



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
Fakultät Life Sciences

# Zustandsüberwachung von Windenergie- anlagen-Triebsträngen am Beispiel eines 1:10 Prüfstands

BACHELORARBEIT

im Studiengang Umwelttechnik

vorgelegt von: Tristan Ahrendt

Matrikelnummer: 2046880

Hamburg 23.03.2016

Gutachter: Prof. Dipl.-Ing. Peter Dalhoff (HAW Hamburg)

Gutachter: Prof. Dr.Ing. Friedrich Ueberle (HAW Hamburg)



## Inhaltsverzeichnis

<b>IV. Nomenklatur .....</b>	<b>iii</b>
<b>V. Versicherung über Selbstständigkeit .....</b>	<b>v</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1. Relevanz des Themas.....	1
1.2. Ziel der Arbeit.....	2
<b>2 1:10-Rotorwellen-Prüfstand .....</b>	<b>2</b>
2.1 Beschreibung des Prüfstands.....	2
2.2 Problemdarstellung.....	11
<b>3 Möglichkeiten zur Schadensdiagnostik .....</b>	<b>12</b>
3.1 Akustische Kamera.....	12
3.2 Laser-Doppler-Vibrometer .....	16
3.3 Vibrationsmessung mit Beschleunigungssensoren .....	20
<b>4 Bewertungskriterien und Versuchsabläufe .....</b>	<b>24</b>
4.1 Akustische Kamera.....	24
4.2 Laser-Doppler-Vibrometer .....	26
4.3 Vibrationsmessung mit Beschleunigungssensoren .....	28
<b>5 Auswertung und Diskussion .....</b>	<b>31</b>
5.1 Akustische Kamera.....	33
5.2 Laser-Doppler-Vibrometer .....	36
5.3 Vibrationsmessung mit Beschleunigungssensoren .....	40
<b>6 Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>53</b>
<b>7 Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>A</b>
<b>8 Literaturverzeichnis .....</b>	<b>C</b>
<b>9 Anhang.....</b>	<b>I</b>

## IV. Nomenklatur

### IV. Nomenklatur

#### Verwendete Formelzeichen

Symbol	Bedeutung	Einheit
$\ddot{x}$	Beschleunigung	$m/s$
$\rho$	Dichte	$kg/m^3$
$p$	Druck	$Pa$
$A$	Fläche	$m^2$
$f$	Frequenz	$Hz$
$\tau$	Integrationszeit des Messsystems	$s$
$I$	Intensität	$W/m^2$
$C$	Kapazität	$F$
$K$	Kompressionsmodul	$Pa$
$k$	Konstante	-
$R$	Korrelation	%
$F$	Kraft	$Nm$
$Q$	Ladung	$C$
$P$	Leistung	$W$
$m$	Masse	$Kg$
$L$	Pegelmaße	$dB$
$r$	Radius	$m$
$N$	Schwingspielzahl	-
$U$	Spannung	$V$
$S$	Spannungsamplitude	$N$
$v$	Wellengeschwindigkeit	$m/s$
$\lambda$	Wellenlänge	$nm$
$R$	Widerstand	$\Omega$

## IV. Nomenklatur

---

### Verwendete Indizes

<b>Symbol</b>	<b>Bedeutung</b>
---------------	------------------

eff	Effektivwert
-----	--------------

p	Schalldruck
---	-------------

I	Schallintensität
---	------------------

Q	Quelle
---	--------

E	Empfänger
---	-----------

rel	Relativwert
-----	-------------

q	Ladung
---	--------

0	Grundzustand z.B. Widerstand
---	------------------------------

100	100 $\Omega$ Nennwiderstand eines Platin-Temperatursensors bei 0°C
-----	--



## **V. Versicherung über Selbstständigkeit**

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfemittel verwendet habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

Hamburg, den \_\_\_\_\_

## 1 Einleitung

### 1.1. Relevanz des Themas

In den letzten Jahren ist die Stromerzeugung durch Erneuerbare Energien stark angestiegen. Verglichen mit dem Jahr 2000, ist der Anteil der Erneuerbaren Energien an der installierten Gesamtleistung im Jahr 2015 von 24% auf 44% gestiegen [EWE2016]. Der Bundesverband Erneuerbare Energien e.V. (kurz: BEE) prognostiziert bis 2020 einen Anteil von 47%, wovon die Windkraft mit 55000 MW installierter Leistung den größten Anteil stellen wird [BEE2009].

In den nächsten Jahren werden vermehrt Windenergieanlagen (kurz: WEA) errichtet und die Leistung der einzelnen WEA wird größer. Je größer eine WEA wird, desto höher werden die Anforderungen an das verwendete Material. Die Anforderungen an das Material bestehen zum einen aus den Lasten, welche durch das größere Eigengewicht auftreten und zum anderen durch die allgemeine aerodynamische Belastung und durch die Lasten, die entstehen, wenn stochastisch verteilte Windlasten mit Böen und Turbulenzen auf die WEA treffen.

Um den Ausbau der Windenergie in einem wirtschaftlichen Rahmen zu halten, müssen Werkstoffe gefunden werden, welche den gleichen Anforderungen entsprechen aber ein geringeres spezifisches Gewicht und zusätzlich geringe Produktionskosten besitzen.

Ein weiterer Ansatzpunkt ist die Einsparung von Material, ohne die Betriebssicherheit zu gefährden. Das ist auch das Hauptziel des vom *Bundesministerium für Wirtschaft und Energie* geförderten Forschungsprojektes *Beschleunigter experimenteller Betriebsfestigkeitsnachweis von WEA-Großkomponenten am Beispiel der Hauptwelle* (kurz: BEBEN XXL). Hierzu wurde ein Prüfstand entwickelt, welcher es erlaubt, beschleunigte Betriebsfestigkeitsversuche an Windenergie-Komponenten, speziell der Rotorwelle, durchzuführen. In diesem Zusammenhang wurde am Technologiezentrum Energie Campus Hamburg ein Ermüdungsprüfstand für eine Rotorwelle im 1:10-Maßstab entwickelt. Dieser Prüfstand kann in einer Versuchszeit von ca.105 Stunden die Lebensdauer von 20 Jahren einer Hauptwelle darstellen. Die an realen Bauteilen gewonnenen Ergebnisse sollen zu einer Verbesserung von theoretischen Modellen zur

## 2 1:10-Rotorwellen-Prüfstand

---

Auslegung von WEA-Komponenten führen. Außerdem wird eine Anpassung und Verbesserung der bestehenden Normen und Richtlinien zur Auslegung von Windkraftkomponenten angestrebt.

### 1.2. Ziel der Arbeit

Aufgrund eines nicht lokalisierbaren Klopfgeräusches an dem 1:10-Rotorwellen-Prüfstand zur Betriebsfestigkeitsuntersuchung von Windenergieanlagen-Rotorwellen soll das Ziel dieser Bachelorarbeit sein, den aktuellen Zustand des Prüfstands mit verschiedenen Messsystemen darzustellen und zu bewerten. Hierzu sollen verschiedene Messsysteme mit unterschiedlichen Funktionsprinzipien zur Schadensdiagnostik aufgezeigt und hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit miteinander verglichen werden. Zusätzlich sollen Untersuchungsabläufe und Bewertungskriterien definiert werden, um eine möglichst genaue Lokalisierung und Identifizierung des Klopfgeräusches am Prüfstand zu erhalten.

## 2 1:10-Rotorwellen-Prüfstand

Auf den ersten Blick wird davon ausgegangen, dass starke Sturmereignisse die größte Herausforderung für WEA sind. Abhängig vom Standort treten verschieden häufige und starke Sturmereignisse auf und führen zu Extrembelastungen der WEA. Die Materialien einer WEA müssen jedoch nicht nur für diese Extrembelastungen ausgelegt sein, sondern auch andauernden, wechselnden Belastungen bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten standhalten. Diese Belastungen sind schwieriger zu bewerten und stellen eine große Anforderung bei der Auslegung einer Anlage dar [HAU2008, S.171].

### 2.1 Beschreibung des Prüfstands

Im Folgenden wird erklärt, auf welchen Grundlagen der Prüfstand entwickelt wurde, wie er aufgebaut ist und mit welchen Hilfsmitteln Daten zur Auswertung der Versuche ermittelt werden.

#### 2.1.1 Hintergrund des Prüfstands

Wie stark ein Material durch eine Belastung beansprucht wird, ist abhängig von verschiedenen Faktoren. Zum einen ist die Geometrie eines Bauteils wichtig, aber auch die Belastungshöhe und Belastungsdauer. Jedoch sind wechselnde Belastungen un-

## 2 1:10-Rotorwellen-Prüfstand

---

ter den gleichen Bedingungen häufig problematischer für ein Material als statische Belastungen. Wird ein Material durch wechselnde Belastungen beansprucht, kann es zu einer Materialermüdung kommen. Die wechselnden Belastungen bei Windenergieanlagen werden durch stochastisch verteilte Windlasten mit Böen und Turbulenzen, sowie durch das Eigengewicht einer Anlage bzw. des Rotors verstärkt und werden an die nachstehenden mechanischen Komponenten weitergegeben [HAU2008, S.172]. Aus diesem Grund sind auch die mechanischen Komponenten, und somit auch der Triebstrang, den meisten Belastungen des Rotors ausgesetzt.

Darum ist eines der Ziele dieses Forschungsvorhabens neue Materialien zur Herstellung der Hauptwelle von WEA zu finden und auf ihre Belastbarkeit zu prüfen. Hauptziel ist es, das Potential zur Einsparung von Material zu ermitteln. Bei der Auslegung einer Rotorwelle werden verschiedene Sicherheitsfaktoren miteinbezogen, da es verschiedene Unsicherheiten bei der Lebensdauerabschätzung von Rotorwellen gibt [HAU2008, S.202]. Diese Unsicherheiten sollen durch Versuche an realen Bauteilen reduziert werden. Mit diesen Ergebnissen kann später das Einsparungspotential von Material bei Schmiedestahlwellen bei gleichbleibender Betriebssicherheit geprüft werden. Außerdem sollen in weiterführenden Versuchen neue Materialien auf ihre Verwendbarkeit geprüft werden. Der Gedanke dabei ist, Materialien wie Gusseisen zu verwenden, um Produktions- und Materialkosten zu sparen. Ein Ansatz dafür ist, hohlgegossene Gusseisenwellen mit herkömmlichen Schmiedestahlwellen zu vergleichen. Zusätzlich werden Effekte, die zu Materialermüdung führen können untersucht z.B. Verschleiß.

In Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (kurz: IWES) und dem Windenergieanlagenhersteller Suzlon wird parallel ein Teststand im Maßstab 1:1 in Bremerhaven realisiert. Der Modelltriebstrang im Maßstab 1:10 wurde am Standort Bergedorf von der Hochschule für Angewandte Wissenschaft Hamburg (HAW-Hamburg) geplant und gebaut. Zum Erreichen der oben genannten Ziele mussten die Belastungen, die auf den Triebstrang einwirken, genauer definiert werden. Da die Welle für diesen Versuch beschädigt werden soll und die Anteile einer Torsionsbelastung und einer Belastung durch eine Schubkraft dafür zu gering sind, ist die Belastung durch ein Biegemoment realisiert. Zusätzlich ist die Realisierung eines Biegemomentes vergleichsweise einfach, im Gegensatz zu einer Torsionsbelastung. Da es nicht nur bei der Auswertung sondern auch bei der Realisierung des Prüfstandes zu komplex wäre, alle Belastungsszenarien darzustellen, wurde nur

## 2 1:10-Rotorwellen-Prüfstand

eine Belastung gewählt, die umlaufperiodisch auf den Triebstrang wirkt. Die Ergebnisse beider Prüfstände werden später in einen Zusammenhang gebracht und können zu einer beschleunigten Versuchsprozedur führen, die Berechnung von Triebsträngen präzisieren und zur Beeinflussung bestehender Richtlinien und Normen genutzt werden.

Die Versuche sollen anhand von Wöhlerversuchen durchgeführt werden. Hierbei handelt es sich um eine Schwingungsbeanspruchung zwischen zwei konstanten Grenzwerten die sich sinusförmig, also mit einer zeitlichen Veränderung der Spannungsbeanspruchung, auf den Prüfling auswirkt, bis es zur Materialermüdung durch Anriss oder Bruch kommt. Dieser Versuch wird an verschiedenen Prüflingen, die exakt gleich sein müssen, mit verschiedenen Spannungsamplituden durchgeführt. Dabei wird die Schwingenspielzahl, bis zum technischen Anriss des Prüflings, ermittelt. Durch das logarithmische oder halblogarithmische Auftragen der Spannungsamplituden über der Schwingenspielzahl, kann anhand mehrerer Versuche eine Wöhler-Linie entwickelt werden.

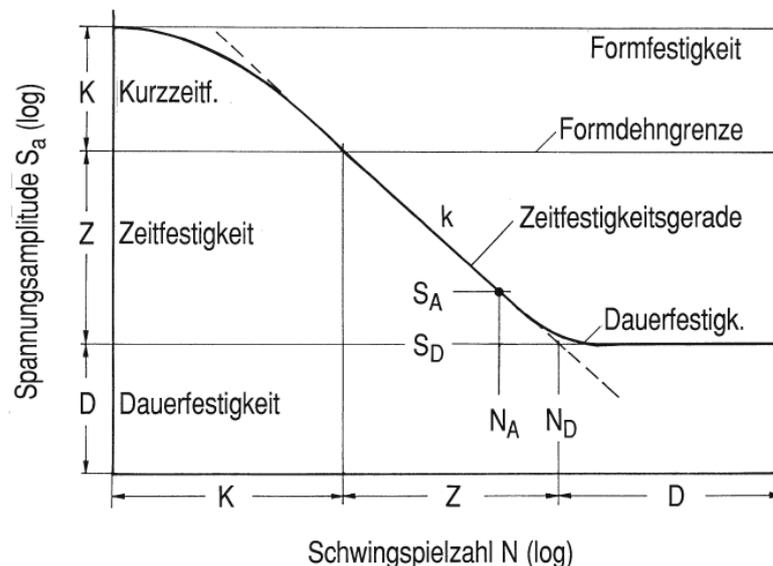


Abbildung 2-1: Schema einer Wöhler-Linie [HAI2006, S.26]

Diese Wöhler-Linie gibt dann Auskunft darüber, bis zu welcher Beanspruchungsgrenze  $S_D$  eine wechselnde Belastung beliebig oft wiederholt werden kann. Durch diese Grenze wird die Dauerfestigkeit beschrieben. Zusätzlich kann die Zeitfestigkeit bestimmt werden. Das ist der Bereich, in dem unter einer bestimmten Spannungsamplitude ein Material bei einer bestimmten Schwingenspielzahl bricht. Da ein Bruch des Materials von verschiedenen Faktoren, wie Fertigung und Geometrie abhängt, wird der

## 2 1:10-Rotorwellen-Prüfstand

---

Bruch mit einer Wahrscheinlichkeit angegeben. Aufgrund der hoch gewählten Spannungsamplitude kann die Lebensdauer einer Rotorwelle (Maßstab 1:10) von 20 Jahren innerhalb weniger Tage mit einer geringen Schwingspielzahl simuliert werden.

Wird ein Material wie Stahl einer wechselnden Belastung ausgesetzt, führt dies nicht zu einem direkten Bruch der Welle, sondern zeigt ein typisches Bruchverhalten, das in einem Schwingbruch beschrieben wird. Solch ein Schwingbruch ist in folgender Abbildung dargestellt.



Abbildung 2-2: Schwingbruch [HAI2006]

Das in Abbildung 2-2 dargestellte Schwingbruchmuster zeigt die drei Phasen eines Bruchs. Die erste Phase ist der Anriss mit submikroskopischer und makroskopischer Rissbildung. Die zweite Phase besteht aus dem mikroskopischen Rissfortschritt, der zu den sichtbaren kreisförmigen Teilbrüchen führt. Wird das Material darüber hinaus belastet, beschreibt dies die dritte Phase durch den Restbruch. Diese Phase wird auch Gewaltbruch des Rests genannt, in der es zum Bruch des letzten Teilstückes kommt [HAI2006, S.5].

### 2.1.2 Aufbau

Im Rahmen des Projektes wurde ein mobiler Teststand entwickelt, welcher einen Teil eines Triebstranges simuliert, der wiederum durch ein Biegemoment belastet wird um die Lebensdauer einer Rotorwelle in beschleunigter Form abzubilden (siehe Kapitel 2.1.1.). In **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** ist der Aufbau des Prüfstands dargestellt.

## 2 1:10-Rotorwellen-Prüfstand

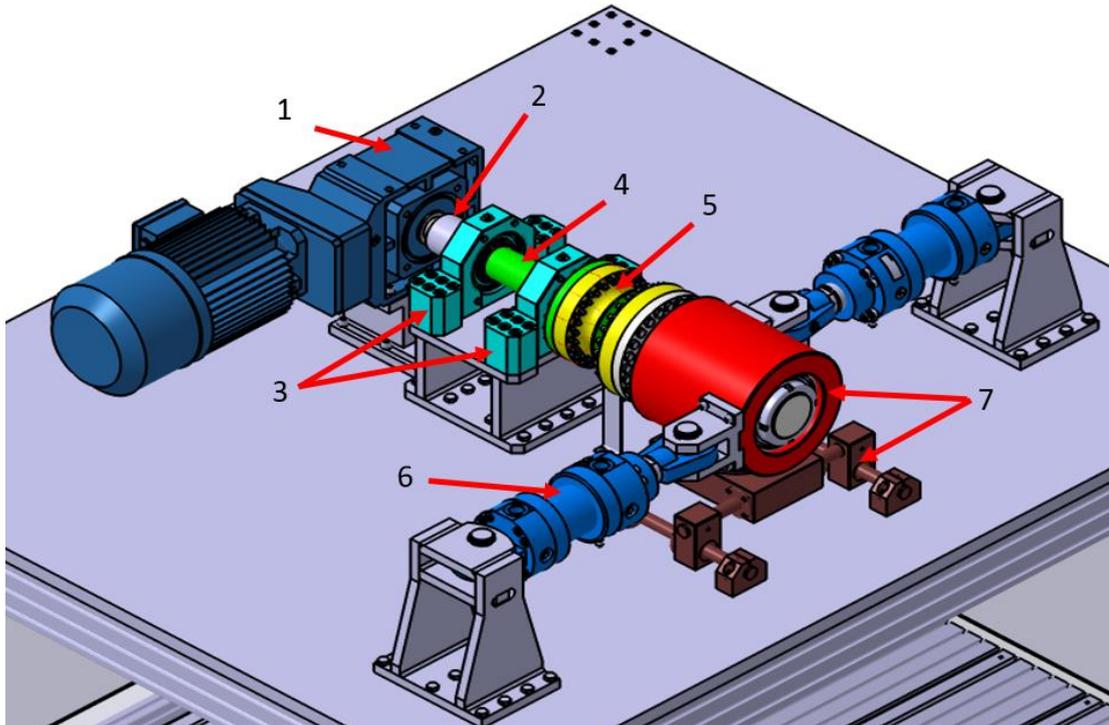


Abbildung 2-3: Aufbau des 1:10-Rotorwellen-Prüfstands

Die zu untersuchenden Prüflinge (4) werden in dem Triebstrang durch eine Flanschverbindung befestigt. Der Antrieb des Triebstranges erfolgt durch einen Elektrogetriebemotor (1) und ersetzt den Antrieb durch einen Rotor. Mit einer Leistung von  $1,5 \text{ kW}$ , einem Drehmoment von  $220 \text{ Nm}$  und einem dreistufigen Kegelradgetriebe, kann die Drehzahl vor dem Getriebe zwischen  $0$  und  $1725 \text{ r/min}$  variiert werden. Die Welle dreht sich um den Übersetzungsfaktor von  $i = 21,81 [-]$  langsamer [SEW2016]. Dabei ist der Aufbau so anzusehen, dass die Seite der Lasteinleitungsnahe (7) auch der Seite der Nabe einer realen WEA und die Seite des Motors (1) dem hinteren Teil der mechanischen Komponenten einer realen WEA entspricht. Dabei ist nur die Welle und das Wellenlager einer realen WEA nachempfunden. Die sich drehende Welle ist einer umlaufperiodischen Belastung ausgesetzt. Das heißt, dass ein definiertes Biegemoment auf die Welle einwirkt und aufgrund der Rotation der Welle eine wechselnde Belastung auf den Außenradius der Welle ausübt. Die Last, welche auf den Prüfling wirkt und eine Biegebeanspruchung in der Welle hervorruft, wird durch zwei Hydraulikzylinder (6) auf den Triebstrang gegeben. Das hydraulische Steuerungssystem kann die Hydraulikzylinder einzeln ansteuern und eine definierte Kraft von  $0$  bis  $60 \text{ kN}$  erzeugen. Um die Kraft gezielt auf den Prüfling zu geben, ist der Prüfling an zwei Stellen in zwei Wälzlager (3) gelagert und die Lager fest auf einem Lagerbock montiert. Die Bauart der Wälzlager sind Pendelrolllager, da diese Bauart das Biegemoment aufnehmen

kann und der Verschleiß der Lager reduziert wird [HAU2014, S.365]. Somit ist gegeben, dass die Welle nicht seitlich verschoben werden und das Biegemoment reproduzierbar und möglichst toleranzfrei auf den Triebstrang gegeben werden kann. Um Zwangskräfte durch Toleranzen aus dem System zu nehmen, ist eine Kupplung (2) zwischen dem Prüfling und dem Antriebsstrang des Motors verbaut. Zusätzlich kann das Biegemoment nicht an den Motor weiter gegeben werden und dort zu Schäden führen. Da es sich bei dem Triebstrang um ein rotierendes Bauteil handelt, ist es schwierig die Messdaten, welche direkt auf dem Prüfling aufgenommen werden, zur Auswerteeinheit zu bekommen. Bei der Planung des Prüfstands hat es sich als sinnvoll erwiesen, die Daten berührungslos durch Induktion von der Welle zum Auswertesystem zu übermitteln. Dazu wurde ein Telemetriesystem (5) der Firma *MANNER Sensortelemetrie* verbaut, dessen Eigenschaften im Kapitel 2.1.3 genauer beschrieben werden. Im Falle eines Bruches der Welle wird die Kraft der Hydraulikzylinder über eine Führung der Lasteinleitungsnahe (8) abgeleitet, sodass die Kraft abgeführt werden und keine weiteren Schäden verursachen kann.

### 2.1.3 Messtechnik

Um die Versuche anhand von Messdaten sinnvoll bewerten zu können und einen sicheren Betrieb des Prüfstands zu gewährleisten, sind verschiedene Messtechniken an dem Prüfstand angebracht. Die gewonnenen Daten dienen sowohl zur späteren Auswertung als auch zur Zustandsüberwachung des Prüfstands.

Alle wichtigen Messgrößen die für die Durchführung der Betriebsfestigkeitsuntersuchung notwendig sind, werden von den entsprechenden Sensoren detektiert und in einer Auswerteeinheit zusammengeführt. Dabei wird die durch das Biegemoment ausgelöste Dehnung bzw. Stauchung durch Dehnungsmessstreifen (kurz: DMS) gemessen. Die durch die Hydraulikzylinder auf die Lasteinleitungsnahe gegebene Kraft durch Kraftmessdosen und die Auslenkung der Lasteinleitungsnahe wird durch Abstandssensoren gemessen. Die in der Auswerteeinheit zusammengeführten Daten werden über eine USB-Schnittstelle an einen Computer mit einer entsprechenden Software zur Darstellung und Speicherung übergeben.

## 2 1:10-Rotorwellen-Prüfstand

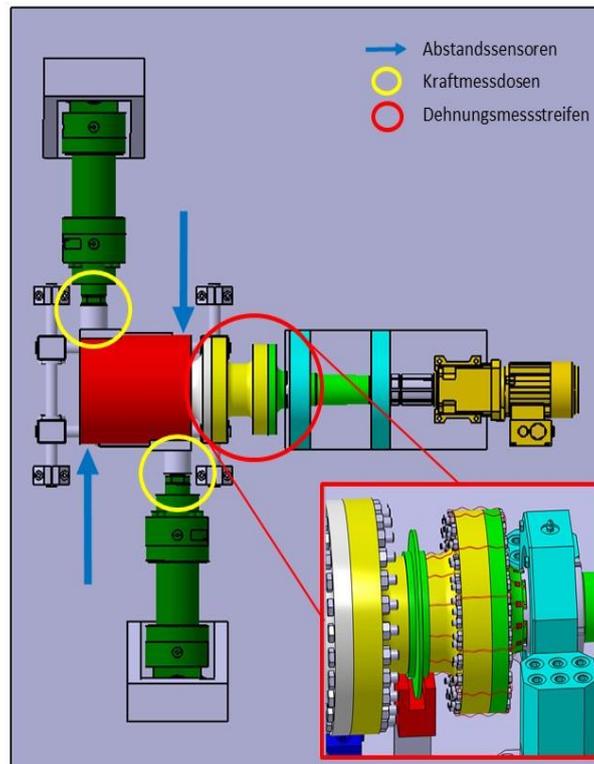


Abbildung 2-4: Verwendete Messtechnik

In Abbildung 2-4 wird aufgeführt, wo am Prüfstand die einzelnen Messtechniken angebracht sind.

Zwei Abstandssensoren messen die Auslenkung der Lasteinleitungsnabe und sind parallel zu den Hydraulikzylindern auf die Nabe gerichtet, wo sie von zwei Seiten den Abstand zwischen Nabe und Sensor mittels optischer Triangulation bestimmen. Hierbei wird ein sichtbarer Punkt auf eine Oberfläche projiziert. Eine Empfängeroptik kann nun den diffusen Anteil des reflektierten Lichtes auf einem ortsauflösenden Element abbilden. Der Messbereich ist auf 200mm begrenzt. In dem Messbereich von 200mm (Messbereichsanfang 60mm, Messbereichsende 260mm) erreicht der Sensor eine Genauigkeit von  $\pm 0,2\%$  des Messbereichs. Das analoge Ausgangssignal von 4 – 20mA wurde, wegen einer vom Hersteller falsch gelieferten Verkabelung, zu einem 1 – 5V Ausgangssignal durch einen  $250\Omega$  Widerstand modifiziert [MIE2008]. Aus dem Messbereich und dem Ausgangssignal ergibt sich ein Umrechnungsfaktor von  $50\text{mm}/V$  zum Berechnen der Messgröße.

## 2 1:10-Rotorwellen-Prüfstand

---

Die Kraft an den Hydraulikzylindern wird an dem Verbindungsstück zwischen Hydraulikzylinder und Lasteinleitungsnabe durch Kraftaufnehmer gemessen. In den Kraftaufnehmern befinden sich Messfedern auf denen DMS appliziert sind. Mit Hilfe der DMS können sowohl Zug- als auch Druckbeanspruchungen aufgenommen werden, da sie so angeordnet sind, dass der eine Teil der DMS bei einer Krafteinwirkung gestaucht und der andere Teil gedehnt wird. Die in dem Prüfstand verbauten Kraftaufnehmer werden nur einer Druckbelastung ausgesetzt und können dabei Kräfte bis 100kN mit einer Genauigkeit von  $< \pm 0,2\%$ , messen. Das analoge Ausgangssignal ist eine Spannung und kann, abhängig von der Betriebsspannung, über den Nennkennwert von  $2mV/V$  berechnet werden [HBM2015]. Für diesen Fall wird eine Betriebsspannung von 10V angelegt und ergibt somit eine Ausgangssignalspanne von 0 – 20mV. Aus dem Messbereich und dem Ausgangssignal ergibt sich ein Umrechnungsfaktor von  $5kN/mV$  zum Berechnen der Messgröße.

Die durch die Rotation der Welle entstehende Temperatur im Lager bzw. im Lager-schmiermittel wird durch einen Pt<sub>100</sub>-Sensor gemessen. Hierbei handelt es sich um einen Widerstandssensor der speziell für den Maschinenbau ausgelegt ist, mit einem abdichtenden M6 Gewinde ausgestattet ist und in den Lagerbock geschraubt werden kann. Jedoch erhöht sich nicht nur die Temperatur im Lager, sondern auch die Umgebungstemperatur innerhalb des Teststandes. Um diesen Temperaturanstieg auszugleichen, ist der Pt<sub>100</sub> mit einer 3-Leitertechnik zur Temperaturkompensation ausgestattet [POH2015]. Verändert sich die Temperatur im Lagerschmiermittel, verändern sich die physikalischen Eigenschaften des Materials und somit verändert sich ebenfalls der elektrische Widerstand des Platinsensors. Die Änderung des Widerstandes wird anhand einer Strom- und Spannungsmessung gemessen, wobei die Stromstärke konstant ist und sich die Spannungsänderung proportional zur Widerstandsänderung verhält [TRA2014, S.918].

Die DMS sind an den kritischen Punkten an der Prüflingswelle appliziert. DMS reagieren mit einer Widerstandsänderung auf eine Längen- und Querschnittsänderung die durch Dehnen oder Stauchen herbeigeführt wird. Die Widerstandsänderung ist proportional zur Längen- und Querschnittsänderung. Anhand der Widerstandsänderung und einer konstanten Stromversorgung wird als Ausgangssignal die Änderung der Spannung gemessen [TRA2014, S.576]. Die am Prüfstand verwendeten DMS der Firma *Tokyo Sokki Kenkyujo Co* vom Typ *FLA-05-11* haben eine aktive Messgittergröße von 0,5mm und einen Nennwiderstand von  $120 \pm 0,3\Omega$ . Das Verhältnis der relativen Widerstandsänderung zur relativen Längenänderung beträgt  $2,17 \pm 1\%$  [TSK2015].

## 2 1:10-Rotorwellen-Prüfstand

Die berührungslose Datenübermittlung von der Welle zur Auswerteeinheit wird durch ein Telemetriesystem realisiert. Das Telemetriesystem wird als Adapterstück zwischen den Prüfling und die Lasteinleitungsnahe geflanscht. Dort können die Messdaten von bis zu 16 DMS durch einen Sensorsignalverstärker verstärken und in digitaler Form durch Induktion von der Rotorantenne an eine Statorantenne übergeben. Die Statorantenne ist sowohl Spannungsquelle für den auf der Welle befindlichen Telemetriesystemteil als auch Empfänger für die digitalisierten Messdaten. Die Messdaten der Kraft-, Abstands-, und Temperaturmessung werden analog an die Auswerteeinheit übermittelt, an eigens dafür eingerichtete Analogeingänge [MAN2015].

Die Kennwerte der einzelnen Messtechniken sind zur Übersicht in der Tabelle 1: Kennwerte der Messtechniken dargestellt.

Tabelle 1: Kennwerte der Messtechniken

	Abstandssensoren	Kraftmessdose	DMS	Temperatur-sensor
<b>Produktname</b>	optoNCDT	U3	FLA-05-11	PT100-400-M6
<b>Firma</b>	MICRO-EPSILON	HBM	Tokyo Sokki Ken-kyujo	Polytech
<b>Messbereich</b>	0-200mm	0-100kN	-	-90...200°C
<b>Genauigkeit</b>	±0,2%	< 0,2%	K=2,17±1%	Klasse B
<b>Funktionsprinzip</b>	Triangulation	Widerstandsänderung durch Dehnung und Stauchung	Widerstandsänderung durch Dehnung und Stauchung	Widerstandsänderung durch Temperatureinfluss
<b>Ausgangssignal<sup>1</sup></b>	Spannung (analog)	Spannung (analog)	Spannung (digital)	Spannung (analog)
<b>Messgröße</b>	Länge	Kraft	rel. Dehnung	Temperatur

\* 1 : Hier ist zusätzlich die Übergabeform des Ausgangssignals an die Auswerteeinheit angegeben.

Alle oben erwähnten Messdaten können über die Software der Firma MANNER *Interface für Mehrkanal-Systeme* (Version 2.3) gelesen, grafisch dargestellt und gespeichert werden.

Desweiteren ist ein Abschaltssystem für den Fall des Durchbruchs an der Nabe angebracht. Dabei wird mit einem Impulsgeber die Drehzahl gemessen, indem ein Impuls ausgegeben wird, sobald ein metallischer Gegenstand in den Erfassungsbereich gelangt. Kommt es nun zu einem Durchbruch des Prüflings, kann die Rotation nicht mehr zur Nabe weitergegeben werden und der Impulsgeber kann keinen Impuls mehr ab-

geben, wodurch sich der Prüfstand abschaltet. Zusätzlich können mobile Messsysteme zur Zustandsüberwachung installiert werden, die in Kapitel 3 genauer beschrieben werden.

## 2.2 Problemdarstellung

Nachdem der Prüfstand aufgebaut wurde und die Messtechnik installiert war, wurde der Prüfstand mit einer Dummywelle ausgestattet. Die Dummywelle entspricht im Material den Prüflingen hat jedoch ein leicht abweichendes Design. Aufgrund des abweichenden Designs speziell im Durchmesser der Lagersitze (siehe Anhang Abbildung 9-1 und Abbildung 9-2) wurden die Dimensionen auf die der Prüflingswelle angepasst. Jedoch konnten die geforderten Radien vom Übergang des Lagersitzes zur Flansch technisch nicht realisiert werden. Die Dummywelle dient dazu, Vorversuche durchführen zu können. Mit Hilfe der Vorversuche konnte die installierte Messtechnik eingestellt werden und die Messdaten auf Plausibilität geprüft werden. Zusätzlich konnten Unstimmigkeiten im Ablauf der Versuche erkannt und behoben werden. Im Betrieb stellt sich am Prüfstand zeitweise ein Klopfgeräusch ein. Die Problematik an diesem Klopfgeräusch besteht darin, dass der Ursprung des Klopfens nicht lokalisierbar ist. Das heißt, dass das Klopfgeräusch aus dem Inneren des Prüfstands (z.B. Motor, Lager) kommen kann, jedoch an einer anderen Stelle austritt. Unabhängig von dem Austritt des Klopfgeräusches ist es nicht möglich den genauen Ursprungsort durch eine offensichtliche Bewegung zu identifizieren. Es kommt erschwerend dazu, dass das Geräusch nicht gleichbleibend ist, weder in der Lautstärke noch in der Klangform. Teilweise setzt das Geräusch aus und kehrt nach einiger Betriebszeit wieder. Zusätzlich lassen Versuche bei unterschiedlichen Betriebszuständen auf einen Einfluss der Belastungshöhe und Drehzahl auf das Klopfgeräusch schließen.

Um das Klopfgeräusch zu lokalisieren und die dafür verantwortliche Quelle zu finden, werden Messsysteme zur Zustandsüberwachung eingesetzt. Die Messsysteme können mobil eingesetzt werden, um die von der Schallquelle ausgehenden Signale anhand verschiedener Funktionsprinzipien zu messen. Mit Hilfe der Messsysteme soll der Fehler identifiziert und für den eigentlichen Messbetrieb behoben werden. Eine genauere Beschreibung der Messsysteme erfolgt im Abschnitt 3.

### 3 Möglichkeiten zur Schadensdiagnostik

Im Folgenden werden drei Messsysteme vorgestellt, mit deren Hilfe die in Abschnitt 2.2 beschriebene Problemstellung gelöst werden soll. Anhand der Messsysteme werden verschiedene Funktionsprinzipien und Anwendungsmöglichkeiten zur Schadensdiagnostik aufgezeigt, um diese im späteren Verlauf hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit zu vergleichen.

#### 3.1 Akustische Kamera

Die in Abbildung 3-1 dargestellte Akustische Kamera (kurz: AK) *Paddle 2x24 AC Pro* ist ein Messsystem zur berührungslosen Nahfeldmessung von tiefen Frequenzen. Sie besteht aus einem 2x24 Studiomikrofon Array mit einem Frequenzgang der Mikrofone von  $20\text{Hz} - 20\text{kHz}$ . Die Mikrofone sind mit einem Abstand von  $12\text{mm}$  in zwei Ebenen angeordnet, sodass der Schalldruck gemessen werden kann während zeitgleich die Schallschnelle und Schallintensität errechnet werden können. Die Besonderheit der AK besteht darin, dass sie durch ihre Bauweise mobil einsetzbar ist, denn die Mikrofone sind in einem Array mit einem Abstand von nur  $7\text{cm}$  angeordnet, wodurch die Kompaktheit der Kamera zustande kommt. Mit einem empfohlenen Messabstand von  $0,1\text{m} - 0,15\text{m}$  sind nur Nahfeldmessungen möglich. Zusätzlich ist die AK mit einer digitalen Videokamera ausgestattet [GFA2015].

Das Messsystem besteht aus der AK, einem Datenrecorder mit einer Abtastrate von  $192\text{kHz}$  und einem Messrechner in Form eines transportablen PC, der mit der Software *NoiseImage* versehen ist [GFA2015a]. Diese Software ermöglicht eine Vielzahl von Analysemethoden, die in Verbindung mit der Digitalkamera nicht nur signalspezifische Analysen zulässt, sondern auch eine Verbindung zwischen den aufgenommen Messsignalen und dem aufgenommenen Bildmaterial der Digitalkamera ermöglicht. Auf diese Weise kann ein akustischer Film oder ein akustisches Foto dargestellt werden. Sofern ein CAD-Modell des zu messenden Objektes zur Verfügung steht, kann dieses ebenfalls von der Software verwendet werden, um ein akustisches 3D-Foto zu erstellen [GFA2015b].

### 3 Möglichkeiten zur Schadensdiagnostik

---



Abbildung 3-1: Akustische Kamera - Paddle 2x24 AC Pro - Akustische Kamera für Nahfeldanalysen [GFA2015]

Damit das Funktionsprinzip der AK und die damit aufgenommenen Messwerte besser verständlich sind, werden im Folgenden die physikalischen Grundlagen genauer erläutert.

#### 3.1.1 Physikalische Grundlagen

Die AK ist in der Lage, akustische Signale zu erfassen und in verschiedene physikalische Bezugsgrößen umzuwandeln. Dazu wird vorab geklärt, um was für Signale es sich dabei handelt, wie sie vom Ursprungsort zur Kamera gelangen und wie diese dort sinnvoll betrachtet werden können.

Bei dem Signal handelt es sich um Schallwellen, die als eine mechanische Schwingung eines elastischen Mediums bezeichnet. Das Medium kann sowohl gasförmig, flüssig oder fest sein. Eine „mechanische Schwingung wiederum ist definiert als zeitlich periodische Zustandsänderung, die auftritt, wenn bei der Störung des mechanischen Gleichgewichtes Kräfte wirksam werden, die das Gleichgewicht wiederherzustellen versuchen“ [WILL2010, S.213]. Dabei können die mechanischen Schwingungen in unterschiedlichen Formen abhängig vom Medium auftreten. Zum einen die sich senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Störung bewegenden transversal Wellen (festes Medium) und zum anderen die sich in Ausbreitungsrichtung der Störung bewegenden longitudinal Wellen (gasförmig, flüssiges und festes Medium) [TIP2015, S.456].

### 3 Möglichkeiten zur Schadensdiagnostik

Für die Betrachtung am Prüfstand geht man davon aus, dass die Wellenquelle, also der Ort an dem das Geräusch seinen Ursprung hat, punktförmig und das Medium in dem es sich ausbreitet homogen ist. Für die AK ist die Wellenquelle nicht der Fehler im mechanischen Bauteil des Prüfstandes, sondern der Austrittsort am Bauteil. Von hier breitet sich der Schall nun Kugelförmig aus (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) [TIP2015, S.456].

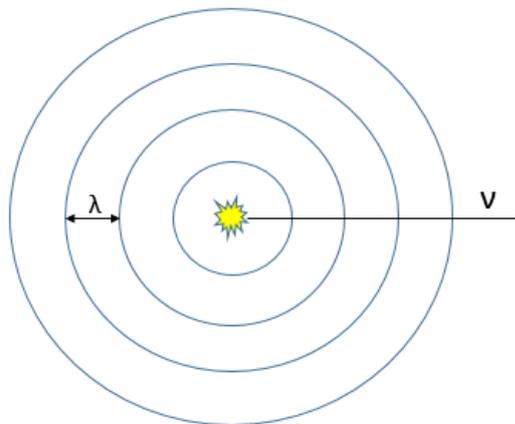


Abbildung 3-2: Akustische Kamera - Schallausbreitung

Die sich kugelförmig ausbreitenden Wellen beginnen bei der Wellenquelle und bilden verschiedene Wellenfronten, die mit dem gleichen Radius um die Wellenquelle herum liegen (vergleichbar mit den Wellen, die entstehen wenn ein Tropfen ins Wasser fällt). Der Abstand zwischen den Wellenfronten ist gleichzeitig die Wellenlänge. Die Wellenfronten entfernen sich mit einer bestimmten Geschwindigkeit vom Ursprungsort. Dies wird Wellengeschwindigkeit  $v$  genannt [TIP2015, S.456].

$$v = \sqrt{\frac{K}{\rho_0}}$$

Formel 3-1: Akustische Kamera - Wellengeschwindigkeit [TIP2015, S.458]

Die Wellengeschwindigkeit berechnet sich aus dem Kompressionsmodul  $K$  und der Dichte des Mediums im Gleichgewichtszustand  $\rho_0$ , wobei das Kompressionsmodul beschreibt, wie viel Druck für eine Volumenänderung benötigt wird.

Die Intensität ist die Schallleistung  $P$  an der Schallquelle bezogen auf eine Fläche  $A$ .

### 3 Möglichkeiten zur Schadensdiagnostik

---

$$I = \sqrt{\frac{P}{A}}$$

Formel 3-2: Akustische Kamera - Intensität bezogen auf die Fläche [TIP2015, S.470]

Aufgrund der Ausbreitung der Wellenfronten vergrößert sich der Abstand zur Wellenquelle und somit auch der Radius. Wird das Gesetz der Energieerhaltung berücksichtigt folgt daraus, dass die Intensität  $I$  mit steigendem Radius  $r$  quadratisch abnimmt, da sie sich auf einen größeren Umfang verteilen muss [TIP2015, S.470].

Für die Intensität mit  $A = 4\pi r^2$  ergibt sich:

$$I = \sqrt{\frac{P}{4\pi r^2}}$$

Formel 3-3: Akustische Kamera - Intensität [TIP2015, S.470]

Die Ausbreitung der Schallwelle hat eine lokale Druckänderung zur Folge, da die Moleküle des Mediums in Schwingung versetzt werden. Um die Ergebnisse des Schalldruckes besser vergleichbar zu machen, wird die wechselnde Größe Schalldruck als Effektivwert angegeben.

$$p_{eff} = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} p^2 dt}$$

Formel 3-4: Akustische Kamera - Effektivwert des gemessenen Schalldruckes [LIN2010, S.241]

Dabei wird im Messsystem der gemessene Schalldruck  $p$  über die Zeit  $\tau$  integriert [LIN2010, S.241].

Der vom Mensch wahrnehmbare Schalldruck erstreckt sich über eine Bandbreite von  $10^{-5} Pa$  bis  $20 Pa$ . Ähnlich verhält es sich mit der Schallintensität. Um diese großen Bandbreiten einzudämmen und handhabbarer zu gestalten, werden die Werte in Pegelmaßen angegeben [LER2009, S.9].

$$L_p = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{p}{p_0} \right)$$

Formel 3-5: Akustische Kamera - Schalldruckpegel in dB [LER2009, S.10]

### 3 Möglichkeiten zur Schadensdiagnostik

---

$$L_I = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{I}{I_0} \right)$$

Formel 3-6: Akustische Kamera - Schallintensitätspegel in dB [LER2009, S.10]

Mit Hilfe des Schallintensitätspegels  $L_I$  und des Schalldruckpegels  $L_p$  können die großen Wertebereiche auf einem kleineren logarithmischen Wertebereich dargestellt werden. Als Bezugsgrößen dienen dabei die Werte für Schallintensität  $I_0 = 10^{12} \frac{W}{m^2}$  und Schalldruck  $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} Pa$  an der Hörschwelle des menschlichen Ohres [LER2009, S.10].

#### 3.1.2 Funktionsprinzip

Das Funktionsprinzip einer AK beruht auf dem Funktionsprinzip von Elektretmikrofonen. Diese verhalten sich wie Kondensatormikrofone und wandeln Luftschall in ein elektrisches Signal um. Dabei wird ein druckempfindlicher Kondensator verwendet, der seine Kapazität durch das Schwingen einer Membran ändert. Die Schwingung der Membran hingegen wird durch den auf die Membran treffenden Luftschall ausgelöst [ZEL2009, S.320]. Ein Elektretmikrofon hat im Gegensatz zu einem Kondensatormikrofon keine äußere Spannungsquelle, sondern ist mit einem permanent geladenen Dielektrikum versehen, welches ein Spannungsfeld erzeugt. Mit Hilfe dieser Spannung können die druckabhängigen Kapazitätsunterschiede ausgewertet werden [LER2009, S.358].

#### 3.2 Laser-Doppler-Vibrometer

Mit dem Laser-Doppler-Vibrometer (kurz: LDV) *IVS 200* der Firma *Polytec* können, aufgrund der hohen Dynamik des Sensors, berührungslos Schwingungen in einem großen Frequenzbereich ( $0,2 Hz - 25 kHz$ ) gemessen werden. Dabei wird mit einem Einpunkt-Laser die Schwinggeschwindigkeit von  $\pm 100 \frac{mm}{s}$  auf einer Distanz von  $70 mm - 2000 mm$  gemessen. Störsignale durch niedrige Frequenzen ( $22 kHz$ ) können durch einen Hoch-Pass bei Bedarf herausgefiltert werden. Als Ergebnis der Messung wird eine Ausgangsspannung von  $\pm 4 V$ , die proportional zur Schwinggeschwindigkeit ist, ausgegeben. Für ein besseres Verständnis der gemessenen Daten werden im Folgenden die physikalischen Grundlagen und das genaue Funktionsprinzip des Messsystems erklärt [POL2015].

### 3 Möglichkeiten zur Schadensdiagnostik

#### 3.2.1 Physikalische Grundlagen

Die Grundlage für die Messung mit einem Laser-Doppler-Vibrometer ist der Doppler-Effekt, welcher von Christian Doppler (1803 – 1853) entdeckt wurde [TIP2015].

Der Doppler-Effekt kann auf verschiedene Strahlungen angewendet werden, die sich in einem Medium bewegen. Dabei wird eine Frequenzverschiebung betrachtet, die von zwei sich relativ zueinander bewegenden Objekten ausgelöst wird. Die Objekte sind zum einen die Quelle und zum anderen der Empfänger der ausgesendeten Strahlung.

Dabei können drei verschiedene Szenarien betrachtet werden [TIP2015, S.474]:

- Die Quelle ist in Bewegung, der Empfänger ruht.
- Die Quelle ruht, der Empfänger ist in Bewegung.
- Die Quelle und der Empfänger sind in Bewegung.

In Abbildung 3-3 ist der Doppler-Effekt von einer sich bewegenden Quelle dargestellt.

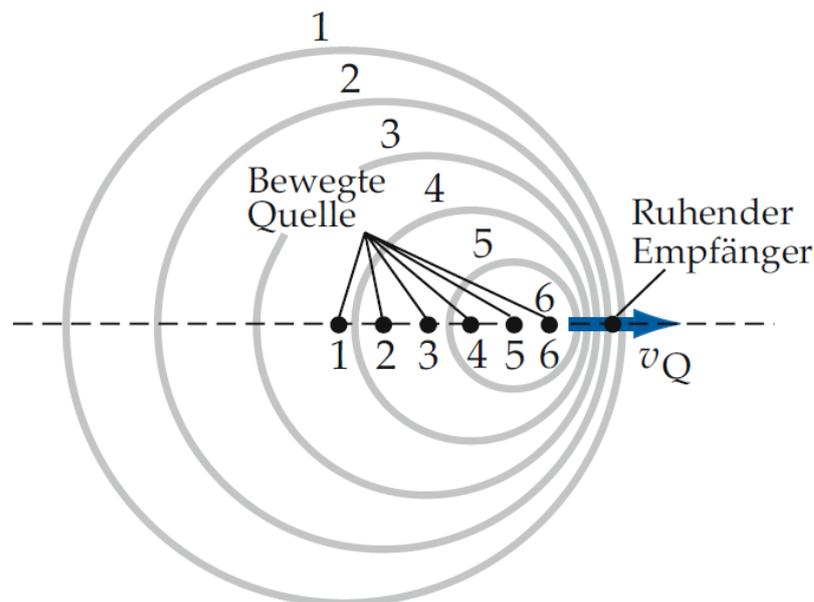


Abbildung 3-3: Doppler Effekt für eine sich bewegende Quelle [TIP2015, S.475]

Der Doppler-Effekt lässt sich gut an dem Beispiel eines vorbeifahrenden Autos beschreiben. Angenommen das Auto ist die sich bewegende Schallquelle und der Beobachter der ruhende Empfänger, dann ist die Frequenz des auf den Beobachter zu fahrenden Autos höher. Der Beobachter nimmt ein höheres Geräusch wahr. Fährt das Auto nun am Beobachter vorbei und entfernt sich von ihm, dann ist das Geräusch tiefer

### 3 Möglichkeiten zur Schadensdiagnostik

---

als zuvor, da auch die Frequenz tiefer ist. Der Grund dafür liegt darin, dass wenn sich die Quelle und der Empfänger aufeinander zubewegen, die Frequenz  $f_E$  größer ist als die von der Quelle ausgesendete Frequenz  $f_Q$ . Somit ist auch die Wellenlänge  $\lambda_E$  kleiner als die von dem Auto ausgesendete Wellenlänge  $\lambda_Q$ . Entfernt sich die Quelle vom Empfänger, dann verhält es sich genau anders herum. Die Frequenz  $f_E < f_Q$  und die Wellenlänge  $\lambda_E > \lambda_Q$  [TIP2015, S.474].

Die folgende Betrachtung bezieht sich weiterhin auf die sich relativ zueinander bewegende Schallquelle und Schallempfänger in einem ruhenden Medium, da die Frequenzverschiebung ebenfalls davon abhängig ist, ob sich der Empfänger oder die Quelle bewegen [TIP2015, S.474]. Darum wird im Folgenden die Frequenzverschiebung für eine sich bewegende Quelle beschrieben, da es sich beim LDV auch um eine bewegende Quelle und einen ruhenden Empfänger handelt

Für die Betrachtung wird angenommen, dass die Geschwindigkeit mit der sich die Quelle bewegt  $v_Q \neq 0$  und die Geschwindigkeit des Empfänger  $v_E = 0$  ist [TIP2015, S.474].

Die Frequenz des Schalls, die den Empfänger  $f_E$  erreicht

$$f_E = \frac{v}{\lambda}$$

*Formel 3-7: Doppler Effekt - Empfängerfrequenz im Ruhezustand [TIP2015, S.474]*

ist abhängig von der Wellenlänge  $\lambda$  und der Wellengeschwindigkeit  $v$ . Da sich die Quelle bewegt, ist  $f_E \neq f_Q$  und kann folgendermaßen bestimmt werden (siehe Abbildung 3-3). Die Abstände, in denen Wellenberge die Quelle verlassen, ergeben die Periodendauer  $T_Q$  und beschreiben unter anderem den Abstand zwischen zwei Wellenbergen, die zu zwei verschiedenen Zeitpunkten ausgesendet wurden  $T_Q = t_1 - t_2$ . In der Zeit  $T_Q$  hat sich der bei  $t_1$  ausgesendete Wellenberg um die Strecke  $vT_Q$  und die Quelle um die Strecke  $v_Q T_Q$  weiterbewegt. Daraus ergibt sich, dass am Zeitpunkt  $t_2$  der Abstand zwischen der Schallquelle und dem an  $t_1$  ausgesendeten Wellenberg die Wellenlänge  $\lambda$  ist [TIP2015, S.474].

Somit kann die Wellenlänge nach der Quelle

$$\lambda_n = (v + v_Q)T_Q = \frac{v + v_Q}{v_Q}$$

*Formel 3-8: Doppler-Effekt - Wellenlänge nach der Quelle [TIP2015, S.474]*

### 3 Möglichkeiten zur Schadensdiagnostik

---

und vor der Quelle

$$\lambda_v = (v - v_Q)T_Q = \frac{v - v_Q}{v_Q}$$

Formel 3-9: Doppler-Effekt - Wellenlänge vor der Quelle [TIP2015, S.474]

errechnet werden. Daraus folgt:

$$f_E = \frac{v}{\lambda_{n,v}} = \frac{v}{v \pm v_Q} v_Q$$

Formel 3-10: Doppler-Effekt - Frequenz am Empfänger [TIP2015, S.474]

Das Laser-Doppler-Vibrometer verwendet einen Laserstrahl. Die Ausbreitung von Licht, also elektromagnetischen Strahlen, verhält sich anders als Schall. Elektromagnetische Strahlen sind nicht auf ein Umgebungsmedium angewiesen, weshalb näherungsweise davon ausgegangen werden kann, dass [HER2012, S.121]:

$$f_{E,v} = f_Q \sqrt{\frac{c + v_{rel}}{c - v_{rel}}}$$

Formel 3-11 :Doppler-Effekt - Frequenz am Empfänger bei Licht, vor der Quelle [HER2012, S.122]

$$f_{E,n} = f_Q \sqrt{\frac{c - v_{rel}}{c + v_{rel}}}$$

Formel 3-12: Doppler-Effekt - Frequenz am Empfänger bei Licht, nach der Quelle [HER2012, S.122]

Wobei nur die Relativgeschwindigkeit  $v_{rel}$  zwischen Empfänger und Quelle und die Lichtgeschwindigkeit relevant sind [HER2012, S.122].

#### 3.2.2 Funktionsprinzip

Das Funktionsprinzip des Laser-Doppler-Vibrometers wird anhand folgender Skizze beschrieben:

### 3 Möglichkeiten zur Schadensdiagnostik

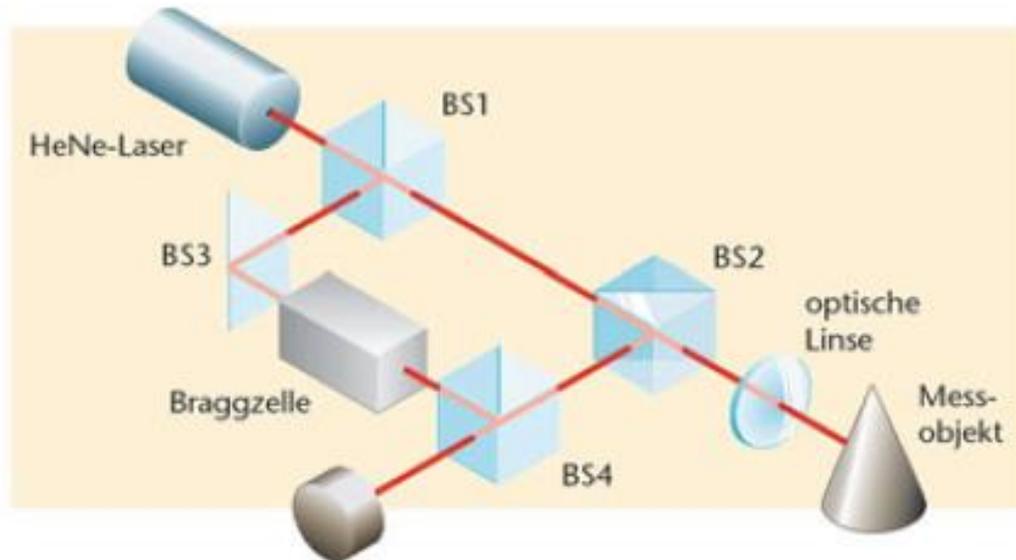


Abbildung 3-4: Doppler Effekt - Funktionsprinzip des LDV [KUT2015, S.97]

Ein Helium-Neon-Laserstrahl, mit einer definierten Wellenlänge und Frequenz, wird durch einen Strahlteiler in einen Referenzstrahl und einen Messstrahl geteilt. Der Messstrahl wird auf das Messobjekt geleitet und wird von diesem reflektiert. Bewegt sich das Messobjekt in Messrichtung kommt es, aufgrund des Doppler-Effektes, zu einer Frequenzverschiebung des reflektierten Messstrahls. Dieser wird im Vibrometer mit dem Referenzstrahl überlagert und auf eine Fotodiode geleitet, wo die beiden Laserstrahlen anhand ihrer Frequenzverschiebung ausgewertet werden [KUT2015, S. 96].

### 3.3 Vibrationsmessung mit Beschleunigungssensoren

Das Messsystem zur Vibrationsmessung mit Beschleunigungssensoren wurde von der Firma *GL Garrad Hassan GmbH* gebaut. Es befindet sich in einem wasser- und staubdichten 'PeliCase', da es für den Gebrauch an WEA konzipiert wurde und verschiedenen Witterungsverhältnissen standhalten muss.

Die Messung erfolgt über 16 Kanäle, die simultan aufnehmen können.

- 10 Kanäle mit IEPE-Anschlüssen für ICP®-Beschleunigungssensoren für eine Frequenz von 0,5Hz – 10kHz (Resonanz bei 22kHz)
- 2 Kanäle mit IEPE-Anschlüssen für ICP®-Beschleunigungssensoren für niedrige Frequenzen (0,2Hz – 15 kHz, Resonanz bei 30kHz)

### 3 Möglichkeiten zur Schadensdiagnostik

- 1 Kanal zur Drehzahlmessung für eine Lichtschranke und einen Reflektor, der auf der Welle angebracht wird
- 3 Kanäle für weitere Messgrößen

Die von den Beschleunigungssensoren aufgenommenen Messdaten werden an die Auswerteeinheit übergeben. Von hier aus können die Daten optional auf einem Datenlogger und/oder auf dem Messrechner gespeichert werden. Mit der Software *imcStudio* können die Parameter der Messung beeinflusst werden. Zusätzlich können gemessene Daten in Echtzeit grafisch dargestellt und im Datenformat *\*raw* (Famos) gespeichert werden [GLG2012].

Die ICP®-Sensoren sind von der Firma *PCB Piezotronics* und gehören zu der Gruppe piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer, dessen Funktionsprinzip im weiteren Verlauf genauer erläutert wird. Aufgrund einer niedrigen Ausgangsimpedanz am Aufnehmer ist die Kabellänge nahezu irrelevant. Die niedrige Ausgangsimpedanz ist möglich, da sich der Impedanzwandler und der Vorverstärker (Integrated Electronics Piezo Electric = IEPE) im Aufnehmer befinden. Außerdem können kostengünstiger Zweileiterkabel verwendet werden, welche den Aufnehmer mit 2mA – 20mA Gleichstrom versorgen [KUT2015, S.111]. Da es sich um ein mobiles Messsystem handelt ist es wichtig, dass die Sensoren schnell installiert bzw. schnell vom Messort entfernt werden können. Die schnellste Möglichkeit einen Sensor zu platzieren, ist ein auf dem Sensor verschraubter Magnet. Die Auswirkung der Befestigungsart auf die Empfindlichkeit bezogen auf die Frequenz ist in Abbildung 3-5 dargestellt.

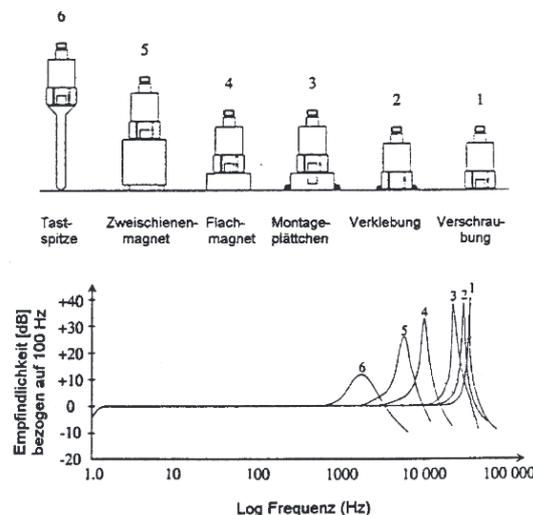


Abbildung 3-5: Beschleunigungssensoren: Einwirkung der Befestigungsart auf Frequenz und Empfindlichkeit [SYT2016]

### 3 Möglichkeiten zur Schadensdiagnostik

Die für das Messsystem verwendete Befestigungsart mit einem Magnet zeigt, dass die Empfindlichkeit im oberen Frequenzbereich aufgrund der höheren Masse abnimmt. Die Befestigungsart hat jedoch keine Auswirkung auf den niedrigen Frequenzbereich [SYT2016].

#### 3.3.1 Physikalische Grundlagen

Die physikalischen Grundlagen beruhen auf dem piezoelektrischen Effekt. „Unter dem piezoelektrischen Effekt versteht man die Entstehung einer nach außen ableitbaren elektrischen Ladungsverschiebung an den Oberflächen von piezoelektrischen Materialien durch einwirkende Kraft“ [KUT2015, S.101]. Dabei wird zwischen zwei unterschiedlichen Krafteinwirkungen differenziert, wie in Abbildung 3-6 dargestellt.

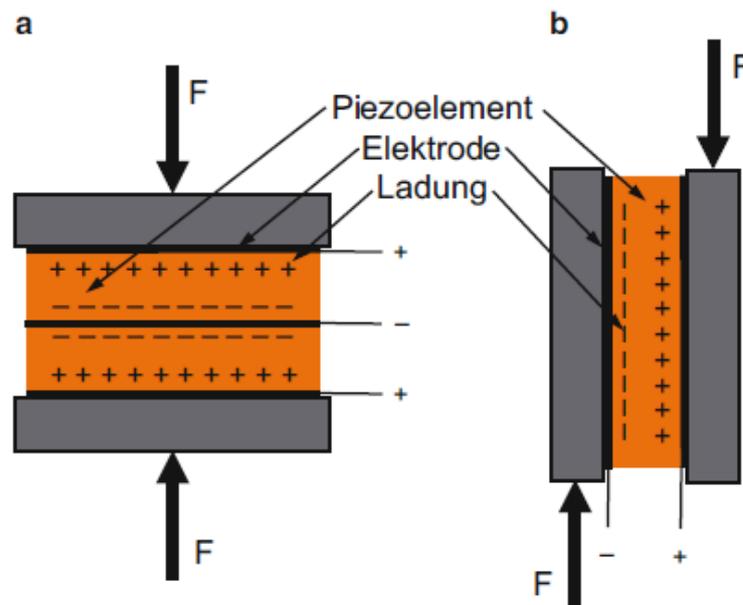


Abbildung 3-6: Piezoelektrischer Effekt - Möglichkeiten der Krafteinwirkung a)Druckwirkung b)Scherwirkung [KUT2015, S.102]

Zum einen kann eine Ladungsverschiebung durch eine Krafteinwirkung von einer Druckeinwirkung oder durch eine Scherwirkung erfolgen. Um die bei einer Krafteinwirkung  $F$  entstehende Ladung  $Q$  abzuleiten, sind zusätzlich Elektroden angebracht. Nach dem Coulombschen Gesetz entsteht dadurch die Spannung  $U_q$ ,

$$U_q = \frac{Q}{C}$$

Abbildung 3-7: Piezoelektrischer Effekt - erzeugt Spannung [KUT2015, S.102]

### 3 Möglichkeiten zur Schadensdiagnostik

---

wobei die sich die Kapazität aus der des Kabels und des piezoelektrischen Materials zusammensetzt. Zusätzlich ist die Ladung  $Q$  proportional zu Kraft  $F$ .

$$Q = k_p \cdot F$$

Abbildung 3-8: Piezoelektrischer Effekt - Proportionalität zwischen Ladung und Kraft [KUT2015, S.102]

Die Konstante  $k_p$  ist abhängig von der angreifenden Kraft (Druck-, Scher-), also auch der Bauform und zusätzlich vom piezoelektrischen Material. Bei einem synthetisch hergestellten Piezoelement ist der Wert der Konstante  $k_p$  bis zu zwei Zehnerpotenzen größer.

Mit  $F = m \cdot \ddot{x}$  ergibt sich:

$$U_q = \frac{k_p}{C} \cdot m \cdot \ddot{x}$$

Abbildung 3-9: Piezoelektrischer Effekt - Proportionalität zwischen Spannung und Beschleunigung [KUT2015, S.102]

Somit kann die abgegriffene Spannung proportional in die zu messende Beschleunigung  $\ddot{x}$  umgerechnet werden.

#### **Kreuzkorrelation:**

Zur Berechnung der zeitlichen Differenz von zwei Signalen wird die Kreuzkorrelation verwendet. Die Kreuzkorrelation beschreibt die gegenseitige Abhängigkeit von zwei Funktionen  $x(t)$  und  $y(t)$ , wobei  $y(t)$  gegenüber  $x(t)$  um den Parameter  $\tau$  auf der X-Achse verschoben wird [LER2009, S. 718].

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2 \cdot T} \int_{-T}^T x(t) \cdot y(t + \tau) dt$$

Formel 13: Beschleunigungssensoren - Kreuzkorrelation [LER2009, S.718]

Dabei wird das Ergebnis integriert und eine neue Funktion entsteht. Die neue Funktion zeigt Maxima an den Stellen an denen die größte Übereinstimmung zwischen den Funktionen ist [LER2009, S. 718].

#### **3.3.2 Funktionsprinzip**

Durch eine Vibration wird der Sensor beschleunigt. Die in dem Sensor eingebaute Masse wirkt mit ihrer Trägheitskraft auf das Piezoelement. Hierdurch wird das Piezoelement gestaucht und es kommt zu einer Ladungsverschiebung, die sich auf die

## 4 Bewertungskriterien und Versuchsabläufe

---

Spannung auswirkt. Da es sich um einen IEPE-Sensor handelt (siehe Physikalische Grundlagen), ist keine weitere Signalverarbeitung notwendig und die Spannung kann direkt als Ausgangssignal verwendet werden [KUT2015, S.103].

### 4 Bewertungskriterien und Versuchsabläufe

Die ausgewählten Messsysteme sind im Allgemeinen zur Zustandsdarstellung von verschiedenen Anlagen, Maschinen o.ä. gedacht. Das heißt, dass sie in verschiedenen Anwendungsbereichen eine Anwendung finden. Dabei werden die Systeme häufig zur Prävention eingesetzt, um mögliche Schäden frühzeitig zu erkennen. Sie werden z.B. eingesetzt um zu überprüfen ob Grenzwerte eingehalten werden, oder sie dienen als Überwachungseinheit, um bei einem bestimmten Schwellenwert abzuschalten.

In diesem Anwendungsbeispiel sollen die Messsysteme eingesetzt werden, um einen schon vorhandenen Schaden bestmöglich darzustellen. Dazu werden für jedes Messsystem Kriterien definiert anhand derer eine Bewertung zur Schadensdiagnostik möglich ist. Außerdem wird die Vorgehensweise für die Anwendung der Messsysteme beschrieben.

Im Verlauf der Versuche hat sich herausgestellt, dass das Klopfgeräusch nahezu unwillkürlich und in verschiedenen Lautstärken auftritt. Anfangs handelte es sich um ein klares lautes Klopfgeräusch, das sich zu einem sehr leisen Geräusch entwickelt hat und nur noch ohne Umgebungsgeräusche und Vibrationen messbar ist. Hierzu wurde die Konfiguration des Teststandes jeweils auf die die Lautstärke des Klopfgeräusches angepasst, was jedoch dazu führen kann, dass die Messdaten nicht mit einander vergleichbar sind.

#### 4.1 Akustische Kamera

Der Nutzen von AK ist weit verbreitet. Sie wird beispielsweise verwendet, um Schallpegelmessungen an Windkraftanlagen durchzuführen um ggf. Grenzwertüberschreitungen zu messen. Die für die Schadensanalyse verwendete AK bezieht sich auf den niederfrequenten Nahbereich. AK dieser Art finden einen häufigen Einsatz in der Autoindustrie. Hier wird die AK dafür verwendet, Geräusche eines Fahrzeuges zu detektieren und anhand der Daten die Geräusche zu minimieren oder teilweise ein Motorgeräusch zu designen [GFA2015c].

#### 4 Bewertungskriterien und Versuchsabläufe

---

Gegenüber eines normalen Mikrofones kann die AK nicht nur Aussagen darüber treffen wann ein Geräusch entsteht, in welchem Frequenzbereich es liegt oder wie laut das Signal ist, sondern kann aufgrund der Mikrofonanordnung auch ortsselektiv auflösen [GFA2015c]. Dazu wird die Messposition an dem Prüfstand unter anderem wie in Abbildung 4-1 gewählt.

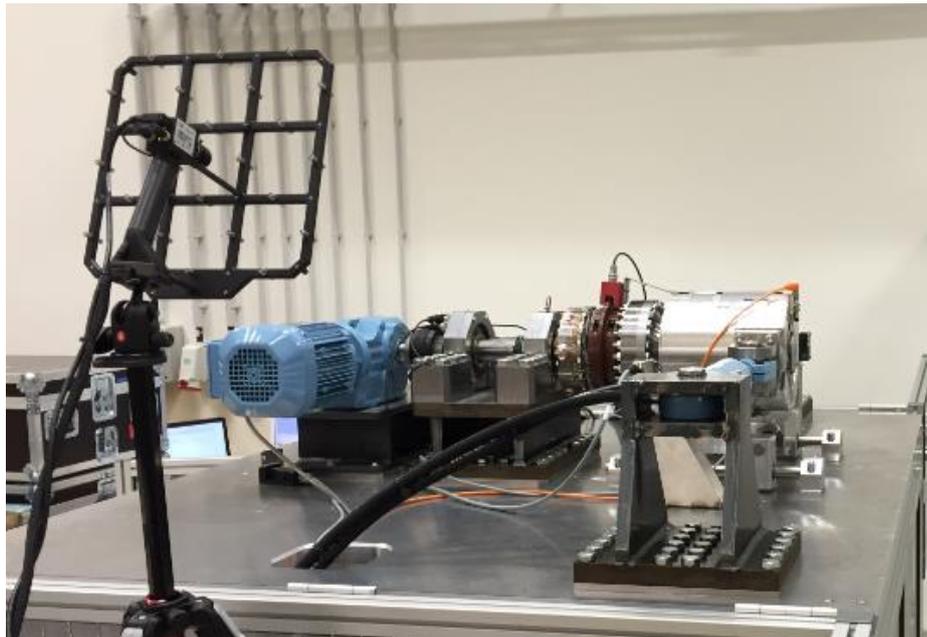


Abbildung 4-1: Versuchsaufbau akustische Kamera

Da aus vorhergegangenen Überlegungen der Ursprung des Klopfgeräusches in einem der beiden Lager vermutet wird, wird der Aufbau der Kamera so gewählt, dass beide Lager gemessen werden können. Hierbei ist wieder zu beachten, dass das Klopfgeräusch nicht konstant ist und sich sowohl in der Lautstärke als auch in der Häufigkeit ändert. Aus diesem Grund werden Messungen herangezogen, bei denen das Klopfgeräusch laut ist und der Prüfstand bei Normalbedingungen betrieben werden kann. Zusätzlich werden Messungen verwendet, bei denen aufgrund eines leisen Klopfgeräusches die Umgebungsgeräusche minimiert werden indem der Motor mit einer niedrigen Drehzahl betrieben und die Hydraulik ausgeschaltet wird. Eine Messung wird immer mit einer Abtastrate von  $192\text{kHz}$  über eine Dauer von 32 Sekunden durchgeführt. Dabei wird immer im Frequenzbereich von  $0 - 96\text{kHz}$  gemessen und nur der Messabstand variiert. Der vom Hersteller angegebene optimale Messabstand wurde nicht eingehalten, damit der gesamten Prüfstand abbildet werden kann.

## 4 Bewertungskriterien und Versuchsabläufe

---

### **Messung 1:**

Für diese Messung wird die AK wie in Abbildung 4-1 dargestellt aufgebaut, sodass der Motor auf der linken Seite der Aufnahme ist und somit links das Lager 1 ist und rechts das Lager 2. Aufgrund eines lauten Klopfergeräusches konnte bei dieser Aufnahme der Prüfstand bei Normalbedingungen betrieben werden. Der Fokus der Digitalkamera ist hierbei auf den Triebstrang gerichtet, mit einem Abstand von 0,3m.

### **Messung 2:**

Für diesen Versuch wurde von der gegenüberliegenden Seite gemessen, sodass der Motor auf der rechten Seite der Aufnahme ist und die Nabe auf der linken. Außerdem wird bei Normalbedingungen gemessen, mit dem Fokus auf die Lager und einem Abstand von 0,39m.

### **Messung 3:**

Bei dieser Messung wird die AK wie in Messung 1 positioniert. Jedoch sind bei dieser Aufnahme keine klaren Geräusche vorhanden, sondern werden von den Umgebungsgeräuschen übertönt. Aus diesem Grund wird das Hydrauliksystem abgeschaltet und der Motor bei einer Drehzahl von  $130r/min$  betrieben. Der Messabstand beträgt 1,08m.

## 4.2 Laser-Doppler-Vibrometer

Das Laser-Doppler-Vibrometer wird häufig zur Überwachung von z.B. Produktionsmaschinen verwendet. Dabei sollen starke Schwingungen gemessen werden, die zu Schäden führen könnten. Das LDV ist in der Lage, die Geschwindigkeit der Schwingung aus verschiedenen Abständen zu messen. Der Vorteil ist, dass diese Messung berührungslos ist und somit auch an schwer zugänglichen Messpunkten rückwirkungsfrei gemessen werden kann, solange der Messpunkt optisch erreichbar ist [KUT2015, S. 98].

Bei der Messung mit einem LDV ist jedoch zu beachten, dass eine Einpunkt-Messung eine 1D-Messung ist. Für die Messposition des LDV heißt das, dass die Schwingrichtung des zu messenden Objektes bekannt sein muss [KUT2015, S.98]. In Abbildung 4-2 ist eine mögliche Messposition des LDV in Verbindung mit der Akustischen Kamera dargestellt.

## 4 Bewertungskriterien und Versuchsabläufe

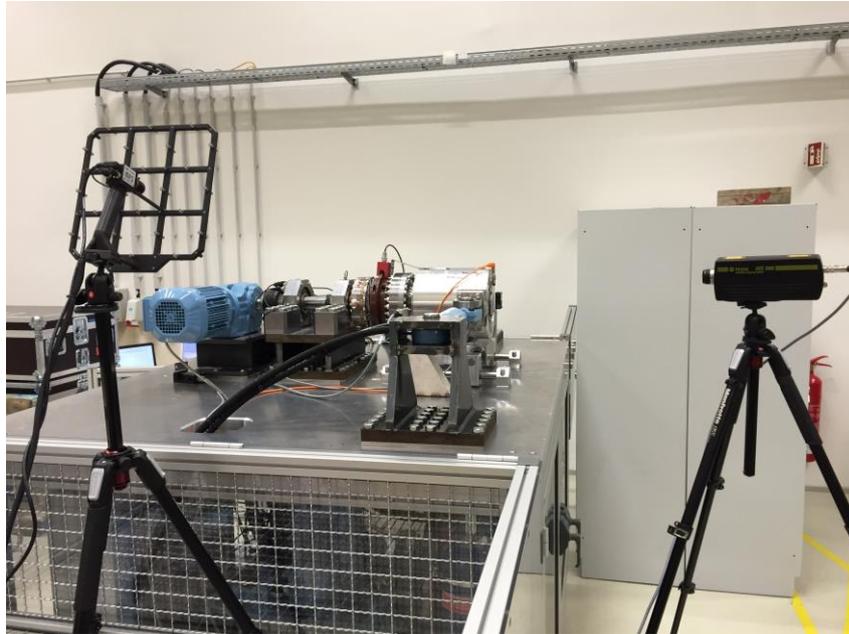


Abbildung 4-2: Laser-Doppler-Vibrometer - Messposition des LDV mit AK

Das LDV wird zur Darstellung und Speicherung des Ausgangssignals mit einem Oszilloskop verbunden. Zusätzlich zum Ausgangssignal wird auf einem zweiten Kanal die Signalgüte auf dem Oszilloskop angezeigt. Die Signalgüte beschreibt die Qualität des reflektierten Laserstrahls und weist bei 5V die höchste Qualität auf. Bei dieser Messung lag die Messung der Signalgüte bei ca. 4,8V.

Da zum Zeitpunkt der Datenaufzeichnung kein ausreichend lautes Klopfgeräusch auszumachen ist, werden die Messdaten bei niedriger Drehzahl und ohne Belastung durch das Hydrauliksystem durchgeführt, wodurch störende Vibrationen vermieden werden.

Im Betrieb bei der gewählten Prüfstandkonfiguration stellte sich heraus, dass sich das Klopfgeräusch zu einem knirschenden Geräusch entwickelt hat und an zwei verschiedenen Stellen verschiedenen laut auftritt.

### **Voruntersuchung:**

Um die Richtung der am Lager auftretenden Schwingungen zu ermitteln, werden vorab Voruntersuchungen durchgeführt. Hierzu wird das LDV so positioniert, dass der Laser auf das Lager gerichtet ist. Im Betrieb soll nun eine erkennbare Schwingung erkennbar sein. Die Position wird solange verändert, bis ein erkennbares Signal auszumachen ist.

## 4 Bewertungskriterien und Versuchsabläufe

---

Nicht immer kann das LDV senkrecht zum Messpunkt bzw. zur Messfläche, auf der sich der Messpunkt befindet, aufgestellt werden. In solch einem Fall muss ein Reflektor (siehe Abbildung 4-3) auf spiegelnden Oberflächen auf dem Messpunkt angebracht werden, da sonst eine Reflektion des Laserstrahls zurück zum LDV nicht möglich ist.

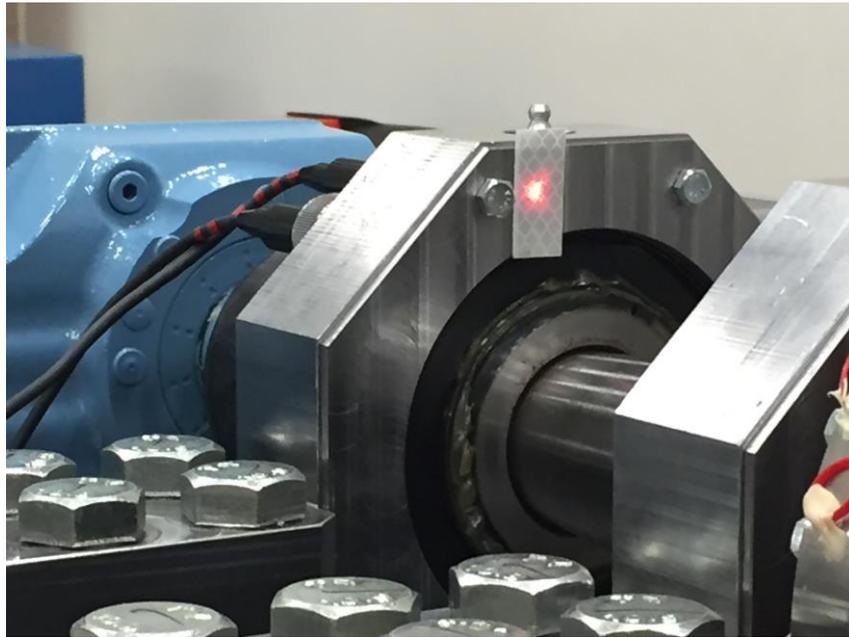


Abbildung 4-3: Laser-Doppler-Vibrometer - Anbringung des Reflektors auf dem Messpunkt

### **Messung 1:**

Ist die Messposition ermittelt und der Reflektor abgebracht können die Daten aufgenommen werden. Die Messung wird zeitgleich mit den Beschleunigungssensoren gestartet, damit ein Bezug zur Drehzahl hergestellt werden kann. Die Aufnahmedauer der jeweiligen Messungen werden über einen Zeitraum von 32 Sekunden durchgeführt.

Da das LDV nur für einen Versuchstag zur Verfügung stand, konnten nur zwei auswertbare Messungen durchgeführt werden, die zur Orientierung genutzt werden sollen.

### **4.3 Vibrationsmessung mit Beschleunigungssensoren**

Der Anwendungsbereich von Beschleunigungssensoren ist vielfältig. Anhand ihrer gewonnen Messdaten können z.B. Schwingungen an Maschinen gemessen und bewertet werden. Dabei kann eine zu hohe Frequenz oder eine zu starke Vibration auf einen Schaden hinweisen oder zu einem Schaden führen. In diesem Anwendungsbeispiel

## 4 Bewertungskriterien und Versuchsabläufe

---

soll die Frequenz oder die Stärke der auftretenden Vibrationen jedoch nicht bestimmt werden. Mit der Software für das Messsystem zur Messung von Vibrationen sind sehr hohe Abtastraten von bis zu 100kHz möglich. Diese hohe Abtastrate erlaubt es, das Messsystem für die erwähnten Frequenzmessungen zu nutzen, aber auch den Beginn eines Signales zu messen und somit verschieden platzierte Sensoren miteinander zu vergleichen.

Hierzu werden die Sensoren sinnvoll an dem Triebstrang angebracht, um sich an die Geräuschquelle „heranzutasten“ und um danach auszuwerten, an welchem Sensor das Signal zuerst auftritt. In einer Vorüberlegung erschien es sinnvoll, die Sensoren für die erste Messung auf die beiden Lager zu verteilen, da sie zum einem Verbindungspunkte zum Triebstrang sind und somit ebenfalls hohen Biegebelastungen ausgesetzt sind und zum anderen, da Lager häufig Ursachen einer ungewollten Geräuschentwicklung sind.

### **Voruntersuchungen:**

In den Voruntersuchungen soll zum einen herausgefunden werden, ob die für die Messungen vorgesehenen Auswerteverfahren anwendbar sind. Des Weiteren soll untersucht werden, ob auf geringen Distanzen zeitliche Unterschiede mit den vorgesehenen Sensoren messbar sind.

Dazu werden zwei der für die Messung vorgesehenen Sensoren in einem Abstand von 30cm auf einer Edelstahlplatte angebracht. Die Sensoren werden auch in den späteren Messungen verwendet und werden dementsprechend *Lager 1 axial* und *Lager 2 axial* genannt. Für die Messung wird zuerst auf der Seite des Sensors *Lager 1 axial* ein Impuls auf die Platte gegeben und im nächsten Schritt ein Impuls auf der Seite von Sensor *Lager 2 axial*. Bewertet werden soll die zeitliche Reaktion der Sensoren. Der Impuls wird durch einen Schlag auf die Stahlplatte realisiert. Die Impulsstärke ist dabei vorerst nicht reproduzierbar.

Anhand dieser aufgenommenen Schwingungen sollen auch die Auswerteverfahren untersucht werden. Dazu wird ein Signal separiert und in drei Bereiche aufgeteilt um herauszufinden, ob evtl. Reflexionen das Ergebnis einer Kreuzkorrelation verändern. Dabei sind die Bereiche wie folgt definiert:

## 4 Bewertungskriterien und Versuchsabläufe

---

- **Bereich I:** Dieser Bereich soll nur einen kleinen Teil der Schwingung und nur wenige der ersten signifikanten Ausschläge beinhalten. Da ein Signal schnell durch Reflexionen innerhalb des Bauteils verändert werden kann, soll der Bereich möglichst so gebildet werden, dass die Signale sich größtmöglich ähneln.
- **Bereich II:** Dieser Bereich beinhaltet sowohl den Signalteil des ersten Bereiches, deckt jedoch zusätzlich den Hauptteil der Schwingung ab. Dabei wird ca. die Hälfte der Schwingung betrachtet und der ausschwingende Teil ausgelassen.
- **Bereich III:** In diesem Bereich sind sowohl Bereich I und II beinhaltet. Zusätzlich wird noch der ausklingende Teil der Schwingung mit einbezogen.

Nun können die Kreuzkorrelationen der Signale von beiden Sensoren gebildet und grafisch dargestellt werden. Zur Auswertung wird die zeitliche Differenz zwischen dem Nullpunkt und dem ersten auftretenden Maxima gebildet und bewertet. Diese zeitliche Differenz ist gleichzeitig die zeitliche Differenz zwischen den Signalen.

Außerdem soll untersucht werden, ob die durch Kreuzkorrelation bestimmte Zeitdifferenz mit der grafisch bestimmten Zeitdifferenz zwischen den Signalen vergleichbar ist. Dazu werden beide Signale in einem Diagramm dargestellt und anhand von verschiedenen signifikanten Punkten die zeitliche Differenz der Signale bestimmt.

### **Messung 1:**

Die Sensoren werden so angebracht, dass möglichst in alle Richtungen gemessen werden kann. An beide Lager werden jeweils Sensoren in axialer Ausrichtung, in horizontaler Ausrichtung und in vertikaler Ausrichtung angebracht um zu messen, an welchem Lager die Schwingung zuerst auftritt. Hierzu sollen die aufgenommenen Signale in einem Diagramm dargestellt und grafisch ausgewertet werden.

### **Messung 2:**

Die zuvor getätigten Messungen weisen auf das betroffene Lager hin. Deswegen soll im nächsten Schritt das betroffene Lager genauer untersucht werden. Hierzu werden die sechs Sensoren auf dem Kreisumfang ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $225^\circ$ ,  $315^\circ$ ) des betroffenen Lagers angeordnet und eine erneute Messung durchgeführt (siehe Anhang Abbildung 9-4). Die gewonnenen Messdaten von allen Sensoren werden in einem Diagramm dargestellt und sowohl grafisch als auch über Kreuzkorrelation ausgewertet und miteinander verglichen.

## 5 Auswertung und Diskussion

---

### **Messung 3:**

Bei dieser Messung soll anhand der aufgezeichneten Drehzahl und dem Sensor, der als erstes auf das Signal reagiert (aus Messung 2), bestimmt werden, bei welcher Stellung des Antriebsstranges das Klopfgeräusch beginnt. Dazu wird das erste auswertbare Signal der Messung verwendet. Fixpunkt für die Ausrichtung der Welle ist ein auf der Welle angebrachter Reflektor.

Da das Klopfgeräusch nicht rekonstruierbar ist und es zum Teil willkürlich auftritt, sollen zwei verschiedene Messungen miteinander verglichen werden. Hierbei wird zum einen eine Messung herangezogen, bei der das Klopfgeräusch laut und eindeutig ist, sodass die Messungen unter Testbedingungen stattfinden können. Wobei Testbedingungen bedeutet, dass die Hydraulikzylinder mit  $77\text{bar}$  auf den Triebstrang wirken und die Motordrehzahl auf  $1300\text{ r/min}$  eingestellt ist. Zusätzlich soll eine Messung für ein leises Klopfgeräusch verwendet werden, bei der kein Druck auf die Welle ausgeübt und die Schwingung durch den Motor minimiert wird, indem die Drehzahl auf  $131\text{ r/min}$  reduziert wird. Desweiteren hat die niedrige Drehzahl den Vorteil, dass die Kurve detaillierter aufgezeichnet werden kann.

### **Messung 4**

Für diese Messung können die Messwerte der Messung 1 verwendet werden, da dort das Klopfgeräusch stark ausgeprägt ist. Aus dem Klopfgeräusch soll mit Hilfe der Software *DIAdem* das Frequenzspektrum dargestellt und mit anregenden Frequenzen verglichen werden. Dazu sollen die Überroll- und Drehfrequenzen berechnet werden, um dem Frequenzspektrum gegenübergestellt zu werden.

## **5 Auswertung und Diskussion**

In diesem Abschnitt werden die gemessenen Daten anhand der definierten Bewertungskriterien und Versuchsabläufe ausgewertet und die Ergebnisse zusammengetragen.

Die dazu notwendigen Daten sind auf der beigelegten DVD gespeichert und können aus folgender Tabelle entnommen werden.

## 5 Auswertung und Diskussion

Tabelle 5-1: Verwendeten Schwingungen

Index	Messsystem	Dateiordner	Zur Auswertung verwendeter Zeitintervall	Drehzahl	Druck	Abtastrate
[-]	[-]	[-]	[s]	[r/min]	[bar]	[kHz]
1	Beschleunigungssensoren	2016-02-08 11-15-49 (1)	39,950- 39,965	1300	77/77	10
2 <sup>1</sup>	Beschleunigungssensoren	2016-02-11 11-26-55 (1)	5,8315 – 5,8335	-	-	100
3 <sup>1</sup>	Beschleunigungssensoren	2016-02-11 11-35-12 (3)	6,725- 6,775	-	-	100
4	Beschleunigungssensoren	2016-02-19 15-26-50	10,62 - 10,64	131	0/0	50
5	Beschleunigungssensoren	2016-02-19 15-27-37 (2)	13,855 - 13,870	131	0/0	50
6	Laser-Doppler-Vibrometer	Messung_10.03.2016	0 - 32	131	0/0	50
7	Akustische Kamera	Messung_Motor links_laut	17,8 – 18,0	1300	77/77	192
8	Akustische Kamera	Messung_Motor links_leise	0 - 32	131	0/0	192
9	Akustische Kamera	Messung_Motor rechts_laut	13 - 14	1300	77/77	192

\*1 : Diese Versuche wurden nicht direkt am Prüfstand durchgeführt, daher sind keine Betriebsdaten angegeben

Die notwendigen Daten sind auf der beigelegten DVD wie folgt abgelegt. Die Dateiordner sind in den jeweiligen Überordnern der Messsysteme abgelegt. Der Dateiordner beinhaltet alle erhobenen Daten für die jeweilige Messung inklusive des Versuchsprotokolls. In der Spalte *Zeitintervall des Signals* ist aufgeführt, welcher exakte Teil des

## 5 Auswertung und Diskussion

Signals für die Auswertung genutzt wurde. Zusätzlich sind die Randbedingungen der Versuche aufgeführt.

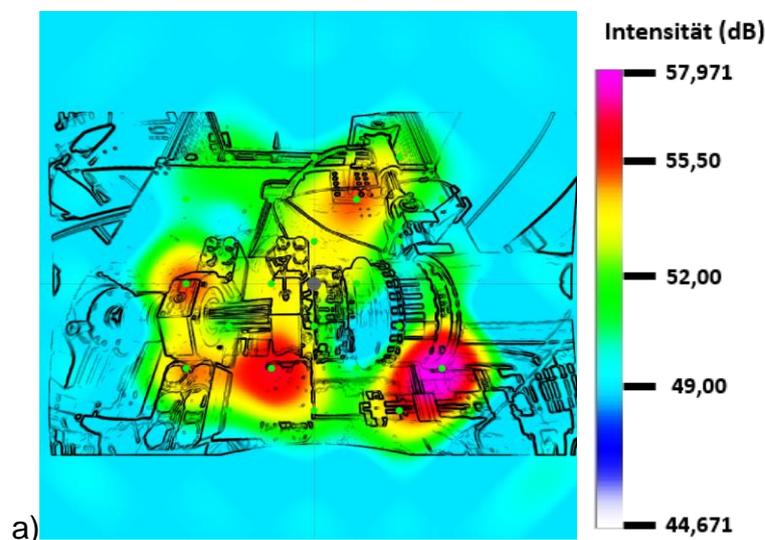
### 5.1 Akustische Kamera

Die mit der AK aufgenommenen akustischen Daten können mit Hilfe des Programms *Noiselmage* erfasst, gespeichert und auf verschiedene Weisen ausgewertet werden. Dabei beruht das Konzept der Software auf einem Plug-in-System. Die Software kann mit, für den Benutzer wichtigen, Plug-ins aufgerüstet werden um weitere Auswertemöglichkeiten zu erlangen. Für die folgende Auswertung ist das Plug-in *Akustisches Foto 2D* relevant, in dem die akustisch aufgenommenen Daten mit einem optischen Foto kombiniert werden und eine akustische Karte entsteht. Auf der Karte sind die Schallintensitätspegel farblich dargestellt, wobei die Farbskala von blau, grün, gelb, rot zu rosa, der größten Intensität reicht. Jedoch muss beachtet werden, dass die Abstände der einzelnen Farben auf der Skala unterschiedlich gewählt werden können und somit eine Farbe nicht einem bestimmten Schallintensitätspegel entspricht.

Alle verwendeten Daten sind in der **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** aufgeführt und werden anhand der Indexnummer für die jeweilige Untersuchung kenntlich gemacht.

#### Messung 1:

Die Kamera wurde wie im Versuchsablauf beschrieben aufgestellt und liefert folgendes Bild:



a)

## 5 Auswertung und Diskussion

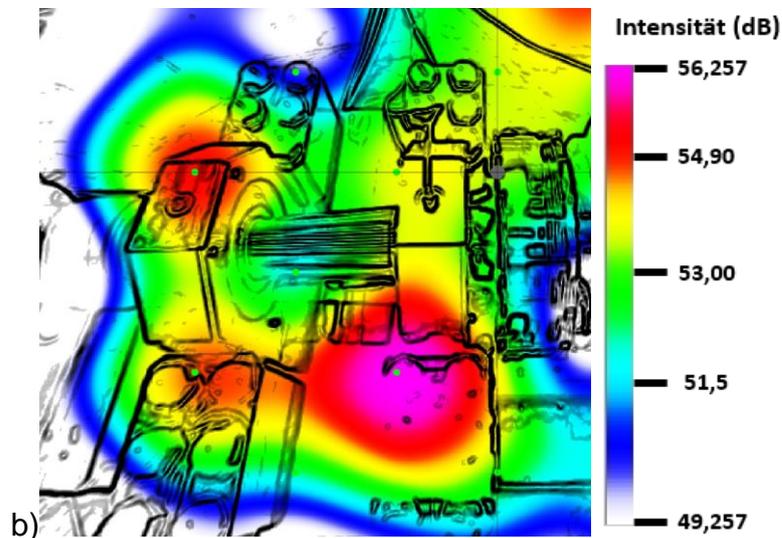


Abbildung 5-1: a) Akustische Kamera - Ergebnisse Messung 1 Gesamtaufnahme b) Akustische Kamera – Ergebnisse Messung 1 Fokus auf die Lager

Auf der Abbildung 5-1 sind die Schallintensitätspegel farblich über die gesamte Messdauer dargestellt. Zur Auswertung wurden die Messdaten aus Index 7 verwendet. Die höchste Intensität mit  $57,97\text{dB}$  wird unter der Nabe (rechts im Bild a) erreicht. Zusätzlich sind drei weitere Bereiche mit einer hohen Schallintensität von ungefähr  $55\text{dB}$  rot gekennzeichnet. Dabei sind zum einem die Zylinderbefestigung betroffen, als auch zwei Bereiche im direkten Umfeld der Lager. Detaillierter werden diese Bereiche im Bild b dargestellt. Das stärkere Geräusch entsteht am Lagerbock des Lager 2. Am Lager 1 ist am oberen Bereich eine rote Färbung.

### Messung 2:

Die Messung von der gegenüberliegenden Seite ergab folgendes Ergebnis.

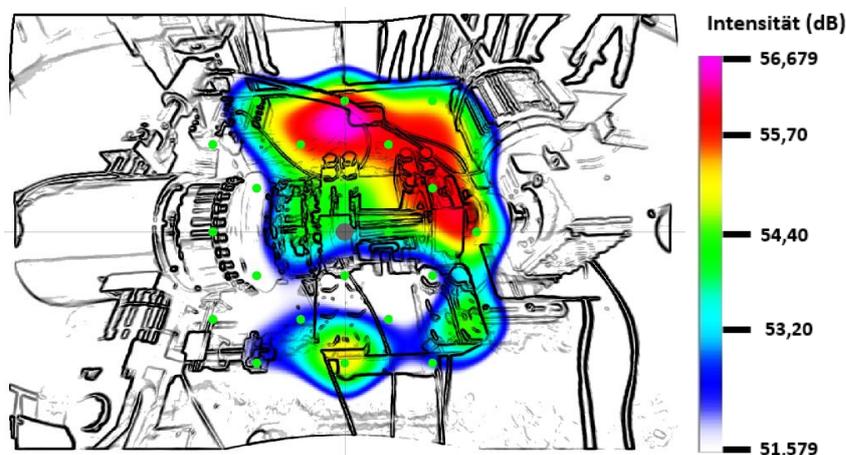


Abbildung 5-2: Akustische Kamera - Ergebnisse der Messung 2

## 5 Auswertung und Diskussion

Auf der Abbildung 5-2 sind die Schallintensitätspegel farblich über die gesamte Messdauer dargestellt. Dabei wurden die Messdaten aus Index 9 verwendet. Auffällig sind hier zum einen der Bereich bei der Aussparung für die Kabeldurchführung, sowie das Lager 1. An der Aussparung wird eine Intensität von  $56,68\text{dB}$  erreicht.

### Messung 3:

Die Aufbereitung der Daten hat für den Versuchsaufbau bei unterdrückten Umgebungsgläuschen folgendes Bild ergeben:

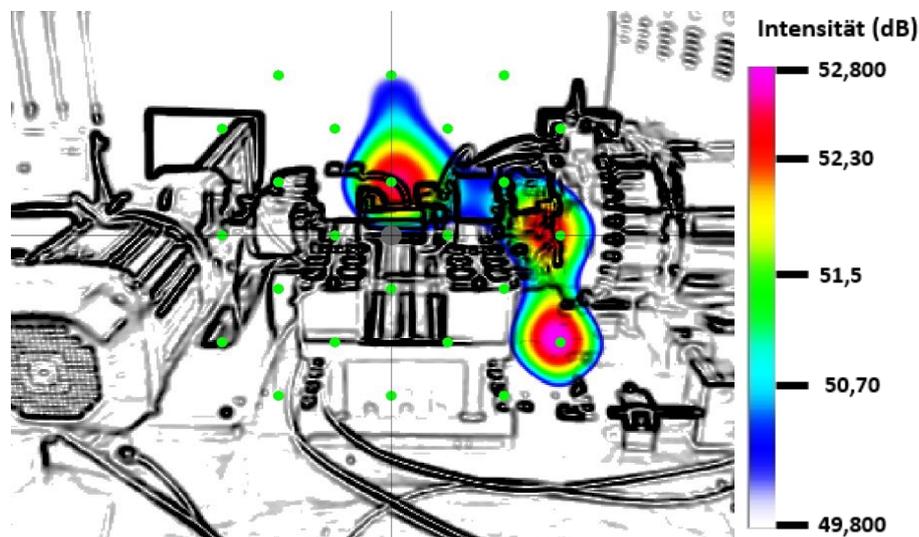


Abbildung 5-3: Akustische Kamera - Ergebnisse Messung 3

Aus der Messung 1 schon bekannten Position mit einer anderen Betriebsweise des Prüfstands hat sich folgende Intensitätsverteilung ergeben. Die verwendeten Daten sind unter dem Index 8 zu finden. Der Bereich unter der Nabe ist auch in dieser Messung mit der höchsten Intensität von  $52,8\text{dB}$  gekennzeichnet. Zusätzlich ist der Bereich zwischen Nabe und Lager 2 betroffen, ebenfalls das Lager 1.

### Zusammenfassung:

Bei der Auswertung mit einer Akustischen Kamera ist zu beachten, dass der Ursprung des Schalls, an dem dieser ein Bauteil verlässt gemessen wird und nicht der Ursprung des Geräusches. D.h. wenn ein Bauteil einen Fehler hat, wird es an den Orten sichtbar, an denen der Schall austritt. Dabei spielen Resonanzkörper und Reflexionen eine wichtige Rolle.

## 5 Auswertung und Diskussion

---

Aus den Messungen 1 bis 3 geht nicht eindeutig hervor, wo der Ursprung des Klopfgeräusches liegt. Es gibt verschiedene Quellen die einen hohen Intensitätspegel haben, für die es jedoch verschiedene Erklärungen gibt.

Die auffälligste Schallquelle liegt unter der Nabe wo sie, wie in Abbildung 5-1 und Abbildung 5-3 zu sehen, den größten Intensitätspegel aufweist. Unter der Nabe bildet sich eine Art Hohlraum, der wie ein Resonanzkörper wirkt und die Intensität an dieser Stelle erhöht.

In Abbildung 5-2 ist eine hohe Schallintensität aus der Kabeldurchführung in der Unterplatte zu sehen. Die Messung 2 wurde unter Normalbedingungen gemessen, d.h. dass das Hydrauliksystem eingeschaltet war. Das Hydrauliksystem befindet sich unter der Unterplatte, direkt unterhalb der Kabeldurchführung und erzeugt einen hohen Umgebungslärm. Zusätzlich sind Lüfter zum Abtransport der Wärme in dem Bereich unter der Unterplatte eingebaut. Die Kombination aus den beiden Lärmfaktoren könnte der Grund für den hohen Pegel an dieser Stelle sein.

In allen drei Messungen sind Hinweise auf einen erhöhten Schallaustritt am Lager 1 zu erkennen. Das Lagergehäuse ist aus einem Stück gefertigt, sodass hier keine auffälligen Resonanzen entstehen können. Außerdem sind an dem Lager keine Reflexionen möglich.

### 5.2 Laser-Doppler-Vibrometer

Die vom LDV gemessenen Werte werden von einem digitalen Oszilloskop verarbeitet und auf einem Messrechner mit einer entsprechenden Software dargestellt und gespeichert.

Alle verwendeten Daten sind in der Tabelle 5-1 aufgeführt und werden anhand der Indexnummer 6 aufgeführt.

#### **Voruntersuchungen:**

Aus den vorangegangenen Untersuchungen mit den Beschleunigungssensoren ist bekannt, dass das Lager 1 in axiale Richtung den größten Ausschlag misst (siehe Kapitel 0, Messung 1). Aus diesem Grund wird das LDV, wie in Abbildung 4-2 dargestellt, auf das Lager gerichtet.

## 5 Auswertung und Diskussion

### Messung 1:

Die Aufnahmen der Messung haben nach der Aufbereitung der Messdaten mit *DIAdem* folgende Grafik ergeben:

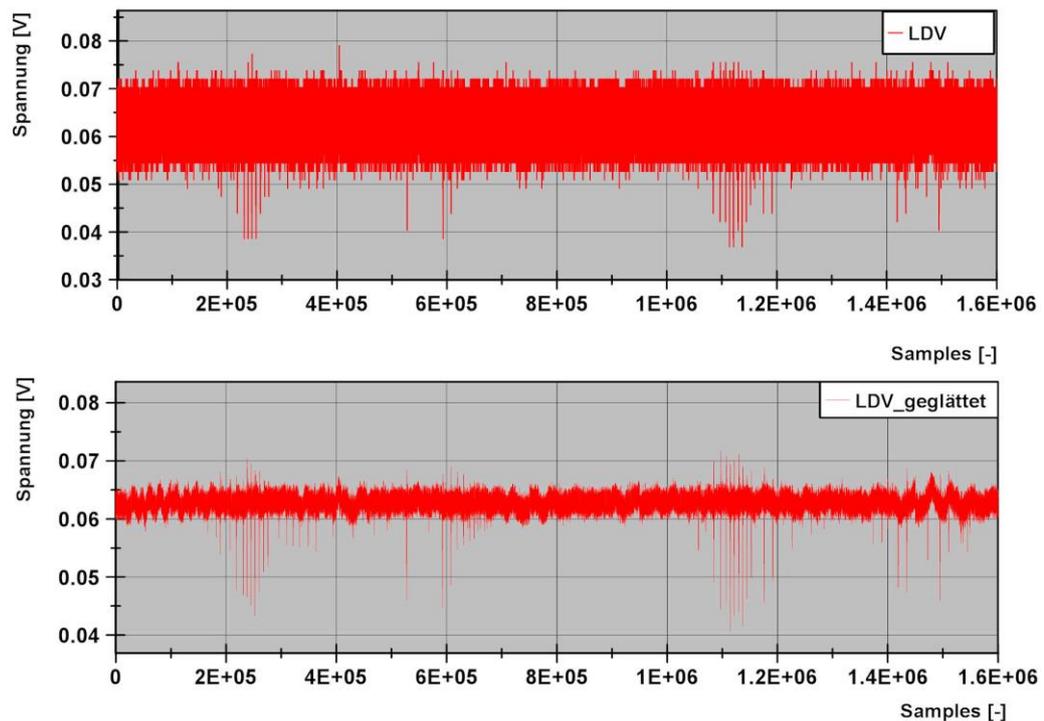


Abbildung 5-4: Laser-Doppler-Vibrometer – Glättung der Messung

Das Ausgangssignal wird als Spannung ausgegeben und über den Messpunkten aufgetragen. Im oberen Teil der Grafik ist das ursprüngliche Signal dargestellt. Jedoch ist das Rauschen des Signales verhältnismäßig groß, wodurch die Auswertung erschwert wird. Da die Signalgüte vergleichsweise hoch war, sind die geringen Amplitudenhöhen des Messsignals also nicht auf die Qualität des Signals zurückzuführen, sondern sind durch das geringe Ursprungssignal zu erklären.

Um das Messsignal besser auswerten zu können, wird das Signal geglättet und im unteren Teil der Abbildung 5-4 dargestellt.

## 5 Auswertung und Diskussion

Ein Zusammenhang zu der Drehzahl wird in der Abbildung 5-5 hergestellt.

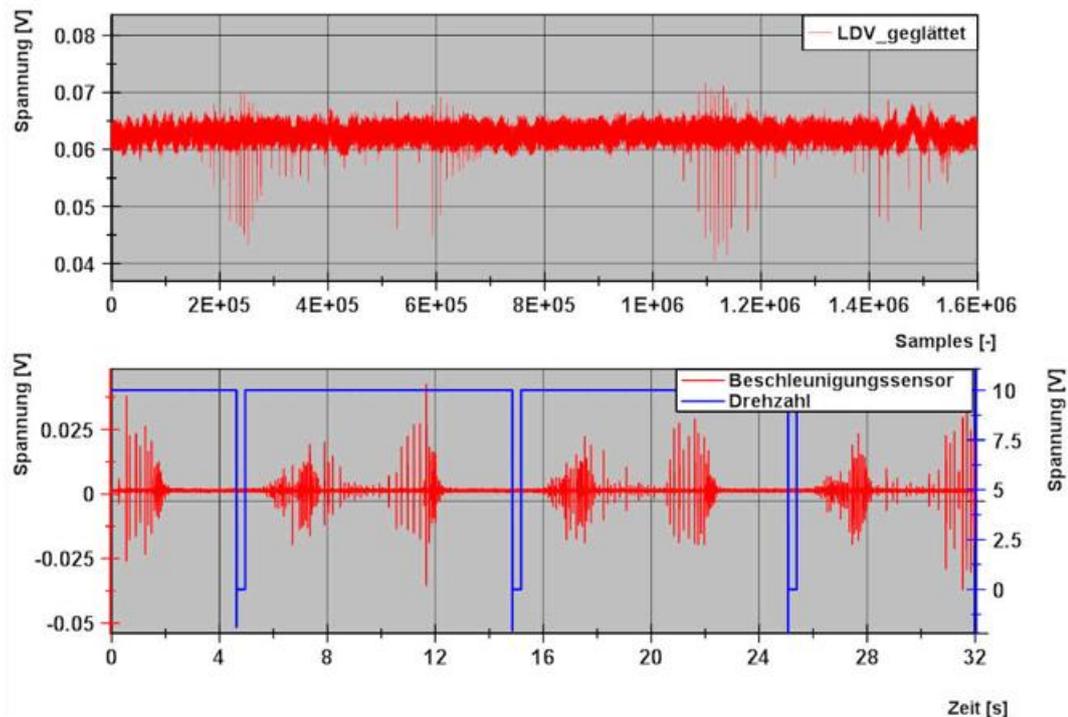


Abbildung 5-5: Laser-Doppler-Vibrometer - Messsignal im Vergleich zum Beschleunigungssensor und der Drehzahl

Das geglättete Messsignal des LDV ist in Volt über den Messpunkten im oberen Teil der Abbildung aufgetragen. Das Signal der Beschleunigungssensoren sowie des Drehzahlnehmers sind über die Messdauer aufgetragen auf zwei verschiedenen Achsen ausgetragen. Das LDV zeichnet die Messwerte mit einer Abtastrate von  $50\text{kHz}$  auf. Daraus folgt, dass  $50000$  Messpunkte pro Sekunde aufgezeichnet werden. Dementsprechend werden in vier Sekunden  $2 \cdot 10^5$  Werte aufgezeichnet. Die X-Achsen beider Grafen sind so angelegt, dass die Messungen auf die Messdauer betrachtet übereinander liegen. Jedoch konnten die Messungen nicht exakt zum selben Zeitpunkt gestartet werden, sodass die Messung der Beschleunigungssensoren später beginnt. Da die Zeitdifferenz zwischen dem Beginn der Messung mit dem LDV und dem Beginn der Messung mit den Beschleunigungssensoren nicht bekannt ist, kann nicht bestimmt werden, welche Schwingungen den gleichen Ursprung haben.

Aus der Drehzahl von  $131\text{ r/min}$  und dem Übersetzungsfaktor des Getriebes ist zu erwarten, dass während der Messdauer von  $32$  Sekunden drei volle Umdrehungen umlaufen werden. Dementsprechend sind  $2\text{-}3$  Störsignale zu erwarten, abhängig von der Stellung des Triebstranges bei Beginn der Messung.

## 5 Auswertung und Diskussion

Das Signal des LDV beinhaltet das Rauschen, Schwingungen mit hohen Amplituden und hohen Frequenzen (z.B. bei  $2 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^5$  Samples), sowie Schwingungen mit niedrigeren Frequenzen (z.B. bei  $3 \cdot 10^5 - 4 \cdot 10^5$  Samples). Auf jede Schwingung mit hohen Frequenzen und hohen Amplituden folgt eine Schwingung mit einer niedrigeren Frequenz und mit niedrigeren Amplituden. In Abbildung 5-6 sind diese Bereiche markiert.

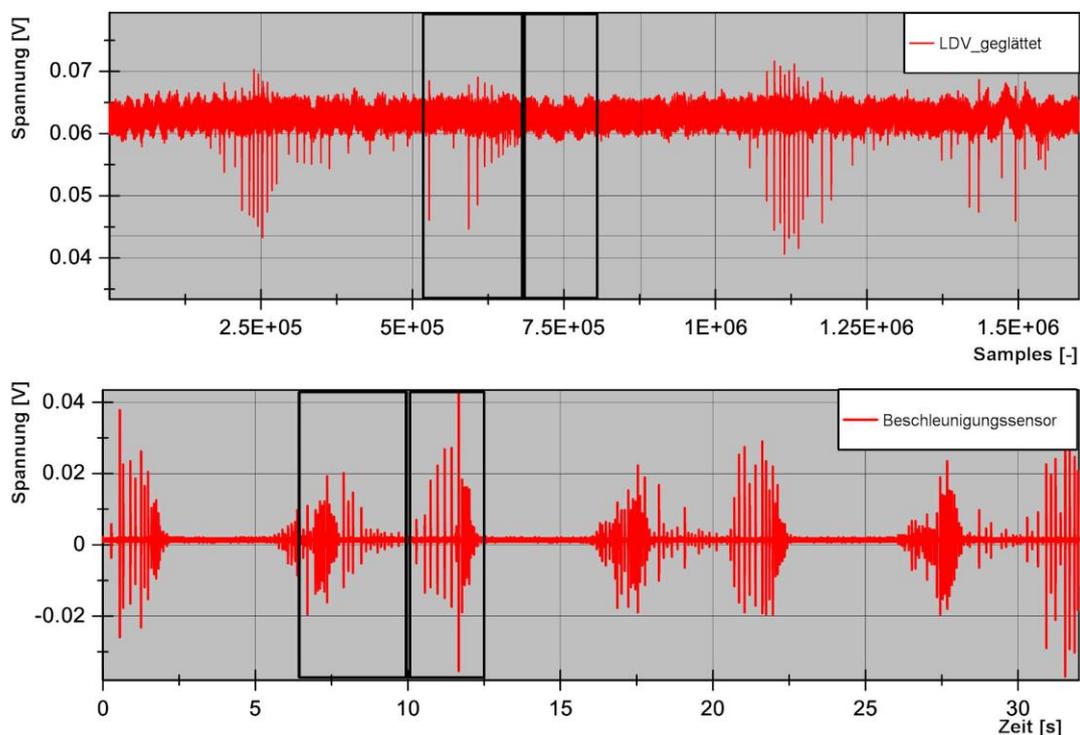


Abbildung 5-6: Laser-Doppler-Vibrometer - Vergleich der Schwingungen zum Beschleunigungssensor

Auffällig ist, dass ein ähnliches Verhalten bei den Beschleunigungssensoren zu beobachten ist. In der ersten Markierung ist eine Schwingung zu sehen, die viele aufeinanderfolgende Amplituden hat. Bei der zweiten Markierung hingegen sind die Amplituden deutlich weiter voneinander entfernt. Es ist im selben Zeitraum das gleiche Frequenzmuster zu erkennen. Um für diese Untersuchung genauere Erkenntnisse zu erlangen, müssten jedoch weitere Messungen gemacht und ein Weg gefunden werden, der es erlaubt, die Messungen zum selben Zeitpunkt zu starten. Über den Zusammenhang des LDV mit dem Messsystem der Beschleunigungssensoren können dann auch Zusammenhänge zur Drehzahl der Welle ermittelt werden.

### 5.3 Vibrationsmessung mit Beschleunigungssensoren

Die Daten werden mit Hilfe des Programms *imcStudio* aufgezeichnet und im Format *\*raw* gespeichert, weshalb sie nur mit bestimmten Programmen geöffnet und bearbeitet werden können. Da es sich um Daten handelt, die mit einer Abtastrate von bis zu  $100\text{kHz}$  aufgenommen werden, ist es nicht möglich, eine Auswertung mit üblichen Programmen wie *EXCEL* o.ä. durchzuführen. Das Programm *imcFamos* ist das Gegenstück zu dem Programm *imcStudio* und ist in der Lage, die aufgenommenen Daten darzustellen und bietet eine Oberfläche zum Bearbeiten der Daten. Dieses Programm stand jedoch nicht zur Verfügung, weshalb das Programm *DIAdem* der Firma *National Instruments* verwendet wird. *DIAdem* bietet die benötigten Funktionen zur Auswertung der Messdaten.

Für das bessere Verständnis der Auswertung wird im Folgenden die Einteilung des Lagers in Grad erklärt. Das Lager wird aus der Richtung des Motors betrachtet und als Kreis angesehen. Dabei wird nicht zwischen Welle, Lagerinnen- und Lageraußenring differenziert. Die Einteilung des Kreises erfolgt ähnlich wie bei dem Uhrzeitprinzip wobei 12 Uhr in dieser Einteilung  $0^\circ$  entspricht und 6 Uhr dementsprechend  $180^\circ$ .

Alle verwendeten Daten sind in der **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** aufgeführt und werden anhand der Indexnummer für die jeweilige Untersuchung kenntlich gemacht.

#### **Voruntersuchungen:**

Bevor die eigentlichen Messungen ausgewertet werden können, werden die Sensoren überprüft sowie zwei verschiedene Auswerteverfahren für die aufgenommenen Schwingungen untersucht.

Zur Überprüfung der Sensoren wurden die Sensoren *Lager 1 axial* und *Lager 2 axial* in einem Abstand von  $30\text{cm}$  auf einer Edelstahlplatte angebracht. Nun wird zuerst auf der Seite des Sensors *Lager 1 axial* ein Impuls auf die Platte gegeben und im nächsten Schritt ein Impuls auf der Seite von Sensor *Lager 2 axial*. Bewertet werden soll die zeitliche Reaktion der Sensoren.

## 5 Auswertung und Diskussion

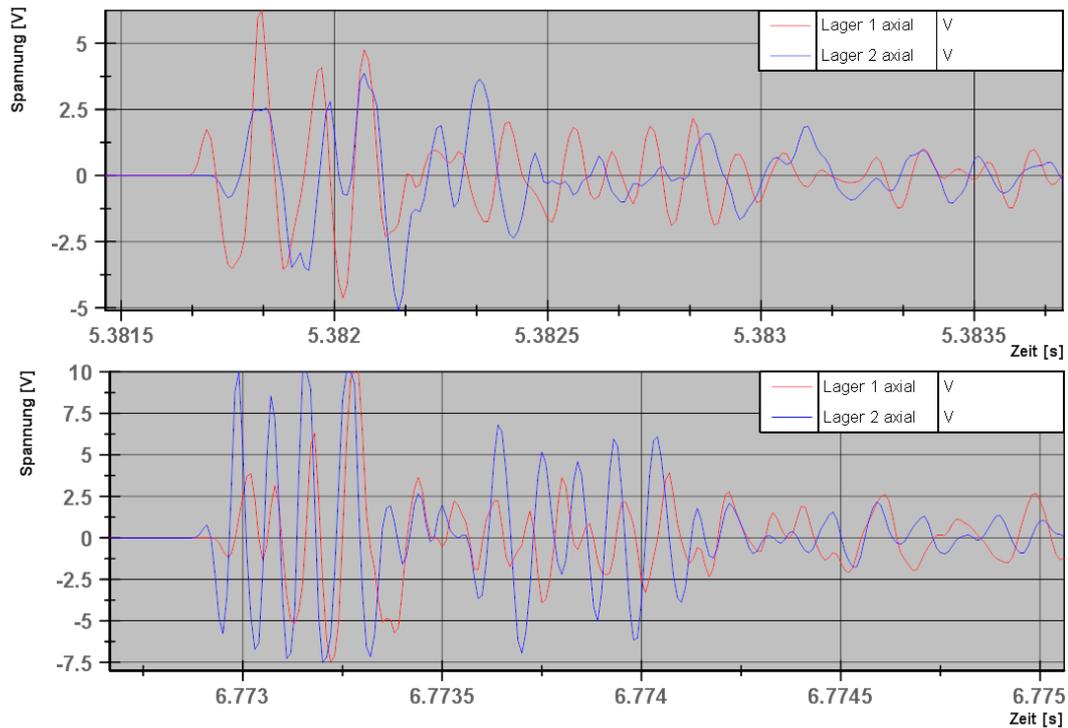


Abbildung 5-7: Beschleunigungssensoren – Auswertung der Vorversuche (Index 2,3): Test zum Reaktionsverhalten der Sensoren a) Impuls am Lager 1 axial Sensor b) Impuls am Lager 2 axial Sensor

Im oberen Abschnitt der Grafik ist das Ausgangssignal der beiden Sensoren bei einem Impuls auf der Seite des *Lager 1 axial* Sensors über der Zeit aufgetragen. Dabei wurden die Messdaten mit dem Index 2 verwendet. Es ist eindeutig zu sehen, dass der Sensor *Lager 1 axial* zuerst das Signal aufzeichnet.

Im unteren Abschnitt der Grafik wurde der Impuls zuerst auf der Seite des *Lager 2 axial* Sensors gegeben. Zum Erstellen der Grafik wurden die Daten Index 3 verwendet. Auch hier reagiert zuerst der näher gelegene Sensor, womit der Messung 1 vertraut werden kann.

Des Weiteren soll ein über die Software *DIAdem* angewendetes Auswerteverfahren auf seine Anwendbarkeit überprüft werden. Dazu wird ebenfalls die Schwingung aus dem Vorversuchen verwendet, da diese rekonstruierbar ist, die Schalllaufzeit zwischen den beiden Sensoren groß ist und die Messungen mit  $100\text{kHz}$  aufgezeichnet wurden.

## 5 Auswertung und Diskussion

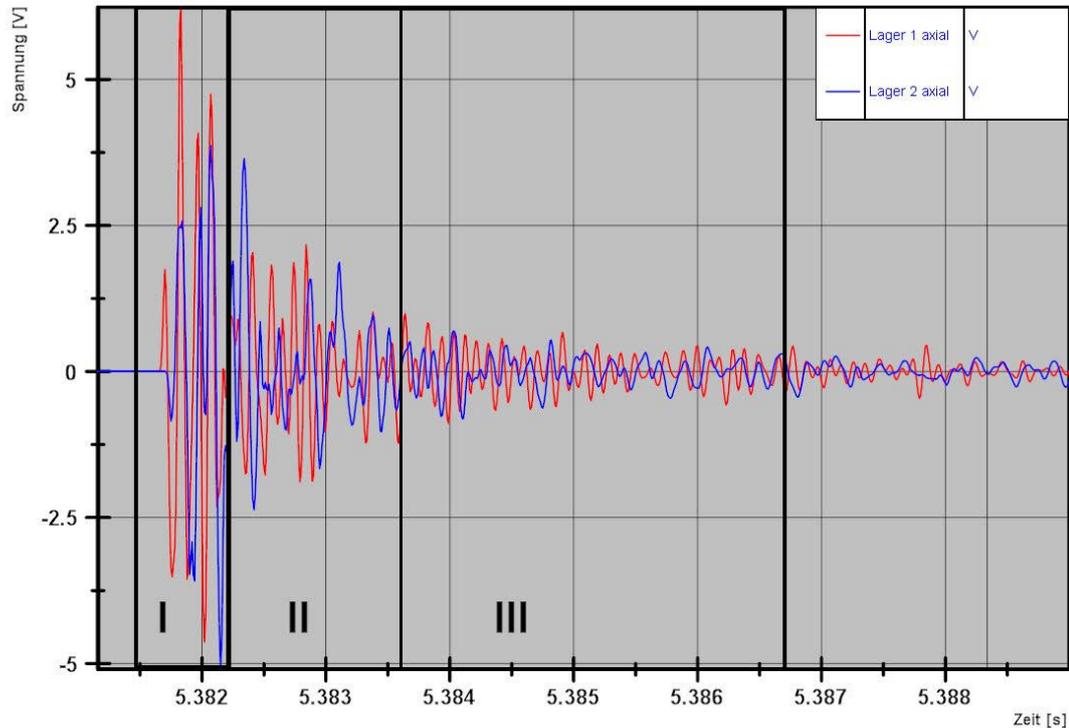


Abbildung 5-8: Beschleunigungssensoren - Bereiche für die Untersuchung einer Schwingung mit Kreuzkorrelation

In Abbildung 5-8 ist der zeitliche Verlauf der Schwingung aus der Messung Index 2 abgebildet. Um herauszufinden, welcher Bereich einer Schwingung sinnvoll für eine Kreuzkorrelation genutzt werden kann, wurde die Schwingung in drei Bereiche eingeteilt. Wobei die Bereiche II und III die jeweils davor liegenden Bereiche mit beinhalten. Für jeden Bereich wurde eine Kreuzkorrelation der beiden Signale berechnet und in Abbildung 5-9 dargestellt.

## 5 Auswertung und Diskussion

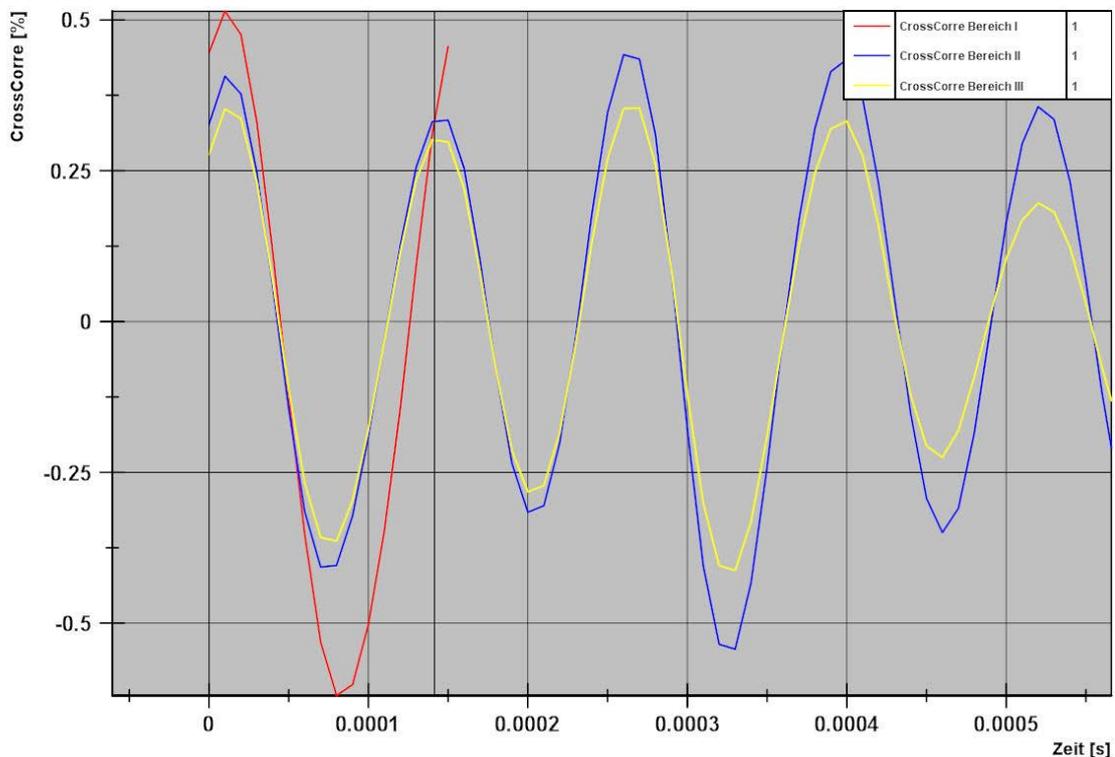


Abbildung 5-9: Beschleunigungssensoren - Kreuzkorrelation für drei verschiedene Bereiche

Die durch Kreuzkorrelation der zwei Signale entstehenden Kurven für die Bereiche I-III sind numerisch über der Zeit aufgetragen. Die Bereiche II und III verändern sich nur in der Höhe der Amplitude und nicht in der Lage der Maxima. Daraus kann geschlossen werden, dass Reflexionen keinen erkennbaren Einfluss, in Form von auslöschen oder addieren von Schwingungsamplituden, auf die Kreuzkorrelationskurve haben. Wird der Bereich, in dem die Schwingung ausgewertet werden soll, zu klein gewählt, kann die Messung nicht ausgewertet werden, da kein Maxima zur Auswertung zur Verfügung steht. Für die folgenden Untersuchungen muss darauf geachtet werden, den Bereich nicht zu klein zu wählen (siehe Abbildung 5-8 Bereich I). Dabei gilt, den Bereich eher zu groß als zu klein zu definieren.

Abschließend wird untersucht, ob die durch Kreuzkorrelation gewonnen Ergebnisse und die grafisch gewonnen Ergebnisse vergleichbar sind. Dazu wurde anhand der Schwingung Index 2 die Zeit grafisch mit der Software *DIAdem* bestimmt. Hierfür soll herausgefunden werden, wie lange es dauert bis das Signal, das am Sensor *Lager 1* ausgelöst wurde, an Sensor *Lager 2* ankommt. Es wurden aus beiden Signalen insgesamt sechs signifikant gleiche Maxima bestimmt und die Zeit zwischen den jeweiligen Maxima der verschiedenen Signale bestimmt.

## 5 Auswertung und Diskussion

Dabei wurden folgende Ergebnisse bestimmt:

Tabelle 5-2: Zeitdifferenz zwischen signifikanten Messpunkten von zwei verschiedenen Signalen

Messpunkt [-]	Zeitdifferenz [s]
1	$1,40 \cdot 10^{-4}$
2	$1,59 \cdot 10^{-4}$
3	$1,02 \cdot 10^{-4}$
4	$1,80 \cdot 10^{-4}$
5	$1,07 \cdot 10^{-4}$
6	$1,79 \cdot 10^{-4}$
	$\sum 1,45 \cdot 10^{-4}$

Durchschnittlich ergibt sich eine Zeitdifferenz von  $1,45 \cdot 10^{-4}$  s. Somit benötigt das Signal diese Zeit, um die 30 cm von dem Sensor *Lager 1* zum Sensor *Lager 2* zu überwinden.

Die Zeitdifferenz wurde zusätzlich durch Kreuzkorrelation bestimmt. Dazu wurde das erste ganze Maximum der Kreuzkorrelation für den Bereich II (siehe Abbildung 5-9) bestimmt. Es ergab sich eine Zeitdifferenz von  $1,5 \cdot 10^{-4}$ s.

Betrachtet man die eingestellte Abtastrate des Messsystems von 50 kHz, wird deutlich, dass alle  $0,2 \cdot 10^{-4}$ s ein Wert aufgezeichnet wird. Die beiden Zeitdifferenzen liegen also in der gleichen Größenordnung und können beide verwendet werden.<sup>2</sup>

### Messung 1:

Nachdem die Beschleunigungssensoren wie in Abschnitt 0 beschrieben angebracht wurden, konnten die Daten im Normalbetrieb aufgezeichnet werden. Es wurden mehrere Signale aufgezeichnet und die Schwingung Index 1 genauer betrachtet (siehe Abbildung 5-10).

## 5 Auswertung und Diskussion

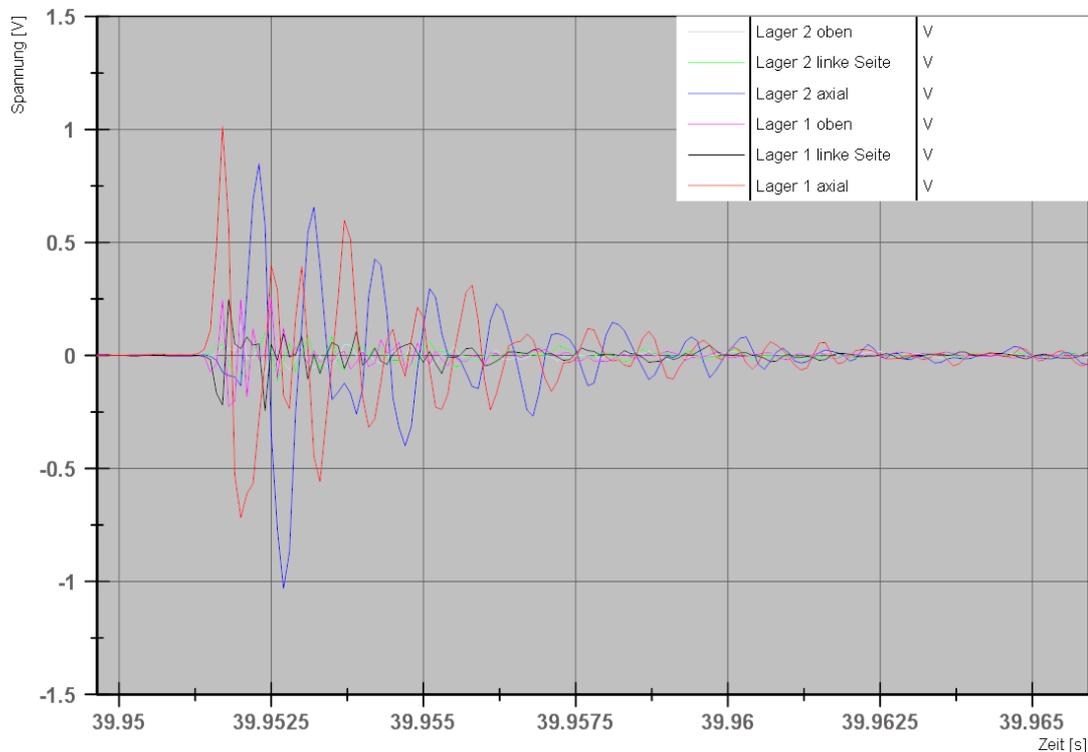


Abbildung 5-10: Beschleunigungssensoren – Auswertung der ersten Messung

In der Grafik ist das Ausgangssignal der Beschleunigungssensoren in Volt über der Zeit dargestellt und zeigt die Schwingung bei einem Klopfgeräusch für alle sechs angebrachten Sensoren. Bei dieser Messung ist das Klopfgeräusch noch verhältnismäßig laut, weshalb die Messung im Normalbetrieb gemacht werden konnte. Dies ist an der Amplitudenhöhe von mehr als 1V zu erkennen. Auffällig ist, dass die größten Ausschläge in Axialrichtung an beiden Lagern erfolgen und die anderen Ausrichtungen eine vergleichsweise kleine Amplitude haben.

Für die aus der Messung resultierende relevanteste Kurve ist der Verlauf rot dargestellt. Hierbei handelt es sich um den Sensor, der am Lager 1 in Axialrichtung angebracht ist. Diese Kurve zeigt nicht nur die höchste Amplitude sondern reagiert auch als erstes, weshalb davon auszugehen ist, dass der Sensor *Lager 1 axial* am nächsten am Ursprungsort liegt.

### Messung 2:

Messung 1 zufolge ist die Störung auf dem Lager 1 zu erwarten. Aufgrund des abgeschwächten Klopfgeräusches musste die Drehzahl des Motors auf 131  $r/min$  reduziert werden, was jedoch den Vorteil hat, dass die Kurve detaillierter bei 50kHz aufgezeichnet werden kann. Nachdem die Sensoren wie im Versuchsablauf beschrieben

## 5 Auswertung und Diskussion

angebracht sind, entsteht daraus folgendes zeitliches Ansprechverhalten der Sensoren:

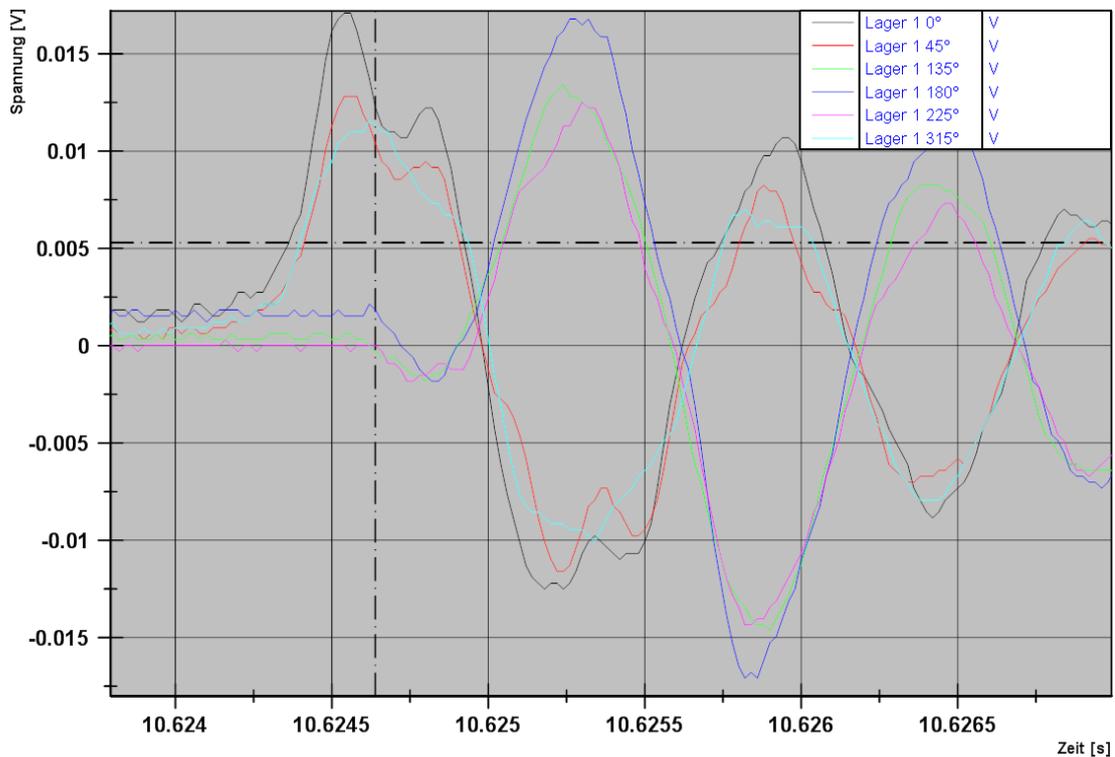


Abbildung 5-11: Beschleunigungssensoren – Auswertung Messung 2

In dem Graphen sind die zeitlichen Schwingungsverläufe der einzelnen auf dem Lager 1 verteilten Sensoren aufgetragen. Dabei ist die Bezeichnung der Sensoren entsprechend der im Versuchsablauf beschriebenen Anordnung gewählt (siehe Abschnitt 0.) und die verwendeten Daten sind aus der Messung Index 4.

Es zeigt sich, dass die Signale eindeutig aufgeteilt sind, in die Sensoren der oberen und unteren Lagerhälfte. Das spricht dafür, dass die Störung im oberen Bereich des Lagers liegt. Den ersten Ausschlag zeigt der Sensor *Lager 1 0°* weshalb davon auszugehen ist, dass die Störung diesem Sensor am nächsten liegt. Jedoch liegen die Signale sehr nah beieinander, sodass die folgenden Aussagen auf Abschätzungen beruhen. Werden die Verläufe der Schwingungen am ersten Maxima von den Sensoren *Lager 1 315°* und *Lager 1 45°* genauer verglichen, dann reagiert der Sensor *Lager 1 45°* vor dem *Lager 1 315°*.

Wie vorab erwähnt ist kein genauer Unterschied der beiden Sensoren *Lager 1 315°* und *Lager 1 45°* zu erkennen. Um die Ergebnisse besser bewerten zu können, soll nun die Kreuzkorrelation der Signale berechnet werden. Hierzu wird der Sensor *Lager*

## 5 Auswertung und Diskussion

1 0° als Bezugssensor genommen, da der erste Ausschlag an diesem Sensor zu erkennen ist (siehe Abbildung 5-11). Dabei haben sich folgende Ergebnisse ergeben.

*Tabelle 5-3: Beschleunigungssensoren - Zeitdifferenz zwischen dem Bezugssignal und den weiteren Signalen*

Sensor	Zeitdifferenz [s]
Lager 1 0°	Bezugssensor
Lager 1 45°	0
Lager 1 135°	$5,8 \cdot 10^{-4}$
Lager 1 180°	$5,8 \cdot 10^{-4}$
Lager 1 225°	$5,8 \cdot 10^{-4}$
Lager 1 315°	$2 \cdot 10^{-5}$

Die Tabelle 5-3: Beschleunigungssensoren - Zeitdifferenz zwischen dem Bezugssignal und den weiteren Signalen zeigt die zeitliche Differenz zwischen dem Auftreten des Signals am Bezugssensor und dem Auftreten des Signals an den anderen Sensoren. Hierzu wurden die Signale der jeweiligen Sensoren mit dem Bezugssensor durch Kreuzkorrelation in einen Zusammenhang gebracht.

Die Sensoren am oberen Teil des Lagers liegen auch in dieser Auswertung nah bei einander. Jedoch muss hierbei betrachtet werden, dass mit 50 kHz aufgezeichnet wird und die Auflösung somit bei  $2 \cdot 10^{-5} s$  liegt. Wird die Auflösung mit einbezogen, dann liegt der Sensor *Lager 1 45°* auch in diesem Fall näher an dem Sensor *Lager 1 0°*. Werden die unteren Sensoren betrachtet, so fällt auf, dass die gleiche Zeitdifferenz gemessen wurde. Offensichtlich ist die Entfernung zum Ursprungsort nahezu gleich. Der genaue Wert kann also um  $\pm 1 \cdot 10^{-5}$  um den Messwert herum liegen.

## 5 Auswertung und Diskussion

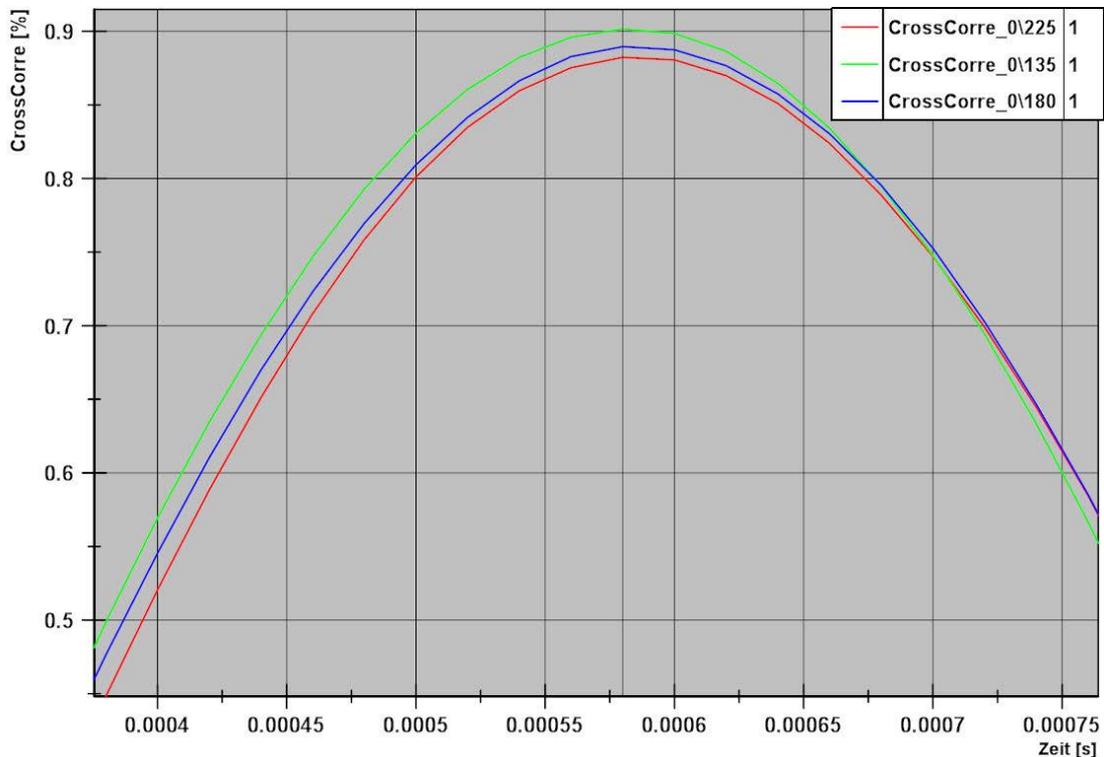
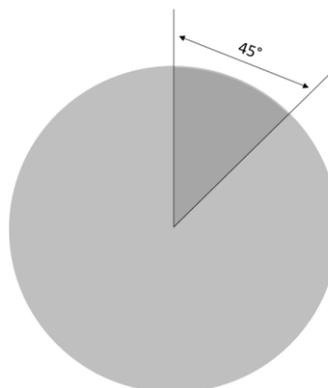


Abbildung 5-12: Beschleunigungssensoren - Verlauf der Kreuzkorrelationskurven an den ersten Maxima

Wird für diesen Fall ebenfalls der Verlauf der Kreuzkorrelationskurven an den Maxima qualitativ untersucht, so fällt hier auf, dass die Kreuzkorrelationskurve für den Bezugssensor Lager 1 0° und den Sensor Lager 1 135° näher am Nullpunkt liegt, weshalb die Zeitdifferenz kleiner ist, als die der anderen Kurven. Werden die rote und die blaue Kurve miteinander verglichen, ist die kleinere Zeitdifferenz zum Nullpunkt eher bei der blauen Kurve zu erwarten.

Der Bereich in dem der Fehler den Auswertungen nach liegt, ist in der folgenden Abbildung dargestellt:



## 5 Auswertung und Diskussion

Abbildung 5-13: Beschleunigungssensoren - Ergebnis der zeitlichen Auswertung

Die Abbildung 5-13 zeigt schematisch den Bereich, in dem der Auswertung zu folge der Schaden am Lager 1 liegen könnte.

Der Auswertung zufolge liegt der Ursprung des Klopfgeräusches im oberen Teil des Lagers in einem Bereich von  $0^\circ - 45^\circ$ .

### Messung 3:

Die folgende Auswertung beinhaltet die örtliche Festlegung der Störung anhand der Drehzahl und dem ersten auswertbaren Signal des Sensors *Lager 1 0°*. Hierfür wurden die gleichen Messdaten verwendet wie in der Messung 2.

Die Daten werden mit einer Abtastrate von  $50\text{kHz}$  aufgezeichnet. D.h. dass alle  $20\mu\text{s}$  ein Wert aufgezeichnet wird. Die Auswertung der Reaktionszeit wird auf  $100\mu\text{s}$  genau gemacht und ist damit hinreichend genau.

Die Auswertung basiert auf den Graphen aus der folgenden Abbildung:

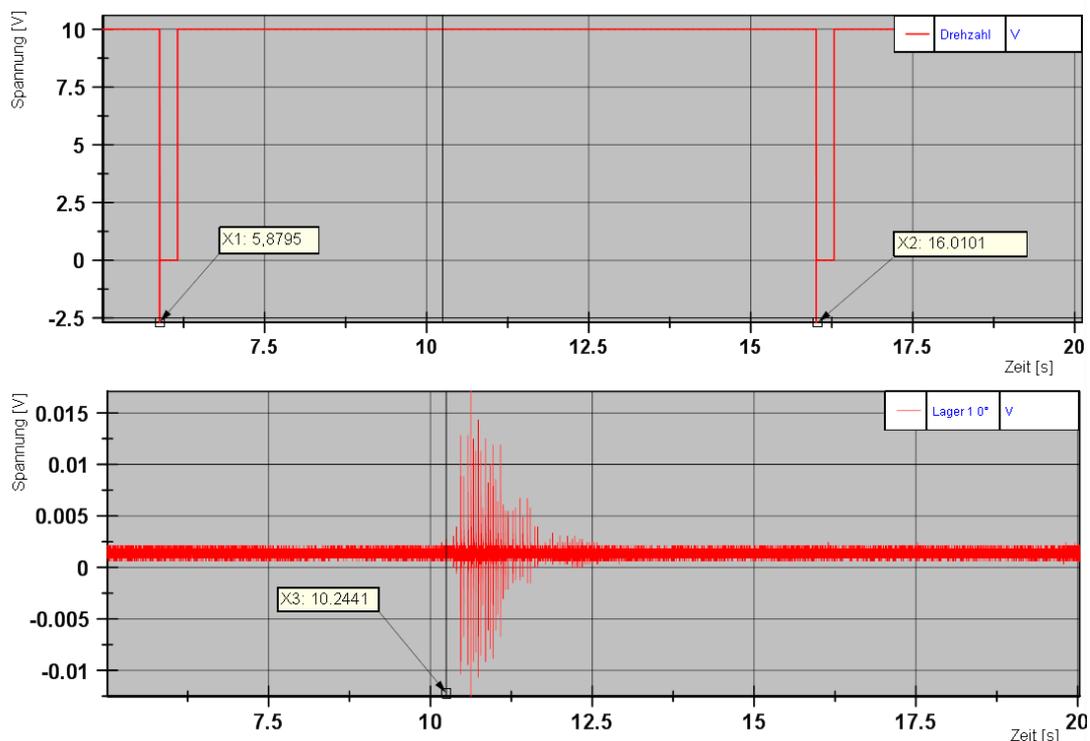


Abbildung 5-14: Beschleunigungssensoren - Auswertung der Messung 3 anhand der Drehzahl a) Drehzahl b) Auftretendes Signal innerhalb einer Umdrehung

Der obere Graph zeigt das Ausgangssignal des Drehzahlnehmers für eine Umdrehung der Welle. Im unteren Graphen ist das Ausgangssignal des Beschleunigungssensors

## 5 Auswertung und Diskussion

---

im selben Zeitraum abgebildet. Beide Graphen werden beinhalten die Daten aus Index 5.

Eine Umdrehung der Welle soll bei einer Drehzahl des Getriebes von 131  $r/min$  und einem Übersetzungsfaktor im Getriebe von 21,81 [-] ungefähr 10,0662 Sekunden dauern.

Für die genaue Drehzahl wird die Differenz zwischen zwei Durchgängen des Reflektors errechnet.

$$\Delta X = X_2 - X_1$$

*Formel 5-1: Beschleunigungssensor - Zeitdifferenz*

Somit liegt die tatsächliche Zeit für eine Umdrehung des Triebstranges bei 10,1306 Sekunden. Wie in den Versuchsabläufen beschrieben, ist ein Durchgang des Reflektors immer bei 270°.

Nach 10,2441 Sekunden tritt das erste messbare Signal am Beschleunigungssensor auf. Bezogen auf das Lager heißt das, dass die Störung bei ca. 65° liegt. Jedoch muss hierbei beachtet, dass der Ursprung des Signales nicht direkt bei dem Sensor liegt, sondern noch davon entfernt ist.

Aufgrund der Änderung des Klopfgeräusches wird diese Auswertung für eine weitere Datenreihe wiederholt. Das Auswerteverfahren bleibt unverändert, jedoch werden die Rahmenbedingungen verändert. Es werden Messdaten von vorherigen Versuchen verwendet, bei denen das Klopfgeräusch stärker war und somit der Prüfstand bei Testbedingungen betrieben werden konnte. Bei der zweiten Auswertung kam heraus [Abbildung 9-5: Anhang - Zusatzberechnung Messung 3], dass das Klopfgeräusch bei ca. 105° auftritt. Ein Grund für das frühere Auftreten des Klopfgeräusches können die veränderten Parameter Druck und Drehzahl sein.

Aus der Fallbetrachtung für den Zustand einer biegebelasteten Welle und einer nicht biegebelasteten Welle kann folgendes abgeleitet werden. Die Stellung der Welle (Fixpunkt weiterhin der angebrachte Reflektor), bei der das Geräusch auftritt, liegt zwischen 65° – 105°

### **Messung 5**

In der folgenden Auswertung werden die Frequenzspektren aus den Messdaten Index 1 mit den vom Hersteller angegebenen Frequenzen verglichen.

## 5 Auswertung und Diskussion

---

Für jedes Lager kann, unter Berücksichtigung der Drehzahl, die Überrollfrequenz und die Drehfrequenz bestimmt werden. Diese kann mithilfe der Produktbezeichnung und eines Tools auf der Internetseite des Herstellers, errechnet werden. Der bei der Berechnung entstandene Report ist auf der beigefügten DVD hinterlegt.

Der Report ist für das Lager 1, mit der Produktbezeichnung *BS2-2214-2CS/VT143*, erstellt worden. Dafür wurde eine Drehzahl von  $60 \text{ r/min}$  angegeben, die der Drehzahl des Prüfstands für diese Messung entspricht.

Dabei wurden folgende, anregende Frequenzen berechnet und in Tabelle 4 aufgeführt:

Tabelle 4: Beschleunigungssensoren - Anregende Frequenzen

	Frequenz [Hz]
Drehfrequenz des inneren Rings	1,0
Drehfrequenz des äußeren Rings	0,0
Drehfrequenz eines Elements des Lagers	3,32
Überrollfrequenz des inneren Rings	11,5
Überrollfrequenz des äußeren Rings	8,54
Überrollfrequenz eines Elements des Lagers	6,64

Für die Schwingung und das Rauschen sind mit *DIAdem* folgende Frequenzspektren erstellt worden:

## 5 Auswertung und Diskussion

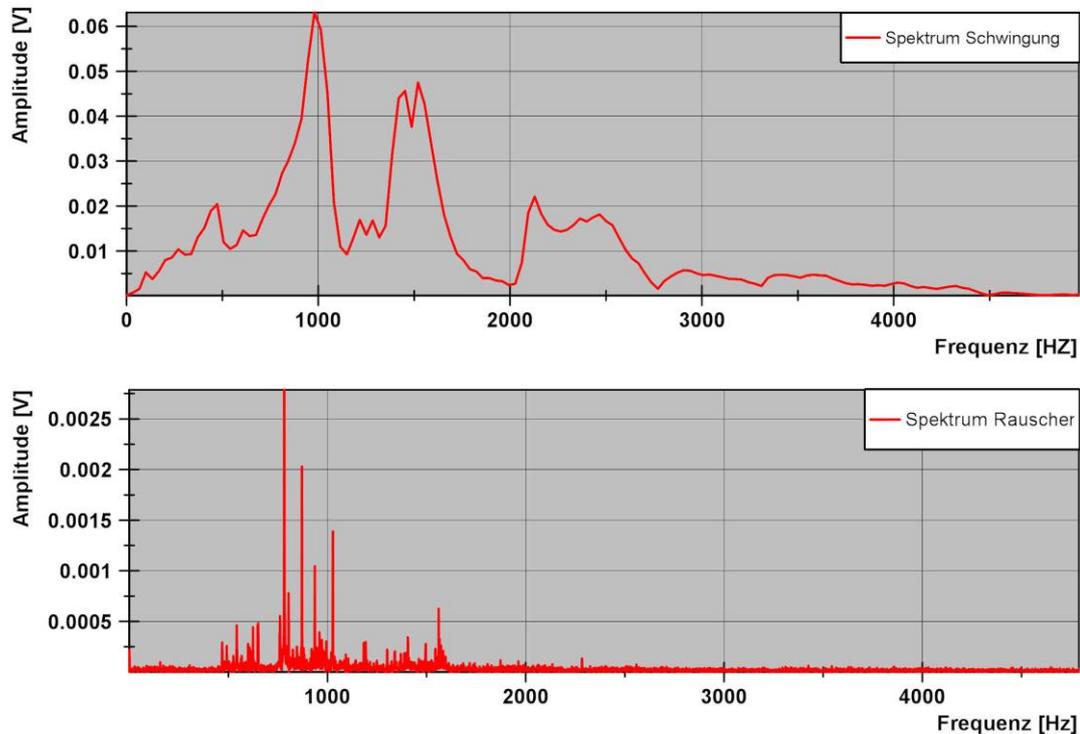


Abbildung 5-15: Beschleunigungssensoren - Frequenzspektren von einer Schwingung und Rauschen

Im oberen Teil des Graphen sind die verschiedenen Amplitudenhöhen über den Frequenzen der Schwingung aufgeführt und im unteren Teil über den Frequenzen des Rauschens. Auffällig ist hierbei, dass Frequenzen von 0 – 5000 Hz auftreten. Die höchste Amplitude der Schwingung liegt bei 979 Hz und die des Rauschens bei 782 Hz, wobei die Amplituden des Rauschens deutlich geringer sind.

### Zusammenfassung

Die Messung mit Beschleunigungssensoren gibt einen äußerst genauen Hinweis darauf, wo sich der Fehler befindet. Anhand weniger Messungen konnte der obere Bereich vom Lager 1 als Ursprung des Klopfgeräusches identifiziert werden. Zur genaueren Spezifizierung des Bereiches, in dem sich der Fehler befindet, konnten bislang nur Abschätzungen durch die grafische Auswertung der Messsignale gemacht werden. Auch die Auswertung anhand von Kreuzkorrelation konnte aufgrund der zu geringen zeitlichen Differenzen zwischen den Signalen und der zu geringen Abtastrate des Messsystems keinen genaueren Aufschluss bringen. Die Auswertung lässt ebenfalls nur die Abschätzung zu, dass sich der Fehler im Bereich  $0^\circ - 45^\circ$  des Lager 1 befindet.

Für die Stellung der Welle, bei der das Klopfgeräusch auftritt, konnte auch nur ein ungefährer Bereich von  $65^\circ$  und  $105^\circ$  ausgemacht werden. Die Ungenauigkeit hängt

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

---

zum einen mit den verschiedenen Fallbetrachtungen zusammen und zum anderen mit der Lichtschranke. Da die Reflektorfläche und der Lichtfleck der Lichtschranke relativ groß sind, kann nicht exakt bestimmt werden bei welcher Stellung der Impuls der Lichtschranke ausgelöst wird und somit ist auch der zu bestimmende Bereich ungenau.

Die Gegenüberstellung der anregenden Frequenzen durch die Rotation des Lagers und der gemessenen Frequenzen beim Klopfgeräusch liegen weit auseinander.

### 6 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, ein nicht lokalisierbares Klopfgeräusch an einem 1:10-Rotorwellen-Prüfstand örtlich zu identifizieren. Zu diesem Zweck wurden drei verschiedene Messsysteme herangezogen, um den Zustand des Prüfstands darzustellen und zu bewerten. Dabei wurden die Messsysteme anhand ihrer Möglichkeiten zur Schadensdiagnostik vorgestellt und werden im Folgenden anhand ihrer Anwendbarkeit bewertet.

Zur grundsätzlichen Anwendung zum Lösen der Fragestellung sind alle Systeme geeignet. Jedoch muss hier zwischen Aufwand und Genauigkeit differenziert werden.

Das Laser-Doppler-Vibrometer hat den Vorteil, dass es aus verschiedenen Entfernungen und Winkeln zum Messobjekt einen großen Frequenzbereich abdeckt und zusätzlich alle optisch erreichbaren Messpunkte zuverlässig misst. Jedoch sollte für eine effektive Problemlösung der zu untersuchende Bereich vorab mit einem der anderen Messsysteme eingegrenzt werden. Außerdem stand das Messsystem nur für wenige Messungen zur Verfügung, sodass lediglich die Aussage getroffen werden kann, dass das Klopfgeräusch detektiert wurden.

Die Akustische Kamera liefert die schnellsten Ergebnisse und kann innerhalb weniger Messungen den aktuellen Zustand des Prüfstands darstellen. Dabei können die aufgenommen akustischen Daten schnell auf ein 2D-Foto projiziert werden und liefert sofort Ergebnisse. Trotz der schnellen Darstellung muss darauf geachtet werden, dass die dargestellten Ergebnisse nicht direkt auf die Ursache hinweisen, sondern nur den Ort des Schallaustrittes markieren. Zusätzlich müssen Resonanzen und Reflektionen berücksichtigt werden. Die Messungen mit der AK haben ergeben, dass es mehrere Bereiche an dem Prüfstand gibt, die auf die Ursache des Klopfgeräusches hindeuten.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

---

Jedoch, unter der Berücksichtigung der Faktoren die eine Messung verfälschen können, weisen die Ergebnisse auf eine erhöhte Schallbildung am motorseitigen Pendelrolllager auf.

Die genauesten Ergebnisse lieferten die Beschleunigungssensoren. Dazu muss jedoch gesagt werden, dass mit diesem Messsystem die meisten Messungen durchgeführt werden konnten. Der Ursprung des Klopfgeräusches konnte innerhalb weniger Messungen eingegrenzt werden. Verglichen mit der Akustischen Kamera kann mit diesem Messsystem der Fehler expliziter, bezogen auf den Ort der Ursache, identifiziert werden. Der Nachteil an diesem Messsystem ist, dass die Durchführbarkeit einer Messung stark von der Oberfläche des Messobjektes abhängt. Grundvoraussetzung ist, dass die Oberfläche magnetisch ist, zusätzlich muss der Sensor fest auf der Oberfläche angebracht sein, da ein Kippen das Messergebnis erheblich verfälscht. Desweiteren kann aufgrund der Verkabelung nicht an drehenden Teilen gemessen werden.

Für das bestmögliche Ergebnis sollten die Messsysteme kombiniert werden. Auf Grund der schnellen Gesamtanalyse, sollte mit der AK der Ursprung des Fehlers eingegrenzt werden um dann in Verbindung mit einem der anderen Messsysteme den Bereich genau zu untersuchen. Bei der Auswahl des zweiten Messsystems sind dann die vorherrschenden Bedingungen der zu messenden Oberfläche entscheidend.

Abschließend kann als Ergebnis festgehalten werden, dass unter Verwendung der drei Messsysteme die Ursache und der Ursprung des Klopfgeräusches nicht eindeutig geklärt werden konnte. Durch die Untersuchungen am Prüfstand kann jedoch davon ausgegangen werden, dass sich das Klopfgeräusch im oberen Teil des motorseitigen Pendelrolllagers befindet.

Zur Verbesserung der Messungen, sollte für das LDV mehr Messungen durchgeführt werden, um bessere Bewertungskriterien zu definieren und um die Anwendbarkeit näher zu untersuchen. Mit Abständen bis zu 1,02m wurden die Messungen mit der Akustischen Kamera nicht im optimalen Messabstand durchgeführt. Zum Vergleich der Ergebnisse sollte diese bei weiteren Untersuchungen berücksichtigt werden. Die Abtastrate der Auswerteeinheit der Beschleunigungssysteme kann auf 100kHz verdoppelt werden. Jedoch ist der aktuelle Messcomputer nicht in der Lage, die Daten mehr als zwei Sensoren mit einer Abtastrate von 100kHz zu speichern. Deshalb sollte nach dem ersten Eingrenzen des Ursprungsortes nur mit zwei Sensoren, dafür aber mit der höchsten Abtastrate aufgezeichnet werden. Dadurch können die Signale mit einer kleinen Zeitdifferenz mit einer höheren Auflösung dargestellt werden. Um die Messdaten



## 6 Zusammenfassung und Ausblick

---

besser ausbereiten und bewerten zu können wäre ein Ansatz, das Rauschen zu reduzieren, indem Störfrequenzen die zum Beispiel durch die Hydraulik ausgelöst werden, bestimmt werden. Diese können dann herausgerechnet werden.

Zusätzlich empfiehlt es sich, den Fehler nach Beendigung des Versuches durch Öffnen des Lagers zu verifizieren. Werden die Ergebnisse durch das Öffnen des Lagers bestätigt, kann anhand dieses Wissens die Schallausbreitungsform (longitudinal, transversal) bestimmt werden, woraus eine genauere Schallgeschwindigkeit im Medium ermittelt werden kann. Über die Schallgeschwindigkeit können dann die Ergebnisse präzisiert werden, indem Reflexionen innerhalb eines Bauteils herausgerechnet werden können oder auch eine Berechnung des Ursprungsorts anhand der Schallgeschwindigkeit wäre im Medium denkbar.

---

## 7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Schema einer Wöhler-Linie [HAI2006, S.26].....	4
Abbildung 2-2: Schwingbruch [HAI2006].....	5
Abbildung 2-3: Aufbau des 1:10-Rotorwellen-Prüfstands.....	6
Abbildung 2-4: Verwendete Messtechnik .....	8
Abbildung 3-1: Akustische Kamera - Paddle 2x24 AC Pro - Akustische Kamera für Nahfeldanalysen [GFA2015] .....	13
Abbildung 3-2: Akustische Kamera - Schallausbreitung.....	14
Abbildung 3-3: Doppler Effekt für eine sich bewegende Quelle [TIP2015, S.475].....	17
Abbildung 3-4: Doppler Effekt - Funktionsprinzip des LDV [KUT2015, S.97] .....	20
Abbildung 3-5: Beschleunigungssensoren: Einwirkung der Befestigungsart auf Frequenz und Empfindlichkeit [SYT2016] .....	21
Abbildung 3-6: Piezoelektrischer Effekt - Möglichkeiten der Krafteinwirkung a)Druckwirkung b)Scherwirkung [KUT2015, S.102] .....	22
Abbildung 3-7: Piezoelektrischer Effekt - erzeugt Spannung [KUT2015, S.102] .....	22
Abbildung 3-8: Piezoelektrischer Effekt - Proportionalität zwischen Ladung und Kraft [KUT2015, S.102].....	23
Abbildung 3-9: Piezoelektrischer Effekt - Proportionalität zwischen Spannung und Beschleunigung [KUT2015, S.102] .....	23
Abbildung 4-1: Versuchsaufbau akustische Kamera .....	25
Abbildung 4-2: Laser-Doppler-Vibrometer - Messposition des LDV mit AK.....	27
Abbildung 4-3: Laser-Doppler-Vibrometer - Anbringung des Reflektors auf dem Messpunkt.....	28
Abbildung 5-1: a) Akustische Kamera - Ergebnisse Messung 1 Gesamtaufnahme b) Akustische Kamera – Ergebnisse Messung 1 Fokus auf die Lager.....	34
Abbildung 5-2: Akustische Kamera - Ergebnisse der Messung 2.....	34
Abbildung 5-3: Akustische Kamera - Ergebnisse Messung 3 .....	35
Abbildung 5-4: Laser-Doppler-Vibrometer – Glättung der Messung.....	37
Abbildung 5-5: Laser-Doppler-Vibrometer - Messsignal im Vergleich zum Beschleunigungssensor und der Drehzahl.....	38



## 7 Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 5-6: Laser-Doppler-Vibrometer - Vergleich der Schwingungen zum Beschleunigungssensor .....	39
Abbildung 5-7: Beschleunigungssensoren – Auswertung der Vorversuche (Index 2,3): Test zum Reaktionsverhalten der Sensoren a) Impuls am Lager 1 axial Sensor b) Impuls am Lager 2 axial Sensor .....	41
Abbildung 5-8: Beschleunigungssensoren - Bereiche für die Untersuchung einer Schwingung mit Kreuzkorrelation .....	42
Abbildung 5-9: Beschleunigungssensoren - Kreuzkorrelation für drei verschiedene Bereiche .....	43
Abbildung 5-10: Beschleunigungssensoren –Auswertung der ersten Messung .....	45
Abbildung 5-11: Beschleunigungssensoren – Auswertung Messung 2 .....	46
Abbildung 5-12: Beschleunigungssensoren - Verlauf der Kreuzkorrelationskurven an den ersten Maxima .....	48
Abbildung 5-13: Beschleunigungssensoren - Ergebnis der zeitlichen Auswertung ...	49
Abbildung 5-14: Beschleunigungssensoren - Auswertung der Messung 3 anhand der Drehzahl a) Drehzahl b) Auftretendes Signal innerhalb einer Umdrehung .....	49
Abbildung 5-15: Beschleunigungssensoren - Frequenzspektren von einer Schwingung und Rauschen .....	52
Abbildung 9-1: Anhang - Technische Zeichnung Prüfling .....	I
Abbildung 9-2: Anhang - Technische Zeichnung Dummywelle .....	II
Abbildung 9-3: Anhang –Positionierung Beschleunigungssensoren Messung 1 .....	III
Abbildung 9-4: Anhang - Positionierung Beschleunigungssensoren Messung 2 .....	III
Abbildung 9-5: Anhang - Zusatzberechnung Messung 3 .....	IV

## 8 Literaturverzeichnis

- BEE2009 Bundesverband Erneuerbare Energien (2009): *Stromversorgung 2020 – Wege in eine moderne Energiewirtschaft* [pdf]  
URL:[http://www.unendlich-viel-energie.de/media/file/203.Branchenprognose2020\\_Pressehintergrund\\_01.pdf](http://www.unendlich-viel-energie.de/media/file/203.Branchenprognose2020_Pressehintergrund_01.pdf) - 17.09.2015
- ENE2010 Enercon (2010): *WINDBLATT*, Ausgabe 01/2010, ENERCON Magazin für Windenergie [pdf]  
URL: <http://www.enercon.de/fileadmin/Redakteur/Medien-Portal/windblatt/pdf/WB-0110-dt.pdf> - 01.02.2016
- EWE2016 THE EUROPEAN WIND ENERGY ASSOCIATION (2016): *Wind in power – 2015 European statistics* [pdf]  
URL:<http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/statistics/EWEA-Annual-Statistics-2015.pdf> - 21.03.2016
- GFA2015 acoustic camera gfai tech GmbH (2015): *Paddle 2x24 AC Pro- 28 Kanal Doppel-Layer Array für Nahfeldanalysen tiefer Frequenzen* [online]  
URL:<http://www.acoustic-camera.com/de/produkte/mikrofon-arrays/paddle-2x24-ac-pro.html> -23.02.2016
- GFA2015a acoustic camera gfai tech GmbH (2015): *Datenrekorder - mcdRec* [online]  
URL:<http://www.acoustic-camera.com/de/produkte/datenerfassung/datenrekorder-mcdrec.html> -23.02.2016
- GFA2015b acoustic camera gfai tech GmbH (2015): *Software NoiseImage* [online]  
URL: <http://www.acoustic-camera.com/de/produkte/noiseimage.html> - 23.02.2016
- GFA2015c acoustic camera gfai tech GmbH (2015): *Geräuschanalyse* [online]



- URL:<http://www.acoustic-camera.com/de/anwendungen/gerae-uschanalyse.html> -28.02.2016
- GLG2012 Arno Trautsch, GL Gerrad Hassan Deutschlang GmbH (2012): *Planung und Bau eines Vibrationsmesssystems zur Messung der Schwingungen an Windenergieanlagen*
- HAI2006 Erwin Haibach (2006): *Betriebsfestigkeit – Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung [e-book]*, 3.Auflage, Springer Verlag
- HAU2008 Erich Hau (2008): *Windkraftanlagen – Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit [e-book]*, 4. Auflage, Springer Verlag Heidelberg
- HAU2014 Erich Hau (2014): *Windkraftanlagen – Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit [e-book]*, 5. Auflage, Springer Verlag Heidelberg
- HBM2015 Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH (2015): *Montageanleitung Kraftaufnehmer U3 [pdf]*
- HER2012 Ekbert Hering, Gert Schönfelder (2012): *Sensoren in Wissenschaft und Technik [e-book]*, 1.Auflage, Vieweg und Teubner
- KUT2015 Thomas Kuttner (2015) : *Praxiswissen Schwingungsmesstechnik [e-book]*, 1. Auflage, Springer Vieweg
- LER2009 Reinhard Lerch, Gerhard Sessler, Dietrich Wolf (2009): *Technische Akustik – Grundlagen und Anwendung [e-book]*, 1.Auflage, Springer Verlag
- LIN2010 H. Lindner (2010): *Physik für Ingenieure [e-book]*; 18.Auflage, Carl Hanser Verlag München.
- MAN2015 MANNER Sensortelemetrie (2015): *Bedinungsanleitung Telemetrie-system MAW SN 64855 [pdf]*
- MIE2008 MICRO-EPSILON (2008): *Betriebsanleitung – optoNCDT 1302 [pdf]*
- POH2015 Pohltechnic.com GmbH (2015): *PT100 Temperatursensor mit M6-Gewinde [online]*
- URL:<http://www.pohltechnik.com/Temperaturfuehler/Pt100-mit-Gewinde/PT100-Temperatursensor-mit-M6-Gewinde::543.html> -  
18.02.2015



8 Literaturverzeichnis

---

- POL2015 Polytec GmbH (2015): *IVS 200 – Industrial Vibration Sensor* [pdf], Datenblatt
- SEW2016 SEW EURODRIVE (2016): *Montage- und Betriebsanleitung KA47* [pdf]
- SYT2016 synoTech Sensor und Meßtechnik GmbH (2016) : *Technische Information TN-054* [pdf]
- TIP2015 Paul A. Tipler, Gene Mosca (2015): *Physik für Wissenschaftler und Ingenieure [e-book]*, 7.Auflage, Springer Spektrum
- TRA2014 Hans-Rolf Tränkler, Leonard M. Reindl (2014): *Sensortechnik – Handbuch für Praxis und Wissenschaft [e-book]*, 2.Auflage, Springer Vieweg
- TSK2015 Tokyo Sokki Kenkyujo (2015): *Foil Strain Gauges – series F* [pdf]
- WILL2010 Wolfgang M. Willems, Kai Schild, Simone Dinter (2010) : *Formeln und Tabellen Bauphysik [e-book]*, 2.Auflage, Springer Vieweg/Teubner
- ZEL2009 Peter Zeller (2009): *Handbuch Fahrzeugakustik [e-book]*, 1.Auflage, Vieweg und Teubner
- ZPF2016 ZPF-Wiki (2016): *Laservibrometrie* [online]  
URL:[http://zfp.cbm.bgu.tum.de/mediawiki/images/a/a4/Prinzip-skizze\\_LDV.jpg](http://zfp.cbm.bgu.tum.de/mediawiki/images/a/a4/Prinzip-skizze_LDV.jpg) -28.02.2016

Anhang

9 Anhang

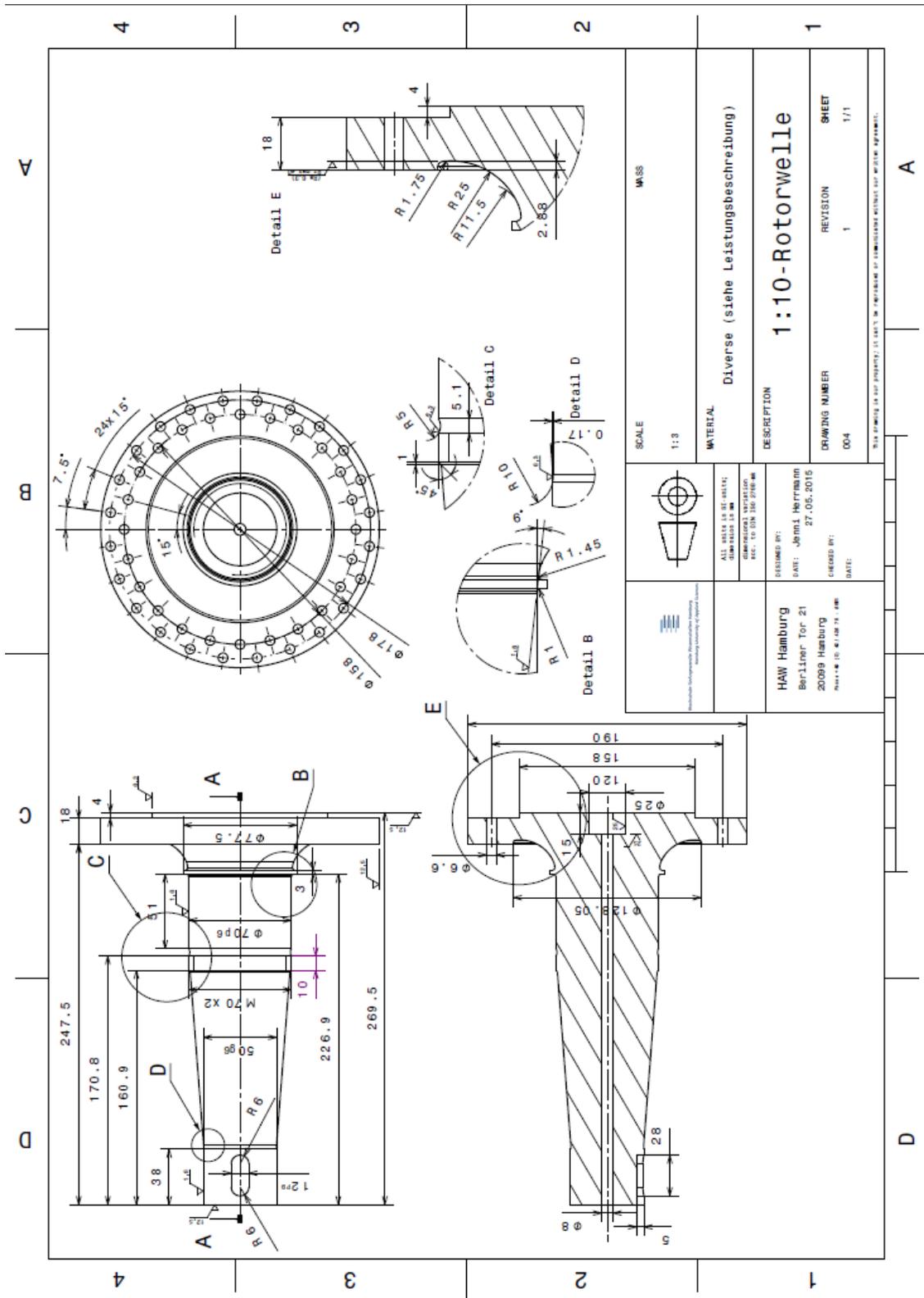


Abbildung 9-1: Anhang - Technische Zeichnung Prüfling

9 Anhang

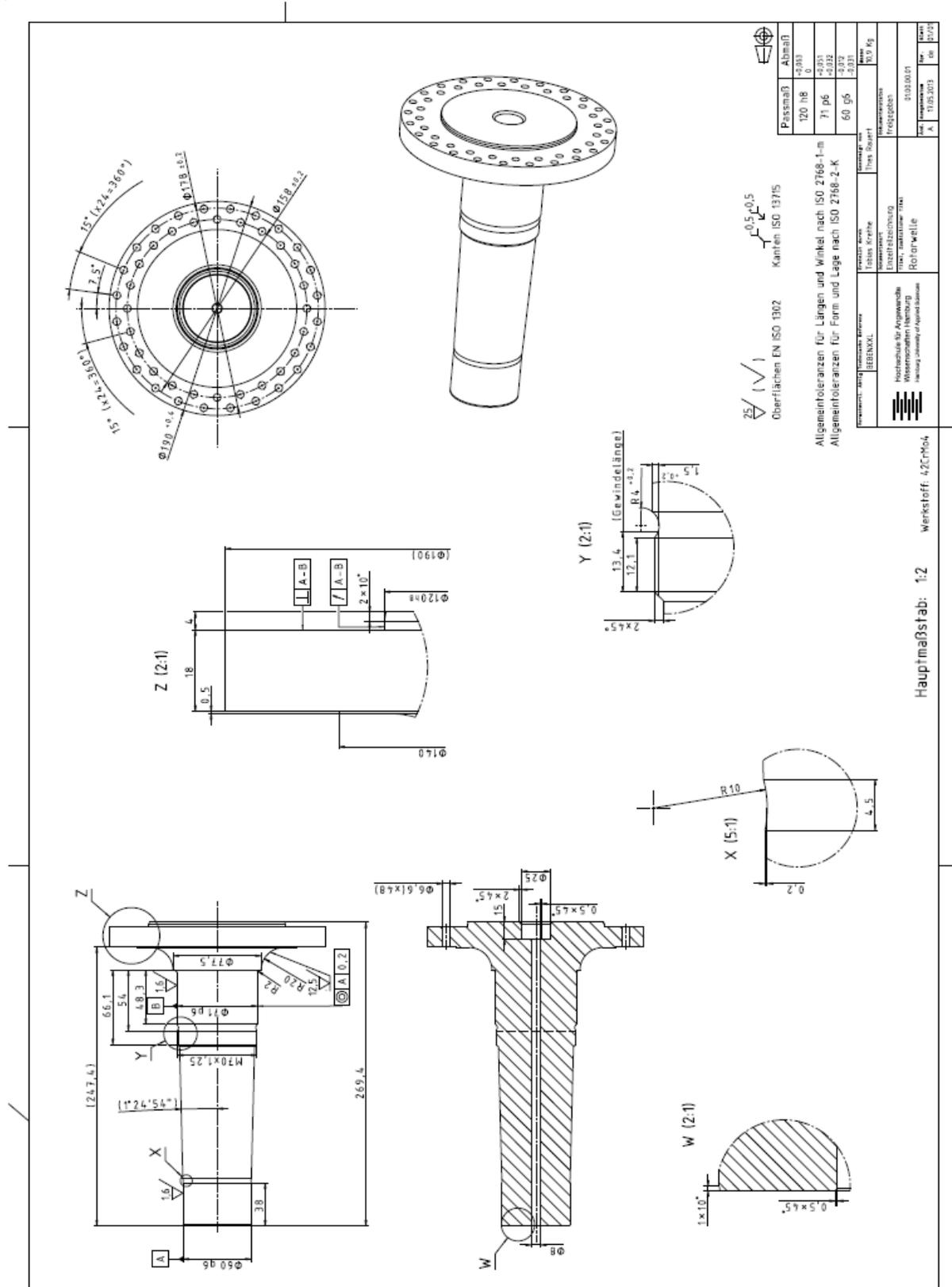


Abbildung 9-2: Anhang - Technische Zeichnung Dummyschleife

9 Anhang

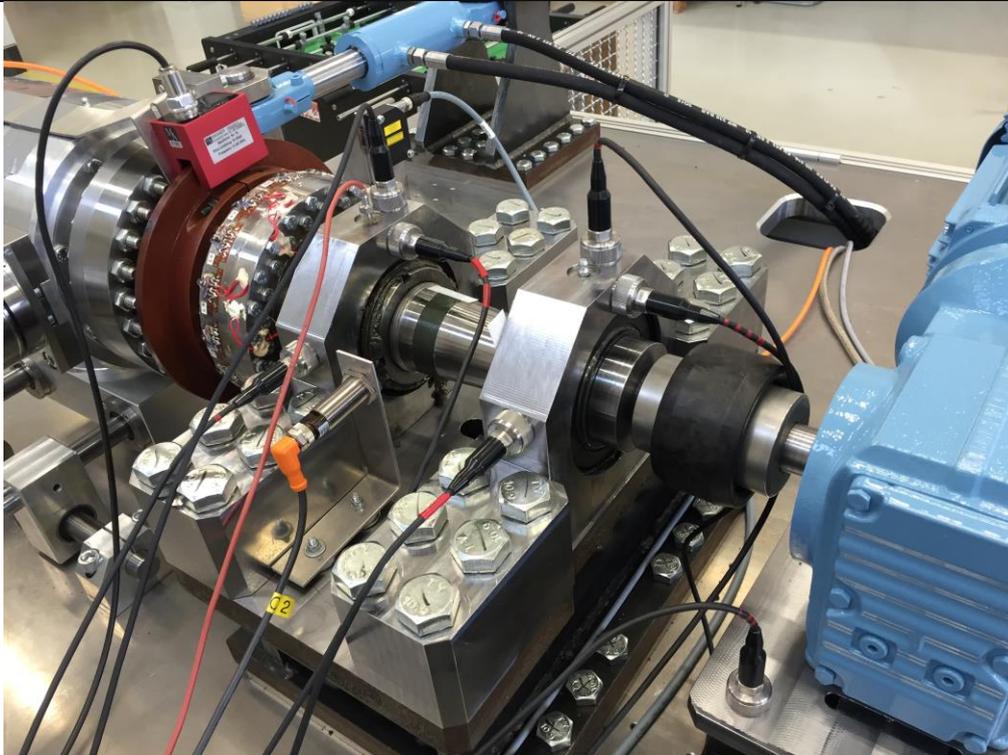


Abbildung 9-3: Anhang –Positionierung Beschleunigungssensoren Messung 1

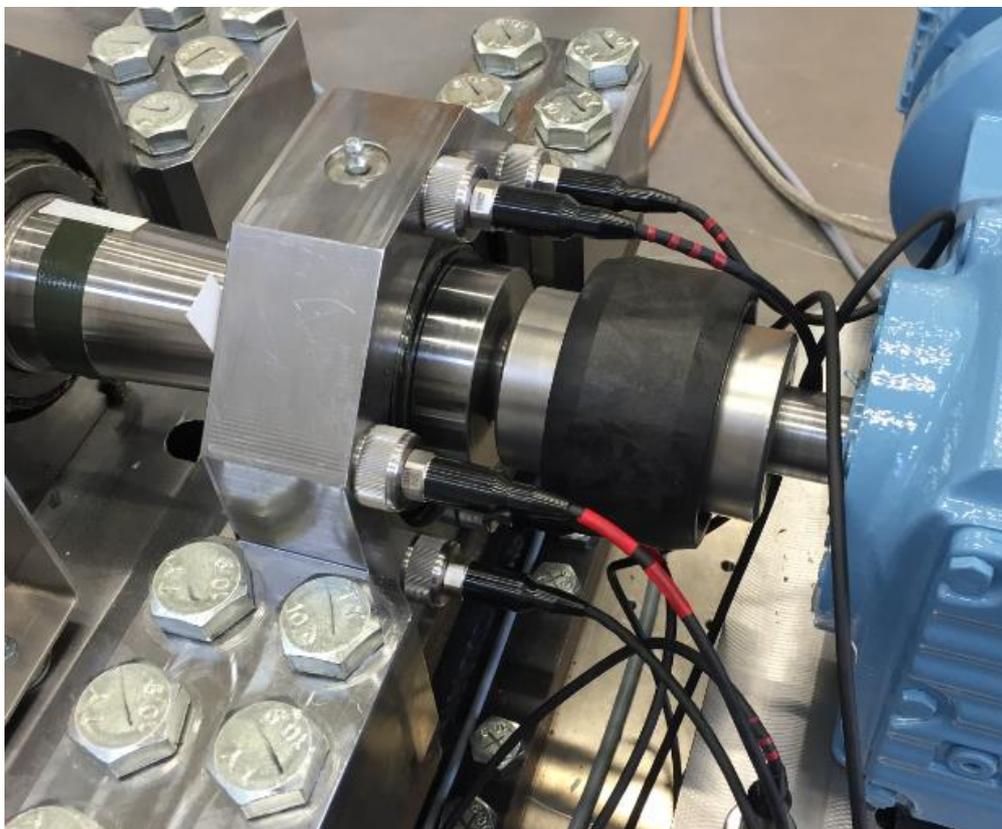


Abbildung 9-4: Anhang - Positionierung Beschleunigungssensoren Messung 2

## 9 Anhang

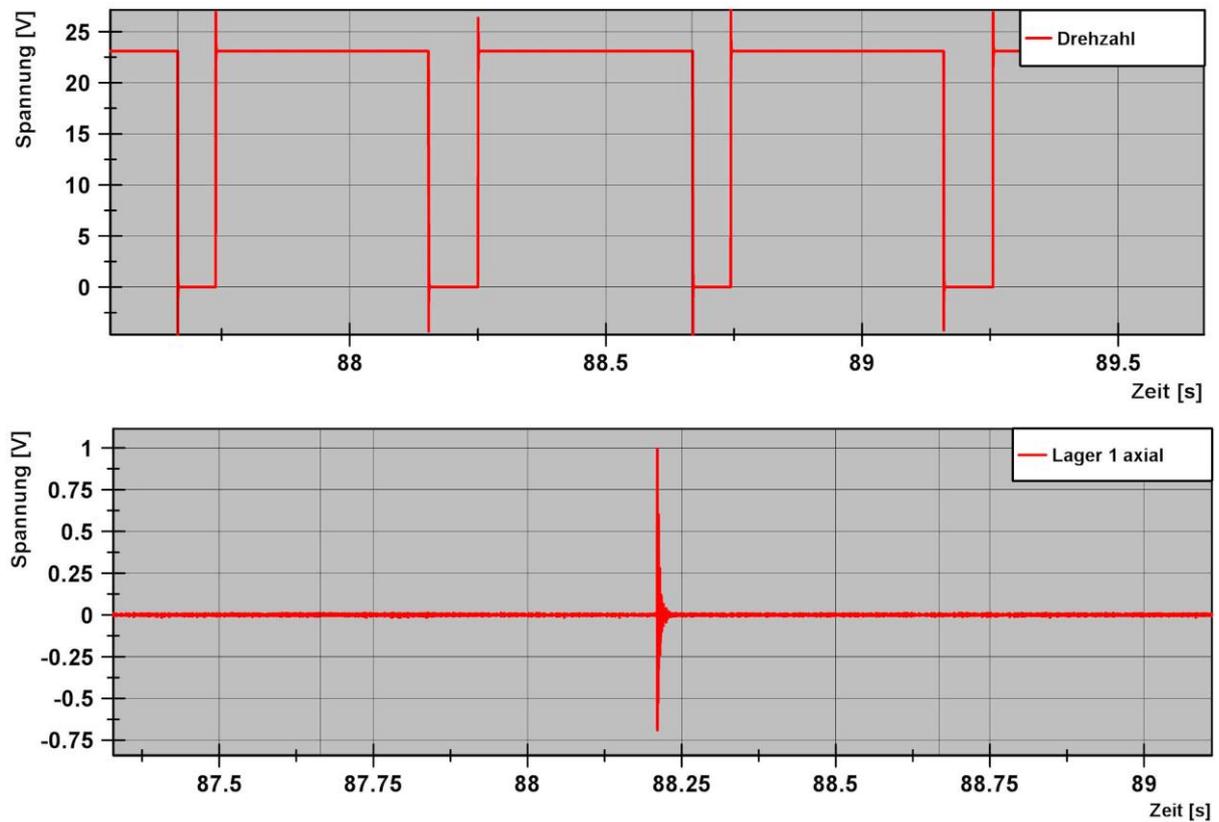


Abbildung 9-5: Anhang - Zusatzberechnung Messung 3