



Rolls-Royce

# Luftfahrtforschungsprogramm LUFO IV Aufruf 4 / 2012-2015

Abschlussbericht zum Vorhaben

## Verbesserte Lager für Triebwerksanwendungen Folgeprojekt

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Laufzeit: 1.10.2012 – 31.12.2015

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter der Förderkennzeichen **20T1119A** gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt liegt bei den Autoren.

i.A. Tobias Eberhardt

EC-23 Component Engineering Power Gearbox

i.A. Rudolf Lück

EC-24 Component Engineering AGB & IGB

i.A. Dr. Ralf von der Bank

ET-R&T Research & Technology

Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co KG  
Blankenfelde-Mahlow

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>3</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>7</b>
<b>1        Kurzfassung .....</b>	<b>10</b>
<b>2        Aufgabenstellung.....</b>	<b>12</b>
<b>3        Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens .....</b>	<b>13</b>
<b>4        Planung und Ablauf des Vorhabens .....</b>	<b>13</b>
4.1    Projektstruktur und Arbeitspaketzuordnung .....	13
4.2    Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeit .....	17
4.3    Wissenschaftlicher und technischer Stand.....	18
4.4    Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	21
4.5    Vergleich der tatsächlichen mit der ursprünglichen Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung..	22
4.6    Schlüsselpositionen des Verwendungsnachweises .....	25
<b>5        Zusammenfassende Ergebnisse.....</b>	<b>26</b>
5.1    Ergebnisse AP 1: Großlagerversuche .....	26
5.2    Ergebnisse AP 3: Lagerüberwachung .....	66
5.3    Ergebnisse AP 4: Triebwerkstest .....	91
<b>6        Voraussichtlicher Nutzen .....</b>	<b>95</b>
6.1    Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte .....	95
6.2    Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit .....	95
<b>7        Veröffentlichungen .....</b>	<b>96</b>
<b>8        Quellen.....</b>	<b>97</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: VERLAT-FP - Projektstrukturplan .....	16
Abbildung 2: Prüflager im Halbschnitt.....	27
Abbildung 3: Schnittdarstellung des Prüfkopfes, Quelle: FAG Aerospace .....	29
Abbildung 4: Schematische Darstellung der zusätzlichen Instrumentierung der Prüflager zur Unterstützung des Arbeitspaketes 3 .....	30
Abbildung 6: Axialer Durchriss des Innenringes eines Pendelrollenlagers – Beispielbild (aus „Wälzlagerschäden“, Schaeffler Technologies AG & Co. KG, 2013) .....	31
Abbildung 7: Vorschädigung der Innenringe im AP1.2.....	31
Abbildung 8: Links: 3D-Profil eines Eindrucks; Rechts: Foto eines Laufbahneindrucks .....	32
Abbildung 9: Zyklusdefinition für die Großlager-Versuche im AP1.2, deckungsgleich mit VEROLAT Großlagerversuchen und VERLAT-FP AP1.1 „Verschmutzungstests“ ...	33
Abbildung 10: Schaden am Außenring des Versuchs mit M50-Außenring .....	34
Abbildung 11: Emission ferromagnetischer Partikel der Versuche des Arbeitspakets 1.2 .....	37
Abbildung 12: Differenz der Lageraußenringtemperaturen von Versuchs- und Hilfslager .....	38
Abbildung 13: Temperaturverlauf des Windmillingversuchs für die unterschiedlichen Materialkombinationen.....	40
Abbildung 14: Belasteter Innenring des Hybridlagers mit konventionell gehärteten Ringen (594685A).....	41
Abbildung 15: Belasteter Innenring des konventionellen Lagers mit deutlich erkennbarem Fremdkörpereindruck.....	41
Abbildung 16: Temperaturverlauf von Test- und Hilfslager bei Unterbrechung der Ölzufuhr (Hybridlager mit M50NiL-DH-Ringen) .....	43
Abbildung 17: Temperaturverlauf des Prüf- und Hilfslagers beim Versuch mit Unterbrechung der Ölversorgung mit dem Stahllager; es wurde der Ausgangszyklus verwendet....	44
Abbildung 18: Innenring des Stahllagers nach dem erfolgten Versuch mit dem Ausgangszyklus; Oben: die Hälften des geteilten Innenringes sind verschweißt; Unten: Aufschmelzungen an den Kugeln .....	45
Abbildung 19: Temperaturverlauf beim Versuch mit Ölunterbrechung: Stahllager mit reduzierter Axiallast .....	46
Abbildung 20: Laufspuren und Ablagerungen an der Stahlkugel nach dem Versuch mit Unterbrechung der Ölversorgung (reduzierte Axiallast) .....	46

Abbildung 21: Vergleich der Temperaturverläufe von hybriden (blau und violett) und konventionellen Lagern (rot); Die Versuche wurden bei gleicher Last und Drehzahl durchgeführt. ....	47
Abbildung 22: Temperaturverlauf von Prüf- und Hilfslager für den Versuch mit moderater Belastung (AP1.5).....	49
Abbildung 23: Außenringlaufbahn des Hybridlagers mit doppelt gehärteten Ringen nach dem Versuch mit Abschaltung der Ölzufuhr (AP1.5); Es sind großflächige Aufschmelzungen zu erkennen.....	50
Abbildung 24: Zustand der Keramikkugeln nach dem Versuch „Abgeschnittene Ölzufuhr“ (AP1.5); Es sind flache Abplatzungen und Aufschweißungen von Ringmaterial aufgetreten. ....	50
Abbildung 25: Temperaturverlauf für Prüf- und Hilfslager aus Stahl bei geringer Belastung (AP1.5) .....	51
Abbildung 26: Temperaturverlauf für Prüf- und Hilfslager aus Stahl bei moderater Belastung (AP1.5) .....	52
Abbildung 27: Belastete Innenringlaufbahn des Stahllagers nach dem Versuch mit Abschaltung der Ölzufuhr (AP1.5); Es sind großflächige Aufschmelzungen zu erkennen. ....	52
Abbildung 28: Zustand der Stahlkugeln nach dem Versuch „Abgeschnittene Ölzufuhr“ (AP1.5) .....	53
Abbildung 29: Vergleich der Temperaturverläufe bei Abschaltung der Ölzufuhr für die 3 getesteten Lagervarianten (AP1.5) .....	54
Abbildung 30: Vergleich der Temperaturverläufe für Hybridlager (rot) und Stahllager (blau) beim Versuch mit moderater Belastung .....	55
Abbildung 31: Prüfzyklus für das AP1.6 „Zyklische Lastumkehr“ – „Langsame Transition“ ...	56
Abbildung 32: Prüfzyklus für das AP1.6 „Zyklische Lastumkehr“ – „Schnelle Transition“ .....	57
Abbildung 33: Temperaturverlauf für Stahl- und Hybridlager (blau bzw. rot) während der Lastumkehrversuche „Schnelle Transition“ .....	58
Abbildung 34: Lager nach dem Lastumkehrversuch: Links: Stahlkugel, rechts: Innenringlaufbahn.....	58
Abbildung 35: Temperaturverlauf für das Arbeitspaket 1.7 .....	60
Abbildung 36: Zusätzlicher Versuch mit vorgeschädigter Kugel: Der eingebrachte Schaden hat einen Durchmesser von 0,55 mm und wurde mittels Laser erzeugt .....	61
Abbildung 37: Verlauf der Temperaturdifferenz zwischen Versuchs- und Hilfslager als Indikator für den Schadfortschritt .....	62

Abbildung 38: Freisetzung metallischer Partikel: Ein Schadfortschritt ist ab Stunde 109 erkennbar .....	62
Abbildung 39: Zustand des Versuchslager nach dem Ausfall; Links: Die Außenringlaufbahn weist Abdrücke und Eindrücke auf; Rechts: Käfig und nicht vorgeschädigte Kugeln weisen keine Schäden auf .....	63
Abbildung 40: Belasteter Innenring nach dem Versuch: Ausbrüche erstrecken sich über ca. 90°, Tiefe und Ausmaß sind vergleichbar zu den Versuchen in VEROLAT .....	63
Abbildung 41: Konstruktion der Gleichung (5.1) .....	66
Abbildung 42: Konstruktion der Gleichung (5.2) .....	67
Abbildung 43 Kugelrotationsfrequenzen im Stahl-Schräggugellager.....	70
Abbildung 44: Kugelrotationsfrequenzen im Hybrid-Schräggugellager.....	71
Abbildung 45: Impuls Schadüberrollung, Messung Hüllkurvenfrequenz.....	72
Abbildung 46: Übersicht zur Signalverarbeitung. Alle Amplituden sind auf die Scheitelwerte $\hat{U}_{max}$ der Sensorausgangsspannung am Außenring normiert.....	73
Abbildung 47: Erkannte Signatur eines Kugelschadens .....	74
Abbildung 48: Gemessene Signatur eines Innenringschadens .....	76
Abbildung 49: Vergleich Körperschall- und Vibrationssensor und Metallpartikelsensor .....	77
Abbildung 50: Vergleich Körperschall-, Vibrationssensor und Metallpartikelsensor .....	78
Abbildung 51: Die FEM Simulation zeigt die Verformungen eines Lageraußenringes durch die Pressungen der Kugeln.....	79
Abbildung 52: Oben: Signalverlauf eines Piezoelementes im Zeitbereich beim Überrollen der Sensorposition im Lastpfad; Unten: Harmonische Signalanteile im Frequenzbereich mit den Seitenbändern aus der Wellendrehzahl.....	80
Abbildung 53: Positionen der piezoelektrischen Sensorelemente über den Umfang der Stirnseite des Außenrings.....	82
Abbildung 54: Schätzfunktion für axiale Kraft durch die Stützpunkte .....	83
Abbildung 55: Vergleich der eingebrachten zu den gemessenen Lagerlasten .....	84
Abbildung 56: Gut Zustand, Signal eines Piezoelementes bei der Überrollung durch einer Kugel.....	85
Abbildung 57: Schlecht-Zustand, Nullstellen und Abstände sind unregelmäßig.....	85
Abbildung 58: Schlecht-Zustand, Amplitude zu klein .....	86
Abbildung 59: Signalmischung .....	87
Abbildung 60: Diagnosesystem .....	88
Abbildung 61: Kaskadierte Diagnose.....	88
Abbildung 62: Einbausituation des BR725 Hochdruckverdichterlagers auf einem Wellenstummel.....	92

---

Abbildung 63: Der IMI-Zyklus für das Versuchstriebwerk BR725.....	93
Abbildung 64: Oben: Rasterelektronenmikroskopaufnahme einer Schadstelle an einer Keramikkugel des Lagers aus dem BR725 Versuch; Unten: Profil der Schadstelle, die Tiefe beträgt nur 0,2 $\mu\text{m}$ .....	94

---

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Arbeits- und Zeitplanung von AP1.....	23
Tabelle 2: Arbeits- und Zeitplanung von AP3.....	23
Tabelle 3: Arbeits- und Zeitplanung von AP4.....	24
Tabelle 4: Getestete Lagervarianten.....	26
Tabelle 5: Überblick über die Versuchsmatrix des Arbeitspaketes 1, der mit * markierte Versuch wurde nachträglich eingefügt, dafür wurde ein Versuch aus dem AP1.2 umgewandelt .....	28
Tabelle 6: Ergebnisse AP1.2 „Untersuchung bei vorgeschädigten Lagerringen“, * abweichend wurde hier der Außenring geschädigt, ** korrigierte Laufzeit.....	36
Tabelle 7: Ausgangszyklus für die Versuche des AP1.4, veränderte Bedingungen siehe Text & Tabelle 8 .....	42
Tabelle 8: Überblick der Versuchsergebnisse der Ölunterbrechungsversuche .....	43
Tabelle 9: Betriebsbedingungen „Abschaltung der Ölzufuhr“ – geringe Belastung.....	48
Tabelle 10: Betriebsbedingungen „Abschaltung der Ölzufuhr“ – moderate Belastung .....	48
Tabelle 11: Überblick der Ergebnisse der Versuche mit vorgeschädigten Kugeln aus dem Projekt VEROLAT mit dem Ergebnis des Zusatzversuches aus VERLAT-FP mit 0,55mm-Schaden (fett hervorgehoben) .....	65
Tabelle 12: Sensorpositionen für die Lastabschätzung.....	82

## Abkürzungsverzeichnis

Name	Beschreibung
AP	Arbeitspaket
ADORE	Advanced Dynamics Of Rolling Elements, ein Mehrkörpersimulationsprogramm für Wälzlager
AN58	Großlagerprüfstand der Schaeffler AG
AR	Außenring
BR700 (BR710/BR725)	Rolls-Royce Deutschland Triebwerksfamilie bzw. -projekt
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
DFG	Deutsche Forschungsgesellschaft
DH	Duplex Hardened (doppelt gehärtet)
DOE	Design Of Experiments – Statistische Versuchsplanung
E3E	Engine 3E – Kerntriebwerksdemonstrator
EMCD	Elektromagnetischer Chipdetektor
FAG	FAG Aerospace GmbH
FEM	Finite-Elemente-Methode
HYZYRO	Hybride Zylinderrollenlager (LuFo-5-Programm)
IMI	Idle-Max-Idle – Leerlauf-Maximal-Leerlauf
IR	Innenring
ITS	Institut für Thermische Strömungsmaschinen
IWM	Institut für Werkstoffmechanik
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
LuFo-Programm	Luftfahrtforschungsprogramm
L/D	Länge zu Durchmesser
M50	M50 Lagerstahl
M50NiL	M50NiL Lagerstahl
MDT	Fachbereich Elektronische Mess- und Diagnosetechnik
MGG12	Akustikprüfstand der Schaeffler AG
MTO	Maximum Take-Off Thrust – Maximalschub
OLIAS	Ölsystem für Innovative Antriebe mit Hochleistungsgetriebe
Q180	Statisches Lagerberechnungsprogramm Q180
QDM	Quantitative Debris Monitoring – Quantitative Partikelüberwachung
RRD	Rolls-Royce Deutschland
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Siliziumnitrid (Keramik)
TRL	Technology Readiness Level - Technologiereifegrad
TUB	Technische Universität Berlin
VERLAT-FP	Verbesserte Lager für Triebwerksanwendungen – Folgeprojekt
VEROLAT	Verbesserte Öl- und Lagersysteme für Triebwerke

## Formelzeichen

Formelzeichen	Beschreibung
$f_c$	Käfigfrequenz
$f_i$	Schadüberrollfrequenz Innenringschaden
$f_o$	Schadüberrollfrequenz Außenringschaden
$f_s$	Wellenfrequenz



---

$k$	Kugelanzahl
$R_B$	Kugeldurchmesser
$r_{IP}$	Radius Innenringkontaktpunkt - Kugelachse
$r_{IR}$	Radius Innenringkontaktpunkt - Lagerachse
$r_m$	Teilkreisradius
$r_{OP}$	Radius Außenringkontaktpunkt - Kugelachse
$r_{OR}$	Radius Außenringkontaktpunkt - Lagerachse
$\alpha_I$	Kontaktwinkel Innenring
$\alpha_O$	Kontaktwinkel Außenring
$\beta$	Winkel Lagerachse zu Kugelachse
$\omega_B$	Kugelwinkelgeschwindigkeit
$\omega_C$	Käfigwinkelgeschwindigkeit
$\omega_{OPN}$	Winkelgeschwindigkeit um Flächennormale am Außenringkontakt
$\omega_S$	Wellenwinkelgeschwindigkeit

# 1 Kurzfassung

## **AP1: Großlagerversuche**

Im Rahmen der Großlagerversuche wurden folgende wesentliche Ergebnisse gewonnen:

### **AP1.2 Vorgeschädigte Lagerringe**

Hybridlager weisen unter den gewählten Bedingungen eine um den Faktor 4 bis 5 erhöhte Laufzeit gegenüber der Ausgangsmaterialkombination M50 gegen M50NiL auf.

Eine Doppelhärtung der Laufbahnen erhöht diesen Faktor auf 8 bis 10 gegenüber der Ausgangsmaterialkombination.

### **AP1.3 Windmilling Versuche**

Die Bedingungen, denen Lager beim Windmilling ausgesetzt sind, sind weder für konventionelle noch für hybride Lager schadenskritisch.

### **AP1.4 Kurzzeitig unterbrochene Ölzufuhr & AP1.5 Abgeschnittene Ölzufuhr**

Unter Mangelschmierungsbedingungen weisen hybride Lager eine signifikant höhere Lebensdauer auf als konventionelle Lager.

### **AP1.6 Zyklische Lastumkehr & AP1.7 Nulllast-Versuche**

Lastumkehr und der Betrieb ohne Axiallast stellen für keine der getesteten Varianten ein Risiko dar.

Die Detektion eines Kugelausbruchs, der kleiner als die kleinste Abmessung der Kontaktellipse ist, ist mithilfe von Körperschallsensoren am Lager möglich und erhöht die Vorwarnzeit signifikant.

Ein Schadfortschritt an der Keramikugel wurde im Großlagerversuch nicht beobachtet werden.

## **AP3: Hybridlagermonitoring**

Im Rahmen des AP3 wurden Messungen an den Prüfständen für die vollmaßstäblichen Lager durchgeführt. Dabei wurden künstlich Schäden in die Oberfläche der Kugeln und der

---

Laufringe eingebracht und die bei der Überrollung entstehenden Frequenzen mit Körperschallsensoren und Vibrationssensoren gemessen.

Die gemessenen Überrollfrequenzen wurden mit unterschiedlichen Methoden simuliert und die gemessenen und simulierten Daten miteinander verglichen. Ein Vergleich der Messergebnisse mit den Resultaten der existierenden Berechnungsmethoden und Simulationsprogramme ergab große Abweichungen bei der Bestimmung der Käfig- und Kugelrotationsfrequenzen.

Es wurde eine Axiallastschätzung im Lager basierend auf den Daten des Körperschall- und Überrollensors durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten, dass eine Axiallastschätzung über Sensoren im stillstehenden Außenring des Schrägkugellagers durchführbar ist.

#### **AP4: Triebwerksversuch**

Der Versuch auf einem BR725-Triebwerk im Prüfstand in Dahlewitz erbrachte keinerlei Auffälligkeiten, so dass einer Verwendung in Triebwerken keine technischen Gründe mehr entgegenstehen.

Auch ein Durchgang harter Partikel durch das Hybridlager wie im Triebwerksversuch erfolgt, schädigt die Keramikkugeln nicht. Im Zusammenhang mit den Ergebnissen des Arbeitspakets 1.1 (siehe Abschlussbericht des Partners FAG Aerospace) lässt sich festhalten, dass hybride Lager weitaus höhere Restlaufzeiten nach Überrollung von harten Teilchen wie Sand oder Korund aufweisen als konventionelle Lager.

## 2 Aufgabenstellung

Eines der wesentlichen Ziele dieses Vorhabens war es, die Technologiereife von Hybridlagern – bestehend aus Ringen und Käfigen aus Wälzlagerstählen, ausgestattet mit keramischen Wälzkörpern – zu erhöhen und damit ihren Einsatz in Flugtriebwerken zu ermöglichen. Dazu sollten über die Entwicklung und Untersuchung des Lagers beziehungsweise seiner Komponenten hinaus Methoden und Sensoren zur Detektion von Lagerfehlern entwickelt und Prognosen der Restlebensdauer ermöglicht werden.

### **AP1: Hybridlager Anwendungstechnik**

Im Arbeitspaket 1 sollten verschiedene Betriebszustände untersucht werden. Ziel war ein Vergleich von Hybrid- und Stahllager bei möglichst gleichwertigen Bedingungen. Untersuchte Themenbereiche waren der Betrieb bei Verschmutzung durch harte Partikel, bei Schädigungen der Laufbahn, bei Windmilling-Bedingungen, kurzfristiger Unterbrechung der Ölzufuhr und Abschaltung der Ölzufuhr. Darüber hinaus wurden beide Lager bei Lastumkehr und bei längerfristigem Betrieb ohne Axiallast untersucht.

### **AP3: Hybridlagermonitoring**

Es wurden Methoden zur Bestimmung der kinematischen Beziehungen der Lagerkomponenten erprobt. Diese Beziehungen dienen der Vorhersage der Schadensüberrollfrequenzen in Schrägkugellagern. Ohne Vorhersage der Schadfrequenzen ist eine Einengung auf diese Werte im Frequenzspektrum nicht möglich. Diese Schadfrequenzen müssen so genau wie möglich bestimmt werden, damit falsche Fehleraussagen vermieden werden können.

Die Resultate der verschiedenen Berechnungsmethoden zur Vorhersage der Schadüberrollfrequenzen mussten miteinander verglichen und bewertet werden.

Zur Bestimmung der verbleibenden Lebenszeit nach einem Schadenseintritt ist es notwendig, die Last bei der Überrollung eines Schadens zu kennen. Dazu war es notwendig, grundlegende Arbeiten zur Lasterkennung aus den Signalen des Überroll- und Körperschallsensors durchzuführen.

### **AP4: Triebwerksversuch**

Die Erreichung des Technologiereifegrades 6 setzt eine erfolgreiche Demonstration in einer „relevanten Umgebung“ voraus. Aufgrund der Vielzahl an Einflussparametern, die in einem Triebwerk auf ein Wälzlager wirken, von Vibrationen über thermische Einflüsse bis hin zur

Umströmung durch ein Luft-Öl-Gemisch, erfüllt nur ein Triebwerk selbst diese Anforderungen. Es war daher unerlässlich, einen solchen Versuch durchzuführen.

### **3 Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens**

*Rolls-Royce Deutschland* verfügt bereits über erhebliche Kompetenz bei der Konstruktion und Integration von Hauptwellenlagern aus den erfolgreichen Programmen der BR700-Serie und der derzeit in der Entwicklung befindlichen BR700 NextGen sowie einem weiteren Entwicklungsprogramm.

Des Weiteren war das vorangegangene Forschungsvorhaben VEROLAT (20T0912A, 2010 bis 2013) als ein wichtiger Schritt hin zur Nutzbarmachung von Hybridlagern für die gesamte Flotte des Rolls-Royce-Konzerns zu verstehen. Der Fokus des Programms lag dabei auf den Wälzkörpern selbst. Das Folgeprojekt VERLAT-FP baut auf die in VEROLAT gewonnenen Erkenntnisse auf und erweitert sie insbesondere auf die Gesamtbaugruppe Kugellager. Der Bedarf an der Technologie bei Rolls-Royce Deutschland ist insbesondere dadurch hoch, dass die am Standort entwickelten Antriebe für Geschäftsreiseflugzeuge traditionell sehr hohe Kerntriebwerksdrehzahlen erreichen, bei denen Hybridlager konventionellen Lagern aufgrund der geringen Dichte und hohen Robustheit der Wälzkörper überlegen sind. Entwürfe für Triebwerke, die Hybridlager als Hochdruckrotorfestlager voraussetzen, bestanden bereits bei Ausschreibung des Programmes. Inzwischen sind Triebwerksprogramme, die auf die Hybridlager-Technologie setzen, bereits in fortgeschrittenen Entwicklungsstadien.

Das Vorhaben VERLAT-FP wurde in einem Zeitraum von 1.10.2012 bis 31.12.2015 durchgeführt. Dieser Zeitraum schließt eine kostenneutrale Verlängerung um neun Monate ein.

Die Ergebnisse für den vorliegenden Bericht wurden von Rolls-Royce Deutschland zusammen mit den Partner FAG Aerospace GmbH erarbeitet.

## **4 Planung und Ablauf des Vorhabens**

### **4.1 Projektstruktur und Arbeitspaketzuordnung**

Um die Ziele der Aufgabenstellung zu erreichen, wurde das Gesamtvorhaben in mehrere Arbeitspakete (AP) untergliedert:

AP 0	Partnerkoordinierung / Projektmanagement
AP 1	Großlagerversuche

---

AP 2	Kleinlagerversuche
AP 3	Lagerüberwachung
AP 4	Triebwerksversuch

Im Arbeitspaket 0 wurden sämtliche Aktivitäten zum Projektmanagement zusammengefasst. Diese beinhalteten u.a.:

- Ressourcen-Management
- Budget-Management
- Aufgabenplanung
- Aufgaben-Koordination
- Berichterstattung

Für die darunterliegenden Arbeitspakete soll hier nur ein kurzer Überblick gegeben werden. Das Arbeitspaket 2 wird im Detail im Abschlussbericht des Partners dargestellt.

Das Arbeitspaket 1 „Großlagerversuche“ beinhaltet die Untersuchungen an Hybridlagern in realer Triebwerksgröße:

- AP1.1 – Verschmutzungstests
- AP1.2 – Vorgeschiedigte Lagerringe
- AP1.3 – Windmilling-Versuche
- AP1.4 – Kurzzeitig unterbrochene Ölzufuhr
- AP1.5 – Abgeschnittene Ölzufuhr
- AP1.6 – Zyklische Lastumkehr
- AP1.7 – Nullast-Versuche

Das Arbeitspaket 2 „Kleinlagerversuche“ wurde maßgeblich vom Projektpartner FAG durchgeführt.

Das Arbeitspaket 3 "Hybridlagermonitoring" wurde gemeinsam von der TU Berlin und RRD bearbeitet. Zur Reduzierung der entstehenden Kosten wurden, wenn möglich, die Prüfstandsläufe aus den anderen Arbeitspaketen zur Gewinnung von relevanten Daten verwendet. Im Fortgang der Arbeit entwickelte Überwachungskonzepte wurden mit Prüfständen an vollmaßstäblichen künstlich geschädigten Lagern überprüft.

Im AP4 „Triebwerksversuch“ wurde ein hybrides Kugellager in einem BR725-Triebwerk getestet. Das Lager war ein umgearbeitetes E3E-Lager und kam in der Position des Hochdruckverdichterlagers zum Einsatz. Das Triebwerk absolvierte einige hundert Stunden im Prüfstandsversuch, im Anschluss wurde das Lager befundet. Der Versuch stellte eine Voraussetzung für die Erlangung von TRL6 dar.

- AP4.1 – Versuchsplanung
- AP4.2 – Lagerentwurf und Fertigung
- AP4.3 – Integration Lagerüberwachung
- AP4.4 – Versuchsdurchführung & Auswertung

Der Projektstrukturplan des Vorhabens ist in Abbildung 1 dargestellt.

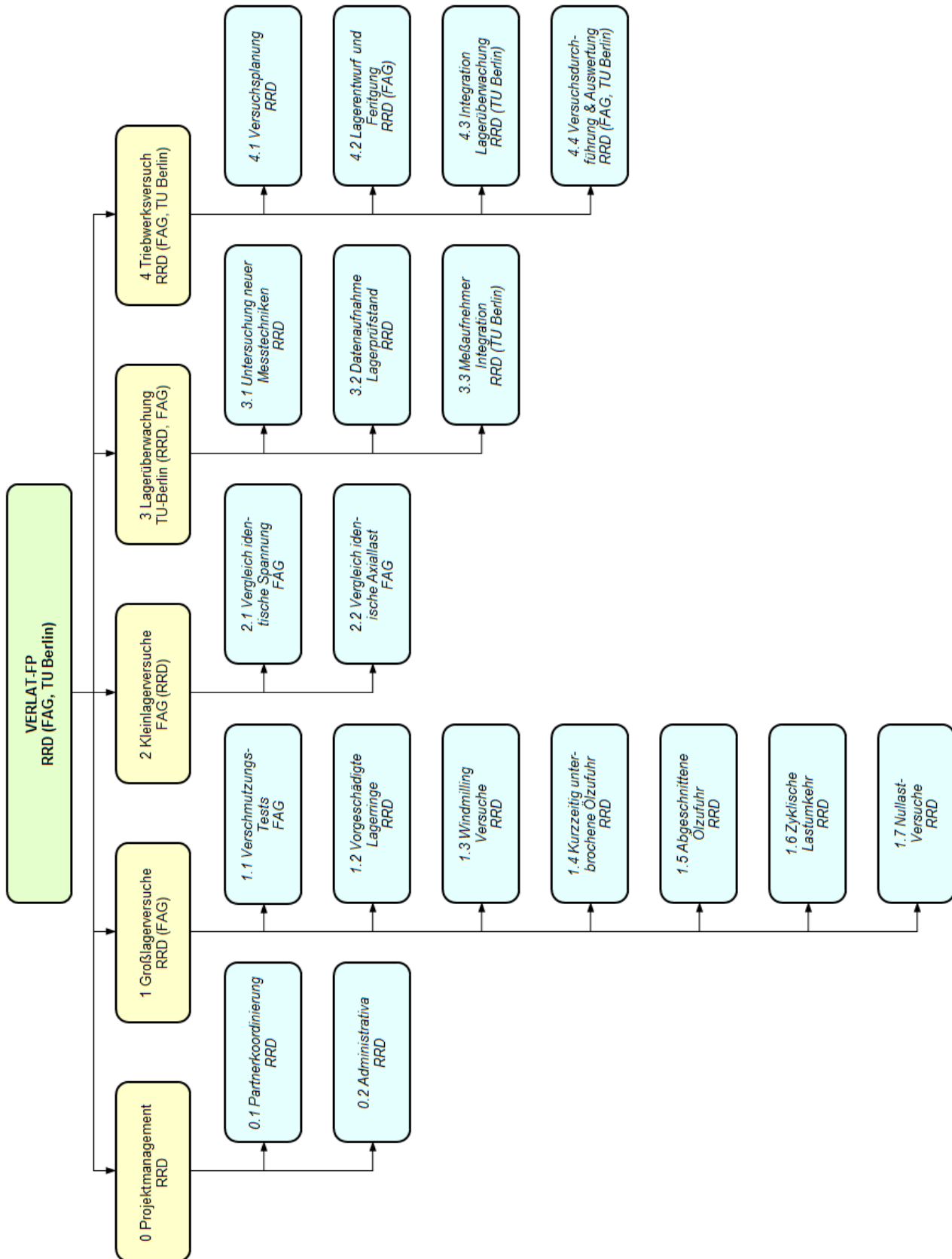


Abbildung 1: VERLAT-FP - Projektstrukturplan



## 4.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeit

Das hier beschriebene Vorhaben zielte in Verbund mit dem Vorgängervorhaben auf eine Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades von Flugtriebwerken ab und liefert damit einen Beitrag zur Erreichung des CO<sub>2</sub>-Reduktionszieles. Hybridlager ermöglichen aufgrund der geringeren Dichte des Keramik-Materials und der damit einhergehenden geringeren Belastung des Lageraußenrings durch Zentrifugalkräfte kompakte Kerntriebwerksarchitekturen. Diese ermöglichen durch eine Erhöhung des Nebenstromverhältnisses einen höheren Vortriebswirkungsgrad.

VERLAT-FP lieferte den entscheidenden Beitrag zur Erreichung des Technologiereifegrades 6 für Hybridkugellager und ermöglicht damit die Reduktion des Treibstoffverbrauches durch schnelllaufende Kerntriebwerksarchitekturen bei hoher Zuverlässigkeit. Es adressierte somit die Herausforderungen „Umweltverträglicher Luftverkehr“ und „Sicherheit und Passagierfreundlichkeit“.

Ein Hybridlager ist robuster und langlebiger als ein Stahllager, in den Kleinlagerversuchen des Partners FAG wurde ein Faktor von ca. 3 ermittelt. Das Vorgängervorhaben erbrachte die Erkenntnis, dass die Schwachstelle des Hybridlagers eine defekte keramische Kugel mit einem Ausbruch an der Oberfläche darstellt, da sie zu einem im Vergleich zum konventionellen Lager beschleunigten Schadfortschritt führt. Ermittelt wurde jedoch auch, dass die Wahrscheinlichkeit eines Kugelschadens bei der Verwendung keramischer Kugeln sehr gering ist. Das Verhalten unter anderen Randbedingungen wie beispielsweise der Schädigung der Laufbahnen durch harte Partikel oder bei Ölabschaltung sowie geringen Lasten war jedoch nicht ausreichend bekannt. Hier setzte das Projekt VERLAT-FP an und konnte erfolgreich darstellen, dass Hybridlager unter diesen Bedingungen mindestens ebenbürtig, häufig aber auch Stahllagern überlegen sind.

Um die Kosten nicht zusätzlich zu erhöhen, wurde im Wesentlichen versucht, die vorhandenen, geplanten Versuche auch für die Weiterentwicklung der Lagerüberwachung zu verwenden und wo nötig zu ergänzen.

Gleichzeitig wurden über die Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit im Bereich der Triebwerkslager die Voraussetzungen für eine arbeitsplatzrelevante Verwertung der Technologien in einem Kernkompetenzbereich von Rolls-Royce Deutschland geschaffen.

## 4.3 Wissenschaftlicher und technischer Stand

### **AP1: Großlagerversuche**

Gegenwärtig werden zur Lagerung der Hauptwellen von Flugtriebwerken Wälzlager mit Stahlwälzkörpern in Lagerringen aus Stahl verwendet. Es kommen Hochgeschwindigkeits-Hochtemperatur-Wälzlagerstähle zum Einsatz, die im Wälzkontakt ohne Oberflächenbeschichtungen mit einem tragenden Ölfilm arbeiten. Zum Teil werden zusätzlich Duplex-Härtungen an Ringen und/oder Wälzkörpern eingesetzt, um die Oberflächen resistenter gegen Fremdkörperschädigungen zu machen. Diese können jedoch zu einem lokalen Zusammenbruch des Ölfilms führen und somit Mikroverschmelzungen von Wälzkörper und Ringlaufbahn begünstigen, die dann fortschreitende Lagerschädigungen verursachen.

In verschiedenen Anwendungen im Maschinenbau ist der Einsatz von Lagern mit Keramikwälzkörpern in Stahlringen, so genannter Hybridlagern, bereits Standard. Für eine Anwendung entsprechender Wälzlager in Flugtriebwerken, bei der die Anforderungen an die Wälzlagerelemente hinsichtlich der Lebensdauer und Zuverlässigkeit deutlich höher sind als bei Standardanwendungen, fehlten wichtige Erkenntnisse bezüglich Schadfortschritt zum Verhalten unter bestimmten Betriebsbedingungen wie Verschmutzung, Laufbahnschäden und bei Ölmangel sowie Lastwechsel und Nulllast.

Das Verhalten von Hybridlagern ist bereits in vorangegangenen Projekten untersucht worden, sie kamen auch in Demonstratoren, beispielsweise dem E3E Kerntriebwerksdemonstrator, zum Einsatz. Der Schwerpunkt lag jedoch ausdrücklich nicht auf dem Verhalten geschädigter Lager, es kamen nur intakte Lager zum Einsatz, so dass die Schadensfortschrittsgeschwindigkeit bei geschädigten Lagern weitestgehend unerforscht blieb. Insbesondere der Vergleich von Schadfortschritt bzw. Robustheit gegenüber einem Schädigungsmechanismus für hybride und konventionelle Lager war unbekannt. Die Kenntnis um diese Charakteristika ist jedoch für Auswahl und Entwicklung einer Überwachungsstrategie für diese Lager unerlässlich.

### **AP3: Lagerüberwachung**

Eine frühe Erkennung von Kugelschäden im Schrägkugellager ist bisher, für die Anwendung an einem Triebwerk, in der Literatur nicht bekannt. Bei der Verwendung von Hybridlagern ist eine frühe Erkennung eines Lagerschadens, speziell eines Kugelschadens wichtig, um mit der verbleibenden Restlaufzeit noch eine ausreichende Sicherheit für einen Weiterflug garantieren zu können. Ziel ist, notwendige Reparaturen planbar durchführen zu können.

Momentan werden Wellenlager in zivilen Flugzeugen nicht direkt am Lager überwacht. Selbst eine Überwachung in einiger Entfernung vom Lager geschieht bisher nur bei einigen Triebwerken durch Beschleunigungsaufnehmer über der Abstützung eines Lagers. Weil an der bisherigen Stelle des Beschleunigungssensors viele „Nebengeräusche“ empfangen werden, führt dies zu einem sehr schlechten Signal-Rausch-Verhältnis. Dadurch, dass man näher an die Quelle des eigentlichen Interesses rückt, wird das Signal-Rausch-Verhältnis stark verbessert. Zudem haben die bisher verwendeten Beschleunigungsaufnehmer eine sehr geringe Frequenzauflösung. Mit der bisherigen Messkonfiguration ist es nicht möglich, Überrollungen von Schäden auf einer Kugel in einem frühen Stadium zu messen. Bei einer derartigen Messkonfiguration ist deshalb die Ansprechschwelle sehr hoch gesetzt und die Indikation erfolgt deswegen sehr spät. Dies hat zur Folge, dass nach Erkennung eines Lagerschadens die verbleibende Zeit bis zum Ausfall des Lagers sehr gering ist.

An bisherigen Triebwerken gibt es unterschiedliche Sensoren, die magnetische Partikel im Öl detektieren:

1. Ein MCD ist ein einfacher Magnet im Ölkreislauf, der in festgelegten Intervallen auf Anlagerungen von ferromagnetischen Partikeln hin kontrolliert wird. Die Prozedur ist aufwendig und wegen der Zeitabstände zwischen den Kontrollen kritisch.
2. Ein EMCD ist ein Magnet mit Kontakten, welche bei der Überbrückung mit Spänen einen veränderten Widerstandswert weitergeben. Nachteilig ist, dass kleine Partikel nur schwer messbar sind. Ein Widerstandsnetzwerk, das zur Kontrolle der Funktion dient, verhindert bisher eine höhere Auflösung bei der Messung des Partikelbelages.
3. Das MetalSCAN Oil-Debris-Monitoring-System der Firma GASTOPS erfasst Partikel beim Durchgang durch eine Spule um die Ölleitung. Allerdings können auch hier kleine Partikel nicht erfasst werden.
4. Der Lubriclone Partikel Separator und QDM Sensor der Firma Eaton ist ein Sensor, der eine Ansammlung von ferromagnetischen Partikeln an einem Magneten über die Auswertung der magnetischen Feldstärke erfasst. Ein Nachteil ist, dass es durch Partikel, die sich im Magnetfeld bewegen, zu falschen Anzeigen kommen kann.

#### **AP4: Triebwerksversuch**

Wie oben bereits angeführt gibt es bereits Erfahrungen mit Hybridlagern in Demonstratoren wie ANTLE und dem Kerntriebwerksdemonstrator E3E. Dabei kamen unterschiedliche Keramiken zum Einsatz. Unter anderem wurde ein Vorgänger der für die Projekte VEROLAT

und VERLAT-FP ausgewählten Keramik von Toshiba in den letzten E3E-Aufbauten verwendet. Innerhalb von Rolls-Royce wurde jedoch noch kein Versuch in einem tatsächlichen Triebwerk durchgeführt. Dies wurde jedoch von den Rolls-Royce-Auditoren als notwendige Voraussetzung für die Erlangung des geforderten Technologiereifegrades TRL6 angesehen.

Ursprünglich war vorgesehen, den Versuch mit den im Vorgängerprojekt entwickelten und im AP3 weiterentwickelten Sensoren und Methoden zu überwachen. Das zur Verfügung stehende Triebwerk ließ den Einbau einer derartige Instrumentierung nicht zu, so dass darauf verzichtet werden musste.

## **4.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

### **AP1: Großlagerversuche**

Die Versuchsdurchführung auf den Großlagerprüfständen der Schaeffler-Gruppe in Schweinfurt erfolgte in enger Zusammenarbeit mit der FAG Aerospace, die wie schon im vorangegangenen Projekt Prüflager und Gegenlager für die AN58-Prüfstände zur Verfügung stellten. Der Prüfkopf konnte aus dem VEROLAT-Projekt übernommen werden.

Rolls-Royce Deutschland übernahm hier die Definition der Versuche in Bezug auf Lasten, Drehzahlen und Haltezeiten sowie Schmiermittelauswahl und Schmiermittelvolumenfluss. Für eine realitätsnahe Versuchsdurchführung wurden die Parameter an die Flugzyklen der Triebwerke BR710 und Trent 500 angelehnt.

### **AP2: Kleinlagerversuche**

Im Arbeitspaket 2 wurde bei der Auswertung der Versuche Rolls-Royce Deutschland einbezogen. Die Versuche wurden mit Luftfahrt-typischen Laufbahnmaterialien durchgeführt.

### **AP3: Lagerüberwachung**

Die Definition und Auswertung der Tests erfolgte in enger Zusammenarbeit mit der Firma FAG und der Technischen Universität Berlin (Institut für Energie und Automatisierungstechnik, Fachgebiet Elektronische Mess- und Diagnosetechnik).

### **AP4: Triebwerksversuch**

Bei der Bereitstellung des Lagers für den Triebwerksversuch wurde eng mit dem Partner FAG zusammengearbeitet. Der vom Triebwerksprojekt gesetzte Zeitrahmen war sehr eng, so dass ein Neuentwurf und eine anschließende Fertigung eines Versuchslagers nicht in Frage kamen. Stattdessen wurden zwei Möglichkeiten verfolgt: 1. Modifikation eines neuen BR725 Hochdruckverdichterlagers sowie 2. Überarbeitung und Modifikation des E3E Hochdruckwellenlagers. Die technische Definition wurde von Rolls-Royce Deutschland durchgeführt, die Modifikationen nahm die Firma FAG vor. Auch bei der Auswertung des Prüflagerzustandes nach dem Versuch konnte auf Unterstützung von FAG zurückgegriffen werden.

---

#### **4.5 Vergleich der tatsächlichen mit der ursprünglichen Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung**

Im Laufe des Projektes wurde offenbar, dass die Projektlaufzeit nicht ausreichen würde, um die gesetzten Ziele zu erreichen. Die Gründe hierfür lassen sich mehreren Ursachen zuordnen. Die hauptsächliche Ursache liegt in den Fertigungsverzögerungen der Lager für die Großlagerversuche, die im FAG-Prüffeld durchzuführen waren. Mit der Herstellung der Lager konnte teils nur verzögert begonnen werden, da es zu Lieferschwierigkeiten beim Rohmaterial kam. Auch die Beschichtung der Innenringe durch einen externen Dienstleister verzögerte sich aufgrund von technischen Schwierigkeiten. Darüber hinaus stellte sich heraus, dass die gewählten Versuchsbedingungen teilweise nicht optimal gewählt waren und nachjustiert werden mussten. Auch die Ergebnisanalyse stellte uns vor größere Schwierigkeiten, so dass ein deutlich erhöhter personeller Aufwand nötig wurde. Dies schlug sich auch in den Personalkosten nieder.

**AP1: Großlagerversuche**

Zeitplan																		
AP	Meilenstein	Wer	2012				2013				2014				2015			
			Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
1	Großlagerversuche	RRD																
1.0	Dokumentation	RRD																
1.1	Verschmutzungstests	FAG																
1.2	Untersuchung bei vorgeschädigten Lagerringen	RRD																
1.3	Windmilling-Versuche	RRD																
1.4	Kurzzeitige Unterbrechung der Ölzufuhr	RRD																
1.5	Dauerhafte Unterbrechung der Ölzufuhr	RRD																
1.6	Versuche bei zyklischer Lastumkehr	RRD																
1.7	Nulllast-Versuche	RRD																

| - Projektbeginn      X X - Verschiebung - Aktivität entfernt  
| - Projektende       - Neuplanung - Neue Aktivität

**Tabelle 1:** Arbeits- und Zeitplanung von AP1

**AP3: Lagerüberwachung**

Zeitplan																		
AP	Meilenstein	Wer	2012				2013				2014				2015			
			Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
3	Lagerüberwachung	TU-B																
3.0	Dokumentation	TU-B																
3.1	Untersuchung neuer Messtechniken	RRD																
3.2	Datenaufnahme Lagerprüfstand	TU-B																
3.3	Meßaufnehmer Integration	RRD																

| - Projektbeginn      X X - Verschiebung - Aktivität entfernt  
| - Projektende       - Neuplanung - Neue Aktivität

**Tabelle 2:** Arbeits- und Zeitplanung von AP3

**AP4: Triebwerksversuch**

Zeitplan																		
AP	Meilenstein	Wer	2012				2013				2014				2015			
			Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
4	Triebwerksversuch	RRD																
4.0	Dokumentation	RRD																
4.1	Versuchsplanung	RRD																
4.2	Lagerentwurf und -fertigung	RRD/FAG																
4.3	Integration Lagerüberwachung	RRD/TUB																
4.4	Versuchsdurchführung und -Auswertung	RRD																

| - Projektbeginn      X X - Verschiebung - Aktivität entfernt  
| - Projektende      ■ - Neuplanung - Neue Aktivität

**Tabelle 3:** Arbeits- und Zeitplanung von AP4



## 4.6 Schlüsselpositionen des Verwendungsnachweises

### Material (Pos. 0813):

Die Position Material umfasst die Sensoren und Messaufnehmer und weitere Ausrüstung zur Erfassung des Zustandes der Lager sowie notwendige Auswertetechnik, insbesondere Softwarelizenzen.

### FE-Fremdleistungen (Pos. 0823):

Die FE-Fremdleistungen beinhalten die Vorbereitung und Durchführung der Versuche am Großlagerprüfstand AN58 der FAG in Schweinfurt sowie die Unterstützung der Versuchsauswertung durch die TU Berlin.

### Personalkosten (Pos. 0837):

Dies betrifft die im Vorhabenszeitraum durch die Bearbeiter des Vorhabens angefallenen Personalkosten. Darunter fallen Lagerberechnungen und Versuchsdefinition bzw. die Erstellung von Anforderungsdokumenten, Koordination des Forschungsverbundes, Auswertung der Versuchsergebnisse, Durchführung von technischen Berechnungen, Literaturrecherche und Projektmanagement. Insbesondere die Auswertung der angefallenen Daten war deutlich aufwändiger, als geplant.

Dazu kommen die Kosten für die Instrumentierung für die Instrumentierung und Betreuung der Versuche am Großlagerprüfstand durch Rolls-Royce Spezialisten.

Die Personalkosten wurden in der Vorkalkulation unterschätzt, sie sind deutlich höher ausgefallen, als erwartet.

### Reisekosten (Pos. 0838):

Dieser Posten beinhaltet Reisen zum Standort der Verbundpartner zur Diskussion des Vorhabenfortschritts, der weiteren Vorgehensweise und von technischen Fragestellungen sowie für die Betreuung der Versuche an den Prüfständen in Schweinfurt durch die Messspezialisten von RRD.

## 5 Zusammenfassende Ergebnisse

### 5.1 Ergebnisse AP 1: Großlagerversuche

Aufbauend auf die im Vorgängerprojekt durchgeführten Großlagerversuche mit vorgeschädigten Kugeln wurden auch in VERLAT-FP Versuche nach dem Schema durchgeführt, konventionelle Lager und ihr Verhalten im Schadensfall mit hybriden Lagern und ihrem Verhalten zu vergleichen.

Die Ergebnisse des Arbeitspaketes 1.1 Verschmutzungs-Tests werden im Abschlussbericht der Firma FAG dargestellt.

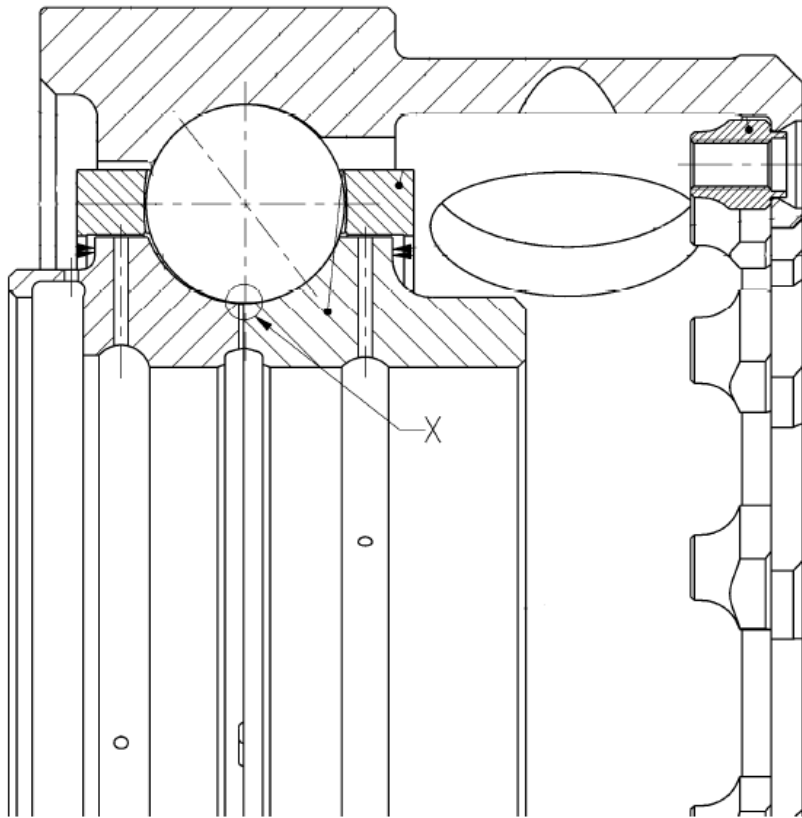
#### Prüflagergeometrie

Die Lagergeometrie ist unverändert zum vorangegangenen Projekt VEROLAT. Das Lager ist ein verändertes Trent 500 Hochdruckverdichterlager. Der Quetschöldämpfer und der Federkäfig wurden für die Versuchslager nicht ausgeführt, um Zeit und Kosten zu sparen. Ein Halbschnitt ist in Abbildung 2 dargestellt.

Das Lager verwendet Kugeln mit einem Durchmesser von 1 Zoll. Es wurden mehrere Varianten des Lagers mit verschiedenen Materialkombinationen hergestellt. In allen Varianten kam ein silber-plattierter Stahlkäfig zum Einsatz.

Teilenummer	Innenring Material	Außenring Material	Wälzkörpermaterial
594684A	M50NiL	M50	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>
594685	M50NiL	M50NiL	M50
594685A	M50NiL	M50NiL	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>
594685A	M50NiL	M50NiL	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>
594686A	M50NiL	M50-DH	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>
594687	M50NiL-DH	M50NiL-DH	M50-DH
594687A	M50NiL-DH	M50NiL-DH	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>

**Tabelle 4:** Getestete Lagervarianten



**Abbildung 2:** Prüflager im Halbschnitt

Die nachfolgende Tabelle 5 gibt einen Überblick, welche Versuche mit welchen Materialkombinationen durchgeführt wurden. Ein Versuch wurde umgewidmet, um aufbauend auf die Erfahrungen aus den Großlagerversuchen von VEROLAT mit 2,2 mm durchmessenden Ausbrüchen das Schadfortschrittsverhalten und die Detektierbarkeit bei kleineren Ausbrüchen untersuchen zu können.

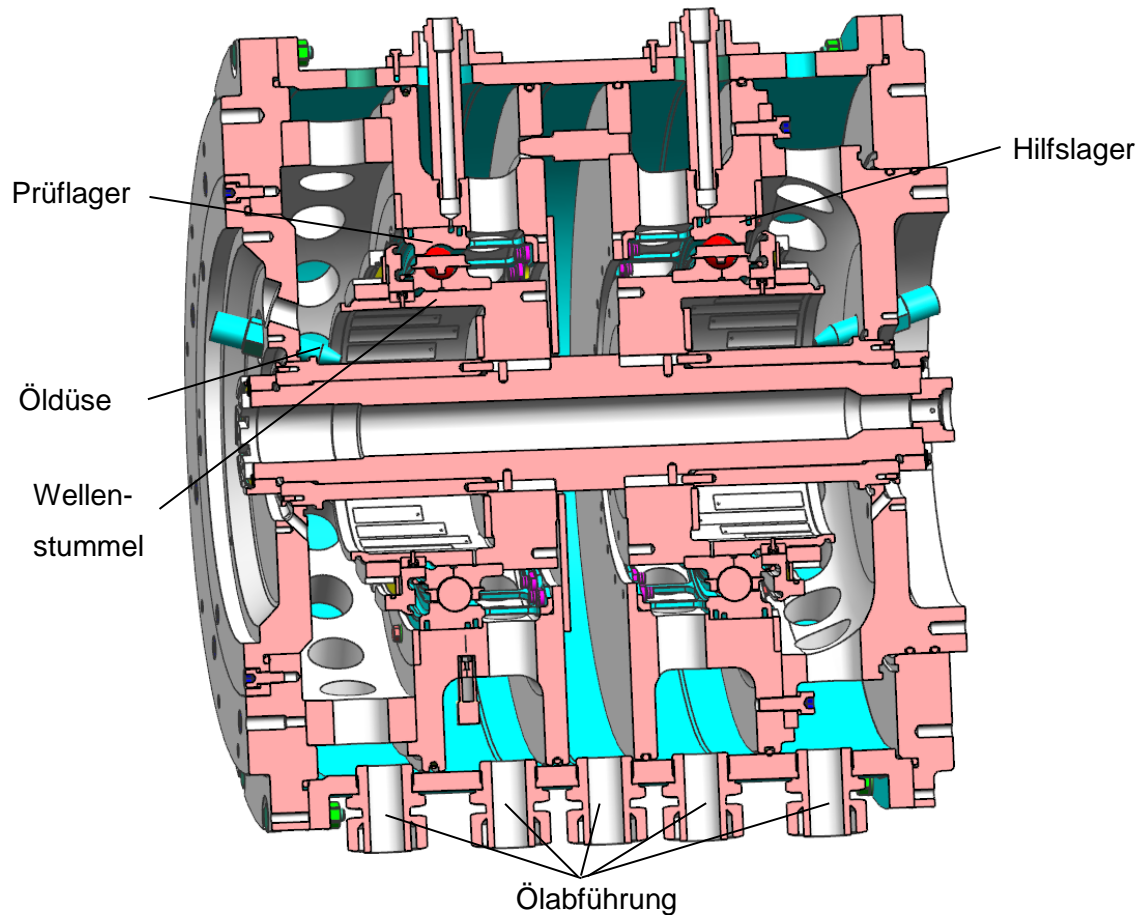
AP	Teilenummer	594684A	594685	594685A	594686A	594687	594687A
	Außenring	M50	M50NiL	M50NiL	M50-DH	M50NiL-DH	M50NiL-DH
	Innenring	M50NiL	M50NiL	M50NiL	M50NiL-DH	M50NiL-DH	M50NiL-DH
	Kugel	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	M50	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	M50-DH	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>
-	Vorgeschädigte Kugel *	1	-	-	-	-	-
AP1.1	Verschmutzungstests	-	2	2	-	2	2
AP1.2	Vorgeschädigte Lagerringe	1	2	2	2	-	2
AP1.3	Windmilling-Versuche	-	1	1	-	-	1
AP1.4	Kurzzeitig unterbrochene Ölzufuhr	-	1	1	-	-	1
AP1.5	Abgeschnittene Ölzufuhr	-	1	1	-	-	1
AP1.6	Zyklische Lastumkehr	-	1	1	-	-	-
AP1.7	Nulllast-Versuche	-	1	1	-	-	-

**Tabelle 5:** Überblick über die Versuchsmatrix des Arbeitspaketes 1, der mit \* markierte Versuch wurde nachträglich eingefügt, dafür wurde ein Versuch aus dem AP1.2 umgewandelt

### Prüfanordnung und Prüfstand

Für die Durchführung der Versuche wurde wie bereits im Vorgängerprojekt auf die Prüfstände der Firma Schaeffler zurückgegriffen. Auch der vorhandene Prüfkopf konnte weiterverwendet werden.

Auf den Prüfständen des Typs AN58 der Schaeffler Gruppe in Schweinfurt können Drehzahlen bis zu 30.000 Umdrehungen pro Minute und Axiallasten bis zu 300 kN auf Lager mit bis zu 510 mm Außendurchmessern und somit realistische Bedingungen für ein Triebwerks-hauptwellenlager dargestellt werden. Untersucht werden je ein Prüf- und ein Hilfslager in einem Prüfkopf, die Axiallasten werden hydraulisch aufgebracht und wirken gleichermaßen auf beide Lager. Eine Darstellung des Prüfkopfes findet sich in Abbildung 3. Die Schmierung der Lager erfolgt mittels Öldüsen, deren Strahl von den Wellenstummeln aufgefangen und über Bohrungen zum Lager geleitet wird.

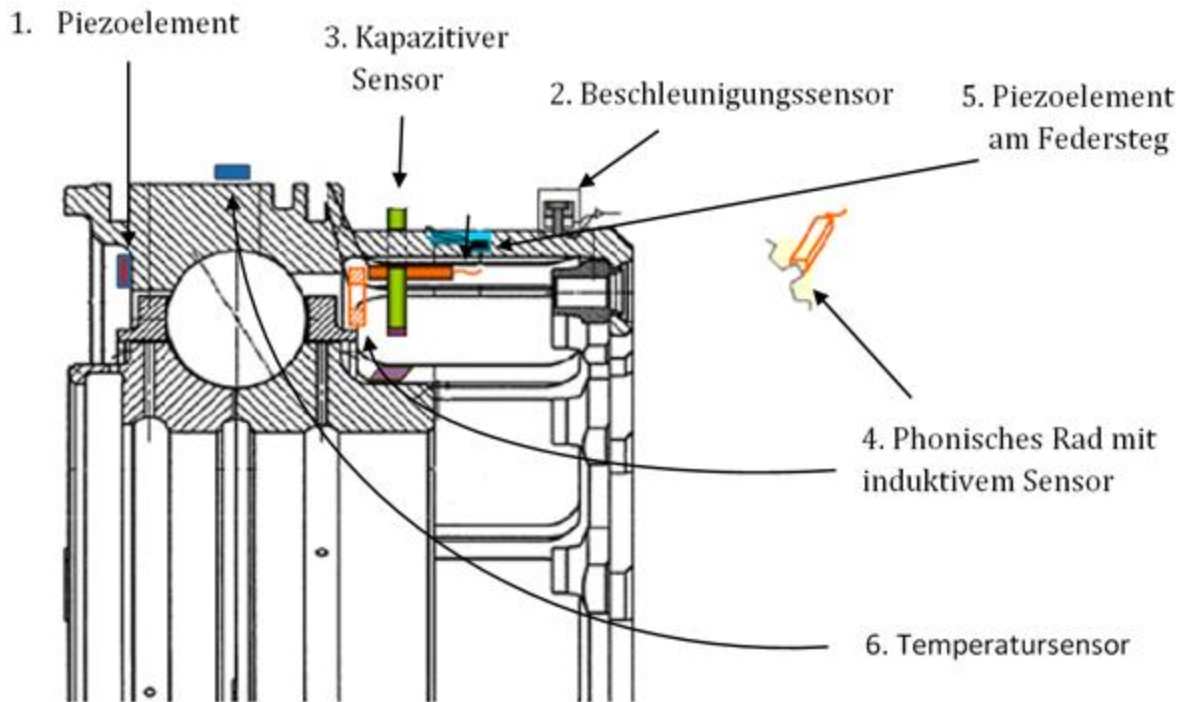


**Abbildung 3:** Schnittdarstellung des Prüfkopfes, Quelle: FAG Aerospace

### Instrumentierung

Die Instrumentierung des Prüfstandes umfasst Vibrations- und Temperatursensoren. Bei jedem Versuch wurden neben der eingeleiteten Axiallast und Drehzahl die Vibration des Prüfkopfes, die Temperaturen der Außenringe von Prüf- und Hilfslager und die Ölabflusstemperaturen gemessen. Darüber hinaus wurde das abgeführte Öl mit Hilfe von elektromagnetischen Sensoren und einem induktiven Sensor kontinuierlich auf Metallpartikel hin untersucht.

Auch wurde die zusätzliche Instrumentierung des Prüflagers, dargestellt in Abbildung 4, bei einigen Versuchen wieder appliziert, um das Arbeitspaket 3 zu unterstützen.



**Abbildung 4:** Schematische Darstellung der zusätzlichen Instrumentierung der Prüflager zur Unterstützung des Arbeitspaketes 3

### **AP1.2 Vorgeschiedigte Lagerringe**

Zielsetzung dieses Versuchs war der Vergleich von hybriden zu konventionellen Lagern im Fall eines Schadens auf einem Außenring, beispielsweise durch Materialermüdung. Es konnte gezeigt werden, dass Hybridlager ein deutlich verzögertes Ausfallverhalten aufweisen. Eine Doppelhärtung der Laufbahnen zeigte eine weitere Verbesserung dieses Verhaltens.

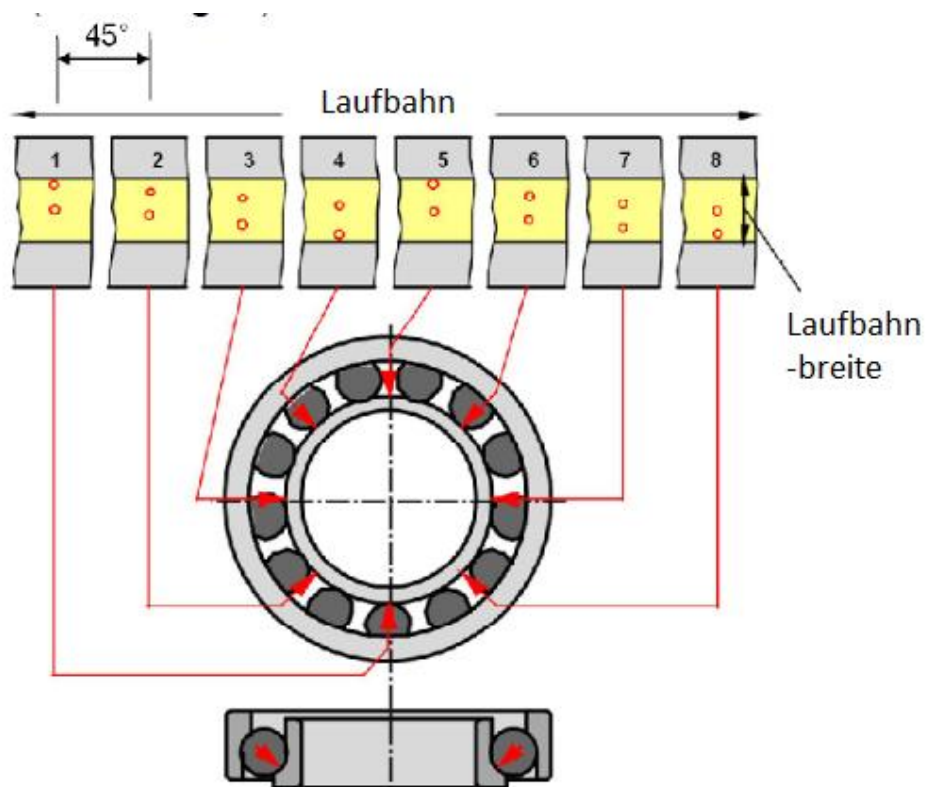
#### **Vorschädigung**

Für die Durchführung der Versuche im AP 1.2 „Untersuchung bei vorgeschädigten Lagerringen“ wurden die Lager mit Eindrücken eines Rockwell-Eindringkörpers präpariert. Die Vorschädigung erfolgte dazu gewöhnlich am Innenring, die Lager mit M50-Außenringen wurden an diesem vorgeschädigt. Diese Abweichung wurde notwendig, da eine Fertigung der Innenringe aus M50 als zu riskant angesehen wurde. Der Stahl M50 ist ein Durchhärter und weist als solcher eine geringe Kernzugfestigkeit auf. Er neigt somit zu Ringbrüchen bei hohen Zugbelastungen, wie sie aufgrund hoher Geschwindigkeiten und der notwendigen Presspassungen am Innenring auftreten. Insbesondere im Zusammenhang mit den geplanten Vorschädigungen wurde somit das Risiko eines Durchrisses des Ringes als unakzeptabel angesehen. Ein solcher Schaden ist beispielhaft in Abbildung 5 dargestellt.

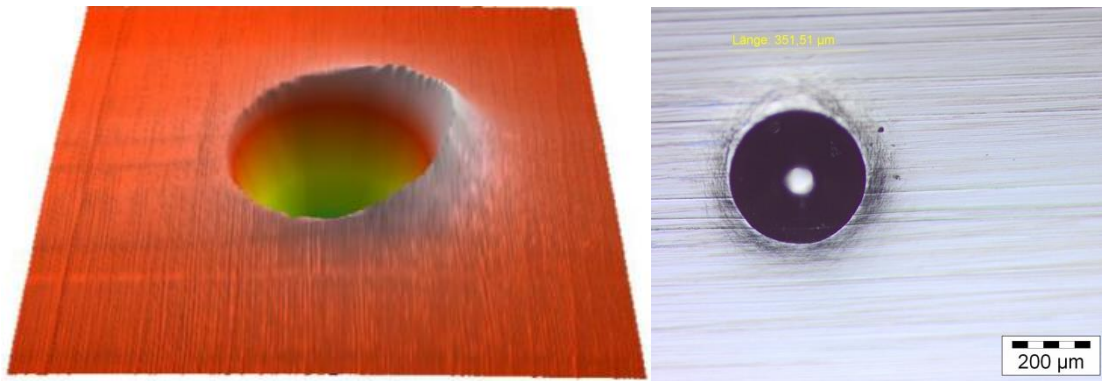


**Abbildung 5:** Axialer Durchriss des Innenringes eines Pendelrollenlagers – Beispielbild (aus „Wälzlerschäden“, Schaeffler Technologies AG & Co. KG, 2013)

Die Positionierung der Eindrücke auf der Laufbahn ist in Abbildung 6 dargestellt. Ziel war es, die Eindrücke in so großem Abstand in Umfangsrichtung voneinander zu positionieren, dass sie einander nicht gegenseitig beeinflussen und die Breite der Laufbahn unter den verschiedenen Belastungszuständen abdecken.



**Abbildung 6:** Vorschädigung der Innenringe im AP1.2



**Abbildung 7:** Links: 3D-Profil eines Eindrucks; Rechts: Foto eines Laufbahneindrucks

### Prüfbedingungen

Der Prüfzyklus für das Arbeitspaket 1.2 gleicht dem aus den Großlagerversuchen des Vorgängerprojekts VEROLAT und wird nachfolgend noch einmal dargestellt. Er basiert auf den Missionen von Geschäftsreiseflugzeugen und der Original-Anwendung des Designs. Die folgenden Versuchsparameter festgelegt:

1) Drehzahl:

Die gewählten Drehzahlen basieren auf einer existierenden Anwendung in einem zivilen Triebwerk.

2) Kontaktspannung:

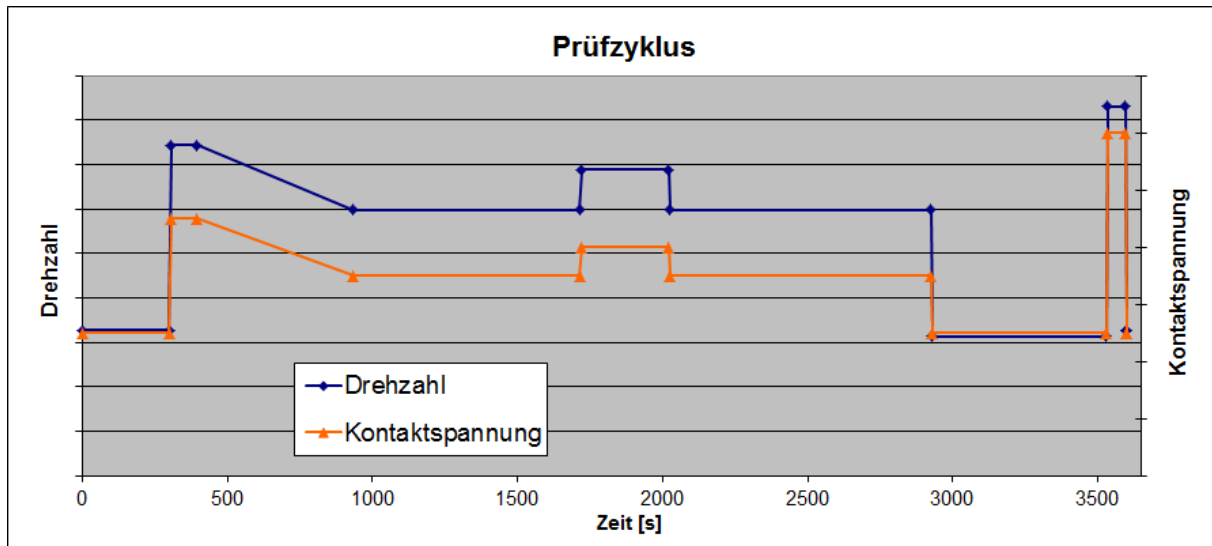
Es wurde entschieden, die Versuche bei gleicher Kontaktspannung für herkömmliche und Hybridlager durchzuführen, da diese entscheidendes Auslegungskriterium sind. In der Anwendung lassen sich die angestrebten Kontaktspannungen durch Variation von Schmiegun, Kugelanzahl und -durchmesser variieren. Es wurden Spannungen definiert, die in der Realität vorkommende Belastungen reproduzieren, so dass nicht durch eine Überlastung andere Ausfallmechanismen zum Tragen kommen als dies in der Anwendung im Flugtriebwerk der Fall ist. Am Teststand wird dazu die Axiallast auf das Prüflager variiert. Die benötigten Axiallasten wurden von Rolls-Royce Deutschland errechnet. Die Berechnungen haben ergeben, dass für die zum Vergleich der Ergebnisse notwendigen Tests mit Stahlkugeln die Lagerlast bei gleicher Schmiegun um etwa 1/3 erhöht werden muss, um gleiche Kontaktspannungen zu erreichen.

3) Haltezeiten bzw. Zyklusdauer:

Die Gesamtdauer des Zyklus wurde auf 60 Minuten festgelegt, was eine Beschleunigung gegenüber realen Zyklen darstellt, die insbesondere bei Großtriebwerken



häufig mehrere Stunden lang sind. In der vorgesehenen Testdauer von 150 Stunden werden entsprechend ebenso viele Zyklen durchfahren. Die Verhältnisse der Haltezeit in den einzelnen Zyklus-Phasen zueinander wurden einer Referenz-Mission nachempfunden.



**Abbildung 8:** Zyklusdefinition für die Großlager-Versuche im AP1.2, deckungsgleich mit VEROLAT Großlagerversuchen und VERLAT-FP AP1.1 „Verschmutzungstests“

#### 4) Schmierung:

Die Tests wurden mit einem Öl durchgeführt, das in vielen Triebwerksanwendungen Verwendung findet. So wird sichergestellt, dass auch ein nicht auf besonders hohe Tragfähigkeit ausgelegtes Öl den Betrieb von Hybridlagern erlaubt. Das Ölsystem wurde während der Versuche genau überwacht, um sicherzustellen, dass Verunreinigungen, Temperaturen und zugeführte Mengen den im Triebwerk vorzufindenden Bedingungen entsprechen. Auch lässt sich über das Öl ermitteln, wie viele Partikel welcher Größe und welchen Materials vom Lager in den Tank zurückgeführt werden, so dass sich der Zustand des Lagers über dieses Verfahren auch im eingebauten Zustand überwachen lässt. Ebenso wird ein direkter Vergleich der Öl-Abflusstemperaturen vom Stahl gegenüber dem Hybridlager sowie zwischen Versuchs- und Hilfslager ermöglicht, dies erlaubt die Erkennung von Trends zur Zustandsüberwachung des geschädigten Testlagers.

## Ergebnisse

Bei allen Versuchen kam es innerhalb der vorgegebenen Versuchszeit von 150 h erwartungsgemäß zum Ausfall des vorgeschädigten Rings. Die Ausbrüche erstreckten sich jeweils über mehrere Schädigungspositionen wie beispielhaft in Abbildung 9 dargestellt.



**Abbildung 9:** Schaden am Außenring des Versuchs mit M50-Außenring

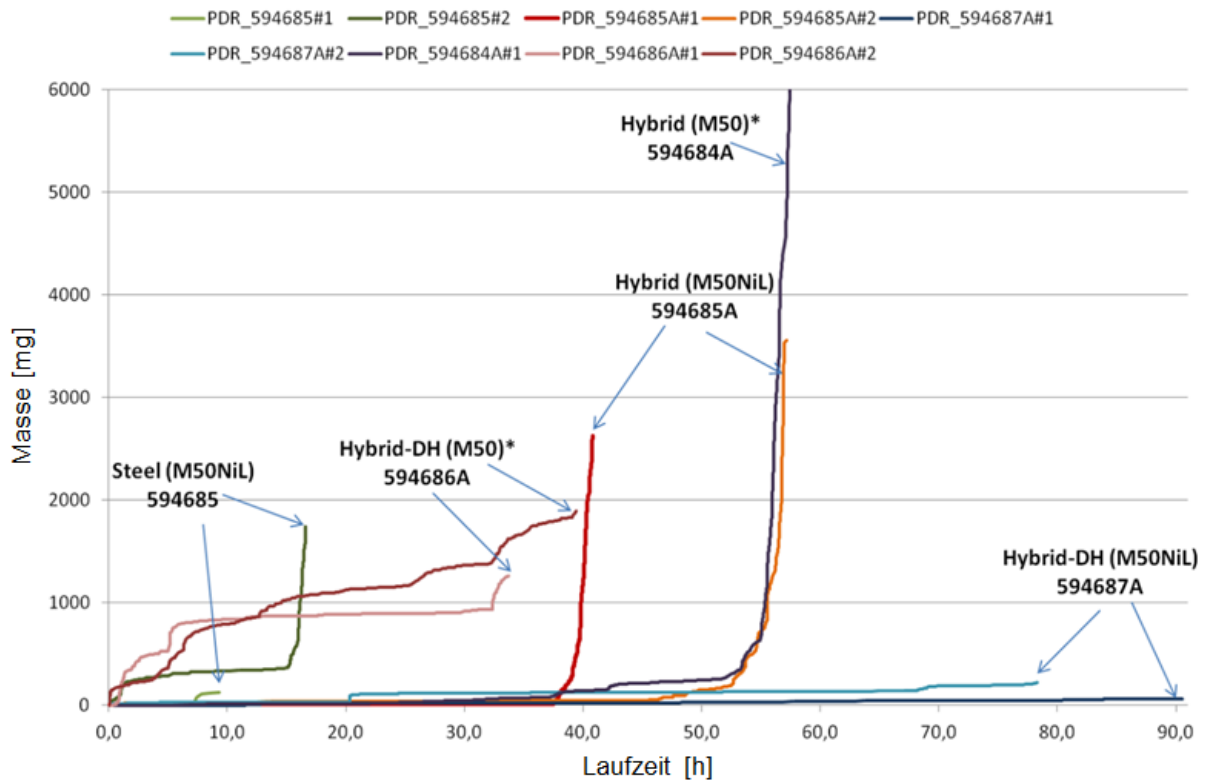
Die nachfolgende Tabelle 6 gibt einen Überblick über die Versuchsergebnisse der einzelnen Lagervarianten. Aufgrund unterschiedlicher Schmiegun am Außenring und des Einflusses der Zentrifugalkraft sowie der Überrollfrequenzen erreichten die Lager mit vorgeschädigtem Außenring eine um 60% längere Laufzeit als diese mit vorgeschädigtem Innenring. Die Laufzeit wurde für die Tabelle und auch die folgenden Diagramme korrigiert.

Die nicht vorgeschädigten Lagerringe wiesen auch nach den Versuchen jeweils keine Beschädigungen auf. Kugelschäden traten nur bei einer konventionellen Lagervariante auf. Die Hybridlager weisen in jedem Fall eine erhöhte Laufzeit unter den gewählten Bedingungen auf, eine Doppelhärtung erhöht im Falle von M50NiL die Laufzeit noch einmal um den Faktor 2. Abweichend ist das Verhalten für M50-DH-Außenringe. Mögliche Ursachen werden in den nächsten Absätzen diskutiert.

<b>Kugel</b>	<b>Material Laufbahn</b>	<b>Laufzeit (Ab- schaltgrund)</b>	<b>Zustand nach Testlauf</b>
M50	M50NiL	9h (Vibration)	Abrasiver Verschleiß der Kugeln, großflächiger Ausbruch am belasteten (vorgeschädigten) Innenring. Käfig, Außenring und unbelasteter Innenring unbeschädigt.
M50	M50NiL	16,5h (Vibration)	
Si3N4	M50NiL	40,5 h (Vibration)	Großflächiger Ausbruch am belasteten (vorgeschädigten) Innenring. Kugeln, Käfig, Außenring und unbelasteter Innenring unbeschädigt.
Si3N4	M50NiL	57 h (Vibration)	
Si3N4	M50NiL-DH	78 h (Außenring- Temperatur)	Großflächiger Ausbruch am belasteten (vorgeschädigten) Innenring. Kugeln, Käfig, Außenring und unbelasteter Innenring unbeschädigt.
Si3N4	M50NiL-DH	91 h (Vibration)	
Si3N4*	AR: M50 IR: M50NiL	92 h / 58 h** (Außenring- Temperatur)	Großflächiger Ausbruch am (vorgeschädigten) Außenring. Kugeln, Käfig und Innenringe unbeschädigt.
Si3N4*	AR: M50-DH IR: M50NiL- DH	54 h / 34 h** (Außenring- Temperatur)	Ausbruch am (vorgeschädigten) Außenring. Kugeln, Käfig und Innenringe unbeschädigt.
Si3N4*	AR: M50-DH IR: M50NiL- DH	63 h / 39 h** (Außenring- Temperatur)	Ausbruch am (vorgeschädigten) Außenring. Kugeln, Käfig und unbelasteter Innenring unbeschädigt.

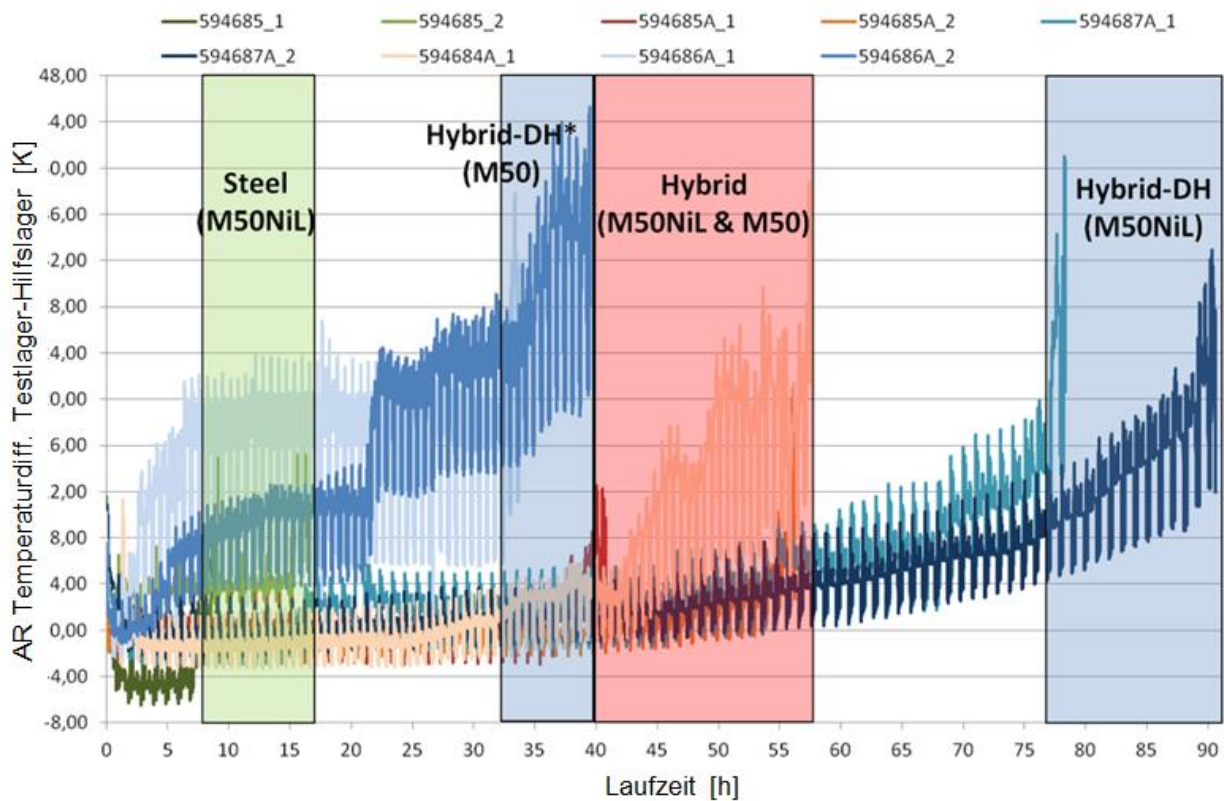
**Tabelle 6:** Ergebnisse AP1.2 „Untersuchung bei vorgeschädigten Lagerringen“, \* abweichend wurde hier der Außenring geschädigt, \*\* korrigierte Laufzeit

Während in Versuchen mit vorgeschädigtem Innenring und auch dem Versuch mit dem einfach gehärteten M50-Außenring einer stabilen Phase ohne Schadensfortschritt eine progressive Schadensentwicklung folgte, welche durch erhöhte Temperaturen und Vibrationen bei gleichzeitiger Partikelemission charakterisiert war, konnte bei den Versuchen mit doppelt gehärteten M50-Ringen frühzeitig eine erhöhte Partikelemission (siehe Abbildung 10) und ebenso ein Temperaturanstieg (siehe Abbildung 11) festgestellt werden. In der Folge erreichten diese Versuche eine deutlich kürzere Laufzeit als der Versuch mit einfach gehärtetem M50.



**Abbildung 10:** Emission ferromagnetischer Partikel der Versuche des Arbeitspakets 1.2

Eine mögliche Erklärung für dieses Verhalten ist die unterschiedliche Ausrichtung der Eindringkörper bei der Vorschädigung von Innen- und Außenringen: Während die Vorschädigung am Innenring senkrecht zur Laufbahnoberfläche vorgenommen werden konnte, konnte dies bei den M50-Außenringen nicht gewährleistet werden. Ein etwaiger Aufwurf von Material (siehe Abbildung 7) oder gar Risse an den Rändern der Eindrücke können daher das Verhalten verfälscht haben.



**Abbildung 11:** Differenz der Lageraußenringtemperaturen von Versuchs- und Hilfslager

Trotz der aufgetretenen Anomalie lässt sich zusammenfassend das Folgende festhalten:

- Hybridlager weisen unter den gewählten Bedingungen eine um den Faktor 4 bis 5 erhöhte Laufzeit gegenüber der Ausgangsmaterialkombination M50 gegen M50NiL auf.
- Eine Doppelhärtung erhöht diesen Faktor auf 8 bis 10 gegenüber der Ausgangsmaterialkombination.

### AP1.3 Windmilling-Versuche

Ziel dieser Versuche ist der Nachweis der Eignung von hybriden Lagern für einen Betrieb unter Bedingungen, wie sie nach Abschaltung oder Ausfall eines Triebwerks im Flug auftreten können. Die Abschaltung eines Triebwerks kann aus den verschiedensten Gründen notwendig werden, beispielsweise aufgrund eines Problems mit der elektronischen Steuerungseinheit oder wegen des Versagens bestimmter Komponenten. Unter diesen Umständen ist für einige Flugzeugmuster eine fortgesetzte Rotation der Triebwerksrotoren vorgeschrieben, da ein blockierter Niederdruckrotor unter Umständen einen zu großen Luftwiderstand

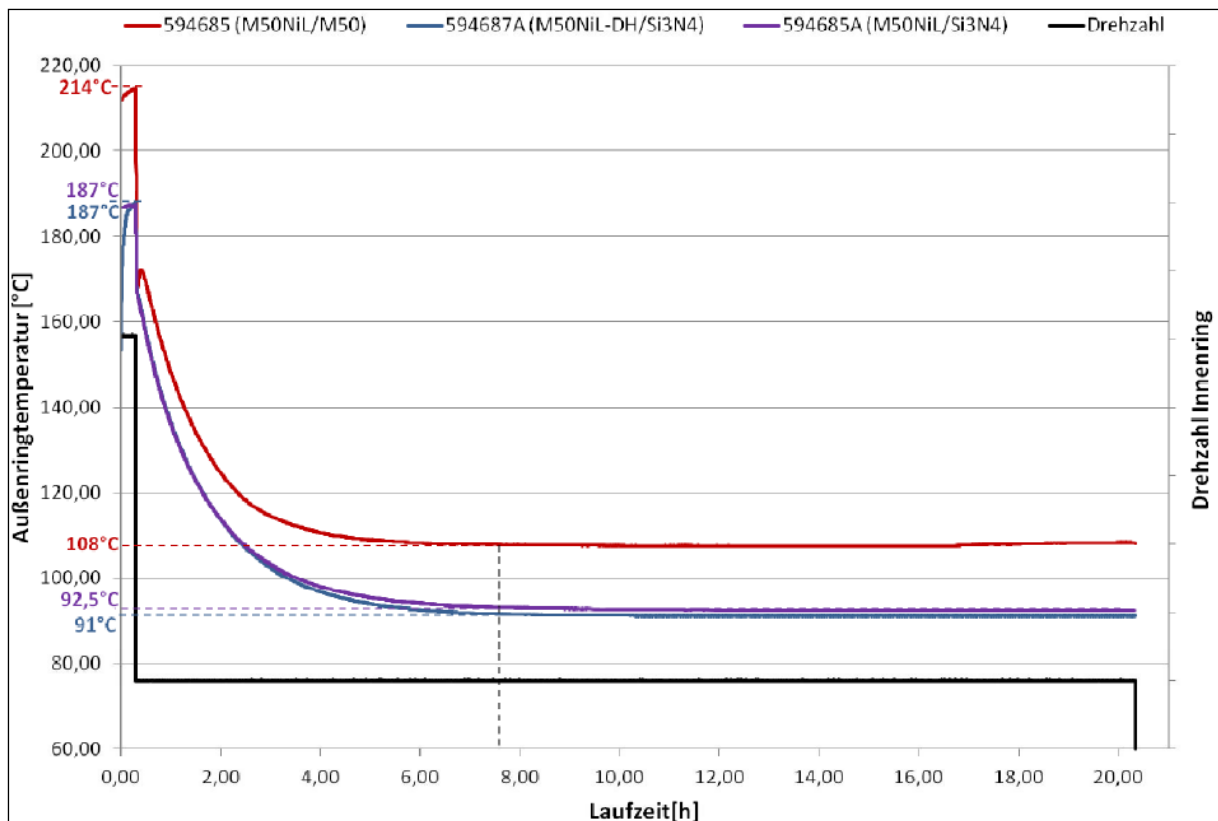
darstellen würde. Auch bei anderen Triebwerkstypen ist es wünschenswert, dass die assoziierten Bedingungen – bspw. keine Ölversorgung – keine Schäden an den verbauten Komponenten verursachen, da sonst eine teure Wartung des gesamten Triebwerks notwendig würde.

### Prüfbedingungen

In der Triebwerksapplikation sind Windmilling-Bedingungen durch relativ geringe Drehzahlen und Lasten gekennzeichnet. Ein Ausfall der Ölversorgung oder eine signifikante Unterversorgung ist ebenfalls möglich, da der Öldruck von der Hochdruckrotordrehzahl abhängig ist. Die gewählten Prüfbedingungen simulieren diese Konditionen. Auf die Stabilisierungsphase bei normaler Ölversorgung folgt ein zwanzigstündiger Betrieb ohne Ölversorgung, also mit nur dem Schmierstoff, der nach Abschaltung der Zufuhr im System verbleibt. Die Drehzahl wird für diese Phase konstant bei einem Wert unterhalb des normalen Betriebsbereiches gehalten. Auch für die Axiallast wurde ein geringer Wert gewählt. Wie in den Arbeitspaketen 1.1, 1.2 und den Großlagerversuchen des Vorgängerprojekts wurde mit konstanter Pressung gefahren, das heißt, dass die Lastwerte für Hybrid- und Stahllager unterschiedlich sind. Beim Stahllager musste eine um den Faktor 1,7 erhöhte Last aufgebracht werden, um die gleiche Pressung zu erreichen.

### Ergebnisse

Abbildung 12 zeigt den Temperatur- und Drehzahlverlauf für die 3 getesteten Lagervarianten. Nach 6 bis 8 Stunden Betrieb ohne Ölzufuhr stellte sich eine Beharrungstemperatur ein, die bis zum Ende des Versuchs nahezu konstant blieb. Die erhöhte Beharrungs- und Ausgangstemperatur des Stahllagers (rot) ist nur zum Teil auf eine generell erhöhte Verlustleistung konventioneller Lager zurückzuführen, sie resultiert auch aus der höheren Lagerbelastung.



**Abbildung 12:** Temperaturverlauf des Windmillingversuchs für die unterschiedlichen Materialkombinationen

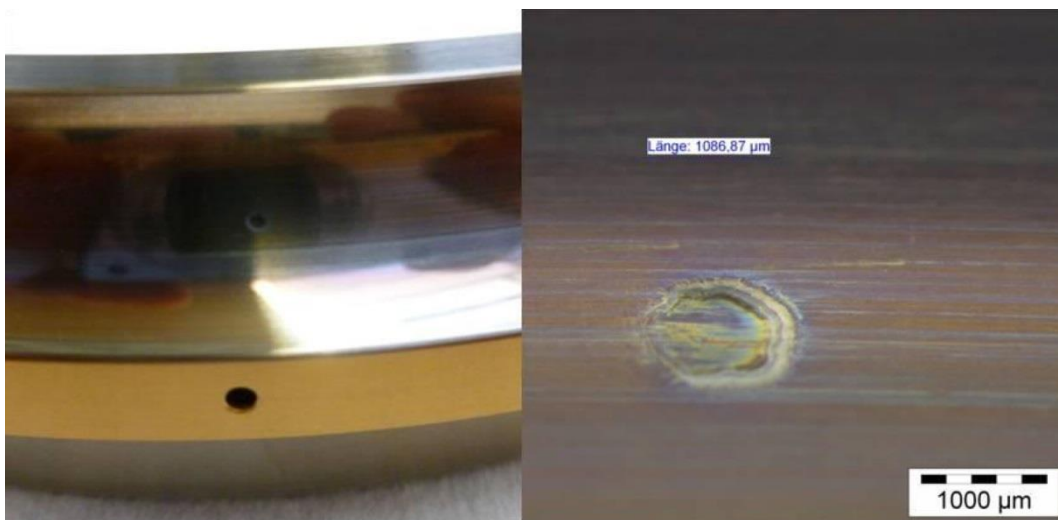
Die Hybridlager wiesen nach dem Versuch keinerlei Beschädigung auf. Lediglich eine leichte bläuliche Verfärbung resultierend aus Reaktionen mit dem Öl war zu beobachten. Diese hat keinerlei negative Auswirkungen auf den weiteren Betrieb des Lagers. Der Zustand des Lagers ist in Abbildung 13 gezeigt.

Das konventionelle Lager war auch weitgehend unbeschädigt. Es wurde jedoch auf belastetem Innen- und auch auf dem Außenring nach dem Versuch ein Eindruck mit einem Durchmesser von ca. 1 mm gefunden. Der Eindruck ist in Abbildung 14 deutlich zu erkennen. Dieser könnte den leichten Temperaturanstieg beim Stahllager nach ca. 17 h erklären. Das Partikel, welches den Eindruck verursachte, stammt vermutlich aus einem vorangegangenen Versuch auf demselben Prüfstand und steht nicht in Zusammenhang mit dem Versuch.





**Abbildung 13:** Belasteter Innenring des Hybridlagers mit konventionell gehärteten Ringen (594685A)



**Abbildung 14:** Belasteter Innenring des konventionellen Lagers mit deutlich erkennbarem Fremdkörpereindruck

#### **AP1.4 Kurzzeitig unterbrochene Ölzufuhr**

Eine kurzzeitige Unterbrechung der Ölzufuhr kann im Triebwerk aufgrund von Flugmanövern auftreten. Es wird von den verbauten Transmissionskomponenten wie Lagern und Zahnradern erwartet, dieser ohne Beschädigung standzuhalten. Dazu werden Triebwerksversuche mit definiert unterbrochenen Ölzufuhren bei hoher Lagerbelastung durchgeführt, beispielsweise eine Unterbrechung von 15 s und darauf folgend mehrfache Unterbrechungen von 5 s Dauer mit je einer Minute normaler Ölzufuhr zwischen den Unterbrechungen. Derartige Versuche wurden in diesem Arbeitspaket nachgestellt.

## Prüfbedingungen

Die Prüfbedingungen für das Arbeitspaket 1.4 wurden ursprünglich wie in Tabelle 7 dargestellt vorgegeben. Einer ersten Unterbrechung der Ölversorgung von 18 s folgen 5 weitere von jeweils 8 s. Zwischen den Unterbrechungen wird die Ölversorgung für jeweils 1 Minute wiederhergestellt. Diese Bedingungen wurden aus verschiedenen Gründen für die einzelnen Versuche variiert. So war der Temperaturanstieg für die Hybridlager so gering, dass entschieden wurde, die Unterbrechungsdauern auf je die doppelte Zeitspanne zu verlängern. Das konventionelle Lager jedoch fiel beim ersten Versuch bereits bei der ersten Unterbrechung der Ölzufuhr aus. Für einen weiteren Versuch wurde deshalb die Last auf das Niveau des Hybridlagers reduziert.

Phase	Dauer [s]	Last Stahllager [%]	Last Hybridlager [%]	Ölfluss [%]
Stabilisierung	240	100	58	100
1. Unterbrechung	18	100	58	0
Stabilisierung	60	100	58	100
2. Unterbrechung	8	100	58	0
Stabilisierung	60	100	58	100
3. Unterbrechung	8	100	58	0
Stabilisierung	60	100	58	100
4. Unterbrechung	8	100	58	0
Stabilisierung	60	100	58	100
5. Unterbrechung	8	100	58	0
Stabilisierung	60	100	58	100
6. Unterbrechung	8	100	58	0
Stabilisierung	300	100	58	100

**Tabelle 7:** Ausgangszyklus für die Versuche des AP1.4, veränderte Bedingungen siehe Text & Tabelle 8

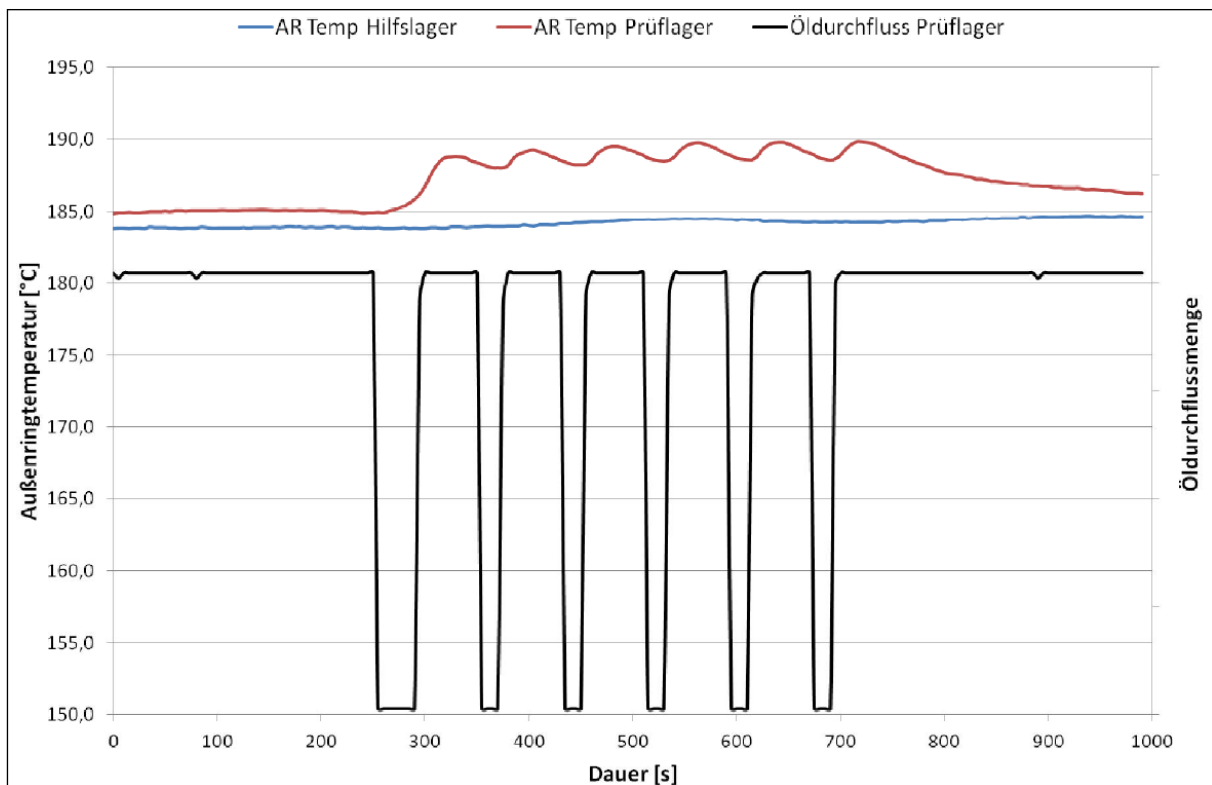
## Ergebnisse

Die Ergebnisse der Ölunterbrechungsversuche sind in Tabelle 8 zusammengefasst. Wie bereits im vorangegangenen Abschnitt dargestellt wurden Anpassungen des Zyklus notwendig, welche Einfluss auf die Ergebnisse hatten. Um dies nachvollziehbar darzustellen, werden die Versuche in chronologischer Reihenfolge dargestellt.

Innen- / Außenring	Ausgangszyklus	Verdoppelte Unterbrechungsdauer	Reduzierte Last
M50 / M50NiL	Ausfall bei erster Unterbrechung	-	Kein Ausfall
Si3N4 / M50NiL	Kein Ausfall	Kein Ausfall	-
Si3N4 / M50NiL-DH	Kein Ausfall	Kein Ausfall	-

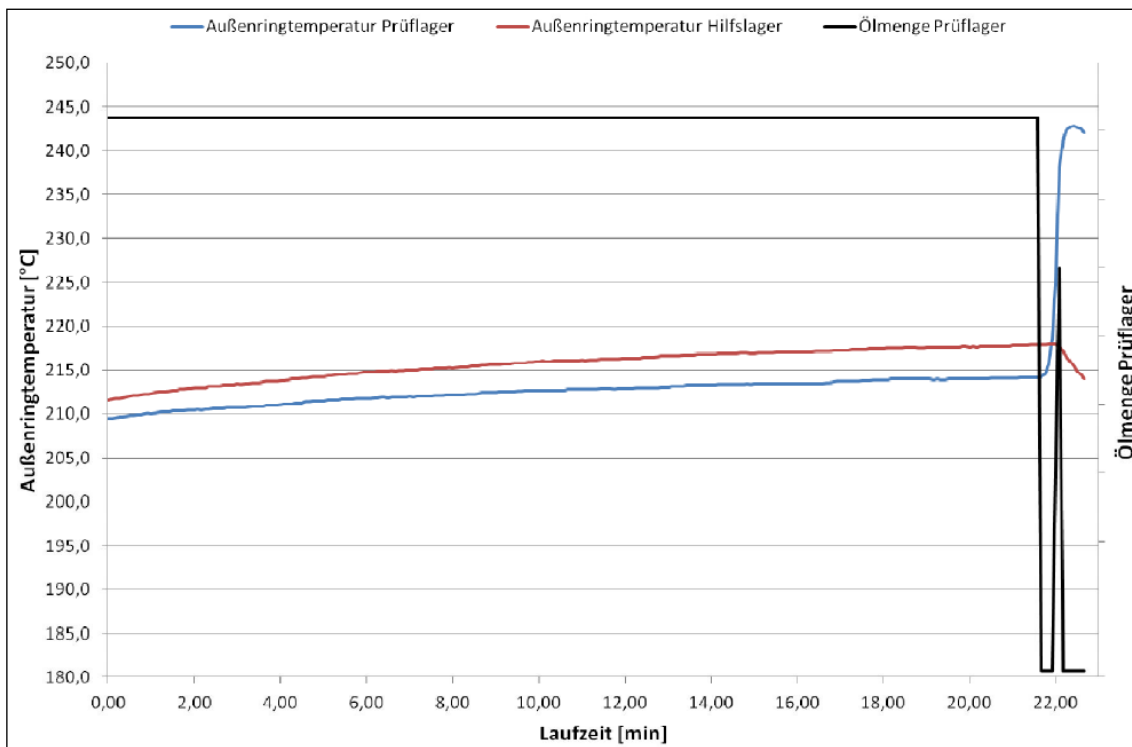
**Tabelle 8:** Überblick der Versuchsergebnisse der Ölunterbrechungsversuche

Die ersten Ölunterbrechungsversuche wurden mit dem Hybridlager mit doppelt gehärteten Außenringen nach dem Ausgangszyklus, welcher in Tabelle 7 dargestellt ist, durchgeführt. Die Beharrungstemperatur, die sich in der Stabilisierungsphase einstellte betrug ca. 185 °C. Die Außenringtemperatur stieg bei diesen Versuchen während der Phasen der Unterbrechung der Versorgung jedoch um lediglich 2 bis 3 K, auch konnte keine Emission von Partikeln festgestellt werden. Es wurde daher entschieden, die Unterbrechungsdauer zu verlängern. Auch unter den veränderten Versuchsbedingungen blieb der Temperaturanstieg mit ca. 5 K moderat, siehe dazu Abbildung 15.



**Abbildung 15:** Temperaturverlauf von Test- und Hilfslager bei Unterbrechung der Ölzufuhr (Hybridlager mit M50NiL-DH-Ringen)

Das Lager wurde nach diesem Versuch ausgebaut und untersucht. Erwartungsgemäß ließ sich keinerlei Beschädigung an den Komponenten feststellen, so dass das Versuchslager für den späteren Versuch mit Abschaltung der Ölzufuhr verwendet werden konnte.



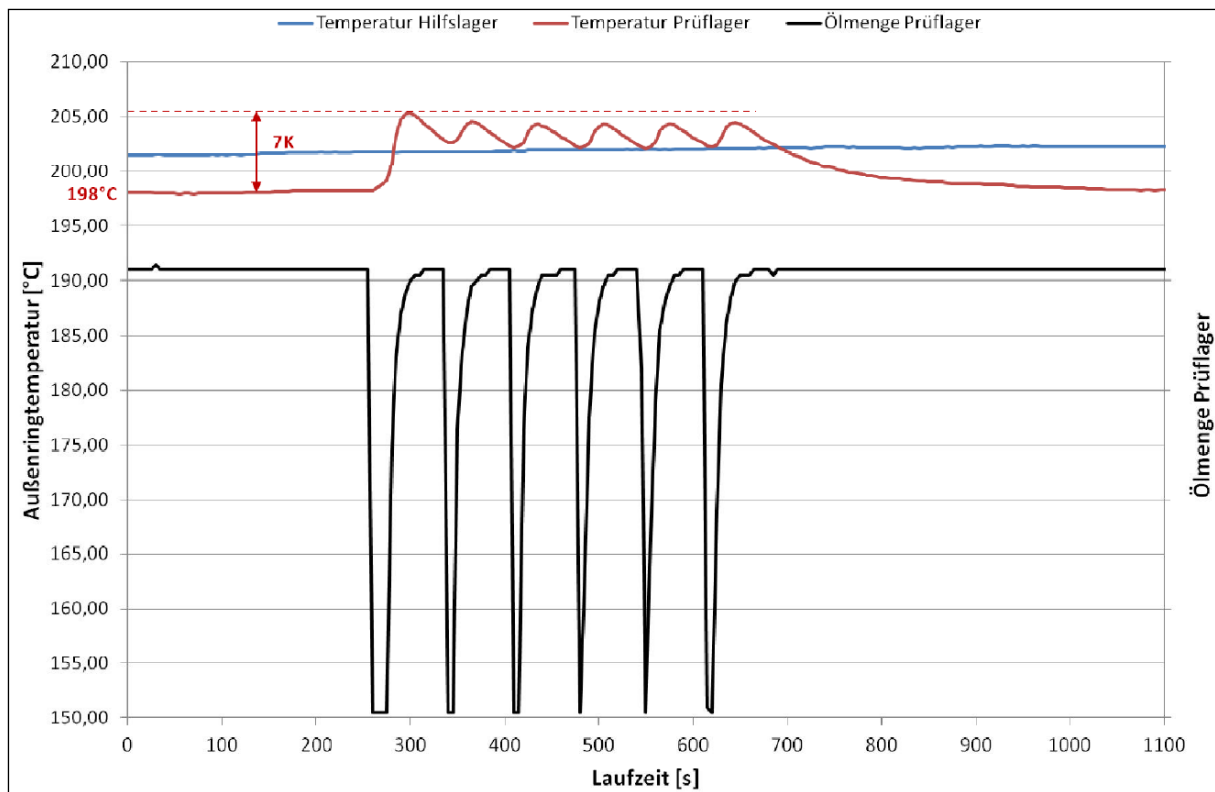
**Abbildung 16:** Temperaturverlauf des Prüf- und Hilfsagers beim Versuch mit Unterbrechung der Ölversorgung mit dem Stahllager; es wurde der Ausgangszyklus verwendet

Auch beim Stahllager wurde der Versuch zunächst mit dem Ausgangszyklus durchgeführt, der hier eine gegenüber dem Hybridlager deutlich erhöhte Axiallast aufwies, um eine konstante Flächenpressung zu erreichen. Das Lager wies deshalb bereits vor Unterbrechung der Ölzufuhr eine deutlich erhöhte Außenringtemperatur von 214 °C auf. Bereits bei der ersten Unterbrechung von 18 s stieg die Temperatur innerhalb von Sekunden auf 243 °C. Der Temperaturverlauf ist in Abbildung 16 dargestellt. Die Sicherheitskupplung des Prüfstandes löste aufgrund einer Blockade des Lagers aus, was den Versuch beendete. Nach Abkühlung des Prüfstandes ließ sich die Welle von Hand rotieren, eine Befundung zeigte jedoch große Beschädigungen des Lagers auf. Zwar trat kein Käfigbruch auf, aber sowohl Außen- als auch Innenringlaufbahnen wiesen Aufschmelzungen auf. Die Innenringhälften (Abbildung 17) ließen sich nur noch zerstörend trennen, die auftretenden Temperaturen von schätzungsweise bis zu 800 °C hatten diese verschweißt. Die Kugeln sind grau-schwarz verfärbt und ihre Oberfläche zeigt Materialaufschmelzungen und Abplatzungen.



**Abbildung 17:** Innenring des Stahllagers nach dem erfolgten Versuch mit dem Ausgangszyklus; Oben: die Hälften des geteilten Innenringes sind verschweißt; Unten: Aufschmelzungen an den Kugeln

Aufgrund des Ergebnisses wurde entschieden, den Versuch mit reduzierter Belastung zu wiederholen. Dazu wurde die Axialkraft auf den Wert des Hybridlagers reduziert, woraus eine geringere Kontaktspannung resultiert. Alle anderen Parameter wurden beibehalten, die Unterbrechungsdauer liegt bei 18 beziehungsweise 8 s. Die Außenringtemperatur nach Abschluss der Stabilisierung sank durch diese Maßnahme von 214 auf 198 °C. In der Folge konnte der Versuch ohne Abschaltung durchfahren werden. Der Temperaturverlauf am Außenring ist in Abbildung 18 dargestellt. Der Temperaturanstieg während der Unterbrechungsphase beträgt ca. 7 K.



**Abbildung 18:** Temperaturverlauf beim Versuch mit Ölunterbrechung: Stahllager mit reduzierter Axiallast

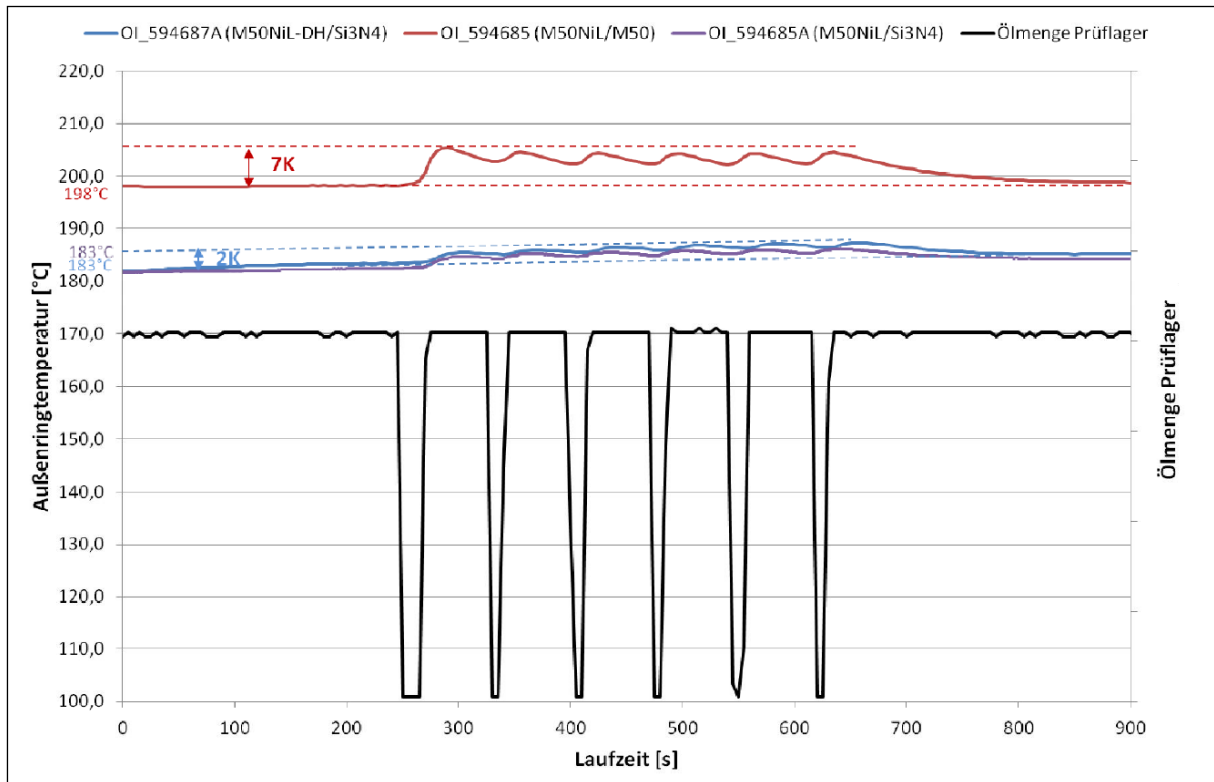
Die anschließende Befundung des Lagers erweist keine Schäden an Ringen und Käfig, lediglich eine graue Laufspur ist erkennbar. Auf den Kugeln finden sich deutlicher ausgeprägte Laufspuren und Ablagerungen, die vom Schmierstoff herrühren.



**Abbildung 19:** Laufspuren und Ablagerungen an der Stahlkugel nach dem Versuch mit Unterbrechung der Ölversorgung (reduzierte Axiallast)



Die Ergebnisse des Versuches mit unterbrochener Ölzufuhr unter Verwendung des Hybridlagers mit konventionell gehärteten Ringen sind in jeder Hinsicht mit denen des Versuchs vergleichbar, der doppelt gehärtete Laufbahnen verwendete. Auch hier traten keine Schäden auf, der Temperaturanstieg bei Unterbrechung der Ölzufuhr liegt bei 2 beziehungsweise 5 K für den Ausgangszyklus und den mit verdoppelter Unterbrechungsdauer.



**Abbildung 20:** Vergleich der Temperaturverläufe von hybriden (blau und violett) und konventionellen Lagern (rot); Die Versuche wurden bei gleicher Last und Drehzahl durchgeführt.

Im Ergebnis lässt sich festhalten, dass Hybridlager eine höhere Widerstandsfähigkeit gegenüber Unterbrechungen der Ölzufuhr aufweisen. Dies lässt sich unter anderem auf die reduzierte Wärmeentwicklung zurückführen, Abbildung 20 zeigt die unterschiedlichen Temperaturanstiege bei Unterbrechung der Ölzufuhr für die hybriden und das konventionelle Lager.

**AP1.5 Abgeschnittene Ölzufuhr**

Unter Umständen kann bei Triebwerken die Ölzufuhr nicht nur kurzfristig unterbrochen sondern ganz abgeschnitten werden, beispielsweise durch Leckagen oder bei einem Versagen der versorgenden Pumpe. Derartiges Versagen ist äußerst selten, stellt jedoch insbesondere für Luftfahrzeuge mit nur einem Triebwerk ein Risiko dar. Die Transmissionskomponenten in

Triebwerken wie Verzahnungen und auch Wälzlager sind unter diesen Umständen diejenigen Komponenten, die erwartungsgemäß zum Ausfall eines Triebwerks führen, da ein fortgesetzter Betrieb bei Fehlen der Schmierstoffversorgung sowohl zu oberflächeninduzierten Schäden als auch zu einer Überhitzung führt. Je länger eine Komponente unter diesen Umständen ihre Funktion erfüllt, desto mehr Möglichkeiten bieten sich dem Piloten, auch solche Situationen zu beherrschen.

Prüfbedingungen

Die Versuche in diesem Arbeitspaket dienen dem Vergleich, konventioneller und hybrider Lager unter Abschaltung der Ölzufuhr. Auch hier wurden infolge der Ergebnisse erster Versuche die Prüfparameter variiert. So erwies sich das Hybridlager als sehr robust gegenüber den gewählten Bedingungen, ein Ausfall konnte anfangs nicht herbeigeführt werden. Last und Drehzahl wurden in der Folge erhöht. So konnte ein Vergleich zum Stahllager herausgefunden werden. Auf die gewählten Bedingungen gehen Tabelle 9 und Tabelle 10 näher ein. Die Betriebsbedingungen für geringe Belastungen sind hier vergleichbar mit den beim Sinkflug auftretenden, die Bedingungen bei moderater Last sind von denen bei Reiseflug auftretenden abgeleitet. Auch wurde hier eingedenk der Ergebnisse des Arbeitspakets 1.4 entschieden, die Axiallast von Stahl- und Hybridlagern bei der höheren Belastungsstufe anzugleichen.

Phase	Dauer [min]	Drehzahl [%]	Last Stahllager [%]	Last Hybridlager [%]	Ölfluss [%]
Stabilisierung	60	100	58	100	100
Abschaltung der Ölzufuhr	-	100	58	100	0

**Tabelle 9:** Betriebsbedingungen „Abschaltung der Ölzufuhr“ – geringe Belastung

Phase	Dauer [min]	Drehzahl [%]	Last Stahllager [%]	Last Hybridlager [%]	Ölfluss [%]
Stabilisierung	60	140	300	300	109
Abschaltung der Ölzufuhr	-	140	300	300	0

**Tabelle 10:** Betriebsbedingungen „Abschaltung der Ölzufuhr“ – moderate Belastung

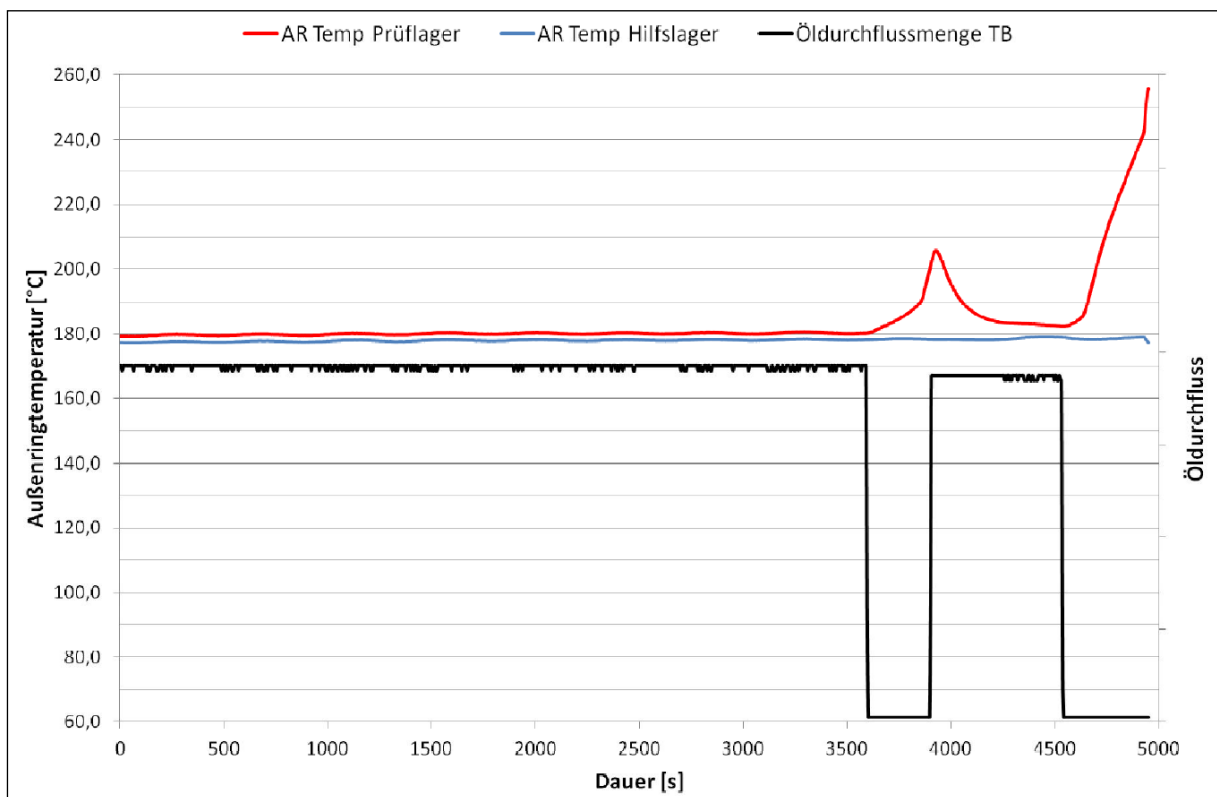
Die Abschaltkriterien wurden im Rahmen des Vertretbaren so weit gefasst wie möglich, die Abschaltung der Prüfstands erfolgt, wenn mindestens eines der folgenden Kriterien erreicht wird: Die Außenringtemperatur übersteigt 250 °C (300 °C für moderate Belastung), ein kritisches Vibrationslimit für den Prüfstand wird erreicht, die Sicherheitskupplung des Prüfstandes löst aus oder bei Erreichen von 5 Minuten ohne Ölzufuhr. Für das Hybridlager



wurde der Versuch nach Erreichen der 5 Minuten sogar noch einmal fortgesetzt, um einen Ausfall zu provozieren.

**Ergebnisse**

Die Versuche wurden zunächst mit dem Hybridlager mit doppelt gehärteten Ringen durchgeführt. Ein Versuch mit den Bedingungen nach Tabelle 9 führte zunächst nur zu einem sehr geringen Temperaturanstieg von der Beharrungstemperatur von ca. 148 °C während der Stabilisierungsphase auf 149 bis 150 °C zu Beginn der Abschaltphase, die Temperatur sank in der Folge sogar wieder auf die Ausgangstemperatur. Da keine auffälligen Vibrationen oder auch Partikelemissionen vorlagen, wurde entschieden, die Belastung auf die in Tabelle 10 gegebenen Werte zu erhöhen. Der resultierende Temperaturverlauf ist in Abbildung 21 dargestellt. Vom Beharrungstemperaturniveau von 180 °C steigt die Temperatur während der Ölabschaltung auf bis zu 206 °C an. Da innerhalb der 5 Minuten kein Ausfall erfolgte, wird der Versuch fortgesetzt. Bei der zweiten Abschaltung der Ölzufuhr ist von Beginn an ein deutlich steilerer Temperaturanstieg zu beobachten. Dennoch kann der Prüfstand für weitere 6,5 Minuten betrieben werden, bevor es aufgrund von Vibrationen zur Abschaltung kommt. Die Außenringtemperatur hat zu diesem Zeitpunkt einen Wert von 256 °C erreicht.



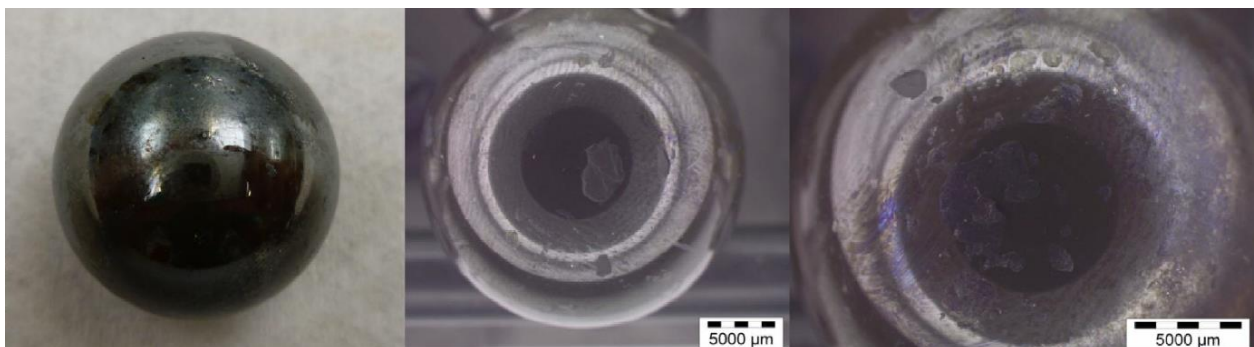
**Abbildung 21:** Temperaturverlauf von Prüf- und Hilfslager für den Versuch mit moderater Belastung (AP1.5)

Die anschließende Befundung erbringt die nachfolgend dargestellten Erkenntnisse: Die Laufbahnen sind großflächig mit Aufschmelzungen überzogen, die von den Kugeln überwalzt wurden. Die Färbung lässt auf Kontakttemperaturen von mindestens 350 °C schließen. Beide Innenringhälften sind miteinander verschweißt und lassen sich nur noch durch Einsatz eines Trennschleifers vom Lagersitz demontieren. Auch der Käfig weist Spuren der Überhitzung auf. Es sind jedoch keine Risse oder Brüche auffindbar.



**Abbildung 22:** Außenringlaufbahn des Hybridlagers mit doppelt gehärteten Ringen nach dem Versuch mit Abschaltung der Ölzufuhr (AP1.5); Es sind großflächige Aufschmelzungen zu erkennen.

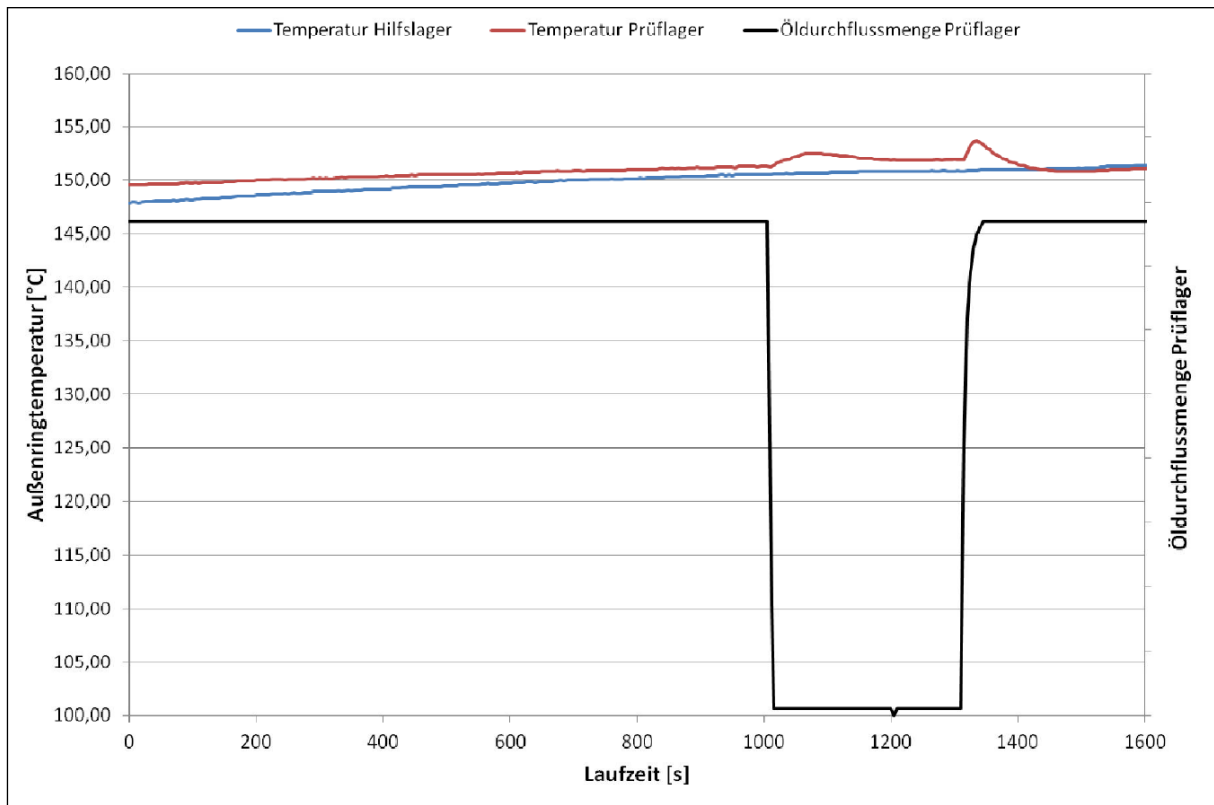
Die Kugeln weisen jedoch nur geringe Beschädigungen auf. An 3 Kugeln sind kleine Abplatzungen aufgetreten, die eine Tiefe von 0,2 mm nicht überschreiten. Alle Kugeln weisen Aufschweißungen von geschmolzenem Laufbahnmaterial auf. Es lässt sich festhalten, dass ein Lager in diesem Zustand durchaus noch hätte weiterbetrieben werden können, die erreichbare Restlaufzeit lässt sich jedoch nicht mit Sicherheit vorhersagen.



**Abbildung 23:** Zustand der Keramikugeln nach dem Versuch „Abgeschnittene Ölzufuhr“ (AP1.5); Es sind flache Abplatzungen und Aufschweißungen von Ringmaterial aufgetreten.

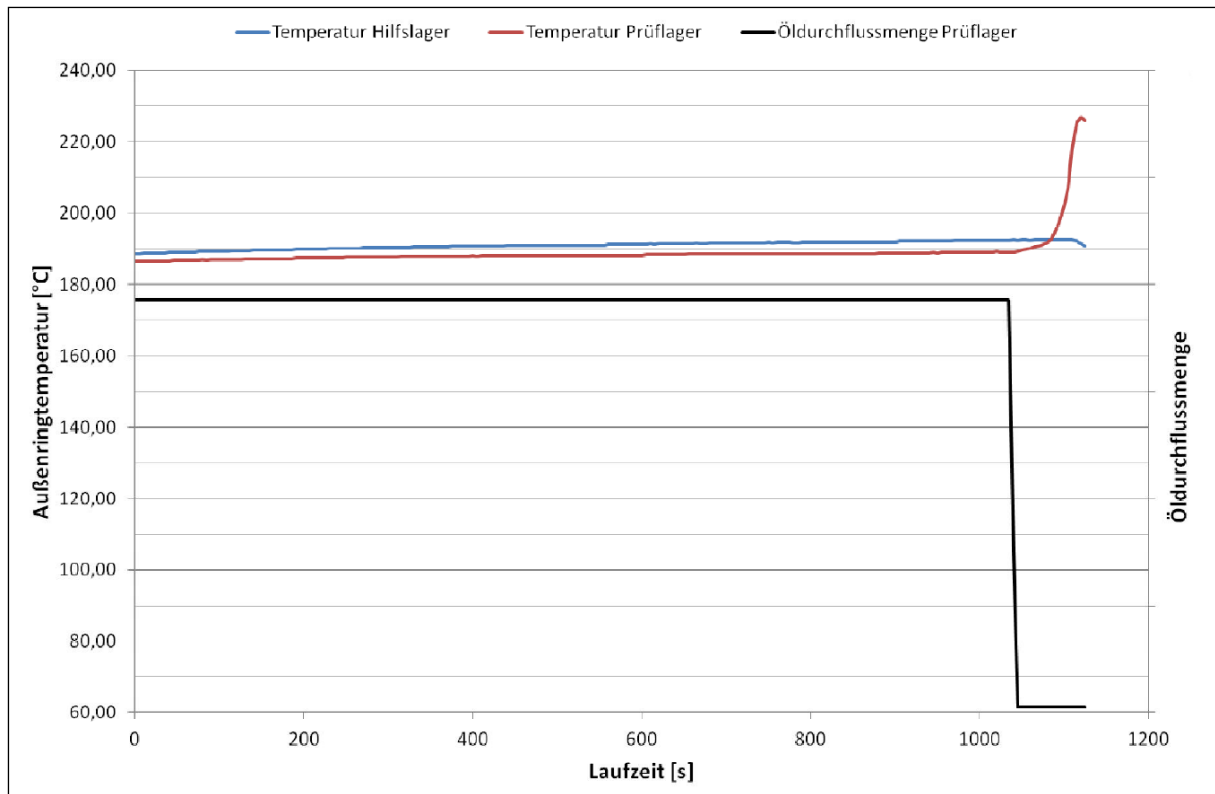
Auch das konventionelle Lager wurde zunächst den Bedingungen nach Tabelle 9 unterworfen. Es erreichte während der Stabilisierungsphase eine Außenringtemperatur von etwa 151 °C. Auch bei diesem Versuch ist zunächst nur ein geringer Temperaturanstieg zu ver-

zeichnen, weshalb auch dieses Lager nach den Bedingungen mit höherer Last und Drehzahl belastet wurde.



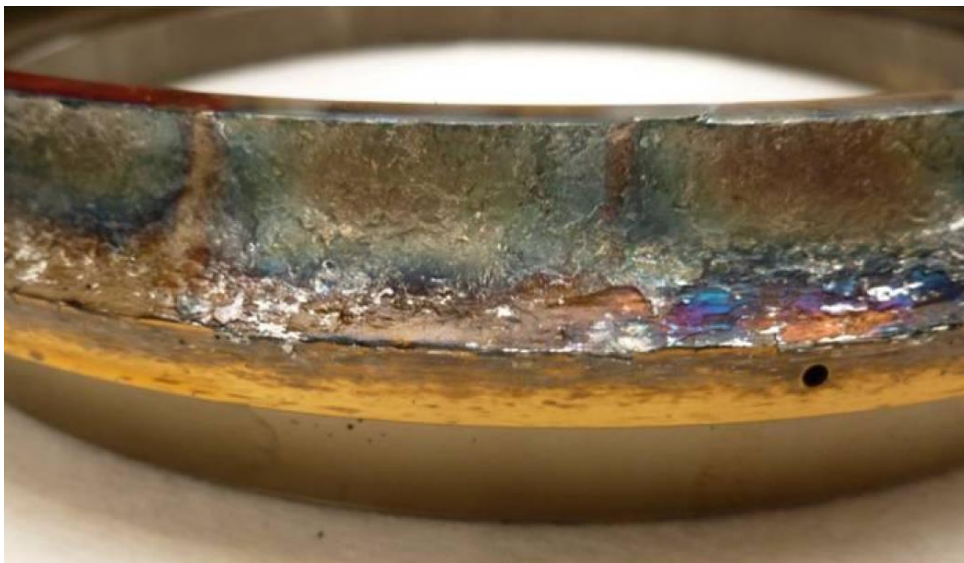
**Abbildung 24:** Temperaturverlauf für Prüf- und Hilfslager aus Stahl bei geringer Belastung (AP1.5)

Das Ergebnis des Versuchs mit Bedingungen nach Tabelle 10 ist in Abbildung 25 dargestellt. Die Außenringtemperatur steigt in einem progressiven Verlauf von ca. 190 °C auf 227 °C an. An diesem Punkt, nach ca. 80 s ohne Ölzufuhr, löst die Sicherheitskupplung aus und die Wellengeschwindigkeit sinkt innerhalb kürzester Zeit auf 0.



**Abbildung 25:** Temperaturverlauf für Prüf- und Hilfslager aus Stahl bei moderater Belastung (AP1.5)

Die visuelle Untersuchung des Lagers zeigt auch hier Aufschmelzungen über die gesamte Laufbahnfläche an Innen- und Außenring. Die Einfärbung lässt Kontakttemperaturen von bis zu 350 °C vermuten. Die Kugeln weisen graue bis schwarze Verfärbungen auf. Ihre Oberfläche ist wie die der Laufbahnen aufgeschmolzen und es lassen sich Abplatzungen feststellen.



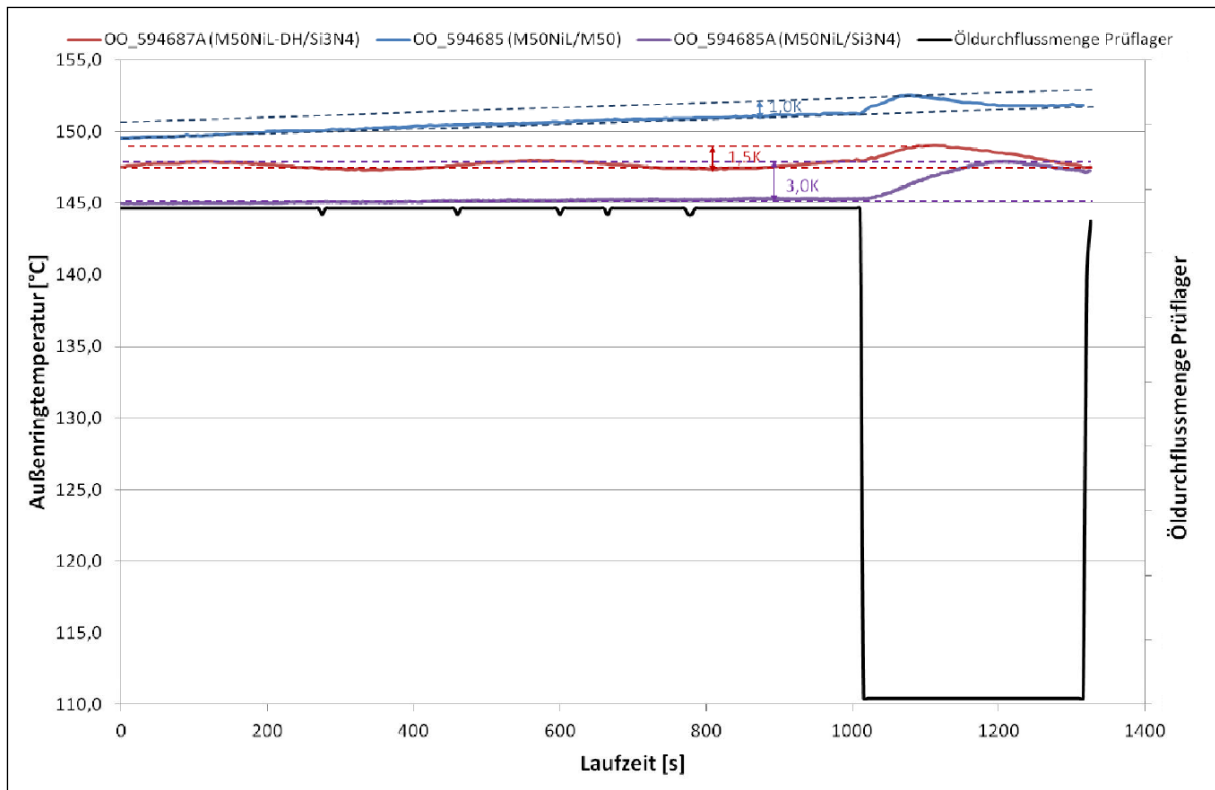
**Abbildung 26:** Belastete Innenringlaufbahn des Stahllagers nach dem Versuch mit Abschaltung der Ölzufuhr (AP1.5); Es sind großflächige Aufschmelzungen zu erkennen.



**Abbildung 27:** Zustand der Stahlkugeln nach dem Versuch „Abgeschnittene Ölzufuhr“ (AP1.5)

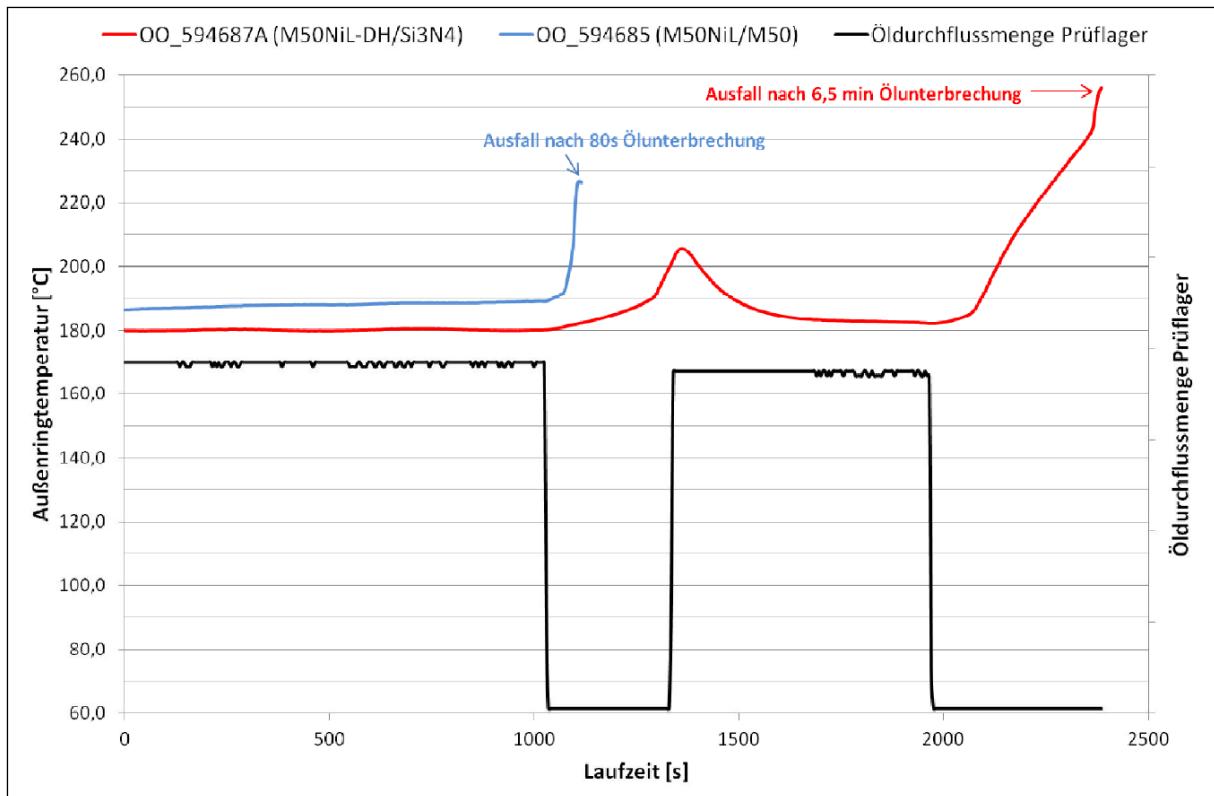
Der Versuch wurde auch für das Hybridlager mit konventionell gehärteten Laufbahnen durchgeführt. Da kein Erkenntnisgewinn von einer Zerstörung eines weiteren Lagers zu erwarten war, wurde entschieden, nur den Zyklus mit geringer Belastung (Tabelle 10) zu durchfahren und das Lager anschließend zu inspizieren. Erwartungsgemäß trat kein Ausfall auf, die Temperatur stieg bei Abschaltung der Schmierstoffzufuhr um ca. 3 K, begann jedoch nach ca. 3 Minuten ohne Ölzufuhr wieder zu sinken. Die Befundung erwies keine Beschädigung des Lagers, lediglich eine Laufspur hatte sich ausgebildet, diese ist jedoch rein kosmetischer Natur.

Ein Vergleich der Lagervarianten unter den gewählten Bedingungen zeigt nur geringe Unterschiede beim Versuch mit geringer Belastung. Die Temperaturanstiege in Abbildung 28 sind sämtlich unkritisch.



**Abbildung 28:** Vergleich der Temperaturverläufe bei Abschaltung der Ölzufuhr für die 3 getesteten Lagervarianten (AP1.5)

Erst bei höheren Lasten verhalten sich Hybrid- und konventionelles Lager deutlich unterschiedlich. Das Hybridlager macht hier seine Überlegenheit beim Betrieb ohne Schmierung deutlich, da es bei gleicher Last und Drehzahl ca. 5x länger betrieben werden kann, bevor es zum Ausfall kommt. Bezeichnend ist der unterschiedliche Gradient des Temperaturanstieges in Abbildung 29. Selbst in der zweiten Abschaltphase steigt die Temperatur im Hybridlager deutlich langsamer als beim konventionellen Lager.



**Abbildung 29:** Vergleich der Temperaturverläufe für Hybridlager (rot) und Stahllager (blau) beim Versuch mit moderater Belastung

**AP1.6 Zyklische Lastumkehr**

Die Axiallast auf Festlager in Triebwerken ist die Differenz zweier Kräfte mit entgegengesetztem Vorzeichen: der rückwärts gerichteten Turbinenlast und der vorwärts gerichteten Last des Verdichters. Dazu kommen Kräfte aus Druckunterschieden innerhalb des Ringraumes, die auf Rotorflächen wirken. Die Vorhersage der tatsächlichen Lagerlast ist aufgrund vieler Einflussfaktoren unter Umständen komplex. Eine Umkehr der Lastrichtung ist deshalb nicht immer auszuschließen. Unter Umständen kann sie auch wünschenswert sein, um die Maximallast zu begrenzen. Das Verhalten eines Lagers unter diesen Umständen wurde deshalb untersucht, um etwaige nachteilige Effekte der Einführung von Hybridlagern zu identifizieren, die die Robustheit des Lagers gegenüber diesen Bedingungen beeinträchtigen könnten.

**Prüfbedingungen**

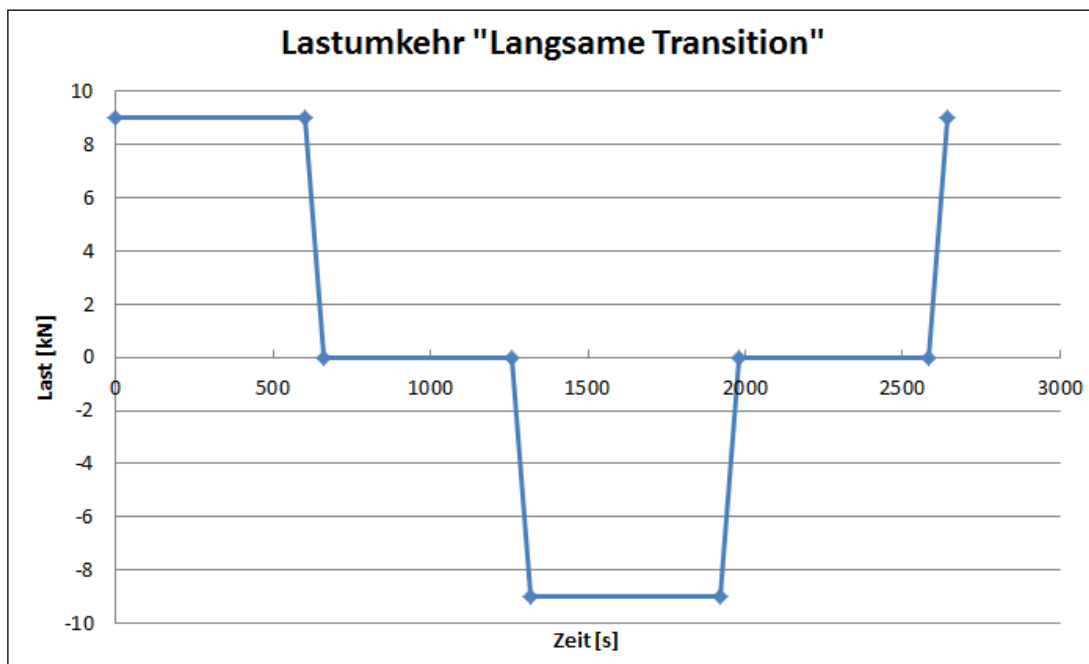
Das Lager wurde während des Versuchs mit einer konstanten Drehzahl von 10000 Umdrehungen pro Minute betrieben. Der Versuch selbst gliederte sich in 2 Teilbereiche und wurde wie in Tabelle 5 ersichtlich mit 2 Materialkombinationen durchgeführt, dem konventionellen Lager mit M50-Stahlkugeln und dem Hybridlager mit Kugeln aus Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. Bei



beiden Lagervarianten wurden die Laufbahnen aus M50NiL gefertigt. Die Teilbereiche „Langsame Transition“ und „Schnelle Transition“ sind in den folgenden Abschnitten dargestellt. Vor, zwischen und nach den Testabschnitten wurde eine Überprüfungsphase durchgeführt, bei der die Parameter Last und Drehzahl für eine halbe Stunde konstant auf 9 kN gehalten wurden. Diese dienten dem Vergleich des Lagerverhaltens, um einen etwaigen Schadeintritt einem bestimmten Teilabschnitt zuordnen zu können.

### Langsame Transition

Für die langsame Transition durch den Nullpunkt wurde der Zyklus wie in Abbildung 30 visualisiert definiert. Lasten von +9, 0 und -9 kN wurden für 10 Minuten gehalten. Die Transition zwischen den einzelnen Laststufen erfolgte innerhalb von 60 s, es ergibt sich also ein geringer Laständerungsgradient. Dieser Zyklus wurde 10-mal durchfahren.

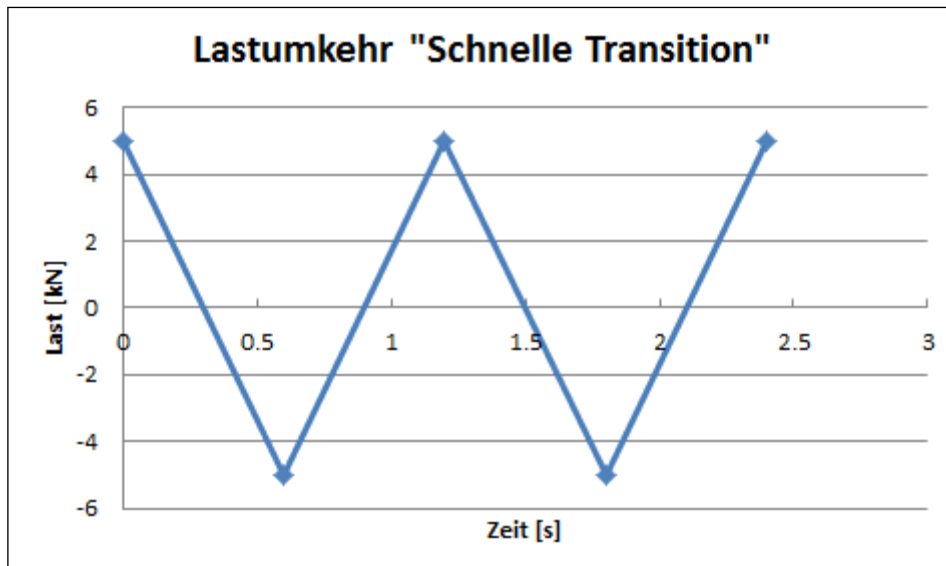


**Abbildung 30:** Prüfzyklus für das AP1.6 „Zyklische Lastumkehr“ – „Langsame Transition“

### Schnelle Transition

Im Anschluss an den Zyklus „Langsame Transition“ wurde ein Zyklus mit möglichst schneller Umkehr der Last durchgeführt. Dieser Zyklus ist in Abbildung 31 dargestellt. Die Last wird innerhalb von 0.6 s von +5 auf -5 kN variiert und anschließend wieder auf +5 kN. Auch dieser Zyklus wurde 10-mal durchfahren.

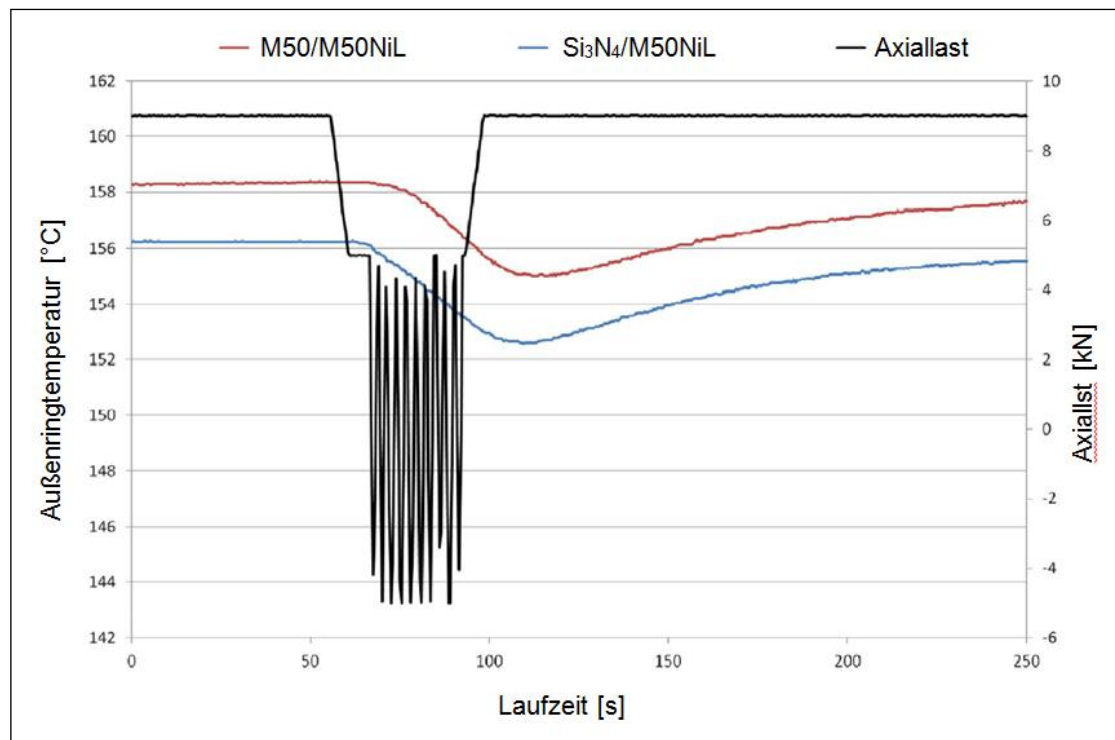




**Abbildung 31:** Prüfzyklus für das AP1.6 „Zyklische Lastumkehr“ – „Schnelle Transition“

## Ergebnisse

Beide Lager zeigten während der Versuche ein vergleichbares Verhalten. Aufgrund der relativ geringen Axialbelastung ist die Differenz der Außenringtemperatur mit ca. 2 bis 3 K moderat. Es lässt sich kein Temperaturanstieg beobachten, der den Eintritt eines Lagerschadens anzeigen würde. Dies gilt für die Versuche mit „Langsamer Transition“ als auch für die Versuche mit „Schneller Transition“, deren Temperaturverlauf in Abbildung 32 dargestellt ist. Auch die Überprüfungsphasen und Vibrationskurven zeigen keine Auffälligkeiten.



**Abbildung 32:** Temperaturverlauf für Stahl- und Hybridlager (blau bzw. rot) während der Lastumkehrversuche „Schnelle Transition“

Im Anschluss an die Versuchsdurchführung wurden die Lager untersucht. Wie bereits durch die Messungen während der Versuche indiziert wiesen weder Laufbahnen, noch Wälzkörper oder Käfige Schäden auf, die gewählten Betriebsbedingungen stellen somit weder für hybride noch für konventionelle Kugellager ein Risiko dar.



**Abbildung 33:** Lager nach dem Lastumkehrversuch: Links: Stahlkugel, rechts: Innenringlaufbahn

### AP1.7 Nulllast-Versuche

Insbesondere bei geringem Schub, beispielsweise am Boden oder im Sinkflug, treten in Triebwerken Bedingungen auf, bei denen auf die Wellenlagerungen geringe bis sehr geringe

---

Lasten wirken. Diese Zustände sollen in den Nulllast-Versuchen des Arbeitspaketes 1.7 nachgestellt werden.

### Prüfbedingungen

Diese Versuche stellen eine Abwandlung der Versuche des AP1.6 dar. Anstelle der Lastumkehr wird im Arbeitspaket 1.7 dauerhaft ohne Axiallast gefahren. Der Versuch besteht aus 2 Phasen: Einer Stabilisierungsphase von 1,5 h bei 10.000 U/min und 9 kN Axiallast folgt der eigentliche Versuch, bei dem bei ebenfalls konstant 10.000 U/min ohne jegliche Axiallast getestet wird.

Getestet werden die gleichen Lagervarianten wie auch im Arbeitspaket 1.6, siehe Tabelle 5.

### Ergebnisse

Der während der Versuche aufgezeichnete Temperaturverlauf in Abbildung 34 zeigt den bekannten Temperaturunterschied zwischen beiden Lagern, er beträgt zum Ende der Stabilisierungsphase 4 K. Nach einer bis zwei Stunden ohne Axiallast stellt sich für beide Lager eine Beharrungstemperatur von 127,5 °C ein. Auch der Verlauf der Vibrationen ist unauffällig, es gibt keine Anzeichen für ein Lagerversagen. Auch die Befundung im Anschluss an den Versuch zeigte keine Lagerschäden auf. Ein Vorteil für eine der beiden Lagervarianten konnte hier nicht ermittelt werden.

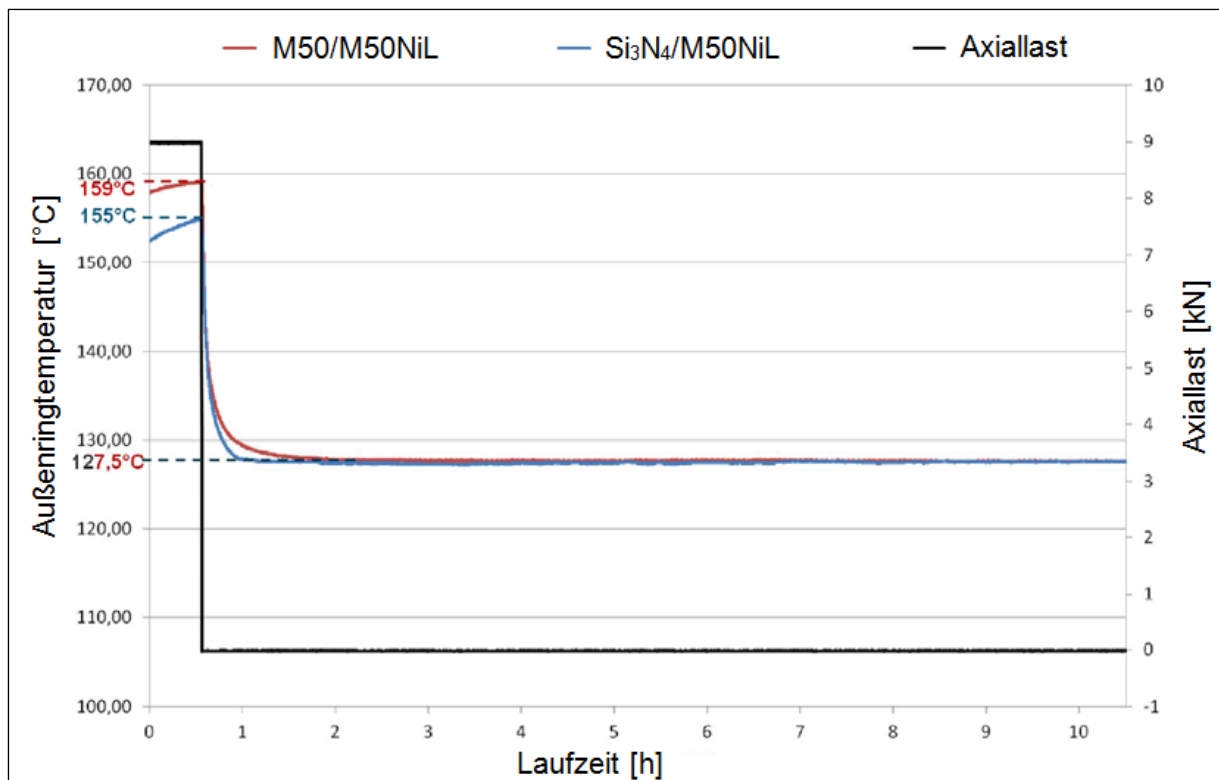


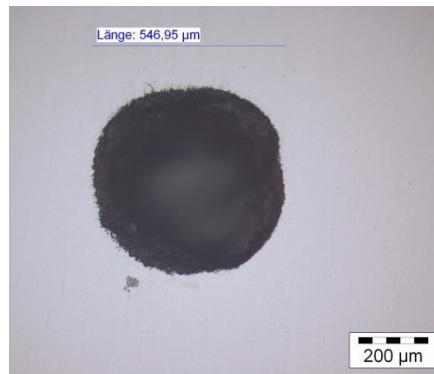
Abbildung 34: Temperaturverlauf für das Arbeitspaket 1.7

### Zusatzversuch mit vorgeschädigter Kugel

Versuche mit vorgeschädigter Kugel wurden bereits im Projekt VEROLAT durchgeführt, dort mit einer Schadgröße von jeweils 2,2 mm Durchmesser. Es wurde jedoch nach erfolgter Auswertung der Versuchsergebnisse deutlich, dass auch deutlich kleinere Schadgrößen auftreten können. Um den Effekt der Schadgröße auf den Schadfortschritt untersuchen zu können, wurde ein Versuch mit Hybridlager des Arbeitspaketes 1.2 „Vorgeschädigte Lageringeringe“ umgewidmet. Weiterhin sollte untersucht werden, ob derartige Schadgrößen auch mit den Sensoren des Arbeitspaketes 3 detektiert werden können.

### Prüfbedingungen

Es wurde entschieden, eine Schadgröße unterhalb der Breite der Kontaktellipse zu verwenden. Diese nimmt bei höheren Lasten eine Breite von ca. 0,7 mm an. Die Größe der Schädigung auf der Keramikkugel wurde deshalb auf 0,55 mm festgelegt.



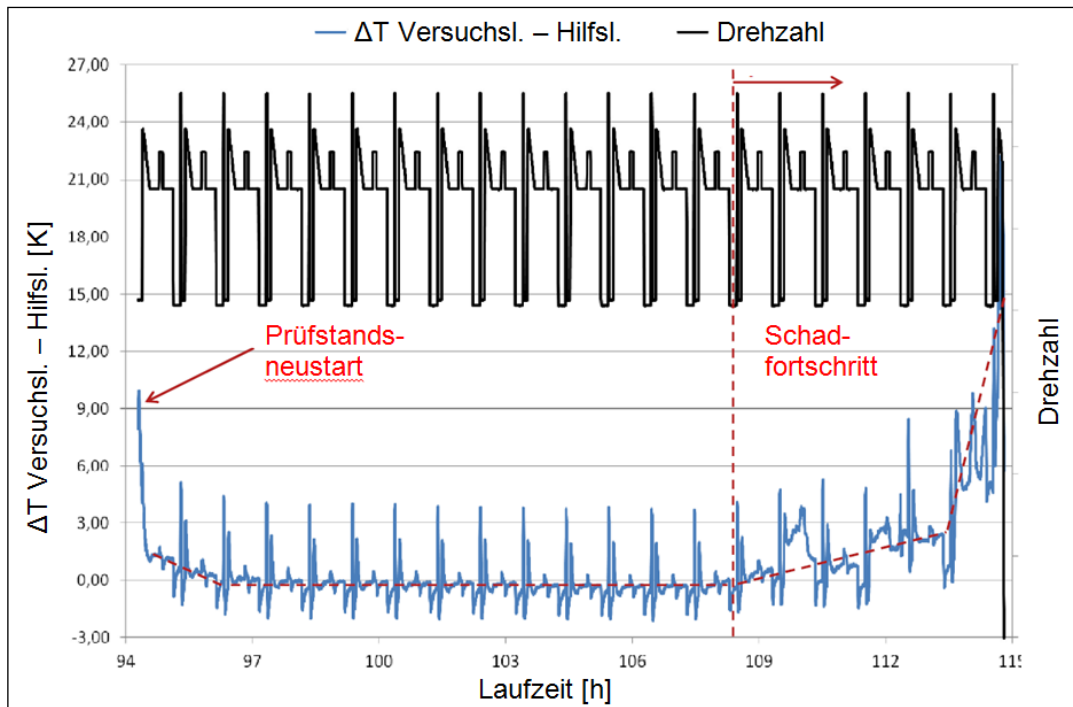
**Abbildung 35:** Zusätzlicher Versuch mit vorgeschädigter Kugel: Der eingebrachte Schaden hat einen Durchmesser von 0,55 mm und wurde mittels Laser erzeugt

Die Betriebsparameter sind unverändert gegenüber dem Vorgängerprojekt VEROLAT, um die Vergleichbarkeit herzustellen und damit auch deckungsgleich mit den Parametern für das Arbeitspaket 1.2, die im Abschnitt „AP1.2 Vorgeschädigte Lagerringe“ in Abbildung 8 dargestellt sind. Das heißt, dass ein verkürzter Flugzyklus nachgestellt wird mit für den Flugbetrieb weitgehend repräsentativen Lasten.

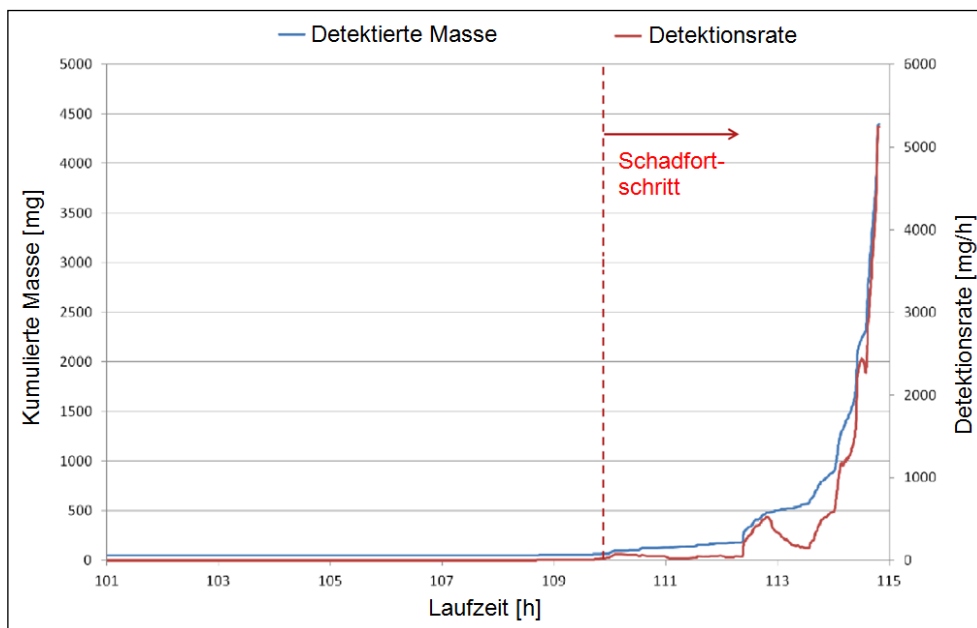
Das verwendete Versuchslager ist ein Hybridlager mit einem Außenring aus M50 und einem Innenring aus M50NiL.

### Ergebnisse

Der Versuch begann zunächst mit einer Phase konstanter Temperaturen von 108 h unterbrochen von einer Abschaltung des Prüfstandes wegen eines Sensorfehlers bei Zyklus/Stunde 94. Der Abschnitt nach dieser Abschaltung ist in Abbildung 36 dargestellt. Nach 108 Stunden beginnt die Lageraußenringtemperatur des Versuchslagers anzusteigen, so dass die in der Abbildung dargestellte Temperaturdifferenz zum baugleichen Hilfslager zunimmt. Diese Indikation für einen Schadfortschritt wird von einem Anstieg des Vibrationslevel begleitet. Zeitgleich detektiert auch der induktive Sensor die Freisetzung von metallischen Partikeln, deren Verlauf in Abbildung 37 dargestellt ist. Die Abschaltung des Prüfstandes erfolgte nach 114 h durch eine Überschreitung des vorgegebenen maximalen Vibrationsniveaus.



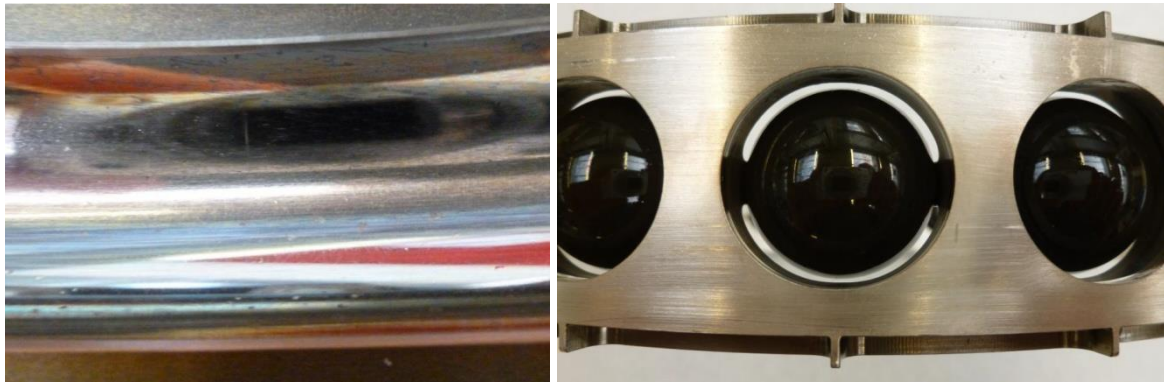
**Abbildung 36:** Verlauf der Temperaturdifferenz zwischen Versuchs- und Hilfslager als Indikator für den Schadfortschritt



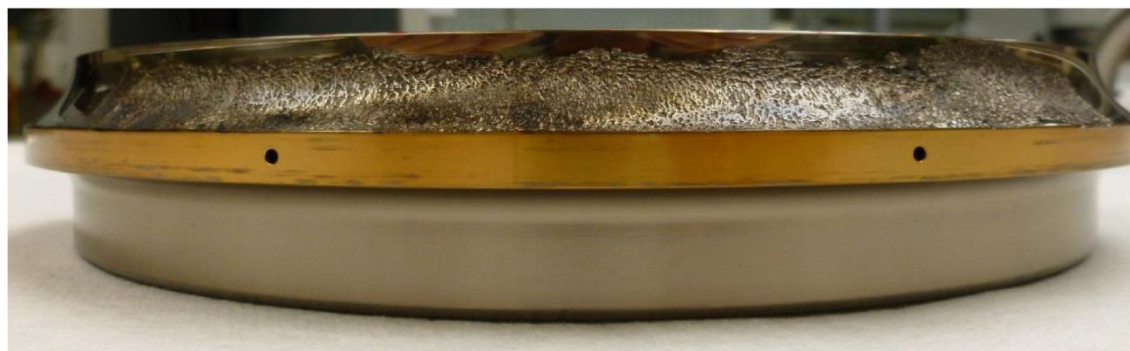
**Abbildung 37:** Freisetzung metallischer Partikel: Ein Schadfortschritt ist ab Stunde 109 erkennbar

Die Untersuchung des Lagers nach der Abschaltung des Prüfstandes ergab die in Abbildung 38 und Abbildung 39 dargestellt. Die Außenringlaufbahn weist einige Eindrücke des überrollten Schadens und von Partikeln auf. Unbelasteter Innenring, Käfig und Wälzkörper sind unbeschädigt mit Ausnahme des vorgeschädigten Wälzkörpers, der jedoch keinen Schad-

fortschritt an dem mittels Laser eingebrachten künstlichen Schaden zeigt. Lediglich der belastete Innenring zeigt Ausbrüche über ca. 25% des Umfangs. Diese sind in Anmutung und Ausmaß vergleichbar mit den Versuchen mit größeren künstlichen Kugelschäden.



**Abbildung 38:** Zustand des Versuchslager nach dem Ausfall; Links: Die Außenringlaufbahn weist Abdrücke und Eindrücke auf; Rechts: Käfig und nicht vorgeschädigte Kugeln weisen keine Schäden auf



**Abbildung 39:** Belasteter Innenring nach dem Versuch: Ausbrüche erstrecken sich über ca. 90°, Tiefe und Ausmaß sind vergleichbar zu den Versuchen in VEROLAT

Die nachfolgende Tabelle 11 setzt das Ergebnis des Versuchs in Relation zu Versuchen aus dem Programm VEROLAT, die vergleichbare Materialkombinationen aufweisen. Es ist erkennbar, dass eine Reduktion der Schadgröße zu einer deutlich erhöhten Laufzeit führte. Die

Indikationen für einen bevorstehenden Lagerausfall wie Temperaturanstieg, Vibrationen und auch Partikelfreisetzung traten jedoch für alle Versuche erst ca. 4 bis 6 Stunden vor Abschaltung des Prüfstands auf.



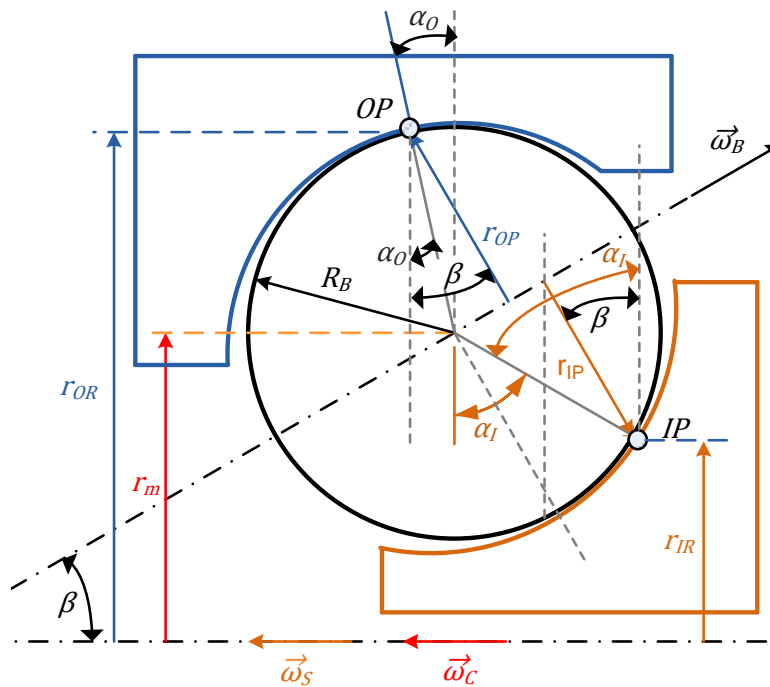
<b>Material- kombination (AR / IR / Kugel)</b>	<b>Laufzeit [Zyk- len bzw. Stunden]</b>	<b>Abschaltgrund</b>	<b>Schadensfortschritt</b>
<i>M50NiL / M50NiL / Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub></i>	8	<i>Zulässige Maximal- temperatur am Außenring erreicht</i>	<i>Kugel: - Innenring: signifikant Außenring: -</i>
<i>M50NiL / M50NiL / Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub></i>	14	<i>Zulässige Maximal- temperatur am Außenring erreicht</i>	<i>Kugel: - Innenring: - Außenring: signifikant</i>
<i>M50 / M50NiL / Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub></i>	15	<i>Maximal zulässiges Vibrationsniveau erreicht</i>	<i>Kugel: - Innenring: signifikant Außenring: Abdrücke, keine Ausbrüche</i>
<i>M50 / M50NiL / Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub></i>	13	<i>Zulässige Maximal- temperatur am Außenring erreicht</i>	<i>Kugel: - Innenring: signifikant Außenring: Abdrücke, keine Ausbrüche</i>
<b><i>M50 / M50NiL / Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub></i></b>	<b>114</b>	<b><i>Maximal zulässi- ges Vibrationsniveau erreicht</i></b>	<b><i>Kugel: - Innenring: signifikant Außenring: Abdrücke, keine Ausbrüche</i></b>

**Tabelle 11:** Überblick der Ergebnisse der Versuche mit vorgeschädigten Kugeln aus dem Projekt VEROLAT mit dem Ergebnis des Zusatzversuches aus VERLAT-FP mit 0,55 mm-Schaden (fett hervorgehoben)



$$\beta = \operatorname{atan} \left( \frac{\sin \alpha_0}{\frac{R_B}{r_m} + \cos \alpha_0} \right) \quad (5.1)$$

Berechnung der Kugelrotationsfrequenz  $f_B$



**Abbildung 41:** Konstruktion der Gleichung (5.2)

Kugelrotationsfrequenz  $f_B$  mit gemessener Käfiggeschwindigkeit  $f_C$ :

$$f_B = f_C \frac{r_m + R_B \cos \alpha_0}{R_B \cos(\beta - \alpha_0)} \quad (5.2)$$

Kugelrotationsfrequenz  $f_B$  mit aus der Wellenfrequenz  $f_S$  berechneter Käfigfrequenz  $f_C$ :

$$f_B = \frac{f_S}{\frac{R_B \cos(\beta - \alpha_O)}{r_m + R_B \cos \alpha_O} + \frac{R_B \cos(\alpha_I - \beta)}{r_m - R_B \cos \alpha_I}} \quad (5.3)$$

Käfigfrequenz  $f_c$  aus der Wellenfrequenz  $f_S$  berechnet:

$$f_c = \frac{f_S}{\left(1 - \frac{(r_m + R_B \cos \alpha_O)(R_B \cos(\alpha_I - \beta))}{(R_B \cos(\beta - \alpha_O))(r_m - R_B \cos \alpha_I)}\right)} \quad (5.4)$$

Schadüberrollfrequenz  $f_I$  bei einem Innenringschaden, mit Kugelanzahl  $k$ :

$$f_I = k(f_S - f_c) \quad (5.5)$$

Schadüberrollfrequenz  $f_o$  bei einem Außenringschaden:

$$f_o = k f_c \quad (5.6)$$

Zur Bestimmung der oberen Grenzfrequenz der Kugelrotation wird der  $\beta$ -Winkel auf null gesetzt. Dies ergibt die höchste mögliche Kugelrotationsfrequenz und dient daher als Obergrenze beim Auffinden der Kugelrotationsfrequenzen im Gesamtspektrum.

$$\beta = 0 \quad (5.7)$$

### Messung Stahlkugel Kugelrotationsfrequenz

#### Vergleich Berechnung und Messung der Kugelrotationsfrequenz $f_B$

Es wurden Messungen zu den Kugelrotationsfrequenzen  $f_B$  mit Stahl und Keramikugeln in Schrägkugellagern durchgeführt. Eingesetzt wurden Schrägkugellager eines Axialverdichters für Flugzeugtriebwerke. Die Versuche wurden bei dem Forschungspartner FAG auf dem Prüfstand AN58 durchgeführt.

Berechnet und gemessen wurden die Kugelrotationsfrequenzen in typischen Betriebspunkten von Flugzyklen. Es wurden im Vergleich einfache Berechnungsmethoden und

---

Simulationstools (siehe Methode 1 bis 4) verwendet und deren Ergebnisse mit den Messergebnissen (siehe Abbildung 42 und Abbildung 43) verglichen.

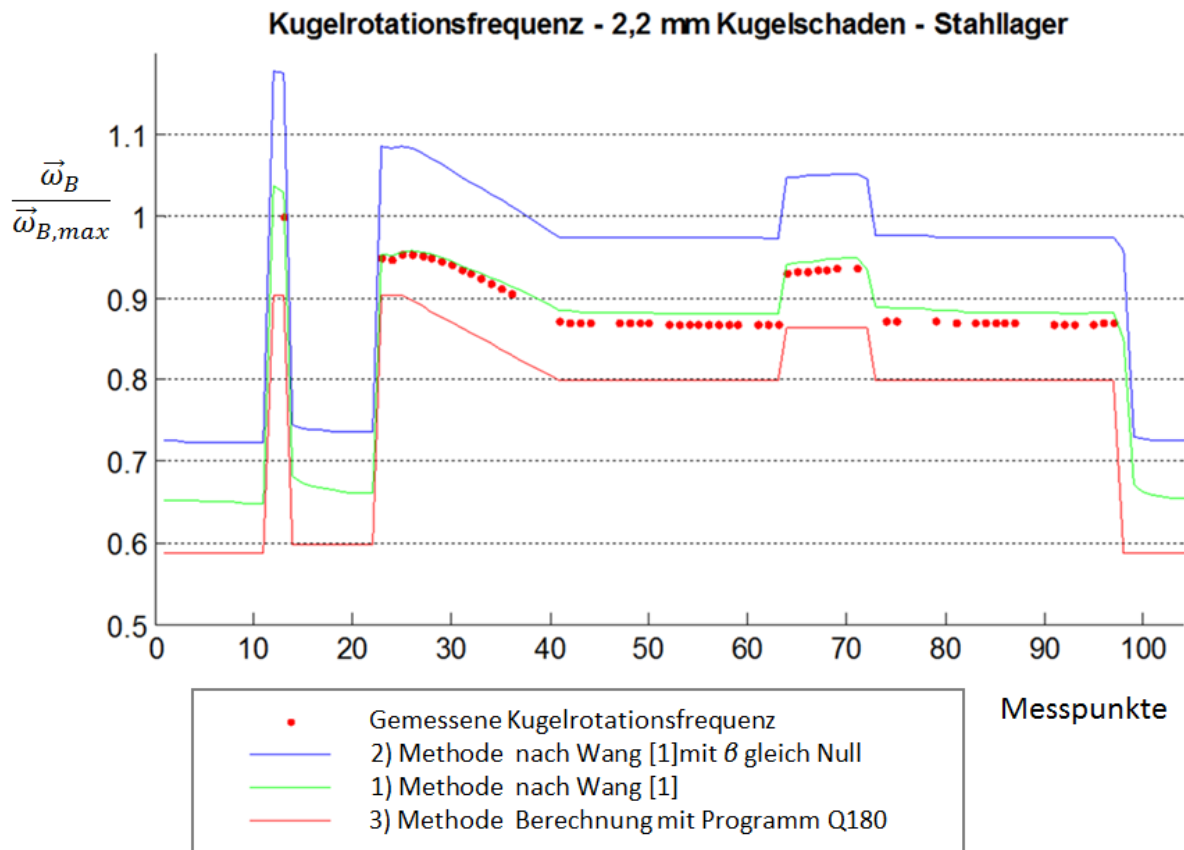
Die Berechnungen sind notwendig, um bei der Verwendung von Hybridlagern aus dem Frequenzspektrum der Messsignale des Körperschall- und Überrollsensors am Lageraußenring die Kugelüberrollfrequenzen herauslesen zu können.

Methode 1): Verwendung der Außenringkontrolltheorie unter der Berücksichtigung der Verhältnisse am Innenring (Wang [1]), Gleichung (5.1) und Gleichung (5.2), unter Verwendung der gemessenen Käfiggeschwindigkeiten.

Methode 2): Wie Methode 1 jedoch wird der  $\beta$ -Winkel auf null gesetzt, Gleichung (5.7) und Gleichung (5.2), unter Verwendung der gemessenen Käfiggeschwindigkeiten.

Methode 3): Simulationsprogramm Q180 (Rolls-Royce-Programm) mit den berechneten Käfiggeschwindigkeiten.

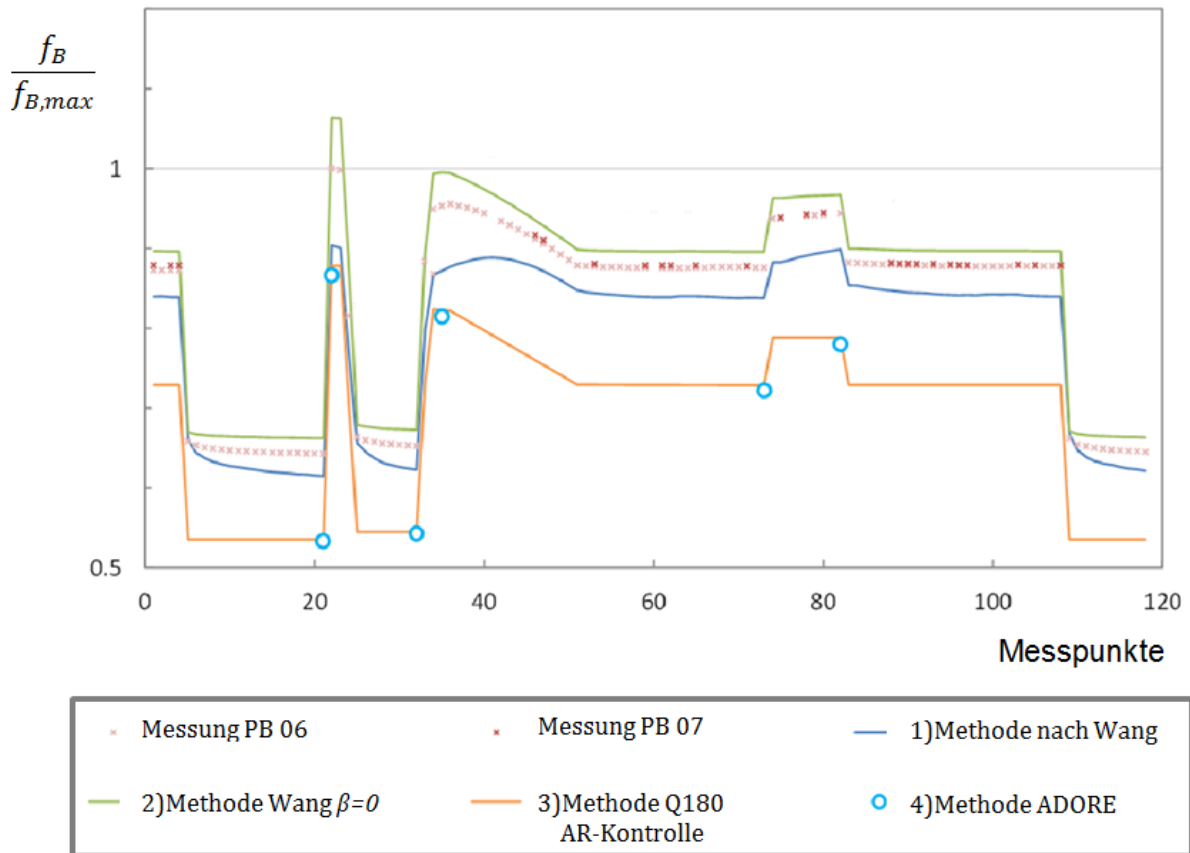
Methode 4): Simulationsprogramm ADORE von Gupta [2] mit den berechneten Käfiggeschwindigkeiten.



**Abbildung 42** Kugelrotationsfrequenzen im Stahl-Schrägkugellager

Für ein traditionelles Stahl Schrägkugellager (siehe Abbildung 42) können die gemessenen Schadüberrollfrequenzen bei einem Kugelschaden gut vorhergesagt werden, allerdings wurden bei der grünen Linie (Methode 1 nach Wang) die gemessenen Käfigfrequenzen verwendet. Bei einem hybriden Schrägkugellager (siehe Abbildung 43) ist diese Vorhersage der Schadüberrollfrequenz der Kugel mit den gegenwärtigen Methoden nicht möglich. Es kann jedoch gezeigt werden, dass es möglich ist, unter Verwendung der gemessenen Käfigfrequenz das Ergebnis der Berechnung der Schadüberrollfrequenz soweit zu verbessern, dass die Schadüberrollfrequenz mit einer oberen und einer unter Frequenz eingeschränkt werden kann.

Messung hybrides Schrägkugellager



**Abbildung 43:** Kugelrotationsfrequenzen im Hybrid-Schrägkugellager

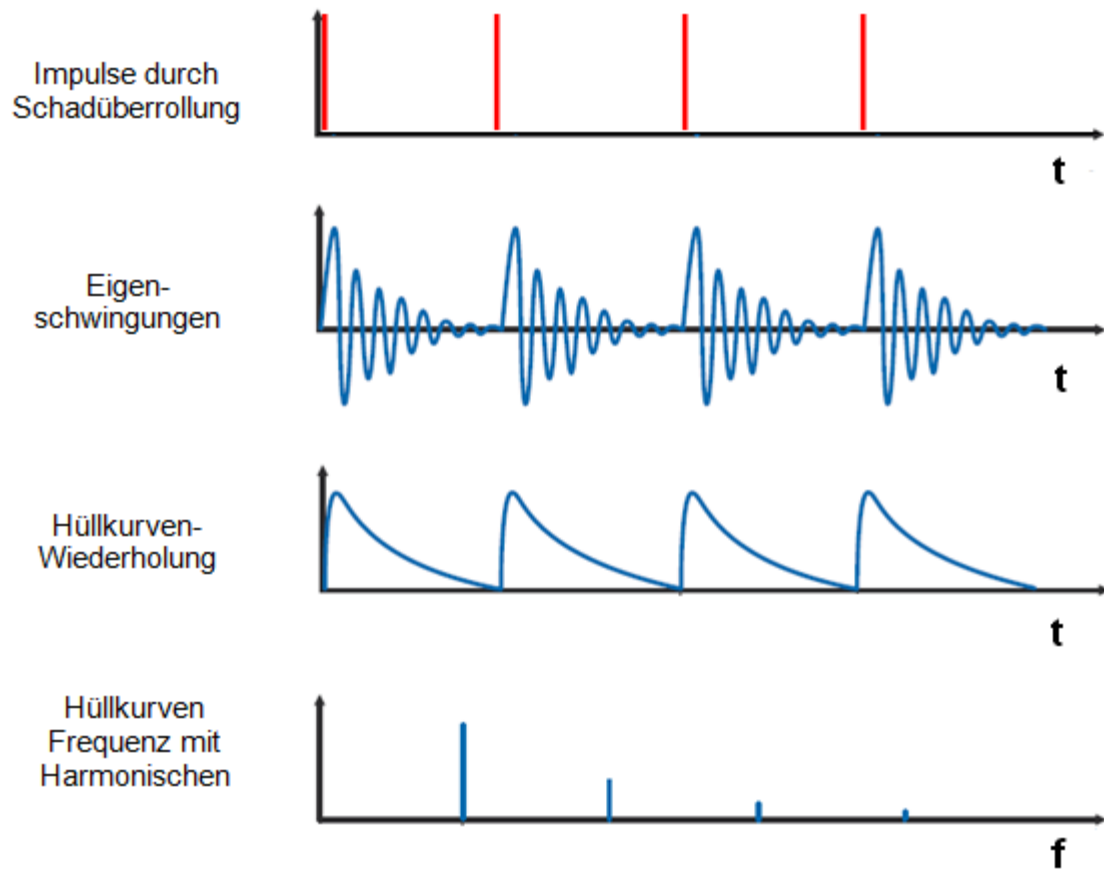
Ein wichtiges Ergebnis ist, dass die Einbeziehung der gemessenen Käfigfrequenz  $f_c$  in die Berechnung der Kugelrotationsfrequenz  $f_B$  die Qualität der Berechnung deutlich verbessert.

**Hüllkurvenbildung zur Erkennung von Schadsignalen**

Die Anforderung ist eine frühe Erkennung von Schäden. Gemessen werden soll die Überrollung eines Schadens durch einen Körperschallaufnehmer am Außenring des Lagers (siehe Abbildung 50). Der bei der Überrollung des Schadens entstehende Körperschall liefert einen kurzen Puls. Dieser müsste, um eine sichere Erkennung zu gewährleisten, mit einer sehr hohen Frequenz abgetastet werden. Eine Möglichkeit, diese Schwierigkeit zu umgehen, besteht darin, nicht die Impulse selbst zu messen, sondern die durch die Impulse angeregten Eigenfrequenzen (siehe Abbildung 44). Dazu werden die Schadfrequenzen mit einem Hochpassfilter aus dem Überrollsignal des Körperschallaufnehmers (Piezoelement) gefiltert.

Die Auslegung des Messsystems inklusive der Abtastfrequenz muss so ausgelegt sein, dass die betreffenden Eigenfrequenzen messtechnisch erfasst werden können. Es ist nicht ohne

weiteres vorherzusagen welche Eigenfrequenzen angeregt werden. Dies hängt von dem spezifischen Lager und der Art des Einbaus ab.



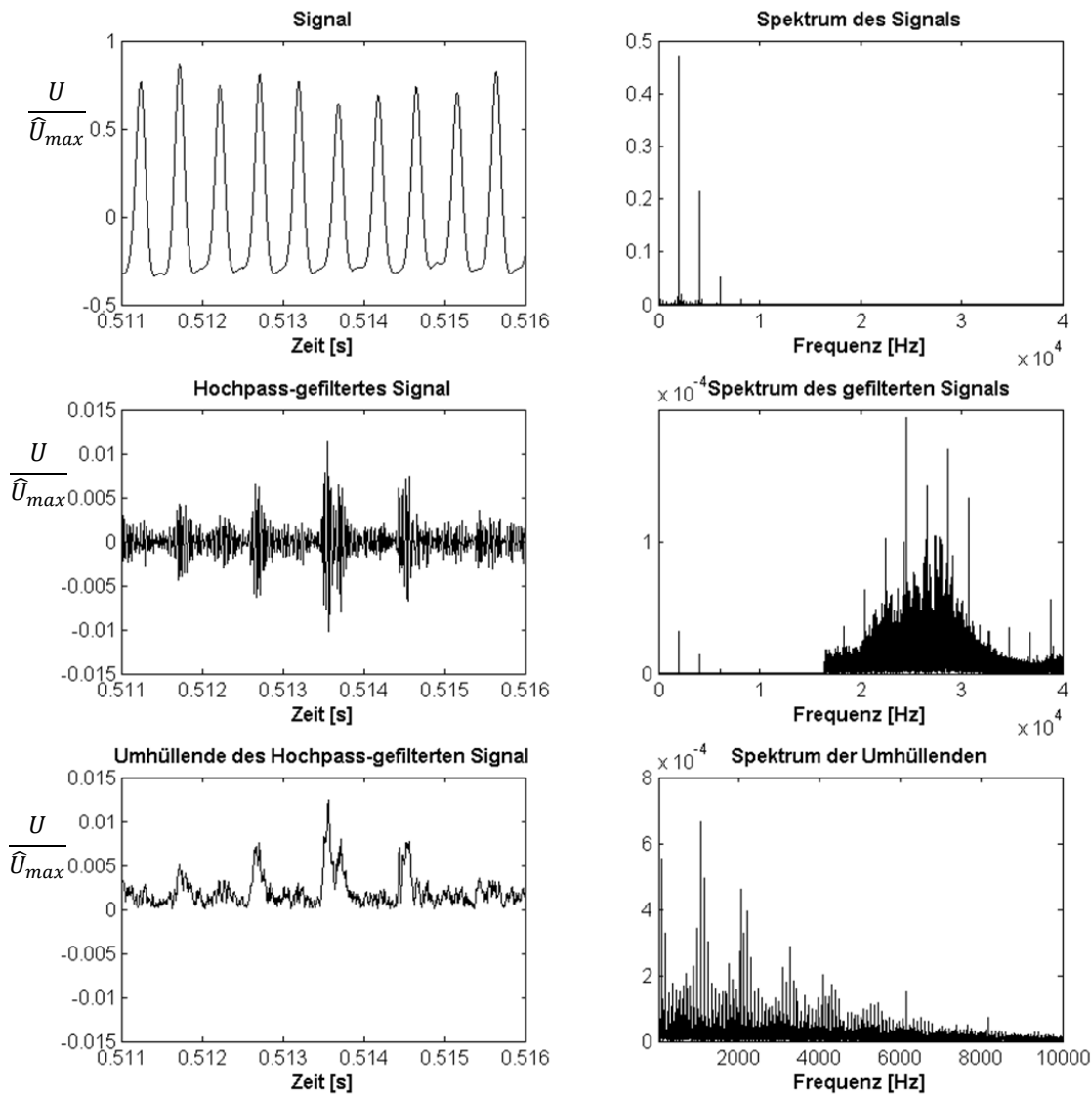
**Abbildung 44:** Impuls Schadüberrollung, Messung Hüllkurvenfrequenz

Die nach der Hochpassfilterung sichtbaren abklingenden Eigenschwingungen (Abbildung 45 Bild Mitte links) zeigen noch nicht die gewünschten Informationen über den Schaden im Schrägkugellager.

In der Abbildung 45 sind die unterschiedlichen Schritte in der Signalverarbeitung in einer Übersicht dargestellt. Das Signal links oben zeigt die Überrollung der Sensorposition durch eine Kugel. In dieser Darstellung ist der hochfrequente Anteil nicht zu erkennen. Nach der Hochpassfilterung erhält man das Bild links in der Mitte. Zu sehen sind hier die abklingenden Eigenschwingungen von zum Schwingen angeregten Elementen. Das Bild ganz unten links zeigt die Umhüllende der abklingenden Eigenschwingungen. Das Spektrum dieser Umhüllenden gibt das gesuchte Signal (ganz unten rechts). Dieses Signal zeigt die Überrollfrequenz über einen Kugelschaden.



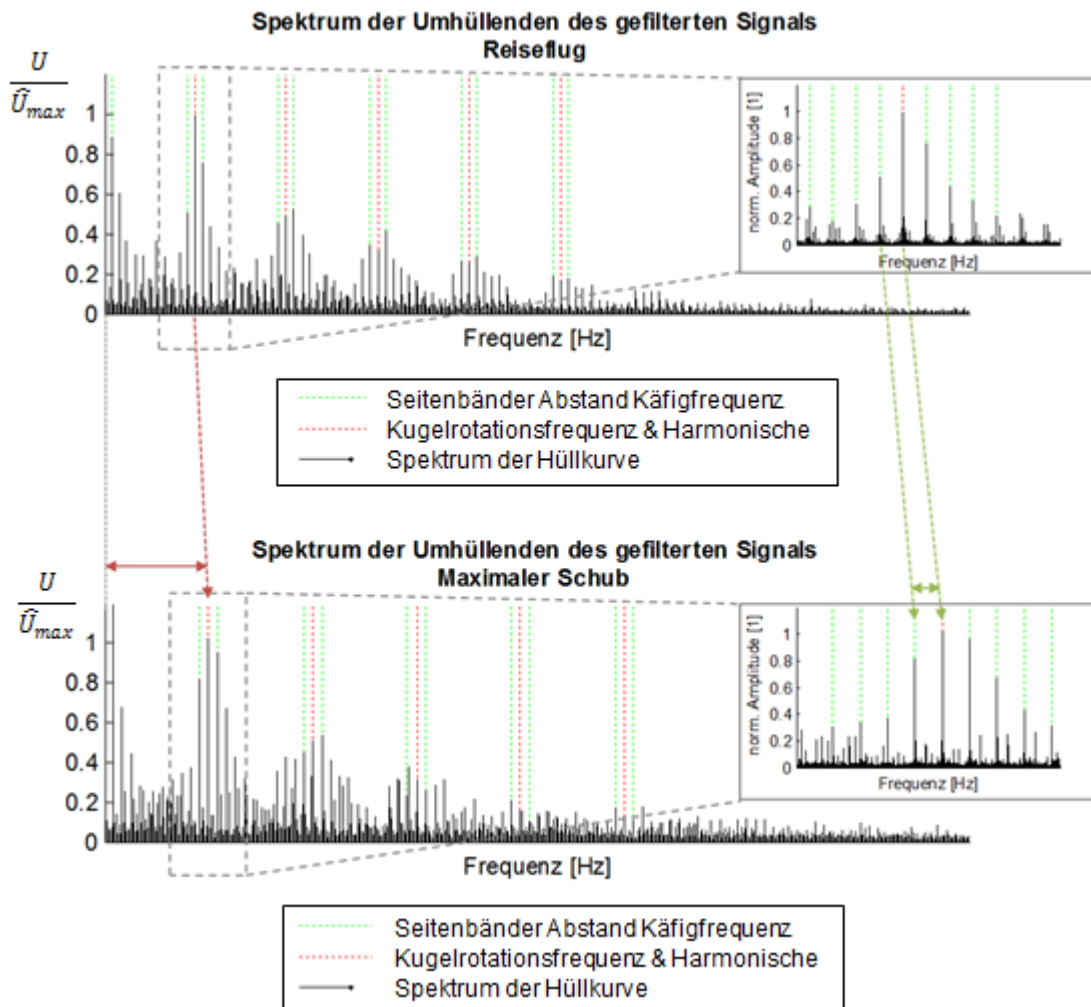
Um die eindeutige Zuordnung zu einem Lagerschaden vornehmen zu können, müssen zuvor die zugehörigen Frequenzen in der Theorie (Kapitel Frequenzfenster für die betreffenden Lagerschäden gebildet. Damit ist die Zuordnung der Lagerschäden gewährleistet. Die Frequenzfenster müssen so treffend wie möglich sein, um Fehlinterpretationen ausschließen zu können.



**Abbildung 45:** Übersicht zur Signalverarbeitung. Alle Amplituden sind auf die Scheitelwerte  $\hat{U}_{max}$  der Sensorausgangsspannung am Außenring normiert.

Erkannter Kugelschaden

Die Erkennung eines Kugelschadens im schnelldrehenden hybriden Schrägkugellager stellte die größte Herausforderung bei der Erkennung von Fehlern dar. In der Abbildung 46 ist zu erkennen, dass ein Kugelschaden eindeutig erkannt werden konnte.



**Abbildung 46:** Erkannte Signatur eines Kugelschadens

In der Abbildung 46 sind die harmonischen Oberwellen der Kugelrotationsfrequenz  $f_B$  plus der Seitenbänder, im Abstand der Käfigfrequenzen  $f_C$ , zu erkennen. In dem oberen Bild der Abbildung 46 sind die Frequenzen bei Reisefluggeschwindigkeit, in dem unteren Bild bei maximalem Schub dargestellt.

$$f_B = f_C \frac{r_m + R_B \cos \alpha_0}{R_B \cos(\beta - \alpha_0)} \tag{5.8}$$

Die Auswertung der Seitenbänder bietet eine zusätzliche Sicherheit bei der Erkennung von Kugelschäden. Die Seitenbänder treten im Abstand der Käfigfrequenz  $f_c$  zu den Schadüberrollfrequenzen  $f_B$  auf. 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  $f_c$ . Es ist zu erkennen, dass auch die Seitenbänder mit den entsprechenden Oberwellen auftreten.

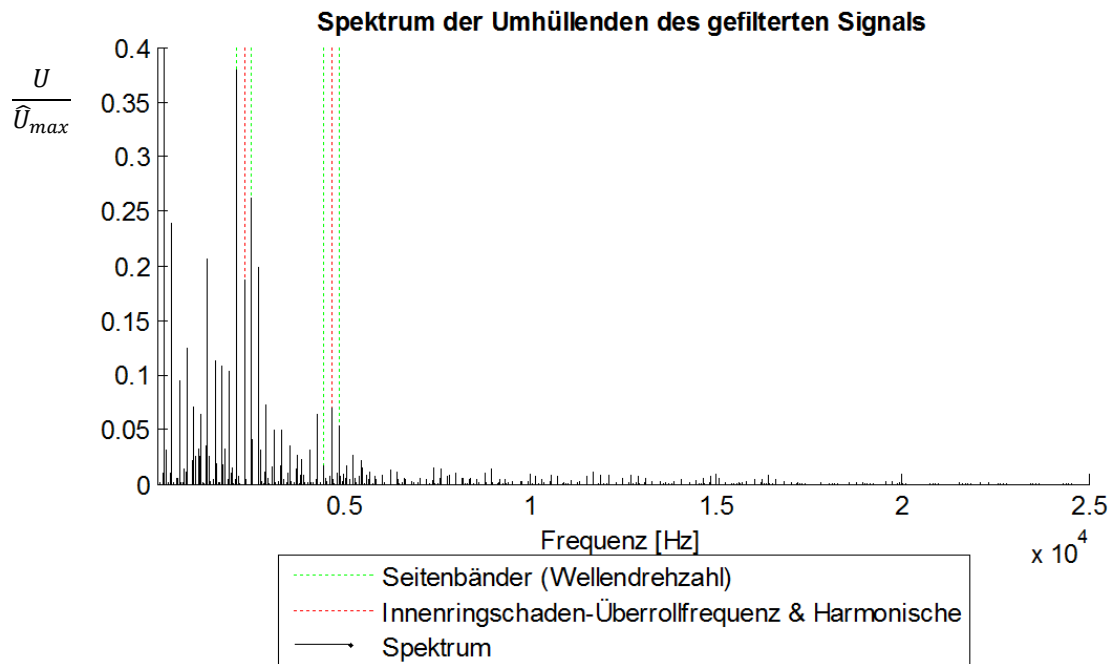
Nur bei Kugelschäden treten Seitenbänder im Abstand der Käfigfrequenzen auf. Diese erlauben eine eindeutige Identifizierung des Kugelschadens als solchen.

### Erkannter Innenringschaden

Aufgrund größerer Überrollfrequenzen und häufig auch Kontaktspannungen tritt ein Innenringschaden häufiger auf als ein Außenringschaden. Die Erkennung eines Innenringschadens erfolgt durch die berechnete Überrollfrequenz  $f_i$ .

$$f_i = k(f_s - f_c) \quad (5.9)$$

Zusätzlich können zur Absicherung der Schaderkennung am Innenring die Seitenbänder rechts und links vom Schadüberrollsignal im Abstand der Wellenfrequenz  $f_s$  verwendet werden.



**Abbildung 47:** Gemessene Signatur eines Innenringschadens

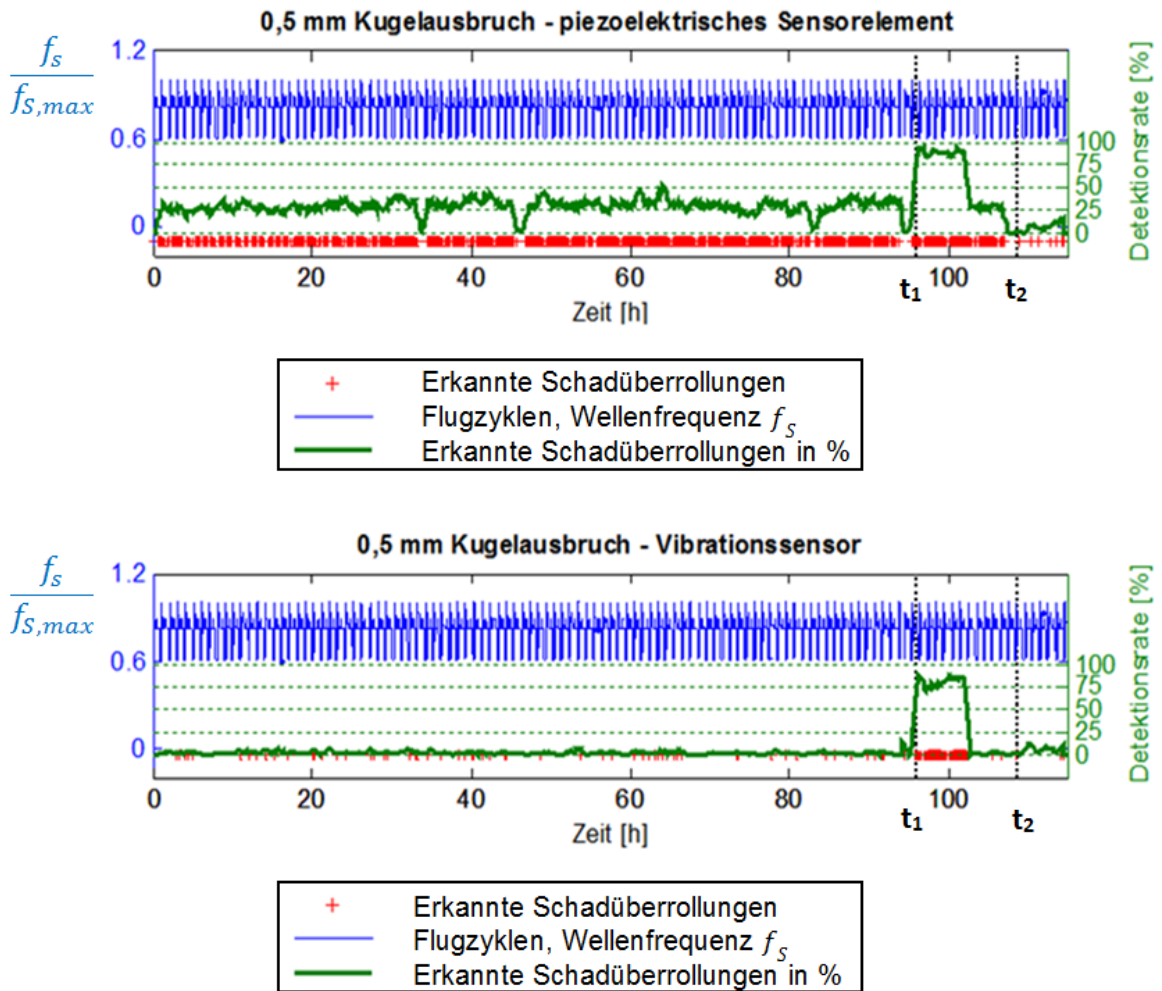
In der der Abbildung 48 sind die Überrollfrequenzen  $f_i$  über den Schaden am Innenring mit den harmonischen Oberwellen zu erkennen. Es ist zu erkennen, dass auch die Seitenbänder mit den entsprechenden Oberwellen auftreten.

Wichtig bei der sicheren Erkennung von Lagerschäden ist, dass sich bei einer Veränderung der Wellendrehzahlen die Schadüberrollfrequenzen und die Seitenbandabstände zu den Schadüberrollfrequenzen ebenfalls verändern.

### Vergleich Körperschallsensor, Vibrationssensor und Metallpartikelsensor

Das Ziel des Versuches war es, einen Körperschallsensor, einen Vibrationssensor und einen Metallpartikelsensor bezüglich der Leistungsfähigkeit bei der Erkennung eines frühen Kugelschadens zu bewerten. Es wurde ein Versuch (Abbildung 49) mit einer geschädigten keramischen Kugel mit einem Schadensdurchmesser von 0,55 mm durchgeführt. Der Versuch lief bis zum Ausfall des Lagers 114 Stunden. Der Körperschallsensor ermöglicht die sofortige Erkennung eines Kugelschadens. Der Vibrationssensor stellt erst zum Zeitpunkt  $t_1$  (ca. 95 Stunden) eine klare Indikation eines Kugelschadens zur Verfügung. Eine sichere Schadaussage durch den Partikelsensor wird erst zum Zeitpunkt  $t_2$  (ca. 110 Stunden) generiert. Damit wird gezeigt, dass das im Forschungsvorhaben erprobte Piezoelement in der

Lage ist, einen frühen Schaden in einem Kugellager zu detektieren und von den überprüften Sensoren die früheste Erkennung von Lagerfehlern bereitstellen kann.



**Abbildung 48:** Vergleich Körperschall- und Vibrationssensor und Metallpartikelsensor

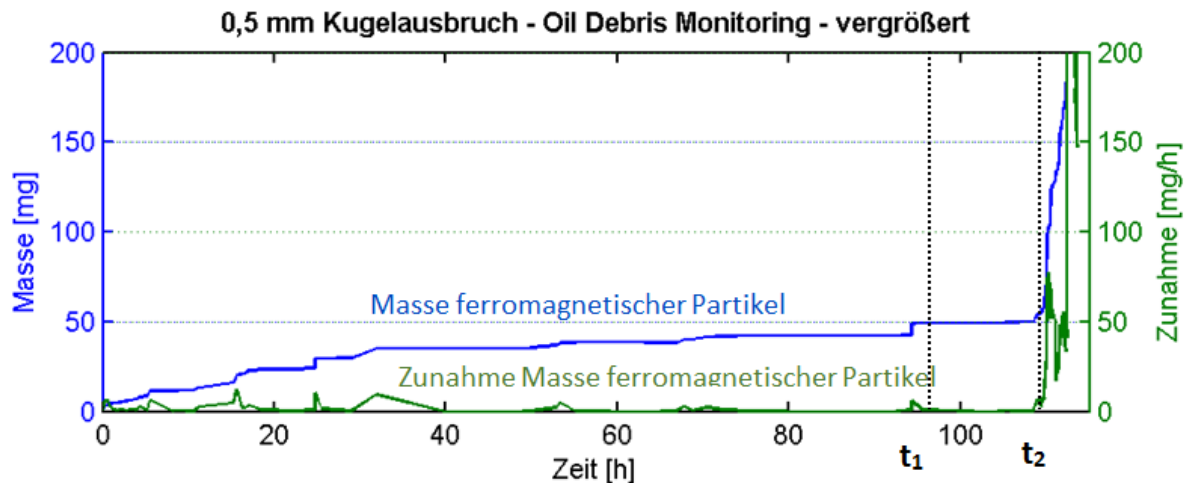


Abbildung 49: Vergleich Körperschall-, Vibrationssensor und Metallpartikelsensor

### Messung des Körperschalles und der Überrollverformung

Ein im Lastpfad eines Lageraußenringes eingesetztes Piezoelement Abbildung 50 liefert neben dem Körperschallsignal bei der Überrollung eines Schadens ein Signal durch die Überrollverformung an der Sensorposition. Damit sind zu einer Schaderkennung über den Körperschall zusätzliche Informationen über die Passiergeschwindigkeit der Kugeln (Käfigfrequenz) verfügbar.

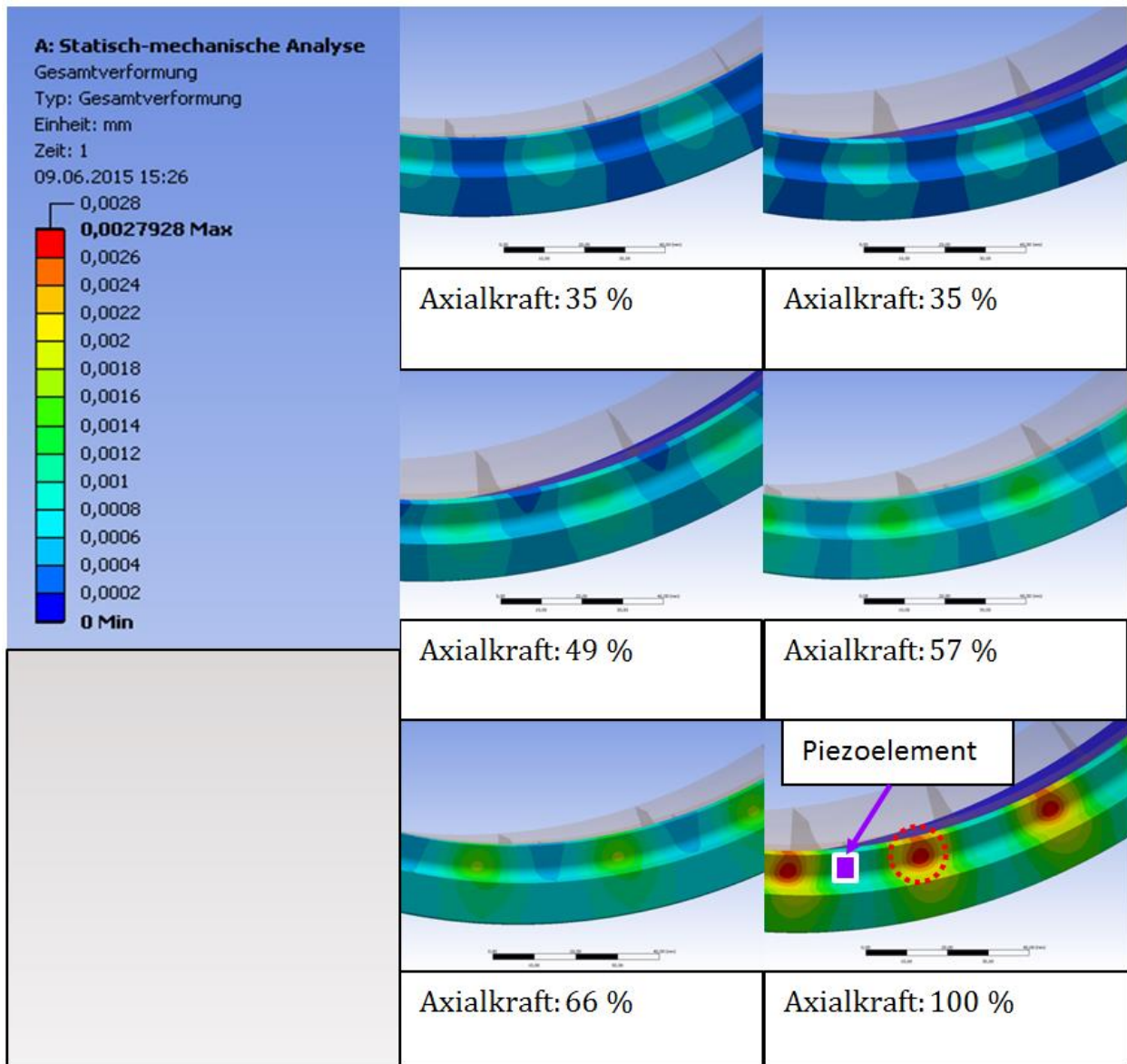
Eine wichtige Eigenschaft eines Überwachungssystems ist die Möglichkeit der Selbstüberwachung der kompletten Messkette. Über die Messung der Kugelpassiergeschwindigkeit ist eine Echtzeitfunktionsprüfung der Überwachungseinheit gegeben (siehe Kapitel Selbstüberwachung der Lagerdiagnoseeinheit). Die Kugelpassierfrequenz entspricht im Mittel der Käfigfrequenz multipliziert mit der Kugelanzahl  $k$ .

Mit der Kugelumlaufgeschwindigkeit kann, bei Kenntnis der Wellendrehzahl- und der Lastbedingung, die Kugelrotationsfrequenz (siehe Kapitel Berechnung von Kugelrotationsfrequenzen) bestimmt werden. Dies ermöglicht es, das Frequenzfenster zur Erkennung von Kugelschäden im laufenden Betrieb eng setzen zu können. Damit wird die Zuverlässigkeit einer Fehlererkennung erhöht. Eine Erkennung der Kugelrotationsfrequenz aus dem Körperschallsignal ist nur bei einem Defekt auf der Kugel möglich.

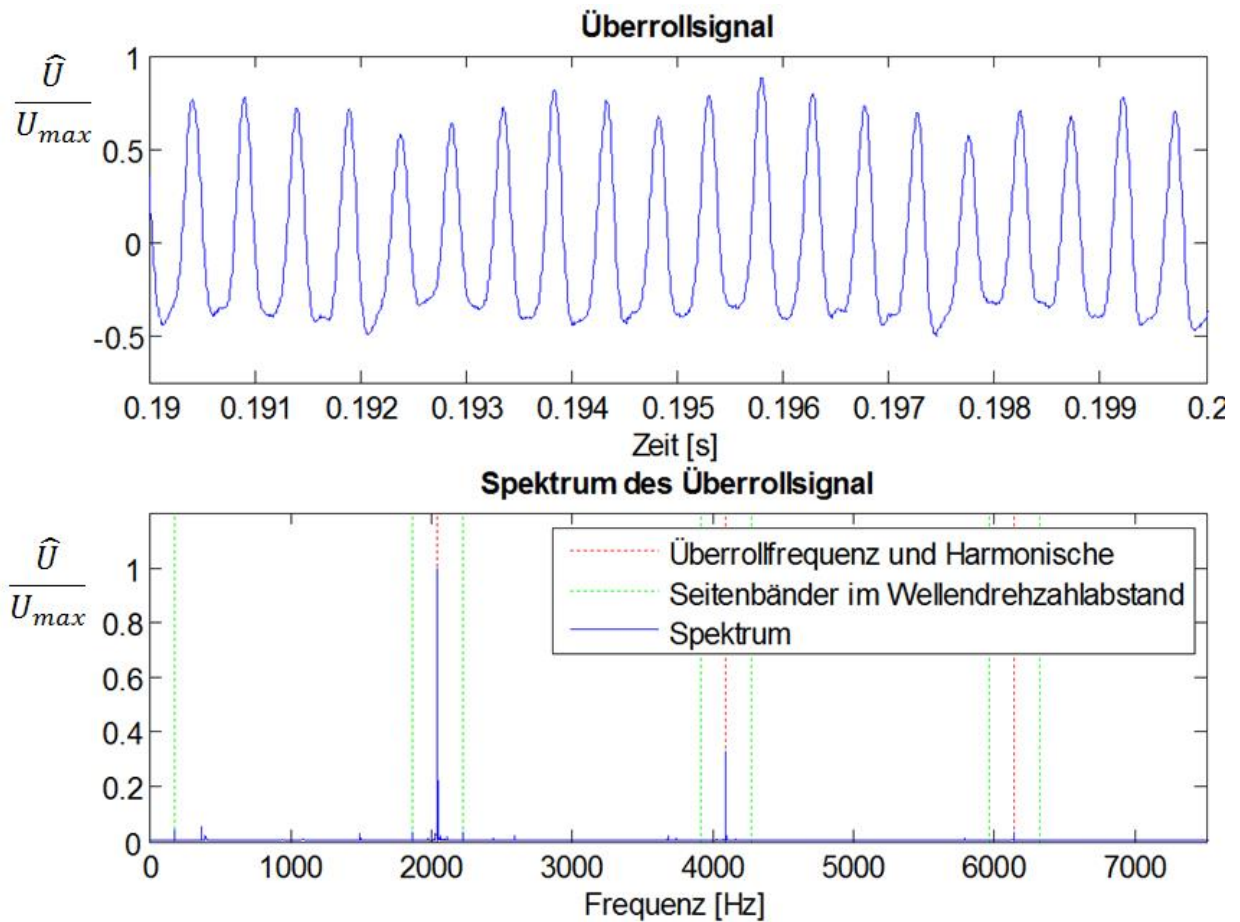
### Verformung des Außenringes bei der Überrollung

Durch die Kontaktpressung der Kugeln auf den Lageraußenring ergibt sich eine Verformung an der Stirnseite der Lager (siehe Abbildung 50, roter Kreis). Ein Sensor misst die entste-

hende Verformung. Durch die Verformung an der Position des Piezoelementes wird ein Signal generiert (siehe Abbildung 51).



**Abbildung 50:** Die FEM Simulation zeigt die Verformungen eines Lageraußenringes durch die Pressungen der Kugeln.



**Abbildung 51:** Oben: Signalverlauf eines Piezoelementes im Zeitbereich beim Überrollen der Sensorposition im Lastpfad; Unten: Harmonische Signalanteile im Frequenzbereich mit den Seitenbändern aus der Wellendrehzahl.

Die in der der Abbildung 51 dargestellten Seitenbänder kommen aus einer Amplitudenmodulation der Welle des Testkopfes. Die Ursache hierfür ist eine nicht exakt ausgewuchtete Welle.

### Lastschätzung

Zur Abschätzung der verbleibenden Lebenszeit eines Lagers nach dem Eintritt eines Schadens wird die Last bei der Überrollung eines Schadens benötigt. Gemeinsam mit der Anzahl der Überrollungen und der Kenntnis der Materialeigenschaften ist eine Abschätzung der verbleibenden Laufzeit eines Lagers möglich.

Aus der Amplitude des Überrollsignals eines Piezoelementes lässt sich die Last nicht direkt abschätzen, da die Verteilung von radialer und axialer Last nicht bekannt ist. Damit ist die Überrollposition auf dem Außenring nicht bekannt und somit die Übertragungsfunktion vom Kräfteintrag auf den Lageraußenring bis zur Messstelle der Sensorposition. Die Übertra-



---

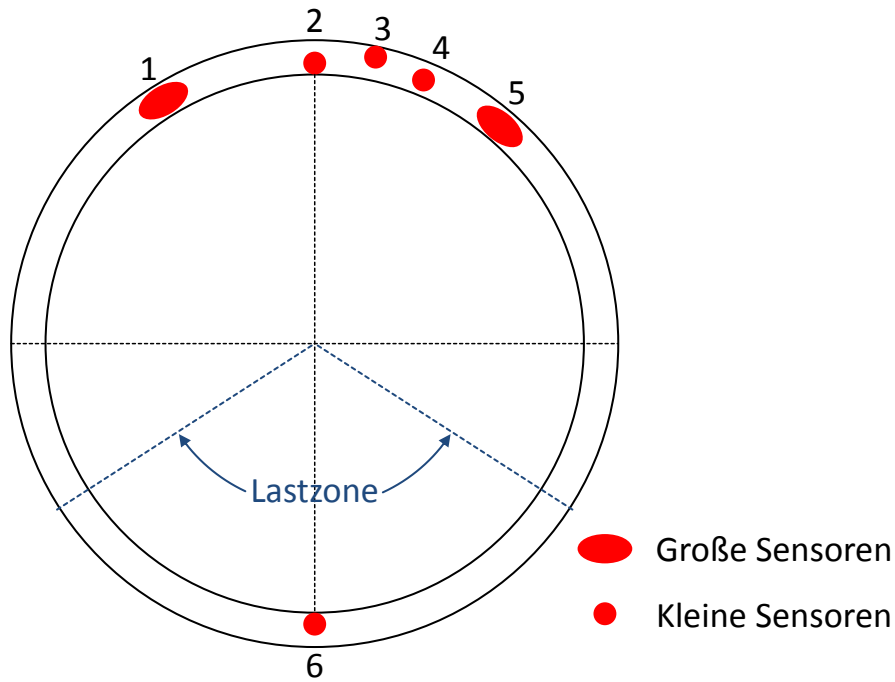
gungsfunktion bezüglich der Verformung von der Pressungsfläche der Kugel am Außenring bis zur Sensorposition ist nichtlinear.

Zur Bestimmung der radialen Last wird aus der Frequenz bei der Überrollung des Piezoelementes die Käfiggeschwindigkeit bestimmt. Daraus lässt sich die zentrifugale Kraft durch die umlaufenden Kugeln ermitteln. Die axiale Last lässt sich über den Vergleich mit bekannten, abgespeicherten Werten der Überrollfrequenz und der Überrollamplitude bei gemessenen axialen Lasten bestimmen.

Zur Bestimmung der Vergleichskurve werden in einem Vorversuch Werte von Drehzahlen bei unterschiedlichen Lasten angefahren. Dabei werden die axialen Kräfte sowie die Frequenz und die Amplituden des Piezoelementes gemessen. Mit der Kraft wird eine Näherungsfunktion über der Amplitude und der Frequenz gebildet.

Aus Kostengründen wurde dieser Versuch im Rahmen eines größeren Versuches gefahren. Der Vorversuch zur Generierung der Stützpunkt für die Schätzfunktion konnte aus diesem Grund nicht bei höheren Lasten gefahren werden, um die Testergebnisse des anderen Versuches möglichst wenig zu beeinflussen. Durch die nicht vorhandenen Stützpunkte bei hohen Lasten wird der Fehler der Lastschätzung bei den hohen Lasten höher ausfallen.

Der Lageraußenring für den Versuch wurde an der Stirnseite mit unterschiedlichen Sensoren an unterschiedlichen Positionen bestückt, siehe Abbildung 52.



**Abbildung 52:** Positionen der piezoelektrischen Sensorelemente über den Umfang der Stirnseite des Außenrings

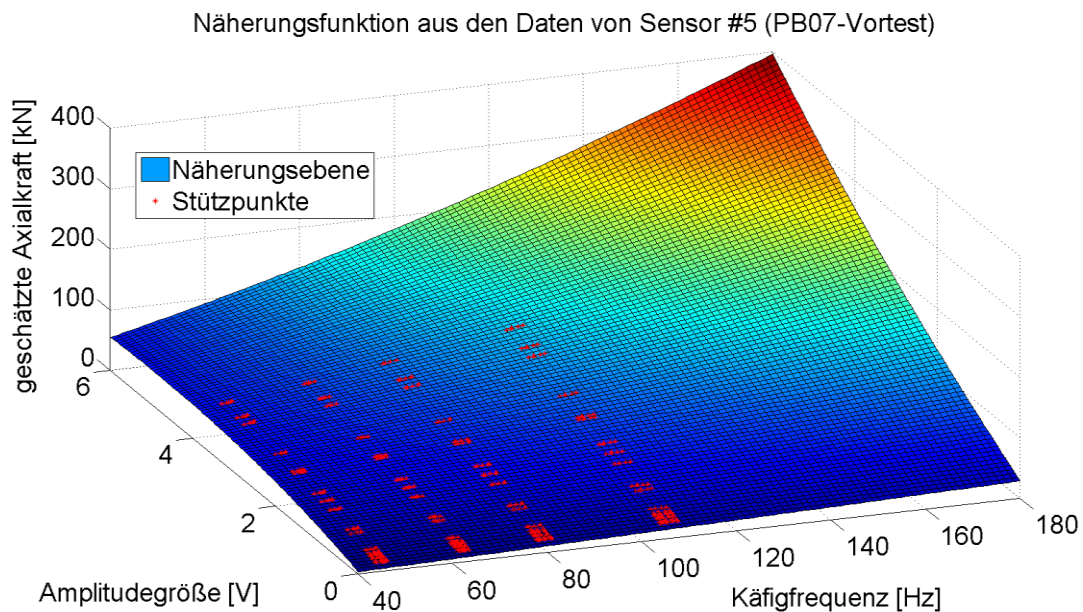
Sensoren:			
ID	Typ	Größe	Kommentar
1	<u>Piezo</u> (PIC300)	6x10mm	Mittige Platzierung auf dem Ring der Stirnseite
2	<u>Piezo</u> (PIC255)	Ø4mm	Möglichst großer Radialabstand zum Lagermittelpunkt
3	<u>Piezo</u> (PIC255)	Ø4mm	Möglichst großer Radialabstand zum Lagermittelpunkt
4	<u>Piezo</u> (PIC255)	Ø4mm	Mittige Platzierung auf dem Ring der Stirnseite
5	<u>Piezo</u> (PIC255)	6x10mm	Mittige Platzierung auf dem Ring der Stirnseite
6	<u>Piezo</u> (PIC255)	Ø4mm	Um 180° versetzte Position zu <u>Piezo 2</u> , in der Lastzone
7	<u>Piezo</u> (PIC255)	Ø4mm	Auf den Stegen des Lagers angebracht, nicht auf Stirnseite des Außenringes

**Tabelle 12:** Sensorpositionen für die Lastabschätzung

Für die erste Untersuchung der Plausibilität des Vorgehens wird eine Polynomfunktion 2-ten Grades gewählt, siehe Kapitel Störsignalunterdrückung, Signalvorverarbeitung und Sensorauswahl. Für spätere Anwendungen ist darauf zu achten, eine geeignete nichtlineare Funktion mit linearen Parametern zu wählen. Diese Funktion sollte derart gestaltet sein, dass

nach Möglichkeit eine ausreichende Approximation mit einem möglichst niedrigen Grad einer Funktion möglich ist.

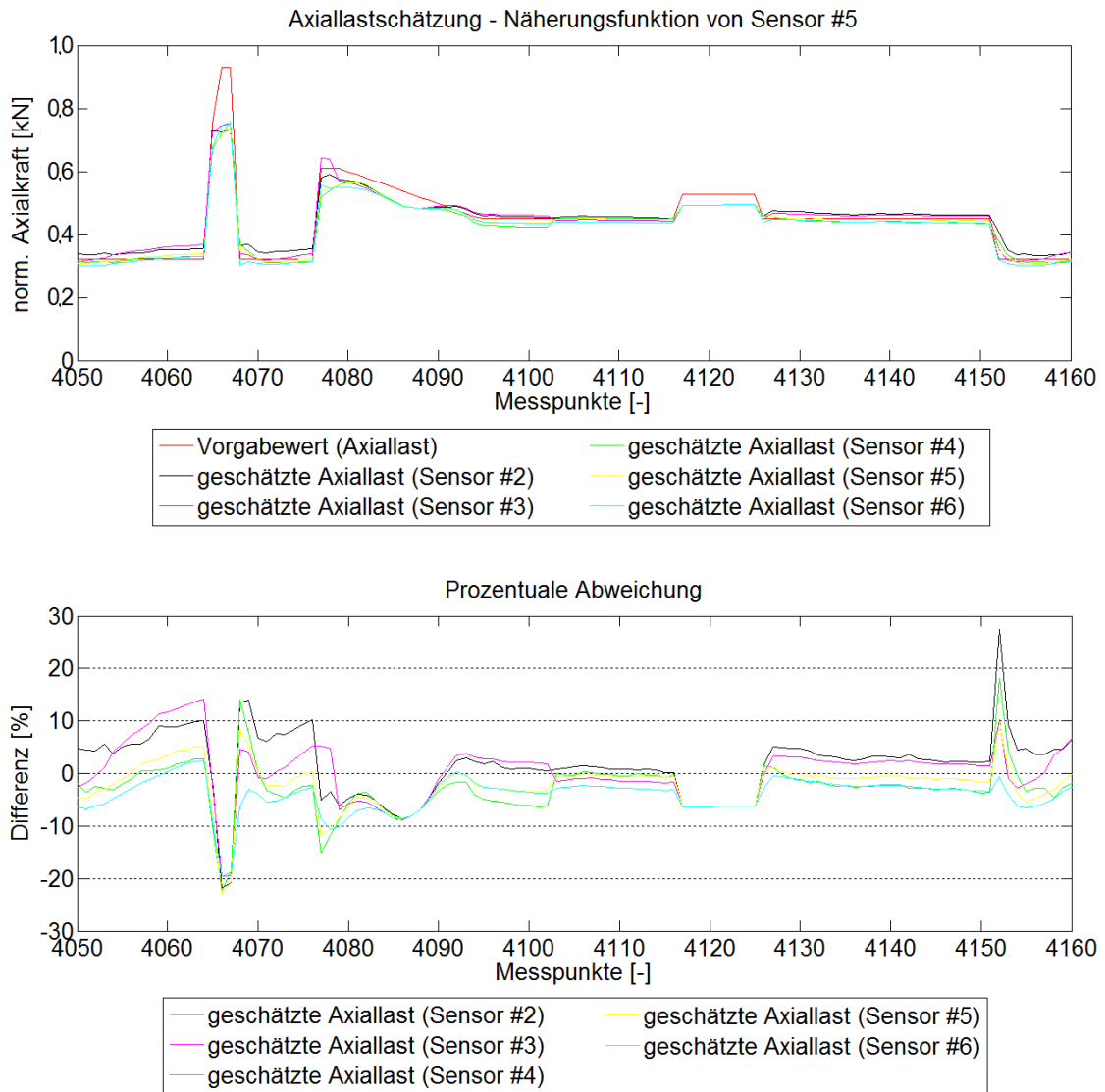
$$f(C, P) = F = a + b \cdot C + c \cdot P + d \cdot C \cdot P + e \cdot C^2 + f \cdot P^2 \quad (5.10)$$



**Abbildung 53:** Schätzfunktion für axiale Kraft durch die Stützpunkte

Die Abbildung 53 zeigt die Schätzung (Least Square Schätzung) aufgrund der in Vorversuchen ermittelten Stützpunkte (in rot dargestellt). In dieser Schätzung sind die hohen Lastbereiche und die hohen Drehzahlen nicht mit Stützpunkten repräsentiert. Der Grund für den Verzicht von Stützpunkten bei den genannten Bedingungen liegt darin, dass diese Versuche aus Kostengründen als Vorversuche vor anderen Versuchen gefahren wurden. Die anderen Versuche sollten jedoch durch die Versuche der Lastschätzung nicht merklich beeinflusst werden.

Das Fehlen der Stützpunkte bei hohen Lasten und Drehzahlen führt zu einem schlechten Ergebnis bei der Anwendung der Funktion, da die aus dieser Funktion ermittelten Werte bei hohen Drehzahlen und Lasten einer Extrapolation entsprechen, mit hohen Abweichungen bei diesen Werten.



**Abbildung 54:** Vergleich der eingebrachten zu den gemessenen Lagerlasten

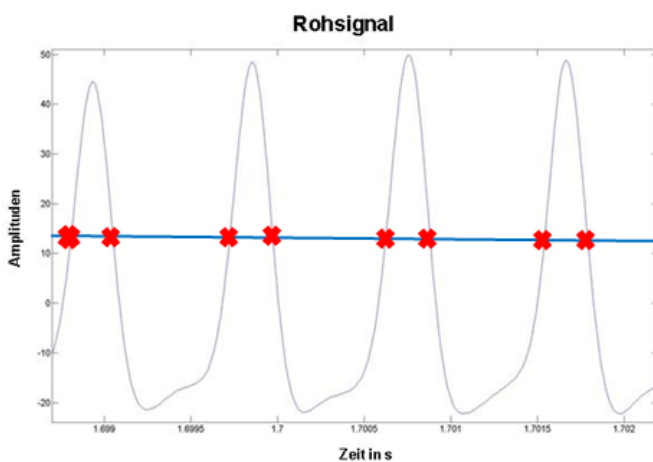
Prinzipiell kann somit gezeigt werden, dass eine Lastschätzung mit diesem Vorgehen funktioniert. Die hohe Abweichung der Schätzung bei hohen Lasten war zu erwarten, da an diesen Stellen keine Stützpunkte bei der Erstellung der Näherungskurve generiert werden konnten. Somit beruht die Schätzung bei den hohen Lasten auf einer Extrapolation. Für erste Untersuchungen ist die Verwendung eines einfachen Polynoms ausreichend, jedoch ist dieses einfache Polynom ungünstig für die Genauigkeit der Schätzung. Dies trägt zu den Abweichungen (Abbildung 54) bei.

**Selbstüberwachung der Lagerdiagnoseeinheit**

Eine Lagerüberwachungseinheit für Triebwerksanwendungen sollte auf die Funktion hin überwacht werden. Eine Möglichkeit bietet das bei der Überrollung des Piezoelementes ent-

stehende Signal. Die Erkennung eines typischen Signalverlaufes, bei der Überrollung der Position des Piezoelementes durch eine Kugel (siehe Abbildung 55) zeigt die Funktion einer Mess- und Auswertekette an. Dabei wird die Funktion des Sensors, der Leitungsverbindung, des A/D-Wandlers und der Auswertung über die Soft- und Hardware im Überwachungsrechner überprüft.

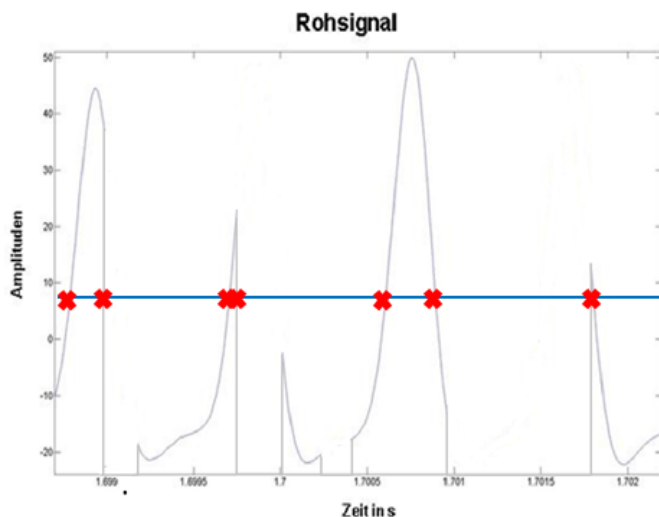
Ein Vergleich der Amplitude und Frequenz der Rohsignale des Piezoelementes mit zuvor aufgezeichneten Tabellenwerten erlaubt eine weitere Funktionsprüfung der Messkette. Die Abweichungen der aktuellen Werte von den abgespeicherten Referenzwerten sollten innerhalb vorgegebener Grenzen liegen.



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

Fazit: → Sensor und Auswerteeinheit funktionieren.

**Abbildung 55:** Gut Zustand, Signal eines Piezoelementes bei der Überrollung durch einer Kugel



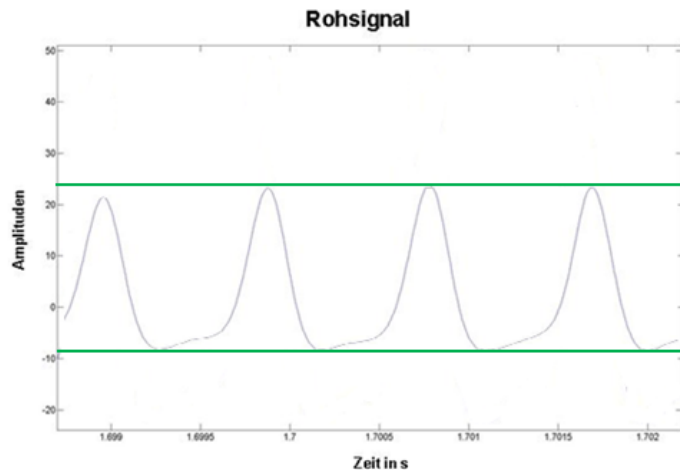
Abstände der Nullstellen sind unregelmäßig.

Mögliche Fehlerquellen:

Wackelkontakt in der Leitung, Wackelkontakt im Sensor.

Im Frequenzbereich ist die Aussage nicht eindeutig! Deshalb Auswertung zur Sicherheit im Zeitbereich.

**Abbildung 56:** Schlecht-Zustand, Nullstellen und Abstände sind unregelmäßig



Amplitude zu gering.

Mögliche Fehlerquellen:

Kontaktprobleme in Verbindungen, Sensordegradierung, Sensordefekt intern.

A/D-Wandler-, Softwareprobleme.

**Abbildung 57:** Schlecht-Zustand, Amplitude zu klein

Referenzen für Vergleichswerte können beim Probelauf der Triebwerke gewonnen werden. Eine Alternative ist die Aufzeichnung der Sensorsignale in Standardsituationen während des Flugbetriebes. Die gespeicherten Sensorsignale müssen dann 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 56 und Abbildung 57 dargestellten Fehlerfälle in der Messkette der Piezoelemente.

### **DOE-Versuchsplanung und Messdatenaufnahme/ -auswertung**

Für die Planung der Versuche auf einem Kleinlagerprüfstand (MGG12 bei der Firma FAG) wurde eine statistische Versuchsplanung vorgenommen. Diese Versuche wurden mit vergleichbarer Hertzscher Pressung wie an den Triebwerkslagern durchgeführt.

Es konnte festgestellt werden, dass die Art der Schmierung des Lagers zu keiner Änderung der Signale der Beschleunigungsaufnehmer führt. Getestet wurden hierbei Lager mit Fett- bzw. Petroleumschmierung sowie Lager ohne Schmierung.

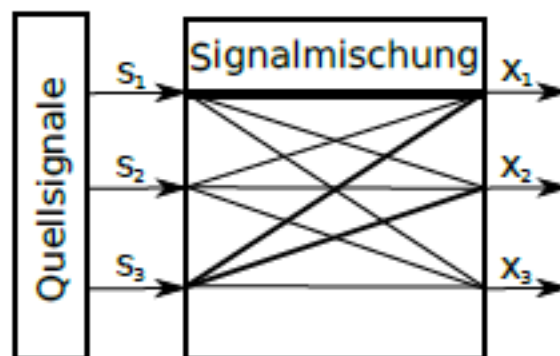
### **Störsignalunterdrückung, Signalvorverarbeitung und Sensorauswahl**

Die körperschallbasierte Diagnose von Lagerschäden in Triebwerken stellt eine Herausforderung dar. In einem Triebwerk wird von einer Vielzahl von körperschallverursachenden Quellen ausgegangen. Dies sind unter anderem Getriebeinteraktionen, aber auch die Verdichterschaufeln sowie die Brennkammer.

Mit der Methode der „blinden Quellentrennung“ ist es möglich, Signale verschiedener Quellen voneinander zu trennen. Mit dieser Methode wird das Signal in Komponenten zerlegt, die

einem Lager zuzuordnen sind, und diejenigen, die zu anderen Quellen gehören. Die Signale sind teilweise über die Drehzahl der Welle korreliert, so dass die Anwendbarkeit dieser Methode zu prüfen ist.

An einem Prüfstand der Technischen Universität Berlin fanden dazu Versuche statt. Der Prüfstand besteht aus einem Antrieb und einer Bremse, an deren gelagerten Wellen jeweils ein Zahnrad angebracht ist, welche ineinander greifen. Ziel dieser Versuche war es die Signale des Lagers von denen des Getriebes zu trennen.



**Abbildung 58:** Signalmischung

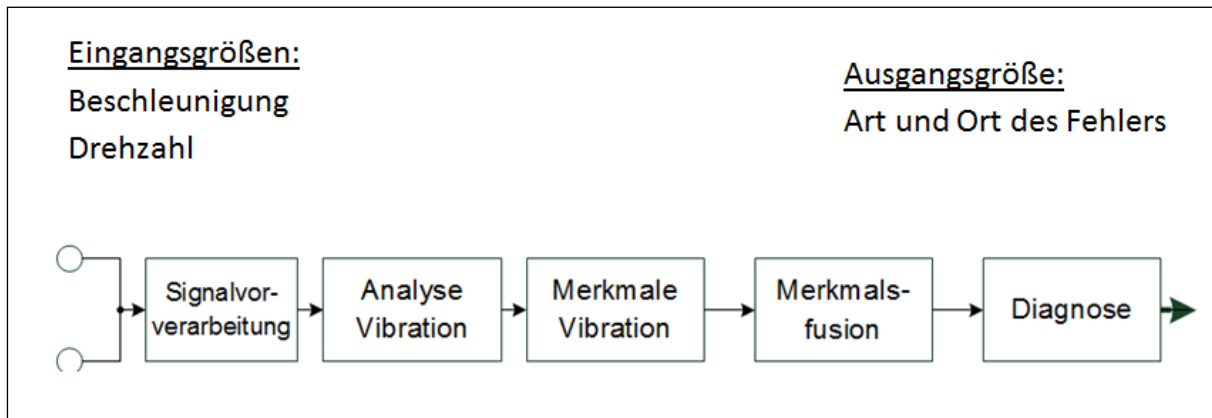
Erste Ergebnisse mit 2 Sensoren zeigten kein eindeutiges Ergebnis. Da auch bei diesem Aufbau schon viele Signalquellen existieren, werden für weitere Untersuchungen mehr als 2 Sensoren benötigt, um eindeutige Aussagen treffen zu können.

Im Rahmen dieser Untersuchung zeigte sich allerdings, dass das untersuchte Verfahren Laufzeitunterschiede der zu trennenden Signale schlecht verarbeiten kann. Hierzu sind zunächst Laufzeituntersuchungen durchzuführen und das Signal über Filter aufzuarbeiten.

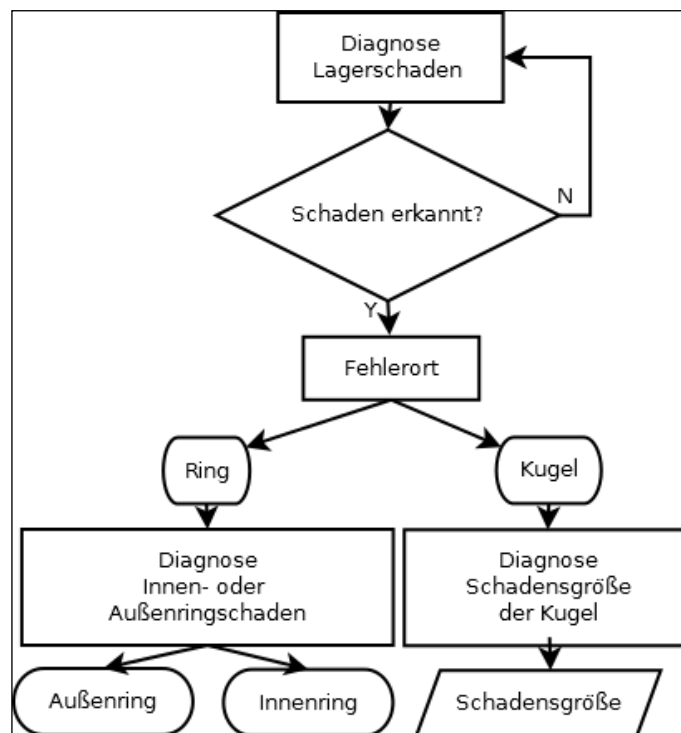
### Merkmalsbestimmung zur Diagnose

Die für die Diagnose notwendigen Sensoren konnten bis auf einen Beschleunigungsaufnehmer, der direkt an dem Außenring montiert war, und den Drehzahlsensor reduziert werden. Die Beschleunigungsaufnehmer-Signale wurden in verschiedenen Frequenzbändern gefiltert, ferner wurde eine Hilbert-Transformation durchgeführt, um die Signale zu demodulieren. Es werden aus den vorverarbeiteten Signalen Merkmale generiert, die komprimiert Informationen über den Zustand des Lagers enthalten. Die Daten des Großlagerteststands (AN 58) und die Daten der Vorversuche am MGG12 Prüfstand wurden hierzu ausgewertet mit dem Ziel, sogenannte trennungswirksame Merkmale zu finden, mit denen der fehlerfreie Fall und die verschiedenen möglichen Fehler klar getrennt werden können. Dies sind unter anderem

die statistischen Momente und die Amplituden der Lagerüberrollfrequenzen. Merkmale werden bewertet und abschließend ausgewählt. Die Diagnose selbst erfolgt dann durch einen Bayes-Klassifikator. Das komplette Diagnosesystem ist in Abbildung 59 dargestellt.



**Abbildung 59:** Diagnosesystem



**Abbildung 60:** Kaskadierte Diagnose

Zur Verbesserung der Robustheit wurde das Diagnosesystem kaskadiert, siehe Abbildung 60. Die Diagnose reduziert sich dabei jeweils auf eine Zwei-Klassenentscheidung. Dies verhindert Fehlentscheidungen, da zunächst nur erkannt werden muss, ob überhaupt ein Fehler vorliegt.



So kann für jede Stufe ein Klassifikator separat trainiert werden. Für jede Stufe werden die Merkmale ebenfalls separat ausgewählt, dadurch steht für jeweils eine Entscheidung genau ein Merkmals-Set zur Verfügung. Zu dem Verfahren und den Ergebnissen ist eine Veröffentlichung der TU-Berlin geplant.

### Systemvalidierung an den Prüfständen MGG12 und AN 58

Die Algorithmen wurden mittels der Daten der Prüfstände MGG12 und AN 58 getestet. Die Validierung erfolgte mittels der Kreuzvalidierung und der Leave-One-Out-Methode. Die ausgebrochenen Kugeln und Ringschäden konnten fehlerfrei erkannt werden.

### Zusammenfassung und Ergebnisse

Es wurde erfolgreich ein Konzept zur Überwachung hybrider Schrägkugellager aufgebaut und validiert. Dies erfolgte unter Beachtung wirtschaftlicher Belange sowie Erfordernissen, die aus Luftfahrtbestimmungen resultieren. Es wurde 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. Bisherige Verfahren zur Überwachung von Schrägkugellagern liefern keine ausreichend frühe Warnung bei Kugelschäden. Es wird gezeigt, dass mit einem Körperschallsensor (Piezoelement) direkt an den Lagerringen, die Messung von Schadüberrollungen möglich ist. Im Rahmen der Forschungsarbeiten in diesem Projekt wurde eine Zusammenarbeit mit der TU Darmstadt begonnen, mit dem Ziel der Entwicklung eines produktionstauglichen Körperschallsensors auf Piezobasis.

Es erfolgte der Nachweis, dass im rotierenden Lager eine Erkennung von Rissen in keramischen Kugeln gelingt. Bei einem Triebwerkshauptwellenlager, mit keramischen Kugeln von 25,4 mm Durchmesser können Ausbrüche von 0,5 mm Durchmesser zuverlässig erkannt werden. Die Erkennung der Schadüberrollhäufigkeit ermöglicht damit eine Prognose der verbleibenden Restlaufzeit eines Lagers nach Eintritt eines Schadens. Bewiesen werden konnte, dass mit Piezoelementen, neben dem Körperschall die Passiergeschwindigkeit der Kugeln gemessen werden kann. Durch die Messung der kontinuierlichen Überrollung der Lagerlaufflächen ist eine Selbstüberwachung der gesamten Messkette möglich. Es kann somit der Forderung nach einer fortlaufenden Eigendiagnose der Überwachungseinheit entsprochen werden. Es wurde der Nachweis erbracht, dass zur frühen Erkennung von Fehlern die Piezoelemente den Vibrationssensoren und den Metallpartikelsensoren überlegen sind. Es wird aufgezeigt, dass bei einer Überwachung, die sich ausschließlich auf die Messung von Metallpartikeln stützt, die verbleibende Reaktionszeit sehr kurz ist. Durch die Ergebnisse wird

dargestellt, dass ein spezieller Sensor zur Erkennung von Keramikteilen im Öl nicht notwendig ist.

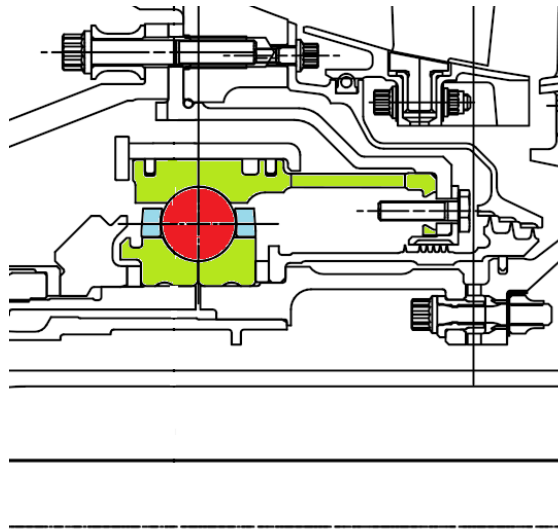
Es wurde auf Schwachstellen bei der Berechnung der Käfigrotationsfrequenzen bei schnell-drehenden, hybriden Schrägkugellagern hingewiesen. Die Verwendung der gemessenen, gegenüber den berechneten Käfigfrequenzen zeigte eine wesentliche Verbesserung bei der Bestimmung der Schadüberrollfrequenzen. Auf dieser Grundlage wird gezeigt, dass es bei hybriden Schrägkugellagern möglich ist, Frequenzbereiche für die Erkennung von Fehlern auf keramischen Kugeln zu bestimmen.

### **5.3 Ergebnisse AP 4: Triebwerkstest**

Zur Erreichung des Technologiereifegrades TRL6 ist die Funktion eines Prototypen in einer „relevanten Umgebung“ nachzuweisen. Obwohl die Prüfstände der Schaeffler AG vom Typ AN58 in Drehzahlen, Lasten und Schmierung die Bedingungen in einem Triebwerk hinreichend gut nachbilden können, sind bestimmte Einflüsse wie beispielsweise Schwingungen, die von anderen Transmissionskomponenten oder auch der Turbomaschinerie herrühren, oder der Luftstrom durch das Lager sowie der Lagerkammerinnendruck nicht darstellbar. Aufgrund dieser Umstände wurde ein Versuch mit einem Hybridlager auf einem BR725-Entwicklungstriebwerk durchgeführt.

#### **Prüflager**

Als Prüflager war ursprünglich eine Modifikation des serienmäßig verbauten konventionellen Lagers vorgesehen. Dazu sollten die Stahlkugeln gegen Keramikkugeln des gleichen Durchmessers ausgetauscht werden. Eine Analyse ergab jedoch ein hohes Risiko für Kantenläufer ohne weitere Anpassung der Lagergeometrie. Es wurde deshalb auf ein Versuchslager aus dem Kerntriebwerksverdichterprogrammes E3E zurückgegriffen, dessen Außenabmessungen weitgehend mit denen des BR725-Hochdruckverdichterlagers identisch sind. Dieses Lager ist als Hybridlager ausgeführt, die Lagerinnengeometrie war also für die veränderten Bedingungen geeignet. Bei einem Zwischenfall während der Verwendung im E3E-Programm wurden Partikel in das Lager eingetragen. Die Laufbahnen wurden durch Überrollung dieser Partikel beschädigt und wiesen Eindrücke auf. Die Laufbahn wurde deshalb vom Partner FAG Aerospace vor der Verwendung noch einmal überholt, indem die Laufbahnen gehont wurden. Dabei konnten die meisten Eindrücke entfernt werden, einige blieben jedoch bestehen. Auf Basis der Erfahrungen aus dem Arbeitspaket 1.1 wurde das Risiko eines Schadeintrittes jedoch als gering eingeschätzt. Des Weiteren wurden auch die Wälzkörper des Lagers ausgetauscht, es wurde die Keramik verbaut, die auch in den anderen Versuchen des Projekts Verwendung fand.

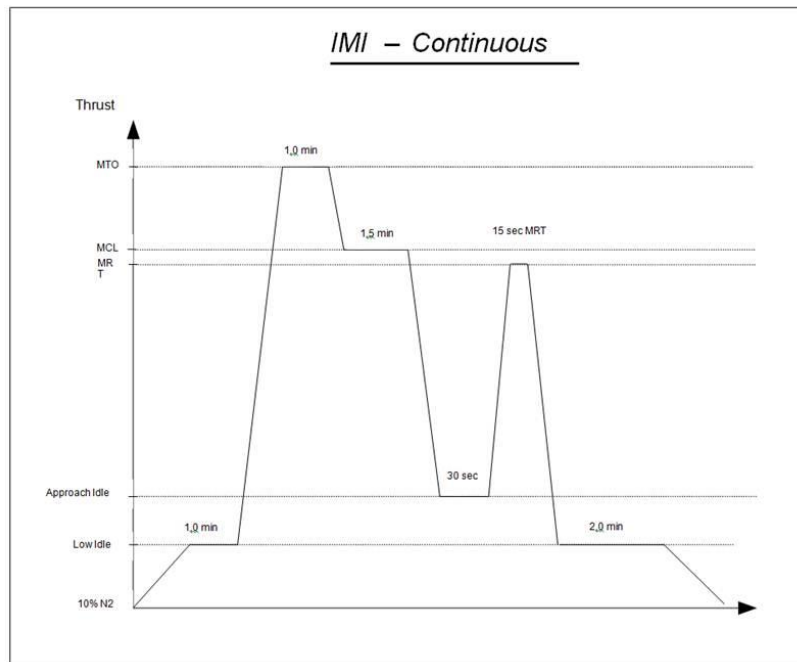


**Abbildung 61:** Einbausituation des BR725 Hochdruckverdichterlagers auf einem Wellenstummel

Das BR725 Hochdruckverdichterstager ist ein Kugellager mit geteiltem Innenring. In den Außenring sind Nuten für Kolbendichtringe eingelassen, die einen Quetschöldämpfer aufbauen. Der zugehörige Federstegkäfig ist ebenfalls integraler Bestandteil des Außenrings. Innen- und Außenring werden aus M50NiL gefertigt, der Käfig besteht ebenfalls aus Stahl und wird am Innenring geführt. Die Schmierung erfolgt über den Wellenstummel, auf den das Lager aufgeschraubt wird. 3 Reihen von Bohrungen versorgen das Lager über die vordere und hintere Käfigführungsfläche sowie die Innenring-Trennlinie mit Schmierstoff.

### **Betriebsbedingungen**

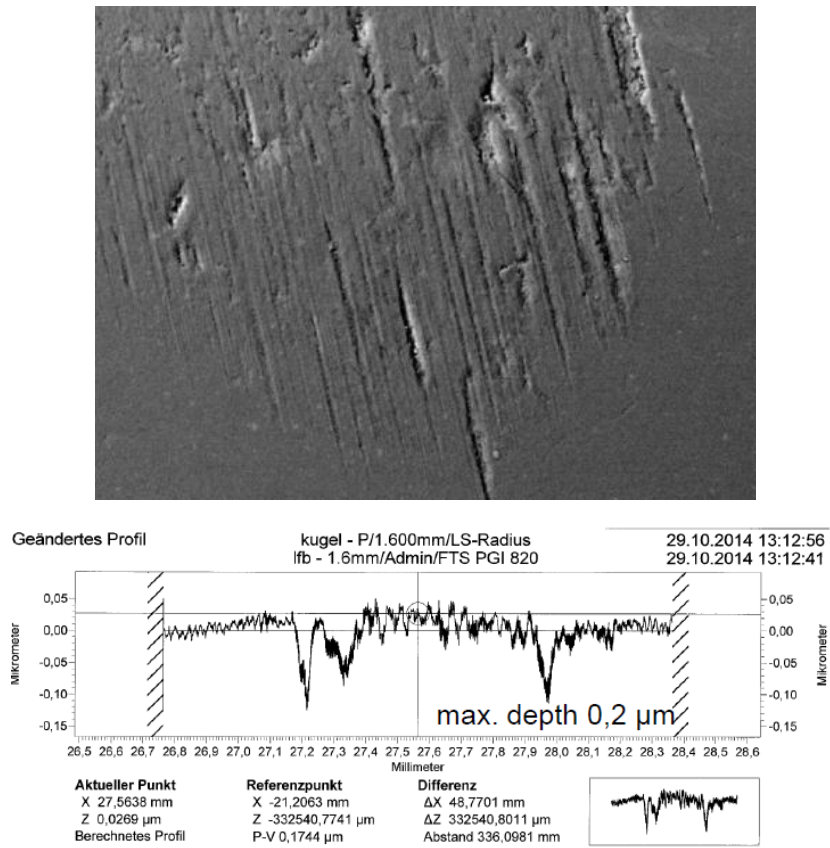
Das Versuchstriebwerk führte sogenannte IMI-Zyklen durch. IMI steht für Idle-MTO-Idle, also Leerlauf - Maximaler Startschub - Leerlauf, und stellt einen deutlich verkürzten Flugzyklus mit den Phasen Leerlauf, maximaler Startschub, maximaler Schub für Steigflug, Anflug, Umkehrschub und Leerlauf dar. Der Zyklus ist schematisch in Abbildung 62 dargestellt und dauert insgesamt nur ca. 6,5 Minuten. Es waren mindestens 1000 Zyklen geplant, insgesamt wurden während der Testkampagne 1417 Zyklen in 172 h Versuchszeit durchgeführt. Die auftretenden Kontaktspannungen lagen ca. 10% über der empfohlenen Maximalspannung für Rolls-Royce-Triebwerke.



**Abbildung 62:** Der IMI-Zyklus für das Versuchstriebwerk BR725

## Ergebnisse

Die Lagerinspektion erbrachte Hinweise auf eine Kontamination des Lagers mit harten Partikeln. Diese hatten in den Laufbahnen Eindrücke hinterlassen und auch einige Kugeln wiesen Schrammen und Kratzer auf. Bei genauerer Untersuchung stellte sich jedoch heraus, dass diese nur von geringer Tiefe  $<2\ \mu\text{m}$  sind, so dass sie keinen negativen Einfluss auf den Lagerbetrieb haben. Der Test wurde somit erfolgreich abgeschlossen.



**Abbildung 63:** Oben: Rasterelektronenmikroskopaufnahme einer Schadstelle an einer Keramikkugel des Lagers aus dem BR725 Versuch; Unten: Profil der Schadstelle, die Tiefe beträgt nur 0,2  $\mu\text{m}$

## **6 Voraussichtlicher Nutzen**

Die Verwendung von hybriden Hochdruckverdichterlagern in modernsten Triebwerken kleiner und mittlerer Schubklassen wird von Rolls-Royce Deutschland konsequent verfolgt und als notwendig angesehen, um die Anforderungen an die Zuverlässigkeit bei kleinem Bauraum zu erfüllen. Ein wichtiger Meilenstein hierfür war das Erreichen von TRL6 mit Hilfe der durch VEROLAT und VERLAT-FP erlangten Erkenntnisse im Oktober 2015.

Es ist vorgesehen, die Technologie in neuen Triebwerksgenerationen einzusetzen. Die Technologie ist essentiell für die kommenden Triebwerke der Trent-Serie für Großraumflugzeuge. Rolls-Royce Deutschland konnte hier seine Position im Konzern deutlich stärken.

### **6.1 Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte**

Im Zeitraum des Projektes VERLAT-FP wurden zwei Patentanträge eingereicht, die sich gegenwärtig noch im Beurteilungsprozess befinden.

- 1.) Patent zur Erkennung einer Schadüberrollung und axialen Lasterkennung
- 2.) Patent zum axialen Lastausgleich axial hochbelasteter Lager

### **6.2 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit**

Im Rahmen des Forschungsprojektes konnte im Verbund mit dem Vorgängervorhaben VEROLAT das Potential von Hybridlagern für den Einsatz in Triebwerken nachgewiesen werden. Sie weisen gegenüber konventionellen Lagern sowohl als Kugellager als auch als Zylinderrollenlager große Potentiale auf. Lag der Fokus des Programmes VEROLAT noch auf der Komponente Wälzkörper, konzentrierte sich das Projekt VERLAT-FP auf das Verständnis auf des Systems Hybrid-Wälzlager durch Versuche unter Triebwerks-spezifischen Bedingungen. Das laufende Programm HYZYRO dient der Übertragung der Erkenntnisse auf Rollenlager, die über die in VEROLAT durchgeführten stichprobenartigen Versuche hinaus spezifische weitere Versuche erfordern, um die Eignung der Keramik untern den speziellen Bedingungen eines Turbinenloslagers nachzuweisen. Darüber hinaus legt HYZYRO den Fokus auf die Verbesserung von Ringmaterialien, die ihre Leistungsfähigkeit dem neuen Wälzkörpermaterial anpassen und die Verwendung in Hochlast-Anwendungen ermöglichen sollen.

In HYZYRO sollen auch die Arbeiten zur Abschätzung der verbleibenden Betriebszeit eines Lagers nach dem Eintritt eines Schadens sollen weitergeführt werden. Dazu sollen Arbeiten an Schadensfortschrittsmodellen vertieft werden. Für die Schätzung der verbleibenden Be-

triebszeit eines Lagers ist eine Schätzung der Größe des initialen Schadens notwendig. Alternativ sollen Möglichkeiten untersucht werden, die verbleibende Lebenszeit eines Lagers über die erkannte Zunahme der Schadensgröße an den Laufringen zu bestimmen.

Die Möglichkeiten, Körperschallsignale aufzunehmen, sollen weiter verbessert werden. Dazu sollen Sensortechnologien mit einer hohen Empfindlichkeit und einer ausreichenden Temperaturresistenz auf eine Anwendbarkeit hin überprüft werden. Eine Keramik mit erweitertem Einsatzbereich wird dazu von der TU Darmstadt im Rahmen des LuFo-geförderten Projektes OLIAS entwickelt. Dabei wird in OLIAS eine Optimierung der Materialzusammensetzung und Fertigungstechnologie der Polymerkeramik-Messelemente auf Basis der Ergebnisse des DFG-Projektes „PoKer“ (Polymer-Keramik) erforscht. Die entwickelte Sensor-Keramik soll in einem anwendungsreifen Überroll- und Körperschallsensor Anwendung finden.

Eine mögliche Variante bei 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. Bei einem Schrägkugellager bietet sich dadurch die Möglichkeit, beim Eintritt eines Schadens von den zwei aktiven Laufflächen des Schrägkugellagers auf die anderen beiden, ungeschädigten Laufflächen „umzuschalten“.

## **7 Veröffentlichungen**

### Masterarbeiten die im Projekt durchgeführt wurden

„Lasterkennung am Kugellager im Flug-Triebwerk“

Masterarbeit Simon Wieloch (2015) am Institut für Konstruktion, Mikro- und Medizintechnik

Prof. Dr.-Ing. Robert Liebich, Fachgebiet Konstruktion und Produktzuverlässigkeit

Technische Universität Berlin



## 8 Quellen

- [1] 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.
- [2] P. Gupta, *Advanced Dynamics of Rolling Elements*, New York: Springer-Verlag, 1984.
- [3] T. A. Harris, *Essential Concepts of Bearing Technology*, Fifth Edition, Boca Raton: CRC Press, 2007.
- [4] T. A. Harris, *Advanced Concepts of Bearing Technology*, Fifth Edition, Boca Raton: CRC Press, 2007.