

# waveimage monitoring: Ein System zur Messung, Analyse und zum Monitoring von Schall und Schwingungen

Daniel HERFERT<sup>1</sup>, Maik GOLLNICK<sup>1</sup>

<sup>1</sup> GFaI e.V, Berlin

Kontakt E-Mail: herfert@gfai.de

**Kurzfassung.** Die Software waveimage monitoring ist eine Komplettlösung der nächsten Generation, die zerstörungsfreie Prüfverfahren zur Überwachung und Diagnose von Maschinen, Anlagen, Werkstoffen, Geräten und Bauwerken mittels Schall und Schwingungen anbietet. Diese Software ist für Instandhaltungs- und Qualitätssicherungsprozesse geeignet, bei denen Schallsensoren zum Monitoring eingesetzt werden können. Zum Monitoring wird eine Schallsignatur unter realen Betriebsbedingungen erstellt, welche die Schallantwort an möglicherweise mehreren Orten der zu entsprechenden Struktur mit einer dazu passenden Beschreibung des aktuellen Zustandes enthält.

Die Merkmalsextraktion, die Merkmalsauswahl zur Erzeugung der Signatur, die Festlegung der Klassen (2 oder N-Klassen) und die Auswahl des Klassifikators sind sehr problembezogen und können daher separat in der Software eingestellt werden. Für die Erstellung der Signatur können sowohl Körper-, Luft- als auch Ultraschallsensoren verwendet werden. Die vorgestellte Software konnte schon im Rahmen von Forschungsprojekten und eines Industriauftrages im industriellen Umfeld erfolgreich validiert und eingesetzt werden.

## 1. Einführung

Die Optimierung von Instandhaltungs- und Qualitätssicherungsprozessen mittels computerüberwachten Monitoring-Systemen für Maschinen, Anlagen, Werkstoffe und Geräte wird vermehrt in Produktionsprozessen eingesetzt und ist ein wesentlicher Bestandteil von Industrie 4.0.

Durch zustandsorientierte und computerüberwachte Instandhaltungsmaßnahmen (Condition Monitoring Systeme) können frühzeitig Schäden oder zu starke Belastungen festgestellt werden, was lange Stillzeiten von Anlagen und Maschinen bzw. hohe Reparatur- und Wartungskosten drastisch vermindern oder sogar verhindern kann. Maschinen und Anlagen im Betrieb zu überwachen und zu analysieren eröffnet die Möglichkeit, die Wartungsintervalle nach dem tatsächlichen Bedarf zu planen und nicht, wie bisher üblich, nach festen Zeiten und unabhängig vom tatsächlichen Zustand durchzuführen. Dies gilt natürlich nicht nur für die Überwachung von Maschinen, alle Anlagen mit beweglichen Teilen können mittels dieser Technik überwacht und analysiert werden. Durch die lange Vorwarnzeit bei der Erkennung einer kritischen Zustandsänderung kann unmittelbar auf einen hohen Verschleiß oder auf zu starke Belastungen reagiert



werden. Somit kann der wirtschaftliche Betrieb der Anlagen und Maschinen gesichert werden und eine höhere Produktivität, durch eine ungestörte und gleichmäßige Produktion garantiert werden. Kosten für den Anlagenbetreiber können minimiert und die Effizienz der Produktion deutlich gesteigert werden.

Ein weiteres großes Anwendungsgebiet für computergestützte Monitoring Anwendungen betrifft den Bereich des Bauwesens (Structural Health Monitoring), da Bauwerke ständig Umgebungseinflüssen ausgesetzt sind. Diese Einflüsse regen die Bauwerke (insgesamt oder Teile davon) zu meist unerwünschten und schädlichen Schwingungen an. Die frühzeitige Erkennung von kritischen Zustandsänderungen ist hier aus Wartungs- aber auch aus sicherheitskritischer Sicht notwendig.

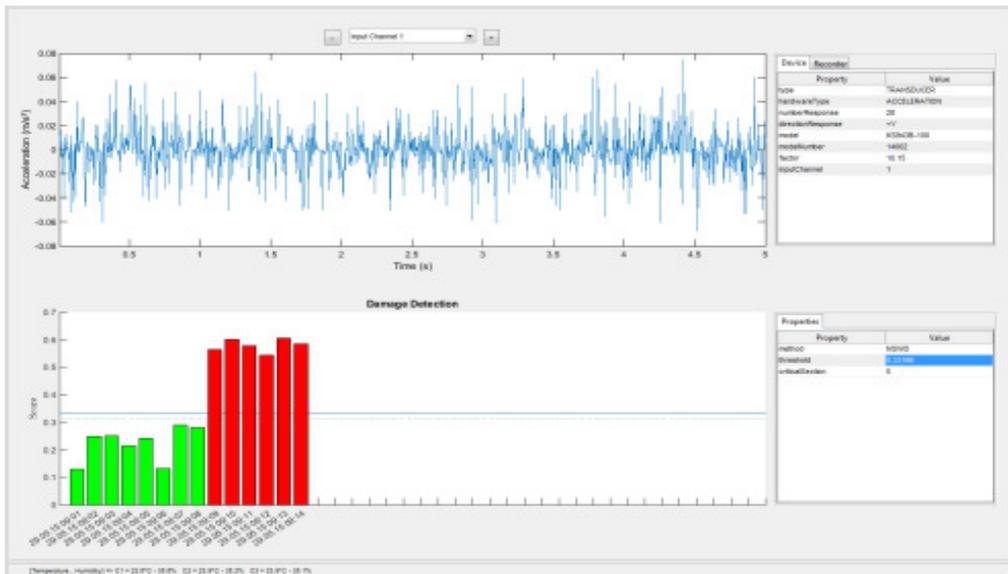
Neben der Zustandsüberwachung von Anlagen und Maschinen spielt die computerbasierte Qualitätssicherung innerhalb der Produktion eine immer größere Rolle. Hierdurch kann eine gleichbleibende Produktionsqualität in der Serienfertigung sichergestellt werden und sogenannte „Schlechtteile“ während des Produktionsprozesses erkannt und automatisiert entsorgt werden.

## **2. Problemanalyse**

Im Bereich des Online Condition Monitoring, aber auch beim Structural Health Monitoring spielen Prüfverfahren die eine zerstörungsfreie Prüfung mittels Schallemission (Körper-, Luft- und Ultraschall) vornehmen eine besonders große Rolle. Das Messprinzip der Schallemissionsprüfung basiert auf der Detektion dynamischer Verschiebungen im Nanometer-Bereich an der Oberfläche des Prüfobjekts, welche durch akustische Wellen erzeugt werden. Diese Wellen entstehen aus kurzzeitigen, transienten, meist irreversiblen Ereignissen, die bei plötzlichen Spannungsänderungen im Werkstoff auftreten und bewirken eine Wecheldruckanregung des Schallemissionssensors. Allgemein lassen sich über die Veränderung der Schallinformationen viele Informationen über den Anlagen- bzw. Maschinenzustand und simultan über die Prozessparameter gewinnen. Mittels der Schallinformationen können prozessbegleitend, mit sehr hoher Genauigkeit, unter rauen Umgebungsbedingungen und mit kostengünstiger Sensorik in Echtzeit zerstörungsfreie Prüfungen durchgeführt werden

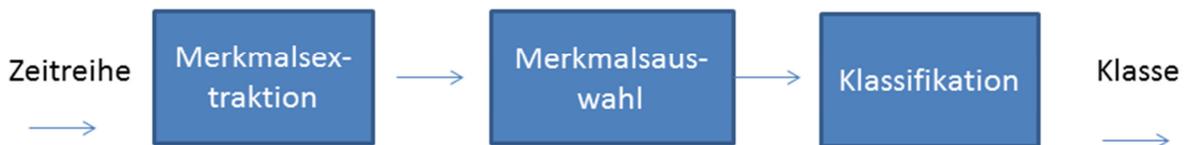
## **3. Lösung**

Ein automatisiertes und echtzeitfähiges Komplettsystem zum Online Condition und Structural Health Monitoring mittels Schallinformationen bietet die Software **waveimage monitoring**. Zur Verwendung der Software in unterschiedlichsten Anwendungsbereichen, wird eine modular aufgebaute und an unterschiedlichste Problemstellungen modifizierbare Benutzeroberfläche (siehe Abbildung 1) zur Klassifikation mittels Schalldaten (Körper-, Luft- und Ultraschall) für die Optimierung von Instandhaltungs- und Qualitätssicherungsprozessen bereitgestellt. Zum Monitoring wird eine Signatur unter realen Betriebsbedingungen erstellt, welche die Schallantwort an möglicherweise mehreren Orten der entsprechenden Struktur mit einer dazu passenden Beschreibung des aktuellen Zustandes enthält. Die Auswahl der Merkmale und Sensoren zur Erzeugung der Signatur und die Festlegung der Klassen sind sehr problembezogen und können daher separat in der Software eingestellt werden.



**Abb. 1.** Softwareoberfläche der Software **waveimage** monitoring zum Condition Monitoring bzw. zur Qualitätssicherung – grün = kein Schaden und rot = Schaden

Um eine universale Anwendbarkeit für unterschiedlichste Anwendungen zu bieten, wurde ein Baukastensystem, bestehend aus 3 Komponenten, zur Klassifikation konzipiert. Die drei Komponenten sind in ihrer Bearbeitungsreihenfolge in Abbildung 2 aufgeführt. Durch den modularen Aufbau können die einzelnen Komponenten individuell nach den Anforderungen des Endkunden zusammengestellt werden. Der hier vorgestellte modulare Aufbau und die Vielfalt an diversen Verfahren der künstlichen Intelligenz und der Signalverarbeitung werden derzeit von keiner anderen Software am Markt erreicht.



**Abb. 2.** Ablaufschema zur Entwurfsphase des Klassifikators

Die Komponente der Merkmalsextraktion umfasst aktuelle Verfahren aus dem Bereich der Filterung (Hoch- bzw. Tiefpass oder Bandpass), Verfahren zur Rauschentfernung und zur Entfernung von Hintergrundgeräuschen. Die daran anschließende Komponente nutzt die vorverarbeiteten Zeitdaten zur Charakterisierung von signifikanten Merkmalen, die eine bestmögliche Trennung zwischen den Klassen ermöglicht. Dafür können sowohl Verfahren aus dem Zeitbereich (u.a. statistische Maße z.B.: Kurtosis und Skewness) oder Verfahren aus dem Frequenzbereich (Spektrum, Oktavspektrum, Terzspektrum, Spektrogramm, Skalogramm, Ordnungsspektrum) genutzt werden. Die ausgewählten Merkmale werden dann zur Konstruktion des Klassifikators genutzt (Ein- oder Mehrklassenklassifikator möglich). Zur Klassifikation werden folgende Verfahren angeboten:

- Support Vector Machines
- Hidden Markov Modelle
- Distanzbasierte Klassifikatoren (K-Means, Fuzzy-C-Means, Ellipsoid)
- Verteilungsbasierter Klassifikator (Bayes Klassifikator)
- Dichtebasierter Klassifikator (K-Nächste Nachbarn)

#### 4. Anwendungen der Software waveimage monitoring

Mit der Entwicklung der Software **waveimage** wurde im Jahre 2011 innerhalb des Projektes Vibr-Energy2 (ZIM-KF: KF2083602WD9), begonnen. In den folgenden Jahren konnte die Software in mehreren Forschungsprojekten: BaSnet (ZIM-KF: KF2083620KM3), BaMaVe (Inno-Kom-Ost: MF120130) und im laufenden Projekt UMKlaD (01IS15051C) weiterentwickelt und in realen Anwendungen validiert werden. Die Software **waveimage monitoring** wurde bereits an mehreren für die Praxis relevanten Fragestellungen (sowohl beim Monitoring von Maschinen, als auch Bauwerken) validiert und weiterentwickelt.

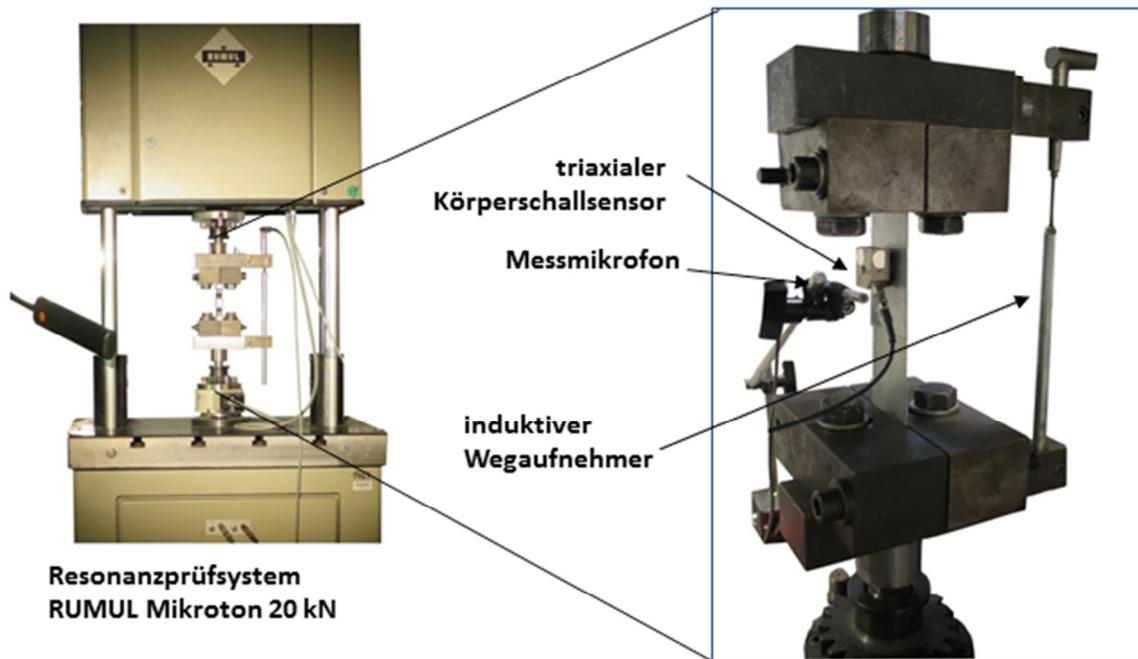
Einige dieser Anwendungen sollen im Folgenden näher erläutert werden. Neben den in diesem Antrag vorgestellten Praxisbeispielen wurde die Software **waveimage monitoring** auch bei anderen industriellen Problemstellungen angewendet. Diese Anwendungen betreffen vor allem die Erkennung von Veränderungen bzw. Schäden an Bauwerken mittels Körperschallsensoren. Darüber hinaus sind diverse weitere Anwendungen im Jahr 2017 vorgesehen.

##### *4.1 Anrisserkennung mechanisch gefügter Proben unter zyklischer Belastung*

Zur Bestimmung der Schwingfestigkeit eines Werkstoffs, Bauteils oder einer Fügeverbindung werden Dauerschwingversuche (Wöhlerversuche) durchgeführt. Im Maschinenbau stellt der Wöhlerversuch ein zentrales Hilfsmittel für die Berechnung und den Nachweis von Dauerfestigkeit und Betriebsfestigkeit dar. Aber auch in der Automobilindustrie werden mit Wöhlerversuchen eingesetzte Fügeverbindungen auf mehreren Lasthorizonten geprüft, um damit die Dauerfestigkeit der gesamten Karosserie zu bestimmen. Der Versuch läuft bis ein definiertes Versagen (Anriss oder Bruch) eintritt oder eine festgelegte Anzahl Schwingungen (auch Grenzspielzahl) überstanden wird. Hierfür wird die Probe meist mit einer sinusförmigen Beanspruchungsfunktion (Resonanzpulser) belastet. Derzeit ist eine Erkennung des Anrissverhaltens von gefügten Proben im Wöhlerversuch nicht detailliert möglich.

Eine detaillierte Rissauswertung (Anrisserkennung) kann daher aktuell nur durch eine zerstörende Prüfung (metallographische Untersuchung) nach dem Versuch geschehen. Aus diesem Grunde wird zur Detektion des Versagens und dem damit verbundenen Abschalten der Anlage, aktuell ein starker Frequenzabfall beim Resonanzpulser angenommen. Diese Aktion erfolgt aber erst deutlich nach dem Auftreten des Anrisses (mehrere Minuten möglich) und zeitgleich mit dem kompletten Bruch der Probe. Aus Sicherheitsgründen wäre die Detektion des Anrisses wichtig, da ab diesem Zeitpunkt das Versagen der Fügeverbindung schon begonnen hat.

Zur frühzeitigen Online-Anrisserkennung bei Schwingfestigkeitsuntersuchungen wurde zusammen mit dem Laboratorium für Werkstoff- und Fügechnik der Universität Paderborn eine Voruntersuchung zur Anrisserkennung an einem in der Praxis eingesetzten Resonanzprüfsystem vorgenommen. Im Rahmen der Voruntersuchung wurden zwei Verbindungen getestet (Stahl/Stahl- und Stahl/Alu-Verbindung). Zum Fügen wurde ein mechanisches Fügeverfahren (Halbhohlstanzniet) ausgewählt. Zur Detektion des Schadens wurden ein triaxialer Beschleunigungssensor und ein Messmikrofon eingesetzt (Aufbau der Messung siehe Abbildung 3).



**Abb. 3.** Versuchsaufbau zur Anrisserkennung bei Dauerschwingversuchen mit der Software **waveimage** monitoring im Laboratorium für Werkstoff- und Fügetechnik der Universität Paderborn

Die Auswertung der Sensorsignale (insbesondere der Körperschallsensoren) war sehr vielversprechend. Zur Klassifikation wurde die Veränderung der durchschnittlichen Kohärenzfunktion (Maß für den Grad der linearen Abhängigkeit zweier Zeitsignale über der Frequenz) zwischen einem Zeitabschnitt (10 Sekunden Ausschnitt aus dem Gesamtsignal) und signifikanten Zeitabschnitten, die keinen Schaden aufweisen, gewählt.

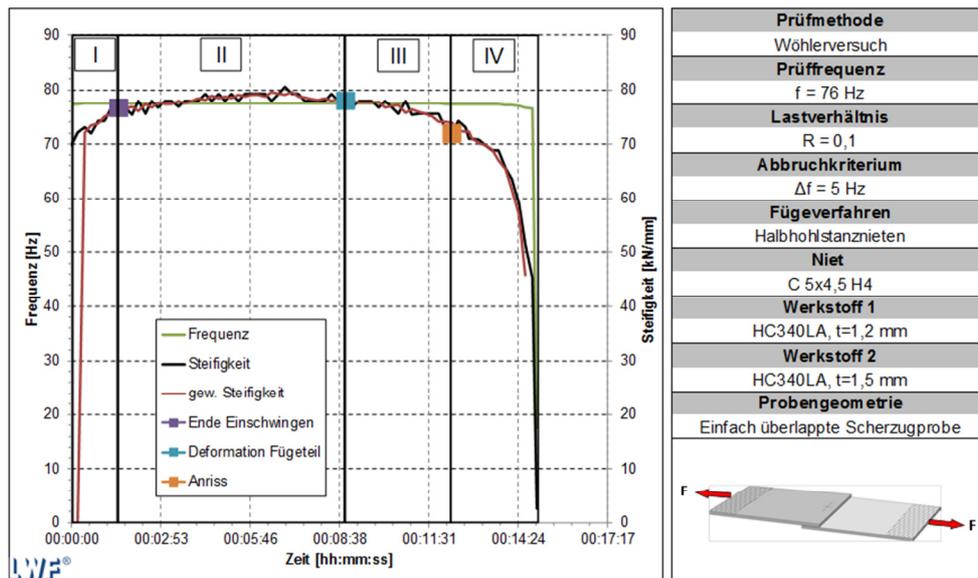
Eine Kohärenz von 1 bedeutet eine vollständige Ähnlichkeit in dieser Frequenz und eine Kohärenz von 0 bedeutet eine vollständige Unähnlichkeit in dieser Frequenz. Bei einer Kohärenz  $< 0.3$  in der Mehrzahl der Frequenzen, wurde eine Veränderung des Schwingungszustandes angenommen.

Durch diese Methodik konnte das Gesamtzeitsignal (Wöhlerversuch) in vier Klassen unterteilt werden:

1. Einschwingen der Verbindung
2. Prüffrequenz erreicht, kein Schaden,
3. Deformation der Fügeteile (Werkstoffverformung),
4. Anriss eines der Fügeteile

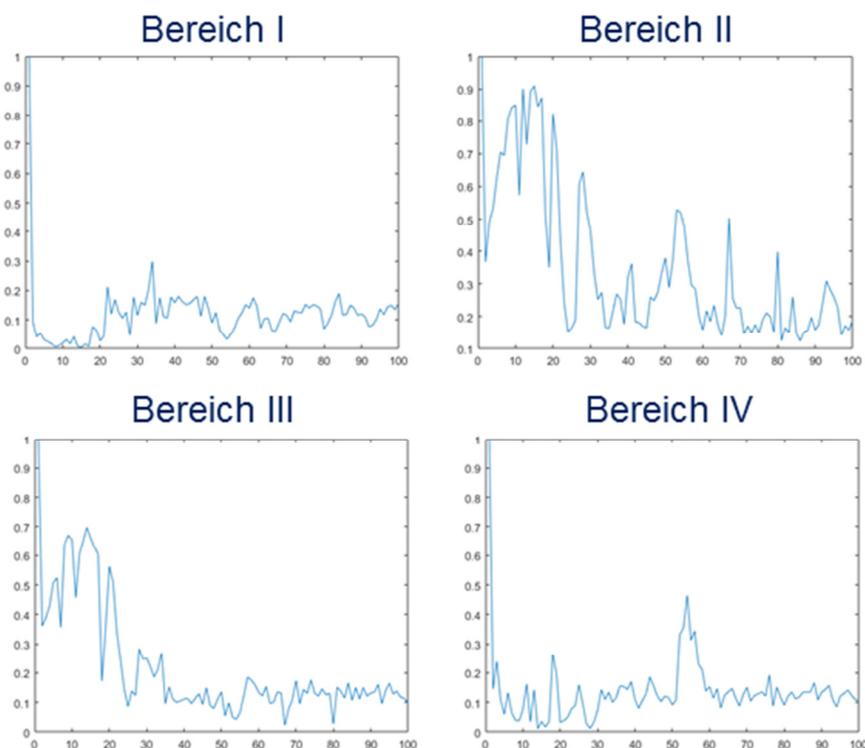
Innerhalb einer Klasse befinden sich ausschließlich Zeitabschnitte die eine ähnliche Kohärenz aufweisen. Die Auswertung ist in Abbildung 4 und 5 zu sehen.

Die Auswertung der Mikrofondaten ergaben eine spätere Erkennung des Anrisses und eine schlechtere Trennbarkeit der weiteren Zustände (1-3) gegenüber dem Einsatz mit einem Beschleunigungsaufnehmer (Körperschall).



**Abb. 4.** Darstellung eines Wöhlerversuches -- Differenz zwischen Frequenzabfall (klassisches Abschaltkriterium) und erstem Hinweis auf Versagen (deutliche Kohärenzveränderung im Bereich IV)

Diese Charakteristik konnte über mehrere Messungen reproduzierbar ermittelt werden. Die Erkenntnisse dieser Voruntersuchungen zeigen, dass die Erkennung von unterschiedlichen Zuständen während des Wöhlerversuches im Kurzfestigkeitsbereich mit Hilfe der eingesetzten Schallsensorik möglich ist. Diese genaue Zustandsanalyse und besonders die wahrscheinliche Detektion des Anrisses gehen weit über den aktuellen Stand der Technik hinaus. Die Weiterentwicklung dieser Methodik soll in Kooperation mit dem LWF Paderborn in einem IGF-Projekt erfolgen. Ein dementsprechender Antrag befindet sich aktuell in Bearbeitung.



**Abb. 5.** Kohärenzfunktionen im Bereich 1 bis 100 Hz von Vertretern der einzelnen Klassen: Bereich 1 = Einschwingen der Verbindung, Bereich 2 = kein Schaden und Prüffrequenz erreicht, Bereich 3 = wahrscheinlich Deformation der Fügeteile (Werkstoffverformung), Bereich 4 = wahrscheinlich Anriss

#### 4.2 Erkennung von Lagerschäden

Die frühzeitige Schadenserkennung an Wälzlagern wurde zusammen mit der Firma Sonotec Ultraschallsensorik Halle GmbH untersucht. Wälzlager werden z.B. in Pumpen, Werkzeugmaschinen, Maschinen und vielen Anlagen in großer Anzahl eingesetzt. Innerhalb der Messungen wurden in einem Messaufbau der Firma Sonotec (siehe Abbildung 6) die Wälz- bzw. Kugellager über einen Motor und unter verschiedenen Drehzahlen in Betrieb genommen.

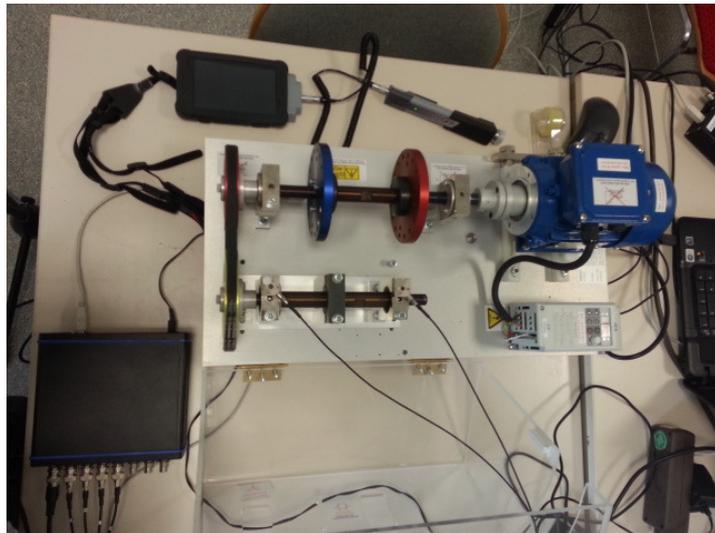


Abb. 6. Messaufbau zur Detektion der Lagerschäden

Für die Analyse wurden vier Schadensklassen (siehe Abbildung 7) erzeugt und im laufenden Betrieb untersucht.

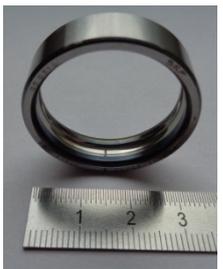
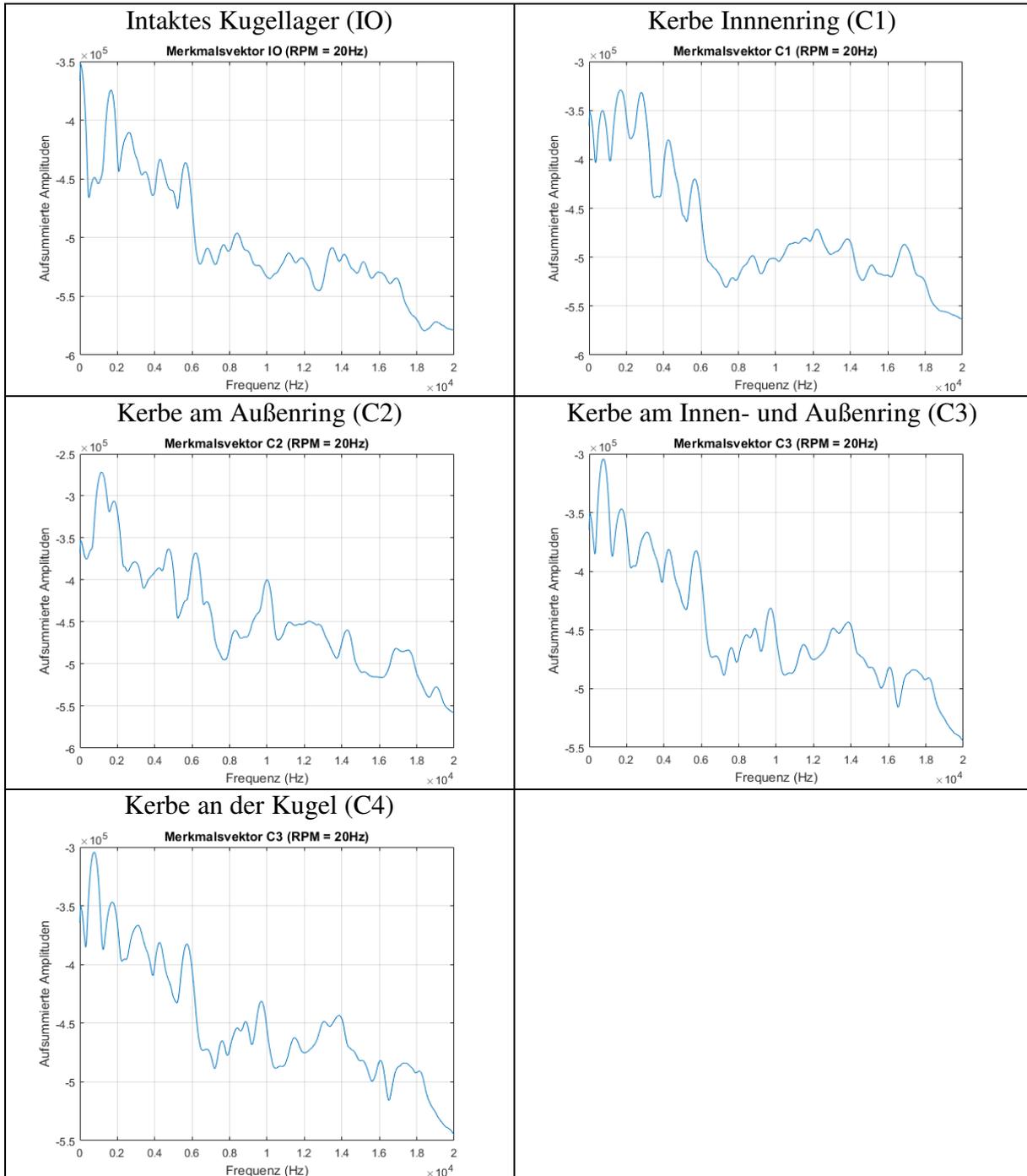
Kerbe Innenring (C1)	Kerbe Außenring (C2)	Kerbe Innen-/ Außenring (C3)	Kerbe an der Kugel (C4)
			

Abb. 7. vier unterschiedliche Klassen von Lagerschäden (bereitgestellt durch die Firma Sonotec)

Zur Messung wurden an einem intakten und an einem geschädigten Kugellager Ultraschallsensoren der Firma Sonotec befestigt und unter den Drehzahlen 10Hz, 20Hz sowie 30Hz betrachtet. Die Zeitdaten wurden mit einer Abtastrate von 250kHz für jeweils 10 Sekunden aufgenommen. Für jede Schadensklasse wurden insgesamt 20 Datensätze aufgezeichnet. Für die Erstellung der Merkmalsvektoren wurde ein Spektrogramm erzeugt, sodass sowohl die Abhängigkeiten im Frequenz- als auch im Zeitbereich kombiniert werden konnten. Dabei wurde der Frequenzbereich auf 1 bis 20kHz reduziert, da sich in den höheren Bereichen keine signifikanten Änderungen abzeichnen. Anschließend wurde das Frequenzband für jeden Zeitschritt des Spektrogramms aufaddiert. Der entstandene Vektor (siehe Abbildung 8) wurde zur Klassifikation herangezogen. Als Klassifikator

wurde das K-Means-Verfahren genutzt. Dabei werden die Merkmalsvektoren in Cluster aufgeteilt und nur durch deren Centroide repräsentiert. Die Daten werden dann überwacht (mit konkreter Klassenzuordnung) oder unüberwacht (ohne konkrete Klassenzuordnung) gruppiert. Da zur Klassifikation nur die Repräsentanten genutzt werden, ergibt sich ein enormer Geschwindigkeits- und Speichervorteil für die Onlineklassifikation gegenüber anderen Klassifikationsverfahren. Für den Praxiseinsatz wird als Vorverarbeitungsschritt eine Ordnungsanalyse mit einem Hochlauf des eingesetzten Motors durchgeführt. Damit werden nur Frequenzen als Merkmale identifiziert, die drehzahlunabhängig sind. Die verbleibenden Frequenzbänder werden vernachlässigt. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind sehr vielversprechend und lassen einen Industrieinsatz zu.



**Abb. 8.** Merkmalsvektor zur Klassifikation für eine Drehzahl von 20Hz am Beispiel von einem intakten und vier verschieden geschädigten Kugellagern