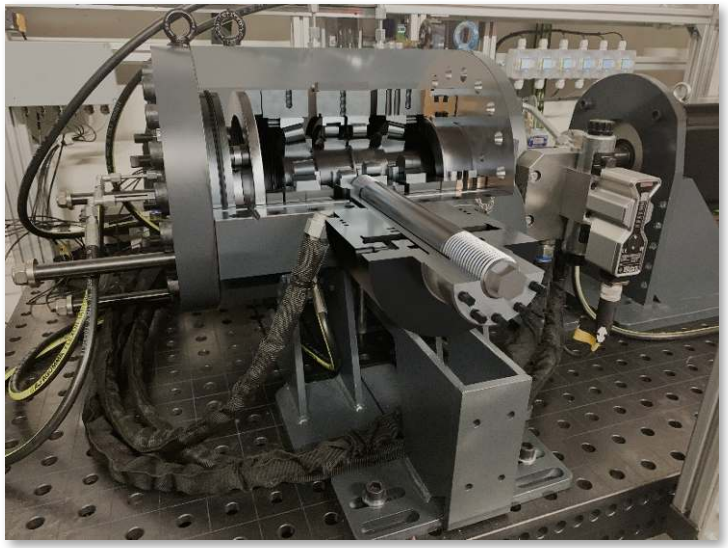
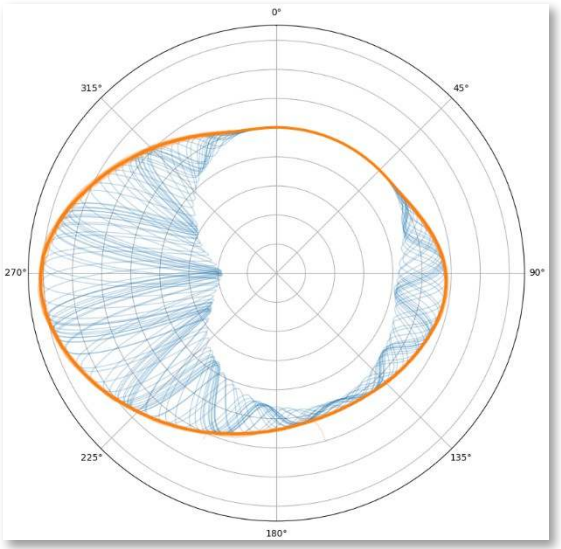
# Untersuchung des Schlupf- und Tragverhaltens eines Kegelrollenlagers mittels wälzkörperintegrierter Messtechnik

Martin-Christopher Noll, i4M technologies GmbH
Prof. Dr. Matthias Stammler, Fraunhofer IWES
Tomek Gerber, B.Sc., Fraunhofer IWES

7. VDI-Fachkonferenz Schadensmechanismen an Lagern 2026, 16.04.2026, Aachen










Fraunhofer IWES i4M technologies GmbH intelligence for mechanical systems

# Gliederung

1. Vorstellung, Einleitung & Motivation
2. Prüfstandsaufbau & Lager
3. Wälzkörperintegrierte Messtechnik
4. Daten & Analyse-Methoden
5. Ergebnisse
6. Zusammenfassung & Ausblick



Fraunhofer IWES i4M technologies GmbH intelligence for mechanical systems

# Gliederung

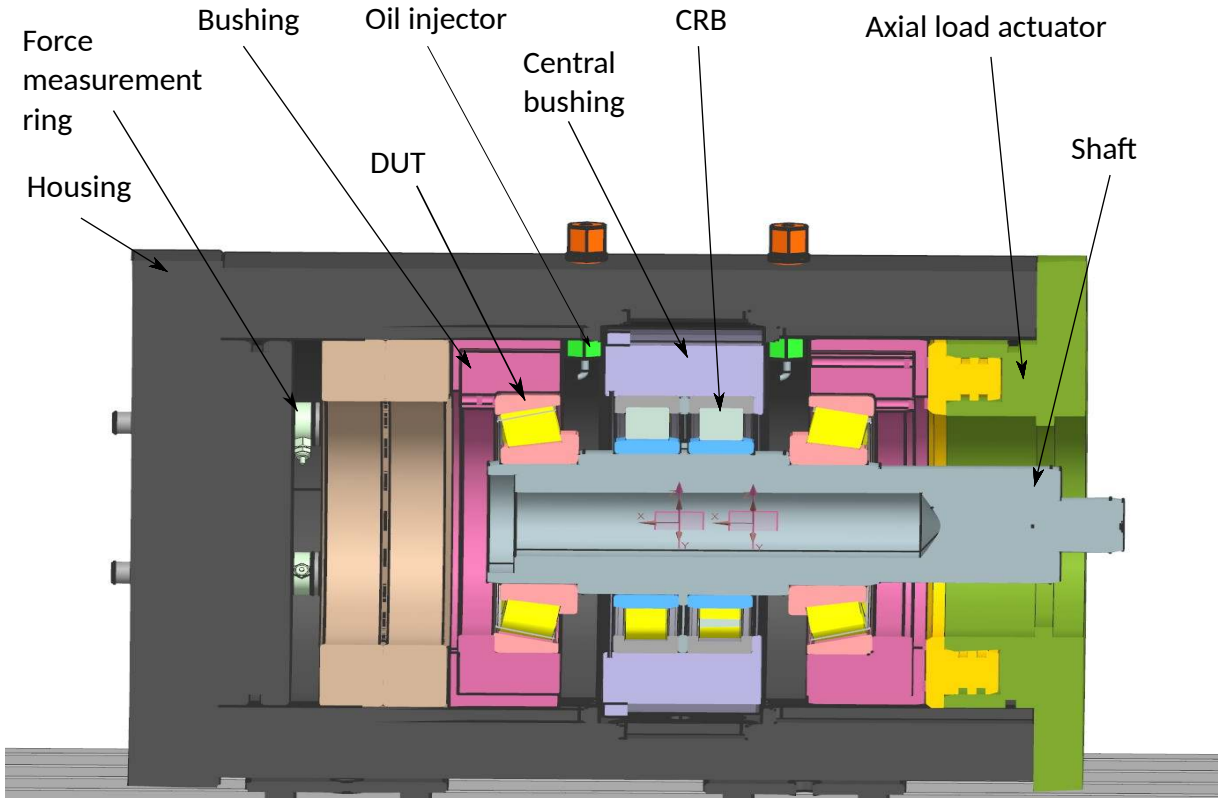
1. Vorstellung, Einleitung & Motivation
2. Prüfstandsaufbau & Lager
3. Wälzkörperintegrierte Messtechnik
4. Daten & Analyse-Methoden
5. Ergebnisse
6. Zusammenfassung & Ausblick



Fraunhofer IWES i4M technologies GmbH intelligence for mechanical systems

# Einleitung: Projekt Dy-rex

- **„Dy**namische **Re**gelung einer a**x**ialen Lastsuperposition“
- Reduzierung von schädlichem Wälzkörperschlupf bei gleichbleibender Ermüdungslebensdauer
- Einsatz in kritischen Betriebssituationen wie Fault Ride Through
- Motivation: Vermeidung von WEC






Fraunhofer IWES i4M technologies GmbH intelligence for mechanical systems

# Einleitung: Projekt Dy-rex

- „**Dy**namische **Re**gelung einer a**x**ialen Lastsuperposition“
- Reduzierung von schädlichem Wälzkörperschlupf bei gleichbleibender Ermüdungslebensdauer
- Einsatz in kritischen Betriebssituationen wie Fault Ride Through
- Motivation: Vermeidung von WEC





Fraunhofer IWES i4M technologies GmbH intelligence for mechanical systems

# Gliederung

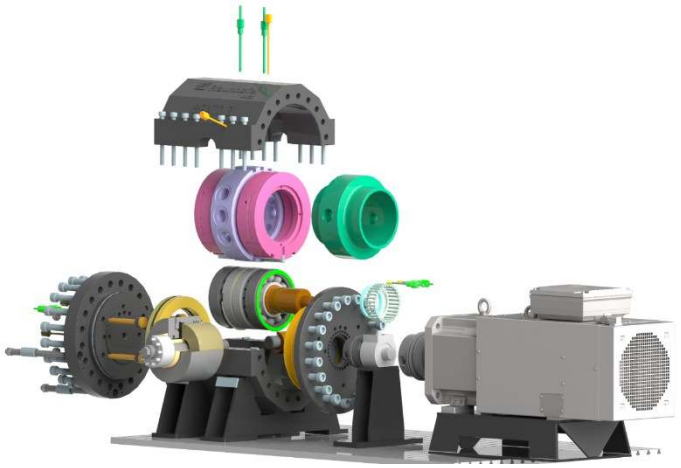
1. Vorstellung, Einleitung & Motivation
2. Prüfstandsaufbau & Lager
3. Wälzkörperintegrierte Messtechnik
4. Daten & Analyse-Methoden
5. Ergebnisse
6. Zusammenfassung & Ausblick

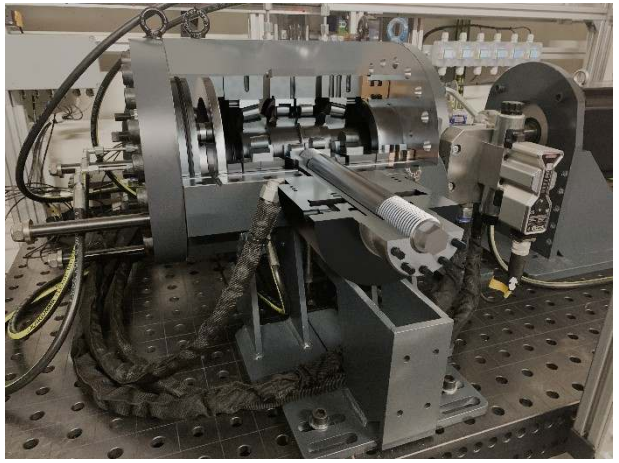


Fraunhofer IWES i4M technologies GmbH intelligence for mechanical systems

# Prüfstandsaufbau & Lager

- Prüfstand BEAT0.3
- Ausgelegt für hohe Last- und Drehzahldynamik
- Mögliche Wälzlager: 30318, 7318 sowie Vierpunktlager
- Zehn einstellbare Ölzuführungen
- Lagerbuchsen als hydrostatische Gleitlager
- Radialkraft über zwei ventilgesteuerte Zugzylinder
- **Lasteinleitung in horizontaler Achse**





| Parameter | Wert | Einheit |
|---|---|---|
| Max. Drehzahl | 3000 | 1/min |
| Drehzahldynamik | 500 | 1/min/s |
| Max. Axialkraft | 140 | kN |
| Axialkraftdynamik | 1120 | kN/s |
| Max. Radialkraft | 250 | kN |
| Radialkraftdynamik | 500 | kN/s |
| Max. Außendurchmesser Prüflager | 220 | mm |
| Max. Volumenstrom Ölschmierung | 60 | l/min |



Fraunhofer IWES i4M technologies GmbH intelligence for mechanical systems

# Gliederung

1. Vorstellung, Einleitung & Motivation
2. Prüfstandsaufbau & Lager
3. Wälzkörperintegrierte Messtechnik
4. Daten & Analyse-Methoden
5. Ergebnisse
6. Zusammenfassung & Ausblick



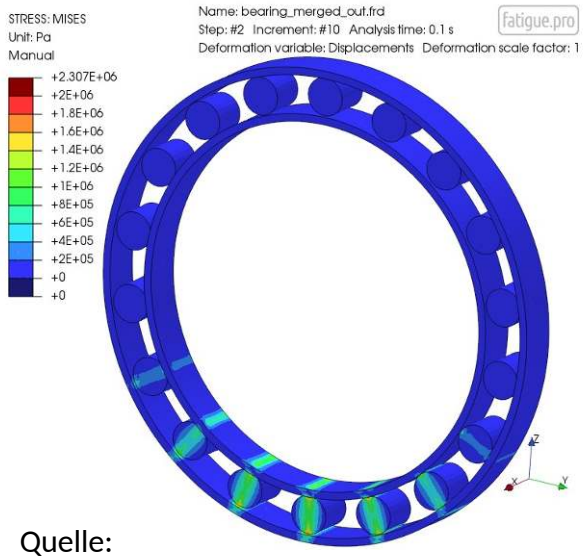
Fraunhofer IWES i4M technologies GmbH intelligence for mechanical systems

# Motivation für die Smart-Roller-Integration

- Hohe Relevanz für Auslegung und Zuverlässigkeitsberechnungen
  - Wie verteilt sich die Last auf die einzelnen Wälzkörper im Orbit eines Wälzlagers?
  - An welchen Stellen und in welchen Betriebsbereichen tritt schädlicher Schlupf auf?
  - Was passiert mit der berechneten Vorspannung unter realen Betriebsbedingungen?
- Zuverlässigkeit ist insbesondere in der Windenergie ein dominantes Thema
- Simulationen bilden die Realität nur begrenzt ab, zur Validierung sind immer Messungen notwendig
- Messungen von Lastverteilung und Schlupf in Wälzlagern sind technisch anspruchsvoll, benötigt wird eine robuste, präzise und vom Lagerhersteller unabhängige Lösung



Quelle: Schaeffler




Quelle: fatigue.pro

# Wälzkörperintegrierte Messtechnik / i4M Smart Roller

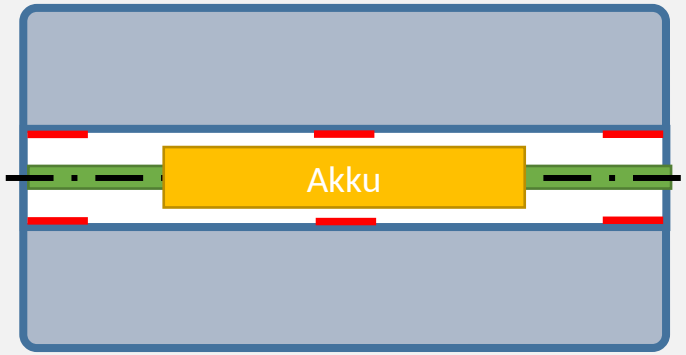
- Verschiedene Smart-Roller-Varianten

Elektronik — DMS — Akku

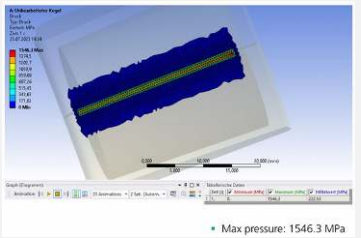
- Kleinere Wälzkörper (< 40 mm Durchmesser)
  - Wiederaufladbar / nicht wiederaufladbar
  - Keine große Zentralbohrung möglich
  - Aussparungen in den Stirnseiten für Elektronik und DMS

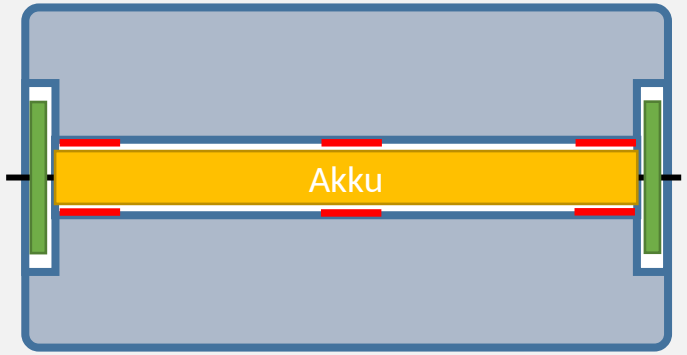



- Größere Wälzkörper (≥ 40 mm Durchmesser)
  - Wiederaufladbar / nicht wiederaufladbar
  - Energy Harvesting möglich

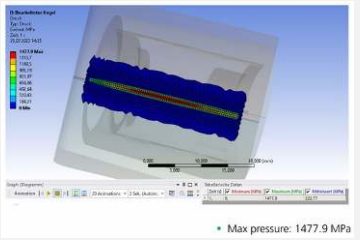



+ gleichmäßigere Kontaktpressung




+ längere Akkulaufzeit






Fraunhofer IWES i4M technologies GmbH intelligence for mechanical systems

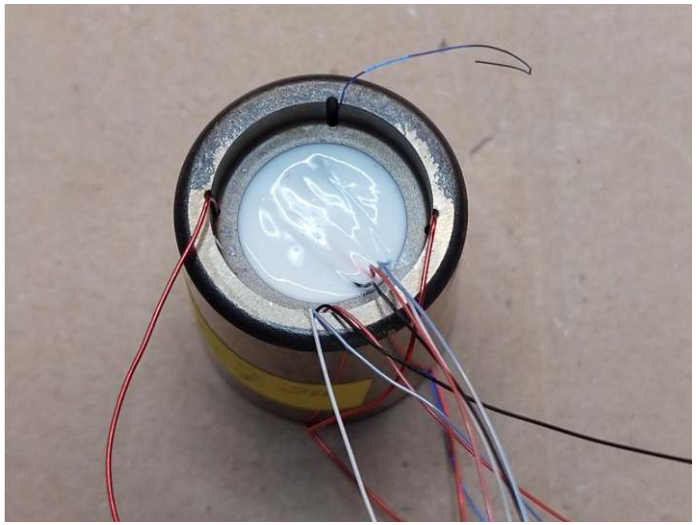
# Wälzkörperintegrierte Messtechnik / i4M Smart Roller

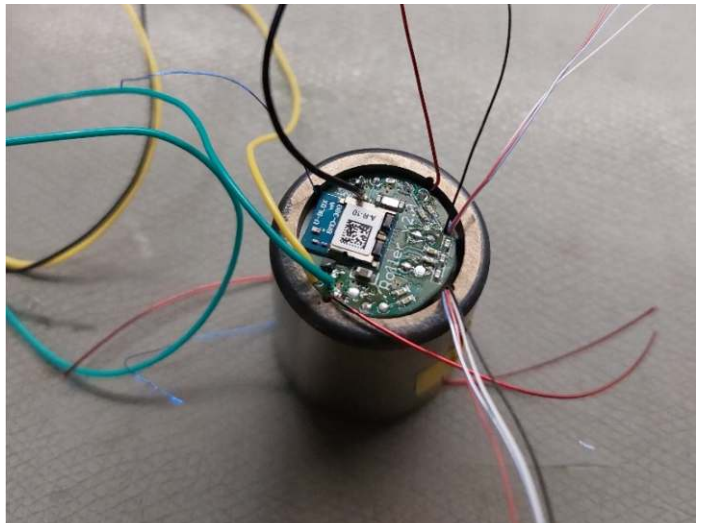
- Wälzkörper mit integrierter Sensorik für Last (DMS) und Drehbewegung (MEMS-IMU)
- **Wälzkörperdurchmesser ca. 23 mm**
- **Wellendrehzahlen bis 1500 1/min**
- Hochkompakte, batteriebetriebene Funktelemetrie (proprietäres i4M-Protokoll)
- Integrierte Lastmesstechnik
  - Auf den Stirnseiten appliziert, keine Zentralbohrung
  - 24 bit Auflösung, rauscharm, **2 kHz Abtastrate**
- Integrierte Bewegungsmesstechnik
  - MEMS-basierte inertiale Messeinheit (IMU)
  - Dreiachsiger Beschleunigungssensor (Accelerometer)
  - Dreiachsiger Drehratensensor (Gyrometer)
  - 16 bit Auflösung, rauscharm, **1,6 kHz Abtastrate**
- Versorgung über integrierten Akku, > 3 h durchgehende Live-Messdauer
- Am Prüfstand über Kontaktstifte aufladbar

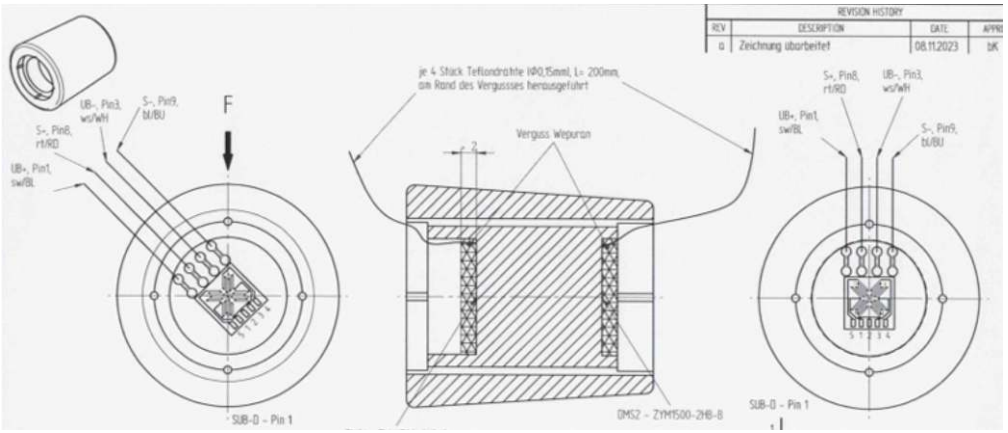


# Wälzkörperintegrierte Messtechnik / i4M Smart Roller

- DMS auf Stirnseiten appliziert
- Keine Durchgangsbohrung notwendig
- Zwei Platinen
  - Mess-Platine mit Sensorik und Funktelemetrie
  - Power-Platine mit Akku und Ladeelektronik
- Gehärteter Wälzkörper, bearbeitet im Funkenerosionsverfahren
- Vollständig mit Epoxidharz vergossen





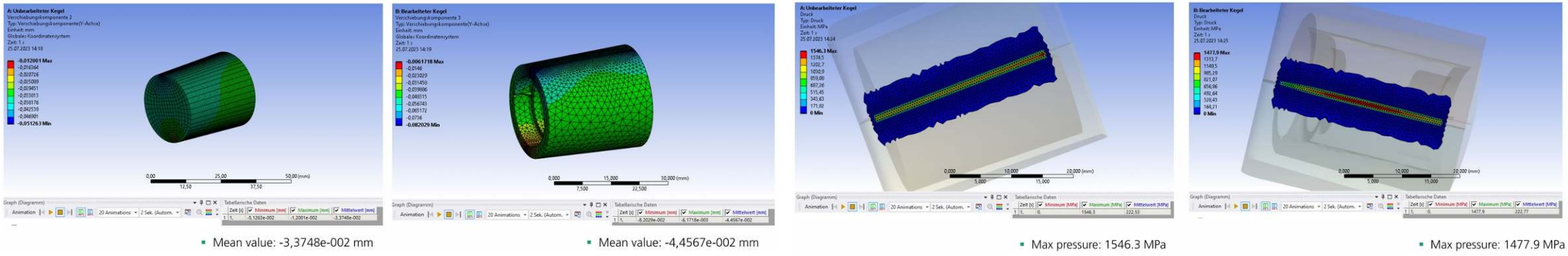





Fraunhofer IWES
i4M technologies GmbH
intelligence for mechanical systems

# Wälzkörperintegrierte Messtechnik / i4M Smart Roller

- Die notwendige Bearbeitung der Wälzkörper zur Integration der Messtechnik verändert das Systemverhalten
- Finite-Elemente-Simulationen zeigen, wie sich Steifigkeit und Pressungen ändern
- Die Versuchsparameter müssen diese Änderungen berücksichtigen (z. B. Anpassung der Lasten)




Änderung der Wälzkörpersteifigkeit

Änderung der Kontaktpressungen

Quelle: FE-Simulationen von Fraunhofer IWES



Fraunhofer IWES
i4M technologies GmbH
intelligence for mechanical systems

# Gliederung

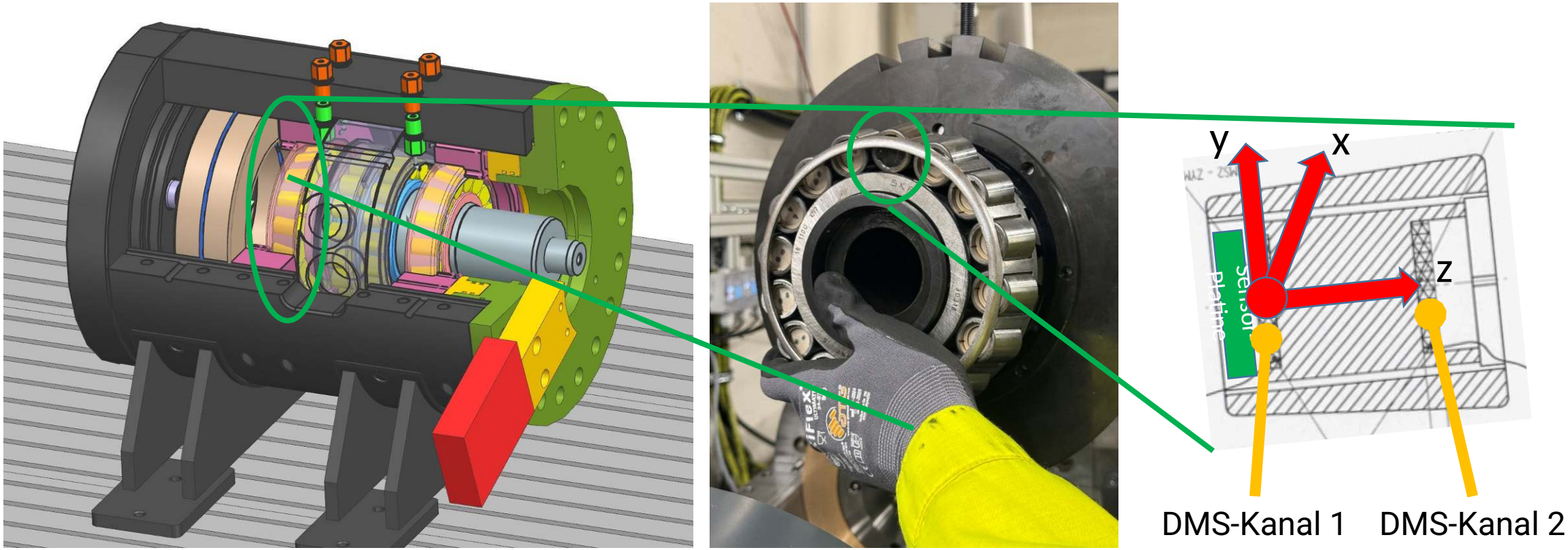
1. Vorstellung, Einleitung & Motivation
2. Prüfstandsaufbau & Lager
3. Wälzkörperintegrierte Messtechnik
4. Daten & Analyse-Methoden
5. Ergebnisse
6. Zusammenfassung & Ausblick



Fraunhofer IWES i4M technologies GmbH intelligence for mechanical systems

# Daten & Analyse-Methoden

- Definition des Koordinatensystems der wälzkörperintegrierten Bewegungssensorik
- X und Y liegen in der Ebene der Wälzkörperstirnflächen, Z liegt auf der Rotationsachse des Wälzkörpers
- DMS-Kanal 1 liegt unter der Mess-Platine (kleinere Stirnfläche),
  DMS-Kanal 2 liegt unter der Power-Platine (größere Stirnfläche)

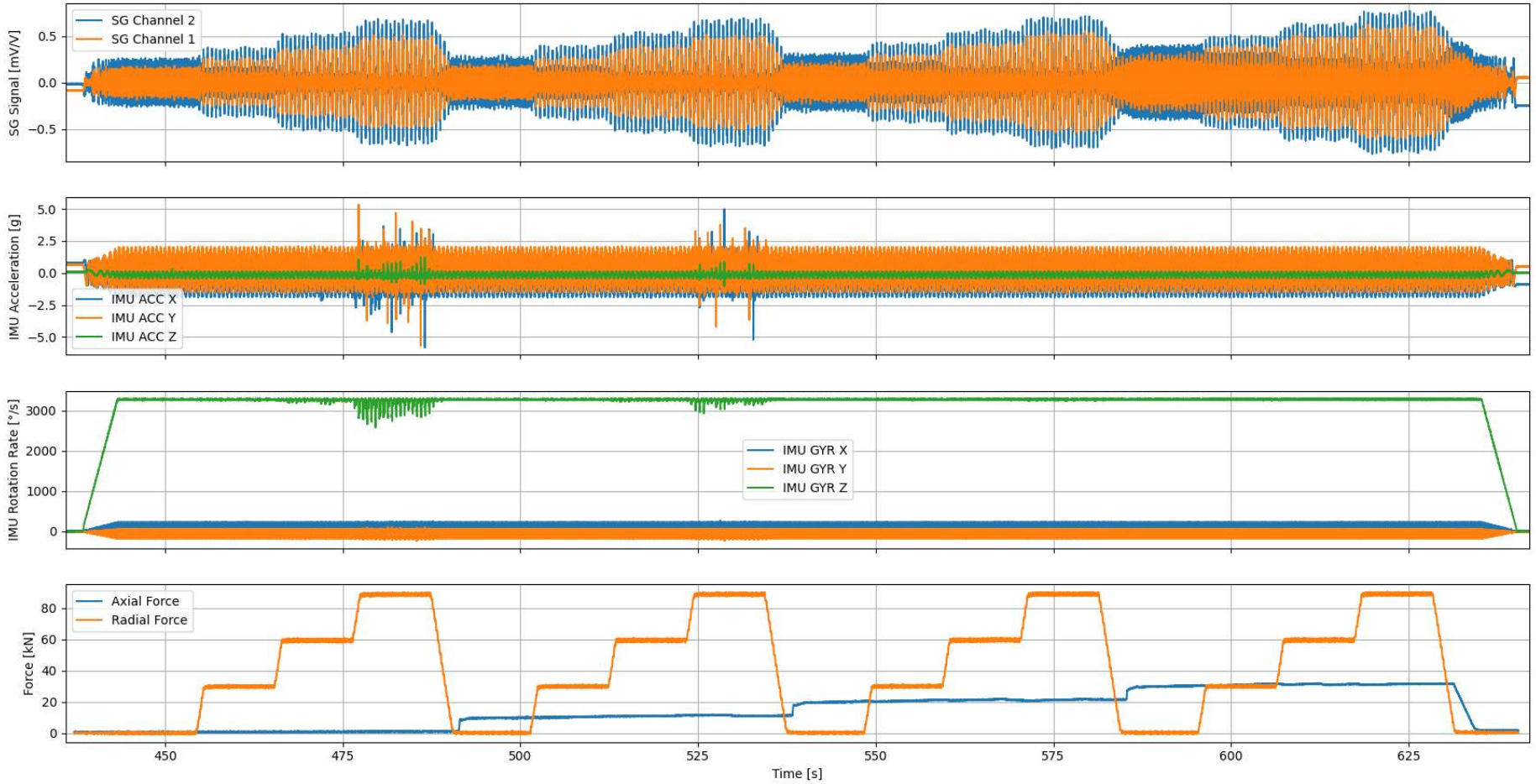





Fraunhofer IWES i4M technologies GmbH intelligence for mechanical systems

# Daten & Analyse-Methoden

- Diskussion der gelieferten Daten anhand eines Beispiels (Welle 250 1/min)
- Lastvariation am Prüfstand: Steigerung der Radialkraft 0 bis 90 kN / Axialkraft 0 bis 30 kN

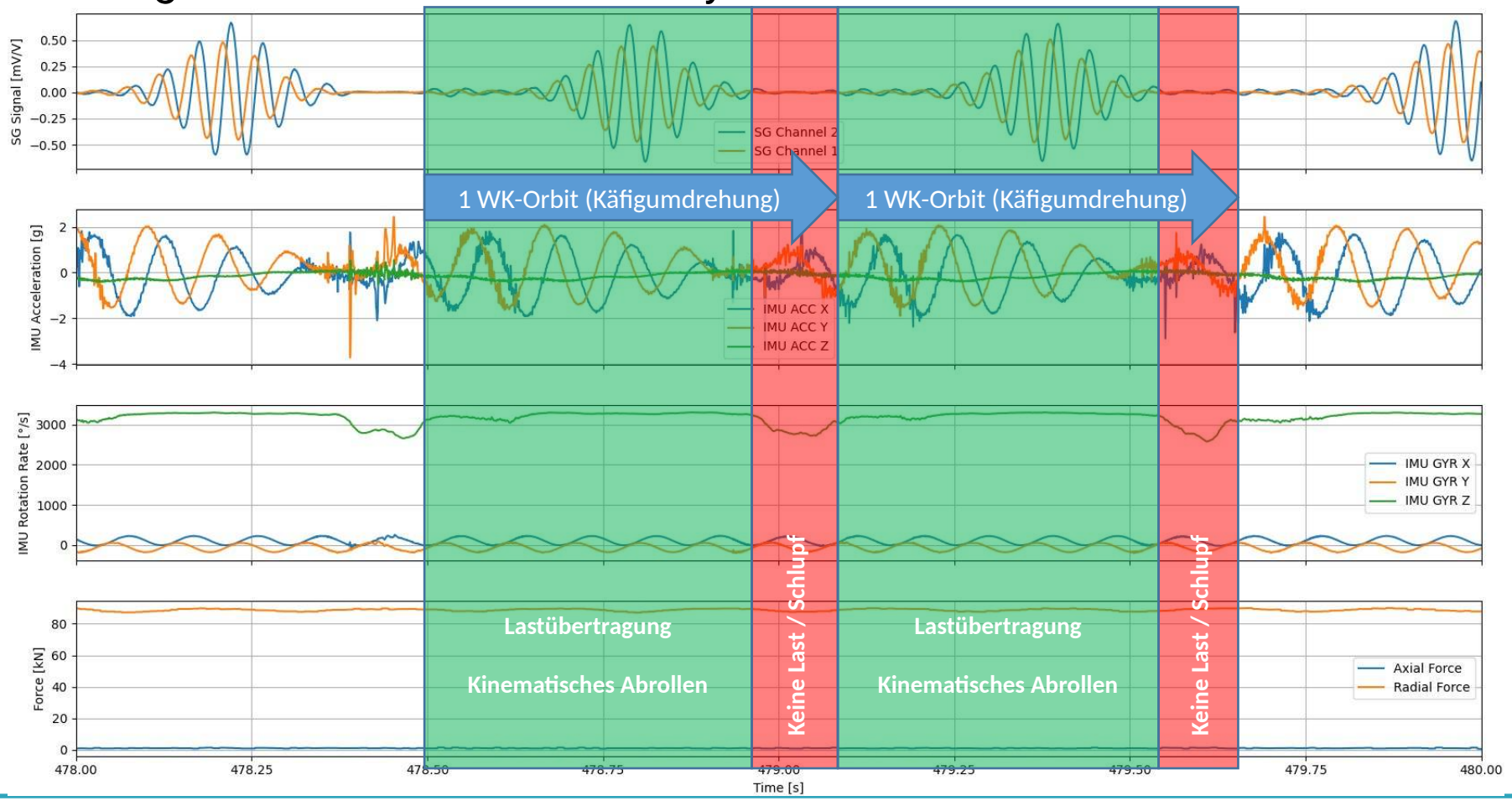





Fraunhofer IWES
i4M technologies GmbH
intelligence for mechanical systems

# Daten & Analyse-Methoden

- Daten an einem Beispiel (Welle 250 1/min, 90 kN rad. / 0 kN ax., Detail)
- Schlupferkennung aus Accelerometer- und Gyrometer-Daten



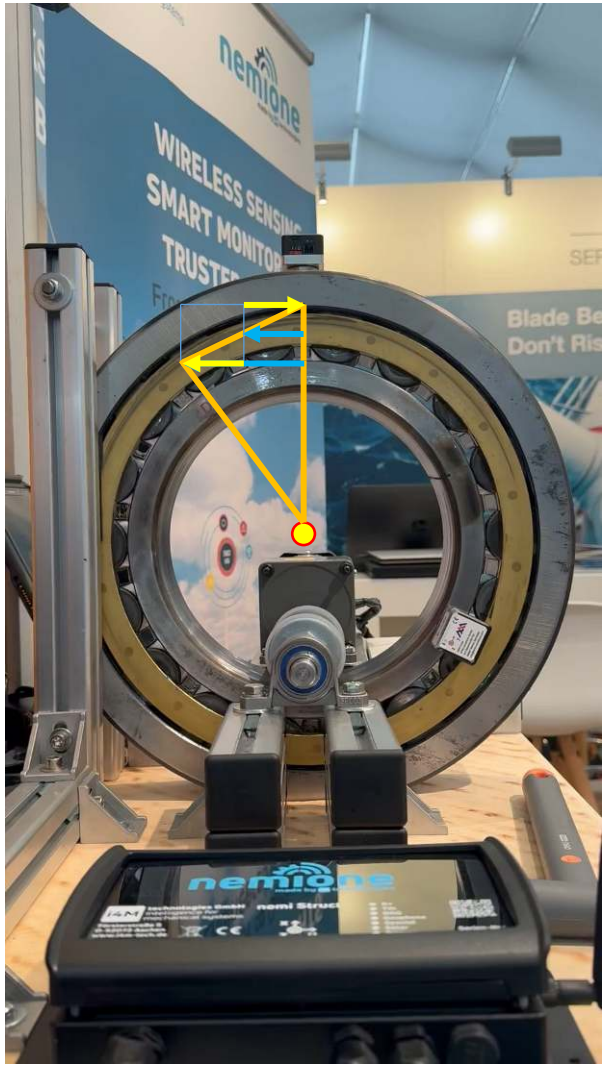



Fraunhofer IWES i4M technologies GmbH intelligence for mechanical systems

# Daten & Analyse-Methoden

- Die kinematischen Zusammenhänge lassen sich aus einer Analyse der Momentanpole ableiten
- Die Drehbewegung der Wälzkörper ist eine Überlagerung zweier einzelner Drehbewegungen
  - Drehung des Wälzkörpers um die zentrale Wellenachse zusammen mit dem Käfig und dem gesamten Wälzkörpersatz, hier gegen den Uhrzeigersinn
  - Drehung des Wälzkörpers um die eigene Achse, hier im Uhrzeigersinn
- Wichtig: Die im Wälzkörper gemessene Drehfrequenz ist die Überlagerung / Summe dieser beiden Drehbewegungen mit entgegengesetzten Vorzeichen
- Beispiel:
  - Wellendrehzahl (fn): + 250 1/min
  - Käfigdrehzahl (fK): + 102 1/min
  - Rollendrehzahl (fWa) - 605 1/min
  - Rollendrehzahl (gemessen) - 553 1/min (= 102 1/min - 605 1/min)

$$f_K = \frac{1}{2} f_n \left(1 - \frac{D_W}{D_T} \cos \alpha_B\right) \qquad f_{WA} = \frac{1}{2} f_n \frac{D_T}{D_W} \left[1 - \left(\frac{D_W}{D_T} \cos \alpha_B\right)^2\right]$$

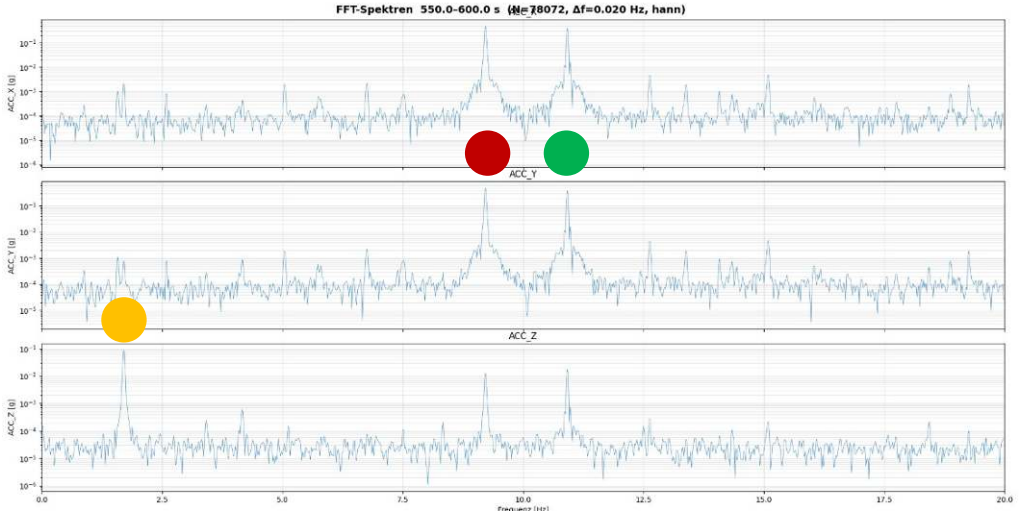


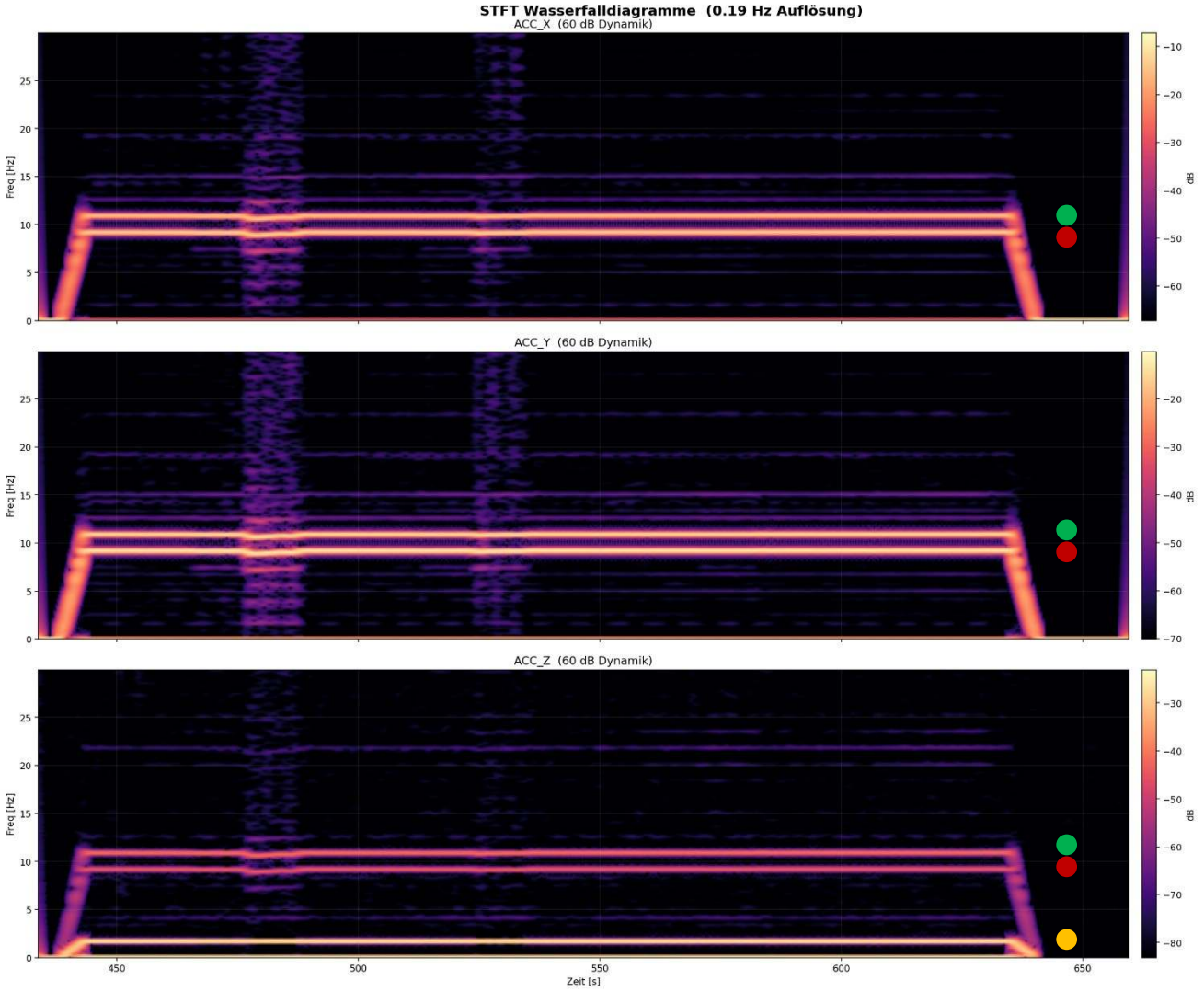



Fraunhofer IWES i4M technologies GmbH intelligence for mechanical systems

# Daten & Analyse-Methoden

- Drehfrequenzen und Schlupf in den IMU-Beschleunigungssignalen
- 250 1/min an der Welle ergeben folgende kinematische Frequenzen:
  - Welle: 4,167 Hz
  - Käfig: 1,706 Hz
  - Rolle o. Käfig: 10,926 Hz
  - Rolle m. Käfig: 9,220 Hz



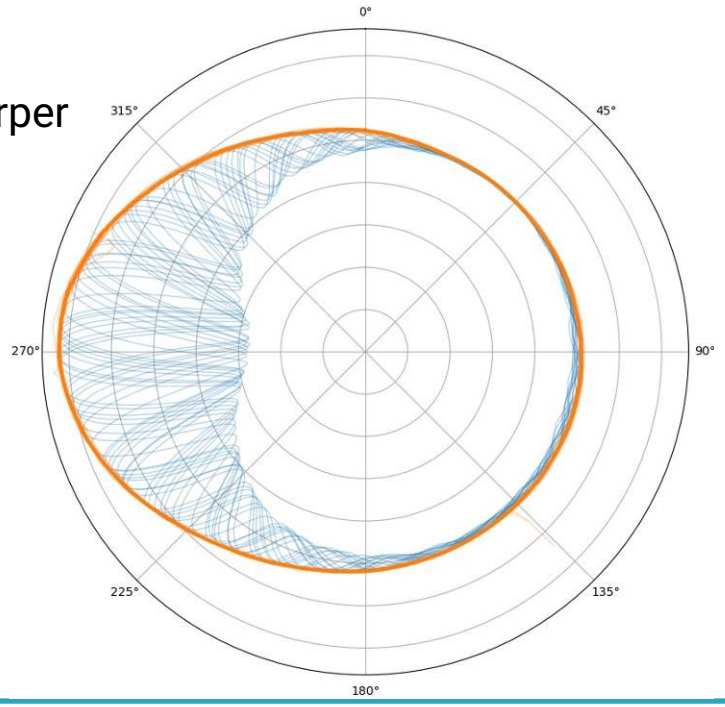


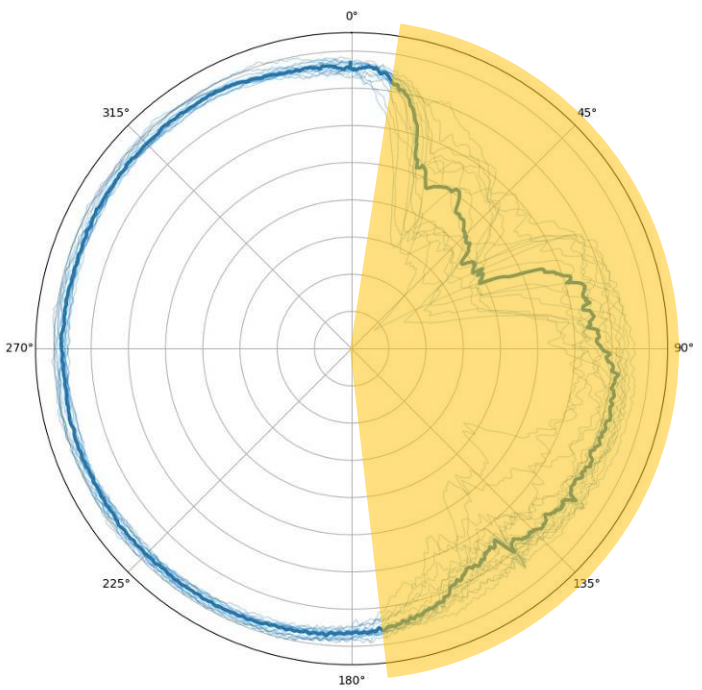

Fraunhofer IWES i4M technologies GmbH intelligence for mechanical systems

# Daten & Analyse-Methoden

- Drehzahl des Wälzkörpers aus dem Z-Gyrometer (optional aus den Nulldurchgängen der X/Y-Beschleunigungen), Wellendrehzahl (als kinematische Referenz) aus den Prüfstandsdaten
- Orbitposition des Wälzkörpers (= Käfigdrehwinkel, nicht Wellendrehwinkel!) aus dem Verlauf der Z-Beschleunigung des Wälzkörpers
- Darstellung aller Messgrößen über den Orbit möglich (90 kN rad. / 0 kN ax.):

Lastverteilung Wälzkörper (DMS-Kanal 2)



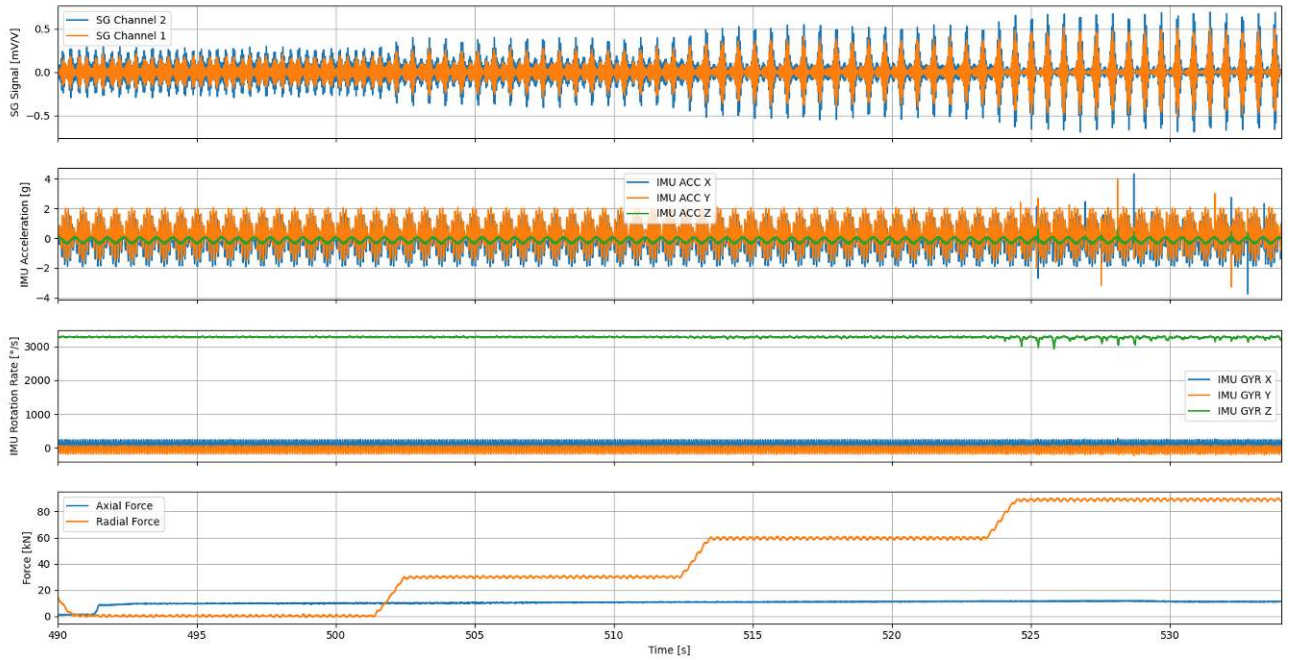

Wälzkörperschlupf

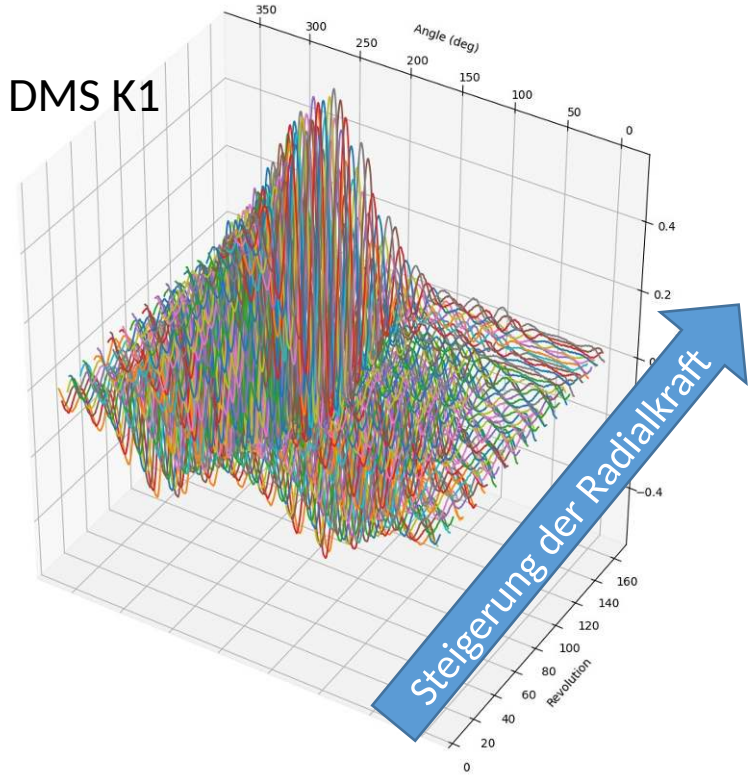


Fraunhofer IWES i4M technologies GmbH intelligence for mechanical systems

# Daten & Analyse-Methoden

- Die Messdaten lassen sich in einzelne Umläufe zerlegen und zeitliche Entwicklungen von Umlauf zu Umlauf darstellen
- Randbedingung: Radialkraft steigend von 0 auf 90 kN bei konstanter Axialkraft von 10 kN



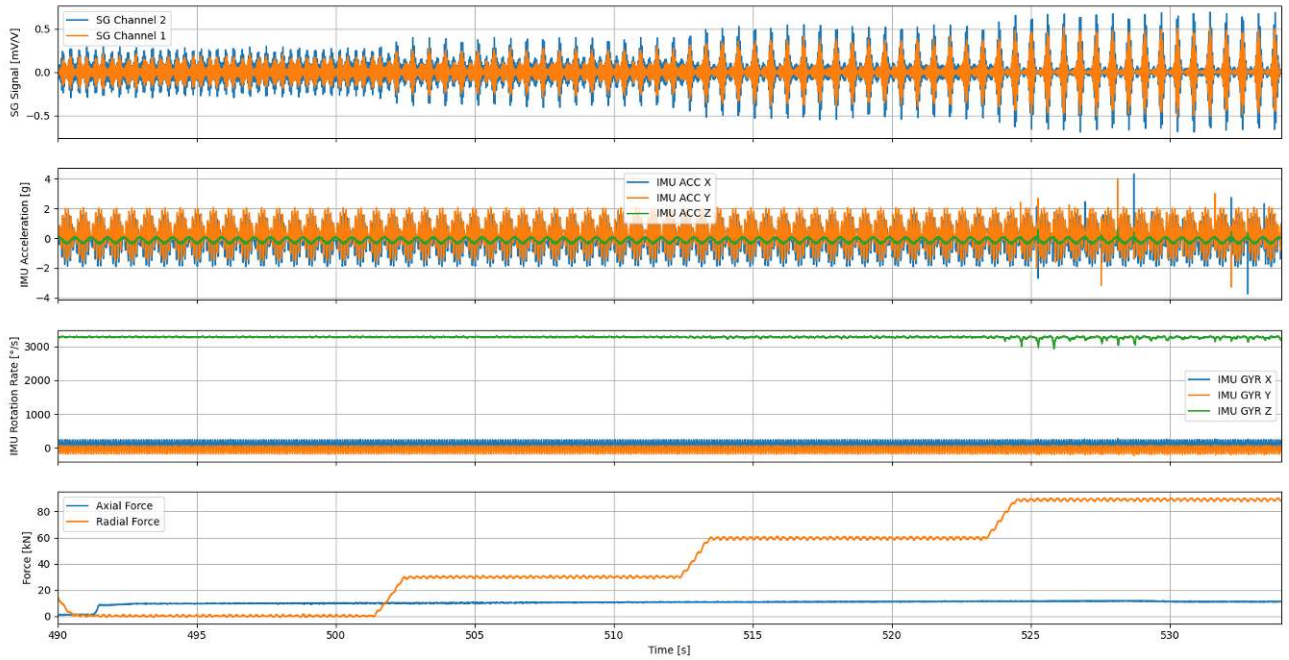





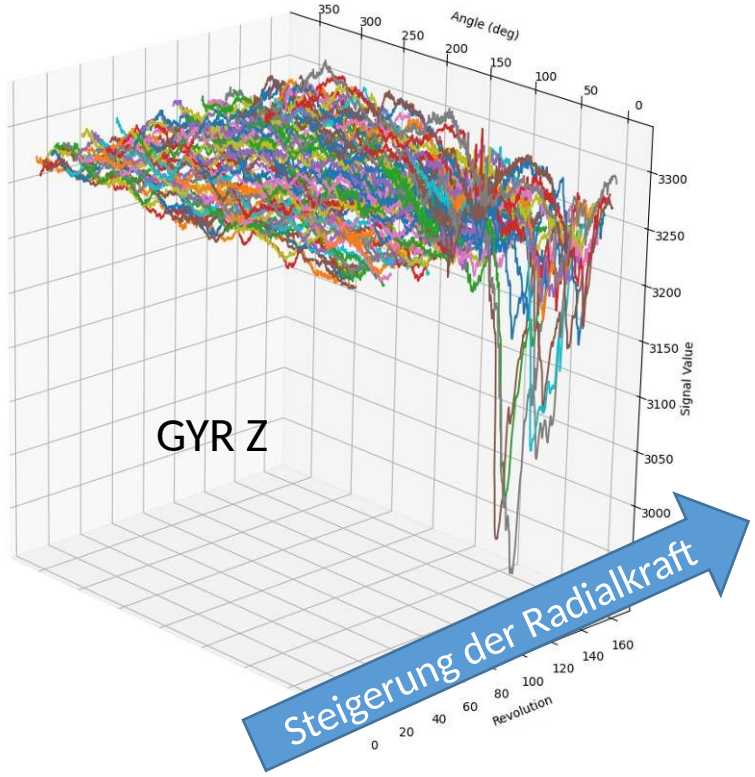

Fraunhofer IWES
i4M technologies GmbH
intelligence for mechanical systems

# Daten & Analyse-Methoden

- Die Messdaten lassen sich in einzelne Umläufe zerlegen und zeitliche Entwicklungen von Umlauf zu Umlauf darstellen
- Randbedingung: Radialkraft steigend von 0 auf 90 kN bei konstanter Axialkraft von 10 kN




Steigerung der Radialkraft






Fraunhofer IWES i4M technologies GmbH intelligence for mechanical systems

# Gliederung

1. Vorstellung, Einleitung & Motivation
2. Prüfstandsaufbau & Lager
3. Wälzkörperintegrierte Messtechnik
4. Daten & Analyse-Methoden
5. Ergebnisse
6. Zusammenfassung & Ausblick



Fraunhofer IWES i4M technologies GmbH intelligence for mechanical systems

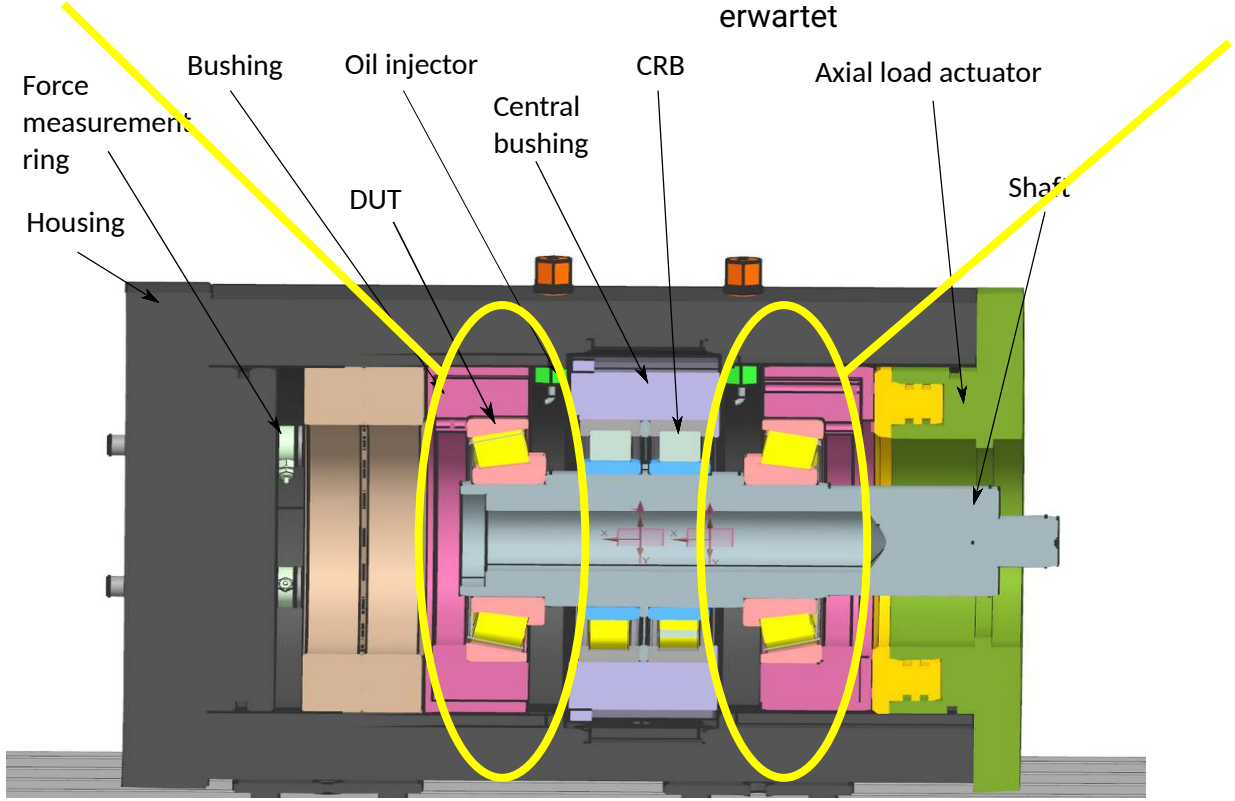
# Messergebnisse

## „Bearing Sensor Lid“

- Weiter entfernt vom Ort der Axialkrafteinleitung
- Reibung im System reduziert die Axialkraft
- Die Wirkung der Axialkraft ist geringer, daher wird hier mehr Schlupf erwartet

## „Bearing Actuator“

- Direkt am Ort der Axialkrafteinleitung
- Reibung spielt hier nur eine untergeordnete Rolle
- Der Einfluss der Axialkraft ist größer, daher wird hier weniger Schlupf erwartet




DMS-Kanäle: 1 2 2 1

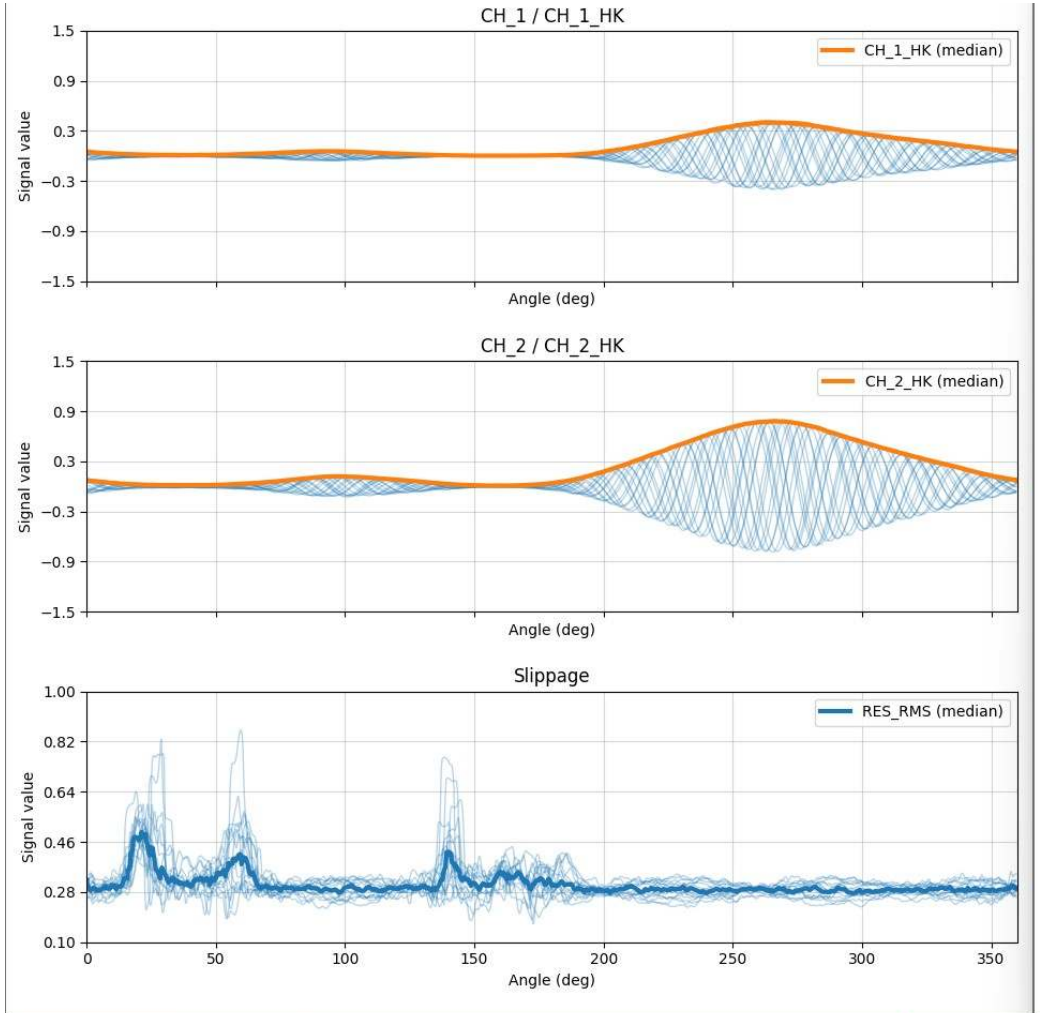


Fraunhofer IWES i4M technologies GmbH intelligence for mechanical systems

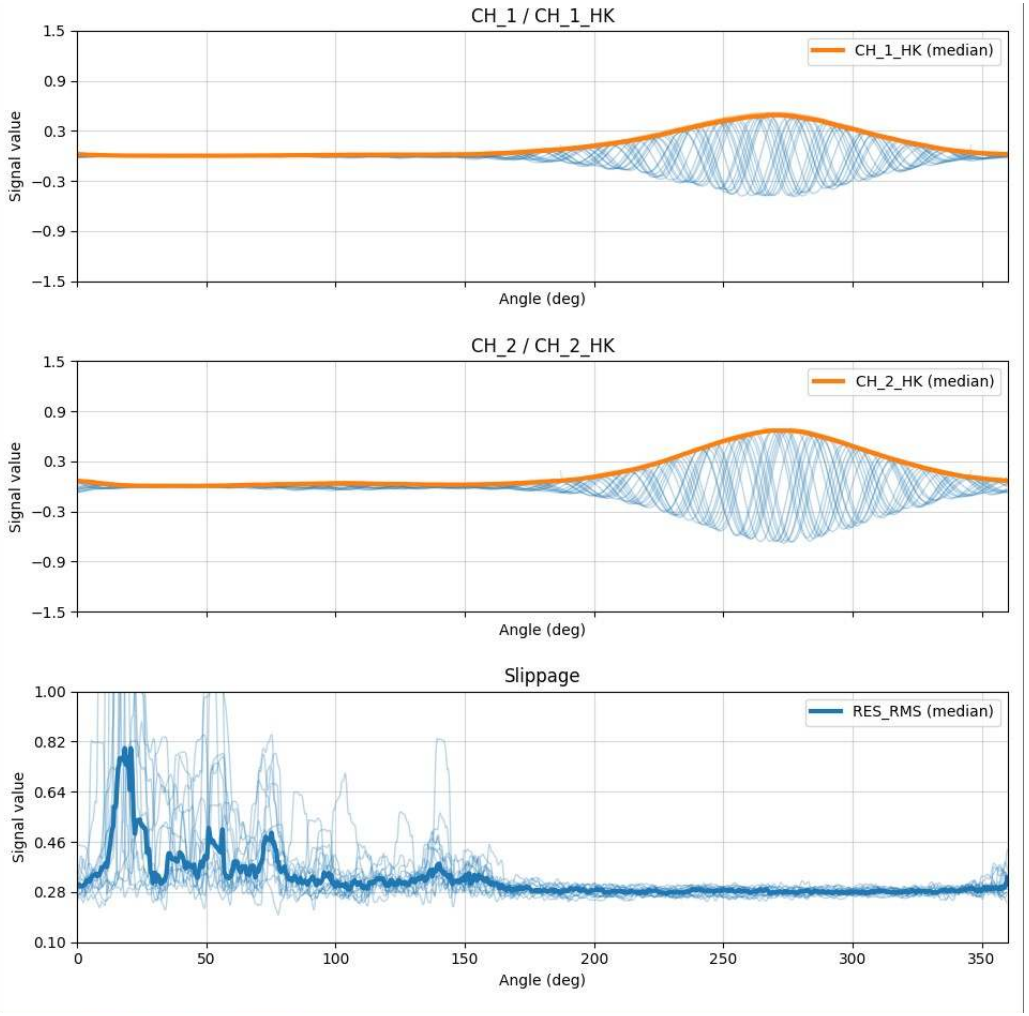
# Messergebnisse – Last- und Schlupfverteilungen

90 kN Radiallast, 0 kN Axiallast

## „Bearing Sensor Lid“



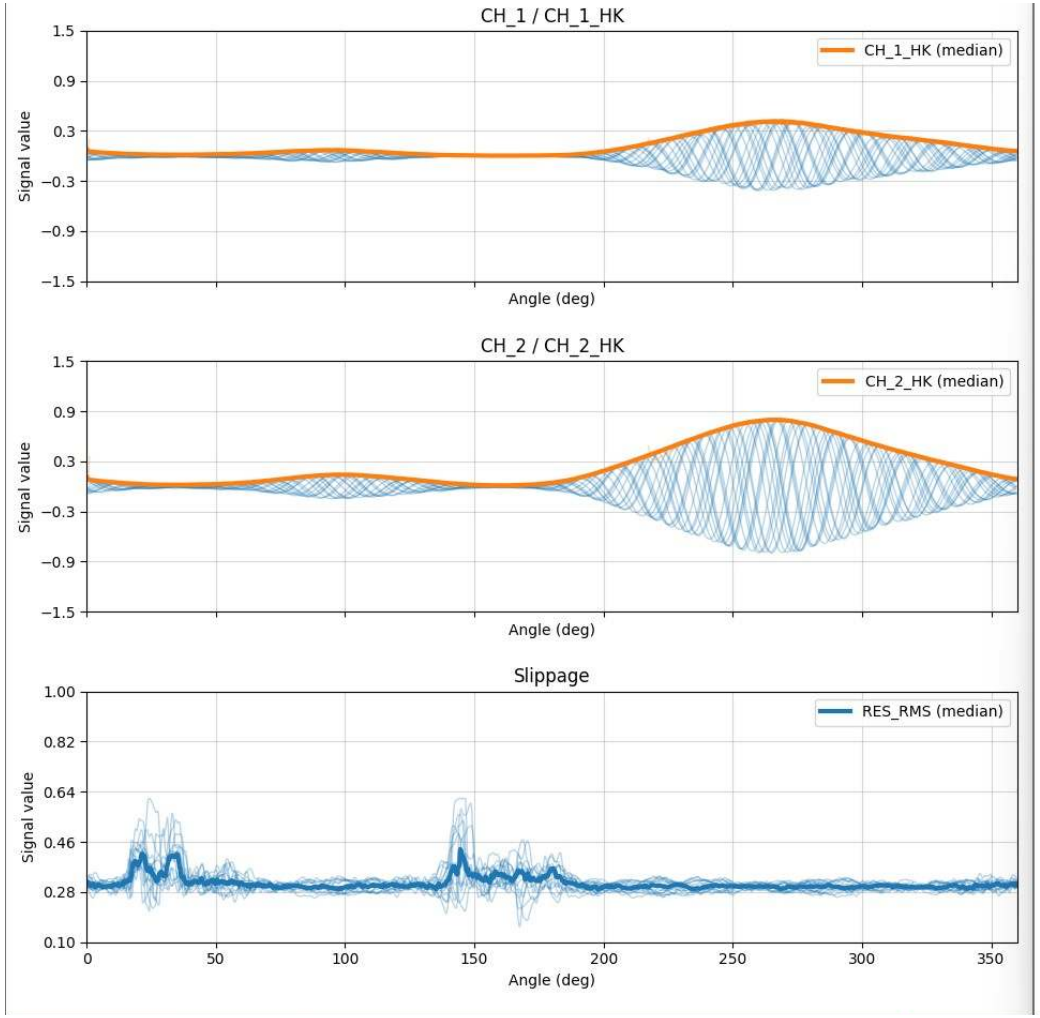

## „Bearing Actuator“



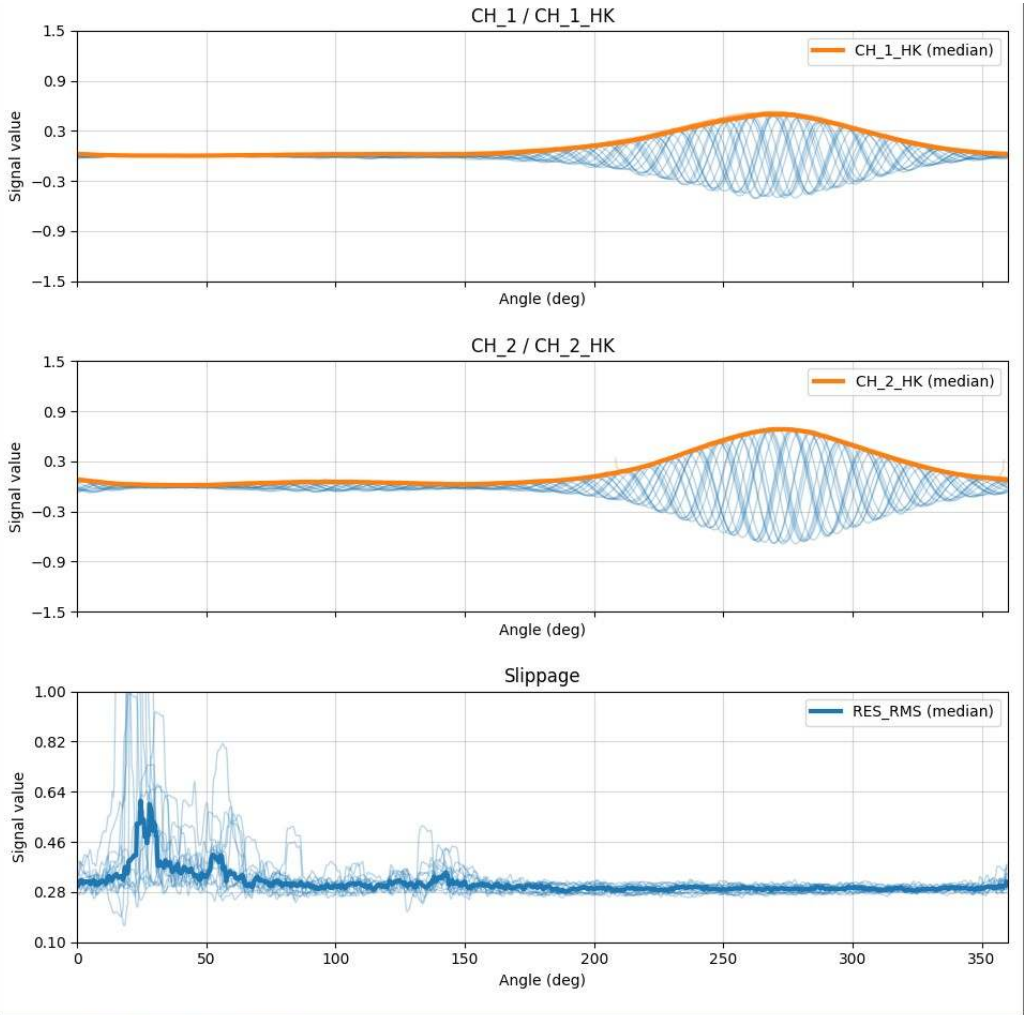
# Messergebnisse – Last- und Schlupfverteilungen

90 kN Radiallast, 10 kN Axiallast

## „Bearing Sensor Lid“



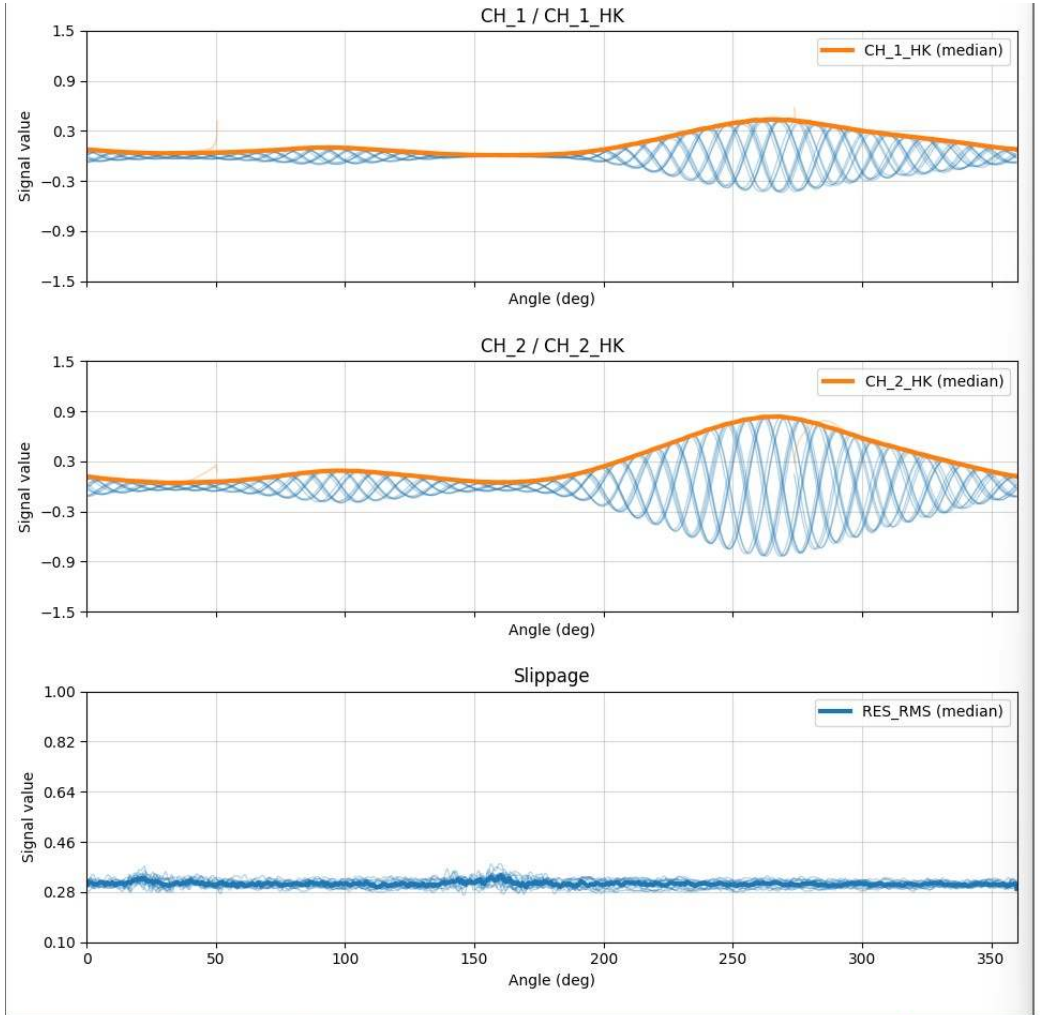

## „Bearing Actuator“



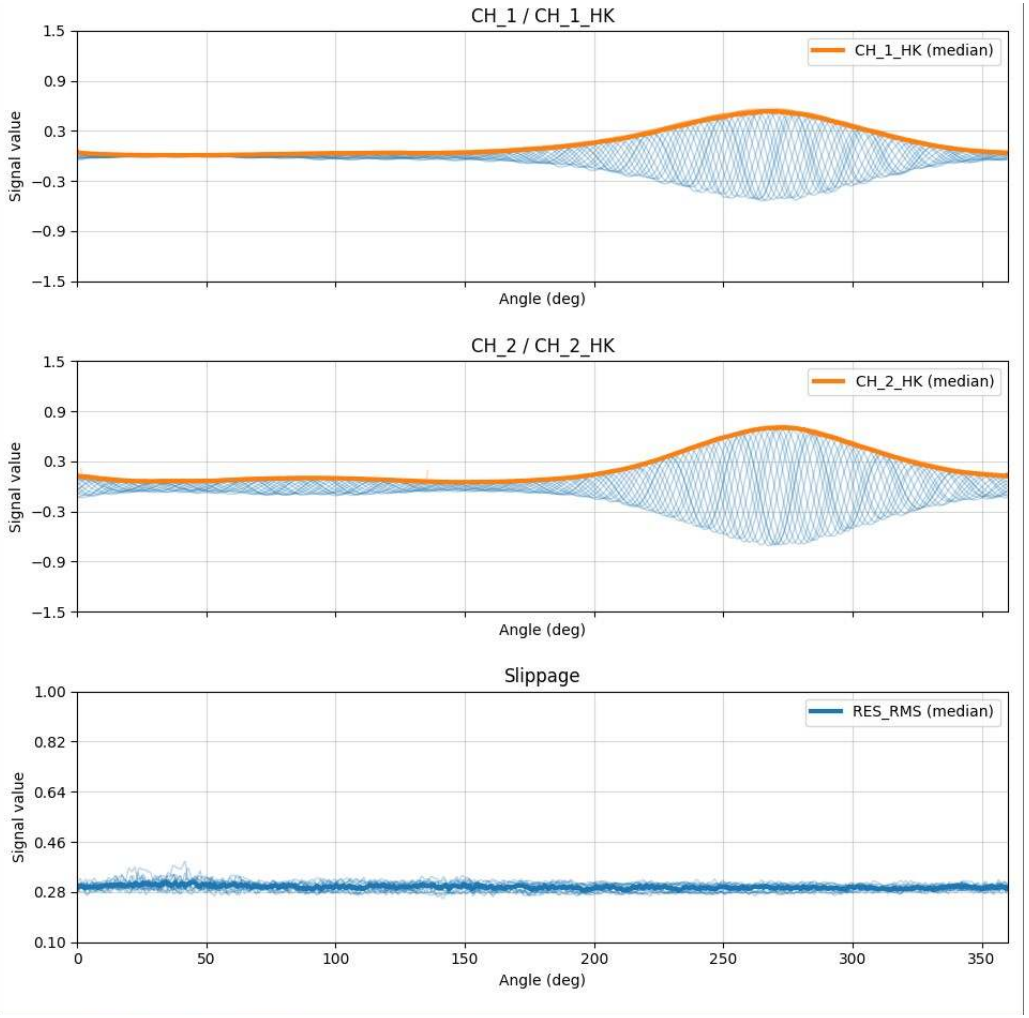
# Messergebnisse – Last- und Schlupfverteilungen

90 kN Radiallast, 20 kN Axiallast

## „Bearing Sensor Lid“



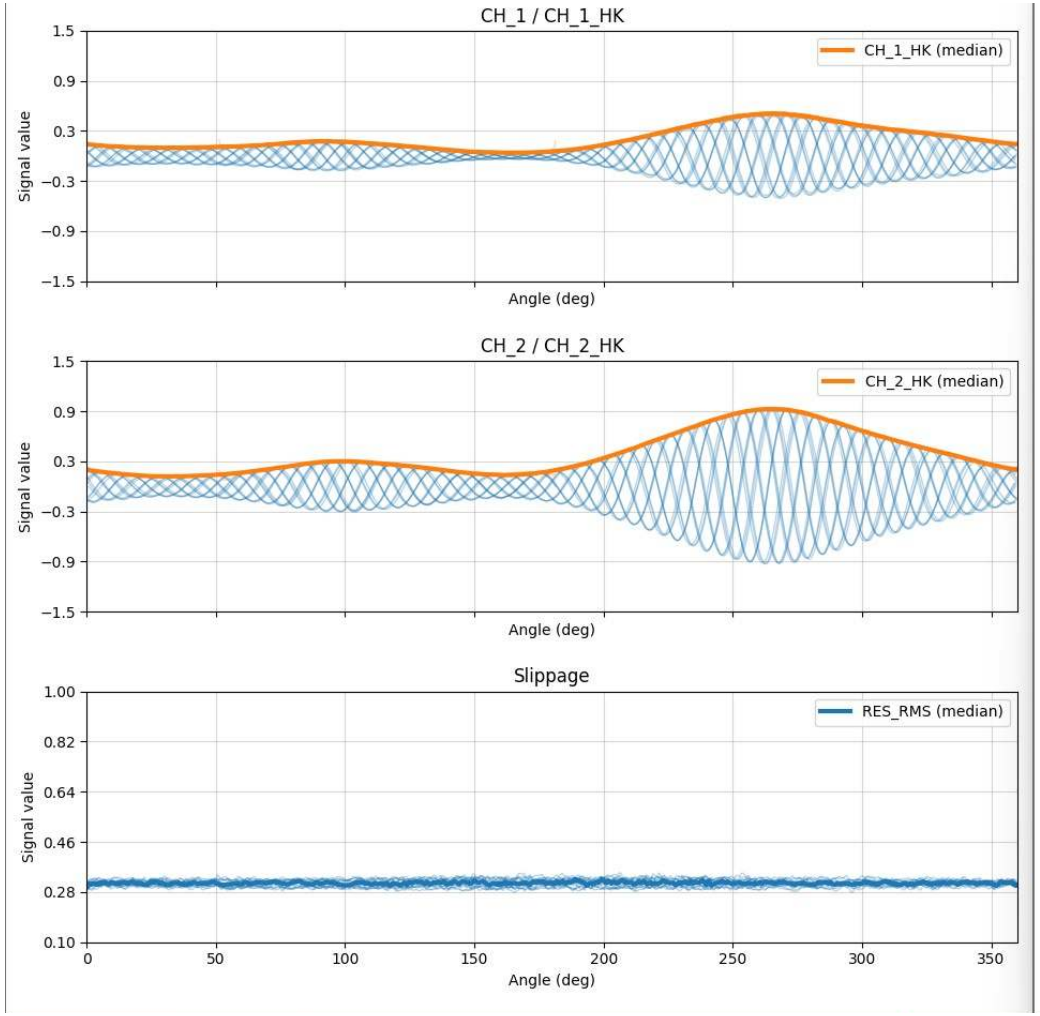

## „Bearing Actuator“



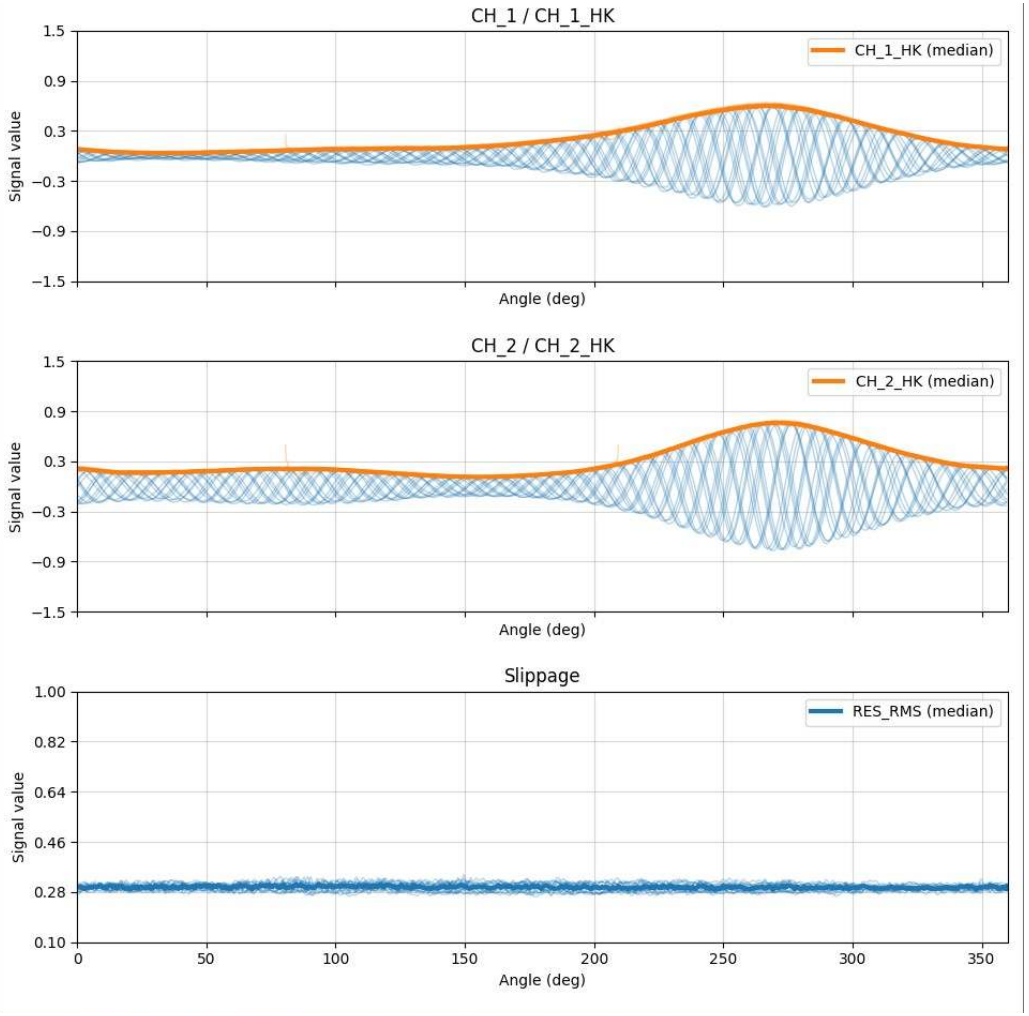
# Messergebnisse – Last- und Schlupfverteilungen

90 kN Radiallast, 30 kN Axiallast

## „Bearing Sensor Lid“




## „Bearing Actuator“



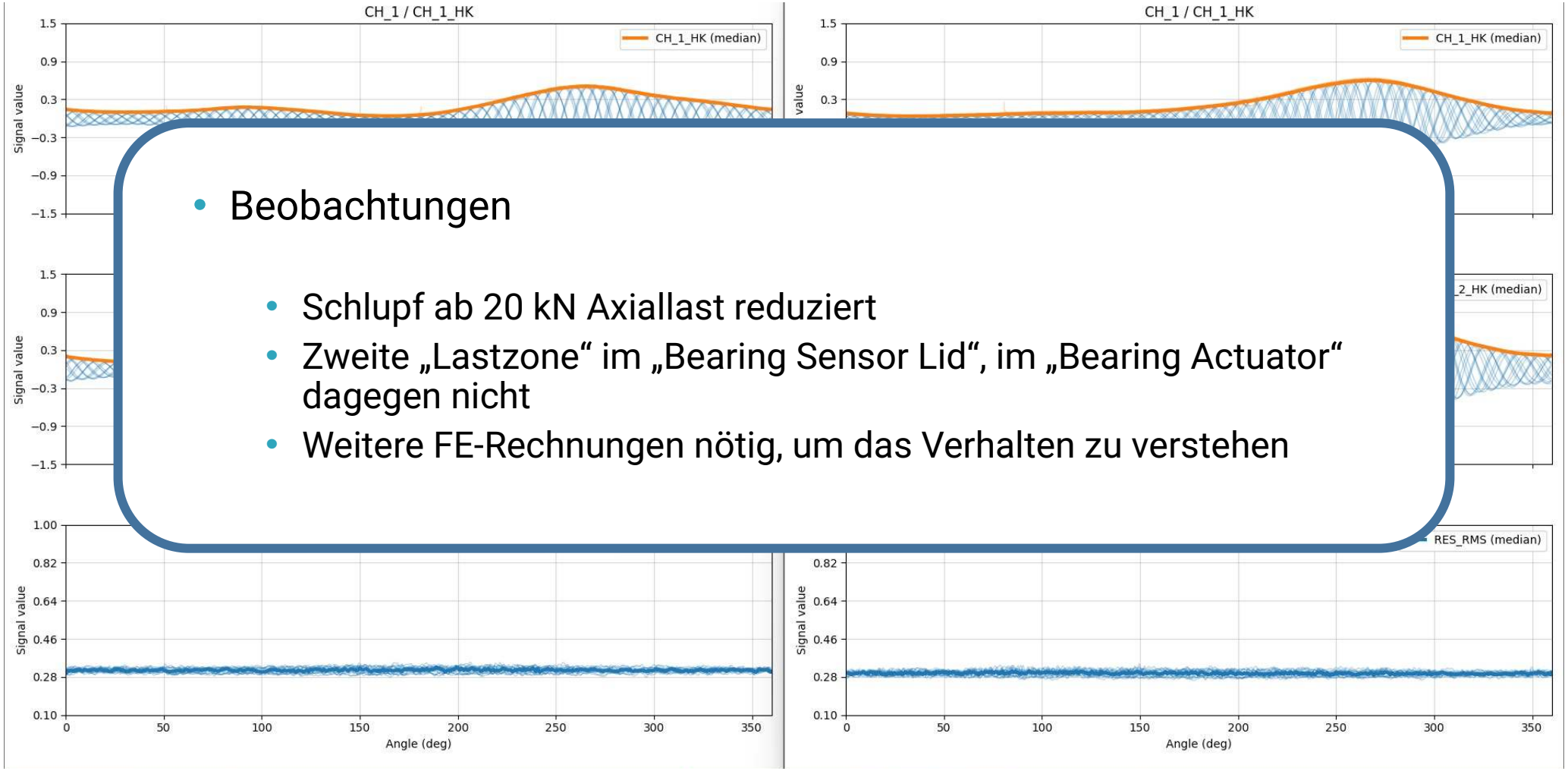



Fraunhofer IWES i4M technologies GmbH intelligence for mechanical systems

90 kN Radiallast, 30 kN Axiallast

„Bearing Sensor Lid“

„Bearing Actuator“




- Beobachtungen
  - Schlupf ab 20 kN Axiallast reduziert
  - Zweite „Lastzone“ im „Bearing Sensor Lid“, im „Bearing Actuator“ dagegen nicht
  - Weitere FE-Rechnungen nötig, um das Verhalten zu verstehen

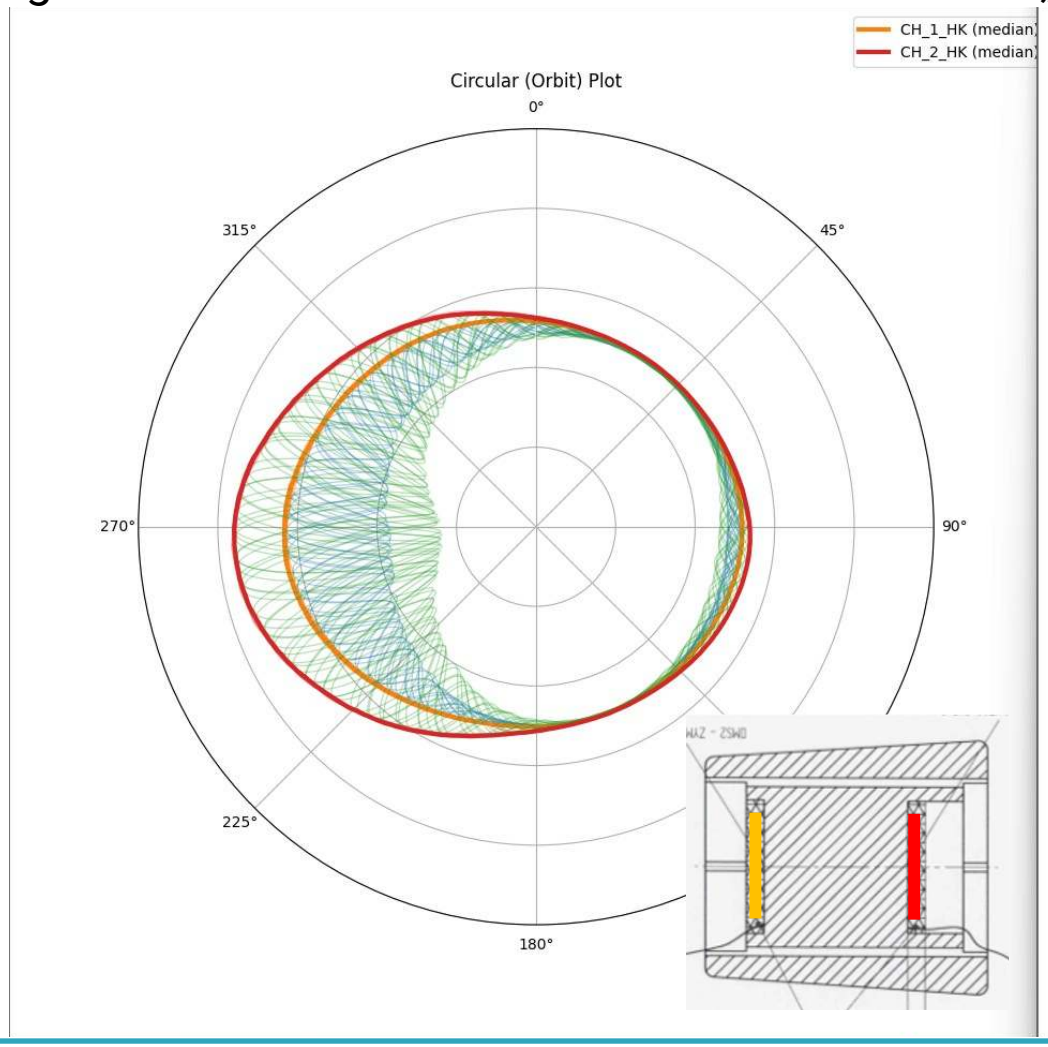


Fraunhofer IWES
i4M technologies GmbH intelligence for mechanical systems

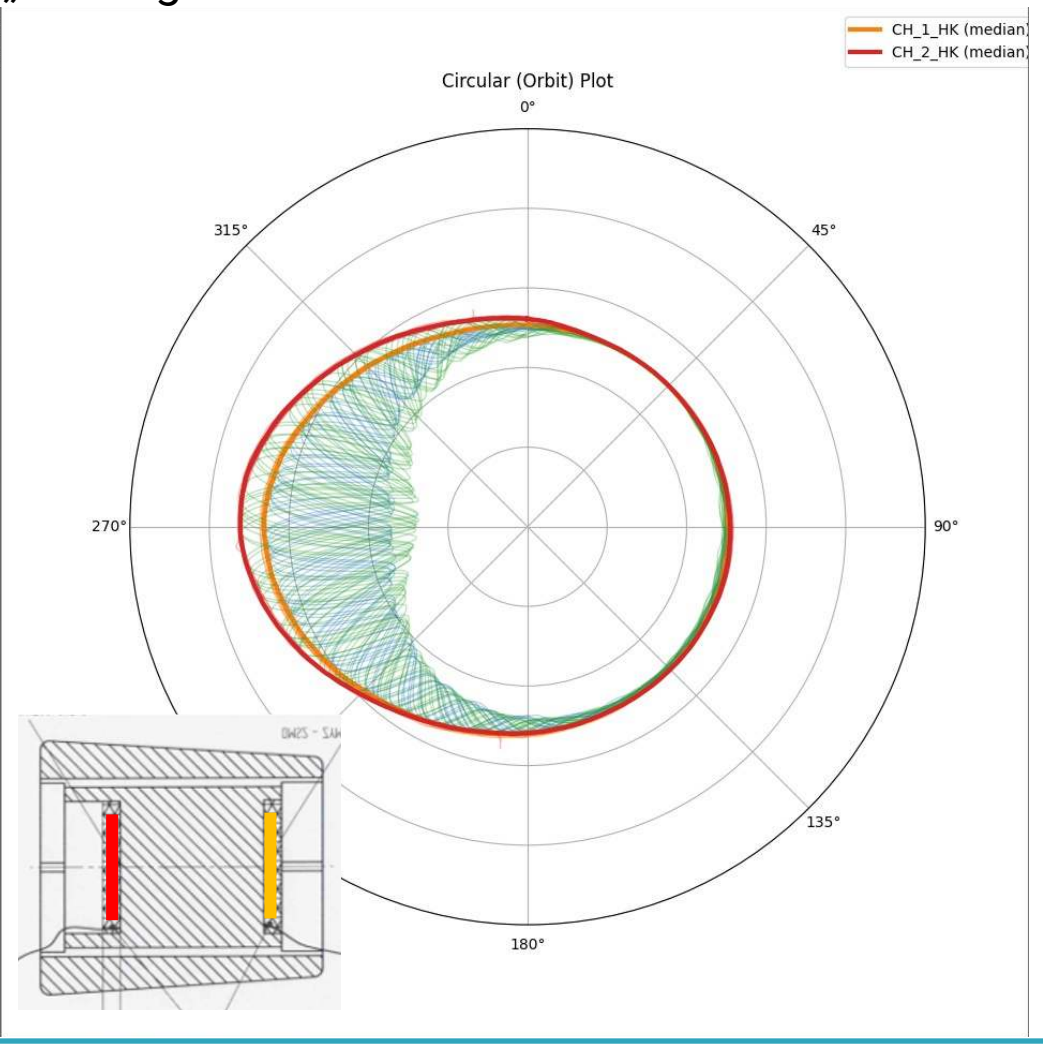
# Messergebnisse – Lastverteilung über den Orbit

90 kN Radiallast, 0 kN Axiallast

„Bearing Sensor Lid“



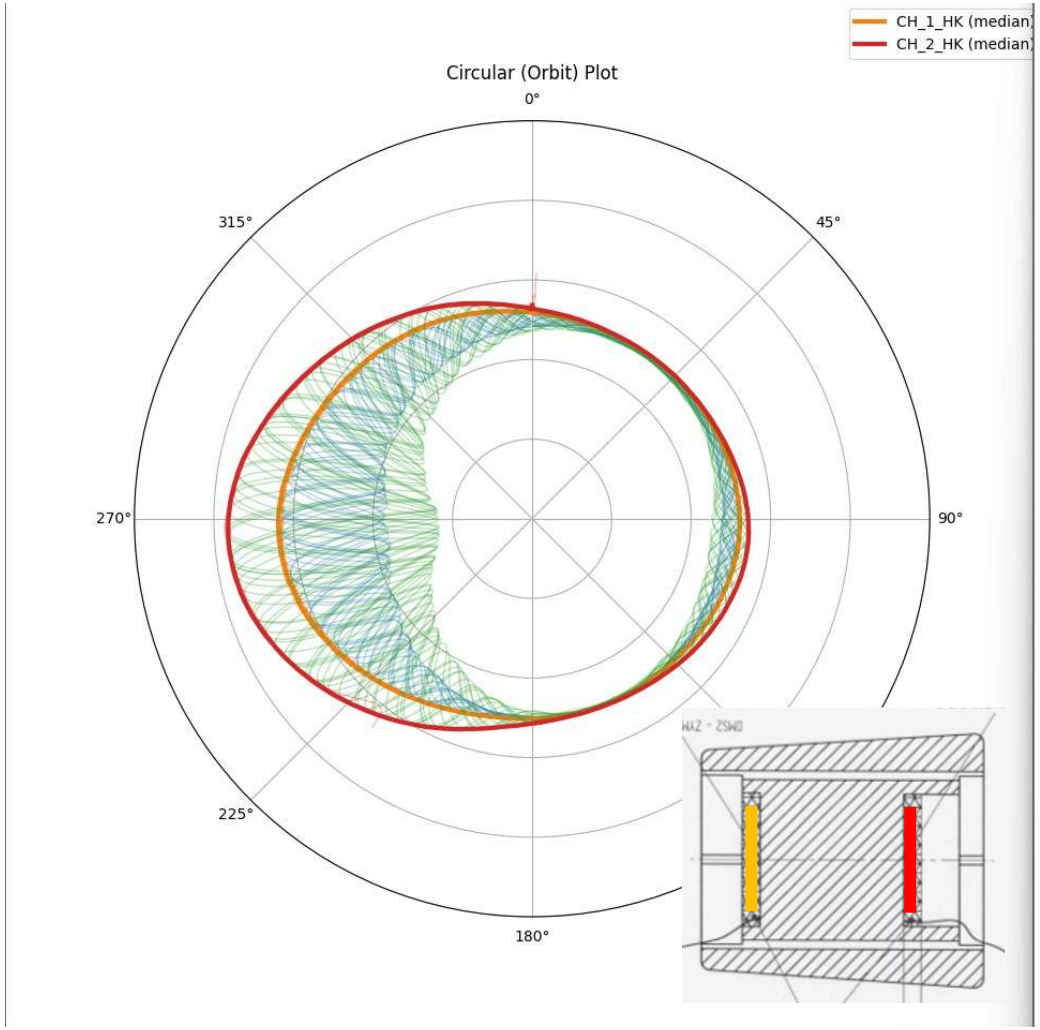

„Bearing Actuator“



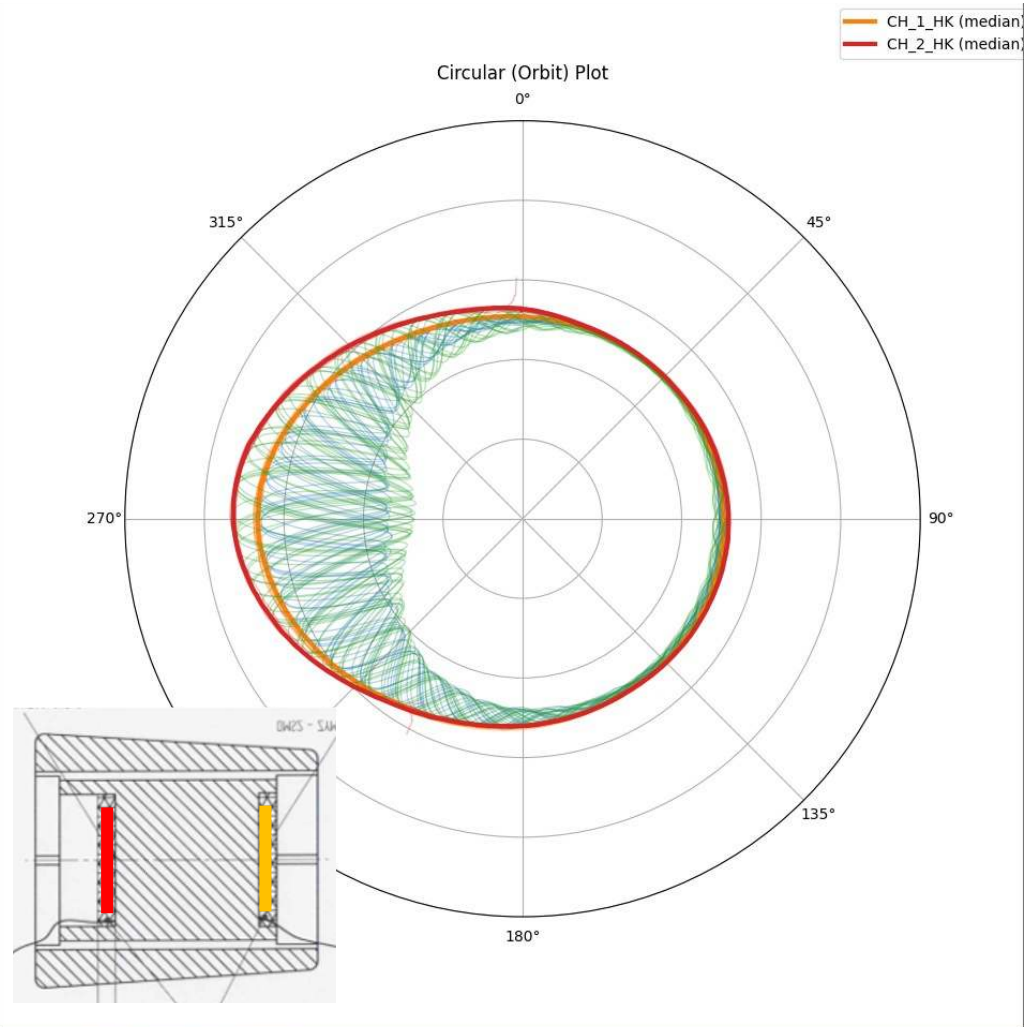
# Messergebnisse – Lastverteilung über den Orbit

90 kN Radiallast, 10 kN Axiallast

## „Bearing Sensor Lid“



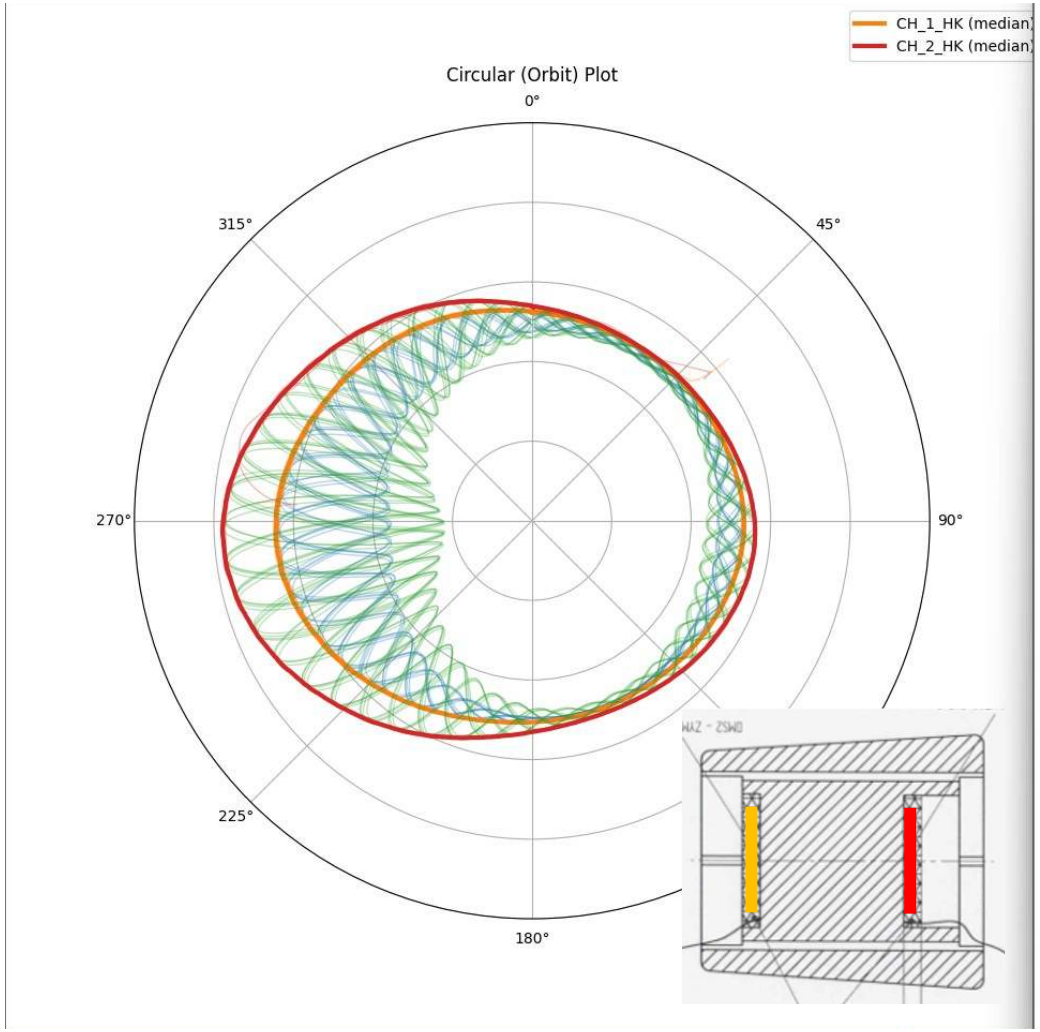

## „Bearing Actuator“



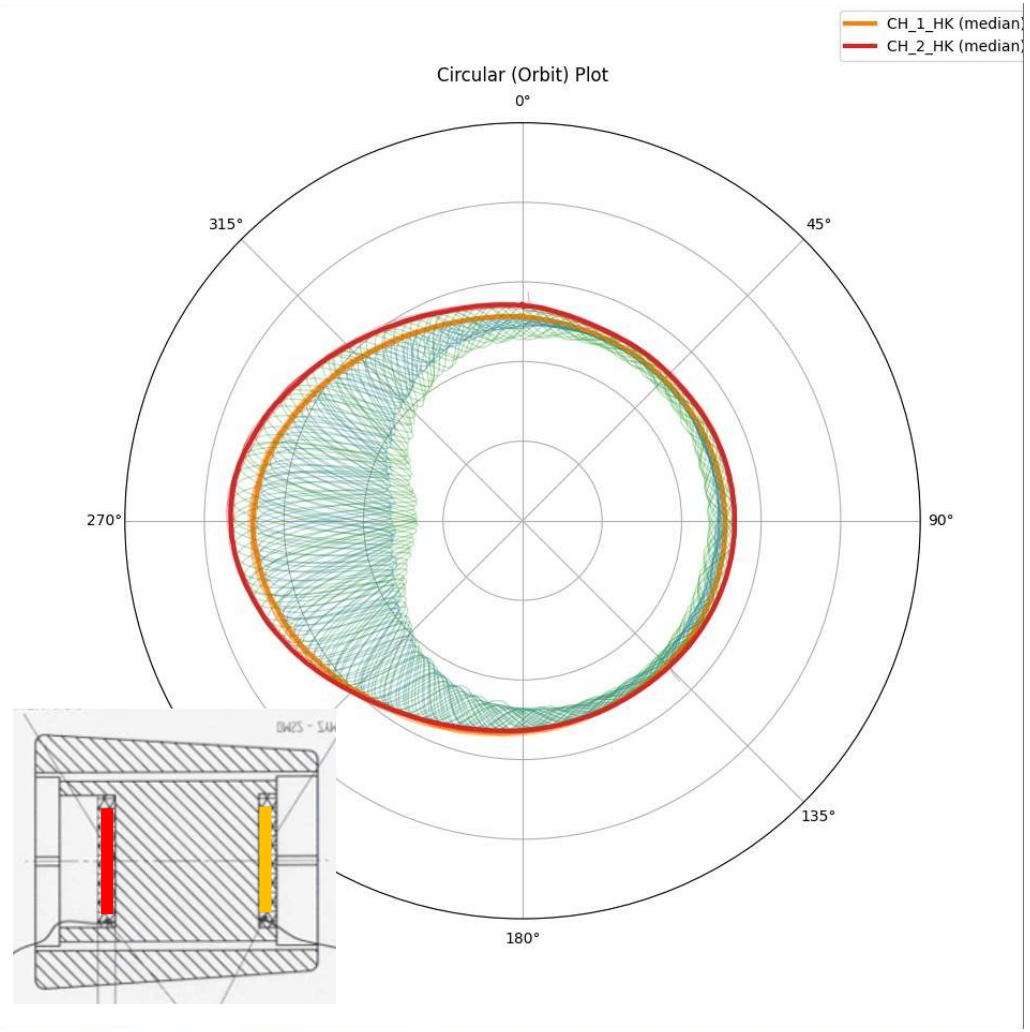
# Messergebnisse – Lastverteilung über den Orbit

90 kN Radiallast, 20 kN Axiallast

„Bearing Sensor Lid“




„Bearing Actuator“



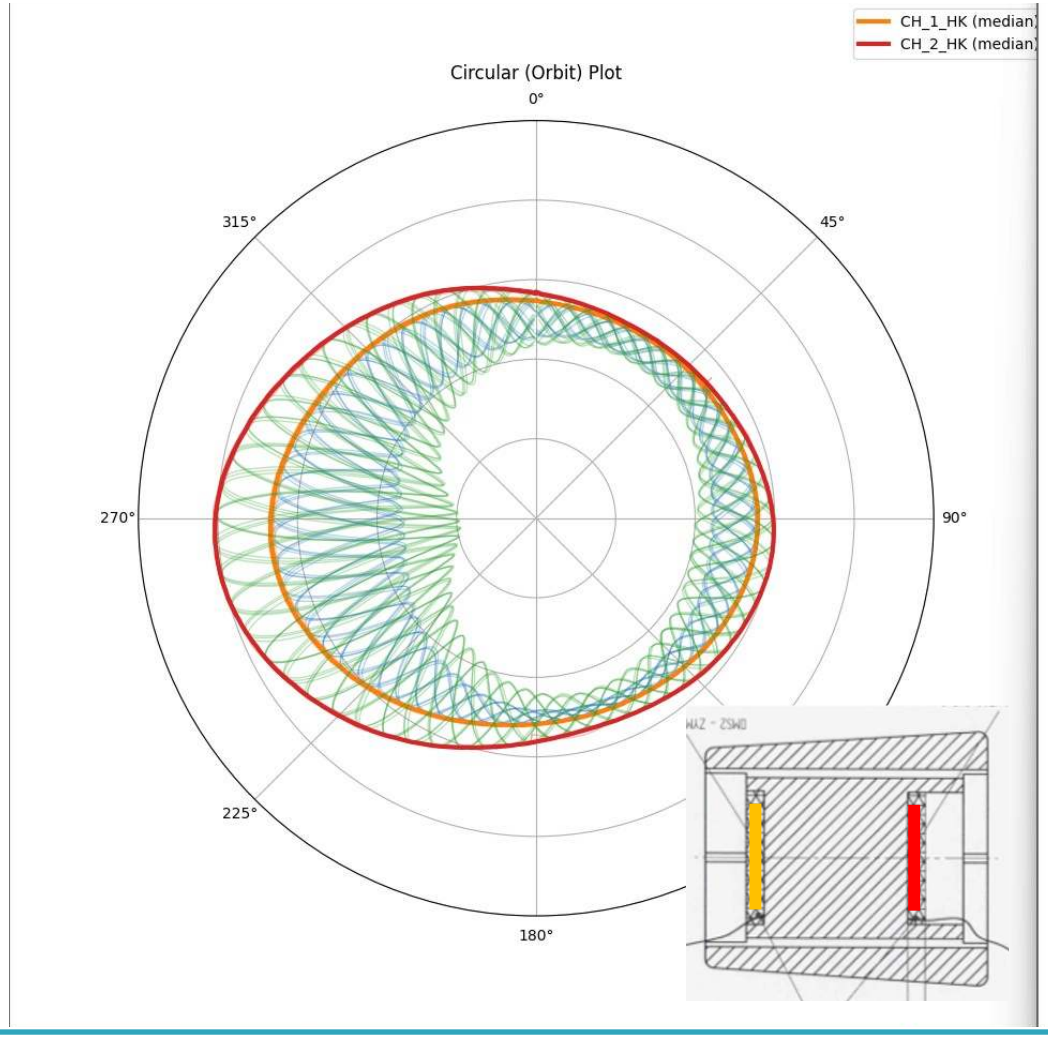



Fraunhofer IWES i4M technologies GmbH intelligence for mechanical systems

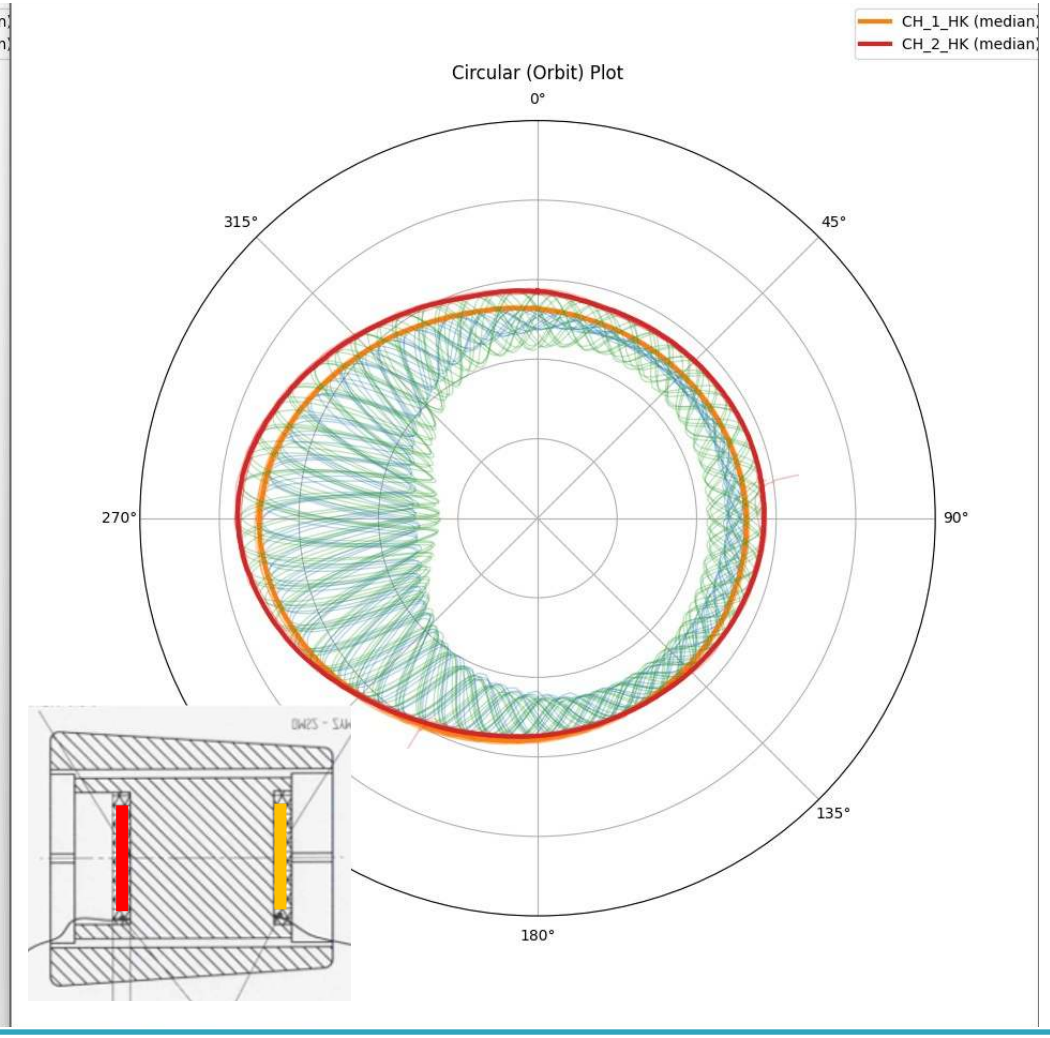
# Messergebnisse – Lastverteilung über den Orbit

90 kN Radiallast, 30 kN Axiallast

## „Bearing Sensor Lid“




## „Bearing Actuator“





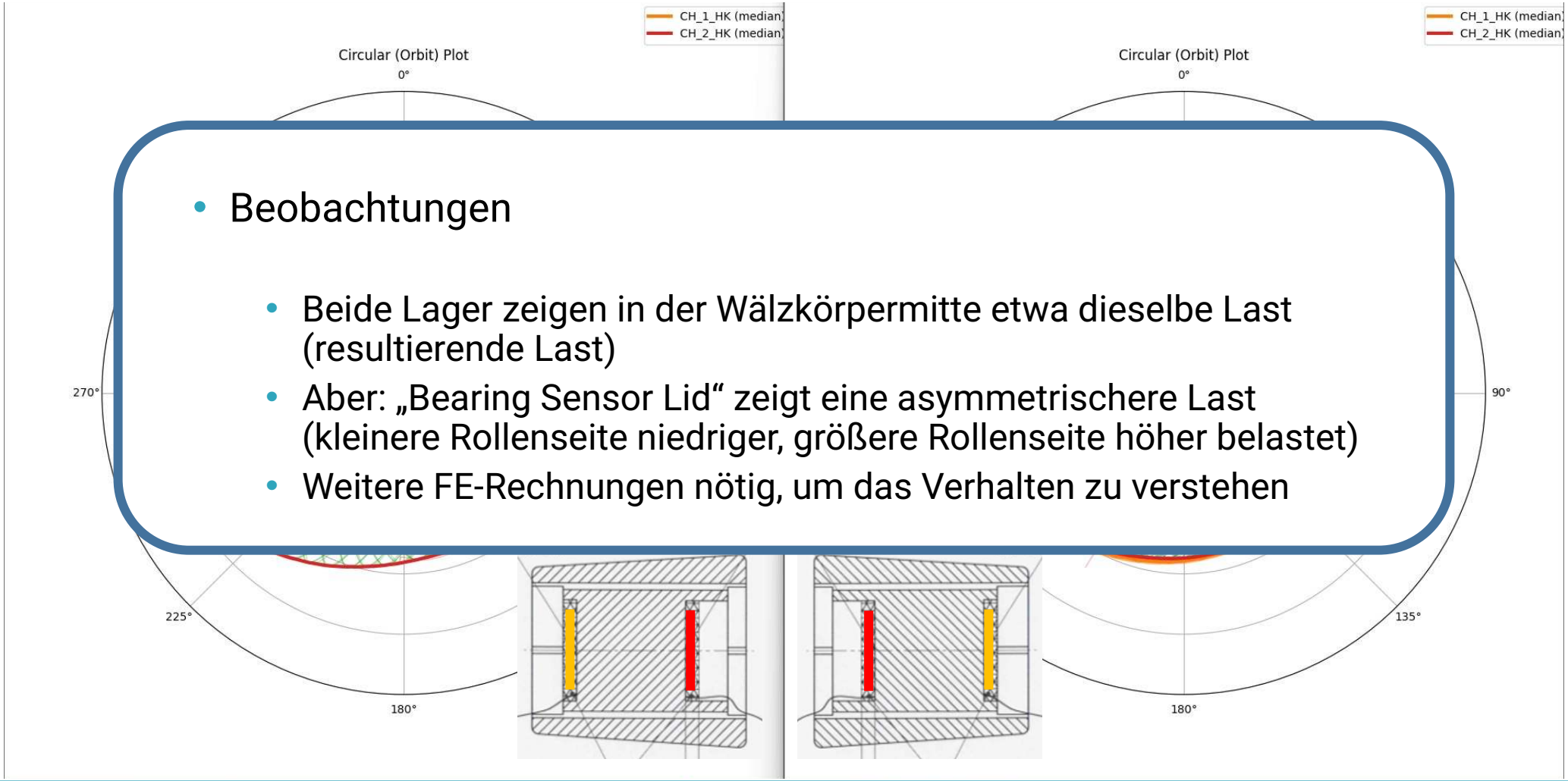

Fraunhofer IWES i4M technologies GmbH intelligence for mechanical systems

# Messergebnisse – Lastverteilung über den Orbit

90 kN Radiallast, 30 kN Axiallast

„Bearing Sensor Lid“

„Bearing Actuator“




- Beobachtungen
  - Beide Lager zeigen in der Wälzkörpermitte etwa dieselbe Last (resultierende Last)
  - Aber: „Bearing Sensor Lid“ zeigt eine asymmetrischere Last (kleinere Rollenseite niedriger, größere Rollenseite höher belastet)
  - Weitere FE-Rechnungen nötig, um das Verhalten zu verstehen

# Gliederung

1. Vorstellung, Einleitung & Motivation
2. Prüfstandsaufbau & Lager
3. Wälzkörperintegrierte Messtechnik
4. Daten & Analyse-Methoden
5. Ergebnisse
6. Zusammenfassung & Ausblick



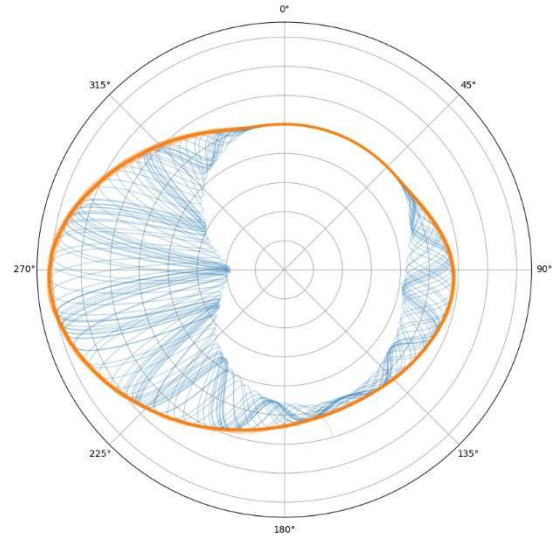
Fraunhofer IWES i4M technologies GmbH intelligence for mechanical systems

# Zusammenfassung & Ausblick

- Integration der i4M-Technologie „Smart Roller“ auch in kleineren, schneller drehenden Lagern möglich
- Kompakte, robuste und zuverlässige Lösung, unabhängig vom Lagerhersteller, mit hohen Datenraten und geringem Energiebedarf
- Hochwertige Kinematik- und Lastdaten direkt aus dem Wälzkörper
- Die Schwächung kleiner Wälzkörper muss berücksichtigt werden, bei größeren Lagern meist unkritisch



- Hier: Fokus auf quasistatische Betriebszustände
- Wie erwartet reduziert eine eingeleitete Axialkraft den Schlupf
- Validierung: Die gemessenen Lastverteilungen beider Lager weichen deutlich von Theorie und aktuellem Simulationsstand ab, daraus lassen sich Verbesserungen für den Prüfstand ableiten






Fraunhofer IWES
i4M technologies GmbH
intelligence for mechanical systems

# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



**Martin Noll**
Geschäftsführer

Tel.: +49 (0)241 56 00 22 00
martin.noll@i4m-tech.de

**i4M technologies GmbH**
Försterstr. 5
52072 Aachen
Deutschland

Tel.: +49 (0)241 56 00 22 00

www.i4m-tech.de



**Matthias Stammler**
Senior Engineer

Tel.: +49 (0)471 14290-522
matthias.stammler@
iwes.fraunhofer.de

**Fraunhofer IWES**
Am Schleusengraben 22
21029 Hamburg
Deutschland

Tel.: +49 (0) 471 14290-522

www.iwes.fraunhofer.de

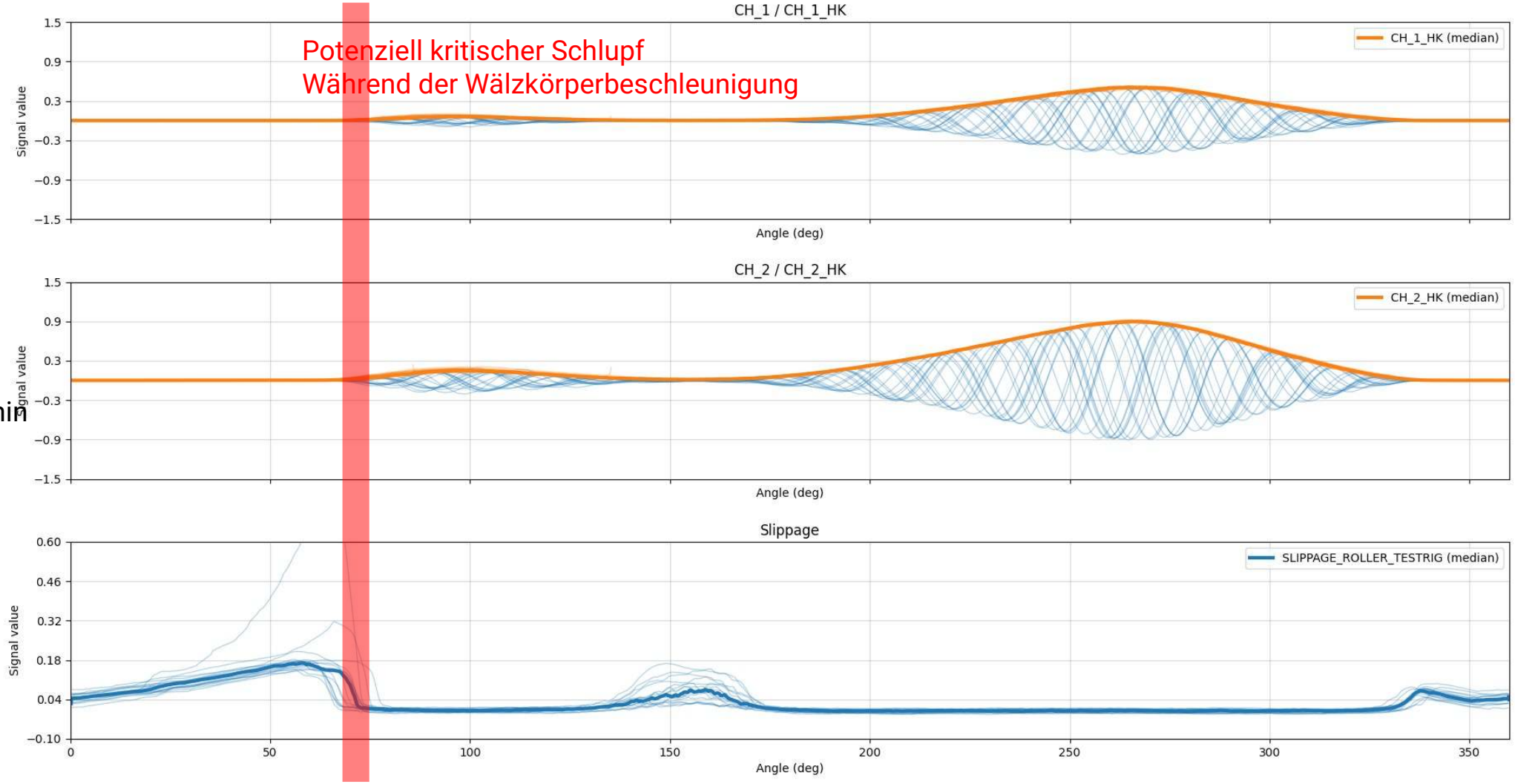


Fraunhofer IWES i4M technologies GmbH intelligence for mechanical systems

# Backup

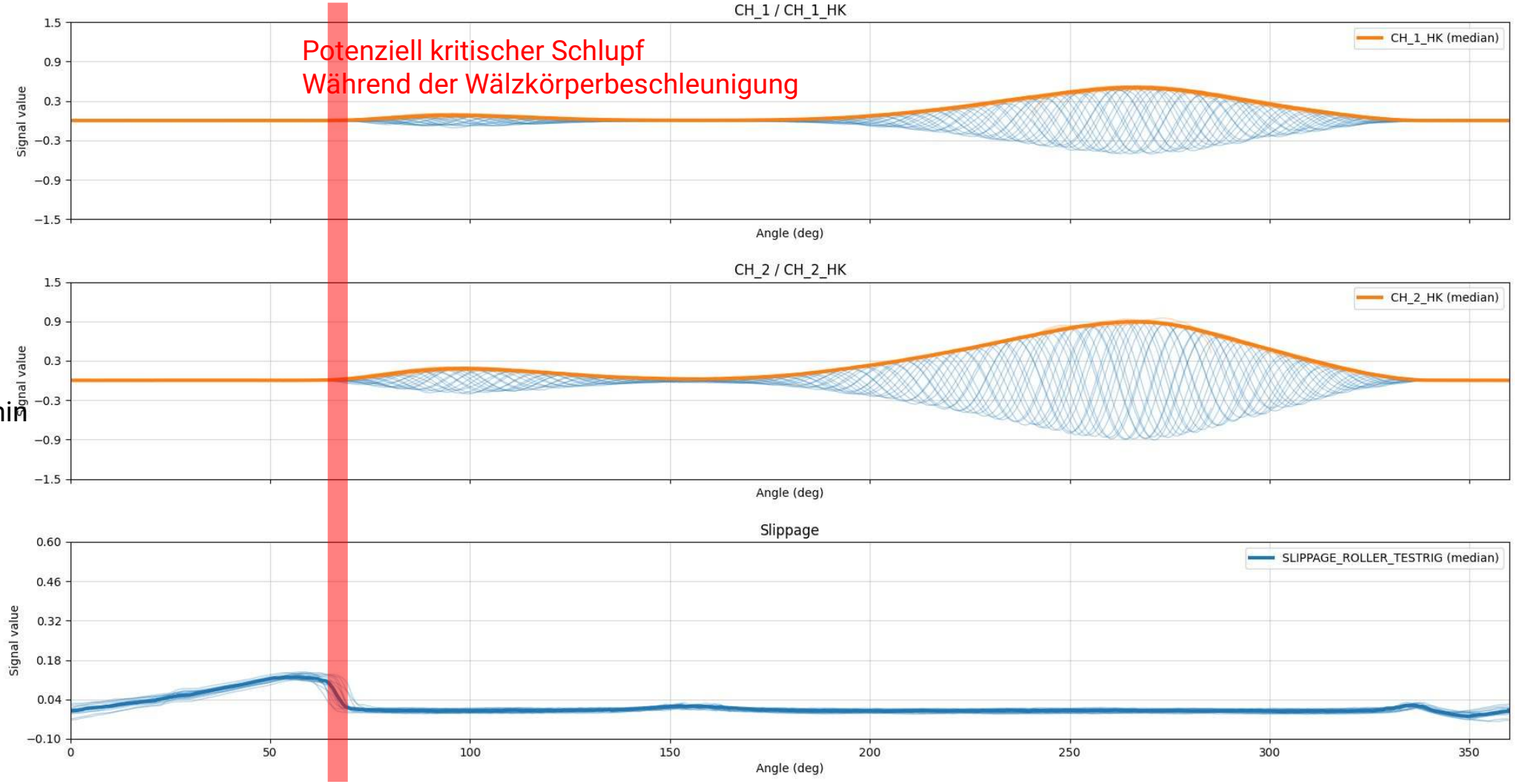
# Ergebnisse und Bewertung – Einfluss der Axiallast unter quasistatischen Bedingungen

Radial: 90 kN
Axial: 0 kN
Welle 250 1/min



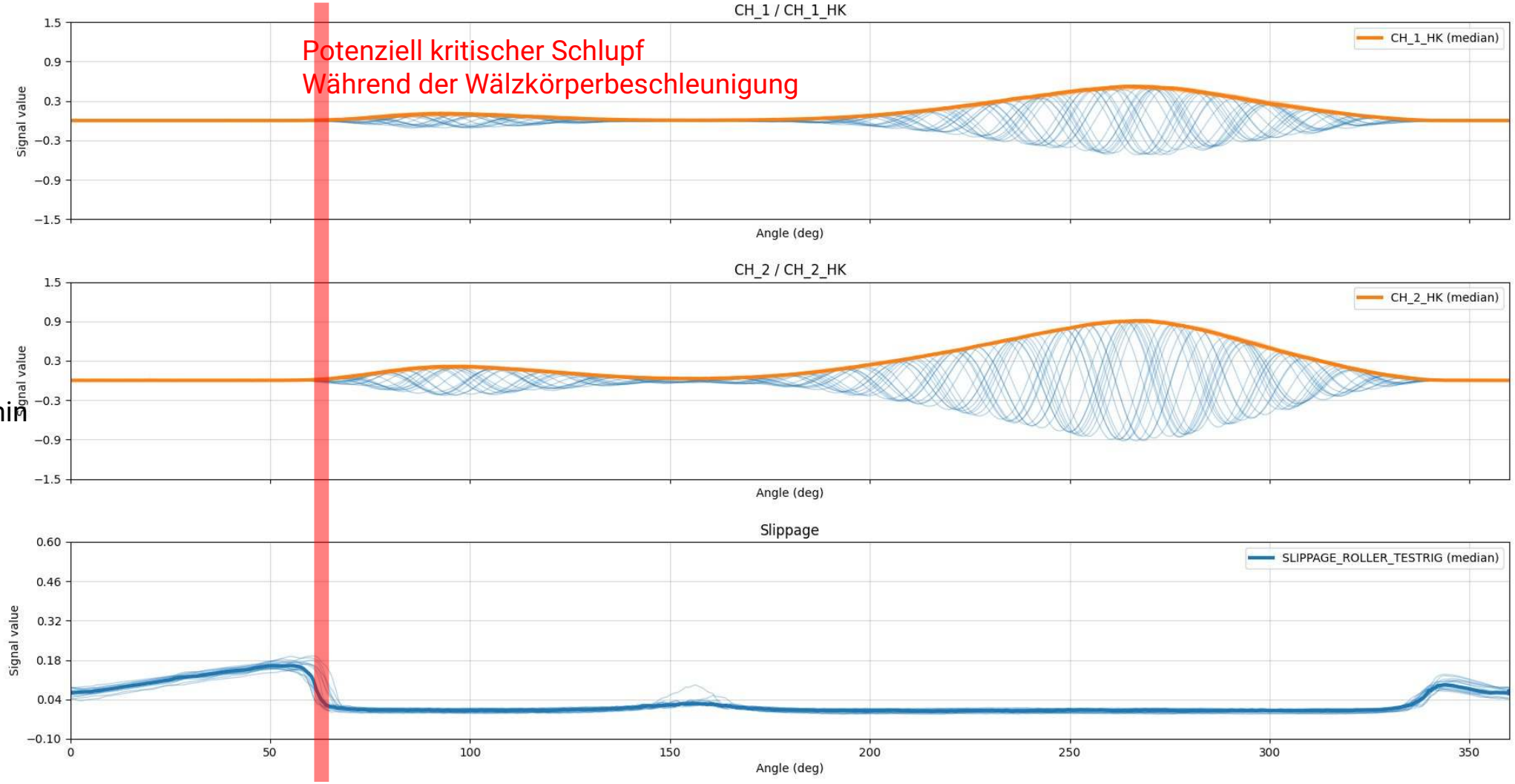
# Ergebnisse und Bewertung – Einfluss der Axiallast unter quasistatischen Bedingungen

Radial: 90 kN
Axial: 10 kN
Welle 250 1/min



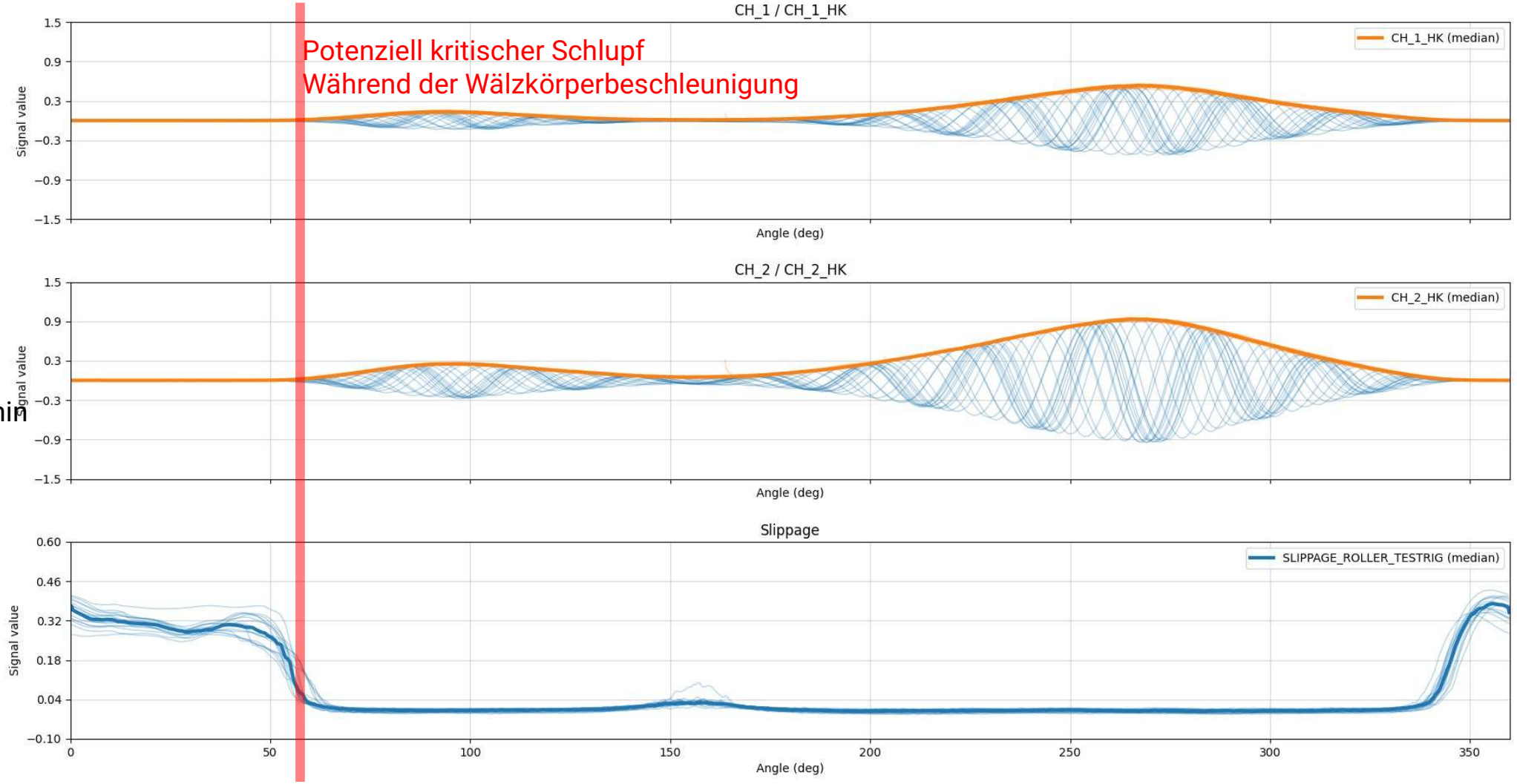
# Ergebnisse und Bewertung – Einfluss der Axiallast unter quasistatischen Bedingungen

Radial: 90 kN
Axial: 20 kN
Welle 250 1/min



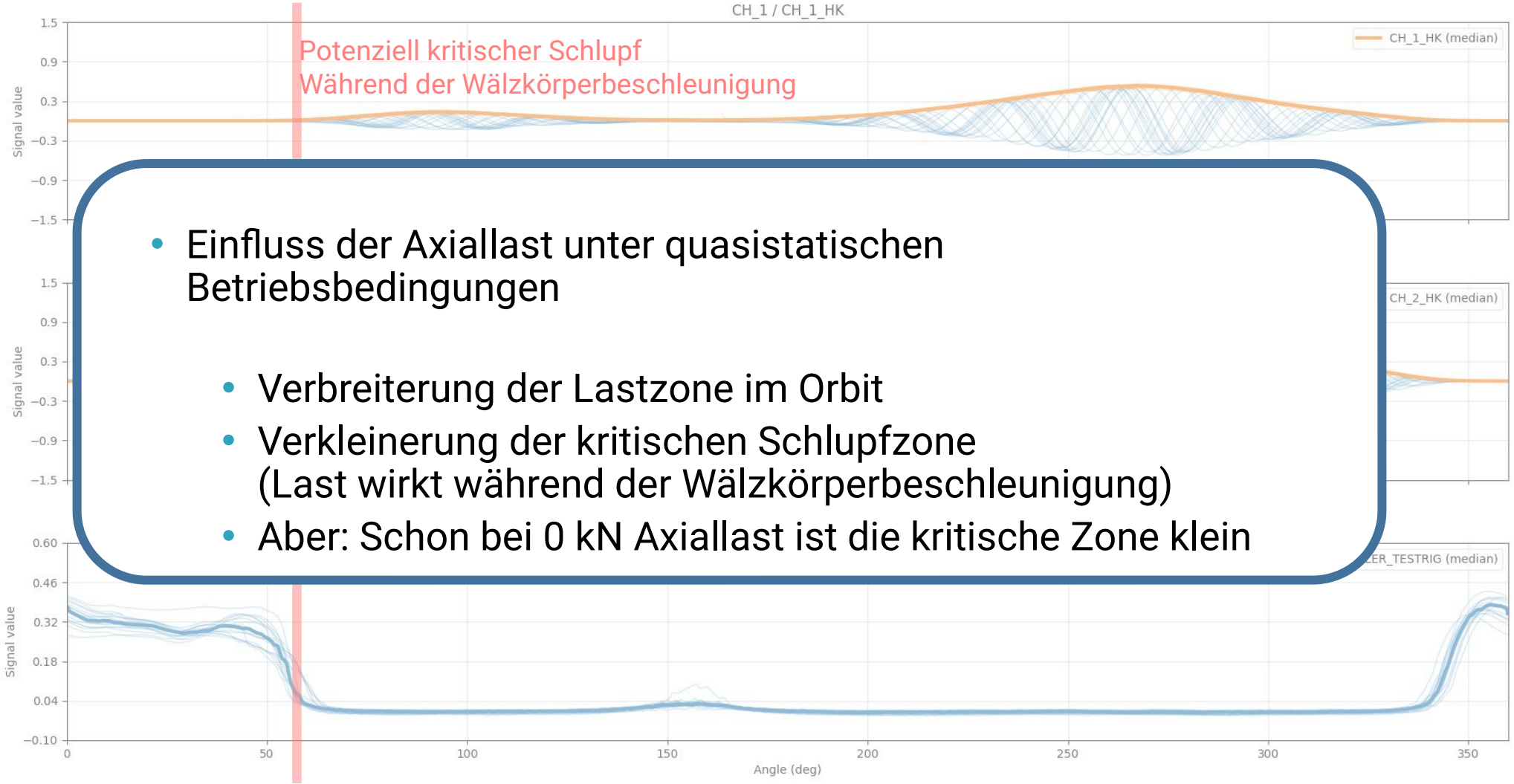
# Ergebnisse und Bewertung – Einfluss der Axiallast unter quasistatischen Bedingungen

Radial: 90 kN
Axial: 30 kN
Welle 250 1/min



# Ergebnisse und Bewertung – Einfluss der Axiallast unter quasistatischen Bedingungen

Radial: 90 kN
Axial: 30 kN



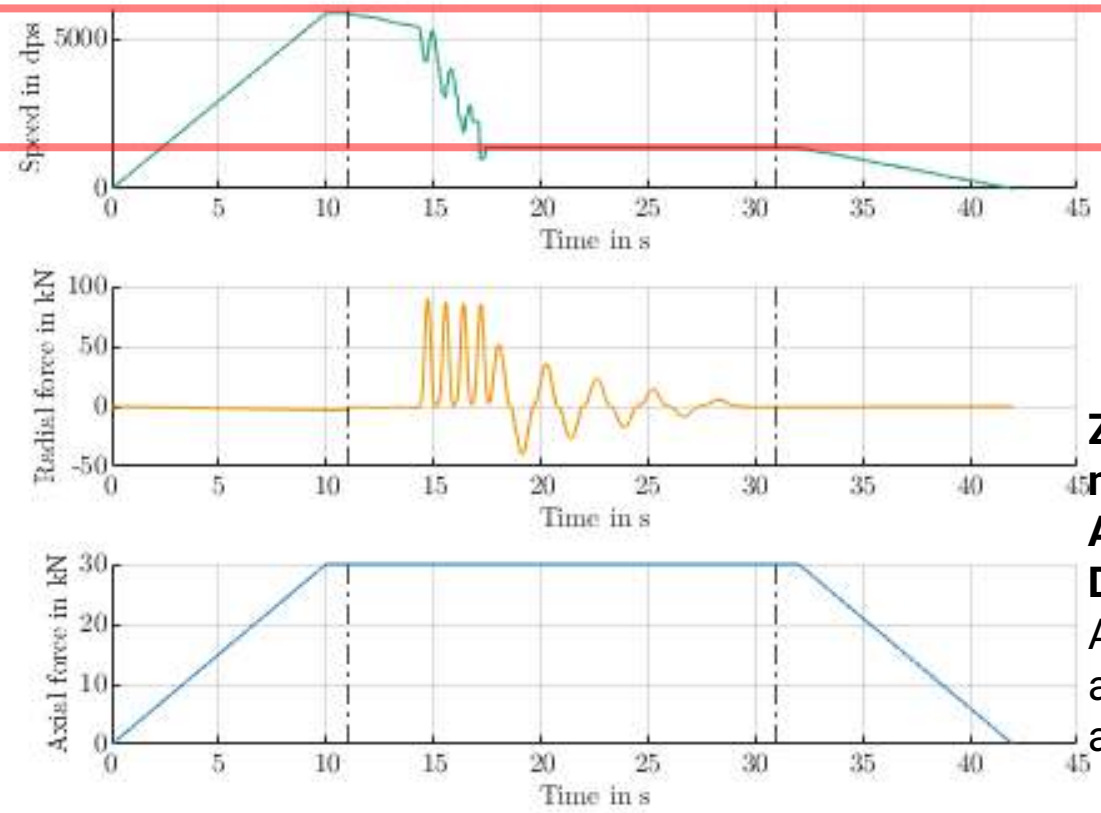

- Einfluss der Axiallast unter quasistatischen Betriebsbedingungen
  - Verbreiterung der Lastzone im Orbit
  - Verkleinerung der kritischen Schlupfzone (Last wirkt während der Wälzkörperbeschleunigung)
  - Aber: Schon bei 0 kN Axiallast ist die kritische Zone klein



Fraunhofer IWES
i4M technologies GmbH intelligence for mechanical systems

- Simulierter Netzausfall

Drehrate Welle Start: 5800 °/s = 967 1/min
Drehrate Rolle Start: **15200 °/s** = 2532 1/min




Drehrate Welle Ende: 1305 °/s = 218 1/min
Drehrate Rolle Ende: **3420 °/s** = 570 1/min

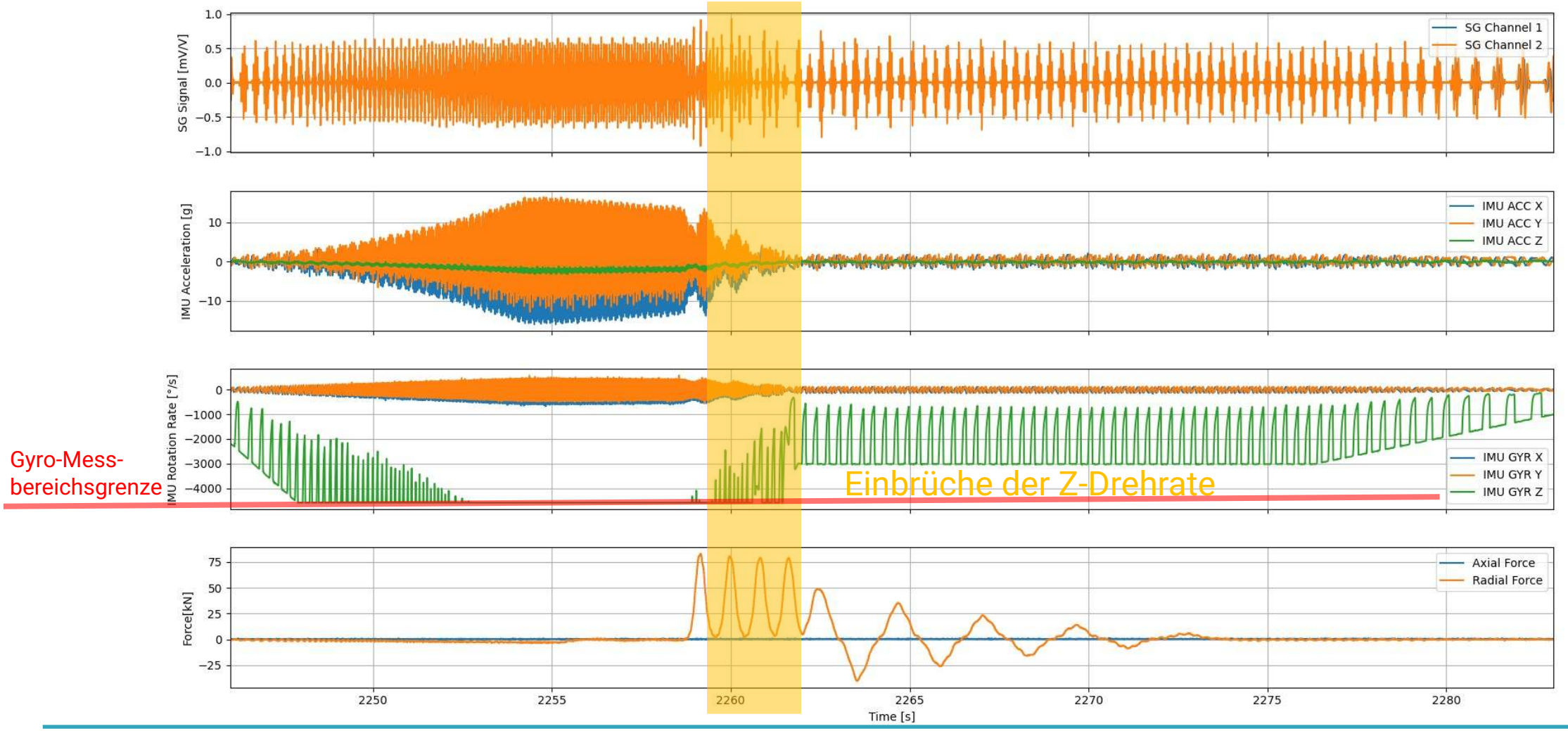
**Z-Gyro-Messbereich des verwendeten Rollers max. ca. ± 4500 °/s**
**Aktuelle Smart Roller messen höhere Drehraten**
Alternativ: Rollendrehzahl aus X/Y-Beschleunigungen, auch bei höheren Drehzahlen, aber mit geringerer Zeitauflösung



Fraunhofer IWES i4M technologies GmbH intelligence for mechanical systems

# Ergebnisse und Bewertung – Analyse dynamischer Ereignisse

- Simulierter Netzausfall, ohne Axiallast

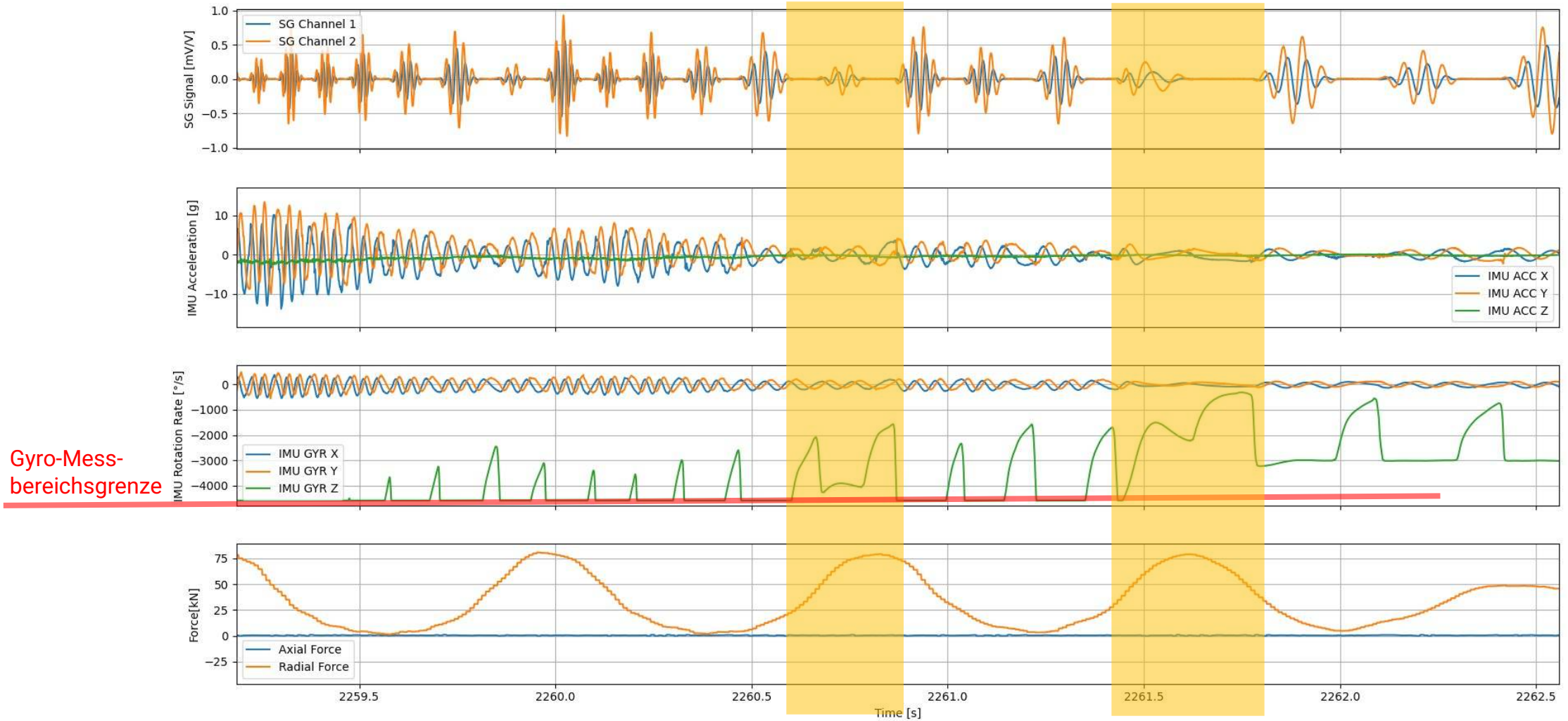





Fraunhofer IWES i4M technologies GmbH intelligence for mechanical systems

# Ergebnisse und Bewertung – Analyse dynamischer Ereignisse

- Simulierter Netzausfall, Detail, ohne Axiallast

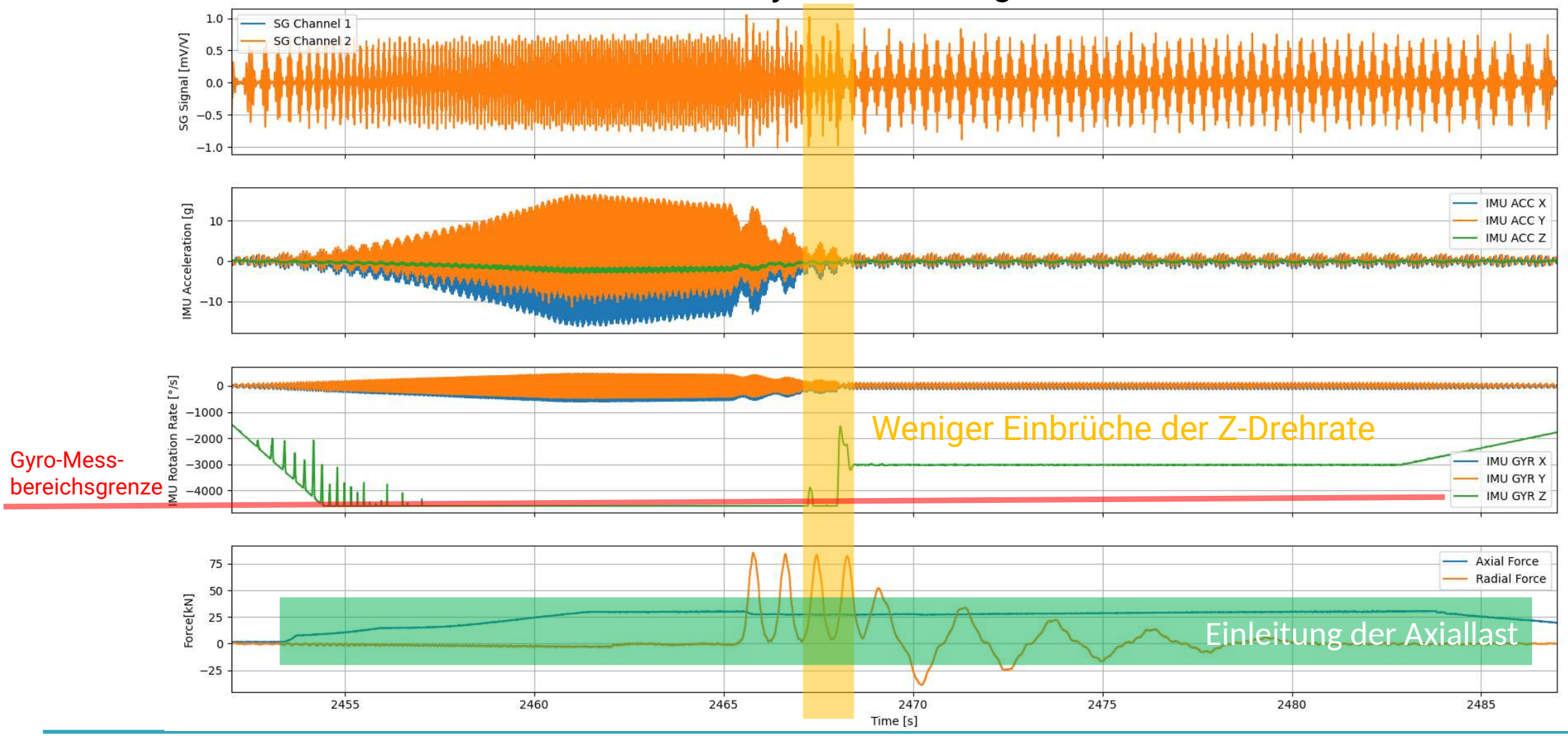





Fraunhofer IWES i4M technologies GmbH intelligence for mechanical systems

# Ergebnisse und Bewertung – Analyse dynamischer Ereignisse

- Simulierter Netzausfall, 30 kN Axiallast dynamisch eingeleitet

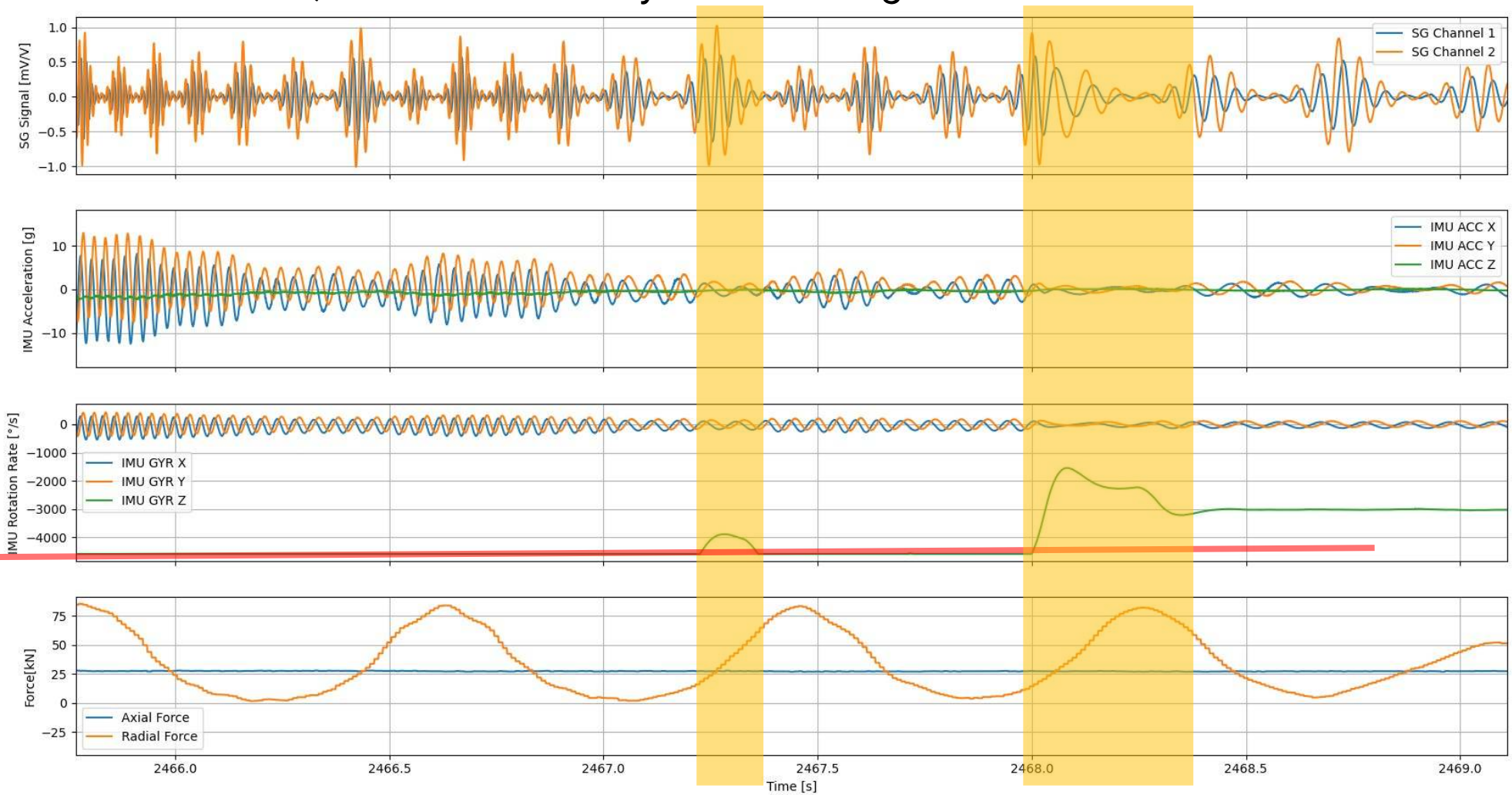





Fraunhofer IWES i4M technologies GmbH intelligence for mechanical systems

# Ergebnisse und Bewertung – Analyse dynamischer Ereignisse

- Simulierter Netzausfall, 30 kN Axiallast dynamisch eingeleitet



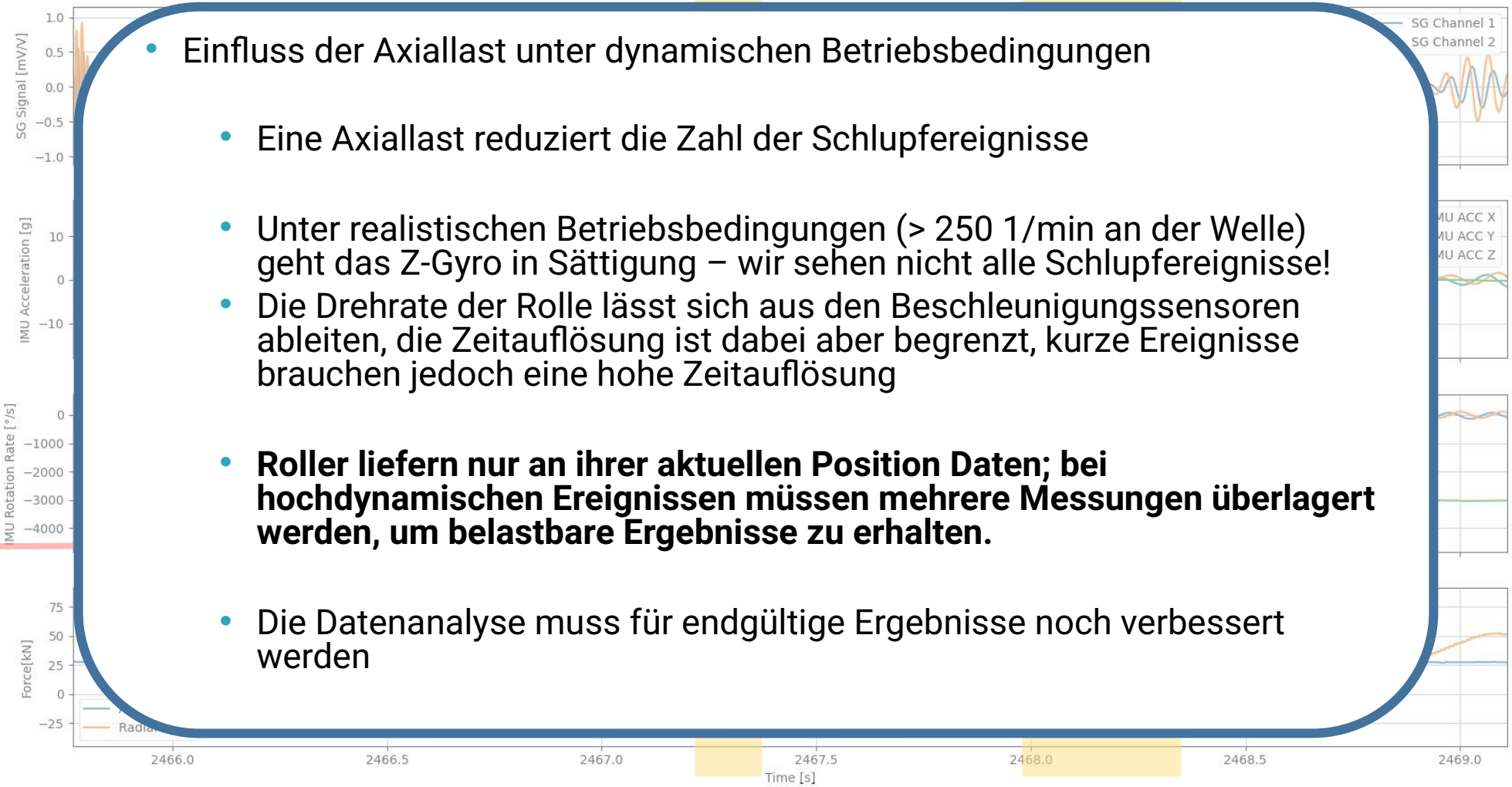

Gyro-Mess-bereichsgrenze



Fraunhofer IWES
i4M technologies GmbH intelligence for mechanical systems

# Ergebnisse und Bewertung – Analyse dynamischer Ereignisse

- Simulierter Netzausfall, 30 kN Axiallast




- Einfluss der Axiallast unter dynamischen Betriebsbedingungen
  - Eine Axiallast reduziert die Zahl der Schlupfereignisse
  - Unter realistischen Betriebsbedingungen (> 250 1/min an der Welle) geht das Z-Gyro in Sättigung – wir sehen nicht alle Schlupfereignisse!
  - Die Drehrate der Rolle lässt sich aus den Beschleunigungssensoren ableiten, die Zeitauflösung ist dabei aber begrenzt, kurze Ereignisse brauchen jedoch eine hohe Zeitauflösung
  - **Roller liefern nur an ihrer aktuellen Position Daten; bei hochdynamischen Ereignissen müssen mehrere Messungen überlagert werden, um belastbare Ergebnisse zu erhalten.**
  - Die Datenanalyse muss für endgültige Ergebnisse noch verbessert werden



Fraunhofer IWES
i4M technologies GmbH intelligence for mechanical systems