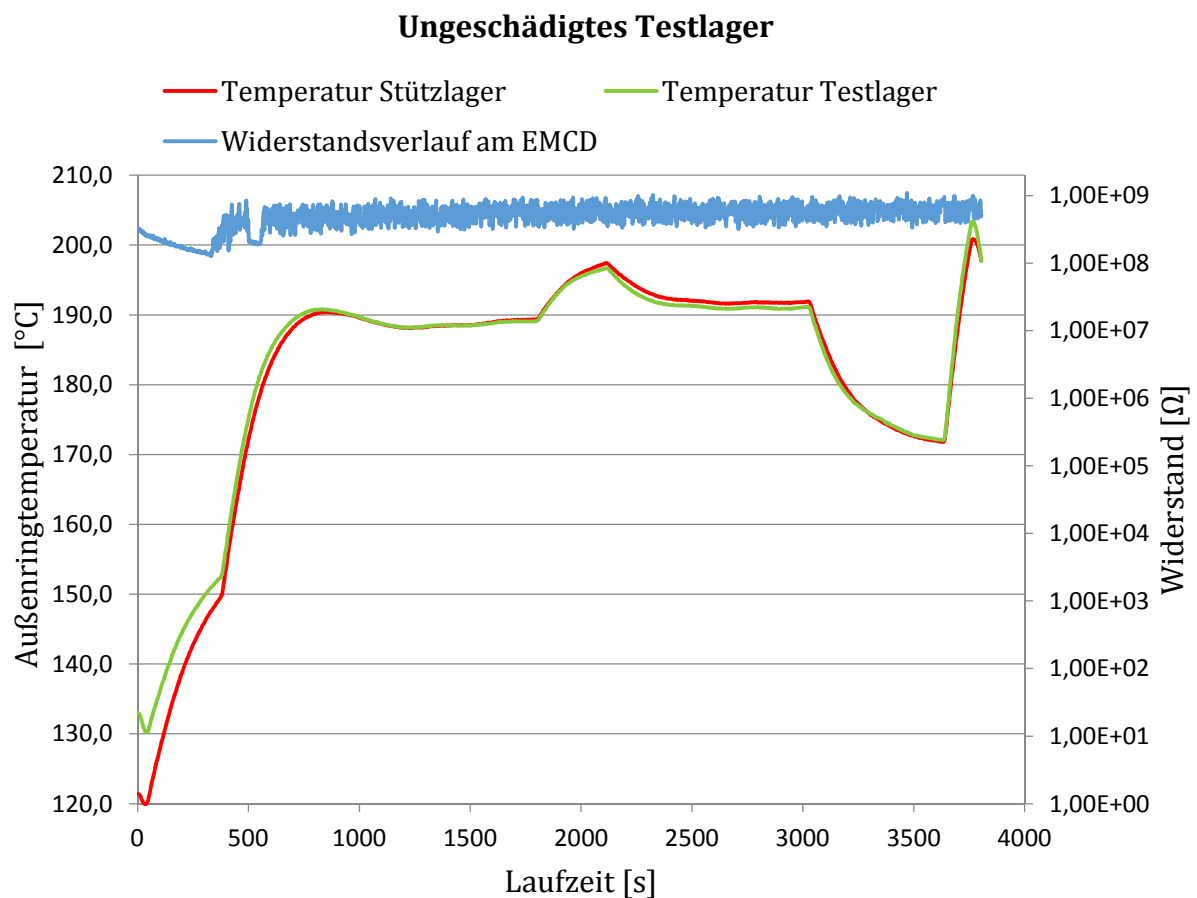


Abbildung 5.10: Prüfstand AN 58, Widerstand an den Kontakten des EMCD ohne Partikelbelag und der Verlauf der Temperaturen in den Lagern des Prüfaufbaus [Bild FAG].

Die in der Abbildung 5.10 gezeigte Messung wurde an dem Prüfstand AN58 vorgenommen und zeigt den Widerstandsverlauf an den Kontakten des EMCD ohne den Belag durch ferromagnetische Partikel. Im Vergleich zu dem Versuch aus der Abbildung 5.11 verlaufen die Temperaturen des Testlagers und des Gegenlagers analog. Der Widerstandsverlauf zwischen den Kontakten (blaue Linie) stellt den Widerstand des Öls dar. Der Widerstand zwischen den Kontakten des EMCD verbleibt im hohen

M-Ohm Bereich. Zugleich ist ein Temperaturunterschied zwischen dem Stütz- (Referenz) und dem Testlager nicht vorhanden.

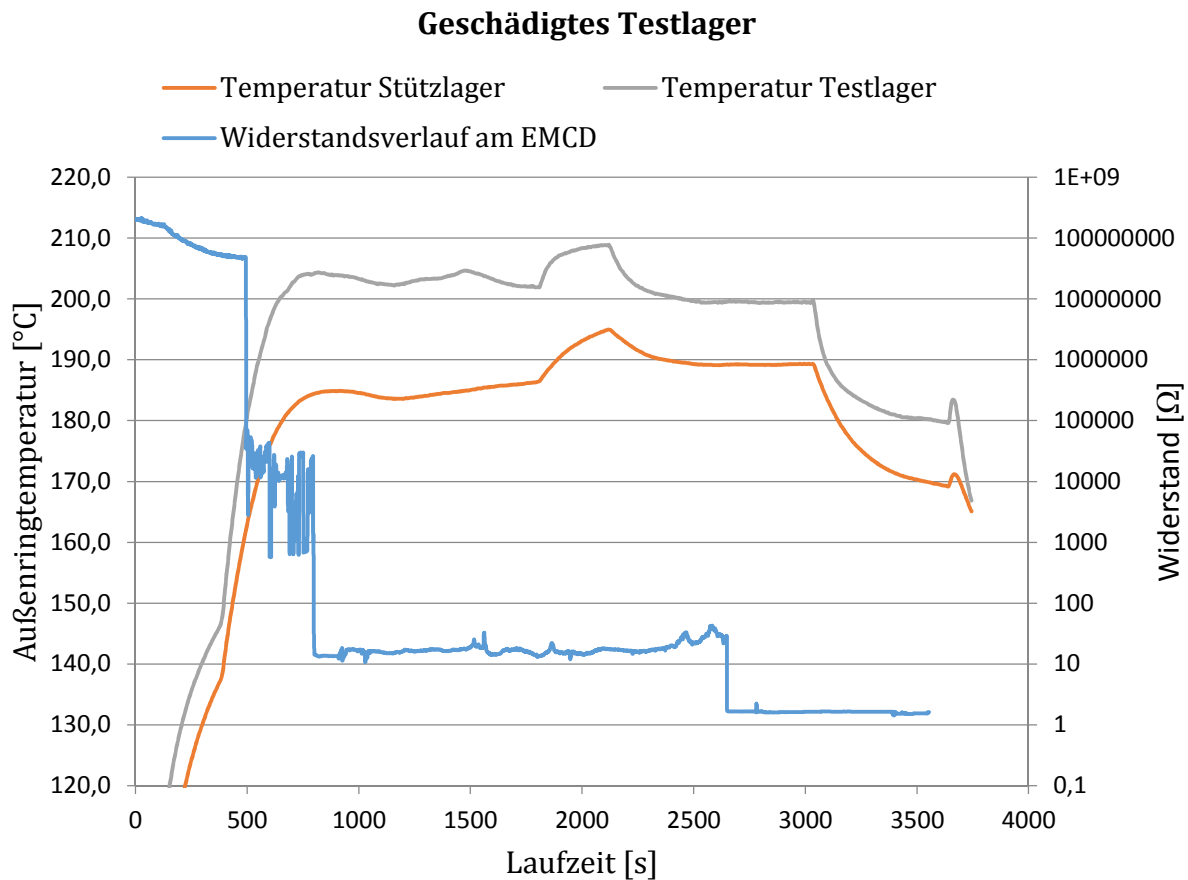


Abbildung 5.11: Prüfstand AN 58, Verlauf des Widerstandes an den Kontakten des EMCD und der Verlauf der Temperaturen in den Lagern des Prüfaufbaus [Bild FAG].

Die Abnahme des Widerstandes an den Kontakten des EMCD korrespondiert mit der Zunahme der Differenz der Temperatur zwischen dem Testlager (grün) und dem Gegenlager (rot). Da das Testlager und das Gegenlager in dem Versuchsaufbau von gleicher Bauart sind, sollten die Temperaturen der Lager im ungeschädigten Zustand ungefähr gleich hoch sein (siehe Abbildung 5.10). Ist zwischen den Temperaturen der beiden Lager eine deutliche Temperaturdifferenz zu messen, dann deutet diese auf eine Schädigung hin. In der Abbildung 5.11 steigt die Differenz der Temperaturen zum gleichen Zeitpunkt an, zu dem der Widerstand über den Kontakten des EMCD, beginnt kleiner zu werden. Die Abnahme des Widerstandes zwischen den Kontakten des EMCD erfolgt aufgrund des zunehmenden Partikelbelages.

Daraus lässt sich schließen, dass der Verlauf des Widerstandswertes über den Kontakten eines EMCD eine Aussage über eine Schädigung eines Lagers bereitstellen kann. Anzumerken ist, dass für qualitativ verwendbare Aussagen Fangraten bei typischen Flugzyklen, dies beinhaltet bestimmte Ölströme und Öldrücke, zuvor ermittelt werden müssen (siehe 5.1.3.5).

5.1.3.4 Versuche zu geeigneten Einbaupositionen für einen EMCD im Ölkreislauf

Um geeignete Einbaupositionen eines EMCD in einem Ölkreislauf bestimmen zu können, werden Versuche mit im Öl befindlichen ferromagnetischen Metallpartikeln durchgeführt. Die Metallpartikel sind in zwei Größen sortiert, $0\mu\text{m}$ bis $20\mu\text{m}$ und $20\mu\text{m}$ bis $40\mu\text{m}$. Die Annahme ist, dass die Metallpartikel abhängig von der Größe eine bestimmte Zeit in der „Schwebe“ im Öl verbleiben. Deshalb werden Versuche geplant, bei denen die Absinkgeschwindigkeit von Metallpartikeln im Öl gemessen wird. Dabei sollen bei unterschiedlichen Öltemperaturen (unterschiedliche Viskositäten) die jeweiligen Absinkgeschwindigkeiten gemessen werden. Es werden die in einem Prüfgefäß mit Öl befindlichen Metallpartikel aufgerührt und 15 Sekunden gewartet. Beim Eintauchen des Sensors und der anschließenden Kontrolle ist kein Metallpartikel am Magneten des EMCD. Wird der EMCD mit dem Magneten unmittelbar nach dem Aufrühren des Öles in das Gemenge getaucht, dann sind alle Metallpartikel am Magneten und es sind keine verbleibenden Metallpartikel mehr im Prüfgefäß festzustellen. Die schnelle Absinkgeschwindigkeit gilt für beide gewählten Sortierungen von Partikelgrößen. Aus den Ergebnissen dieser Versuche ergeben sich Forderungen an die Einbauposition eines EMCD in einem Ölkreislauf. Ein EMCD sollte bei einer weitgehend laminaren Ölströmung mit dem Magneten des EMCD möglichst unten in der Strömung eingebaut werden. Ist dies nicht möglich, kann eine Einbauposition mit einer turbulenten Anströmung an den EMCD gewählt werden. Die Wahl einer geeigneten Einbauposition ist von grundsätzlicher Bedeutung, um eine möglichst zuverlässige Fangrate bei den Metallpartikeln zu erzielen.

5.1.3.5 Bestimmung der Fangraten eines EMCD

Durch Versuche mit einer defekten keramischen Kugel an dem Einzelkugelprüfstand (siehe Abbildung 4.4) wird festgestellt, dass die erzeugten Metallpartikel sehr klein sein können. Ein EMCD soll in der Lage sein, ferromagnetische Partikel zu einem frühen Zeitpunkt anzuzeigen. Ferner soll eine Unterscheidung zwischen kleinen und großen Partikeln möglich sein. Deshalb wird ein klassischer EMCD modifiziert und in der modifizierten Form erprobt. Es wird ein Versuch unternommen um zu verstehen, ob ein EMCD Partikel in der Größe von $4\mu\text{m}$ in der Summe anzeigen kann. Dabei werden feine Metallpartikel in zwei unterschiedlichen Sortierungen in ein Ölrigg gegeben und die Fangrate eines modifizierten EMCD (siehe Kapitel 5.1.3.2) ermittelt.

Ein EMCD ist ein sehr einfacher und dadurch robuster Sensor. Aus den Messresultaten eines EMCD können keine genauen Aussagen über die Menge der erkannten Partikel erwartet werden. Die Fangrate eines EMCD hängt von vielen Variablen ab. Zum einen von der Viskosität und damit der Temperatur des Fluides, weiterhin von der Schichtung der Anströmung in der Ölleitung und von der magnetisch wirksamen Masse in Relation zu der Oberfläche des ferromagnetischen Bruchstückes. Die Fangrate bei einer gewählten Einbauposition muss sorgfältig ermittelt werden. Dabei sind die Drücke, Strömungsgeschwindigkeiten und die Gestaltung der Ölleitungen maßgeblich für die Fangraten von Metallpartikeln im Öl. Dies ist für die Verwendung eines

EMCD von grundsätzlicher Bedeutung. Es bedeutet, dass bei der Überwachung von Lagern mittels eines EMCD die Positionierung sowie die Aussage eines Messergebnisses aufgrund der Positionierung nicht einfach angenommen oder überschlagen werden kann. Vielmehr muss in jeder Anwendung mit den entsprechenden Drücken, Durchflüssen und der Ölführung ein Experiment durchgeführt werden, um später den gemessenen Werten des Widerstandes über dem EMCD Aussagen zuordnen zu können. Um die Fangrate der Sensoren ermitteln zu können, wird nach dem EMCD ein zusätzlicher Magnetfilter eingebaut, der eine Referenz zu der Gesamtmenge der Metallpartikel liefert, die den Ölkreislauf durchlaufen. Außerdem besteht ohne zusätzlichen Magnetfilter die Gefahr, dass Metallpartikel durch die Maschen des üblicherweise verwendeten Filters kommen. Ohne Magnetfilter zirkulieren die Partikel im Ölkreislauf und können somit mehrfach den EMCD passieren. Das Resultat der Messung einer Fangrate am EMCD ist dann nicht zutreffend. Es muss davon ausgegangen werden, dass auch am Magnetfilter nicht alle Metallpartikel eingefangen werden, jedoch ist dieses Verfahren auch im laufenden Versuch durchführbar. Eine absolute Messung der Fangrate des EMCD ist möglich durch die Verwendung eines zusätzlichen Ölbehälters, in den das Öl das nach dem Passieren des EMCD hineinfließt.

In dem hier durchgeführten Versuch wird eine Fangrate von 7,8% erreicht (siehe Abbildung 5.12 und Abbildung 5.13). Die Fangrate wird ermittelt als Relation der Masse der Metallpartikel, die am EMCD verbleiben, gegen die Masse der Partikel, die am Magnetfilter abgeschieden werden. Die Annahme hierbei ist, dass der Magnetfilter alle Partikel in der Ölrückführleitung aufnimmt, die an dieser Stelle der Ölleitung noch vorhanden sind.



Abbildung 5.12: Bild EMCD mit dem Besatz kleiner Metallspäne 0,22 g [Foto FAG].



Abbildung 5.13: Magnetfilter mit dem Besatz kleiner Metallspäne 2,82 g [Foto FAG].

5.1.4 Temperatursensoren zur Erkennung von Schäden im Kugellager

Im Lager entstehen durch Verformungen und Reibung erhöhte Temperaturen. Eine elastische Verformung der Laufflächen geschieht in Umfangsrichtung vor den Kugeln, hinter den Kugeln in dem nun entlasteten Bereich geht die Laufbahn wieder in die ursprüngliche Position zurück. Ein Teil der Wärmegenerierung in Lagern geschieht über diese Art der Verformung. Ein anderer Teil der Wärmegenerierung geschieht über die Reibung in den Kontaktflächen zwischen den Kugeln und den Laufflächen, wie diese in der Abbildung 3.3 dargestellt sind. Unterschieden wird zwischen Gleitreibung in Umlaufrichtung und Bohrreibung um die Flächennormalen in den Kontaktflächen.

Bei einem Defekt im Kugellager verändern sich die Temperaturen im Lager und im umgebenden Öl (siehe Abbildung 5.11). Die Überwachung von Kugellagern ausschließlich über den Verlauf von Temperaturen wird als nicht sehr zuverlässig angesehen, da auf die Temperaturen unterschiedlichste Größen Einfluss nehmen. Zudem können sich in absolut gemessenen Werten Mess- und Kalibrierungsfehler stark bemerkbar machen. Die Temperaturunterschiede bei frühen Lagerfehlern sind gering und kaum messtechnisch nachweisbar. Eine Temperaturüberwachung wäre denkbar als zusätzliche Größe zur Absicherung von Fehleraussagen. Die Möglichkeit der Fehlerfrüherkennung in Lagern durch eine Temperaturüberwachung wird in dieser Arbeit nicht weiterverfolgt.

5.2 Signalauswertung der Piezoelemente

Die Signalauswertung für eine Anwendung in der Luftfahrt soll möglichst robust und zuverlässig sein. Eine Signalauswertung soll auch bei einem permanenten Störlevel möglich sein. Die Auswertung soll eine hohe Sicherheit bei der Erkennung von Feh-

lern bereitstellen und eine nichtzutreffende Fehlermeldung vermeiden. Es soll eine Auswertung während des Betriebes eines Triebwerks in der Luft als auch eine Auswertung gesammelter Daten am Boden möglich sein. Eine Auswertung in der Luft erfordert sichere und ausreichende Rechenkapazitäten auf dem Triebwerk. Eine Auswertung am Boden erfordert eine sichere ausreichende Speicherkapazität auf dem Triebwerk. Es soll ein Fehler an einer Lagerkomponente erkannt werden und Elemente zur Schätzung der verbleibenden Restlaufzeit bereitgestellt werden. Eine Eigendiagnose der Überwachungseinheit soll nichtzutreffende Fehlermeldungen vermeiden.

5.2.1 Fensterfunktion über die Datenreihen

Zur Vermeidung von Leck-Effekten (Randal [23]) werden im Zeitbereich mit Transversalfiltern Fensterfunktionen über die Datenreihen gelegt. Verwendet wird die Matlab Hamming-Fensterfunktion. Bei sehr langen Datenreihen spielen die Fensterfunktionen allerdings nur noch eine untergeordnete Rolle. Bei unendlich langen Beobachtungszeiträumen kommt der Effekt nicht vor. Bei den in dieser Anwendung gewählten Abtastzeiten von 200 kHz und Testabschnitten, die mindestens im Minutenbereich liegen, werden immer mehrere Millionen Daten erzeugt, deshalb hat der Leck-Effekt bei den hier vorgestellten Anwendungen einen untergeordneten Einfluss.

5.2.2 Trennung der Piezosignale in Körperschall- und Überrollsignale

Die in der Arbeit verwendeten Piezoelemente (siehe Kapitel 7.10) messen durch die Verformung des Lagerringes an der Sensorposition sowohl die Überrollungen (siehe Abbildung 5.2) als auch Körperschallsignale, die bei der Überrollung von Schadstellen durch breitbandig angeregte Eigenresonanzen im Lager entstehen (siehe Abbildung 5.4). Die Überroll- und die Schadsignale befinden sich in unterschiedlichen Frequenzbereichen und müssen zur weiteren Bearbeitung und Analyse getrennt werden.

Die Körperschallsignale befinden sich in einem höheren Frequenzbereich. Die Überrollsignale liefern, abhängig von der Positionierung der Piezoelemente, eine hohe Signalamplitude. Die Körperschallsignale, die bei einer Schadüberrollung im Lager entstehen, liefern eine um Größenordnungen kleinere Signalamplitude. Aufgrund der hohen Amplitude der Überrollsignale können diese zumeist direkt verwendet und weiterbearbeitet werden. Befindet sich das verwendete Piezoelement außerhalb der Lastzone, ist ein Tiefpassfilter zu verwenden, um unerwünschte höherfrequente Störanteile herauszufiltern. Zur Analyse der Körperschallsignale muss ein Hochpassfilter implementiert werden.

5.2.2.1 Bestimmung angeregter Eigenfrequenzen

Durch Schadüberrollungen im Lager angeregte Eigenfrequenzen sollen durch eine Hochpassfilterung aus den Signalen der Piezoelemente gefiltert werden. Ein Lager hat viele Eigenmoden, die abhängig von der Position und Frequenz der Anregung mit un-

terschiedlichen Frequenzen schwingen und unterschiedliche Abklingzeitkonstanten aufweisen. Zur Vermeidung von Versuchen bei neu konstruierten Lagern wäre es von Vorteil, Eigenresonanzen eines Lagers rechnerisch bestimmen zu können.

Von Interesse sind die Eigenfrequenzen, die von dem Messsystem bestehend aus dem Sensor, dem Messverstärker und der Analysesoftware am besten erkannt werden können. Diese potentiell angeregten Eigenfrequenzen sind in der Theorie zwar vorab bestimmbar, jedoch im realen Einsatz sind Abhängigkeiten wie Einbaupositionen und Einbauarten bestimmend für die Dominanz der unterschiedlichen möglichen Eigenfrequenzen. Bei neuen Triebwerken können Details des Einbaus der Schrägkugellager für Hauptwellen stark variieren. Es ist daher nicht vorhersagbar, mit welchen Eigenfrequenzen ein Lager, angeregt durch Schadüberrollungen, schwingen wird. Daher ist es nicht ohne weiteres möglich, optimale Filterfrequenzen für einen Hochpassfilter im Voraus zu bestimmen.

5.2.2.2 Auslegung des Hochpassfilters zur Analyse der Körperschallsignale

Eine einfache Methode, Schadüberrollfrequenzen aus am Lager entstehenden Frequenzen herauszufiltern, ist alle Frequenzen oberhalb der Kugelpassierfrequenzen mit einem Hochpass hoher Ordnung zu filtern. Dabei muss bei der Auslegung des Filters die höchste Drehzahl des Triebwerks berücksichtigt werden. Es kann auch mit einem Hochpassfilter mit drehzahlabhängiger Grenzfrequenz gearbeitet werden. Die Kugelpassierfrequenz ergibt sich aus der Käfigfrequenz multipliziert mit der Kugelanzahl des Lagers.

Es sollen Kriterien für die Auslegung eines Hochpassfilters zur Filterung von Körperschallsignalen dargelegt werden. Das messende Piezoelement ist an der Stirnseite des stillstehenden Außenringes des Lagers angebracht. Das Piezoelement PIC 255 (siehe 7.10) misst das Überrollsignal der Kugel und das Körperschallsignal einer Schadüberrollung im Lager. Das Signal der Kugelüberrollung ist dominierend, wenn das Piezoelement wie in dieser Arbeit ausgeführt im Lastpfad der Kugelpressung liegt. Das Überrollsignal der Kugeln ergibt sich aus der Käfigrotationsfrequenz f_c multipliziert mit der Kugelanzahl k_B . Das Körperschallsignal besteht aus einer oder mehreren durch eine Schadüberrollung angeregten Eigenfrequenzen des Lagers, die über der Zeit abklingen. Diese Eigenfrequenzen haben eine deutlich höhere Frequenz als das Überrollsignal der Kugeln. Die wichtige Information steckt in der Wiederholfrequenz der abklingenden Eigenschwingungen.

Das Körperschallsignal muss mit einem Hochpassfilter aus dem Grundsignal des Piezoelementes gewonnen werden. Hochpassfilter zur Auswertung der Körperschallsignale müssen so gewählt werden, dass die Grundfrequenzen der Überrollsignale und deren harmonische Frequenzen möglichst unterdrückt werden. Der Filter muss die Wiederholfrequenz der durch die Schadüberrollungen angeregten Eigenfrequenzen hervorheben. Die Filterfrequenzen können als feste Frequenzen oder abhängig von den Betriebsdrehzahlen des Triebwerks festgelegt werden. Die Amplituden der harmonischen Frequenzen der Überrollsignale können hohe Werte annehmen. Damit die Frequenzbereiche scharf getrennt werden können, werden für die grundsätzlichen

Untersuchungen in dieser Arbeit Filter hoher Ordnung verwendet. Für eine spätere Anwendung am Triebwerk sollen die Filteranforderungen auf die notwendigen Werte reduziert werden.

Es werden Daten von Versuchen mit Triebwerkshauptwellenlagern auf dem Prüfstand AN 58 verwendet. Auch die Amplituden der harmonischen Frequenzen der siebten Ordnung des Überrollsignals sind noch hoch im Verhältnis zu den Amplituden der Körperschallsignale. Bei der Filterauslegung wird die Eckfrequenz des Hochpassfilters so gelegt, dass die siebte harmonische Frequenz des Überrollsignals noch unterdrückt wird. Eine noch höher liegende Eckfrequenz des Hochpassfilters würde bereits Eigenfrequenzen beeinträchtigen.

Berechnung der 7ten harmonischen Frequenz der Kugelüberrollfrequenz über die Position eines Piezoelementes.

$$f_{UE,7} = f_{C,max} \cdot k_B \cdot 7 \quad (5.1)$$

Berechnung der Eckfrequenz der Sperrfrequenz des Hochpassfilters. Hier wurde Wellenfrequenz als Sicherheitsfaktor addiert.

$$f_{stop} = f_{UE,7} + f_{S,max} \quad (5.2)$$

Berechnung der Eckfrequenz der Durchlassfrequenz des Hochpassfilters

$$f_{pass} = f_{UE,7} + f_{S,max} + 200 \text{ Hz} \quad (5.3)$$

Es werden Daten von Versuchen mit Triebwerkshauptwellenlagern auf dem Prüfstand AN 58 ausgewertet. Die Filterwirkung der Hochpassfilter soll für die durchfahrenen Bereiche der Standardflugzyklen (Kapitel 3.3.2) optimiert werden.

Verwendet wird eine keramische Kugel mit einem Schaden von 0,5 mm Durchmesser. Die Messungen erfolgen mit einem Piezoelement PIC 255 in den Abmessungen 4 mm mal 10 mm.

Die Filterfrequenzen der Hochpassfilter sind in 3 Gruppen unterteilt (Tabelle 5.1). Alle Filter haben denselben Abstand des Durchlassbereiches zum Sperrbereich. Die Filterfrequenzen sollten bei einer finalen Anwendung am Triebwerk optimiert und auf die Position des Piezoelementes am Lager abgestimmt werden.

Eine Hochpassfilterung mit feststehenden Frequenzstufen ist für eine Anwendung, bei der die Rechenzeit eine Rolle spielt, vorteilhaft. Ist eine auf den Betriebszustand der Applikation angepasste Filterung möglich, können Hochpassfilter mit angepassten Filterwerten verwendet werden. Es wird ein Vergleich der Ergebnisse dargestellt, die mit festen Filterwerten und einem den Betriebsbedingungen angepassten dreigeteilten Filter erreicht werden. Angabe in % der erkannten Schadüberrollungen zu den maximal möglichen Schadüberrollungen.

Flug Phase	$f_{c,max}$ [Hz]	$f_c \cdot k_B \cdot 7$ [Hz]	Max. $f_c \cdot k_B \cdot 7$ [Hz]	$f_{s,max}$ [Hz]	f_{stop} [Hz]	f_{pass} [Hz]
Leerlauf	66	10639	10776	136	10915	11115
Sinkflug	67	10776		138		
Reiseflug	90	14476	15990	185	16199	16399
Steigflug	96	15477		200		
Start	99	15990		208		
Maximale Drehzahl	105	16833	16833	222	17056	17256

Tabelle 5.1: Sperr- und Durchlassfrequenzen der Hochpassfilter in Abhängigkeit von den Wellendrehzahlen.

Flugzyklus	Hochpassfilter drei feste Werte [%]	Frequenzvariabler Hochpassfilter [%]
Gesamt	60,1177	66,6499
Leerlauf	25,7764	34,058
Sinkflug	31,906	38,0157
Reiseflug	82,7643	87,9683
Steigflug	69,7275	78,9102
Start	41,0596	44,3709
Maximale Drehzahl	41,0377	43,3962

Tabelle 5.2: Verbesserung der Fehlererkennungsrate durch variable Hochpassfilter. Die %-Zahlen bedeuten hierbei den Anteil der erkannten Schadüberrollungen, basierend auf der Gesamtzahl der möglichen Schadüberrollungen.

5.2.3 Auswertung von Seitenbändern

Die in dieser Arbeit verwendeten Piezoelemente sind an festen Positionen auf den Lageraußenringen angebracht. Die Schadüberrollungen bei Kugel- oder Innenring-schäden variieren in den Entfernungen zur Sensorposition. Dadurch kommt der Körperschall mit unterschiedlichen Amplituden beim Sensor an. Bei einem Kugelschaden geht die Variation der Amplituden mit dem Umlauf der geschädigten Kugel im Lager einher. Dies führt zu einer Amplitudenmodulation mit der Käfigfrequenz f_c , die zugleich die Umlauffrequenz der geschädigten Kugel darstellt. Daraus ergeben sich Seitenbänder zu der Schadüberrollfrequenz f_B der Kugel im Abstand der Käfigfrequenz

$\pm f_c$. Erkannte Seitenbänder erhöhen die Sicherheit bei der Bestimmung und Zuordnung eines Lagerschadens.

In der Abbildung 5.17 ist die Kugelrotationsfrequenz f_B bei der Überrollung eines Kugelschadens durch das Hüllkurvenspektrum der Strukturresonanz dargestellt. Die Schadüberrollfrequenzen f_B mit den zugehörigen Seitenbändern $\pm f_c$ wiederholen sich als harmonische Frequenzen im Spektrum, dadurch kann für eine Schadensanalyse der Frequenzbereich mit dem besten Signal/ Rauschverhältnis ausgewählt werden. Die Seitenbänder im Abstand der Käfigfrequenz f_c besitzen eigene harmonische Oberschwingungen.

Eine Erhöhung der Sicherheit einer Schadaussage wird erzielt durch eine Analyse bei unterschiedlichen Wellenfrequenzen f_s (siehe Abbildung 5.17). Bei veränderten Wellenfrequenzen f_s müssen sich die Schadüberrollfrequenzen f_B und die zugehörigen Seitenbänder $\pm f_c$ entsprechend den Gleichungen aus dem Kapitel 3.2.6 verändern.

Dies gilt ebenso für die Harmonischen der Überrollfrequenzen f_B und der Seitenbänder $\pm f_c$ (siehe Abbildung 5.19).

5.2.4 Hüllkurvenbildung über abklingende Eigenschwingungen des Lagers

Bei der Überrollung von Schäden oder Partikeln im Kugellager kommt es zu einem zeitlich kurz andauenden Stoß (siehe Abbildung 5.4). Der Stoß selbst ist messtechnisch nur schwer erfassbar, da eine hohe Abtastrate benötigt würde, um sicherstellen zu können, dass ein kurzer Impuls zu jeder Zeit erfasst wird. Ein Impuls, der bei der Schadüberrollung entsteht, regt viele Eigenfrequenzen der umliegenden schwingfähigen Strukturen zum Schwingen an. Die Schwingungen dieser Eigenfrequenzen erfahren Dämpfungen mit unterschiedlichen Abklingzeitkonstanten. Angeregte Eigenfrequenzen sind dann als abklingende Schwingungen messbar. In der Wiederholfrequenz der angeregten abklingenden Schwingungen der Eigenfrequenzen ist die Information über den Schaden enthalten. Um die Wiederholfrequenz zu erhalten, muss eine Hüllkurve um die sich wiederholenden Eigenfrequenzen gelegt werden. Eine Möglichkeit der Hüllkurvenbildung ergibt sich mit der Gleichrichtung und der anschließenden Tiefpassfilterung der Eigenschwingungen. Eine andere mögliche Methode stellt die Verwendung der Hilberttransformation dar. Die Einhüllende ergibt sich aus dem Betrag der Originalfunktion $u(t)$ plus der imaginären Hilbert transformierten $i H\{u(t)\}$ der Originalfunktion.

Die Hilbert-Transformation wird mit der integrierten Matlabfunktion realisiert.

$$h(t) = 1/(\pi t) \quad (5.4)$$

$$H\{f(t)\} = f(t) * \frac{1}{\pi t} \quad (5.5)$$

$$H\{f(t)\} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f(x)}{t-x} dx \quad (5.6)$$

Wird ein amplitudenmoduliertes Signal $u_m(t)$ vorausgesetzt, wird die Hüllkurve wie folgt gebildet (siehe Schreier [31]).

$$u(t) = u_m(t) \cdot \cos(\omega t + \phi) \quad (5.7)$$

$$u_a(t) = u(t) + i H\{u(t)\} \quad (5.8)$$

$$u_a(t) = u_m(t) \cdot [\cos(\omega t + \phi) + i \cdot \sin(\omega t + \phi)] \quad (5.9)$$

$$u_a(t) = u_m(t) \cdot e^{i(\omega t + \phi)} \quad (5.10)$$

$u_m(t)$ ist der Betragsverlauf der Funktion $u_a(t)$ und entspricht der gesuchten Hüllkurve der Funktion $u(t)$. Praktisch gesehen handelt es sich um die Erweiterung einer Schwingung mit einem orthogonalen Anteil, um über „Euler“ die Amplitudenbeziehung $u_m(t)$ zu gewinnen.

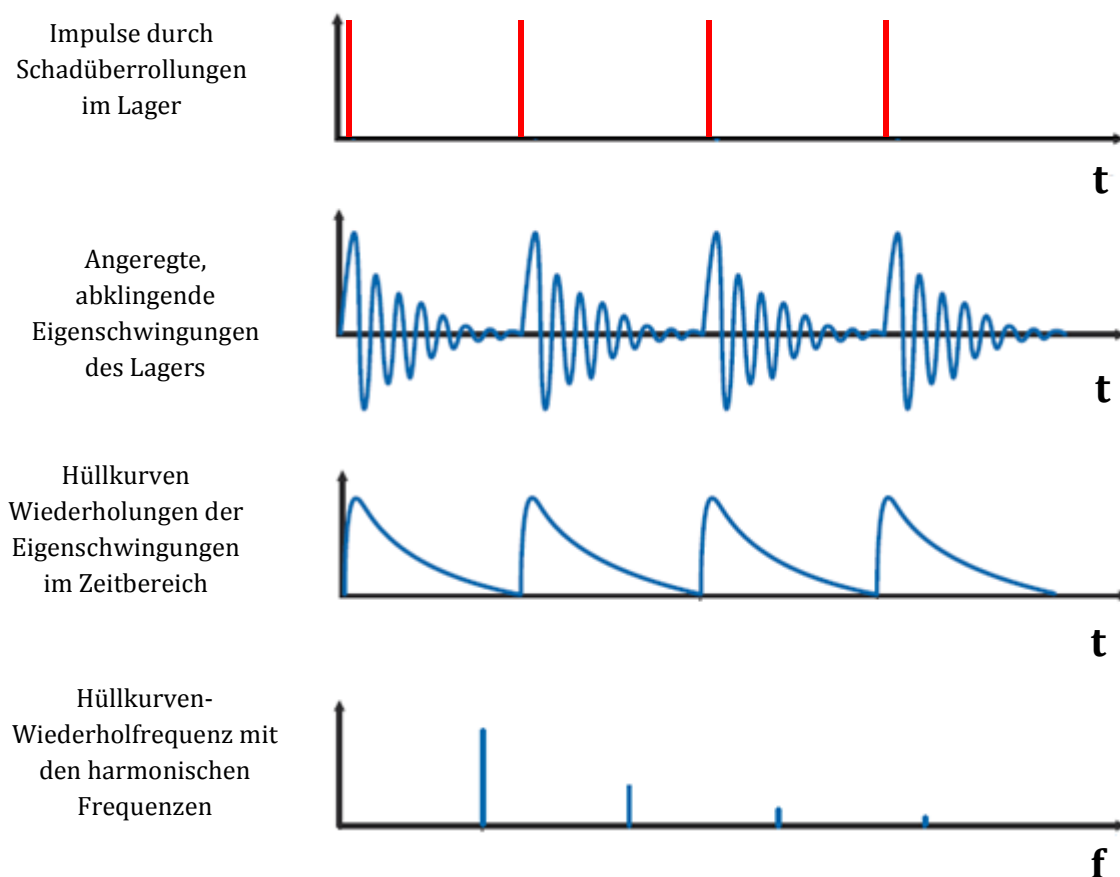


Abbildung 5.14: Impulse durch Schadüberrollungen; angeregte, abklingende Eigenschwingung und Hüllkurvenwiederholfrequenz der Signale.

In der spektralen Darstellung tritt das entsprechende Schadsignal mit in den harmonischen Überrollsignalen in der Wiederholung auf (siehe Abbildung 5.14). Bei Kugel-

schäden treten zusätzlich Seitenbänder im Abstand der Käfigfrequenz auf, bei Innenringschäden im Abstand der Wellenfrequenz.

5.2.5 Übersicht der Signalverarbeitung

In der Abbildung 5.15 ist die Abfolge in der Auswertung der Signale der Piezoelemente zur Erkennung und Zuordnung von Schadsignaturen dargestellt. Weiterhin werden Elemente dargestellt, die eine Schätzung der verbleibenden Lebenszeit eines Lagers ermöglichen sollen.

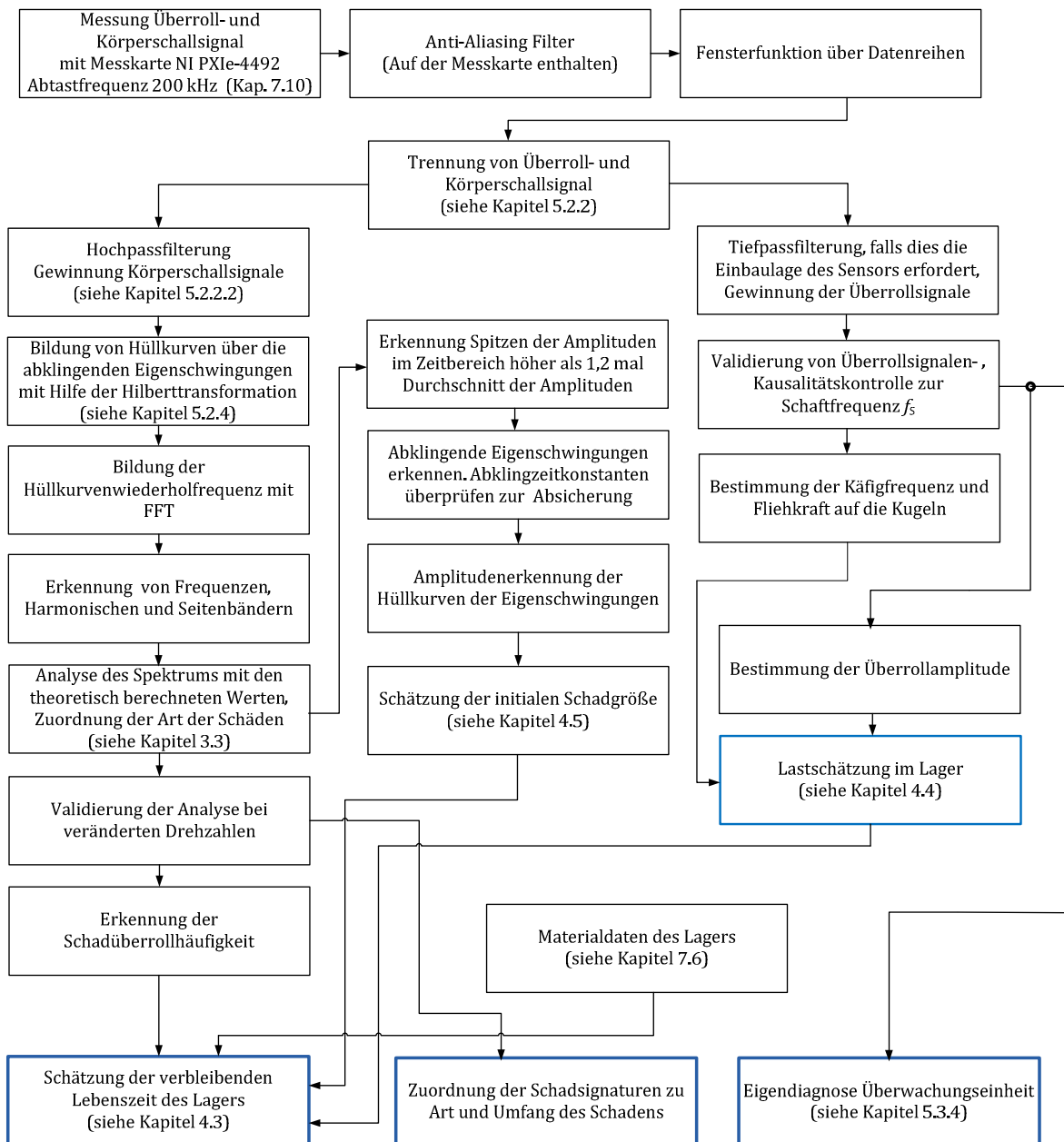


Abbildung 5.15: Übersicht über den Ablauf der Auswertung der Signale der Piezoelemente.

Die folgende Darstellung zeigt die Abfolge der Auswertung der gemessenen Signale der Piezoelemente am Außenring von Schrägkugellagern. Die Daten werden auf dem Prüfstand AN58 mit Triebwerkshauptwellenlagern aufgenommen.

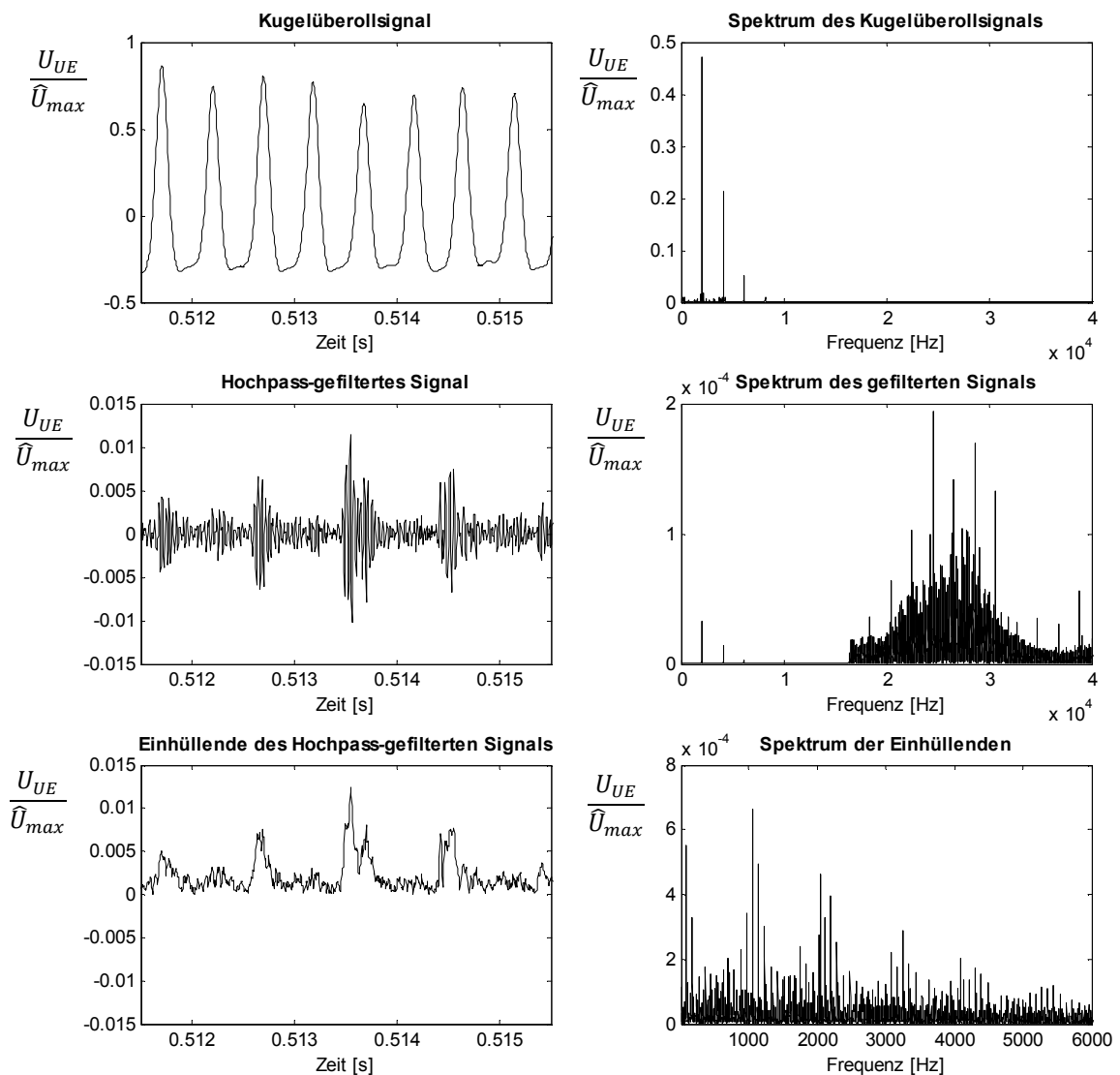


Abbildung 5.16: Übersicht der Signale bei der Auswertung. Alle Amplituden sind auf die Scheitelwerte $\hat{U}_{max}$ der Ausgangsspannung des Sensors am Außenring normiert.

In der Abbildung 5.16 sind die Schritte in der Verarbeitung der Signale von Piezoelementen in einer Übersicht dargestellt. Das Rohsignal links oben zeigt ein Signal, das bei der Überrollung der Position mit einem Piezoelement entsteht. In dieser Darstellung sind hochfrequente Signalanteile, die bei der Überrollung eines Schadens entstehen, noch nicht erkennbar. Durch eine Hochpassfilterung des Rohsignals wird das Signal links in der Mitte in der Abbildung 5.16 generiert. Dieses Signal zeigt das gedämpfte Ausschlagen der Amplituden von Eigenfrequenzen. Das Bild unten links in der Abbildung 5.16 zeigt das Hüllkurvensignal der Eigenfrequenzen. Das Bild unten

rechts in der Abbildung 5.16 zeigt die Wiederholffrequenz der Hüllkurven. Die Frequenzen des Hüllkurvenspektrums werden entsprechend dem beschriebenen Vorgehen im Kapitel 5.3 ausgewertet und die Merkmale bestimmt, die typisch für die jeweiligen Lagerschäden sind.

5.3 Ergebnisse, Erkennung von Schäden in Schrägkugellagern

Dargestellt sind Ergebnisse der Schaderkennungen von Versuchen mit Triebwerks-hauptwellenlagern, die auf dem Prüfstand AN 58 durchgeführt werden. Die Erkennung der Fehlersignaturen geschieht automatisch durch die in der Programmiersprache *MATLAB* programmierten Methoden (siehe Kapitel 5.2).

5.3.1 Erkennung von Kugelschäden

Zur Erkennung von Kugelschäden werden die berechneten oberen und unteren Grenzen der Frequenzen aus Kapitel 3.2.6 verwendet. Die Abbildung 5.17 zeigt eine erkannte Kugelrotationsfrequenz f_B und die höher harmonischen Frequenzen plus der Seitenbänder im Abstand der Käfigfrequenzen $\pm f_C$. In dem oberen Bild der Abbildung 5.17 sind die Frequenzen bei Reisefluggeschwindigkeit dargestellt. In dem unteren sind Bild der Abbildung 5.17 sind die Frequenzen bei maximalem Schub dargestellt.

Die Überprüfung auf vorhandene Merkmale (Abbildung 5.17, oberes Bild) erfolgt entsprechend der im Kapitel 3.2.6 gezeigten Berechnungen. Kontrolliert wird das Vorhandensein von Kugelrotationsfrequenzen f_B und deren Harmonische $n \cdot f_B$ bei Reiseflugbedingungen. Weiterhin werden bei diesem Betriebszustand die Seitenbandabstände der Käfigfrequenzen $\pm f_C$ kontrolliert. Zur Sicherstellung einer korrekten Fehleraussage erfolgt die Überprüfung auf vorhandene Merkmale eines Kugelschadens zusätzlich bei maximalem Schub (Abbildung 5.17, unteres Bild).

Die Abbildung 5.17 zeigt eine erkannte Kugelrotationsfrequenz f_B und die höher harmonischen Frequenzen plus der Seitenbänder im Abstand der Käfigfrequenzen $\pm f_C$. In dem oberen Bild der Abbildung 5.17 sind die Frequenzen bei Reisefluggeschwindigkeit dargestellt. In dem unteren Bild der Abbildung 5.17 sind die Frequenzen bei maximalem Schub dargestellt.

Die Überprüfung auf vorhandene Merkmale (Abbildung 5.17, oberes Bild) erfolgt entsprechend der im Kapitel 3.2.6 gezeigten Berechnungen. Kontrolliert wird das Vorhandensein von Kugelrotationsfrequenzen f_B und deren Harmonische $n \cdot f_B$ bei Reiseflugbedingungen. Weiterhin werden bei diesem Betriebszustand die Seitenbandabstände der Käfigfrequenzen $\pm f_C$ kontrolliert. Zur Sicherstellung einer korrekten Fehleraussage erfolgt die Überprüfung auf vorhandene Merkmale eines Kugelschadens zusätzlich bei maximalem Schub (Abbildung 5.17, unteres Bild).

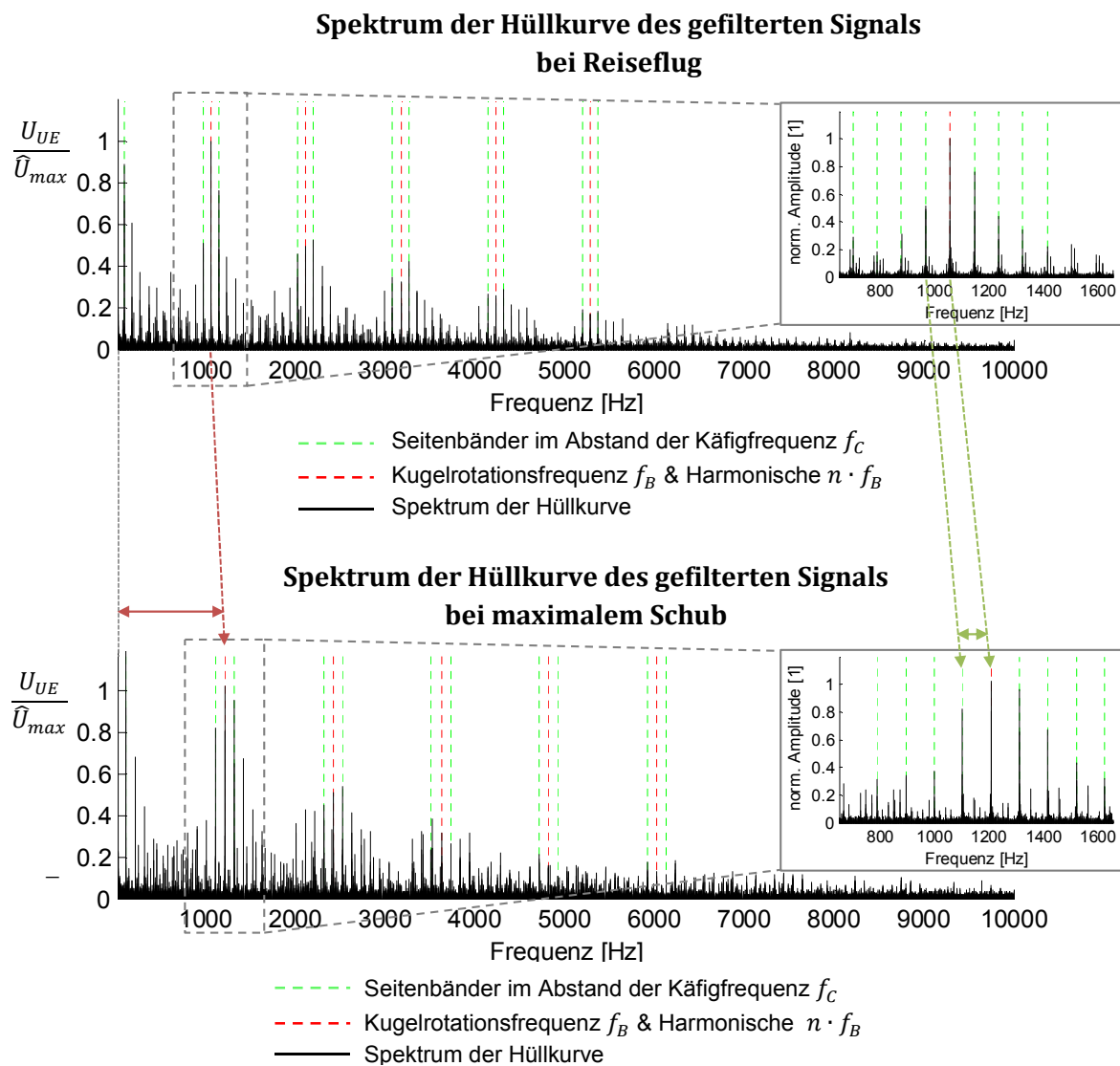


Abbildung 5.17: Erkannte Merkmale eines Kugelschadens.

Bei einer Veränderung der Wellenfrequenzen f_s verändern sich die Schadüberrollfrequenzen f_B bei der Überrollung der Kugel, zugleich verändern sich ebenfalls die Seitenbandabstände zu den Schadüberrollfrequenzen f_B mit den Käfigfrequenzen f_C . Abbildung 5.17 zeigt nach der Bewertung aller Merkmale einen eindeutigen Kugelschaden.

5.3.2 Erkennung von Innenringschäden

Die Abbildung 5.18 zeigt einen erkannten Innenringschaden mit der Überrollfrequenz f_I . Im Abstand der Wellenfrequenz f_s treten Seitenbänder $\pm f_s$ rechts und links des Schadüberrollsignals f_I und dessen harmonischen Frequenzen auf. Zu der Überrollfrequenz f_I als auch zu den harmonischen Frequenzen treten Seitenbänder im Abstand der Wellenfrequenz $\pm f_s$ auf. Eine zusätzliche Sicherheit bei der Erkennung von

Innenringschäden ergibt sich daraus, dass sich bei einer Veränderung der Wellenfrequenz f_s die Schadüberrollfrequenz f_I und die Seitenbandabstände der Wellenfrequenz $\pm f_s$ ebenfalls verändern.

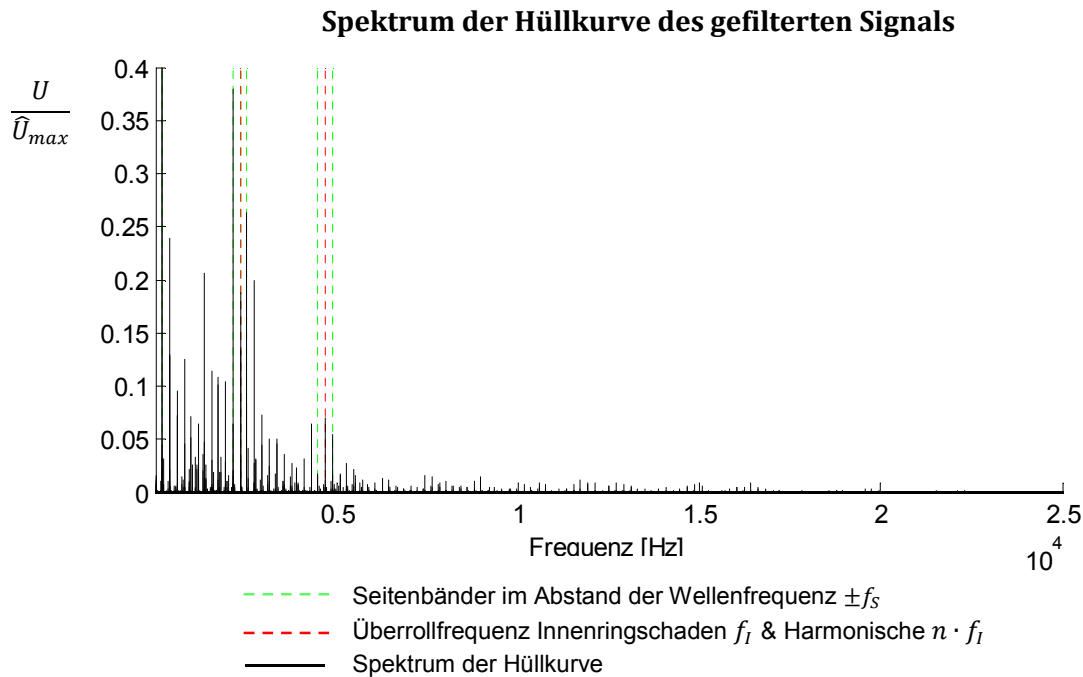


Abbildung 5.18: Erkannte Merkmale eines Innenringschadens.

Die Überprüfung auf vorhandene Merkmale (Abbildung 5.17, oberes Bild) erfolgt entsprechend den im Kapitel 3.2.6 gezeigten Berechnungen. Kontrolliert wird das Vorhandensein von Innenringfrequenzen f_I und deren Harmonischen $n \cdot f_I$. Weiterhin wird das Vorhandensein von Seitenbändern im Abstand der Wellenfrequenz $\pm f_s$ überprüft.

5.3.3 Erkennung von Außenringschäden

Eine eindeutige Bestimmung eines Außenringschadens ist im Frequenzbereich nicht möglich, da die Hüllkurve von Eigenschwingungen eines Außenringschadens dieselben Frequenzen beinhaltet wie die Überrollung der Sensorposition durch eine ungeschädigte Kugel. Die Amplituden der Überrollfrequenzen und deren harmonische Frequenzen können deutlich höher sein als bei Schadüberrollungen die Signalanteile der Hüllkurven der abklingenden Strukturresonanzen.

In den in dieser Arbeit durchgeführten Versuchen sind Sensorelemente am stillstehenden Außenring des Lagers befestigt. Bei der Überrollung eines Schadens auf dem Außenring bleibt der Abstand eines Schadensignals zum Sensor konstant. Damit ist auch die Dämpfung der Amplitude des Schadensignals vom Entstehungsort bis zum Sensor konstant. Dies hat zur Folge, dass im Fehlerfall keine Amplitudenmodulation

der Körperschallsignale auftritt. Daraus resultierend werden bei einem Außenring-schaden im Frequenzbereich keine Seitenbänder erzeugt, daher fällt diese Möglich-keit zur Validierung von Außenringschäden aus. Eine sichere Erkennung von Außen-ringschäden im Frequenzbereich ist somit bei am Außenring angebrachten Körper-schallsensoren nicht möglich.

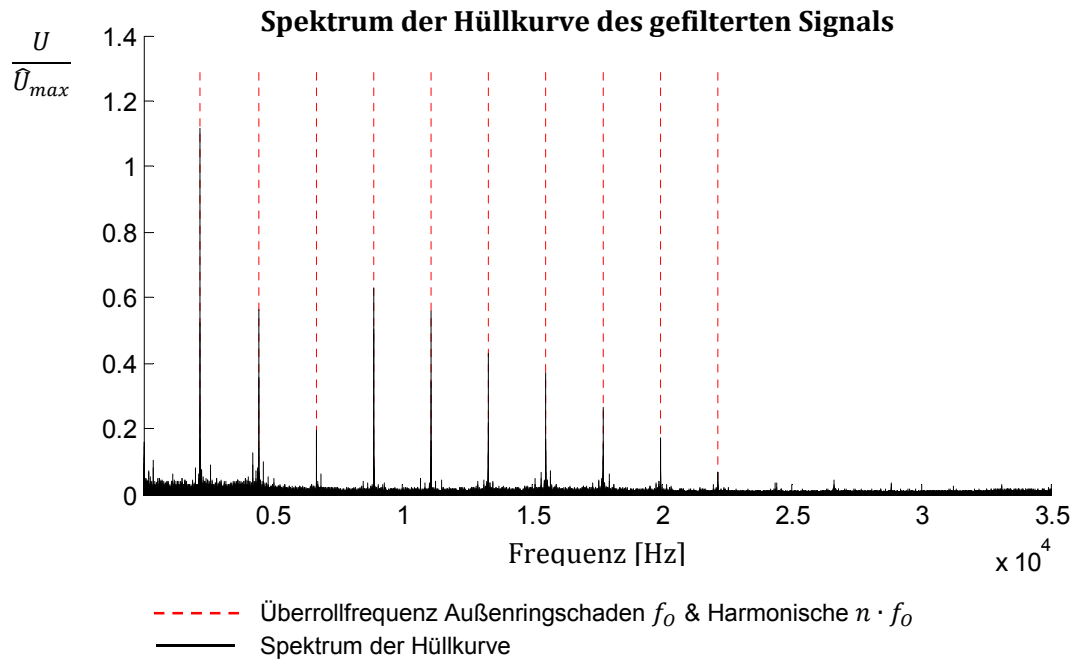


Abbildung 5.19: Möglicher Außenringschaden, muss durch Betrachtung im Zeitbe-reich validiert werden.

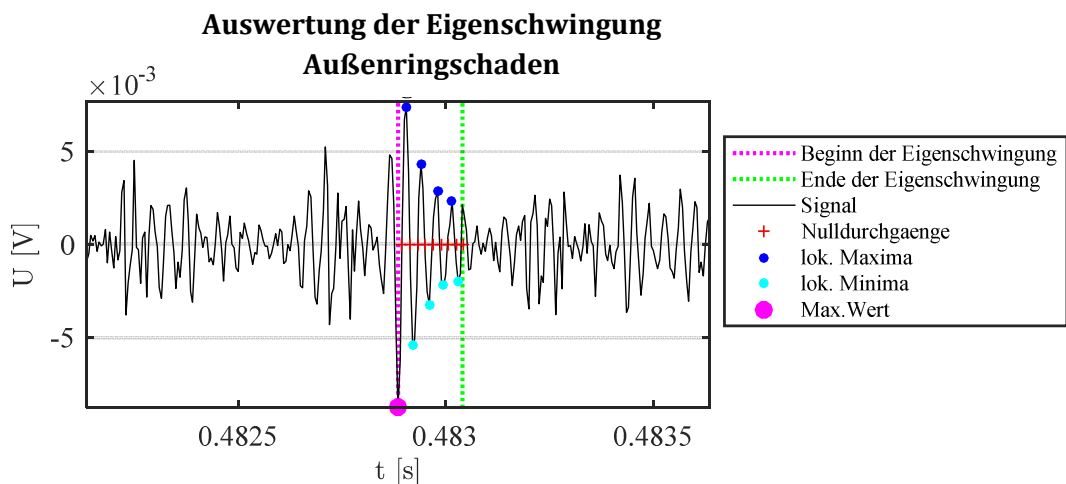


Abbildung 5.20: Im Zeitbereich erkannter Außenringschaden, zu sehen sind die ab- klingenden Eigenschwingungen [8EA].

Eine Möglichkeit der Erkennung ist eine Validierung von möglichen Außenringschä- den im Zeitbereich. Dabei werden die durch die Schadüberrollungen angeregten ab-

klingenden Eigenschwingungen ausgewertet. Diese werden über die nahezu äquidistanten Nulldurchgänge der abklingenden Eigenschwingungen erkannt (rote Kreuze, Abbildung 5.20). Eine Auswertung der Eigenschwingungen kann im Zeitbereich auch durch eine Erkennung der Abklingzeitkonstanten unterstützt werden. Eine Überprüfung typischer, erwarteter Abklingzeitkonstanten der Eigenschwingungen kann die Sicherheit einer Aussage erhöhen.

Somit ist eine eindeutige Erkennung von Außenringschäden im Zeitbereich über die Auswertung angeregter, abklingender Eigenschwingungen möglich.

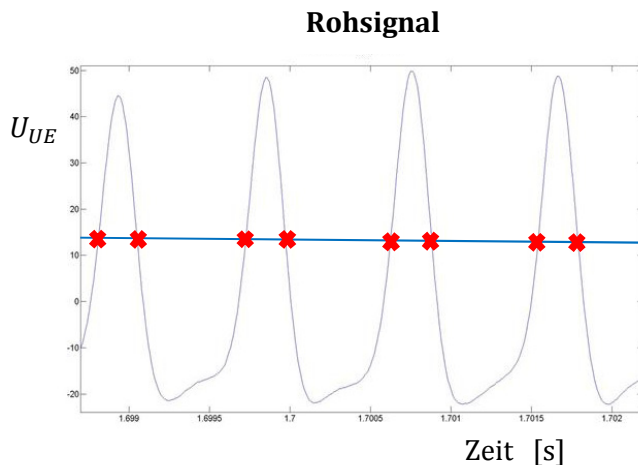
Die Dominanz der Überrollsignale am Außenring kann vermindert werden, indem die Piezoelemente nicht direkt in den Lastpfad am Außenring integriert werden, sondern in einem Abstand von dem konstruktionsbedingten Lastpfad. In der Folge sind dann die höherharmonischen Signalanteile des Überrollsignals nicht mehr so störend für die zu erkennenden Fehlerüberrollsignale am Außenring. Die Überrollsignale sollten jedoch so deutlich sein, dass diese zur robusten Funktionsvalidierung der Messkette verwendet werden können (siehe Kapitel 5.3.4).

5.3.4 Eigendiagnose der Lagerüberwachungseinheit

Der Ausfall einer Triebwerkskomponente im Betrieb kann hohe Folgekosten verursachen und gravierende Folgen haben. Deshalb muss die Funktion einer Überwachungseinheit sichergestellt werden. Dafür ist es notwendig, eine Eigendiagnose vorzusehen. Beim Einsatz einer Lagerüberwachung für ein Triebwerk muss berücksichtigt werden, dass im Normalfall ein ungeschädigtes Lager vorhanden ist, das somit keine Signatur für einen Kugelschaden liefert. Dies bedeutet, dass über eine längere Zeit keine Schadsignatur auftreten wird. Bei auftretenden Kugelschäden hingegen ist es entscheidend, einen Fehler so früh wie möglich zu erkennen, da der Fehlerfortschritt in der nachgelagerten Schädigung der metallischen Lagerlaufringe in kurzer Zeit zu einem Ausfall des Triebwerks führen kann. Deshalb sollten speziell Bereiche im Frequenzbereich, die auf Kugelschäden hindeuten, fortlaufend überwacht werden. Triebwerkselemente sind üblicherweise für eine Betriebszeit von 40.000 Stunden entworfen. Für elektronische Bauelemente sind solche Betriebszeiten nicht immer zu erreichen. Diese Schwierigkeit kann umgangen werden, indem die Überwachungseinheit Fehlfunktionen in der Überwachung erkennt und meldet. Eine Eigendiagnose der Überwachungseinheit soll die Funktion von Sensoren, Signalleitungen, Rechnerhardware und Software umfassen. Die Überwachung der Hardware Komponenten erfolgt über die Signale der Sensoren. Eine Überwachung der Software der Diagnosefunktionen ist durch einen sogenannten „Watchdog“ möglich. Diese Funktion wird in wichtige Funktionen der Software eingebracht. Durch das regelmäßige Durchlaufen der „Watchdog“-Funktionen werden Hardwareausgänge getriggert und bei Hardware-Timern Zeitabläufe gestartet. Es wird überwacht, ob innerhalb dieser Zeitabläufe Triggersignale ausgelöst werden. Beim Ausbleiben einer Triggerung wird eine Fehlfunktion angezeigt. Die Signale der verschiedenen Sensoren können zueinander über Modelle validiert werden.

5.3.4.1 Überwachungsmöglichkeiten durch die Überrollsignale vom Piezoelement

Die Erkennung eines typischen Signalverlaufes bei der Überrollung der Position des Piezoelementes durch eine Kugel zeigt die Funktion einer Überwachungskette an. Dabei wird die Funktion des Sensors, der Leitungsverbindung, des A/D-Wandlers und der Auswertung über die Soft- und Hardware im Überwachungsrechner überprüft. Ein Vergleich der Amplitude und Frequenz, des Rohsignals des Piezoelementes mit zuvor aufgezeichneten Tabellenwerten erlaubt eine Funktionsprüfung der Messkette.

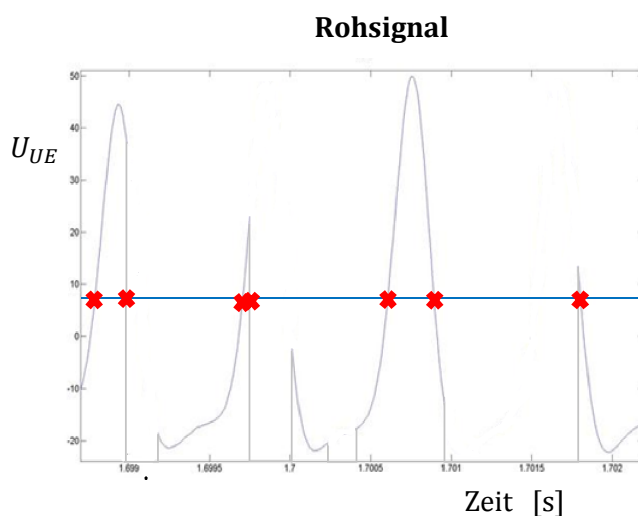


Anzahl der Nulldurchgänge und Abstände der Nullstellen äquidistant sind zutreffend. Amplitudenhöhe des Signals ausreichend.

→ Sensor und Auswerteeinheit funktionieren

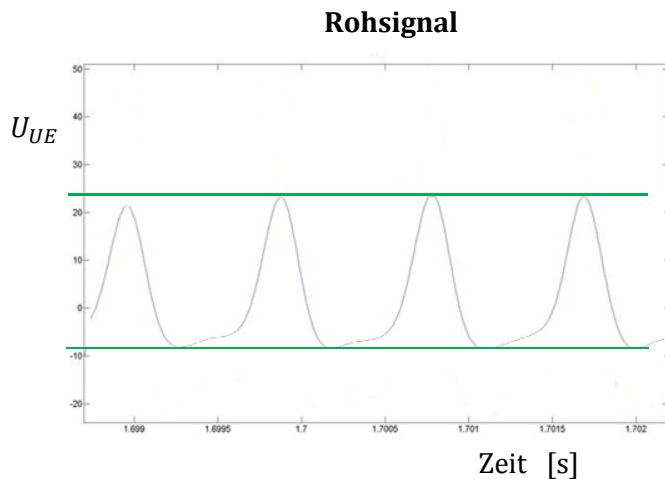
Abbildung 5.21: Gut-Zustand, Signal eines Piezoelementes bei der Überrollung durch eine Kugel [2EA].

Die Abweichungen der aktuellen Werte von den abgespeicherten Referenzwerten sollten innerhalb vorgegebener Grenzen liegen.



Abstände der Nullstellen sind unregelmäßig.
Mögliche Fehlerquellen:
Wackelkontakt in der Leitung,
Wackelkontakt im Sensor.
Im Frequenzbereich ist die Aussage nicht eindeutig! Deshalb Auswertung zur Sicherheit im Zeitbereich.

Abbildung 5.22: Schlecht-Zustand, Nullstellen und Abstände sind unregelmäßig [2EA].



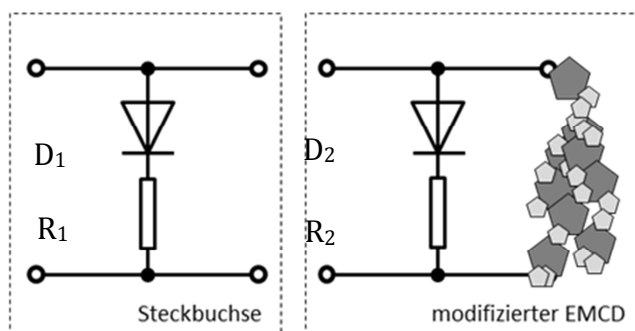
Amplitude zu gering.
Mögliche Fehlerquellen:
Kontaktprobleme in Verbindungen,
Sensordegradierung,
Sensordefekt intern.
A/D-Wandler, Software.

Abbildung 5.23: Schlecht-Zustand, Amplitude zu klein [2EA].

Referenzen für Vergleichswerte können beim Probelauf der Triebwerke gewonnen werden. Eine Alternative ist die Aufzeichnung der Sensorsignale in Standard-situationen während des Flugbetriebes. Die gespeicherten Sensorsignale sollen mit den aktuellen Werten während des Fluges verglichen werden. Dabei können Abweichungen festgestellt und zur Fehlermeldung genutzt werden. Als Beispiel dienen die in der Abbildung 5.22 und Abbildung 5.23 dargestellten Fehlerfälle in der Messkette der Piezoelemente.

5.3.4.2 Überwachung des modifizierten EMCD (BITE Test)

Ein traditioneller EMCD besitzt ein BITE Netzwerk entsprechend der Abbildung 5.6. Dargestellt ist ein einfaches Prüfnetzwerk. Die Widerstände dienen zur Überwachung der Funktion und der Erkennung von Fehlerfällen im Sensor und der Zuleitung (siehe 5.4.2.1). Ein sogenannter modifizierter EMCD besitzt ein analoges Prüfnetzwerk bestehend aus Widerständen, das mit Dioden oder Kondensatoren erweitert ist.



Beispiel einer einfachen BITE Funktion.

Abbildung 5.24: Widerstands- Diodennetzwerk für die Funktionsüberprüfung.

Die Wahl der Widerstandswerte für die Widerstände R_1 und R_2 , aus der Abbildung 5.24, kann sich auf sehr kleine Widerstandswerte beschränken, da im Messmodus gegen die hochohmige Sperrrichtung der Diode gemessen wird. Die Widerstände werden benötigt, um die Parallelschaltung zu erkennen, wenn der Stecker mit dem Sensor verbunden ist.

5.3.4.3 Funktionsprüfung der Messkette für den EMCD:

Umpolung der Spannung in Durchlassrichtung der Diode.

R_1 und R_2 als Parallelschaltung sichtbar, dann:

- ➔ Stecker eingesteckt
- ➔ Kein Massenschluss
- ➔ Leitungsverbindung in Ordnung

Nur Wert von R_1 als Widerstandswert sichtbar:

Stecker nicht im EMCD eingesteckt

Wert kleiner als Parallelschaltung von R_1 und R_2 :

- ➔ Masseschluss

Wert größer als Parallelschaltung von R_1 und R_2 :

- ➔ Unterbrechung der Leitung

Die messbare Steilheit beim Umschalten der Polarisierung für den BITE Test kann ebenfalls für Prüfzwecke verwendet werden.

Bei der Wahl der Lösung, einen Kondensator für die Umschaltung zwischen BITE und Messmodus zu wählen, wird zwischen Wechselspannung (AC) und Gleichspannung (DC) gewechselt.

5.3.5 Plausibilitätsprüfung der Sensorsignale

Um nichtzutreffende Schadensaussagen zu vermeiden, sollten mehrere unabhängige Informationen von Sensoren verwendet werden. Unabhängige Mess- und Sensorprinzipien sollen in den Aussagen aufeinander abgestimmt werden.

Bei dem hier vorgeschlagenen Messaufbau bestehend aus Piezoelementen und einem modifiziertem EMCD könnte eine abgestufte Warnung implementiert werden. Im Fall, dass die Körperschallsignaturen des Piezoelementes Kugel- oder Laufringschäden anzeigen und dann in der Folge Metallpartikel im Öl angezeigt werden, ist die Wahrscheinlichkeit eines Lagerschadens hoch. Es können auch signifikante Abweichungen von Öltemperaturen zur Absicherung von Schadaussagen hinzugezogen werden. Sich ausschließlich auf die Indikationen eines EMCD zu verlassen, ist mit hohen Unsicherheiten verbunden, da verschiedene Quellen die Ursache für Metallpartikel sein können. Mögliche Indikationen von Metallpartikeln im Öl erfolgen zu einem späten Zeitpunkt im Schadprozess.

6 Ergebnisse und Ausblick

6.1 Ergebnisse

Es wird erfolgreich ein Konzept zur Überwachung hybrider Schrägkugellager aufgebaut und validiert. Dies erfolgt unter Beachtung wirtschaftlicher Belange sowie von Erfordernissen, die aus Luftfahrtbestimmungen resultieren.

In dieser Arbeit wird gezeigt, dass eine Erkennung von Kugel- und Laufringschäden zu einem frühen Zeitpunkt im Schädigungsprozess der Lagerkomponenten möglich ist. Es wird der Nachweis geführt, dass ein Kugelschaden auf einer keramischen Kugel in relativ kurzer Zeit zu einem massiven Folgeschaden auf den Lagerringen führen kann. Ein Schaden auf einer keramischen Kugel wird somit als kritischer Anfangsschaden in einem Hybridlager bestätigt.

In der vorliegenden Arbeit werden Schwachstellen bei der Berechnung der Käfig- und Kugelrotationsfrequenzen schnelldrehender, hybrider Schrägkugellager dargelegt. Es wird gezeigt, dass eine wesentliche Verbesserung bei der Bestimmung der Schadüberrollfrequenzen durch die Messung der Käfiggeschwindigkeit erreicht werden kann. Auf dieser Grundlage kann nachgewiesen werden, dass es auch bei hybriden Schrägkugellagern möglich ist, für alle Lagerkomponenten Frequenzbereiche zur Erkennung von Fehlern zu bestimmen.

Es kann dargestellt werden, dass Schadstellen auf Kugeloberflächen die Rotationsträgheitsmomente von Kugeln nicht so weit ändern, dass sich Schäden auf den Kugeln aus der überrollten Bahn „herausdrehen“. Dies wird gezeigt für keramische Kugeln mit einem Durchmesser von 25,4 mm und einem maximal eingebrachten Kugelschaden mit einem Durchmesser von 2,2 mm bei einer Schadenstiefe von 0,2 mm. Es wird nachgewiesen, dass Kugelschäden mindestens abschnittsweise stabil überrollt werden.

Der Nachweis kann erbracht werden, dass mit Piezoelementen am Lageraußenring die Überrollamplituden der wirkenden Kraft und die Geschwindigkeiten der Kugeln gemessen werden können und zugleich eine messtechnische Erfassung von Schadüberrollungen über die Auswertung von Körperschall möglich ist.

Es erfolgt der Nachweis, dass bei einem hybriden Kleinlager eine Erkennung von Rissen in den keramischen Kugeln im Betrieb möglich ist. Bei einem Triebwerkhauptwellenlager mit keramischen Kugeln von 25 mm Durchmesser können Ausbrüche von 0,5 mm Durchmesser auf den Kugeln bei einer Tiefe von 0,2 mm zuverlässig erkannt werden.

Der Beweis erfolgt, dass Piezoelemente direkt an den Lagerringen Lagerschäden zu einem früheren Zeitpunkt detektieren können als vergleichsweise Vibrationssensoren oder Metallpartikelsensoren.

Der Forderung nach einer Eigendiagnose und Überwachung der kompletten Messkette wird entsprochen durch die fortlaufende Auswertung der Überrollsignale der Piezoelemente.

Zum Aufbau eines Lebensdauermodells werden Elemente für die Abschätzung der verbleibenden Betriebsdauer eines hybriden Schrägkugellagers nach der Erkennung

eines Lagerfehlers geliefert. Dazu gehören die Erfassung der Häufigkeit der Schadüberrollung, die Axiallastschätzung und die Schätzung initialer Schadgrößen auf keramischen Kugeln.

Es erfolgt der Nachweis, dass mit den Überrollsignalen der Piezoelemente eine Schätzung der axialen Kraft im Schrägkugellager vorgenommen werden kann. Aus den Amplituden einer durch Schadüberrollung angeregten Eigenschwingung und der Überrollamplitude des Piezoelementes kann auf die Schadgrößen bei Ausbrüchen aus Kugeloberflächen geschlossen werden.

Es wird gezeigt, dass nach dem Eintreten von Oberflächenausbrüchen aus den Laufringen und dem Nachweis ferromagnetischer Partikel im Öl die verbleibende Zeit bis zum Ausfall eines Lagers nur wenige Stunden beträgt. Durch Messergebnisse kann dargestellt werden, dass dieser verbleibende Zeitraum nahezu unabhängig von der Stahlzusammensetzung der Laufringe und deren Oberflächenbearbeitung ist. In Versuchen wird gezeigt, dass defekte keramische Kugeln in hybriden Lagern kleinste metallische Partikel erzeugen können.

Es wird nachgewiesen, dass unter nominellen Lasten ein Schadensfortschritt auf den verwendeten keramischen Kugeln wesentlich langsamer voranschreitet als der Schadensfortschritt auf den Laufringen. Bei kleinen Kugelausbrüchen bis zu 1 mm Durchmesser war kein Schadensfortschritt auf den Kugeln zu erkennen.

Es wird nachgewiesen, dass die Erkennung einer Summe kleinster ferromagnetischer Metallpartikel mit EMCD mit trennbarem Prüfnetzwerk (BITE) möglich ist.

Es wird aufgezeigt, dass eine Erkennung von Lagerfehlern, ausschließlich basierend auf der Messung von Metallpartikeln im Triebwerksöl, zu einem frühen Zeitpunkt im Schädigungsprozess nicht möglich ist.

6.2 Ausblick

Eine Schwachstelle in hybriden Lagern sind geschädigte keramische Wälzkörper, da diese in der Folge die Laufbahnen der Lagerringe schnell schädigen können. Deshalb sollten weitere Anstrengungen unternommen werden, Schäden auf den Wälzkörpern zu einem frühen Zeitpunkt im Schädigungsprozess erkennen zu können. Die frühesten auftretenden Schäden in keramischen Wälzkörpern sind Risse. Es konnte bei Kleinlagern nachgewiesen werden, dass Risse in den Wälzkörpern im Betrieb des Lagers erkannt werden können. Die Möglichkeit der Erkennung von Rissen in keramischen Kugeln sollte auf Triebwerkshauptwellenlager übertragen werden.

Arbeiten an Lebensdauermodellen, zur Abschätzung der verbleibenden Betriebszeit eines Lagers nach dem Eintritt eines Schadens, sollten weitergeführt werden. Methoden zur Lastschätzung und zur initialen Schadenserkennung auf Wälzkörpern sollten weitergeführt und zur Anwendungsreife entwickelt werden.

Durch eine Lasterkennung im Lager könnte das Verlassen der Elastizitätsgrenze und das Erreichen der Plastizitätsgrenze der Laufringe erkannt werden. Dabei würde über die zyklische Verformung die Materialermüdung der Lagerlauflächen betrachtet werden. Somit wäre über die Laufzeit der Lager eine aufsummierende Erfassung der Lagerschädigung denkbar. Möglichkeiten, die verbleibende Lebenszeit eines Lagers

über eine Erkennung der Fehlerfortschrittsgeschwindigkeit zu bestimmen, sollten weitergeführt werden. Dafür sollten für eine Referenz als Basis Fehlersignaturen im Betrieb gesammelt werden. Die Daten sollten aufbereitet und die Erkenntnisse auf die Triebwerke der Triebwerksflotte übertragen werden. Um die Verfügbarkeit von Daten zu gewährleisten, sollte deren Sammlung und Verwaltung langfristig im Voraus geplant werden. Wenn ausreichende Erfahrungen mit einem Lager in einer Anwendung am Triebwerk vorhanden sind, könnten typische Fehlermuster den einzelnen Lagerfehlern zugeordnet werden. Denkbar ist der Aufbau eines Expertensystems, in das die Ergebnisse dieser Arbeit und der auf dieser Arbeit aufbauenden Untersuchungen integriert werden könnten.

Möglichkeiten, Körperschall- und Überrollsignale von Lagern im Betrieb aufzunehmen, sollten weiter verbessert werden. Dazu sollten robuste temperaturstabile Sensortechnologien mit einer hohen Empfindlichkeit gegenüber mechanischen Verformungen auf eine Anwendbarkeit hin überprüft werden. Die Erprobung von piezoelektrischen Keramiken aus der Langasitgruppe und piezoresistiven Keramiken sollte weiter vorgenommen werden.

Arbeiten zur serienreifen Einbettung von Piezoelementen in Lagerringe sollten fortgeführt werden.

Methoden zur Simulation und Berechnung schnell-drehender hybrider Schrägkugellager sollten verbessert werden. Rotationsfrequenzen von Lagerkäfigen und Kugeln sollten in einer ausreichenden Genauigkeit rechnerisch ermittelt werden können, um eine gute Bestimmung von Schadfrequenzen zu ermöglichen.

Technologien zur Erkennung einzelner kleiner Metallpartikel im Öl sollten weiter verbessert werden.

Für eine produktionstechnische Einführung eines Überwachungsverfahrens ist als Nachweis ein Triebwerksversuch oder Versuche in einer triebwerksrelevanten Umgebung erforderlich. Zur Validierung der Überwachungsfunktionen sollte eine Strategie entwickelt werden, um Triebwerksversuche mit defekten Lagern vermeiden zu können. Es sollte geprüft werden, ob der Einbau defekter Lager in Demonstrator-Triebwerke zur Überprüfung der Fehlererkennung vermeidbar ist. Dies könnte durch die Anbringung von Aktuatoren auf den feststehenden Außenringen der Triebwerkslager geschehen. Durch die Erzeugung zyklischer Signale (Pulse) könnten Eigenfrequenzen eines eingebauten Triebwerkslagers angeregt werden. Durch die synthetische Vorgabe von typischen Fehlermustern der betreffenden Lagerkomponenten könnte ein Diagnosesystem getestet und zertifiziert werden.

Eine Möglichkeit zur Reaktion, nach der Erkennung eines Fehlers in einem Schrägkugellager, könnte eine axiale Lastverstellung bieten. Dabei würde die axiale Last auf dem Schrägkugellager durch ein aktives Element (Pneumatikzylinder) verändert. Es bietet sich dadurch die Möglichkeit, beim Eintritt eines Schadens auf den zwei aktiven Laufflächen des Schrägkugellagers auf die anderen beiden ungeschädigten Laufflächen „umzuschalten“.

Eigene und betreute Arbeiten zu dem Thema

Überwachung von Schrägkugellagern in Luftfahrttriebwerken:

- [1EA] R. Lück, T. Eberhardt, Abschlussbericht VEROLAT, 20T0912A, 2013
Lagermonitoring Rudolf Lück,
Grundversuche neue Hybridlager Sören Braun, Tobias Eberhard
- [2EA] R. Lück, T. Eberhardt, Marc Seimert, Abschlussbericht VERLAT-FP, 20T1119A, 2015
Lagermonitoring Rudolf Lück, DoE und Merkmalsfusion Marc Seimert,
Grundversuche neue Hybridlager Sören Braun, Tobias Eberhard
- [3EA] Dilay Dil, Empirical Modelling of Crack Propagation in Hybrid Bearings for Aerospace Applications
Masterarbeit 2013
Werkzeugmaschinenlabor WZL
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
- [4EA] David Hasler, Kinematik und Kinetik der Kugel im Schrägkugellager
Praktikumsarbeit März 2013
Rolls-Royce Deutschland
- [5EA] Sebastian Herrmann, Interpretation von Prüfstandsergebnissen für die Anwendung am Triebwerk am Beispiel eines Hybridlagers
Masterarbeit 2014
Institut für Luft- und Raumfahrt Prof. Dr.-Ing. Dieter Peitsch
Fachgebiet Luftfahrtantriebe Technische Universität Berlin
- [6EA] Björn Petersen, Erkennung von Rissen in Keramikugeln von Hybridlagern in Luftfahrttriebwerken
Masterarbeit 2014
Institut für Luft- und Raumfahrt Prof. Dr.-Ing Dieter Peitsch
Fachbereich Luftfahrtantriebe Technische Universität Berlin
- [7EA] Simon Wieloch, Lasterkennung am Kugellager im Flug-Triebwerk
Masterarbeit 2015
Institut für Konstruktion, Mikro- und Medizintechnik
Prof. Dr.-Ing. Robert Liebich
Fachgebiet Konstruktion und Produktzuverlässigkeit
Technische Universität Berlin

[8EA] Viet Duc Tran, Erkennung der Schadgröße zur Schätzung des Fehlerfortschritts in schnelldrehenden Hybridlagern für Flugzeugtriebwerke
Masterarbeit 2017
Institut für Konstruktion, Mikro- und Medizintechnik
Prof. Dr.-Ing. Robert Liebich
Fachgebiet Konstruktion und Produktzuverlässigkeit
Technische Universität Berlin

Eingereichte Erfindungen und Patente aus dieser Arbeit:

[1P] Druckverlaufsmessung - inverse Magnetostriktion
Rudolf Lück, Anika Schönicke,
DE102010018236.2
EP11 162 307.0
US 8,701,499 B2

[2P] Magnetostriktive Lagerspielanpassung
Rudolf Lück, Anika Schönicke,
DE102010022643.2
EP2577080 B1
US8727626 B2
WO002011151339

[3P] Messung von Feinstspänen im Öl bei Hybridlagern
Rudolf Lück, Peter Höhne,
DE102012219242.5
EP 2 909 621 B1
US 9575023 B2
WO002014064043

[4P] Lagermonitoring und Lastschätzung
Rudolf Lück, Frank Schröer, Peter Höhne,
DE10 2015 214 074.1

[5P] Minimierung der Axialkraft in Schrägkugellagern
Rudolf Lück,
DE10 2016 209 262.6

[6P] Wellenbruchererkennung durch Lastumkehrerkennung im Fanlager
Rudolf Lück,
DE 10 2017 213 090.3

Literaturverzeichnis:

- [1] T. A. Harris and M. N. Kotzalas, *Advanced Concepts of Bearing Technology*, New York: Taylor & Francis, 2007.
- [2] A. B. Jones, „Ball Motion and Sliding Friction in Ball Bearings“, *Journal of Basic Engineering*, 1959.
- [3] T. A. Harris and M. N. Kotzalas, *Rolling Bearing Analysis – Essential Concepts of Bearing Technology*, New York: Taylor & Francis, 2007.
- [4] Eschmann, Hasbargen und Weigand, *Ball and Roller Bearings*, Chichester: Wiley, 1985.
- [5] J. Brändlein, P. Eschmann, L. Hasbargen und K. Weigand, *Ball and Roller Bearings Theory, Design and Application*, Wiley.
- [6] P. J. Dempsey, J. M. Certo und W. Morales, „Current Status of Hybrid Bearing Damage Detection“, *NASA/TM-2004-212882 ARL-TR-3119*, p. 17, 2004.
- [7] H. Kawamura und K. Touma, „Motion of Unbalanced Balls in High-Speed Angular Contact Ball Bearings“, *Journal of Tribology*, pp. 105–110, January 1990.
- [8] B. J. Hamrock und W. J. Anderson, „Rolling-Element Bearings“, *NASA ReferencePublication*, June 1983.
- [9] D. F. Shi, W. J. Wang and L. S. Qu, „Defect Detection for Bearings Using Envelope Spectra of Wavlet Transform“, *Journal of Vibration and Acoustics*, pp. 567–573, October 2004.
- [10] P. Gupta, *Advanced Dynamics of Rolling Elements*, New York: Springer-Verlag, 1984.
- [11] H. Wei, Q. Miao, M. Azarian und M. Pecht, „Health monitoring of cooling fan bearings based on wavelet filter“, *Center for Advanced Life Cycle Engineering University of Maryland College Park*, July 2011.
- [12] S.-w. Fei, „Kurtosis forecasting of bearing vibration signal based on the hybrid model of empirical mode decomposition and RVM with artificial bee colony algorithm“, *School of Mechanical Engineering Donghua Univeristy Shanghai*, November 2014.
- [13] I. i. El-Thalj und E. Jantunen, „A summary of fault modelling and predictive health monitoring of rolling element bearings“, *Industrial Systems, VTT Technical Research Centre of Finland*, 2014.
- [14] L. Hoffmann, M. S. r. Mülle, M. Somavilla und A. W. Koch, „Wälzlagerüberwachung mit faseroptischer Sensorik, Faser-Bragg-Gitter“, *Technische Universität München*, 24. Januar 2007.
- [15] B. Herkert, „Bestimmung des Verschleißes und der Kinematik schnelllaufender Wälzlager mit Hilfe radioaktiver Isotope“, *Gesellschaft für Kernforschung M.B.H. Karlsruhe*, Februar 1972.
- [16] G. Stachowiak und A. Batchelor, *Engineering Tribology Vol. 3*, Elsevier Science, p. 294, 1993.

- [17] J. Shigley, R. Mischke und R. G. Budynas, *Mechanical Engineering Design* Vol. 7, The McGraw-Hill Companies, 2004.
- [18] G. Jacobs und M. Plogmann, *Tribology-Lecture documentation*, Herzogenrath: Schumacher-Verlag, 2010.
- [19] S. Klotzbach und H. Henrichfreise, „Ein nichtlineares Reibmodell für die numerische Simulation reibungsbehafteter mechatronischer Systeme“, *ASIM*, 16. *Symposium Simulationstechnik*, p. 13, 10–13 September 2002.
- [20] W. Jürgensmeyer, *Die Wälzlager*, Berlin: Julius Springer, 1937.
- [21] S. Yamamoto, „A Study on Ball Motion of High-Speed Ball Bearings“, *Soc. Lubr. Eng Vol. 13 J. Japan*, pp. S. 505–521, 1968.
- [22] K. Touma, H. Kawamura und K. Kawakita, „Ball Motion in High-Speed Angular Contact Ball Bearings“, *Proceedings of the JSLE International Tribology Conference Vol. 2*, pp. Seiten 585–590, 1985.
- [23] R. Randall und Bond, *Vibration based Condition Monitoring Industrial, Aerospace and Automotive Applications*, Wiley.
- [24] W. Wang, H. Lang, S. Zhang, Z. Zhao und S. Ai, „Modeling angular contact ball bearing without raceway control hypothesis“, *Mechanism and Machine Theory*, Nr. 82, pp. 154–172, 2014.
- [25] F. Hirano, „Motion of a Ball in Angular Contact Ball Bearing“, *ASLE Vol. 8*, pp. S. 425–434, 1965.
- [26] K. Kawakita und S. Ariyoshi, „The actual motion and the contact angle of a ball in a deep groove ballbearing“, *College of General Education, Kyushu Univeristy*, 1986.
- [27] F. P.-N. W. 8. 1. DA, *Wälzlagerschäden Schadenserkennung und Begutachtung gelaufener Wälzlager*, Schaeffler, Juni 2013.
- [28] M. Hadfield, T. A. Stolarski, R. T. Cundill und H. S., „Failure Modes of ceramic elements with ring-crack defects“, *Tribology International*, 10 December 1992.
- [29] W. Kleber, H.-J. Bartsch, J. Böhm und D. Klimm, *Einführung in die Kristallographie*. 19. Aufl. ISBN 978-3-486-59075-3, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2010.
- [30] M. Lugovy, S. Slyunyayev, S. Yarmolenko, J. Sankar, T. Graule, J. Kuebler, D. Nicholson und N. Orlovskaya, A further insight into spherical indentation: Ring crack formation in a brittle $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{Mg}_{0.2}\text{O}_3$ perovskite., *Acta Materialia*, Vol. 59, 201.
- [31] P. Schreier und L. Scharf, „Statistical signal processing of complex-valued data: the theory of improper and noncircular signals“, *Cambridge University Press*, 2010.
- [32] J. Jedrzejewski und W. Kwasny, „Modelling of angular contact ball bearings and axial displacements for high-speed spindles“, 2010.
- [33] C. Miclea, C. Tanasoiu, L. Amarande, C. F. Miclea, C. Plavitu, M. Cioanher, L. Trupina, C. T. Miclea und C. David, „Effect of Temperature on The Main Piezoelectric Parameters of A Soft PZT Ceramic“, *ROMANIAN JOURNAL OF*

INFORMATION SCIENCE AND TECHNOLOGY, pp. 243–250, 2007 Volume 10, Number 3.

- [34] D. J. Haines, „Ball Race Performance“, *Proc Instn Mech Engrs Tribology Group*, 1970.
- [35] M. Albert und H. Köttritsch, „Wälzlager“, Springer-Verlag, 1987, p. 288.
- [36] P. K. Gupta, „On the Geometrical Imperfections in Ball Bearings“, *Journal of Tribologie*, January 1988.
- [37] G. A. Levesque und N. K. Arakere, „Critical Flaw Size in Silicon Nitride Ball Bearings“, *Society of Tribologists and Lubrication*, p. 511 bis 519, 2010.
- [38] H. Ocak and K. A. Leoparo, „HMM-Based Fault Detection and Diagnoses Schema for Rolling Element Bearings“, *Journal of Vibration and Acoustics*, pp. 299–306, August 2005.
- [39] G. Roebben, M. Steen, J. Bressers und O. Vam der Biest, „Mechanical fatigue in monolithic non-transforming ceramics“, *Progress in Material Science*, pp. 265–331, 1996.
- [40] Y. Wang und M. Hadfield, „Failure modes of ceramic rolling elements with surface crack defects“, *Science direct*, pp. 208–219, 2003.

Die Anwendung eines Additionstheorems ergibt:

$$\sin \alpha_o \cos \beta - \cos \alpha_o \sin \beta = \frac{R_B}{r_m} \sin \beta \quad (7.4)$$

Die Division durch $\sin \beta$ ergibt:

$$\frac{\sin \alpha_o}{\tan \beta} - \cos \alpha_o = \frac{R_B}{r_m} \quad (7.5)$$

Umgestellt nach $\tan \beta$ ergibt sich:

$$\tan \beta = \frac{\sin \alpha_o}{\frac{R_B}{r_m} + \cos \alpha_o} \quad (7.6)$$

Aus den Gleichung (7.6) ergibt sich die Gleichung (3.8) mit:

$$\beta = \text{atan} \left(\frac{\sin \alpha_o}{\frac{R_B}{r_m} + \cos \alpha_o} \right) \quad (3.8)$$

7.2 Ableitung der Gleichung (3.15)

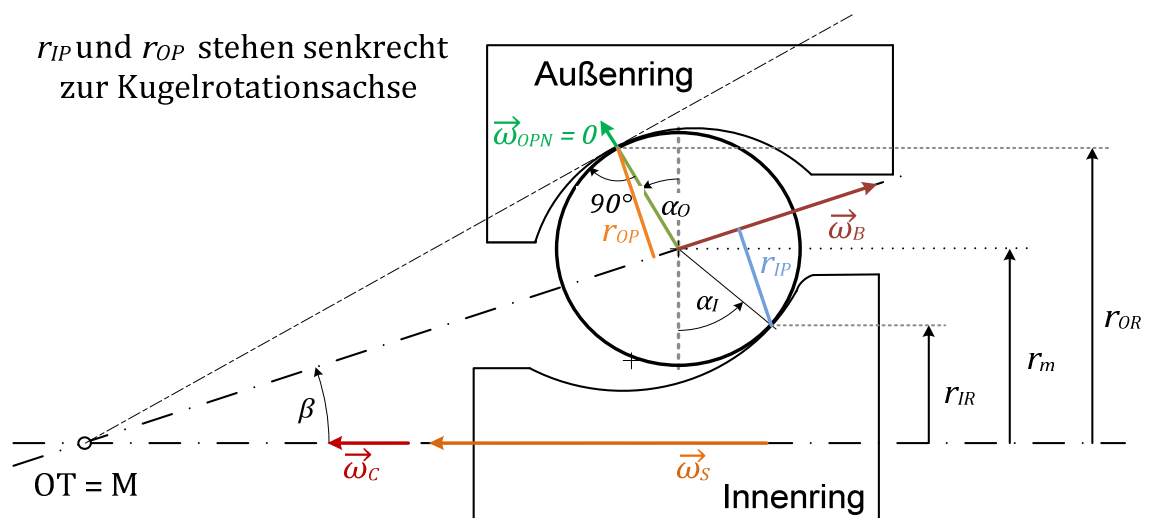


Abbildung 7.2: Ableitung Gleichung (3.15)

Antreibender Radius am Innenring:

$$r_{IR} = r_m - R_B \cos \alpha_I \quad (7.7)$$

Antreibender Radius am Außenring:

$$r_{OR} = r_m + R_B \cos \alpha_O \quad (7.8)$$

Antreibende Geschwindigkeit am Innenring:

$$\vec{V}_{IR} = \vec{\omega}_S r_{IR} \quad (7.9)$$

Mittelpunktgeschwindigkeit der Kugel minus Oberflächengeschwindigkeit der Kugel:

$$\vec{\omega}_S r_{IR} = \vec{\omega}_C r_{IR} - \vec{\omega}_B r_{IP} \quad (7.10)$$

Mittelpunktgeschwindigkeit der Kugel plus Oberflächengeschwindigkeit der Kugel:

$$\vec{\omega}_{OR} r_{OR} = \vec{\omega}_C r_{OR} + \vec{\omega}_B r_{OP} \quad (7.11)$$

Rotation um die Flächennormale im Außenringkontakt der Kugel wird zu null angenommen. Diese Beziehung folgt der Außenringkontrolle:

$$\vec{\omega}_{OPN} = 0$$

Die Winkelgeschwindigkeit $\vec{\omega}_{OR}$ am Außenring wird zu null angenommen:

$$0 = \vec{\omega}_C r_{OR} + \vec{\omega}_B r_{OP} \quad (7.12)$$

Die Gleichung (7.10) multipliziert mit r_{OR} ergibt die Gleichung (7.13).

$$(\vec{\omega}_S r_{IR}) r_{OR} = (\vec{\omega}_C r_{IR} - \vec{\omega}_B r_{IP}) r_{OR} \quad (7.13)$$

Die Gleichung (7.12) multipliziert mit r_{IR} ergibt die Gleichung (7.14).

$$0 = (\vec{\omega}_C r_{OR} + \vec{\omega}_B r_{OP}) r_{IR} \quad (7.14)$$

Die Gleichung (7.13) subtrahiert mit Gleichung (7.14):

$$\vec{\omega}_S r_{IR} r_{OR} = \vec{\omega}_C r_{IR} r_{OR} - \vec{\omega}_B r_{IP} r_{OR} - \vec{\omega}_C r_{OR} r_{IR} - \vec{\omega}_B r_{OP} r_{IR} \quad (7.15)$$

$$\vec{\omega}_S r_{IR} r_{OR} = -\vec{\omega}_B r_{IP} r_{OR} - \vec{\omega}_B r_{OP} r_{IR} \quad (7.16)$$

Aus den Gleichungen(7.7) (7.16) ergibt sich die Gleichung (7.17) mit:

$$\vec{\omega}_B = -\vec{\omega}_S \frac{r_{IR} \cdot r_{OR}}{r_{OP} \cdot r_{IR} + r_{IP} \cdot r_{OR}} \quad (7.17)$$

Die Gleichung (7.17) geteilt durch $(r_{IR} \cdot r_{OR})$ ergibt die Gleichung (7.18)

$$\vec{\omega}_B = -\vec{\omega}_S \frac{1}{\frac{r_{OP}}{r_{OR}} + \frac{r_{IP}}{r_{IR}}} \quad (7.18)$$

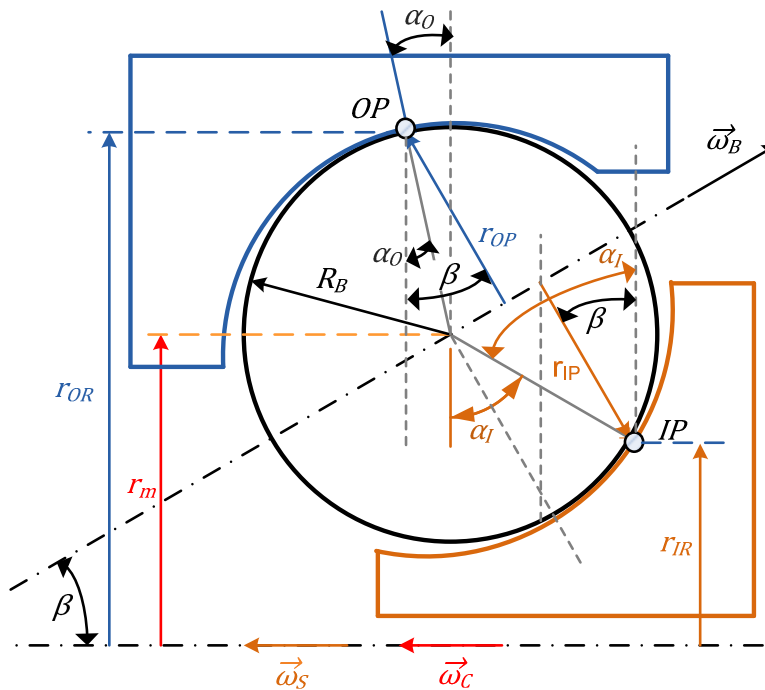


Abbildung 7.3: Konstruktion der Winkel für die Gleichung (3.15)

Die Radien r_{OP} und r_{IP} werden durch den Durchmesser der Kugel R_B und die bekannten Winkelbeziehungen ausgedrückt.

$$r_{OP} = R_B \cos(\beta - \alpha_O) \quad (7.19)$$

$$r_{IP} = R_B \cos(\alpha_I - \beta) \quad (7.20)$$

Gleichung (7.19) und (7.20) eingesetzt in Gleichung (7.18) ergibt Gleichung (7.21).

$$\vec{\omega}_B = - \frac{\vec{\omega}_S}{\frac{R_B \cos(\beta - \alpha_O)}{r_m + R_B \cos \alpha_O} + \frac{R_B \cos(\alpha_I - \beta)}{r_m - R_B \cos \alpha_I}} \quad (7.21)$$

Aus der Gleichung (7.21) ergibt sich die Gleichung (3.15)

$$f_B = \frac{f_S}{\frac{R_B \cos(\beta - \alpha_O)}{r_m + R_B \cos \alpha_O} + \frac{R_B \cos(\alpha_I - \beta)}{r_m - R_B \cos \alpha_I}} \quad (3.15)$$

7.3 Ableitung der Gleichung (3.16) und (3.17).

Die Gleichung (7.10) wird nach $\vec{\omega}_S$ aufgelöst, dies ergibt.

$$\vec{\omega}_S = \vec{\omega}_C - \vec{\omega}_B \frac{r_{IP}}{r_{IR}} \quad (7.22)$$

Die Gleichung (7.12) wird nach $\vec{\omega}_B$ aufgelöst, dies ergibt.

$$\vec{\omega}_B = \vec{\omega}_C \frac{r_{OR}}{r_{OP}} \quad (7.23)$$

$$\vec{\omega}_B = \vec{\omega}_C \frac{r_m + R_B \cos \alpha_O}{R_B \cos(\beta - \alpha_O)} \quad (7.24)$$

Damit ergibt sich die Gleichung (3.16)

$$f_B = f_C \frac{r_m + R_B \cos \alpha_O}{R_B \cos(\beta - \alpha_O)} \quad (3.16)$$

Gleichung (7.23) eingesetzt in Gleichung (7.22) ergibt.

$$\vec{\omega}_S = \vec{\omega}_C - \frac{\vec{\omega}_C r_{OR} r_{IP}}{r_{OP} r_{IR}} \quad (7.25)$$

$$\vec{\omega}_C = \frac{\vec{\omega}_S}{\left(1 - \frac{r_{OR} r_{IP}}{r_{OP} r_{IR}}\right)} \quad (7.26)$$

Die Gleichung (7.19) eingesetzt für r_{OP} , die Gleichung (7.20) für r_{IP} , die Gleichung (7.7) für r_{IR} und die Gleichung (7.8) für r_{OR} ergibt für die Relation der Winkelgeschwindigkeit der Welle $\vec{\omega}_S$ zur Käfiggeschwindigkeit $\vec{\omega}_C$ die Gleichung (7.27)

$$\vec{\omega}_c = \frac{\vec{\omega}_s}{\left(1 - \frac{(r_m + R_B \cos \alpha_o)(R_B \cos(\alpha_I - \beta))}{(R_B \cos(\beta - \alpha_o))(r_m - R_B \cos \alpha_I)}\right)} \quad (7.27)$$

Daraus ergibt sich die Beziehung (3.17) zur Berechnung der Käfigfrequenzen f_c :

$$f_c = \frac{f_s}{\left(1 - \frac{(r_m + R_B \cos \alpha_o)(R_B \cos(\alpha_I - \beta))}{(R_B \cos(\beta - \alpha_o))(r_m - R_B \cos \alpha_I)}\right)} \quad (3.17)$$

7.4 Statisches Gleichgewicht der Kräfte im Kontaktpunkt

Diese Berechnungen erfolgen analog für die Methode 1) und 2). Bei allen Berechnungen wird die gemessene Kraft $\vec{F}_{axial}$ verwendet. Diese Kraft wird mittels eines Kraftsensors am Prüfstand gemessen. Im Einsatz am Triebwerk kann diese Kraft aus Tabellen mit Beziehungen der Drehzahl zur axialen Kraft oder einer Lastschätzung (siehe Kapitel 4.4) aus Signalen vom Lager gewonnen werden.

Kräftegleichgewicht am äußeren Kontaktpunkt (Jederzejweski [32]), der axiale Anteil der Normalkraft $\vec{F}_{N,o} \cdot \sin(\alpha_o)$ ist gleich der äußeren axialen Kraft $\vec{F}_{axial}$:

$$\vec{F}_{N,o} \cdot \sin(\alpha_o) - \vec{F}_{axial} = 0 \quad (7.28)$$

Kräftegleichgewicht am inneren Kontaktpunkt (Jederzejweski [32]):

$$\vec{F}_{N,I} \cdot \sin(\alpha_I) - \vec{F}_{axial} = 0 \quad (7.29)$$

Kräftegleichgewicht auf der Kugel (Jederzejweski [32]):

$$\vec{F}_{cent} \cdot \sin(\alpha_I) - \vec{F}_{N,o} \cdot \sin(\alpha_I - \alpha_o) = 0 \quad (7.30)$$

Vereinfachung der Annahmen (Jederzejweski [32]):

$$2 \cdot \alpha_{nom} - \alpha_I - \alpha_o = 0 \quad (7.31)$$

7.5 Berechnung des β -Winkels

Berechnung wird verwendet in der Methode 1) (siehe Kapitel 3.2.6).

β -Winkel für die untere Grenzfrequenz

Gleichungen zur Berechnung des β -Winkels nach Außenring geführter Beziehung (siehe Gleichung (3.8) und Ableitung 7.1).

$$\beta = \operatorname{atan}\left(\frac{\sin \alpha_O}{\frac{R_B}{r_m} + \cos \alpha_O}\right)$$

β -Winkel für die obere Grenzfrequenz

Zur Erreichung der höchsten möglichen Kugelrotationsfrequenz wird der β -Winkel auf null gesetzt.

$$\beta = 0$$

7.6 Berechnung der Kugelrotationsfrequenz f_B (siehe Gleichung (3.16))

Mit der Gleichung (3.16) kann dann die untere und die obere Grenze der Frequenz berechnet werden, die zur Kennung der Kugelrotationsfrequenz im gemessenen Spektrum des Piezoelementes am Lager dienen.

$$f_B = f_c \frac{r_m + R_B \cos \alpha_O}{R_B \cos(\beta - \alpha_O)}$$

7.7 Berechnung Frequenzfenster der Kugelrotationsfrequenzen f_B

Berechnung der oberen und unteren Frequenz zur Erkennung von Rotationsfrequenzen keramischer Kugeln

Zu Kapitel 3.2.6, Methode 1) und Methode 2):

Für schnelllaufende Schrägkugellager werden Abgrenzungen für die Kugelrotationsfrequenzen f_B berechnet. Dies geschieht durch die Bestimmung einer unteren und einer oberen Frequenz f , die eine Eingrenzung zur Bestimmung der Kugelrotationsfrequenzen f_B aus dem gemessenen Gesamtspektrum ermöglichen. Diese Eingrenzung ermöglicht es, mit Hilfe der gemessenen Daten Fehler auf den Kugeloberflächen zu erkennen.

7.8 MATLAB-Erweiterung Curve Fitting Toolbox, Erklärung der Ausgaben

Zur Berechnung der Hochpass- und Bandfilter, für die Filterung der Eigenfrequenzen aus den Signalen der Piezoelemente, wird die *MATLAB* Signal Processing Toolbox verwendet.

Parameter	Value
Response Type	High Pass
Design Method	FIR – Equiripple*
Filter Order	Minimum Order*
Options – Density Factor	20*
Units	Hz*
f_s – sampling frequency	200.000 Hz
f_{stop}	e.g. 10915
f_{pass}	e.g. 11115
Units	dB*
A_{stop}	80*
A_{pass}	1*

Tabelle 7.1: *MATLAB* Signal Processing Toolbox, Eingabemaske für Bandpassfilter, zur Erkennung angeregter Eigenfrequenzen. Eingänge sind mit Sternchen [*] gekennzeichnet.

7.9 Materialien der Prüflager

M50

Grundmaterial: Warmfester durchhärtender Wälzlagerstahl M50, umgeschmolzen im Vakuum

Wärmebehandlung: Martensitisch gehärtet

Kurzcharakterisierung: Härten bis zu 64 HRC, Warmfestigkeit von +350 °C bis +400 °C, Druckeigenspannungen

Anwendungsgrenzen: Korrosion, extrem hohe Zentrifugalkräfte.

Vorteile: Warmfestigkeit bei angehobener Zähigkeit

Anwendungen: Triebwerke Hauptwellenlager, Stromerzeugung Aerospace, Lagerung der Turbinenläufer.

[Angaben Schaeffler]

M50NiL

Grundmaterial: Warmfester einsatzgehärteter Wälzlagerstahl M50NiL, umgeschmolzen im Vakuum

Wärmebehandlung: Aufgekohlt und martensitisch gehärtet

Kurzcharakterisierung: Randhärten bis zu 64 HRC, Warmfestigkeit von +350 °C bis +400 °C, Druckeigenspannungen

Anwendungsgrenzen: Korrosion.

Haupteinsatzgebiet: Turbinenlager mit höchsten Umdrehungskennzahlen

Vorteile: Warmfestigkeit bei stark angehobener Zähigkeit, Bruchsicherheit

Kundennutzen: Begrenzung Kühlleistung, Vermeidung Frühausfälle.

Anwendungen: Triebwerke, extrem schnell drehende Hauptwellenlager.

[Angaben Schaeffler]

M50NiL-DH (Duplex-Härtung)

Grundmaterial: Warmfester einsatzgehärteter Wälzlagerstahl M50NiL, umgeschmolzen im Vakuum

Wärmebehandlung: Aufgekohlt und martensitisch gehärtet, zusätzlich nitriert

Kurzcharakterisierung: Randhärten bis zu 70 HRC, Warmfestigkeit von +350 °C bis +400 °C, höchste Druckeigenspannungen

Anwendungsgrenzen: Korrosion.

Haupteinsatzgebiet: Hochbelastete Lager, höchste Umdrehungskennzahlen, hohe Schadenstoleranz (gutes Verhalten nach Partikelüberrollung)

Vorteile: Warmfestigkeit bei stark angehobener Bruchsicherheit, beste Verschleißfestigkeit, bester Widerstand gegen Oberflächenverletzungen durch Partikel

Kundennutzen: Begrenzung Kühlleistung, Vermeidung Frühausfälle, Schadenstoleranz.

Anwendungen: Triebwerke, extrem schnell drehende Hauptwellenlager

[Angaben Schaeffler]

Si₃N₄ (Siliziumnitrid)

Grundmaterial: Nitridbasierte Keramik Si₃N₄

Dichte: Kubisches Siliziumnitrid 3,44 g·cm⁻³

Behandlung: **Heiß-Isostatisches Pressen (HIP)** während der Herstellung

Kurzcharakterisierung Härte im Bereich von 1500 HV, sehr geringe Dichte, unmagnetisch,

hervorragend korrosions- und medienbeständig

Anwendungsgrenzen Einsatz meist nur als Wälzkörper im Kontakt mit stahlbasierten Lagerringen.

Haupteinsatzgebiet: Deutlich höher belastbare Hybridlager als bei ZrO₂, falls abgestimmte Werkstofflösung bei den Ringen (Cronidur 30 oder Carbonitrieren), deutliche Verlängerung der Lebens- und Gebrauchsdauer auch bei hoher Belastung im Vergleich zu Wälzkörpern aus Stahl möglich; hohe Drehzahlen (Spindellager), Mangelschmierung, Trockenlauf, Medienschmierung, korrosive Umgebung

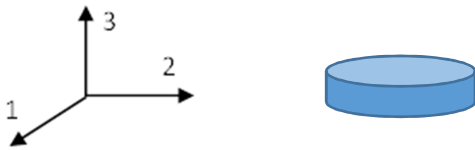
Vorteile: Gewichtsreduzierung, einsetzbar bis 700 °C

Kundennutzen: Beste Drehzahleignung, Stromisolation, höchste Verschleißfestigkeit, Reibungsreduzierung, Steigerung der Fettgebrauchsdauer, Ersatz von Ölumlauf- durch Fettschmierung, Initialschmierung.

Anwendungen: Lebensmittelindustrie, Werkzeugmaschinen Spindellager.
[Angaben Schaeffler]

7.10 Piezoelemente

Ausrichtung der Polarisierungen:



PIC 255

Hersteller:

Material

Dichte

P Polarisierung des Sensors in
(Senkrecht auf der Ebene)

Curie-Temperatur T_C

Empfindlichkeit in der in Richtung 33:
(Änderung der Schichtdicke des Sensors)

Piezoelektrische Spannungskonstante

Temperaturstabilität ε_{33}^T
(im Bereich -20 °C bis +125 °C)

In der Arbeit verwendete Baugrößen:

- a) Piezoelement
- b) Piezoelement

PIC 300

Hersteller

Dichte

P Polarisierung des Sensors in

Curie-Temperatur T_C

Empfindlichkeit in der in Richtung 33:
(Änderung der Schichtdicke des Sensors)

Piezoelektrische Spannungskonstante

Temperaturstabilität ε_{33}^T
(im Bereich -20 °C bis +125 °C)

In der Arbeit verwendete Baugröße:

Piezoelement, weiches Piezomaterial

PI Ceramic

Modifiziertes Blei-Zirkonat-Titanat

7,8g/cm³

Richtung 33

350 °C

25

$g_{31} = -11,3 \cdot 10^{-3} \text{ Vm/N}$

$g_{33} = 25 \cdot 10^{-3} \text{ Vm/N}$

4

[Angaben Pi Ceramic]

Durchmesser 4 mm 1,5 mm hoch

10 mm x 5 mm x 1,5 mm

Piezoelement, hartes Piezomaterial

PI Ceramic

7,8g/cm³

Richtung 33

370 °C

16

$g_{31} = -9,5 \cdot 10^{-3} \text{ Vm/N}$

$g_{33} = 16 \cdot 10^{-3} \text{ Vm/N}$

2

[Angaben Pi Ceramic]

Durchmesser 10 mm 1,5 mm hoch

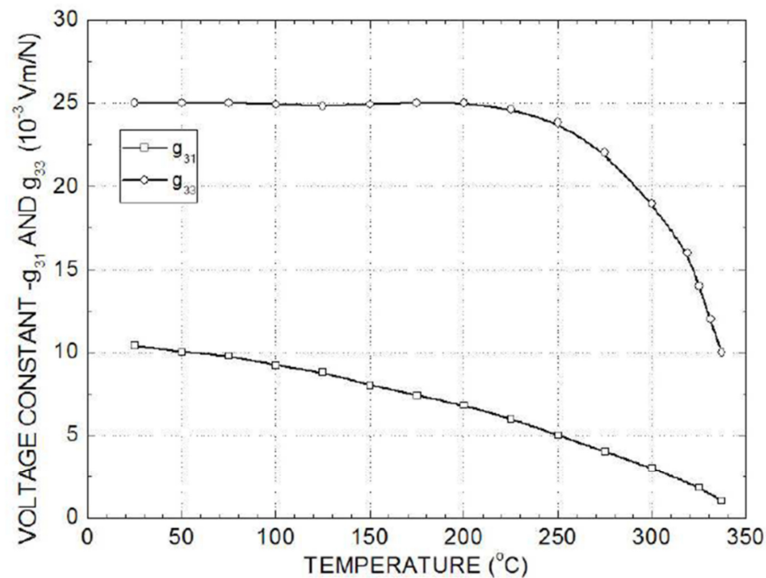


Abbildung 7.4: Temperaturabhängigkeit der Spannungs-Konstanten g_{33} und $-g_{31}$ von der Raumtemperatur bis zur Curietemperatur (siehe Miclea [33]).

Für die Piezoelemente PIC 255 und PIC 300 sind Angaben über das Temperaturverhalten der Spannungs-Konstanten g_{33} und $-g_{31}$ vom Hersteller nicht erhältlich. Die Piezoelemente PIC 255 und PIC 300 werden in dieser Arbeit außerhalb der vom Hersteller angegebenen Spezifikation betrieben. In der Abbildung 7.4 ist das Verhalten von Blei-Zirkonat-Titanat in einer zu PIC 255 vergleichbaren Spezifikation angegeben Miclea [33].

7.11 Sensoren

EMCD	Magnetischer Partikelsensor Spaltweite zwischen den elektrischen Kontakten, am Magneten 0,4 mm. Hersteller Allen Aircraft USA
Endevco 7240C	Beschleunigungsaufnehmer 30 kHz, 2,621 pC/g.
FAG SG 4	Beschleunigungsaufnehmer, Schwingspule 200 mV pro mm/s
MetalSCAN	Oil-Debris-Monitoring-System der Firma GASTOPS. Dieses erfasst Partikel beim Durchgang durch Spulen. Der Sensor ist in die Ölrücklaufleitung integriert. Limitierung bei der Erfassung einzelner kleiner Partikel.

7.12 Chassis für Messkarten

NI PXIe-1073: 5-Slot 3U PXI Express Chassis with AC - Up to 250 MB/s
3 hybrid slots and 2 PXI Express slots - every slot accepts PXI Express modules
150 W total power available from 0 to 50 °C
Integrated MXI-Express controller included
Up to 250 MB/s per-slot dedicated bandwidth and 250 MB/s system bandwidth
Compatibility with PXI, PXI Express, Compact PCI, and Compact PCI Express modules
Configure Complete PXI System
[Angaben National Instruments]

7.13 Messkarten

Um eine Unterabtastung zu vermeiden, wird die Bandbreite des Signals durch einen Anti-Aliasingfilter begrenzt, dieser ist in der Messkarte von NI enthalten.

NI PXIe-4492: 24-Bit, 204.8 kS/s, 8 Inputs
8 simultaneously sampled analog inputs at up to 204.8 kS/s
24-bit resolution ADCs with 114 dB dynamic range
2 gain settings up to +20 dB for input ranges from ± 1 V to 10 V
Software-configurable 4 mA IEPE and TEDS for microphones and accelerometers
AC/DC software-selectable coupling
8 channels provide channel density for most NVH measurements

Single-Ended Channels	8
Differential Channels	0
Analog Input Resolution	24 bits
Maximum Voltage Range	-10 V-10 V
Sensitivity	14 μ Vrms
Minimum Voltage Range	-1 V-1 V
Sensitivity	2.2 μ Vrms
Number of Ranges	2
Simultaneous Sampling	Yes
On-Board Memory	4095 samples
Excitation Current	4 mA
Total Harmonic Distortion (THD)	98 dB
Dynamic Range	2
Dynamic Range (RF Only)	114 dB
Signal Conditioning	Anti-aliasing filter, Current excitation

[Angaben National Instruments]

Advances in Automation Engineering

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Clemens Gühmann

ISSN 2509-8950 (print)

ISSN 2509-8969 (online)

1. Nowoisky, Sebastian: Verfahren zur Identifikation nichtlinearer dynamischer Getriebemodelle. - 2016. - VIII, 224 S.

ISBN 978-3-7983-2854-9 (print) 15,00 EUR

ISBN 978-3-7983-2855-6 (online)

DOI 10.14279/depositonce-5420

2. Huang, Hua: Model-based calibration of automated transmissions. - 2016. - XXIV, 134 S.

ISBN 978-3-7983-2858-7 (print) 14,00 EUR

ISBN 978-3-7983-2859-4 (online)

DOI 10.14279/depositonce-5461

3. Röper, Jan: Entwicklung eines virtuellen Getriebeprüfstands. - 2017. - xxvi, 133 S.

ISBN 978-3-7983-2951-5 (print) 14,00 EUR

ISBN 978-3-7983-2952-2 (online)

DOI 10.14279/depositonce-6073

4. Funck, Jürgen Helmut: Synchronous data acquisition with wireless sensor networks. - 2018. - xix, 327 S.

ISBN 978-3-7983-2980-5 (print) 19,50 EUR

ISBN 978-3-7983-2981-2 (online)

DOI 10.14279/depositonce-6716

5. noch nicht erschienen



Überwachung hybrider Schrägkugellager in Luftfahrttriebwerken

Es wird ein Konzept zur Überwachung hybrider Schrägkugellager für Hauptwellen von Luftfahrttriebwerken vorgestellt. Gezeigt wird die Auswirkung der Interaktion geschädigter keramischer Wälzkörper mit den Stahllaufringen. Es werden Schwachstellen bei der Berechnung von Kugelrotationsfrequenzen besprochen und Möglichkeiten, die Resultate der Berechnung zu verbessern. Im Vergleich werden Vorteile bei der Erfassung von Lagerschäden durch die Messung von Körperschall gegenüber der Messung von Vibrationen oder der Messung von Metallpartikeln im Öl gezeigt. Nachgewiesen wird, dass eine Erkennung von Lagerschäden zu einem frühen Zeitpunkt im Schädigungsprozess möglich ist. Ein besonderer Wert wird auf Möglichkeiten der Entwicklung eines Lebensdauermodells gelegt, um die verbleibende Lebenszeit eines Lagers nach der Erkennung eines Lagerschadens abschätzen zu können. Eingegangen wird auf eine fortlaufende Eigendiagnose der Überwachungseinheit.

ISBN 978-3-7983-3021-4 (print)

ISBN 978-3-7983-3022-1 (online)



ISBN 978-3-7983-3021-4



<http://verlag.tu-berlin.de>