

Condition Monitoring
-
Akustische Zustandsüberwachung
von
Produktionsmaschinen

Masterarbeit
von
Christian Altziebler, BSc.

Technische Universität Graz

Fakultät für Maschinenbau und Wirtschaftswissenschaften

Institut für Maschinenbau- und Betriebsinformatik

Institutsleiter:

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Siegfried Vössner

Betreuer:

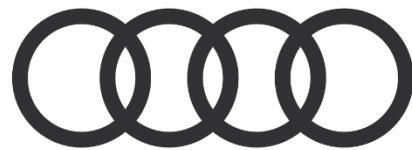
Dipl.-Ing. Clemens Gutschi

Dipl.-Ing. Dietmar Neubacher

Graz, Februar 2017

**In Kooperation
mit**

Audi
Hungaria



Eid (Ehrenwörtliche Erklärung)

Ich erkläre an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Ich versichere, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland (einer Beurteilerin oder einem Beurteiler) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe.

Graz, im Februar 2017

.....

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die mich sowohl im Rahmen dieser Arbeit, als auch in meiner Studienzeit unterstützt und motiviert haben.

Spezieller Dank gilt meinem Betreuer bei Audi Hungaria, Albert Fazekas, der mir während der Zeit in Ungarn stets hilfreich geholfen hat und auch für private Anliegen ein offenes Ohr hatte.

Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei Dipl.-Ing. Clemens Gutschi und Dipl.-Ing. Dietmar Neubacher, die meine Arbeit betreut und begutachtet haben. Die hilfreichen Anregungen und die konstruktive Kritik haben dazu geführt, dass sich die Qualität meiner Arbeit stets verbessert hat.

Mein Dank gilt auch Herrn Dr.techn. Andreas Marn vom Institut für thermische Turbomaschinen, der mir mit seinem umfangreichen Wissen, im Bereich der technischen Akustik, wertvolle Ratschläge geben konnte.

Auch meinen Freunden möchte ich danken, die über die gesamte Studienzeit ein wertvoller Rückhalt waren und mich bei Allem unterstützt haben. Besonderer Dank gilt dabei Christina Karnitschar, die mir bei der Korrektur der Arbeit zur Seite gestanden ist.

Abschließend möchte ich mich bei meinen Eltern Edith und Leo bedanken, ohne die ich mein Studium nie antreten hätte können. Dieser besondere Dank gilt nicht nur für die finanzielle Unterstützung, sondern auch weil sie immer ein offenes Ohr für mich hatten und in Zeiten fehlender Motivation stets die richtigen Worte gefunden haben.

Kurzfassung

Eine effiziente Instandhaltungsstrategie ist für jedes produzierende Unternehmen, hinsichtlich der fortschreitenden Automatisierung, wichtiger denn je. Ausfälle und Stillstände müssen bestmöglich vermieden werden und gleichzeitig sollen die Lebensdauer von Bearbeitungsmaschinen und deren Komponenten verlängert werden. Um diese Ziele zu erreichen wird in der Instandhaltung vermehrt auf die Unterstützung von sensorischen Überwachungssystemen gesetzt, sogenannte Condition-based-Maintenance Systeme. Diese Arbeit betrachtet die generelle Eignung akustischer Zustandsüberwachungssysteme einer Bearbeitungsmaschine und beschreibt den Aufbau eines derartigen Systems zur Echtzeitüberwachung. Im ersten Schritt werden verschiedene Komponenten einer Bearbeitungsmaschine untersucht und anschließend wird gezielt auf die Werkzeugzustandsüberwachung mittels Beschleunigungssensoren eingegangen. In einer definierten Versuchsreihe werden Werkstücke, verschiedenster Bauformen und Materialien, mit unterschiedlich abgenutzten Werkzeugen bearbeitet. Mit geeigneten Signalanalysen, wie zum Beispiel der Fast Fourier-Transformation (FFT) und der Ordnungsanalyse, werden die gemessenen Schwingungen der Werkzeuge ausgewertet und miteinander verglichen. Die Analysen zeigen, dass sich signifikante Unterschiede des Schwingungssignals zwischen einem neuen und einem verschlissenen Werkzeug einstellen. Diese erfassbaren Amplitudenunterschiede zeigen, dass es möglich ist, den Zustand des eingesetzten Werkzeuges aus dem Schwingungssignal abzuleiten und sich daher eine akustische Überwachung als Zustandsbewertung für Werkzeuge eignet. Zum einen liefert diese Arbeit eine Handlungsempfehlung zur Umsetzung einer Werkzeugzustandsüberwachung an ausgewählten Bearbeitungsmaschinen. Zum anderen zeigen die Erkenntnisse eine Methode zur Bestimmung des aktuellen Zustands eines Werkzeuges auf. Dies bietet Potential, zukünftige Werkzeugwechsel vorrauschaudend planen zu können. Zusätzlich ist es mit diesem Messaufbau möglich, die Schwingungen der Antriebsspindel mitzumessen. Folglich wird nicht nur der Zustand des Werkzeuges abgenommen, sondern auch der Spindelzustand kann aus dem Signal abgeleitet werden. Ferner ist es denkbar die Lebensdauer von Werkzeugen und anderer Komponenten, bei bekanntem Schwingungsverhalten zu verlängern und somit Instandhaltungskosten drastisch zu verringern.

Abstract

Due to the growing sector of automated production, efficient maintenance strategies of a manufactory are becoming an important factor for manufactories. Failure in production and loss of production need to be avoided and the lifespan of production machines and their components should be extended. Many companies work with assisting sensorial systems in maintenance to meet these targets. These systems are called Condition-based- Maintenance systems.

This thesis considers the potential of an acoustical monitoring system for milling machines. Furthermore, it describes the structure of a system used for online monitoring. Firstly, the components of the production machines are surveyed, in order to determine which ones can be monitored. Then a closer look is taken at a tool condition monitoring system, based on measured accelerations of the machine structure. In a specific experimental setup, parts with variable size and different material are machined with tools of different conditions. The vibrations are measured by accelerometers and processed by appropriate analysis methods, such as Fast Fourier-Transform or order analysis. The signals of the different tool conditions are analyzed and compared to each other. These signals show significant differences between a new machining tool and a worn one. The results indicate the possibility of identifying the tool condition based on the measured vibration signal. It can be taken as a basis for a predictive maintenance system in order to plan tool exchanges more efficiently. The positioning of the accelerometers makes sure that the vibration of spindle also can be detected, so this condition monitoring system can determine the conditions of more than one component of the production machine. This system can also extend the lifetime of tools or other components, if the vibration signal has already been analyzed. Conclusively, this will lead to a decrease in maintenance costs.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis.....	ix
Symbolverzeichnis.....	x
1. Einleitung.....	1
2. Instandhaltung.....	3
2.1 Aufgabenfeld der Instandhaltung	3
2.2 Instandhaltungsarten.....	5
2.3 Instandhaltungsstrategien	6
2.3.1 Reaktive Instandhaltung.....	7
2.3.2 Präventiv periodisch vorbeugende Instandhaltung	8
2.3.3 Präventiv zustandsabhängige Instandhaltung	9
2.3.4 Präventiv vorausschauende Instandhaltung	10
2.3.5 Total Productive Maintenance (TPM)	12
2.4 Auswahl der Instandhaltungsstrategie.....	13
2.5 Prozess- / Zustandsüberwachung und Diagnose in der Instandhaltung	15
2.5.1 Struktur des Überwachungssystems	19
2.5.2 Überwachungstechniken	22
2.5.3 Sensoren.....	23
3. Grundlagen der Akustik	26
3.1 Definition Schwingung.....	26
3.2 Definition von Schall	27
3.3 Zustandsgrößen und Schallfeldgrößen	28
3.4 Pegelgrößen	29
3.4.1 Bewertung von Schalldruckpegel	30
3.5 Schallentstehung	32
3.5.1 Technische Geräuscentwicklung.....	33
3.6 Grundlagen der Messtechnik	35
3.6.1 Die akustische Messkette.....	36
3.7 Körperschall – Messtechnik	37
3.7.1 Messgrößen	37
3.7.2 Messgeräte	37
3.7.3 Vorverstärker.....	40
3.7.4 Eigenschaften der Sensoren	40

3.7.5	Ankoppelung von Sensoren	41
3.8	Luftschall – Messtechnik	42
3.8.1	Luftschallsensoren	43
3.8.2	Einteilung der Mikrofone nach Richtcharakteristik	45
3.8.3	Vorverstärker.....	46
3.9	Erfassung akustischer Signale - Datenerfassungseinheit.....	46
3.9.1	Filterung der Signale	47
3.9.2	Frequenzanalytoren.....	47
3.10	Mess- und Auswerteverfahren	49
3.10.1	Frequenzanalyse.....	50
3.10.2	Ordnungsanalyse	55
4.	Technologiescreening	59
4.1	Stand der Technik.....	59
4.2	Überwachungsmöglichkeiten	64
4.2.1	Spindelüberwachung.....	64
4.2.2	Überwachung der gesamten Maschine	66
4.2.3	Werkzeugüberwachung.....	66
4.3	Conclusio	67
5.	Messmittel- und Anlagenauswahl	68
5.1	Auswahl Sensorik	68
5.2	Datenerfassungseinheit	70
5.3	Analysesoftware.....	72
5.4	Empfehlung Condition Monitoring System.....	73
5.5	Messequipment für Versuchsdurchführung	74
5.5.1	Beschleunigungssensoren	74
5.5.2	Datenerfassungseinheit.....	75
5.5.3	Analysesoftware	75
5.5.4	Drehzahlsensor	76
5.6	Produktionslinienauswahl für Umsetzung.....	76
6.	Experimentelle Versuchsdurchführung.....	80
6.1	Erster Vorversuch	83
6.1.1	Vorgehensweise.....	83
6.1.2	Durchführung	84
6.1.3	Ergebnis.....	87

6.1.4	Diskussion.....	88
6.2	Zweiter Vorversuch	90
6.2.1	Vorgehensweise.....	90
6.2.2	Durchführung	91
6.2.3	Ergebnis.....	92
6.2.4	Diskussion.....	95
6.3	Erster Hauptversuch	98
6.3.1	Vorgehensweise.....	98
6.3.2	Durchführung	99
6.3.3	Ergebnis.....	102
6.3.4	Diskussion.....	107
6.4	Zweiter Hauptversuch	110
6.4.1	Vorgehensweise.....	110
6.4.2	Durchführung	111
6.4.3	Ergebnis.....	114
6.4.4	Diskussion.....	120
6.5	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	122
7.	Zusammenfassung.....	123
8.	Ausblick.....	125
9.	Literaturverzeichnis	128
	Abbildungsverzeichnis.....	135
	Tabellenverzeichnis.....	139
	Anhang.....	141

Abkürzungsverzeichnis

AHM	Audi Hungaria Motor Kft.
CM	Condition Monitoring (Zustandsüberwachung)
CMS	Condition Monitoring Systeme (Zustandsüberwachungssystem)
ZKG	Zylinderkurbelwellengehäuse
AD	Analog-Digital
FFT	Fast Fourier-Transformation
DFT	Diskrete Fourier-Transformation
BE	Betrachtungseinheit
TPM	Total Productive Maintenance
AF	Arbeitsfolge
WKZ	Werkzeug

Symbolverzeichnis

κ	[-]	Isentropenexponent
ρ	[kg/m ³]	Dichte
E	[N/mm ²]	Elastizitätsmodul
R	$\left[\frac{J}{Mol \cdot K}\right]$	Allgemeine Gaskonstante, $R = 8,314 \frac{J}{Mol \cdot K}$
T	[K]	Temperatur
τ	[s]	Periodendauer
f	[Hz]	Frequenz
ω	[1/s]	Kreisfrequenz
Δf	[-]	Frequenzauflösung
q	[m ³ /s]	Schallfluss
p	[Pa]	Schalldruck
\vec{I}	[W/m ²]	Schallintensität
P	[W]	Schalleistung
L_I	[dB]	Schallintensitätspegel
L_p	[dB]	Schalldruckpegel
L_W	[dB]	Schalleistungspegel
x	[m]	Auslenkung
\hat{x}	[m]	Amplitude, maximale Auslenkung
$L_{p ges}$	[dB]	Gesamtschalldruckpegel

1. Einleitung

Die Audi AG gehört dem Volkswagen-Konzern an und zählt im Premiumsegment zu den erfolgreichsten Automobilherstellern der Welt. Um diese Stellung in dieser wichtigen wirtschaftlichen Branche halten zu können, muss auch der technische Fortschritt stets vorhanden sein. Deshalb gilt es alte Technologien zu überarbeiten und durch fortschrittliche Technologien zu ersetzen. Nicht umsonst lautet der Slogan von Audi: „*Vorsprung durch Technik*“.

Mit dem Standort Audi Hungaria Motor Kft. (AHM) in Göyr, verfügt Audi über das größte Motorenproduktionswerk der Welt, das einzige Werk, welches jemals über zwei Millionen Motoren im Jahr produzieren konnte. Um solche Stückzahlen zu erreichen, ist ein reibungsloser Ablauf in der Produktion besonders wichtig. Eine hohe Verfügbarkeit und draus resultierende geringe Stillstandzeit der Maschine sind wesentliche Bewertungsfaktoren in der Produktion. Dabei gilt es Ausfälle von Produktionsmaschinen so gut wie möglich zu vermeiden und ebenso die Grenzen der Werkzeugstandzeit zu erweitern. Aus diesem Grund ist es besonders wichtig auf eine effiziente Instandhaltungsstrategie zu setzen.

Die vorwiegend angewandte Instandhaltungsstrategie bei AHM kann als periodische vorbeugende Instandhaltungsstrategie beschrieben werden. Das bedeutet, betrachtete Einheiten werden vorbeugend, nach einer gewissen Produktionszeit oder produzierten Stückzahl gewartet oder ausgetauscht. Da es dadurch oft zum verfrühten Austausch der Einheiten kommt und der Abnutzungsgrad dieser Einheiten nicht vollkommen ausgenutzt werden kann, entstehen Kosten die durch andere Strategien vermieden werden können. Eine solche ist die zustandsabhängige Instandhaltung, welche heutzutage vermehrt durch den Einsatz zusätzlicher Sensorik ermöglicht wird. Derartige System werden als Condition Monitoring Systeme bezeichnet.

In dieser Arbeit wird eine Machbarkeitsstudie einer akustischen Zustandsüberwachung von Bearbeitungsmaschinen dargelegt und dient als Grundlage Instandhaltungstätigkeiten vorausschauend planen zu können. Zusätzlich soll die Arbeit aufzeigen wie ein Zustandsüberwachungssystem aufgebaut werden kann,

um damit eine Echtzeitüberwachung zu ermöglichen. Darunter versteht man eine kontinuierliche Datenanalyse zur Prädiktion von Fehlern und Störungen.

Im Rahmen dieser Arbeit wird besonders auf den Körperschall und Messgeräte zur Erfassung des Körperschalls eingegangen, da die Luftschallmessung an Bearbeitungsmaschinen schon zu Beginn der Arbeit als ungeeignet klassifiziert wurde.

Der Aufbau der Arbeit wird in zwei theoretische und zwei praktische Kapitel unterteilt. Zunächst wird im theoretischen Teil auf die Grundlagen der Instandhaltung eingegangen und darauf aufbauend werden die notwendigen akustischen Grundlagen aufgearbeitet.

Im praktischen Abschnitt werden im Rahmen eines Technologiescreenings Möglichkeiten einer akustischen Überwachung angeführt, woraus direkte Anwendungsfälle für AHM abgeleitet werden können. Die notwendige Messtechnik zum Aufbau eines Condition Monitoring Systems, wird im Folgekapitel behandelt. Den Abschluss des praktischen Teils machen mehrere Versuchsreihen, bei denen Signale verschiedener Werkzeugzustände, mittels Beschleunigungssensoren, erfasst und miteinander verglichen werden. Dieser Vergleich der Schwingungssignale dient als Grundlage zur Identifikation von unterschiedlichen Werkzeugzuständen bei Bearbeitungsmaschinen.

2. Instandhaltung

Technische Einrichtungen bzw. Allgemein einer Betrachtungseinheit (BE) unterliegen während ihrer Laufzeit Zustandsveränderungen, die durch Alterung, Korrosion und Verschleiß hervorgerufen werden. Dies heißt nicht, dass technische Objekte nur unter Benutzung Zustandsveränderungen aufweisen; auch natürliche Vorgänge bewirken Veränderungen an der Maschine (Wärmeeinfluss, Umgebungsdämpfe, Licht, elektromagnetische Wellen, ...). (vgl. Strunz 2012, p. 2) Die nachfolgenden Kapitel beschäftigen sich rein mit der Instandhaltung von technischen Anlagen, deshalb werden auch andere Betrachtungen der allgemeinen Instandhaltung nicht erwähnt.

Definitionen laut (ÖNORM EN 13306:2010)

„Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements während des Lebenszyklus einer Einheit, die dem Erhalt oder der Wiederherstellung ihres funktionsfähigen Zustandes dient, sodass sie die geforderten Funktionen erfüllen kann.“

„Instandhaltung gemäß Definition nach DIN 31051 wird immer und überall dort ausgeübt, wo es gilt, die Funktionsfähigkeit und damit den Wert technischer Objekte sicherzustellen und zu erhalten.“ (Strunz 2012, p. 1)

2.1 Aufgabenfeld der Instandhaltung

Ziel der Instandhaltung ist die Reduzierung der Abnutzungsgeschwindigkeit und der Schutz vor Verfall. Um die Zielformulierung der Sicherung einer möglichst störungsfreien Lebensdauer einer Maschine zu verwirklichen, ist die Aufgabe der Instandhaltung, besonders in der Produktion, von hoher Priorität. Neben der Aufrechterhaltung des gebrauchsfähigem Zustandes gilt auch den Aufwand zur Erreichung dieses Zustandes gering zu halten. Die Unterteilung nach DIN 31051 erfolgt in vier Maßnahmen: Wartung, Inspektion, Instandsetzung und Verbesserung. (vgl. Strunz 2012, p. 3)

Instandsetzung

Wiederherstellung der Funktionalität von fehlerhaften Komponenten.

Inspektion

Bestimmung des aktuellen Zustands von Komponenten, Störungen identifizieren und Maßnahmen ableiten, welche die Funktion sicherstellen.

Wartung

Die Lebensdauer der Einheiten wird durch Reduzierung der Abnutzung verlängert.

Verbesserung

Maßnahmen, welche die Zuverlässigkeit, die Sicherheit und die Instandhaltbarkeit einer Komponente erhöhen.

(vgl. DIN 31051:2012-09, 5f)

Diese vier erwähnten Begriffe bilden die Basis der Instandhaltungsmaßnahmen, jedoch beschränken diese nicht alleine das Aufgabengebiet. Analyse des Ausfallsverhaltens, identifizieren potenzieller Störungen und vermeiden von Störungen sind weitere wichtige Tätigkeiten.

Eine Einteilung der Instandhaltungsarten findet man in der DIN EN 13306:2001-09 wieder. Diese beschreibt die Arten bezüglich des Zeitpunktes wann die Instandhaltungsmaßnahmen ausgeführt werden und ebenso von wo aus diese verrichtet werden. (vgl. Schenk 2010, p. 23)

2.2 Instandhaltungsarten

Die Instandhaltungsarten werden in (ÖNORM EN 13306:2010, 12ff) wie folgt eingeteilt:

- präventive Instandhaltung
- vorausbestimmte Instandhaltung
- zustandsorientierte Instandhaltung
- voraussagende Instandhaltung
- korrektive Instandhaltung
- aufgeschobene korrektive Instandhaltung
- sofortige korrektive Instandhaltung
- geplante Instandhaltung
- ferngesteuerte Instandhaltung
- Instandhaltung während des Betriebs
- Instandhaltung vor Ort
- Bediener-Instandhaltung

In weiterer Folge sollen auf die Instandhaltungsarten eingegangen werden, die für die Erstellung dieser Arbeit relevant sind.

zustandsorientierte Instandhaltung

Ist eine Art der präventiven Instandhaltung, dabei werden Zustandsüberwachung, Prüfungen von Einheiten und verschiedensten Analysemethoden miteinander kombiniert, um daraus Instandhaltungsmaßnahmen abzuleiten.

voraussagende Instandhaltung

Abgeleitet von bekannten Parametern und Eigenschaften, die eine Abnutzung der Einheit beschreiben, kann eine Vorhersage über den Zustand getroffen werden.

korrektive Instandhaltung

Nach der Fehlerfrüherkennung wird die Betriebseinheit in den gewünschten Funktionszustand übergeführt.

geplante Instandhaltung

Diese Instandhaltungsart findet nach konstanten Zeitabständen statt bzw. nach einer festgelegten Anzahl von Nutzungseinheiten.

(vgl. ÖNORM EN 13306:2010, 12ff)

Die Gestaltung der Instandhaltungsprozesse hängen sehr stark von der ausgesuchten Instandhaltungsstrategie ab. (vgl. Schenk 2010, p. 26)

2.3 Instandhaltungsstrategien

Instandhaltungsstrategien können als Vorgaben bzw. Regeln verstanden werden, welche vorschreiben, wann eine Aktion an welchem technischen Objekt durchgeführt werden soll. Zu berücksichtigen sind bei der Auswahl der Strategie, gesetzliche Vorgaben, sicherheitsrelevante, produktionsrelevante, wirtschaftliche und technische Aspekte.

Definition laut ÖNORM EN 13306:2010:

„Vorgehensweise des Managements zur Erreichung der Instandhaltungsziele.“

Unterschieden wird bei der Wahl des Zeitpunktes, nämlich zwischen der systematischen und unsystematischen Herangehensweisen. Unsystematische Herangehensweisen treten bei Bedarf auf oder sind im Falle eines Schadens durchzuführen. Bei der systematischen kommt es zu einer periodischen Durchführung, das heißt nach einer gewissen Zeit oder Nutzungsdauer. Auch geplante Betriebspausen und andere Randbedingungen des Anlagenbetriebes müssen in der systematischen Betrachtung berücksichtigt werden.

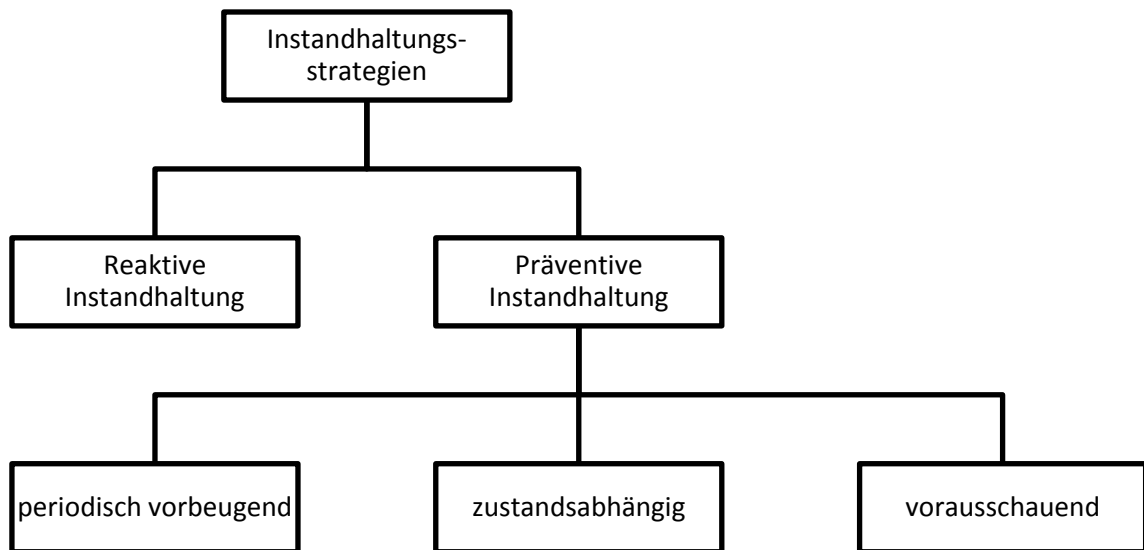


Abbildung 1: Instandhaltungsstrategien (vgl. Matyas 2013, p. 29)

Die Einteilung erfolgt prinzipiell nach zwei Grundstrategien, nämlich nach der reaktiven und der präventiven Instandhaltung. Im Falle der präventiven wird, wie in Abbildung 1 ersichtlich, zwischen der periodisch vorbeugenden, zustandsabhängigen und der vorausschauenden Strategie unterschieden. Die Grundstrategien haben wesentlichen Einfluss auf die Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit der technischen Anlage und sind folglich entscheidend für die Instandhaltungskosten. Ziel ist es eine Kostenmaximierung, bei maximaler Anlagenverfügbarkeit, zu erzielen.

(vgl. Schenk 2010, 26f; Matyas 2002, p. 13)

2.3.1 Reaktive Instandhaltung

Diese Bezeichnung ist auch unter dem Namen störungsbedingte, ausfallorientierte Instandhaltung in der Literatur zu finden. Hier erfolgt die Durchführung einer Instandhaltungsmaßnahme erst beim Ausfall des Objektes oder bei Erreichen gewisser Schadensgrenzen. Dies kann in manchen Fällen auch bis zur kompletten Zerstörung der Maschine führen. Wartungen und Inspektionen sind zwischen den Ausfällen nicht vorgesehen und werden in der Regel nicht durchgeführt. Streng genommen handelt es sich hierbei um keine Strategie, sondern vielmehr um

schnelles Handeln im Schadensfall. Deshalb ist auch diese Handhabung der Instandhaltung nicht für alle technischen Anwendungen geeignet, da mit dieser ein Gefahrenpotential miteinher geht. Komponenten werden immer an ihre Abnutzungsgrenzen gebracht und so gesehen ist es von der anfänglichen Betrachtung eine kostengünstige Variante. Treten Folgeschäden auf, weil es zu einer Überlastung anderer Komponenten kommt, kann dies zu weitaus höheren Kosten führen. Da ein Schaden nicht vorausschauend behandelt wird, müssen auch die Komponenten, welche zu tauschen sind, sowie das Personal stets zu Verfügung stehen. Ansonsten kommt es zu längeren Stillstandszeiten der Anlage. Die Umsetzung dieser Strategie ist nur für Anlagen geeignet, welche eine untergeordnete Bedeutung im Unternehmen haben. Im Falle eines Produktionsunternehmens darf die Anwendung nur an Maschinen erfolgen, bei denen ein Ausfall nicht zu einer Produktionsunterbrechung führt. Man findet diese Strategie, wenn überhaupt, bei redundanten Systemen wieder.

(vgl. Schenk 2010, 27f; Matyas 2002, p. 14; Strunz 2012, p. 296)

2.3.2 *Präventiv periodisch vorbeugende Instandhaltung*

Instandsetzungsmaßnahmen und Austausch von Komponenten finden unabhängig von der tatsächlichen Abnutzung statt. Man orientiert sich an vorhin definierten Nutzungsintervallen. Die Intervalle beziehen sich entweder auf ein Ereignis oder auf einen bestimmten Zeitpunkt, zum Beispiel monatlich, wöchentlich, gewisse Betriebsstunden, bearbeitete Stückzahlen, gefahrene Kilometer, Anfahrvorgängen usw. Geplante Überholungen an Anlagen werden angewendet, wenn sicherheitsrelevante oder umwelttechnische Aspekte betroffen sind. Ebenso findet diese Strategie ihre Anwendung, wenn die Lebensdauer von den Bauteilen, aufgrund von Erfahrungswerten, bekannt ist und andere Komponenten sich noch in einem guten Zustand befinden. Gegenüber der reaktiven Instandhaltung erzielt man mit der periodisch vorbeugenden Instandhaltung eine höhere Anlagenverfügbarkeit, da der Zeitpunkt der Instandhaltungsmaßnahmen geplant ist. Somit stehen die benötigten Ressourcen zur Verfügung und die Arbeiten können in der produktionsfreien Zeit stattfinden. Dem gegenübergestellt ist die Tatsache, dass der Austausch der Komponenten oft zu früh erfolgt und die Lebensdauer nicht

voll ausgenutzt werden kann. Bezüglich der Kosten ergibt das geringere Ausfallkosten, aber höhere Vorbeugungskosten. Diese Strategie macht sich oft unterschiedlicher Austauschintervalle von gleichen Komponenten zu Nutze, damit die Lebensdauer besser ausgereizt werden kann. Dazu ist entsprechende Erfahrung notwendig und eine gute Dokumentation der Schadensereignisse gefordert. Periodisch vorbeugender Austausch von Komponenten wird angewendet, wenn die Austausch- bzw. Instandsetzungskosten gegenüber den Ausfallkosten gering sind. Ziel ist es also den optimalen Zeitpunkt für die Instandhaltung zu finden, bei dem minimale Kosten entstehen. Dies wird durch die zustandsorientierte Instandhaltung optimiert.

(vgl. Schenk 2010, 28ff; Matyas 2002, p. 14; Strunz 2012, p. 297)

2.3.3 *Präventiv zustandsabhängige Instandhaltung*

Diese Strategie wird auch Inspektionsstrategie genannt und erzielt die geringste Ausfallzeit, bei gleichzeitig guter Ausnutzung des Verschleißgrades der Komponenten. Grundlegend unterscheidet sich zu den anderen Strategien die Tatsache, dass sich die Steuergröße des Instandhaltungsintervalls ändert, da hier die Steuergröße der Zustand ist und nicht mehr direkt die Zeit. Somit gelingt es die Wartungs- und Instandsetzungsmaßnahmen exakt zu der Zeit durchzuführen, wenn es der Abnutzungsgrad erfordert. Um Rückschlüsse auf den aktuellen Zustand der Anlage ziehen zu können, sind weitere Informationen notwendig, so dass die Instandhaltungsintervalle an den aktuellen Abnutzungsgrad angepasst werden können. Diese Überwachung des aktuellen Zustandes bedient sich der Methodik der technischen Diagnostik, wobei die regelmäßige Inspektion durch den Menschen die einfachste Form der Methode darstellt.

Manuelle Inspektionen können bei technischer Unterstützung durch sogenannte Condition Monitoring Systeme (CMS) geringgehalten werden. Diese Inspektionen erfolgen vollkommen automatisch, entweder werden sie zyklisch oder kontinuierlich durchgeführt. In einem CMS ist es gewünscht, die Anzahl von Sensoren so gering wie möglich zu halten und gleichzeitig so viele Komponenten wie möglich zu überwachen. So können die Investitionskosten minimiert werden. Diese Strategie setzt voraus, dass der Abnutzungsgrad, der zu überwachenden Komponenten, auch technisch messbar ist. Des Weiteren muss die messtechnische

Überwachung auch wirtschaftlich vertretbar sein, da die Investitionskosten in den meisten Fällen nicht sehr gering sind. Sowohl die Inspektionen durch den Menschen, als auch technische Diagnostik ermöglichen Schäden frühzeitig zu erkennen und die Restlebensdauer vorherzusagen. Daher können Anlagenausfälle gut vermieden werden, was zu einer Erhöhung der Zuverlässigkeit der Anlage führt. Zusätzlich lässt die frühzeitige Erkennung des Schadens den Zeitpunkt der Instandhaltung so planen, dass die Maßnahmen zur produktionsfreien Zeit durchgeführt werden. Dies senkt wiederum die Instandhaltungskosten.

(vgl. Jardine et al. 2006; Strunz 2012, 297f; Schenk 2010, 30f; Matyas 2002, 14f)

2.3.4 *Präventiv vorausschauende Instandhaltung*

Die zustandsorientierte Instandhaltung stößt bei verdeckten Fehlern an ihre Grenzen, da diese nicht erfasst werden können. Geht es um sicherheits- und umweltrelevante Aspekte. So gilt es die Ausfallwahrscheinlichkeit auf ein erträgliches Maß zu senken. Die vorausschauende Instandhaltung versucht Störungen zu beseitigen, bevor diese entstehen. Es muss jedoch im Vorhinein entschieden werden, ob dies technisch realisierbar ist und sich wirtschaftlich lohnt.

Ausgegangen wird in der theoretischen Betrachtung, dass die Störungsfolgen in vier oder weniger Gruppen eingeteilt werden können:

Verdeckte Folgen

Am Beginn haben diese keinen Einfluss am Prozessablauf, jedoch können im Laufe der Zeit schwerwiegende Folgen entstehen. Ihnen wird deshalb hohe Aufmerksamkeit geschenkt.

Sicherheits- und umweltrelevante Folgen

- Gefahr von Personenschäden haben ein hohes Aufmerksamkeitspotenzial
- Grenzwertüberschreitende Emissionen

Betriebsabhängige Folgen

- Warenausstoß
- Produktqualität
- Kundenservice

Betriebsunabhängige Folgen

- beziehen sich auf reine Instandsetzungskosten

(vgl. Matyas 2002, p. 15)

Diese vier Basisstrategien werden nicht immer getrennt behandelt, z.B. durch Kombination der einzelnen Strategien lassen sich einige Unterstrategien ableiten. Die zustandsabhängige Instandhaltung kann in eine periodische Inspektion und in eine kontinuierliche Überwachung aufgespalten werden und des Weiteren gegliedert werden, wer die Überwachung durchführt. In der Literatur wird auch häufig der Ansatz des Total Productive Maintenance (TPM) als eigenständige Instandhaltungsstrategie angeführt.

(vgl. Schenk 2010, 31ff)

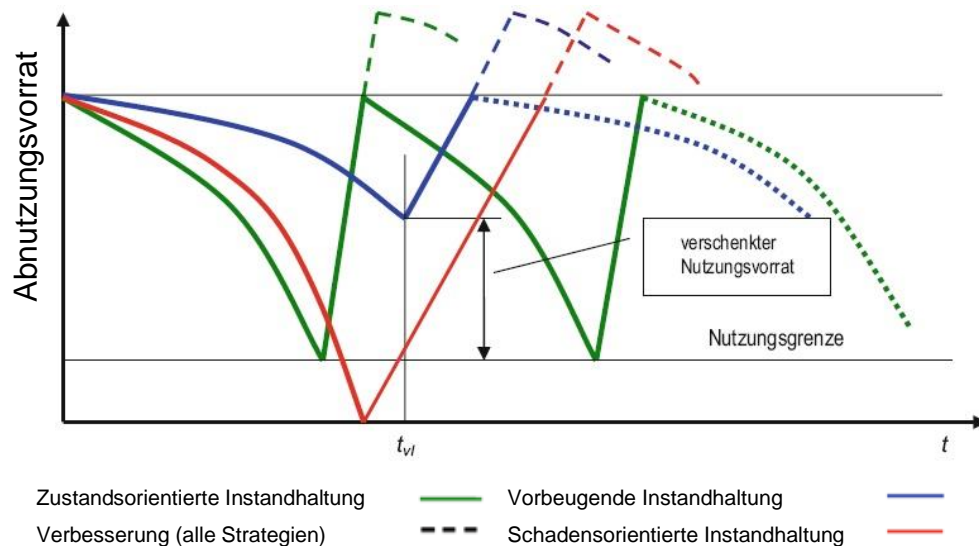


Abbildung 2: Abnutzungsvorrat im Vergleich (Strunz 2012, p. 300)

2.3.5 Total Productive Maintenance (TPM)

Entwickelt wurde das TPM Konzept um eine hundertprozentige Maschinenverfügbarkeit zu erreichen. Im Gegensatz zur klassischen Instandhaltung verfolgt das TPM Konzept das Ziel, dass alle Mitarbeiter in den Verbesserungsprozess miteinbezogen werden.

„Das Konzept der Total Productive Maintenance strebt eine Maximierung der Effizienz der Betriebsmittel an. Dazu bedient sie sich der umfassenden und vorbeugenden Instandhaltung über die gesamte Lebenszeit aller betrachteten Produktionsanlagen. TPM umschreibt im Wesentlichen einen Prozess, durch den die Produktion zuverlässiger gestaltet werden soll. In diesem Konzept sind alle Abteilungen und Ebenen mit Schnittstellen zur Instandhaltung einbezogen. Der Produktionsmitarbeiter wird durch Übernahme von Instandhaltungsaufgaben zum „knowledgeable operator“. Er soll neben der Durchführung einfacher Instandhaltungstätigkeiten vor allem Unregelmäßigkeiten beim Betrieb „seiner“ Anlage erkennen, um so Anlagen- und Qualitätsstörungen rechtzeitig zu erkennen.“
(Pawellek 2013, p. 4)

Als Ziel im TPM wird die Maximierung der Anlageneffizienz beschrieben. Bei den Tätigkeiten zur Erreichung des Zieles spielen nicht nur allein die Maschinenbediener eine Rolle, es betrifft ebenso die Managementebene, die in diesem Prozess genauso tätig sein muss. Die Arbeit in Kleingruppen und die Verantwortlichkeit für die eigene Anlage, soll zu einer Motivationssteigerung und zu mehr Aufmerksamkeit zur Reduzierung von Störungen an den täglichen Prozessen führen.

(vgl. Matyas 2013, p. 214)

2.4 Auswahl der Instandhaltungsstrategie

Große Bedeutung zur Erreichung der Ziele kommt der Wahl der richtigen Instandhaltungsstrategie zu. Entscheidend für oder gegen eine der Strategien ist immer von der konkreten Situation der Anlage und von der Instandhaltungspolitik des Unternehmens abhängig. Bei der Auswahl der richtigen Strategie muss bedacht werden, dass Themen wie Sicherheit, Schutz des Menschen und Umweltverträglichkeit immer an erste Stelle stehen müssen und der Schutz der Produktion als zweitrangig angesehen werden muss. Die Instandhaltungsstrategie verfolgt das Ziel Folgeschäden durch Störungen gering zu halten, jedoch sollten Instandhaltungsarbeiten nur dort ausgeübt werden, wo sich merkbare Änderungen erkennen lassen.

Moubray (1996) beschreibt in seinem Buch einen Prozess zur Identifizierung von essentiellen Instandhaltungstätigkeiten, welche die Funktionsfähigkeit von allen beteiligten Maschinen erhöhen soll. Die Durchführung dieser Analyse basiert auf sieben Grundfragen für jede Anlage, die am Produktionsprozess beteiligt ist.

1. Welche Funktionen und damit verbundenen Leistungsnormen erfüllt die Anlage?
2. Wie kann die Anlage gestört werden?
3. Was bewirkt die Funktionsstörung?
4. Welche Folgewirkung hat die Störung?
5. Wie wirkt sich die Störung aus?
6. Möglichkeiten der Vorbeugung?
7. Was geschieht wenn keine vorbeugende Lösung anwendbar ist?

Dokumentation der Ursachen und Folgen einer Funktionsstörung ermöglicht es, Fehlfunktionen entsprechend zu kategorisieren. Diese Kategorisierung dient als Entscheidungshilfe, welche Instandhaltungsaktivitäten zu erwarten sind.

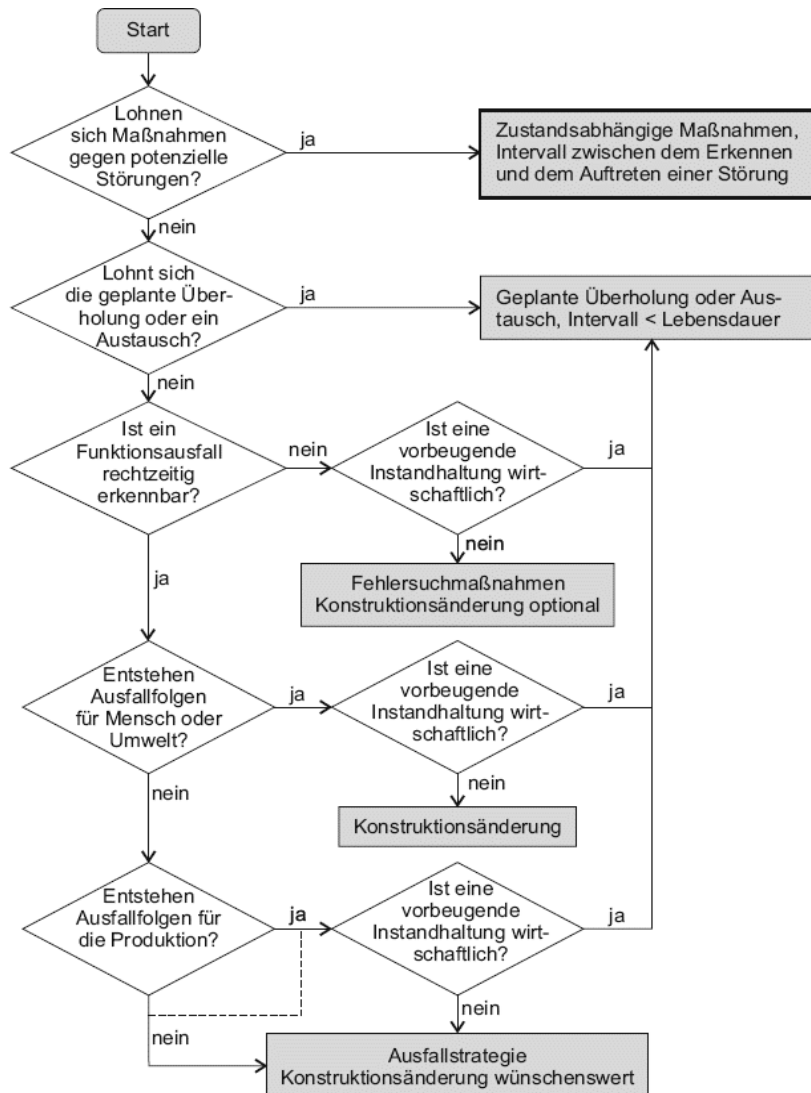


Abbildung 3: Vorgehensweise zur Auswahl der Strategie nach Moubray (Schenk 2010, p. 35)

Wie aus Abbildung 3 hervorgeht, kann es der Fall sein, dass keine der erwähnten Strategien in Frage kommen kann. Sollte dies der Fall sein, dann muss auf Standardmaßnahmen, wie Fehlersuchmaßnahmen, Konstruktionsänderung oder redundante Parallelanlagen, zurückgegriffen werden. Das Resultat der Analyse ist ein Konzept von Instandhaltungsstrategien, welche notwendige Instandhaltungstätigkeiten zur Erreichung der individuellen Ziele beschreiben.

Erhöhung der allgemeinen Sicherheit, Verbesserung des Umweltschutzes, höhere Produktivität durch besser Anlageneffizienz und verbesserte Rentabilität der Instandhaltung sind trotz individueller Vorgaben, Grundziele die es zu erreichen gilt.

(vgl. Matyas 2013, 132ff; Matyas 2002, 15f; Schenk 2010, 34f)

Tabelle 1: Strategien und ihre Anwendung (Matyas 2002, p. 15)

Instandhaltungsstrategie	Wann wird sie angewendet?
Ausfallstrategie	Nichtkritische Anlagen (Sicherheit, Umwelt, Auslastung) Kosten um Störungen zu entdecken oder zu verhindern sind höher als die Ausfallkosten
Zeitgesteuerte periodische Instandsetzung	Die Anlage hat ein gut dokumentiertes Ausfallverhalten. Zustand der Anlage ist nicht oder erst nach langwierigem Zerlegen erkennbar
Zustandsorientierte Instandhaltung	Die Anlage fällt zu nicht vorhersehbaren Zeitpunkten aus. Es besteht eine Möglichkeit, den Zustand der Anlage zu erfassen
Vorausschauende Instandhaltung	Das Ziel ist es, die Ausfallrate für eine vorgegebene Periode zu reduzieren
Redundanz oder Neukonstruktion	Kritische Anlagen, für die kein anderes Verfahren durchführbar ist

2.5 Prozess- / Zustandsüberwachung und Diagnose in der Instandhaltung

Wie in Kapitel 2.3.3 bereits angesprochen, bedient man sich zur Beurteilung des aktuellen Abnutzungsgrades von Komponenten der Methodik der technischen Diagnostik. Die heutige Fertigungstechnik ist nicht nur durch hohe Genauigkeit, sondern auch durch hohe Bearbeitungsgeschwindigkeiten gekennzeichnet. Die führt zu hohen Belastungen und in weiterer Folge zu Verschleißerscheinung an den Anlagenkomponenten. Aufgrund dieser Tatsachen ist es oft notwendig, die

Maßnahmen der Prozessüberwachung und Diagnostik zu nutzen, um Ausfälle zu vermeiden und eine effiziente Instandhaltungspolitik betreiben zu können.

Der Fokus liegt in diesem Kapitel auf der Zustandsüberwachung mittels Sensorik, die subjektive Überwachung durch den Menschen wird nicht weiter behandelt. Zu unterscheiden gehören die beiden Begriffe, Prozess- und Maschinenüberwachung. Im Falle der Prozessüberwachung bezieht man sich auf das Werkzeug und Werkstück, die Maschinenüberwachung beschäftigt sich mit den kritischen Maschinenkomponenten. Die Prozessüberwachung verfolgt das Ziel durch einhalten der Produktqualität eine hohe Prozesssicherheit zu erreichen und Störungen, wie z.B. Werkzeugbrüche, zu verhindern. Der Fokus der Maschinenüberwachung liegt auf den hochbelasteten kritischen Komponenten, diese Komponenten werden überwacht und fehlerhafte Funktionen sollen somit frühzeitig erkannt werden.

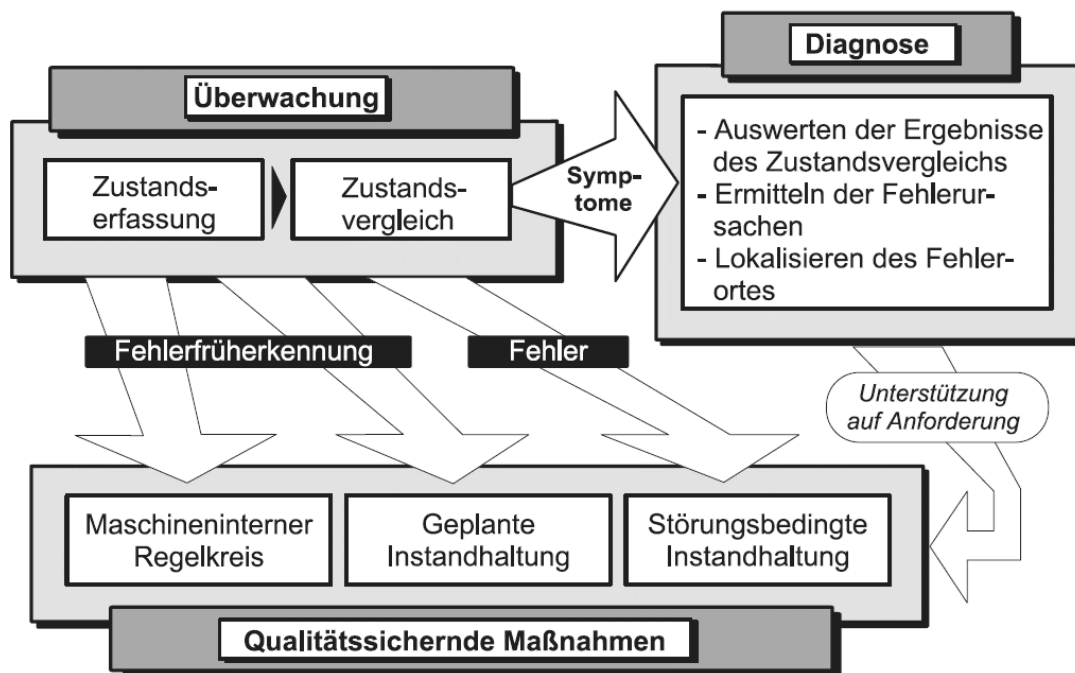


Abbildung 4: Überwachung und Diagnose in der Qualitätssicherung (Weck, Brecher 2006, p. 269)

Um eine ausreichende Prozesssicherheit und Maschinenverfügbarkeit zu gewährleisten bzw. diese zu verbessern kommen immer mehr automatisierte Überwachungs- und Diagnoseeinrichtungen zur Anwendung. Als Ziele der Diagnose werden folgende Punkte definiert.

(vgl. Weck, Brecher 2006, 267ff; Jardine et al. 2006)

Verfügbarkeit erhöhen (Wirtschaftlichkeit)

- Verringerung der Maschinenstillstandszeiten durch Fehlerbehebung und Wartung
- Zeitweise bedienungsloser Betrieb
- Verlegung der Wartung in Produktionsstillstandszeit

Produktqualität

- Sicherstellung gleichbleibenden Maschinenzustands
- Verbesserung der Maschinen- und Prozessfähigkeit
- Qualitätsregelung
- Verringerung von Nacharbeit und Ausschuss

Gesetze

- Verringerung der Gefährdung des Umfeldes
- Unterstützung des Maschinenarbeiters
- Warnung vor gefährlichen Maschinen- und Prozesszuständen
- Verbesserung der Arbeitsbedingungen durch Kompetenz vor Ort

(vgl. Matyas 2013, p. 121)

Das Überwachungs- und Diagnosesystem muss Prozessabläufe auf Abweichungen und Störungen untersuchen und im Falle von Abweichungen, den Prozess regeln. Des Weiteren müssen Störungen identifiziert, Fehlerart, -ort und -ursache ermittelt werden und dem Benutzer bei der Fehlerbehebung geholfen werden. Die Erfassung des Istzustands dient zu Erkennung von Abweichungen im Prozess und erfolgt über einen Zustandsvergleich mit einem, über Prozessparameter definierten, Sollzustand. Die Definition des Sollzustands erweist sich ab und zu als schwierig und kann oft erst durch Lernprozesse in der Einlaufphase gefunden werden.

Einige Störungseinflüsse können aufgrund wirtschaftlicher oder technischer Ursachen schlecht in eine Diagnose miteinbezogen werden. Deshalb gilt es vorweg eine Abschätzung der Machbarkeit, mit einer Analyse auf Fehlerquellen, durchzuführen.



Abbildung 5: Einflussgrößen und Zielgrößen der Diagnose (Matyas 2013, p. 124)

Dem Zustandsvergleich kommen zwei Aufgaben in der Überwachung zu, erstens die Überprüfung von Grenzwerten und zweitens die Kontrolle der zeitlichen Abläufe. Viele Parameter können als Grenzwerte genutzt werden, hier betrachtet man z.B. Kräfte, Drücke, Temperaturen, Schwingungen, Werkzeugwege und als Ergebnis erhält man Anhaltspunkte, die als Eingangsgröße für die Diagnose dienen. Im Anschluss kann die Diagnoseeinrichtung den Fehlerort lokalisieren, die Fehlerursache untersuchen und den Prozess bewerten. Damit erhält man eine Prozesszustandsbeschreibung, die zu einer frühzeitigen Erkennung von Fehlern und ihren Ursachen führt. Hinsichtlich dieser Tatsache können nötige Reparaturen, bezüglich Material und Personaleinsatz, besser geplant werden. Die Möglichkeit der Erkennung von Störungen und Fehlern in ihrer Entstehung ermöglicht es die Ausfallszeiten gering zu halten und folglich die Kosten zu reduzieren.

Oft besteht nicht die Möglichkeit der direkten Überwachung von Maschinenparametern, dann werden diese indirekt über die Auswirkung auf die Messgröße überwacht. Ein Beispiel dafür ist die Verschleißüberwachung, die in der Regel indirekt, über Kraft- oder Schwingungsmessungen etc., durchgeführt wird.

Nicht alle Überwachungsvorgänge, wie das Überwachen des Werkzeugverschleißes oder das Einhaltung von Toleranzen, müssen kontinuierlich erfolgen. Bei einigen Beobachtungen ist es ausreichend diese periodisch durchzuführen. Die kurzzeitperiodische Überwachung ist bei der Überwachung der Zentralschmierung ein Thema, langzeitperiodische Überwachung kann angewendet werden, wenn die Zustandsveränderungen langsam vor sich gehen (z.B. Verschleiß von Kugelrollspindeln, Lagervorspannung). Sporadisch anfallende Zustandsänderung bilden dabei auch eine eigene Gruppe der Überwachungsmöglichkeit, die Gruppe umfasst auch Störungen, die durch einen Crash entstanden sind und längere Ausfallzeiten umfassen.

(vgl. Weck, Brecher 2006, 269ff; Jardine et al. 2006; Matyas 2013, 121f)

2.5.1 Struktur des Überwachungssystems

Das Maschinenverhalten bzw. der Bearbeitungsprozess kann als physikalische Größe, mittels Sensorik erfasst und weiter verarbeitet werden. Die digitalisierten Signale werden bewertet, um entsprechende Reaktionen einleiten zu können. Die Unterteilung des Systems erfolgt anhand von Modulen, man spricht dabei vom Sensormodul, Überwachungsmodul, Reaktionsmodul und der Bedieneinheit. Im Sensormodul findet meist eine Vorverarbeitung der Signale statt, welche im Überwachungsmodul ausgewertet werden.

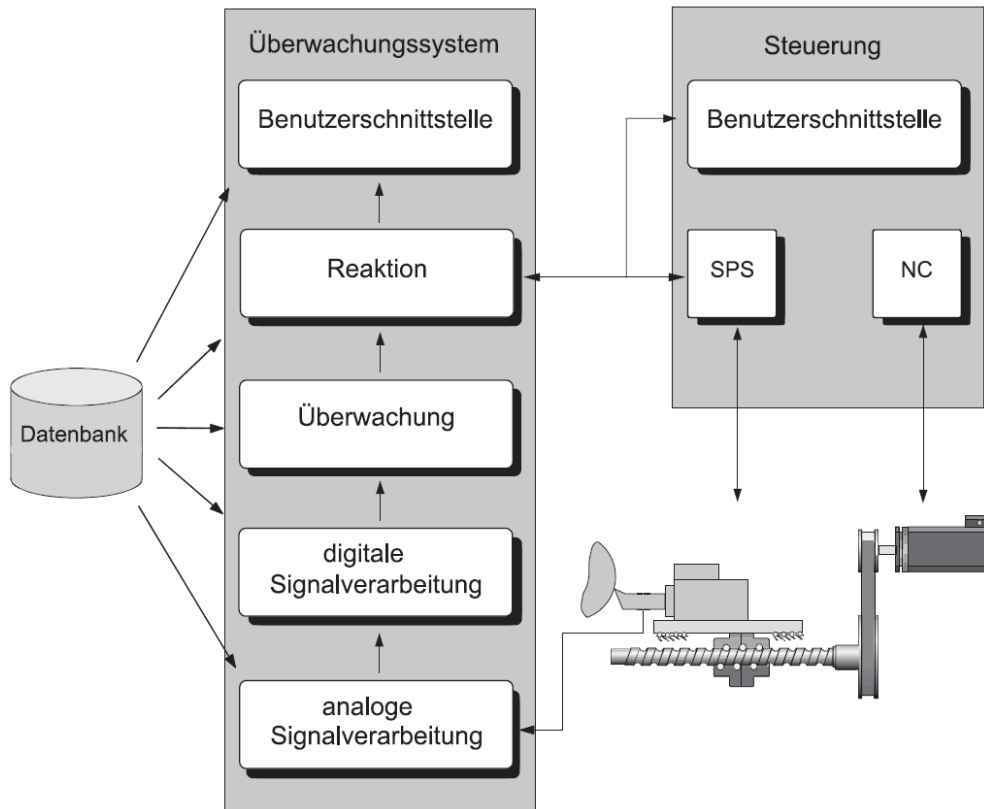


Abbildung 6: Informationsfluss einer Überwachungseinrichtung (Weck, Brecher 2006, 277f)

Prinzipiell gibt es zwei Möglichkeiten des Aufbaues einer Überwachungseinrichtung, eine Echtzeitüberwachung (siehe Abbildung 6) oder ein System mit einem tragbaren Datensammler und anschließender Auswertung der Daten. Der Aufbau der Messkette sieht jedoch prinzipiell gleich aus.

(vgl. Matyas 2013, p. 122; Weck, Brecher 2006, 277ff; Jardine et al. 2006)

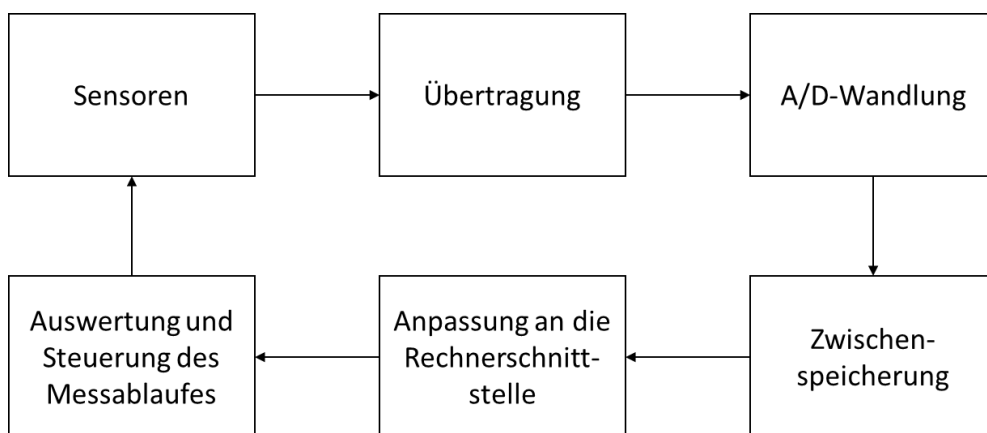


Abbildung 7: Aufbau Messkette (vgl. Matyas 2013, p. 122)

Offline Überwachung

Alle Signale werden mit einer Datenerfassungseinheit (Speicherkarte) aufgezeichnet und nach Abschluss des Messvorganges, am Computer ausgewertet. Bei der Offline Überwachung können die benötigten Sensoren nur temporär an dem zu überwachenden Objekt angebracht werden. Dies ist ab und zu bei der Überwachung mittels Beschleunigungssensoren der Fall. Hier werden die Sensoren mit Magneten angebracht und nach der Messung wieder entfernt. Diese Art der Überwachung ist für kontinuierliche und kurzperiodische Beobachtungen nicht geeignet.

Online (Echtzeit) Überwachung

Sensoren und Datenerfassungseinheit sind direkt vor Ort an der zu überwachenden Maschine installiert, die aufgezeichneten Signale werden z.B. über Netzwerk an den Computer, mit entsprechender Analyse-Software, weitergeleitet. In der Regel werden mit einem Online System gleich mehrere Komponenten überwacht, im Falle der Offline Überwachung erfolgt meist eine Überwachung einer Komponente. Zur Überwachung des Werkzeugverschleißes oder bei Komponenten, bei denen eine schnelle Abnutzung erwartet werden kann, ist solch eine Onlineüberwachung erforderlich.

Diese Arte der Überwachung kann auch als Ferndiagnose durchgeführt werden. Damit ist gemeint, dass ein spezialisierter Dienstleister, der nicht im Unternehmen ansässig ist, die Diagnoseaufgaben übernimmt. Typische Anwendungsfälle sind hier z.B.: Virtual und Augmented Reality Diagnose, Teleservice oder Videodiagnose.

Als Ziel, sowohl technologisch als auch wirtschaftlich, sollte bei der Wahl des richtigen Systems ein Minimum an Sensoren mit einem Maximum an zu überwachenden Komponenten definiert sein.

(vgl. Matyas 2013, p. 127f)

2.5.2 Überwachungstechniken

Die Daten die in einem Überwachungssystem gesammelt werden können, sind vielseitig. Es kann sich um akustische Daten, Daten der Ölanalyse, Temperatur, Druck und viele mehr handeln. Unterschieden werden diese charakteristischen Symptome in folgende Kategorien von Effekten.

Dynamische Effekte

Breitband-Vibrationsanalyse, Oktavbandanalyse, Echtzeitanalyse, Akustische Emission, Ultraschall-Leckprüfung

Temperatureffekte

Thermografie, Glasfaserthermografie, Indikatorfarben zur Temperaturmessung

Chemische Effekte

Spektrometrische Ölanalyse, Gaschromatografie, Flüssigkeitschromatografie, Fluoreszenz-Spektrografie, Ultraviolett- und Lichtspektroskopie, Dünnschichtaktivierung, elektrochemische Korrosionsüberwachung

Physikalische Effekte

Flüssigkeitsfarbtonpenetration, Untersuchung auf magnetische Partikel, Abziehbare Magnetfolie, Ultraschall-Pulsechotechnik, Ultraschall-Resonanztechnik, Wirbelstromprüfung, Röntgen-Durchstrahlungsprüfung, Starres Endoskop, Weitwinkel-Faseroptik usw.

Elektrische Effekte

Linear Polarisationswiderstand, Elektrischer Widerstand, Potentialüberwachung

Partikeleffekte

Ferrografie, Schrittweise Filtration, Magnetchip-Detektion, Röntgenfluoreszenz, Ölfleck-Test

(vgl. Matyas 2013, 127f; Jardine et al. 2006; Klocke, König 2008, p. 387)

2.5.3 Sensoren

Dehnungsmessungen

Dehnmessstreifen (DMS) messen Materialdehnungen an den Maschinenkomponenten, über den Zusammenhang des Hook'schen Gesetzes werden sie zur Kraftmessung eingesetzt. Der direkte Einsatz von DMS zur Kraftmessung ist oft nicht möglich, da die Dehnungen an modernen Maschinenstrukturen meist zu klein sind oder es zu aufwändig ist das Signal zu verstärken.

Piezoelektrische Kraftmesselemente

Sie beruhen auf der direkten Nutzung des piezoelektrischen Effekts, das bedeutet die mechanische Belastung der Struktur bewirkt eine Ladungsverschiebung, welche gemessen werden kann. Piezoelektrische Kraftmesselemente auf Quarzbasis verfügen über einen großen Temperaturbereich, hohe Steifigkeit, großen Messbereich, des Weiteren sind sehr kleine Dehnungen messbar. Ausführungsformen sind z.B., ein nach dem Schubeffekt wirkender Dehnungsaufnehmer, Querkraftmessdübel, Längskraftmessdübel. Messsensoren die eigentlich nur in der Forschung und Entwicklung eingesetzt werden sind die Kraftmessplattform und der „Rotierende Schnittkraftmesser“.

Strom- und Leistungsmessung

Jede Bewegung von Maschinenkomponenten erfordert eine Leistungserbringung, welche vom Antrieb aufgebracht werden muss. Kommt es zu Änderungen im überwachten Prozess, werden sich auch die Leistungen der Motoren ändern. Aufgrund dieser Änderungen der Leistung können Fehlerursachen und Störungen detektiert werden.

Steuerungsinterne Information

Bei Spindelantrieben, aber auch bei Vorschubmotoren können die steuerungsinternen Moment- und Stromwerte abgenommen werden. Dies setzt jedoch den Einsatz offener Steuerungen voraus. Ein wesentlicher Vorteil dieser Steuerungen ergibt sich aus dem Wegfall der externen Sensorik, jedoch muss es möglich sein, die Steuerung durch eigens programmierte Algorithmen zu erweitern.

Temperatursensoren

Berührende Temperatursensoren werden beispielsweise zur Überwachung der Schmiermitteltemperatur, bei Wälzlagern und elektronischen Leistungsschaltern eingesetzt. Eine weitere Überwachungstechnik, die heutzutage immer mehr Anwendung findet, ist die Überwachung mittels Thermografiekamera. Aus der Wärmeverteilung kann der Verschleiß von Maschinenkomponenten abgeleitet werden.

(vgl. Klocke, König 2008, 388ff; Weck, Brecher 2006, 282ff; Jardine et al. 2006)

Körperschall- und Beschleunigungssensoren

Diese Sensoren werden eingesetzt um Schwingungen im Bearbeitungsprozess oder von defekten Maschinenelementen, wie Wälzlagern, Zahnrädern, Wellen, usw., zu detektieren. Änderungen im Prozessablauf können durch Amplitudenveränderungen und Frequenzverschiebungen im Signal erkannt werden. Piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer haben aufgrund ihrer Linearität über große Frequenzbereiche einen hohen Stellenwert. Sie können an der bestehenden Maschinenstruktur angebracht werden, ohne dass große konstruktive Änderungen vorgenommen werden müssen. Einige Sensoren sind speziell für die rauen Betriebsbedingungen im Inneren von Werkzeugmaschinen geeignet und können, ohne dass Schäden an den Sensoren durch Kühlmittel, Öle oder Späne entstehen, angebracht werden (siehe Abbildung 8).

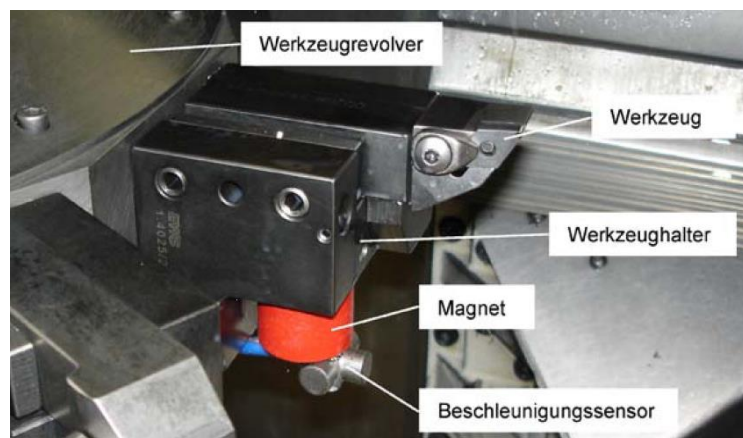


Abbildung 8: Beschleunigungssensor an Drehmeißel (Klocke, König 2008, p. 399)

Bei der Werkzeugzustandsüberwachung oder Zustandsüberwachung von Maschinenkomponenten, kommt es im Laufe der Zeit zu Verschleißerscheinungen, was zu einer Veränderung des Körperschall- und Luftschallsignals führt.

3. Grundlagen der Akustik

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den grundlegenden Definitionen der akustischen Größen und soll einen Überblick über die Themenbereiche der technischen Akustik verschaffen. Spezielle Aufmerksamkeit gilt den Messverfahren bzw. den Messgeräten und den Sensoren, deren Verständnis essentiell für die Durchführung dieser Arbeit ist.

3.1 Definition Schwingung

Eine Schwingung ist ein Prozess, bei dem sich eine betrachtete Größe $x(t)$ mit der Zeit ändert und sich in gewissem Maße immer wiederholt. Ein Spezialfall sind die periodischen Schwingungen. Hierbei kommt es zu einer kompletten Wiederholung des Verlaufes nach der Ablauf der Periodendauer τ .

$$x = x(t + \tau)$$

Formel 1: Schwingungsauslenkung

Aus der Periodendauer, auch Schwingungsdauer genannt, ergibt sich die Definition der Frequenz (f).

$$f = \frac{1}{\tau}$$

Formel 2: Frequenz

Eine weitere wichtige Größe in der Schwingungstechnik, bildet die Kreisfrequenz

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = \frac{2\pi}{\tau}$$

Formel 3: Kreisfrequenz

Die Amplitude bezeichnet den Maximalwert einer Schwingung während einer Schwingungsdauer. Dabei sollte diese nicht mit der Auslenkung verwechselt werden, welche den momentanen Wert der Schwingungsgröße angibt. Die Amplitude ist folglich ein Maß für die Stärke einer Schwingung und wird mit dem Formelzeichen \hat{x} angegeben.

(vgl. Kollmann et al. 2006, 2f)

3.2 Definition von Schall

Laut (Lerch et al. 2009, p. 1) bezeichnet man als Schall

„[...] mechanische Schwingungen eines elastischen Mediums, die sich in Gasen, Flüssigkeiten oder festen Körpern als Schallwellen ausbreiten. Die Akustik ist die Lehre vom Schall, von seinen Eigenschaften, seiner Entstehung und Ausbreitung, seiner Erzeugung und Wahrnehmung, seiner Messung und seiner Anwendungen. Schallereignisse werden insbesondere durch die Frequenz der Schallwelle charakterisiert.“

Tabelle 2: Frequenzbereiche (Lerch et al. 2009, p. 1)

Frequenzbereich	Bezeichnung
0-20Hz	Infraschall
20Hz-20kHz	Hörbereich
20kHz-1GHz	Ultraschall
1GHz-10THz	Hyperschall

Die Verknüpfung der Zustandsgrößen Druck, Temperatur und Dichte werden in den hydrodynamischen Grundgleichungen in Relation gesetzt. Dämpfungseffekte, wie innere Reibung, Wärmeleitungseffekte und molekulare Absorption beeinflussen die Ausbreitung des Schalls. Relevant ist das Verhalten von Schall beim Auftreffen auf Hindernisse und Begrenzungen, hier treten unterschiedliche Effekte, wie Reflexion, Beugung und Brechung, auf. Diese Erscheinungen haben einen wesentlichen Einfluss auf die Schallausbreitung.

Die Schallausbreitung in den verschiedenen Medien unterscheidet sich aufgrund der Tatsache, dass in festen Medien auch eine Formelastizität auftritt, in flüssigen und gasförmigen Medien rein Volumenelastizität. Neben den Schubkräften entstehen in Festkörpern auch Scherungen, Daher entstehen in Festkörpern zusätzlich zu den Longitudinalwellen auch Transversalwellen.

Jegliche Maschinen erzeugen Schall. Der Ort der Schallentstehung wird als Schallemissionsstelle bezeichnet, dieser Schall wird durch Moleküle an seine Einwirkstelle, den Immissionsort, übertragen. Der Weg zwischen Emissionsstelle und Immissionsort wird Übertragungsweg genannt. (vgl. Lerch et al. 2009, 1f)

3.3 Zustandsgrößen und Schallfeldgrößen

Die Abweichungen von den Zustandsgrößen (Druck, Dichte und Geschwindigkeit) zu ihren Ruhewerten werden als Schalldruck, -dichte und -schnelle bezeichnet. Zusammenfassend werden diese Größen als Schallfeldgrößen bezeichnet, da diese die Struktur des schallerfüllten Raumes beschreiben.

Eine Vielzahl von akustischen Untersuchungen basiert auf der Grundlage der Schalldruckmessung, über die Krafteinwirkung auf eine bekannte Fläche.

Die Schnellebestimmung ist ebenfalls mit geeigneten Wandlern möglich, jedoch nur mit Einschränkungen, da diese leicht durch Störungen beeinflusst werden kann. Weitere wichtige Kenngrößen sind der Schallfluss q und die Schallintensität I .

$$q = \vec{v} \cdot \vec{A}$$

Formel 4: Schallfluss

Der Schallfluss ist das Produkt aus Schallschnelle und der durchströmten gerichteten Fläche A .

$$\vec{I} = p \cdot \vec{v}$$

Formel 5: Schallintensität

Aus der Schallintensität kann in weiterer Folge die Schallleistung P errechnet werden.

$$P = \int_A I \cdot dA$$

Formel 6: Schallleistung

Die Schallleistung und -intensität werden aus Produkten der akustischen Feldgrößen berechnet. Sie werden als Energiegrößen bezeichnet und beschreiben den Energietransport im Schallfeld.

Der Druck wird in Pa (Pascal), die Geschwindigkeit in ms^{-1} , die Dichte in kgm^{-3} , die Temperatur in K (Kelvin) und die Ortsänderung in m angegeben.

Durch Angabe von Wechseldruck und Schnelle zu jeder Zeit und an jeder Stelle des Mediums wird das Schallfeld eindeutig definiert. Ein räumliches Wellenfeld ist durch Ausbreitung der Schallfeldgrößen in alle Richtungen charakterisiert.

In einem ebenen Wellenfeld findet die Ausbreitung nur in eine Richtung statt. Alle Feldgrößen, senkrecht zur Ausbreitungsrichtung, sind konstant. Die Schallschnelle beschreibt die Wechselgeschwindigkeit, mit der Medienteilchen um ihre Ruhelage schwingen und ist keinesfalls mit der Schallgeschwindigkeit c zu verwechseln. Diese beschreibt die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls (in m/s) und ist vom Medium und der Temperatur abhängig.

(vgl. Henn et al. 2008, 5ff; Lerch et al. 2009, 7ff)

3.4 Pegelgrößen

Da der Wert des Schalldruckes, welcher gerade noch wahrnehmbar ist, und der Wert der Schmerzgrenze um einige Zehnerpotenzen abweichen, kommt es zur Einführung logarithmischer Verhältnisgrößen. Da auch das menschliche Hörempfinden einer logarithmischen Skala ähnelt, ist die Verwendung des Pegelmaßes durchaus sinnvoll. Schalldruck-, Schallschnelle-, und Schalleistungspegel werden mit der Einheit Dezibel (dB) angegeben.

$$L_I = 10 \lg \frac{I}{I_0}$$

$$I_0 = 10^{-12} \text{ Wm}^{-2} \dots \text{Bezugsintensität}$$

Formel 7: Schallintensitätspegel

$$L_p = 20 \lg \frac{p}{p_0}$$

$$p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \dots \text{Bezugsdruck für Luft}$$

Formel 8: Schalldruckpegel

$$L_W = 10 \lg \frac{P}{P_0}$$

$$P_0 = 10^{-12} \text{ W} \dots \text{Bezugsleistung}$$

Formel 9: Schalleistungspegel

Der kleinste Schalldruck, welcher bei einer bestimmten Frequenz gerade noch wahrgenommen werden kann, charakterisiert die Hörschwelle eines gesunden menschlichen Gehörs. Die obere Grenze heißt Schmerzgrenze, da bei Überschreitung eines gewissen Schalldruckpegels, dieser als schmerzhaft empfunden

den wird. Kommt es zu einer Überlagerung von mehreren Schallfeldern, von unabhängigen Schallquellen, so sind die Energiedichten der einzelnen Schallfelder zu addieren.

$$L_{p_{ges}} = 10 \lg \sum_{v=1}^n \left(\frac{p_v}{p_0} \right)^2 \dots \text{dB}$$

Formel 10: Gesamtschalldruckpegel

Sind die Pegel zweier Schallquellen gleich groß, so ergibt sich eine Erhöhung des Gesamtschalldruckpegels um 3dB gegenüber dem Einzelpegel.

Bei ungleichen Pegeln von zwei Schallquellen ist die Differenz der beiden Schalldruckpegel und der Pegel der stärkeren Schallquelle ausschlaggebend. Die Werte, die der stärkeren Schallquelle aufzuaddieren sind, können einem sogenannten Nomogramm entnommen werden.

(vgl. Henn et al. 2008, p. 70; Siart 2014)

3.4.1 Bewertung von Schalldruckpegel

In der DIN 45634 werden Bewertungskurven des Schalldruckpegels, die die Empfindlichkeit des menschlichen Ohres nachahmen sollen, definiert (A-,B-,C-Bewertungskurven).

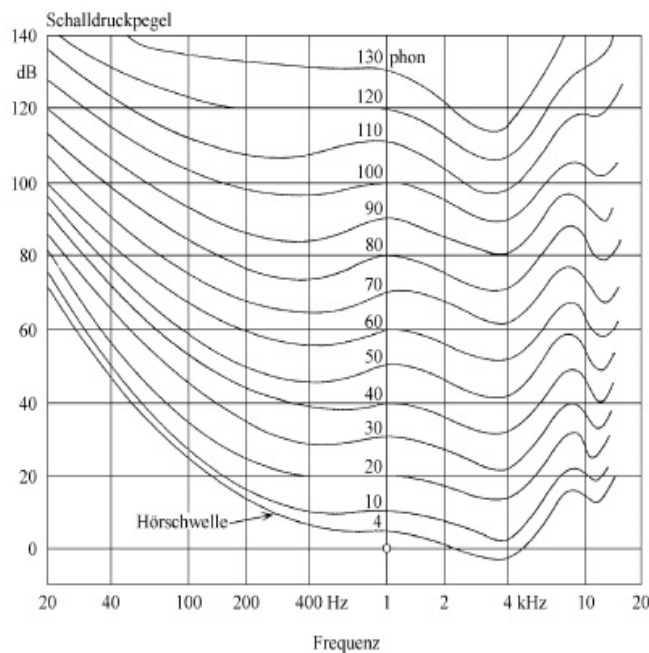


Abbildung 11: Phon in Relation zum Schalldruckpegel und der Frequenz (Lerch et al. 2009, p. 485)

Bewertungskurven). Die Empfindung der Lautstärke ist subjektiv. Es hängt vom Menschen und von der Frequenz ab, wie die Lautstärke empfunden wird.

Phon ist dabei die Einheit des Lautstärkepegels (empfundene Lautstärke), welcher eine psychoakustische Größe widerspiegelt. Die Kurven konstanter Phonwerte, werden als Isophonen bezeichnet. Schalldrücke von Sinustönen unterschiedlicher Frequenzen, welche als

gleich laut wahrgenommen werden, liegen also auf einer Kurve gleicher Lautstärke. Bei diesen A-,B-,C-Bewertungsfiltern findet eine frequenzabhängige Abschwächung statt, deshalb kann der Verlauf der Kurven gleicher Lautstärke nur approximiert werden. Unter Verwendung der Bewertungsfilter können die bewerteten Schalldruckpegel bestimmt werden, am häufigsten im Einsatz ist die A-Bewertungskurve. Hier wird der bewertete Schalldruckpegel mit einem zusätzlichen „A“ angegeben, „dB(A)“. (vgl. Lerch et al. 2009, 484ff)

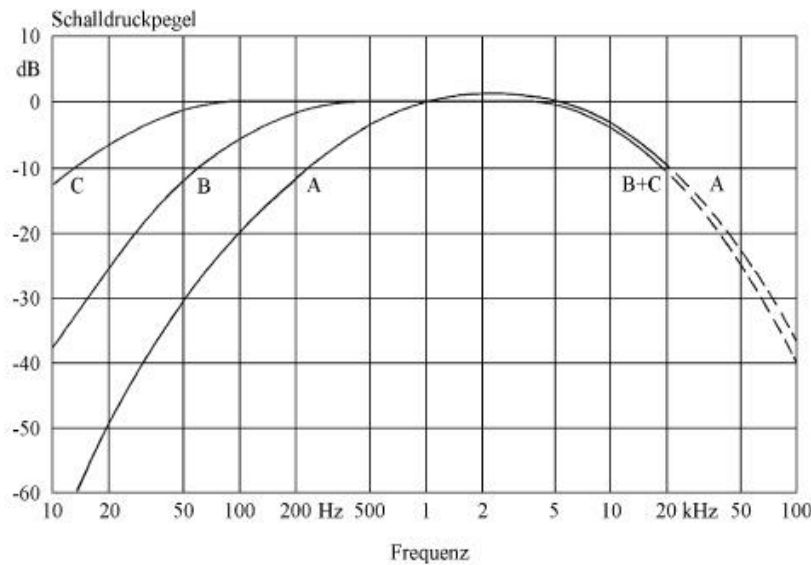





Abbildung 12: gerichtete Bewertung des Schalldruckpegels (Lerch et al. 2009, p. 484)

Eine konstante Schallpegeländerung wirkt sich unterschiedlich auf die Faktoren der Lautstärke, des Schalldruckes und der Schallintensität aus. Eine Pegeländerung (siehe Abbildung 13) um +10dB bewirkt eine Verdoppelung der Lautstärkenwahrnehmung. Eine Änderung von +6dB kennzeichnet eine Verdoppelung des Schalldruckes und eine Erhöhung um 3dB entspricht der doppelten Schallintensität.

Pegeländerung	Lautstärke Wahrnehmung	Schalldruck Wirkung	Schallintensität Ursache
			
Dezibel	Lautheits-Faktor	Schallfeld-Faktor	Schallenergie-Faktor
+ 20 dB	4,000	10,000	100,000
+ 10 dB	2,000 •	3,160	10,000
+ 6 dB	1,516	2,000 •	4,000
+ 3 dB	1,232	1,414	2,000 •
± 0 dB	1,000	1,000	1,000
- 3 dB	0,812	0,707	0,500 •
- 6 dB	0,660	0,500 •	0,250
- 10 dB	0,500 •	0,316	0,100
- 20 dB	0,250	0,100	0,010

(vgl. Sengpiel 2014; Amt für Umweltschutz 2017)

Abbildung 13: Vergleich Pegeländerung mit Lautstärke-, Schalldruck- und Schallintensitätsfaktor (Sengpiel 2014)

3.5 Schallentstehung

Schallentstehungsmechanismen

„Schall entsteht überall dort, wo die Energieübertragung bzw. Energieumwandlung zeitlich begrenzt abläuft.“ (Henn et al. 2008, p. 85)

Die Amplitude des erzeugten Schalles wird durch die umgesetzte Energie definiert (Schallstärke). Die benötigte Zeit zur Umsetzung der Energie definiert den Frequenzinhalt des Schalles (Tonlage).

Die Unterteilung erfolgt in zwei Arten:

Primärer Luftschall

Entsteht durch Strömungsvorgänge, dabei werden die Luftmoleküle zum Schwingen angeregt. Eine direkte Verbindung zwischen Strömungsgebiet und Umgebung ist notwendig. (Beispiele: Ventilator, Blasinstrumente etc.)

Sekundärer Luft- oder Körperschall

Diese Art der Schallentstehung wird auch indirekte Schallentstehung genannt und durch Körperschallabstrahlung von Bauteilstrukturen hervorgerufen. Die Bauteilstruktur wird durch Wechselkräfte angeregt und beginnt zu schwingen. Diese Schwingungen werden als Körperschall abgestrahlt.

Die indirekte Schallentstehung kann in zwei Erregergruppen eingeteilt werden, die Krafterregung und die Geschwindigkeitserregung. Die Erregerarten werden bezüglich des Kraftflusses unterschieden, bei der Krafterregung liegen die Komponenten innerhalb des Kraftflusses, bei der Geschwindigkeitserregung nicht.

Die Schallemissionen von Maschinen sind meist eine Kombination aus direkter und indirekter Schallentstehung. Die gesamte Geräuschentwicklung ergibt sich aus der Summe der beiden Einzelwerte.

(vgl. Henn et al. 2008, 85f; Grote, Feldhusen 2001, O 29)

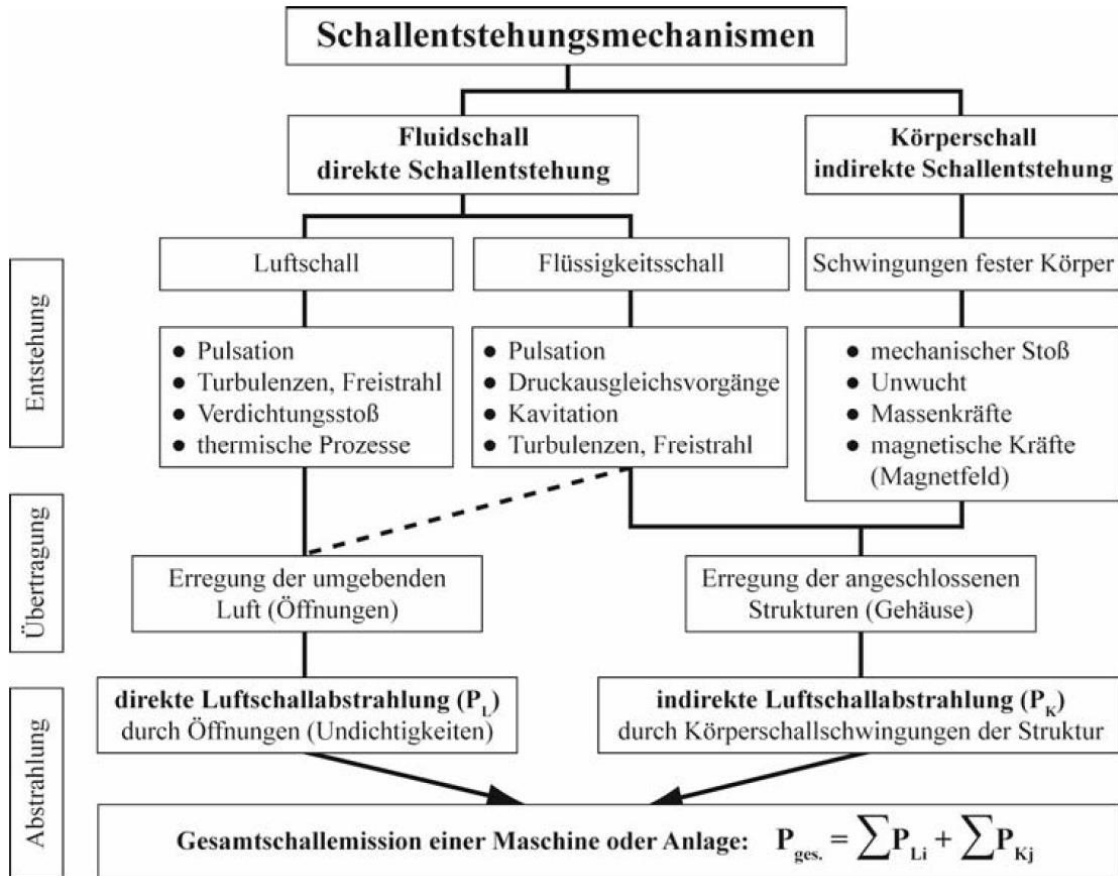


Abbildung 14: Schallentstehungsmechanismen (Henn et al. 2008, p. 86)

3.5.1 Technische Geräuschentwicklung

Die Analyse der einzelnen Geräuschquellen ist bei Produktionsmaschinen aus mehreren Gründen notwendig. Zum einen wenn die Maschine akustisch überwacht werden sollte, müssen Einflussgeräusche detektiert und anschließend gefiltert werden. Zum anderen wenn geräuschmindernde Maßnahmen in der lärmarmen Konstruktion gefordert sind.

Ursachen der Körperschallentwicklung nach Henn et al. (2008)

Die Entstehung des Körperschalles findet in den elastischen Strukturen der Maschine statt. Diese Schwingungen liegen im Wahrnehmungsbereich des Menschen und werden, unter anderem an die angrenzenden Strukturen, weitergeleitet. Jedoch werden diese Schwingungsanregungen erst hörbar, wenn der Schall in Form von Luftschall, an die Umgebung abgestrahlt wird. Bei der Messung des Körperschalles kann der Einfluss von Luftdruck- und Temperaturunterschieden vernachlässigt werden, da die Abweichung nicht allzu groß ist und ebenso das

Abstrahlmaß mit einer höheren Unsicherheit behaftet ist. Mit geeigneten Körperschallsensoren können diese Schwingungen detektiert werden, bevorzugt gemessen wird dabei die Körperschallbeschleunigung. Durch Integration kann die Körperschallschnelle bzw. der Schwingweg berechnet, sowie ausgegeben werden.

Stoß- und Schlaganregung

Beschreibt eine kurzzeitige Einwirkung von Kräften an begrenzten Strukturbereichen, welche einmal auftreten kann oder sich in längeren Abständen wiederholt.

Periodische Anregung

Diese Art der Anregung ist meist auf Trägheitskräfte zurückzuführen.

Stochastische Anregung

Sie tritt beim Abrollen zweier Flächen relativ zueinander auf, welche mit einer äußeren Kraft beaufschlagt werden. Es kommt zur Bildung von Wechselkräften, die eine Körperschallanregung in die anliegenden Strukturen verursachen.

Ursachen der Fluidschallentwicklung nach Henn et al. (2008)

Die zweite Hauptgruppe der technischen Geräusche bildet der Fluidschall bzw. die Strömungsgeräusche. Bei reiner Betrachtung von Luftschall, kann die Luft von unterschiedlichen Mechanismen zu Bewegungen angeregt werden, wobei in weiterer Folge Druckschwankungen entstehen. Diese Druckschwankungen setzen sich mit Schallgeschwindigkeit fort und werden als Luftschall wahrgenommen, wenn ihre Frequenzen im Hörbereich liegen.

Aeropulsive Geräusche

Diese Art der Geräusche entsteht durch Verdrängung, was zu einem Wechseldruck in der Luft führt. In der Folge entstehen Druckschwankungen, welche sich mit Schallgeschwindigkeit fortpflanzen.

Wirbelbildung

Bei der Umströmung von Hindernissen entstehen, aufgrund der Wirbelbildungen, Geräusche mit Dipolcharakter. Dabei kann es zu Geschwindigkeits- und Druckschwankungen in der Wirbelzone kommen. Diese Druckschwankungen breiten sich mit Schallgeschwindigkeit aus und werden als Geräusche wahrgenommen werden.

Freistrah

Strahlt die Luft aus einer Öffnung in einen Raum, in dem die Luft in Ruhe ist, erfolgt einer Vermischung von Luftbereichen mit stark unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Es entwickeln sich Wirbel unterschiedlicher Größe und es kommt zu Druckschwankungen. Durch die Ausbreitung mit Schallgeschwindigkeit in der Luft, kommt es zur Entstehung von breitbandigen Geräusch.

Turbulente Grenzschichten

Grund für die Entstehung sind kleine Turbulenzballen, welche in der Grenzschicht zerfallen und sich wieder aufbauen. Dies führt zu Impulsstößen und daraus resultierenden Druckschwankungen.

(vgl. Henn et al. 2008, 166ff)

3.6 Grundlagen der Messtechnik

Bereits vor der Durchführung akustischer Messungen muss eine klar definierte Aufgabenstellung formuliert sein und ebenso muss das Ziel der Messung bereits bekannt sein. Nur so wird der richtige Einsatz der Messtechnik gewährleistet. Messgrößen sind zeit- und frequenzabhängig, sie werden in skalare und vektorielle Messgrößen eingeteilt. (vgl. Kollmann et al. 2006, p. 180)

3.6.1 Die akustische Messkette

Der Aufbau der Messkette soll in Abbildung 15 aufgezeigt werden und sieht in der Regel für alle Messungen gleich aus.

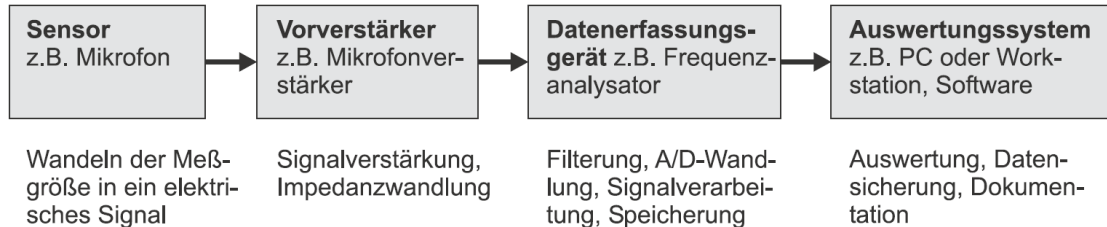


Abbildung 15: akustische Messkette (Kollmann et al. 2006, p. 183)

Sensor

Dient der Erfassung der zu messenden Größe. Das Ausgangssignal ist ein elektrisches Signal, welches zur gemessenen Größe proportional ist.

Vorverstärker

Dient neben der Signalverstärkung auch noch der Impedanzanpassung an das Datenerfassungsgerät. Oft ist der Vorverstärker im Sensor selbst verbaut, er kann auch ein eigenständiges Gerät sein oder in der Datenerfassungseinheit verbaut sein.

Datenerfassungseinheit und Auswertesystem

Ist üblicherweise ein Frequenzanalysator oder ein Digital-Datenrecorder. In beiden Fällen umfasst die Einheit mehrere Filter (analoger Tiefpass- oder Bandpassfilter, Digitalfilter), sowie einen AD-Wandler. Hier kann bereits eine interne Signalverarbeitung (FFT oder ähnliches) durchgeführt werden. Die gesammelten Daten können direkt an das Auswertesystem (PC) übermittelt oder auf einem Speichermedium abgespeichert werden. Am PC werden die benötigten Daten gespeichert und analysiert.

(vgl. Kollmann et al. 2006, 180ff)

3.7 Körperschall – Messtechnik

Als Körperschall werden Schwingungen im Wahrnehmungsbereich des menschlichen Gehörs bezeichnet, welche sich in Festkörpern ausbreiten.

Die Entstehung des Körperschalls, in der Maschinenakustik, kann viele Ursachen haben. Motoren, Werkzeugmaschinen, Pumpen usw. sind nur einige Beispiele. Die Erfassung der auftretenden Schwingungen sind vor allem für die Bereiche Geräuschbekämpfung, lärmarme Konstruktionen, Materialuntersuchungen, Zustandsüberwachung von Maschinen relevant. (Michael Möser 2010, p. 427)

3.7.1 Messgrößen

Für die Messtechnik sind die Bewegungsgrößen Auslenkung (Schwingweg in m), Schnelle (Schwinggeschwindigkeit in m/s) und Beschleunigung (in m/s^2) von Bedeutung. *„Diese drei Größen haben ihren direkten Bezug zu den drei Grundelementen aller mechanischer Strukturen, nämlich Feder, Dämpfer und Masse.“*

(Michael Möser 2010, p. 428)

Kommt es zu einer Kraftauswirkung auf das Feder-Dämpfer-Masse System, so reagiert die Feder mit einer gewissen Auslenkung, die Masse mit einer Beschleunigung und der Dämpfer mit einer Schnelle. Durch Differenzieren des Schwingweges nach der Zeit t , erhält man die Schwinggeschwindigkeit, bei zweifacher Differenzierung die Beschleunigung.

(vgl. Michael Möser 2010, 427ff)

3.7.2 Messgeräte

Wandler (Körperschallsensoren) im Allgemeinen dienen zur Umwandlung von mechanischen Schwingungen und elektrische Signale. Es gibt eine Vielzahl von unterschiedlichen Wandlerprinzipien, genauer erläutert werden nur Wandler die für die Arbeit von Relevanz sind.

Tabelle 3: Messgeräte Körperschall

Wandlerprinzip	Bezeichnung des Wandlers
Auslenkungswandler	Mechanischer Taster
	Wirbelstromwandler
Schwingschnellewandler	Elektrodynamischer und -magnetischer Wandler
	Laser-Doppler Vibrometer
Beschleunigungswandler	Elektromagnetischer Wandler
	Piezoelektrischer Wandler
	Kapazitiver Wandler
	Piezoresistiver Wandler

Beschleunigungssensor - Piezoelektrischer Wandler

Zur Erfassung von Körperschallschwingungen wird in den meisten Fällen die Beschleunigung gemessen. Die verwendeten Sensoren beruhen auf dem piezoelektrischen Prinzip.

„Darunter versteht man die Eigenschaft bestimmter Kristalle bei gerichteter Verformung ihres Atomgitters durch eine dynamische Kraft nach außen ableitbare elektrische Ladungsverschiebung zu erzeugen, [...]“

(Michael Möser 2010, p. 441)

Den piezoelektrischen Beschleunigungssensor zeichnen ein weiter Frequenz- und Dynamikbereich, gute Linearitätseigenschaft, ein flacher Frequenzgang, eine robuste Bauform, kompakte Abmessungen und ein günstiges Preis – Leistungsverhältnis gegenüber anderen Bauformen aus. Piezoelektrische Körperschallsensoren verfügen über einen linearen Kraft-Ladungszusammenhang.

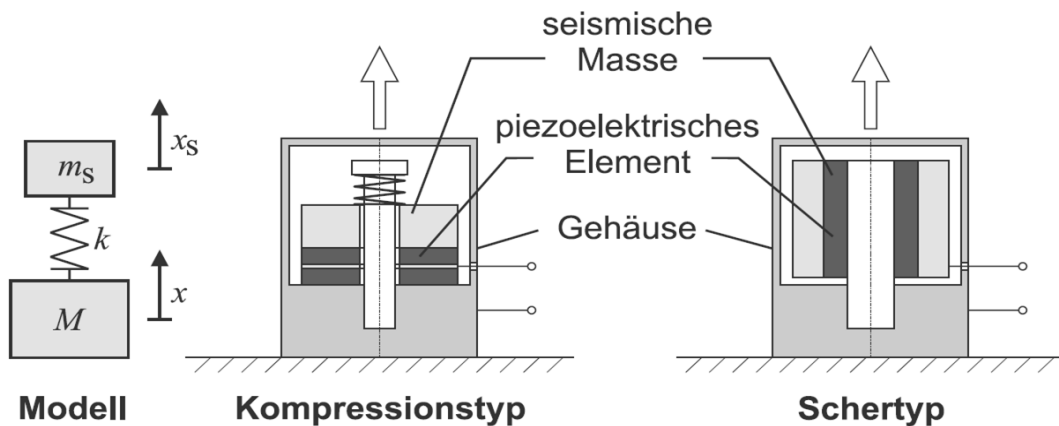


Abbildung 16: Bauformen der piezoelektrischen Körperschallsensoren (Kollmann et al. 2006, p. 192)

Dies gilt sowohl bei Druckverformungen, als auch bei Scherverformungen, wenn die Polarisationsrichtung des Kristalls beachtet wird. Im Inneren des Sensors befindet sich eine seismische Masse, welche über das piezoelektrische Element mit dem Gehäuse verbunden ist.

Das piezoelektrische Element wirkt dabei als steife Feder. Kommt es zur Beschleunigung des Sensorgehäuses wirkt, aufgrund der Trägheit der seismischen Masse, eine Kraft auf das Element. Diese ist der Beschleunigung und somit der erzeugten Ladung proportional (im Arbeitsfrequenzbereich des Sensors).

(vgl. Michael Möser 2010, p. 427; Kollmann et al. 2006, p. 191)

IEPE Technik bei Beschleunigungssensoren

Mit dieser Spannungsaufbereitungstechnik ist es möglich Signale über große Distanzen störungsfrei und niederohmig zu übertragen. Dazu werden spezielle Sensoren verwendet, die über eine integrierte Mikroelektronik verfügen. Jedoch ist die Stromversorgung der Sensorelektronik nachteilhaft. In Datenblättern werden Sensoren, die auf diesem Prinzip beruhen auch ICP[®] (Integrated Circuit Piezoelectric), Deltratron[®], Isotron[®] und Piezotron[®] genannt.

Als weiteren Nachteil kann das Eigenrauschen der Elektronik angesehen werden, sowie eine nach oben hin begrenzte Betriebstemperatur von 125°C.

Die Anschaffungskosten eines Sensors sind gering, was beim Einsatz von vielen Sensoren eine wesentliche Rolle spielt. Sie verfügen meist über nur eine Messrichtung, sind gegenüber Beschleunigungen, orthogonal zur Messrichtung, unempfindlich. Triaxiale Sensoren hingegen können ebenso in zwei weiteren Achsen, normal zur Messrichtung, Beschleunigungen aufnehmen. Diese kommen dann zur Anwendung, wenn die Schwingform des Messobjektes relevant ist. Vorteilhaft gegenüber drei einzelnen Sensoren ist, dass triaxiale Sensoren einen geringeren Masseinfluss verursachen.

(vgl. Michael Möser 2010, 449ff; Weber 2009)

3.7.3 Vorverstärker

Am Ausgang des Sensors ist das Signal sehr hochohmig und dadurch sehr empfindlich gegenüber Störsignalen. Der Vorverstärker wandelt dieses hochohmige Signal in ein niederohmiges, bevor das Signal in die Datenerfassungseinheit weitergeleitet wird. Vorverstärker werden nach ihrer Bauform kategorisiert:

Ladungsverstärker

Hier wird der Beschleunigungssensor über ein speziell abgeschirmtes Übertragungskabel mit dem hochohmigen Ladungseingang des Verstärkers verbunden. Dieses Verbindungskabel sollte relativ kurz sein, ansonsten kommt es hierbei zu Störungseinflüssen. Betrachtet werden diese Vorverstärker als externe Geräte, zusätzlich gibt es auch die Bauform, in denen der Ladungsverstärker am Eingang der Datenerfassungseinheit verbaut ist. Der Vorteil dieses verbauten Ladungsverstärkers ist die kompakte Messkette, jedoch ist man in der Kabellänge begrenzt.

Integrierter Verstärker

Hier findet sich der Vorverstärker im Gehäuse des Beschleunigungssensors wieder. Diese Bauart ist weniger empfindlich gegenüber Störsignalen und die Sensoren können direkt über Koaxialkabel mit der Datenerfassungseinheit verbunden werden. Über die Verbindung mit den Koaxialkabeln wird der Vorverstärker zugleich mit Strom versorgt.

(vgl. Kollmann et al. 2006, 194f)

3.7.4 Eigenschaften der Sensoren

Diese Eigenschaften sind zu beachten, um den richtigen Sensor für die geforderten Anwendungen auszuwählen.

Übertragungsfaktor

Er ist ein Maß für die Empfindlichkeit des Sensors. Die Bauform und die Größe der seismischen Masse sind ausschlaggebend für die Größe des Übertragungsfaktors. Je größer die seismische Masse, desto größer der Übertragungsfaktor, jedoch ist die Resonanzfrequenz umso kleiner.

Frequenzgang

Der Frequenzgang kennzeichnet die Frequenzabhängigkeit des Übertragungsfaktors.

Arbeitsfrequenz- und Dynamikbereich

Kollmann et al. (2006, p. 198) definiert den Arbeitsfrequenzbereich wie folgt:

„Die Grenzen des Arbeitsfrequenzbereiches werden in Abhängigkeit der zulässigen Abweichung des Amplitudenganges vom Übertragungsfaktor bestimmt.“

Zulässige Abweichungen werden mit einem bestimmten \pm Bereich angegeben.

Querempfindlichkeit

Empfindlichkeiten senkrecht zur Messrichtung sind bei Beschleunigungssensoren unerwünscht. In der Realität besitzen sie jedoch eine gewisse Querempfindlichkeit.

(vgl. Kollmann et al. 2006, 195ff)

3.7.5 Ankoppelung von Sensoren

Bei der Montage der Sensoren an dem Messobjekt, kann es zu einer Rückwirkung auf den Sensor kommen. Dies führt zu Messfehlern und beeinflusst das Messergebnis. Im folgenden Text werden nur die relevanten Einflüsse behandelt, die auch im Rahmen der Versuche beachtet werden mussten.

Mechanische Einflüsse

Die Oberfläche an der der Sensor montiert werden soll, hat einen großen Einfluss auf die gemessenen Signale, deshalb sollte die Montagefläche sauber sein. Wölbungen und starke Rauigkeiten können zu Ungenauigkeiten und zu Messfehlern führen. Der Übertragungsweg zwischen Erregerquelle und Messstelle sollte kurz sein und über eine steife Struktur verfügen.

Zur Befestigung der Beschleunigungssensoren gibt es unterschiedliche Montagemöglichkeiten, wünschenswert ist eine möglichst steife Verbindung zwischen Sensor und Messobjekt. Die Verbindungsstelle kann als Federsteife angesehen werden, bei relativ elastischer Verbindung kann es dazu kommen, dass Beschleunigungen gedämpft werden. Durch eine feste Schraubverbindung kann der

Frequenzbereich des Sensors so gut wie möglich ausgenutzt werden, oft ist diese Montageart aus verschiedenen Gründen nicht immer möglich. Ist dies der Fall, sollte man einen möglichst starren Kleber verwenden, damit der Frequenzbereich nicht zu stark eingeschränkt wird.

Die Rückwirkung des Sensors auf die zu untersuchende Struktur sollte ebenso untersucht werden, denn bei Strukturen, die nicht über ausreichende Steifigkeit verfügen, kann das Eigengewicht des Sensors die Struktur beeinflussen.

Elektrische Einflüsse

Wird ein Koaxialkabel Biegungen, Druck oder mechanischen Spannungen ausgesetzt, kann dies zu Kapazitätsänderungen führen, was zu Fehlmessungen führt. Ein zweites Verhalten, welches vermieden werden sollte, ist die Übertragung von Biegekräften über den Anschlussstecker zum Piezoelement. Eine ordnungsgemäße Verlegung und Führung der Kabel ist folglich ein wichtiger Faktor beim Messaufbau.

Beim sogenannten Netzbrummen, kann durch Erdung an mehreren Punkten ein Potentialunterschied auftreten. Um dies zu vermeiden, müssen die Sensoren, Verstärker und auch die Verkabelung vom Messobjekt elektrisch isoliert werden.

(vgl. Michael Möser 2010, 458ff; Kollmann et al. 2006, 207ff)

3.8 Luftschall – Messtechnik

Schallwellen, welche sich in der Luft ausbreiten und im engeren Sinne auf den Wahrnehmungsbereich des menschlichen Gehörs beschränkt sind, werden als Luftschall bezeichnet. Der Normalenvektor der Schallschnelle an der Oberfläche des Messobjektes führt zur Abstrahlung des Luftschalles, dieses abgestrahlte Schallfeld kann durch Messungen des Schalldruckes erfasst werden.

(vgl. Lexikon - Luftschall 2017)

3.8.1 Luftschallsensoren

Am häufigsten im Einsatz befinden sich bei der Luftschallmessung sogenannte Druckmikrofone, welche den Schalldruck in ein proportionales elektrisches Signal, zur Weiterverarbeitung, umwandeln. Abgeleitet aus der Art der Umwandlung werden die Mikrofone auch als elektroakustischer Wandler bezeichnet. Zuerst wird die Energie des Luftschalls in mechanische Energie umgewandelt, dies erfolgt durch Druckbeaufschlagung einer Membran, die in Schwingung versetzt wird. Im Anschluss erfolgt die Umwandlung der mechanischen Energie in elektrische, die Art der Umwandlung hängt von Aufbau des Mikrophones ab. Tabelle 4 soll einen Überblick über die Bauformen von Elektroakustischen Wandlern vermitteln. Dabei stellen das Kondensatormikrofon und das Elektretmikrofon die wichtigsten Wandler dar. (vgl. Michael Möser 2010, 14ff; Kollmann et al. 2006, 184ff)

Tabelle 4: Aufbauarten Elektrodynamischer Wandler (Hering Ekbert et al. 2009, p. 260)

Elektroakustischer Wandler	Technische Ausführung	Anwendungsbereich
Elektrostatisch	Kondensatormikrofon	Schallpegelmesser, Studiomikrofon, Ansteckmikrofon, Handmikrofon
	Elektretmikrofon	
	Speziallautsprecher	
Elektrodynamisch (Schwingspule)	Tauchspulenmikrofon	Studiorichtmikrofon, Handmikrofon, Kopfhörer
	Lautsprecher	
Elektrodynamisch (Bändchen)	Bändchenmikrofon	Studiosmikrofon für höchste Lautstärkepegel, Vokalmikrofon
Elektromagnetisch	Lautsprecher	Telefonhörer, Hörgeräte
Piezoelektrisch	Kristallmikrofon	Körperschallmikrofon, Wasserschallmikrofon
	Keramikmikrofon	
Piezoresistiv	Kohlemikrofon	Fernsehapparat

Kondensatormikrofon

Diese Art des Mikrofons ist als Messmikrofon weit verbreitet und wird eingesetzt, wenn es um Genauigkeit und Reproduzierbarkeit geht. Sie weisen einige Vorteile gegenüber den anderen Mikrofonarten auf, geringes Eigenrauschen und die kompakte Bauform sind nur zwei der Vorteile. Abbildung 17 zeigt den Aufbau eines Kondensatormikrofons, dabei bilden Membran und Gegenelektrode den Plattenkondensator.

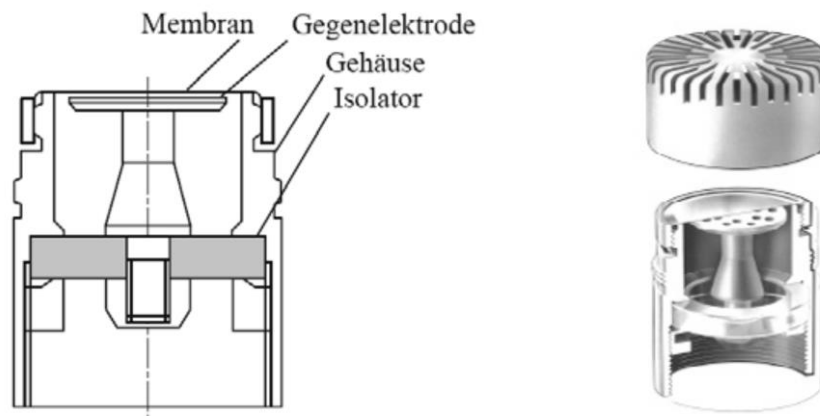


Abbildung 17: Aufbau Kondensatormikrofon (Henn et al. 2008, p. 136)

Durch Schalldruckschwankungen verändert sich der Abstand zwischen der Membran und der Gegenelektrode, was zu einer Kapazitätsänderung im Kondensator führt. Aufgrund der Trägheit des Systems kommt es zu einer zeitlichen Differenz beim Ausgleich der Ladungen. In weiterer Folge kommt es zu einer Spannungsänderung am Ausgang, die dem Schalldruck proportional ist.

Elektretmikrofon

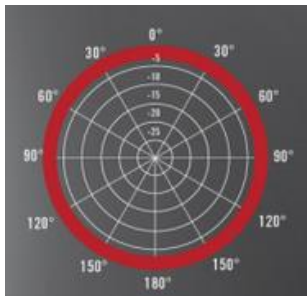
Betrachtet man den Aufbau, ist dieser ähnlich dem konventionellen Kondensatormikrofon. Der Unterschied in der Funktion liegt darin, dass hier keine Polarisierungsspannung benötigt wird. Zwischen Membran und Gegenelektrode wird ein Dielektrikum mit permanenter Polarisierung angebracht. Mit der sogenannten Elektretfolie kann das elektrische Feld ohne externe Spannungsquelle erzeugt werden. Diese Mikrofone kommen bei kompakten, kostengünstigen Messketten zur Anwendung. In Abbildung 22 sind die Größenverhältnisse der beiden Mikrofonarten zueinander abgebildet.

(vgl. Kollmann et al. 2006, 184f; Henn et al. 2008, 135f)

3.8.2 Einteilung der Mikrofone nach Richtcharakteristik

Die Richtcharakteristik ist ein Identifikationsfaktor für die räumliche Empfindlichkeit eines Mikrofons. Er sagt aus, wie stark der Schall aus den verschiedenen Umgebungsrichtungen aufgenommen wird.

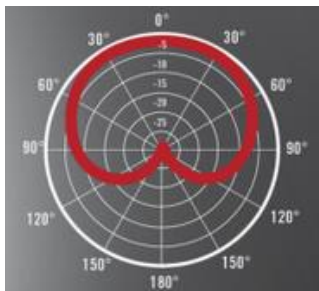
Kugelcharakteristik



Hier muss nicht auf die Ausrichtung geachtet werden, da der Schall von allen Seiten gleich aufgenommen wird. Diese Charakteristik kommt bei Messmikrofonen zum Einsatz.

Abbildung 18: Kugelcharakteristik (Shure 2013)

Nierencharakteristik



Der Schall wird hauptsächlich von vorne aufgenommen, von hinten nur gering.

Abbildung 19: Nierencharakteristik (Shure 2013)

Supernierencharakteristik



Im Gegensatz zur Niere, ist die Schallaufnahme von hinten empfindlicher.

Abbildung 20: Supernierencharakteristik (Shure 2013)

Achtercharakteristik



Von vorne und von hinten wird der Schall gut und gleichmäßig verteilt aufgenommen, jedoch erfolgt die Schallaufnahme von der Seite nur minimal.

(vgl. Kollmann et al. 2006, p. 189; Shure 2013)

Abbildung 21: Achtercharakteristik (Shure 2013)

3.8.3 Vorverstärker

Sowohl das Kondensatormikrofon, als auch das Elektretmikrofon verfügen über einen Vorverstärker, welcher die hohe Ausgangsimpedanz des Mikrofons in



Abbildung 22: 1: Kondensatormikrofon
2: Elektretmikrofon
3: Mini-Elektretmikrofone
(Kollmann et al. 2006, p. 186)

eine niedrige Eingangsimpedanz der Datenerfassungseinheit umwandelt. Dieser soll möglichst nahe an der Mikrofonkapsel liegen, um die Störeinflüsse auf das Messsignal gering zu halten.

Ausschlaggebend bei der Auswahl von Messmikrofonen sind ähnliche Faktoren wie bei den Beschleunigungssensoren. Genauer gesagt spielen der Übertragungsfaktor, der Amplitudengang, die Arbeitsfrequenz- und der Dynamikbereich, sowie die Richtcharakteristik eine

entscheidende Rolle. (vgl. Kollmann et al. 2006, 185ff)

3.9 Erfassung akustischer Signale - Datenerfassungseinheit

Akustische Signale können im Zeit- und Frequenzraum dargestellt werden. Die zeitliche Darstellung dieses Signals erfolgt bei einer gewissen Frequenz und umgekehrt erfolgt die Darstellung im Frequenzraum zu einem gewissen Zeitpunkt. Hauptsächlich werden in der digitalen Messtechnik Frequenzanalytoren zur Messdatenerfassung eingesetzt, wobei die FFT von hoher Bedeutung ist.

Auch Handgeräte verfügen über integrierte Analysemethoden, welche Schmalbandanalyse und teilweise Mehrkanal-Frequenzanalysen ausführen.

Die gemessenen Signale können direkt über ein Netzwerk, zur Weiterverarbeitung, an den PC (Echtzeitüberwachung bzw. Online Auswertung) weitergeleitet werden oder auch auf einer Festplatte bzw. SD-Karte gespeichert (Post-processing bzw. Offline Auswertung) und nachträglich analysiert werden.

(vgl. Michael Möser 2010, p. 73; Kollmann et al. 2006, p. 214)

3.9.1 *Filterung der Signale*

Ein Filter lässt Signale in einem festgelegten Frequenzbereich unverändert und ungehindert passieren. Liegt ein Signal außerhalb des Filterbereiches wird es vollständig unterdrückt.

Ein Tiefpassfilter lässt jene Signale passieren, die unterhalb der Grenzfrequenz liegen, die Signale über dieser Frequenz werden unterdrückt oder gedämpft.

Umgekehrt erfolgt die Filterung beim Hochpassfilter, dieser lässt die Signale über der Grenzfrequenz passieren und filtert die Signale unterhalb dieser festgelegten Grenze.

Der Bandpassfilter verfügt über eine obere und untere Grenze, Signale zwischen diesen Grenzen können unverändert passieren.

Am häufigsten im Einsatz sind sogenannte Oktavfilter oder Terzfilter. Eine Terz entspricht dem Drittel einer Oktave. Diese werden durchgeführt, wenn signifikante Frequenzanteile im akustischen Frequenzbereich auftreten.

In Schmalbandanalysen werden Filter konstanter Breite verwendet und sie werden eingesetzt, wenn eine hohe Frequenzauflösung erforderlich ist.

(vgl. Michael Möser 2010, p. 73; Kollmann et al. 2006, 214ff)

3.9.2 *Frequenzanalysatoren*

Frequenzanalysatoren verfügen über eine Vielzahl von Werkzeugen, welche eine korrekte Messung sicherstellen sollen. Der Aufbau eines Frequenzanalysators, wie sie heutzutage im Einsatz sind, wird in Abbildung 23 schematisch erläutert.

Eingangskanäle

Frequenzanalytoren sind meist Spannungsmessgeräte, bei denen die Eingangskanäle entweder Wechselstrom (AC) oder Gleichstrom (DC) gekoppelt werden können.

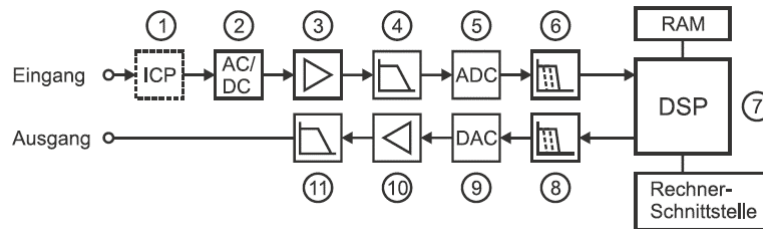


Abbildung 23: Aufbau Frequenzanalytator (Kollmann et al. 2006, p. 219)

In der Maschinenakustik wird vermehrt die AC-Kopplung verwendet. Die Eingangssignale können über einen integrierten Messverstärker verstärkt werden, um eine hohe Ausnutzung des Spannungsbereiches der Eingangskanäle zu erzielen. Diese Verstärker verfügen meist über eine stufenweise Einstellung zur Regelung des Verstärkungsfaktors.

Der Tiefpass-Anti-Alias-Filter ist ein wichtiges Messkettenelement, welches der Digitalisierung vorgeschaltet ist. Er dient dazu sogenannte Unterabtastungen von hochfrequenten Signalen zu vermeiden, welche zu einem Messfehler führen. Bezeichnet werden diese Fehler als Aliasing.

Als Digitalisierung wird die Abtastung des analogen, tiefpassgefilterten Signals, durch einen Analog-Digital Konverter (ADC), bezeichnet. Bei der Diskretisierung des Zeitsignales kommt es zu geringen Abweichungen vom digitalen Signal zum Analogen. Diese Abweichung kann als digitales Rauschen verstanden werden und entsteht, weil der Ordinatenwert, für den Zeitraum eines Abtastintervalls, konstant gehalten wird.

Laut dem Abtasttheorem nach Shannon muss die Abtastfrequenz mindestens doppelt so hoch sein, wie die höchste Frequenzkomponente des Signals. Ein wichtiges Qualitätsmerkmal der AD-Konvertierung ist der Dynamikbereich, welcher das Verhältnis zwischen dem größten und den kleinsten noch erfassbaren Signalamplitudenbetrag beschreibt.

Daten, die durch Überabtastung erhalten wurden, werden in einem Dezimierungsfiler auf die entsprechenden Frequenzbereiche reduziert. Hierbei kommt

es zu einem erneuten Abtasten des Signals mit einer geringeren Abtastfrequenz, auch Resampling genannt.

Im Digitalsignalprozessor (DSP) wird das digitale Messsignal weiter verarbeitet, wobei eine FFT durchgeführt wird. Diese Signale werden dann im Speicher gepuffert. Der DSP führt nicht nur die FFT durch, sondern steuert auch alle Funktionen des Frequenzanalysators. Dezimierungs- und Digitalfilter, Messverstärkereinstellungen und auch die Kommunikation mit dem angeschlossenen Rechner werden über den DSP gesteuert.

Ausgangskanäle

Frequenzanalysatoren verfügen über Signalgeneratoren, welche Signalarten wie Sinus, Rechteck und Rauschen erzeugen können. Sie dienen der Ansteuerung von Anregungsgeräten, wie z.B. einem Shaker.

(vgl. Kollmann et al. 2006, 219ff)

3.10 Mess- und Auswerteverfahren

Dem Akustiker steht eine große Auswahl an Messsystemen und Softwarepaketen zur Verfügung, deshalb ist auch die Auswahl der richtigen Mess- und Auswertemethodik eine essentielle Aufgabe zu Beginn der Arbeit. Die Mess- und Auswerteverfahren müssen an die Problemstellung angepasst werden und können somit sehr individuell sein.

Unterteilt können die Mess- und Auswertungsverfahren prinzipiell in Signalanalyse und Systemanalyse werden. Die Signalanalyse beschäftigt sich mit unbekanntem Betriebskräften, sie wird benötigt um maschinenakustische Probleme zu erkennen. Weniger geeignet ist diese für Lärminderungsmaßnahmen.

Die Systemanalyse beschäftigt sich mit den Übertragungseigenschaften des Untersuchungsobjektes und in manchen Fällen auch mit der des Umgebungsmediums. Hier sind die fremderregenden Kräfte bekannt.

Bei der Signalanalyse werden die digitalisierten und bereits aufbereiteten Messwerte interpretiert. Es gilt die Informationen auszulesen um eine Versuchsaus-

sage zu ermöglichen. Zuerst soll ein Überblick über die verschiedenen Analysemethoden gegeben werden und in weiterer Folge werden diese dann detaillierter erläutert. (vgl. Zeller 2012, 325ff; Kollmann et al. 2006, 242f)

Tabelle 5: Übersicht Möglichkeiten der Signalanalyse (Zeller 2012, p. 325)

Analysemethoden	Analysemöglichkeit
Zeitbezogene Analysen	Zeitverläufe Drehschwingungsanalysen Grad- Kurbelwinkel-Analysen
Frequenzanalysen	Digitale 1/n - Oktaveanalysen DFT, FFT
Kurzzeitanalysen	Waveletanalysen
Ordnungsanalysen	Digitales Ordertracking Kalman-Filtering
Statische Analysen	Hauptkomponentenanalyse
Psychoakustische Analysen	Lautheit, Schärfe, Rauigkeit, Tonhaltigkeit

3.10.1 Frequenzanalyse

Bezüglich der Signaleigenschaften ist es oft besser eine Darstellung im Frequenzbereich zu wählen, als eine im Zeitbereich. Die Überführung von den Zeit- in den Frequenzbereich erfolgt mittels Fast Fourier-Transformation (FFT). Bei der Frequenzanalyse mit Bandfiltern gibt es zwei Arten. Nämlich Filter mit konstanter absoluter Bandbreite und Filter mit konstanter relativer Bandbreite. Schmalbandfilter (Filter mit konstanter absoluter Bandbreite) verfügen über eine geringe Analysegeschwindigkeit und sind deshalb nur bei der Analyse von stationären Signalen im Einsatz. (vgl. Jardine et al. 2006; Klocke, König 2008, 408ff)

1/n-Oktavanalyse

Bei dieser Art der Signalanalyse wird das Signal durch eine Reihe von parallel geschalteten 1/n-Oktavfiltern geleitet, bevor der Pegel bestimmt wird. Aus diesen einzeln gefilterten Ausgangssignalen wird dann ein mittlerer Pegel bestimmt. Die obere Grenzfrequenz eines Oktavfilters entspricht genau der doppelten unteren Grenzfrequenz. Ein 1/3-Oktavfilter wird auch als Terzfilter bezeichnet; dabei wird das Oktavband nochmals in drei Teile unterteilt. Oktavfilter im Allgemeinen sind Filter mit konstanter relativer Bandbreite. Mit der Oktavanalyse kann entweder ein gemittelttes Spektrum berechnet werden oder es kann ein zeit- bzw. drehzahlabhängiges Spektrogramm ausgegeben werden.

Als grundlegendes Problem der Frequenzanalyse wird der Übergang vom Zeit- in den Frequenzbereich angesehen. Es kommt zum Auftreten Zeit-Frequenz-Unschärfe, das bedeutet dass zum einen die Frequenz auf Kosten der Zeitauflösung hoch aufgelöst werden kann. Oder zum anderen sich eine hohe Zeitauflösung und eine daraus resultierende geringere Frequenzauflösung ergibt. Frequenz- und Zeitauflösung hoch zu halten ist nicht möglich. Diese Problematik kann auch die Diskrete Fourier-Transformation (DFT) oder Waveletanalyse nur bedingt lösen. (vgl. Head Acoustics 2016b, 3f; Zeller 2012, 325f)

Fourier-Analyse

Fourier-Theorem: „Jede periodische Signalform kann als Überlagerung diskreter periodischer Sinus- und Cosinusschwingungen mit unterschiedlicher Frequenz und Amplitude dargestellt werden“. (Head Acoustics 2016b, p. 1)

In der Praxis wird diesem Theorem im Rahmen der DFT und auch der Fast Fourier-Transformation (FFT) umgesetzt. Bei der digitalen Bearbeitung von Signalen spielt die *DFT* eine wesentliche Rolle, im Gegensatz zur Fourier-Transformation wird hier eine endliche Anzahl von N Abtastwerten vorausgesetzt, da Signale über einen begrenzten Zeitraum relevant sind. Weil in der Praxis eine effiziente und rasche Berechnung gefordert wird, greift man auf die *FFT* zurück, welche eine *DFT* mit reduziertem Rechenaufwand widerspiegelt. Das Resultat beider Analysen ist ein diskretes Frequenzspektrum eines abgetasteten Zeitsignals. (vgl. Head Acoustics 2016b, 1f; Werner 2000, 1-10; Michael Möser 2010, 547-551)

Fast Fourier-Transformation (FFT)

Eine FFT arbeitet mit effizienten Algorithmen, aus diesem Grund hat sie sich weitgehend in der digitalen Signalanalyse durchsetzen können. Es erfolgt eine Zerlegung des kontinuierlichen Zeitsignals in Blöcke mit 2^n Abtastwerten, wobei aus jedem Block die FFT berechnet wird. Die Aufteilung des Signals in Blöcke wird als Fensterung bezeichnet.

Zur Vermeidung von Unstetigkeit, kommt es zu einer Gewichtung mittels einer Fensterfunktion (meist Hanning oder Flattop). Werden die Ergebnisse der einzelnen Blöcke gemittelt spricht man von der gemittelten FFT. Kommt es zu einer Abbildung der Resultate der einzelnen Blöcke hintereinander, in einem Spektrogramm, spricht man von einer zeitabhängigen Analyse (FFT über die Zeit oder FFT über Drehzahl). Bei der Berechnung fällt eine hohe Datenmenge an. Deshalb werden die Spektren oft schon bei der Messung gemittelt, um diese Datenmenge gering zu halten. Eine gemittelte Analyse eignet sich für stationäre Signale, die Zeitabhängige nicht. Die FFT ist im Gegensatz zur 1/n-Oktavanalyse eine Analyse mit konstanter Bandbreite. Die Frequenzauflösung Δf ist über den kompletten Frequenzbereich konstant, sie setzt sich der Abtastrate und der ausgewählten Blocklänge zusammen.

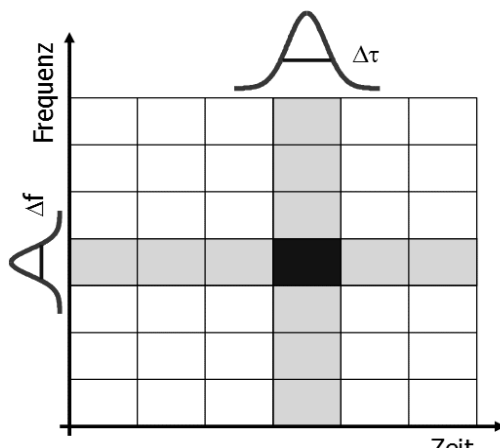


Abbildung 24: Zeit-Frequenzebene
(Maier 2002b)

$$\Delta f = \frac{\text{Abtastrate}}{\text{Blocklänge}}$$

Formel 11: Frequenzauflösung

Die Parametereinstellungen entscheiden über die zeitliche Auflösung und den Abstand der Frequenzlinien.

$$\Delta f \cdot \Delta \tau \approx 1$$

Formel 12: Zeit-Frequenzauflösung

Ein schmales Fenster bedeutet eine hohe Zeitauflösung, bei geringer Frequenzauflösung. Ein breites Fenster hat die umgekehrte Charakteristik. Kurzzeitanalysemethoden (z.B. Wavelet-Analyse) versuchen beide Auflösungsfaktoren zu verbessern.

Unvorteilhaft bei diesem Verfahren sind das Auftreten von Pegelverschiebungen oder Messartefakten. Diese Effekte sind von den gewählten Parametern abhängig.

(Zeller 2012, 326f; Kollmann et al. 2006, 225ff; Head Acoustics 2016b; Jardine et al. 2006)

Wavelet-Analyse

Zur Optimierung der Zeit- und Frequenzauflösung, arbeitet die Wavelet-Analyse mit variablen Fensterbreiten. Die Wavelet-Analyse besitzt wie die 1/n-Oktavanalyse eine Frequenzauflösung mit konstanter relativer Bandbreite. Bei dieser Art der Signalanalyse wird ein frei wählbarer Wellenzug mit dem zu analysierenden Signal abschnittsweise verglichen. Die Analysefrequenz kann, durch Stauchung und Dehnung des Wellenzuges, variiert werden. Die ursprüngliche Form des Wellenzuges - sie wird als Mutterwelle bezeichnet - bleibt jedoch unverändert. Das Produkt der einzelnen Wavelets wird mit dem zu analysierenden Signal verglichen, daraus ergibt sich eine eingeschlossene Fläche, die ein Maß für den Frequenzinhalt des Signals widerspiegelt. Die Mutter-Wavelet muss zu dem zu analysierenden Messsignal passen. Dies gestaltet sich jedoch oft als schwierig. Dehnung und Stauchung (Skalierung) der Mutter-Wavelet sind frei wählen, sowie die Position (zeitliche Verschiebung) des Vergleiches.

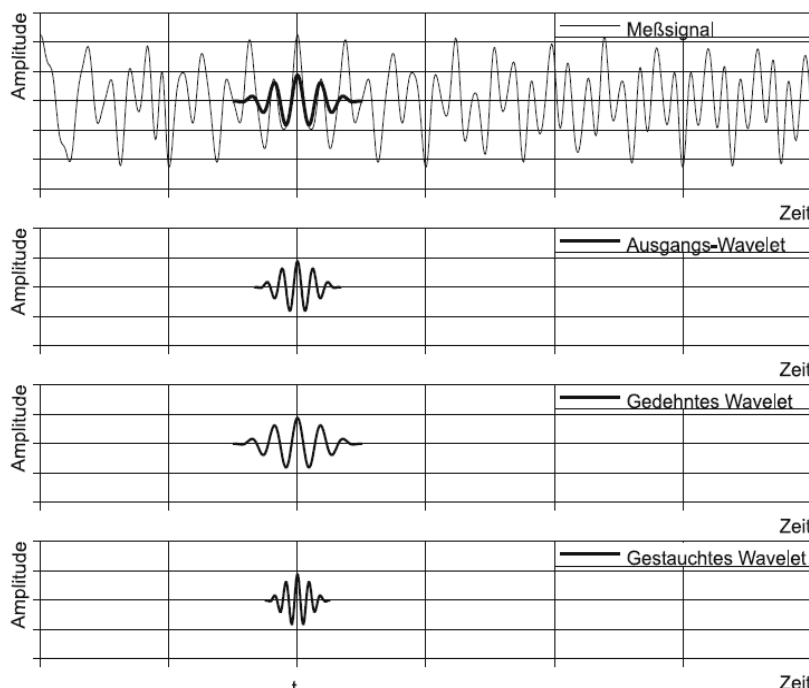


Abbildung 25: Vorgehen der Wavelet-Analyse (Kollmann et al. 2006, p. 267)

Dadurch kann die Auflösung im Frequenz- und Zeitbereich beliebig gewählt werden, nachteilig bei hohen Auflösungen ist die damit verbundene lange Rechenzeit. Abbildung 25 veranschaulicht den Vergleich der einzelnen Wavelet mit dem zu analysierenden Signal.

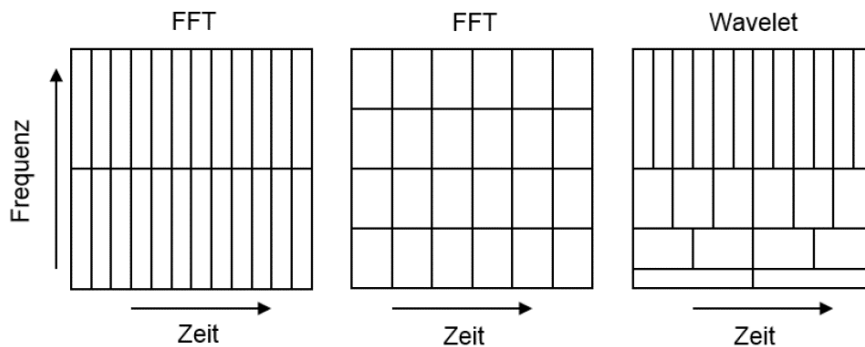


Abbildung 26: Frequenz-Zeitauflösung bei FFT und Wavelet-Analyse im Vergleich (Head Acoustics 2016b)

In Abbildung 26 sind zwei unterschiedliche Auflösungen der FFT und einer Wavelet-Analyse dargestellt. Die linke Darstellung zeigt ein schmales Fenster, welches eine hohe zeitliche Auflösung darstellt, die rechte FFT Darstellung zeigt eine höhere Frequenzdarstellung. Es ist ersichtlich, dass die Wavelet-Analyse mit einer hohen Frequenzauflösung und schlechter Zeitauflösung, im Bereich niedriger Frequenzen, rechnet. Zu höheren Frequenzen hin nimmt die Frequenzauflösung ab und die Zeitauflösung verbessert sich. Die Fläche dieser „Boxen“ bleibt jedoch immer dieselbe.

(vgl. Klocke, König 2008, 408ff; Kollmann et al. 2006, p. 266; Head Acoustics 2016c, 2016b, 4f, 2016b, 4f; Maier 2002; Jardine et al. 2006; Head Acoustics 2016b, 4f)

3.10.2 *Ordnungsanalyse*

Für Maschinen und Anlagen mit rotierenden Bauteilen ist die Ordnungsanalyse ein wichtiges Werkzeug, insbesondere wenn die Drehzahlen sich während der Überwachung der Bauteile ändern. Die Signalanteile können dabei in drehzahlabhängige und drehzahlunabhängige Anteile unterschieden werden. Frequenzen, die der Bezugswellendrehzahl und deren Vielfachem entsprechen, werden als Ordnungen bezeichnet. Die erste Ordnung ist ident mit der Frequenz der Bezugswellendrehzahl, die zweite Ordnung (auch 2. Harmonische genannt) entspricht der doppelten Frequenz usw.

Möglichkeiten der Datenanalyse

- Zeitbasierende Frequenzanalyse
- Drehwinkelbasierte Frequenzanalyse mit variabler Abtastfrequenz
- Drehwinkelbasierte Frequenzanalyse mit konstanter Abtastfrequenz

Zeitbasierende Frequenzanalyse

Die Vorgehensweise ist identisch wie die der klassischen FFT-Analyse. Auch hier erfolgt die Abtastung des Messsignals mit einer festen Abtastfrequenz. Der Einfachheit halber werden zunächst stationäre Signale angenommen. Im Falle eines gestuften Drehzahlenlaufes, erfolgt die Durchführung der FFT-Analyse für jede Drehzahlstufe getrennt. Durch die arithmetische Mittelung kann der stochastische Fehler klein gehalten werden. Die Darstellung kann unterschiedlich erfolgen. Eine Möglichkeit ist die Darstellung im sogenannten Wasserfalldiagramm (siehe: Abbildung 27). Hier wird die Amplitude über die Frequenz und Drehzahl aufgetragen, also eine dreidimensionale Abbildung. Signalanteile die von der Drehzahl abhängig sind (Ordnungen), werden als schräge Gerade dargestellt. Eine weitere Variante ist die Sonogrammdarstellung, Amplitudenhöhen werden mit Farb- oder Graustufen dargestellt.

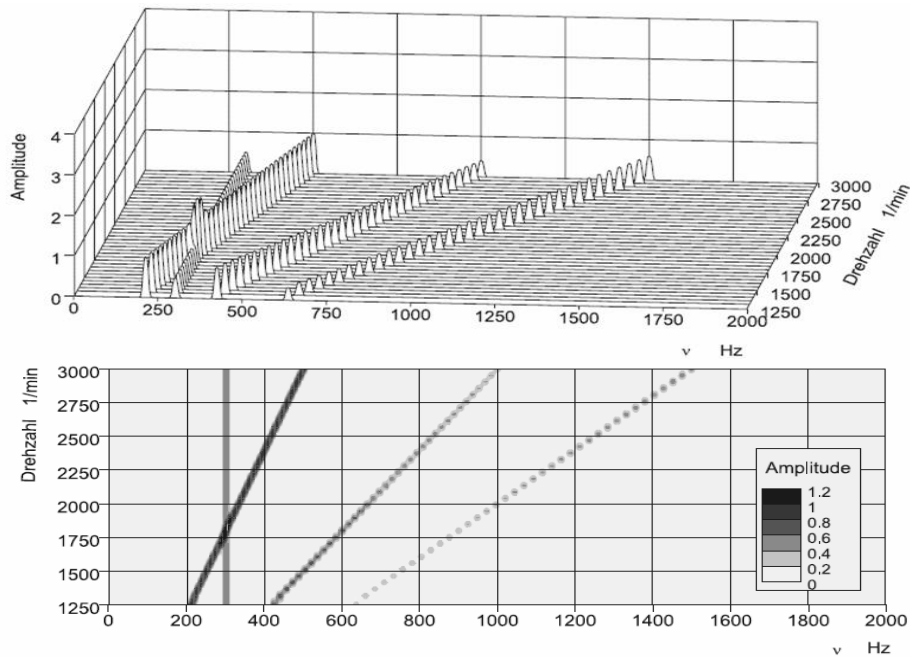


Abbildung 27: Wasserfalldiagramm und Sonogramm in Graustufendarstellung (Kollmann et al. 2006, p. 259)

Anschließende genauere Analysen werden mit Hilfe von Cursor Schnitten durchgeführt, diese Schnitte werden entlang der Ordnungen gelegt oder entlang konstanter Frequenzen.

Finden die Analysen bei konstanten Betriebsbedingungen und schwankender Drehzahl statt, ist die klassische FFT-Analyse nicht mehr ausreichend genau und es kommt zum Verschmieren der Signalamplituden. Um diesem Problem entgegenzuwirken wird anstatt der äquidistanten Zeitabtastung eine äquidistante Drehwinkelabtastung verwendet.

Drehwinkelbasierte Frequenzanalyse mit variabler Abtastfrequenz

Zur Durchführung dieser Art der Ordnungsanalyse werden Drehwinkelgeber mit ganzzahligen Inkrementen an der Bezugswelle angebracht. Wird der Drehzahlverlauf nebenbei nicht mitaufgezeichnet, verfügt das Ordnungsspektrum über keine Frequenz- oder Drehzahlinformationen.

Das Messsignal wird durch einen externen Takt gesteuert, welcher dem Drehwinkel synchron ist (external sampling). Jedes Inkrement des Drehwinkelgebers erfasst einen Messwert. Eine Änderung der Drehzahl bewirkt eine Veränderung des zeitlichen Abstandes der Drehwinkelinkremente, daraus resultiert die variable, drehzahlproportionale Abtastfrequenz.

Drehwinkelbasierte Frequenzanalyse mit konstanter Abtastfrequenz

Die heutigen Frequenzanalytoren verfügen meist über eine feste Abtastfrequenz, welche die obere Grenze des Auswertungsfrequenzbereiches bei weitem überschreitet (Oversampling). Neben der zeitbasierten Datenaufzeichnung werden die Drehzahlimpulse erfasst. Die Drehwinkelinkremente sind in diesem Fall nicht zeitlich äquidistant, deshalb ist eine Normierung, durch digitales Resampling, auf die Drehzahl notwendig. Nach der Anpassung sind zur Vermeidung von Aliasing Tiefpassfilter nachzuschalten. Zeit- und drehwinkelbezogene Analysen sind -im Gegensatz zu den zuvor erwähnten Verfahren- durchführbar. Betrachtet man das Wasserfalldiagramm kann man erkennen, dass die Ordnungslinien als Geraden parallel zur Drehzahlachse verlaufen. Konstante Frequenzanteile sind in dieser Darstellung als gekrümmte Kurven abgebildet.

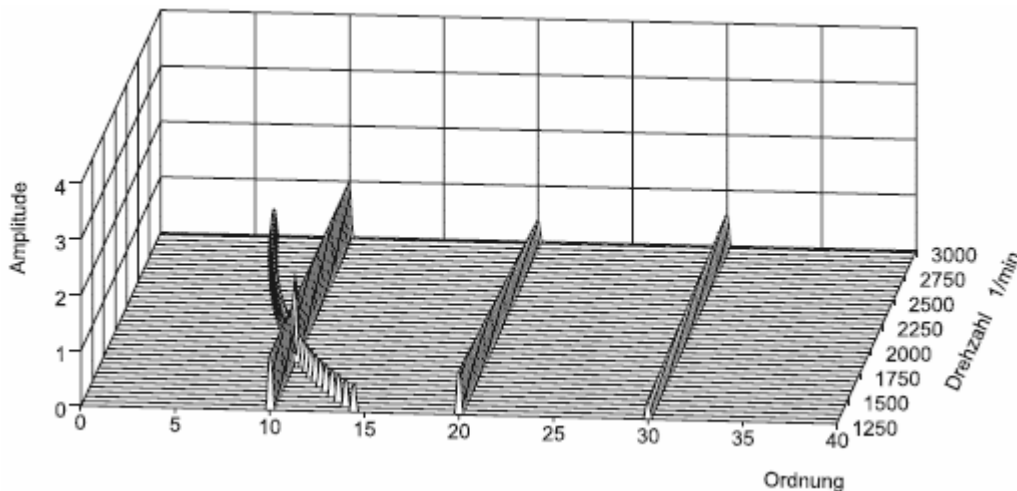


Abbildung 28: Wasserfalldiagramm einer drehwinkelbasierten Frequenzanalyse (Kollmann et al. 2006, p. 263)

Allgemein gesagt stellt die Ordnungsanalyse eine einfache Beziehung zwischen Schwingungssignalen und der Drehzahl her. Signale werden in ihre charakteristischen Bestandteile zerlegt und mechanischen Bauteilen zugeordnet. Somit gelingt eine gut reproduzierbare Geräusch- und Schwingungsmessung. Mit Hilfe dieser Analyse können nicht nur Informationen über einzelne Bauteile, sondern über die gesamte Maschine gesammelt werden. In Abbildung 29 sieht man die Zuordnung der von einzelnen Bauteilen hervorgerufenen Schwingungen. Wie bereits zu Beginn des Kapitels erwähnt wurde, entspricht der Peak der 1. Ordnung der Grundfrequenz, also der Drehzahl der Bezugswelle.

(vgl. National Instruments 2012; Henn et al. 2008, p. 180; Head Acoustics 2016c; Kollmann et al. 2006, p. 258)

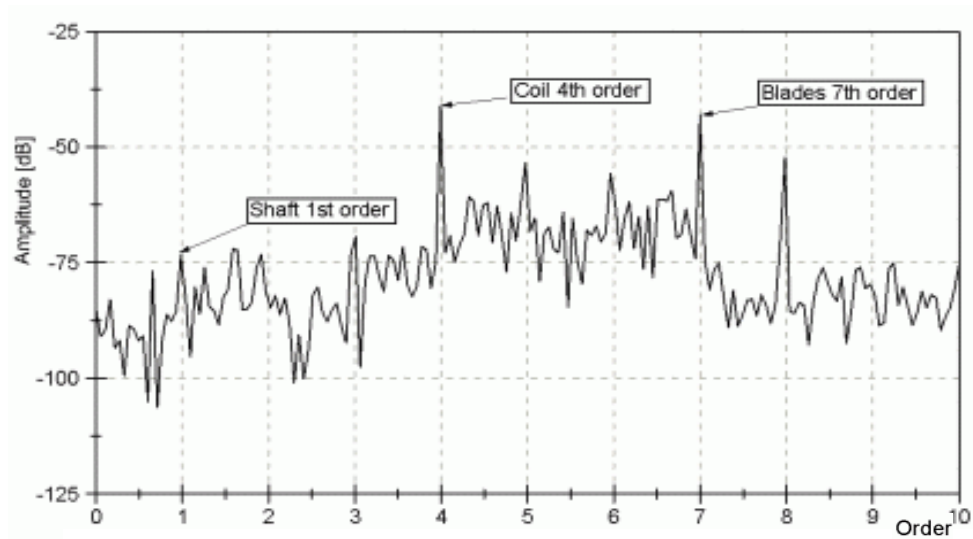


Abbildung 29: zweidimensionales Ordnungsspektrum

(National Instruments 2012)

4. Technologiescreening

Zustandsüberwachung von Maschinen und deren Komponenten, begründet durch akustische Analysen, wird bereits seit einigen Jahren erforscht. Die ersten Untersuchungen gehen auf die späten sechziger Jahre zurück.

(vgl. Weller et al. 1969)

Die Forschungen beschränken sich nicht nur auf Luftschallaufzeichnungen mit Mikrofonen, sondern auch Bauteilvibrationen können direkt überwacht werden.

Die Maschinen erzeugen im Betrieb Schwingungen in den einzelnen Komponenten, die als Körperschall an der Maschinenstruktur gemessen oder als Luftschall in der Umgebung detektiert werden können.

Wissenschaftliche Artikel über Überwachung mit Luftschallsensoren gibt es vergleichsweise zur Vibrationsüberwachung wenige, deshalb liegt der Fokus des Technologiescreenings vielmehr auf dem Bereich der Körperschall- bzw. Vibrationsuntersuchungen. Ausschlaggebend für die Bevorzugung der Vibrations- und Körperschalluntersuchung könnte sein, dass weniger Störeinflüsse von den Umgebungsgeräuschen, besonders bei großen Produktionshallen, aufgezeichnet werden.

4.1 Stand der Technik

Das Aufzeigen von Lagerschädigungen ist ein großer Teil der Maschinen- und Komponentenüberwachung und wird, unter anderem direkt von den großen Lagerherstellern wie SKF und FAG realisiert. (vgl. SKF 2016)

In der Literatur findet man einige Aufzeichnungen von experimentellen Zustandsüberwachungen, die erfolgreich bewiesen haben, dass die Lagerzustände akustisch mit Beschleunigungs- bzw. Körperschallsensoren überwacht werden können. Durch Analyse der aufgezeichneten Signale können z.B. Schäden am Innen- oder Außenring erkannt werden.

(vgl. Hemmati et al. 2016; Márquez 2012; Mba D., Rao R. B. 2006; N Tandon A. C. 1999; Wirth 1998; Randall 2004)

Dabei werden die Sensoren direkt am Lagergehäuse angebracht, wie in Abbildung 30, gezeigt wird.

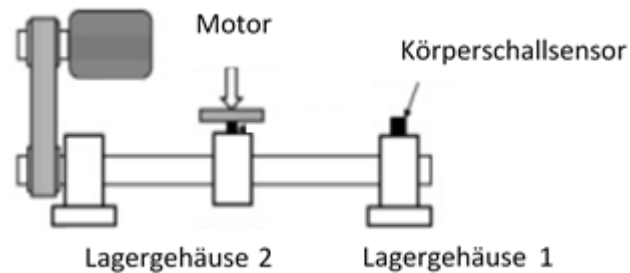


Abbildung 30: Körperschallsensoren zur Lagerüberwachung (Hemmati et al. 2016)

Weitere Forschung wird im Bereich Spindelüberwachung betrieben. Hier werden die Vibrationssensoren am Spindelgehäuse, direkt über den vorderen und hinteren Lagerpaaren, verschraubt oder mit einer magnetischen Halterung angebracht.

Die Firma PROMETEC bietet Komplettüberwachungssysteme von Spindel und auch von ganzen Produktionsmaschinen an. Hier wird der Zerspanungsprozess mit speziellen Körperschall- bzw. Beschleunigungssensoren untersucht und soll Rückschlüsse auf etwaige Zustandsänderungen, wie z.B. Verschleiß des Werkzeuges oder Unwucht der Spindel, geben. (vgl. Prometec 2011)

Die Forschung des Fraunhofer Institutes und auch anderer Forschungseinrichtungen haben sich mit der Thematik der akustischen Werkzeugüberwachung beschäftigt. Hier wurde die Werkzeugzustandsüberwachung mittels Körperschallsensoren erfolgreich durchgeführt. Beim Beispiel Fraunhofer Institut wurden eine Schleifmaschine und eine Drehmaschine überwacht. Die Platzierung des Sensors erfolgte an der Werkzeugaufnahme bzw. bei der Drehmaschine direkt am Meißel.

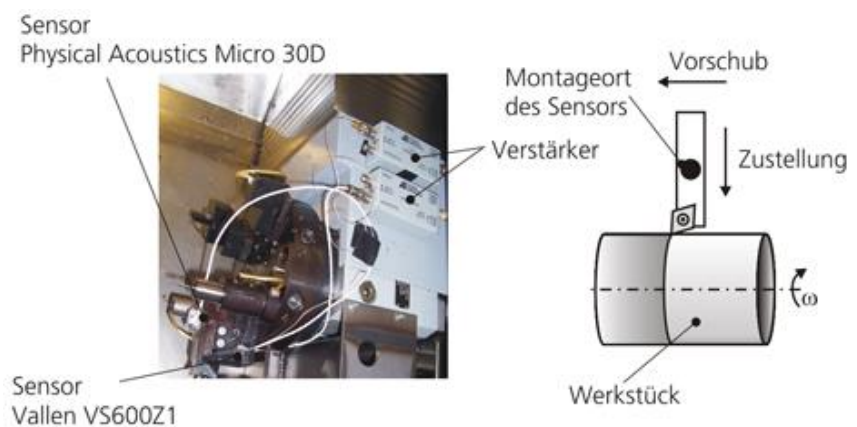
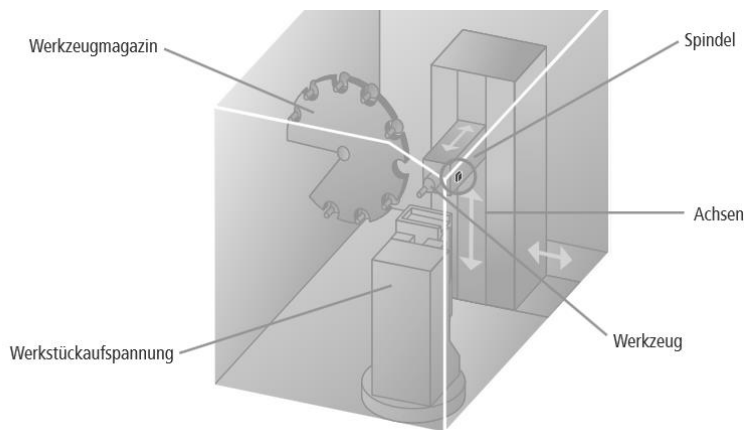


Abbildung 31: Werkzeugüberwachung AE Sensoren (Fraunhofer Institut 2009)

Erfasst wurden die Schwingungssignale über einen Zeitraum von mehreren Bearbeitungsstunden. Im Laufe der Aufzeichnung konnten höhere Schwingungsamplituden gemessen werden, welche aus der Erhöhung der Schnittkraft resultieren. Dieser Anstieg der Schnittkraft ist auf den Verschleiß des Werkzeuges zurückzuführen.

Zur Überwachung der Werkzeugabnutzung, ist die Untersuchung des Verhaltens der Spindel ausreichend. Hierbei werden, wie bei reiner Spindelüberwachung, Sensoren an das Spindelgehäuse angebracht und das Verhalten der Spindel aufgezeichnet. Die stärker werdenden Schwingungen, begründet durch die erhöhte



Schnittkraft, breiten sich entlang der Spindel aus und werden an die Lagerstelle übertragen. Mit den Sensoren an den Lagerstellen der Spindel können diese übertragenen Schwingungen erfasst und aufgezeichnet werden.

Abbildung 32: Sensoren zur Spindel- und Werkzeugüberwachung (Prometec 2011)

Daraus folgt, dass die Themen Spindelüberwachung, sowie Werkzeugüberwachung nicht unbedingt getrennt betrachtet werden sollten.

Beschleunigungssensoren können besonders in der Getriebeüberwachung bzw. Zahnräderüberwachung ihr breites Frequenzband ausnutzen. Durch die Messung am Getriebe bzw. an der Lagerung der Zahnradwellen ist es möglich Ausrichtungsfehler, Verschleiß an den Zähnen, Zahnkopf-, Zahnfußbruch, Exzentrizität im Schwingungssignal zu detektieren. Ebenso können Ermüdungserscheinungen des Materials im Laufe der Zeit wahrgenommen werden.

Randall (2004) verweist in seinem Artikel auf die Überwachung von Elektro-, Diesel-, und Hubkolbenmotoren. Im Falle des Elektromotors werden die Möglichkeiten zur Erkennung von Problemen am Stator und Rotor beschrieben, ebenso können Ausrichtungsfehler der Wellen über Interpretation der Schwingungssignale erkannt werden.

Erläutert werden auch die unterschiedlichen Charakteristiken im Schwingungssignal bei unvollständiger Verbrennung, sowie bei Fehlzündungen. Diese Vibrationen werden direkt an die Kurbelwelle übertragen und können mit geeigneten Beschleunigungssensoren erfasst werden.

Wirth (1998) beschreibt in seinem Artikel elektrische Effekte an Elektromotoren, die zu mechanischen Schwingungen führen. Im Falle eines mit Wechselspannung betriebenen Elektromotors können diese Effekte z.B. aus einer magnetischen Unwucht resultieren. Diese Kräfte werden an den Stator übertragen und führen zur Oszillation des Massenschwerpunktes. Die Schwingungen können direkt am Stator mit dem Beschleunigungssensor aufgezeichnet werden.

Alle Möglichkeiten haben sich als geeignet erwiesen, um die Überwachung von Maschinenkomponenten zu realisieren. Zusammenfassend werden die vorhin erwähnten Techniken zur besseren Übersicht in tabellarischer Form noch einmal aufbereitet (siehe Tabelle 6). Ebenso werden in der Übersicht noch einmal auf die bereits angesprochen literarischen Werke und Artikel verwiesen.

Tabelle 6: Übersicht der Techniken und ihrer Anwendungen

Überwachung von	Messgröße	Beschreibung
Spindel ¹	Luftschall	Kondensatormikrofon im Nahfeld
	Körperschall	Sensor am Spindelgehäuse
Lager ²	Luftschall	Kondensatormikrofon im Nahfeld
	Körperschall	Sensor am Lagergehäuse
Motoren (Elektromotoren, Hubkolbenmotoren) ³	Luftschall	Kondensatormikrofon nahe am Motor
	Körperschall	Sensor auf Lagerung der Abtriebswelle
Getriebe ⁴	Luftschall	Kondensatormikrofon in einer Bohrung anbringen
	Körperschall	Mehrere Sensoren am Gehäuse
Gesamte Maschine	Luftschall	Ein Mikrofon vor der Maschine und eines im Innenraum platziert
Werkzeug ⁵	Luftschall	Mikrofon nahe Kontaktzone Werkstück und Werkzeug
	Körperschall	Für stehende Werkzeuge: Sensor am Werkzeug Für rotierende: auf Werkzeugaufnahme

¹ vgl. Prometec 2011

² vgl. N Tandon A. C. 1999; Hemmati et al. 2016; Marcus Bengtsson et al. 2004; Márquez 2012; Mba D., Rao R. B. 2006; Wirth 1998; Randall 2004; Sinha, Elbhah 2013; Shiroishi et al. 1997

³ vgl. Randall 2004; Wirth 1998

⁴ vgl. Randall 2004; Marcus Bengtsson et al. 2004; Márquez 2012; Capdessus et al. 2000; Antoni, Randall 2002; Wirth 1998; Randall 1982; Tan et al. 2007

⁵ vgl. Salgado, Alonso 2007; Fraunhofer Institut 2009; Byrne et al. 1995; Xiaozhi Chen, Beizhi Li 2007

4.2 Überwachungsmöglichkeiten

In diesem Abschnitt wird auf die Überwachungsmöglichkeiten, welche in Tabelle 6 aufgelistet sind, konkreter eingegangen. Ebenso werden Probleme, die bei der Überwachung entstehen können, aufgezeigt. Auf die Getriebe- und Motorenüberwachungen wird im nachfolgenden Kapitel nicht detailliert eingegangen, da es für den aktuellen Anwendungsfall bei Audi nicht relevant ist. Bezüglich der Untersuchung an Elektromotoren gibt es wesentlich einfachere Optionen (z.B. Statorstromüberwachung, (vgl. Schoen et al. 1995).

4.2.1 Spindelüberwachung

Durch gezielte Platzierung der Sensoren kann aus den aufgezeichneten Signalen Rückschlüsse auf Lagerverschleiß, Unwucht und Werkzeugverschleiß gezogen werden.

Luftschall

Ein Kondensatormikrofon wird im Nahfeld (Anm.: Unmittelbarer Bereich um die Schallquelle) der Spindel angebracht. Die Problematik bei Luftschallmessungen allgemein ist, dass sehr viele Störgeräusche die Messung beeinflussen können. Maschinenhallen sind in der Regel von Umgebungslärm geprägt, deshalb müssen diese Störgeräusche gefiltert werden, um eine hochwertige Messung zu erhalten.

Sollte der Pegel der kritischen Maschine bzw. des kritischen Bauteiles um 10dB lauter sein als die Hintergrundgeräusche, wird keine Korrektur benötigt, dann dominiert die kritische Komponente.

Wenn jedoch das Hintergrundgeräusch nur 3 bis < 10 dB leiser ist, dann muss mit Korrekturwerten gerechnet werden.



Abbildung 33: Kondensatormikrofon mit Vorverstärker (PCB Piezotronics Inc. 2016)

Körperschall- bzw. Beschleunigungssensoren

Der Sensor wird auf dem Spindelgehäuse über dem vorderen Lagerpaar angebracht, ein weiterer Sensor kann in der hinteren Lageraufnahme eingeschraubt werden. Dieser weitere Sensor dient rein zur Überprüfung der Messung um fehlerhafte Messungen ausschließen zu können. Eine weitere Möglichkeit wäre den Sensor über der vorderen Lagerung, um 90° versetzt an dem Spindelgehäuse anzubringen (Sensorpositionen, siehe Abbildung 35)

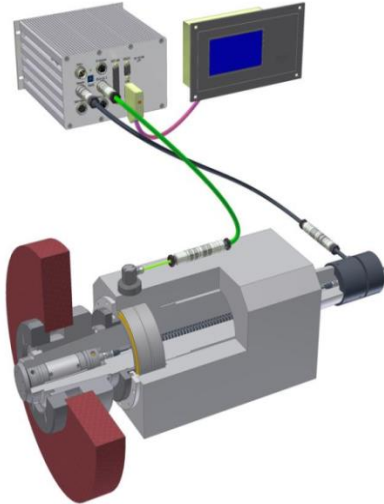


Abbildung 34: Spindelüberwachung mittels Körperschall-/AE Sensor (PCB Piezotronics 2015)

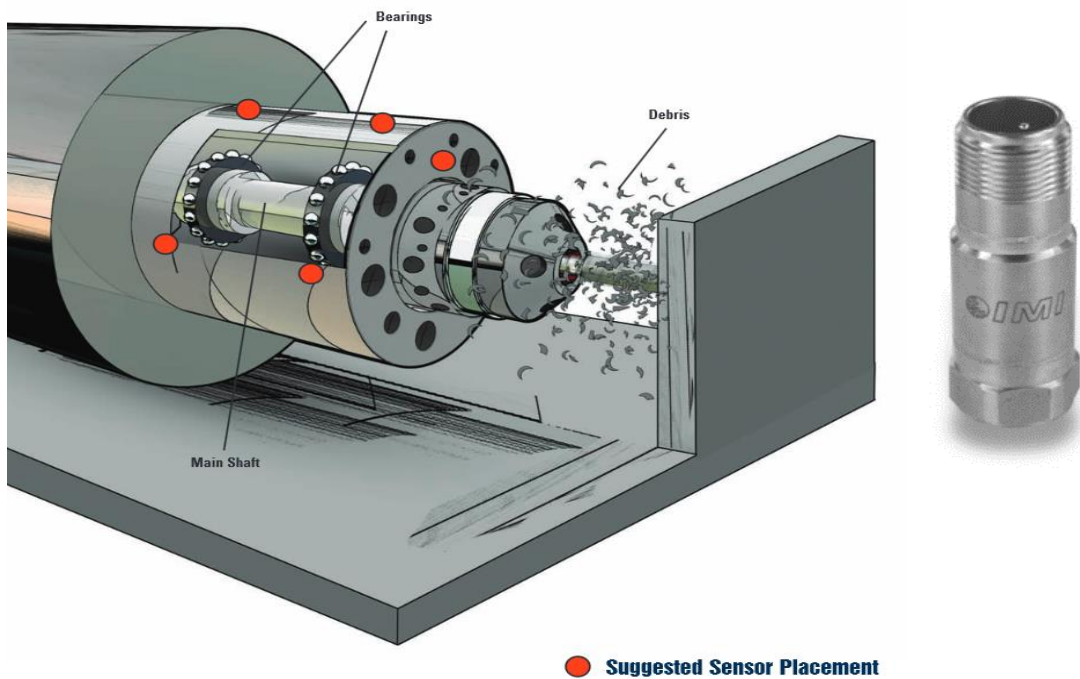


Abbildung 35: empfohlene Sensorposition und dazu geeigneter Sensor (PCB Piezotronics 2015)

4.2.2 *Überwachung der gesamten Maschine*

Körperschallanalysen sind ungeeignet für die Überwachung der ganzen Maschine, es sei denn man würde etliche Sensoren an der Maschine anbringen, jedoch wäre das bei der Auswertung mit hohem Aufwand verbunden.

Luftschall

Um die Überwachung mit Luftschall zu realisieren müssen im Vorfeld ein paar Experimentalversuche durchgeführt werden.

Wie im Abschnitt 4.2.1 bereits erwähnt, müssen gewisse Kriterien erfüllt sein, damit eine Überwachung mit Luftschallsensoren sinnvoll ist.

Besonders in Produktionshallen wird eine Vielzahl von Maschinen zeitgleich betrieben, welche Einfluss auf die zu messende kritische Maschine haben können. Um die Signale der Hintergrundgeräusche filtern zu können, ist es wichtig die Maschinen einzeln zu betreiben. Nur so können die Signale den einzelnen Geräuschquellen zugeordnet werden.

Damit ist gemeint, dass, wenn möglich, alle Maschinen inklusive der kritischen Maschine zuerst im Betrieb aufgezeichnet werden, dann wird die kritische Maschine gestoppt. Alle weiteren Maschinen laufen und es findet eine weitere Messung statt. Als letzten Schritt werden alle Maschinen, der betrachteten Linie, ausgeschaltet und das reine Hintergrundgeräusch wird gemessen. Diese Schritte sind notwendig um eine eindeutige Zuordenbarkeit von den Signalen zu erhalten.

4.2.3 *Werkzeugüberwachung*

Mit diesem Verfahren ist es möglich Rückschlüsse auf den Zustand des Werkzeuges zu ziehen. Werkzeugverschleiß, Werkzeugbruch, sowie die Kontrolle ob einwandfreier Kontakt zwischen Werkzeug und Werkstück vorliegt, kann erkannt werden.

Luftschall

Ein Kondensatormikrofon wird nahe der Kontaktzone zwischen Werkzeug und Werkstück befestigt.

Im Inneren der Maschine werden viele Einflüsse von anderen Komponenten mitgemessen, deshalb müssen diese Störgeräusche lokalisiert und gefiltert werden. Wenn dies gelingt können Änderungen der Schnittkraft als Luftschallsignal detektiert und eine Aussage über Werkzeugverschleiß kann getroffen werden.

Körperschall- bzw. Beschleunigungssensoren

Im Falle eines rotierenden Werkzeuges können die Sensoren an der stehenden Werkzeugaufnahme platziert werden, da sich Körperschall und Vibration an den Anbauteilen weiter ausbreitet. Die Problematik bei drehenden Werkzeugen besteht darin, dass der Sensor die Signale kabellos übertragen werden müssen. Dies bedeutet deutlich höhere Investitionskosten.

Am Beispiel Drehmaschine wäre die Überwachung am Werkzeug einfach zu realisieren, da der Sensor direkt am Meißel angebracht werden kann.

4.3 Conclusio

Nachdem in der Maschinendiagnostik immer ein Vergleichssignal zur Interpretation des Zustandes benötigt wird, muss bei den akustischen Untersuchungen zuerst ein Sollzustand abgenommen werden. Das Problem bei den meisten Komponentenbetrachtungen ist die Lebensdauer. Werkzeuge verfügen vergleichsweise über eine geringe Lebensdauer. Deshalb wurde die Entscheidung getroffen eine Werkzeugzustandsüberwachung umzusetzen, da hierbei die Maschine einfach mit einem verschlissenen Werkzeug bestückt werden kann und daraus Vergleichszustände abgenommen werden können.

Zur Werkzeugzustandsüberwachung sollen Beschleunigungssensoren eingesetzt werden, da die Einflüsse auf die Körperschallsensoren vergleichsweise klein sind. Einflüsse und Schwierigkeiten bei Luftschallsensoren wurden bereits im Kapitel 4.2.1 erwähnt. Aufgrund der Schwierigkeiten ergibt sich ein viel höherer Arbeitsaufwand durch Zuordnung von den Geräuschquellen und im schlechtesten Fall muss zusätzlich mit Korrekturwerten gerechnet werden.

5. Messmittel- und Anlagenauswahl

Aus dem Technologiescreening geht hervor, dass einzig die Werkzeugzustandsüberwachung, aus den zuvor erwähnten Gründen, in Frage kommt. So muss zu Beginn eine Bearbeitungsmaschine gefunden werden, bei der eine Werkzeugzustandsüberwachung sinnvoll ist und diese ohne großen Aufwand ausgerüstet werden kann. Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Bestimmung der zu überwachenden Maschine, sowie der Messgeräte und der benötigten Software zur Umsetzung eines CMS. Die Auswahl der benötigten Sensoren und Messgeräte wurde auf Wunsch von AHM durchgeführt und ist als Empfehlung angedacht. Für die Versuchsdurchführung haben die Verantwortlichen entschieden, vorhandene Messmittel zu verwenden.

5.1 Auswahl Sensorik

Bei der Auswahl der Sensorik ist zu beachten, dass diese für die rauen Bedingungen des Produktionsprozesses geeignet sein muss, da die Anbringung der Sensoren im Inneren der Maschine erfolgt. Wie in Kapitel 2.5.3 bereits erwähnt, sind die meisten Beschleunigungssensoren, hinsichtlich ihrer Schutzklasse, für diese Art der Anwendung geeignet. Da dies meist nur für das Gehäuse des Sensors gilt, muss zusätzlich eine Möglichkeit gefunden werden, die Übertragungskabel zu schützen. Die Firma PCB Group Inc. bietet Sensoren an, die mit metallisch geschützten Übertragungskabel ausgeliefert werden, bereits vorhandene Sensoren können mit einem Kabelschutz aufgerüstet werden.



Abbildung 36: links: Sensoren zur Zustandsüberwachung mit Kabelschutz
rechts: metallisch geschützte Verlängerung des Verbindungskabels
(IMI Armored Sensors 2017)

Bei der Wahl der geeigneten Sensoren konnte auf die Erfahrung der Firmen LB Acoustics, PIM (Professionalis Ipari Merestechnika), und PCB Synotech

Deutschland zurückgegriffen werden. Spezielle Eignung für CM-Anwendungen für Spindeln und somit auch geeignet zur Werkzeugzustandsüberwachung, haben die Modelle der Firma IMI-Sensors, 607A61 und 608A11 (Kurzbeschreibung der technischen Daten siehe Tabelle 7).

Auch die kleine Bauform spricht für die Verwendung dieser Sensoren, da der Messaufbau so wenig Einfluss wie möglich, auf die Fertigung, haben soll.

Tabelle 7: Sensoren zur Werkzeugzustandsüberwachung (IMI Sensors 2017)



Model 607A61	Model 608A11
Empfindlichkeit ($\pm 15\%$): 100 mV/g	Empfindlichkeit ($\pm 15\%$): 100 mV/g
Messbereich: ± 50 g	Messbereich: ± 50 g
Größe: Sechskant 9/16 Zoll Höhe: 25,4 mm	Größe: Sechskant 9/16 Zoll Höhe: 64 mm
Temperaturbereich: - 54 - 121 °C	Temperaturbereich: - 54 - 121 °C
Frequenzbereich: 0.5 bis 10k Hz	Frequenzbereich: 0.5 bis 10k Hz
Kabel: mit Schutz	Kabel: ohne Schutz
Kosten: € 405,-	Kosten: € 210,-

Die Vorgabe seitens AHM war nicht nur rein die Wahl eines geeigneten Sensors, sondern auch die Auswahl der restlichen Glieder der Messkette. Um ein vollständiges CM-System aufzustellen, werden noch eine Datenerfassungseinheit, zur Speicherung der aufgezeichneten Signale, und eine Analyseeinheit benötigt.

5.2 Datenerfassungseinheit

Die Datenerfassungseinheit dient zur Speicherung der Signale, die vom Beschleunigungssensor erfasst werden. Des Weiteren sendet die Datenerfassungseinheit die aufbereiteten Signale an die Analyseeinheit weiter. Dies erfolgt entweder über Netzwerkeinrichtungen (Fernwartung) oder über eine direkte Kabelverbindung zu einer Workstation, die vor Ort bei der Maschine ist.

Hierzu wurden zwei Angebote, eines der Firma LB Acoustics und das zweite von der Firma PIM eingeholt und miteinander verglichen.

Angebot LB Acoustics

Die vorgeschlagene Datenerfassungseinheit wird von der Firma PROSIG vertrieben und bietet die Möglichkeit vier einaxiale ICP-Beschleunigungssensoren anzuschließen. Die Datenerfassung und Übertragung an die Analysesoftware kann in Echtzeit erfolgen oder die Daten werden zwischengespeichert und zu einem späteren Zeitpunkt analysiert.



Abbildung 37: P8004 mit 4 ICP-Eingängen und 1 Tacho Eingang (Prosig 2017)

Angebot PIM

Auch dieser Datensammler kann sowohl Online, als auch Offline betrieben werden. Gleich wie das Produkt von Prosig, verfügt auch dieses Gerät (TPI 9034) über vier Eingänge für ICP-Sensoren. In Kombination mit der Firmensoftware können direkt von der Workstation Alarmgrenzen für die Überwachung gesetzt werden. Ein großer Vorteil dieses Produktes ist der niedrige Preis, laut eigenen Angaben einer der günstigsten am Markt. Ebenso verfügt die Einheit, in Kombination mit der Software, über einen zusätzlichen Temperatur Alarm, wenn der entsprechende Sensor vorhanden ist.



Abbildung 38: Datenerfassungseinheit TPI 9038 (TPI Europe 2017)

Tabelle 8: Vergleich Datenerfassungseinheiten

	LB Acoustics	PMI
Model	Prosig P8004	TPI 9034 / TPI 9038
ICP-Anschlüsse	4	4 / 8
Datenverarbeitung	Online und Offline	Online und Offline
Preis	€ 4.240,-	€ 768,- / € 1110,- ⁶

⁶ Kosten umgerechnet aus Pfund, laut www.tpieurope.com (Ohne Steuern und Lieferkosten)

1 Pfund = 1,1389 (abgerufen am 16.1.2017 um 12:10 Uhr)

5.3 Analysesoftware

Prinzipiell ist es mit beiden Datenerfassungseinheiten möglich, Dateien in Programme, wie MATLAB oder ähnliches, zu exportieren und die Analysesoftware selbst zu programmieren. Der Vorteil einer selbst entwickelten Analysesoftware ist die Möglichkeit der Erweiterungen. Man ist dadurch im Analyseumfang nicht beschränkt. Eine Zugekaufte Analysesoftware verfügt zwar über zahlreiche Analysemethoden, jedoch sind diese manchmal nicht genau an die Anforderungen angeschnitten.

Software LB Acoustics

Auch hier wird ein Produkt der Firma Prosig angeboten, nämlich Prosig Data Basic. Mit dem Erwerb dieser Software können zeitgleich zwei Lizenzen verwendet werden. Die Kosten der zwei Basislizenzen belaufen sich auf € 9300,-. Um alle Analysemöglichkeiten verwenden zu können muss noch ein zusätzliches Tool zugekauft werden. Dies führt zu weiteren € 3.870,- für die Erweiterung (Prosig Dats Rotating Machinery) zum Basisprodukt.

Das macht einen Kostenaufwand von € 13.170,-. Den hohen Kosten ist ein umfangreiches Paket an Analysemöglichkeiten gegenübergestellt. Laut Datenblatt der Firma ist diese Software unter anderem für folgende Anwendungen geeignet: Allgemeine Vibrationsuntersuchungen, Untersuchung von rotierenden Maschinen, Raumakustik, Modalanalysen, Akustische Untersuchungen, „Human Biodynamics“, Strukturanimationen, Produktionstests etc.

Software PIM

Die Software TPI C-Trend II ist eine Analysesoftware für zustandsorientierte Instandhaltung, basierend auf vibrationstechnischen Untersuchungen. Nicht nur klassische Frequenzanalysen sind mit dieser Software möglich, sondern auch spezielle Funktionen zur Lagerüberwachung sind im Umfang inbegriffen. Das Programm ist einfach aufgebaut und auf die Basisanalysen der akustischen Untersuchungen fokussiert. Kosten ca. € 950,-.

Tabelle 9: Softwarevergleich

	TPI C-Trend II	Prosig Data
Anwendung	Klassische Schwingungsanalysesoftware	Viele Möglichkeiten der Überwachung, nicht nur rein vibrationstechnische Untersuchungen
Preis	€ 950,-	€ 13.170,-

5.4 Empfehlung Condition Monitoring System

Tabelle 10: empfohlenes Messequipment

Messequipment	Bezeichnung	Preis
Sensor	Model 607A61	€ 405,-
Datenerfassungseinheit	TPI 9034	€ 768,-
Analysesoftware	C-Trend II	€ 950,-
	<u>Gesamtkosten:</u>	<u>€ 2123,-</u>

Hinsichtlich der starken Preisunterschiede fällt die Entscheidung sowohl bei der Datenerfassungseinheit, als auch bei der Software, zugunsten der Produkte der Firma TPI aus. Die Software verfügt zwar über weniger Funktionsanalysen, jedoch sind die vorhandenen ausreichend für den Anwendungsfall bei AHM.

Als Sensor wurde das Model 607A61 aus zwei Gründen bevorzugt, da einerseits das Kabel bereits über den metallischen Schutz verfügt und andererseits das Kabel, bei der Montage, in alle Richtungen gedreht werden kann und somit ein flexiblerer Aufbau möglich ist. Dies gilt nicht als endgültige Kaufempfehlung, da die Angebote ein halbes Jahr alt sind und neu angefordert werden müssen. Ebenso sollten weitere Angebote überprüft werden. Der Messaufbau kann direkt von experimentellen Versuchen übertragen werden, da der Messaufbau eines Online oder Offline Systems keine Unterschiede aufweist. Die Sensoren werden bei der Festinstallation, anders als in den Versuchen, am Spindelgehäuse verschraubt. Dabei ist zu beachten, dass die Struktur möglichst steif ist und der Sensor so nahe wie möglich am Werkzeug montiert wird.

5.5 Messequipment für Versuchsdurchführung

Da sich die Verantwortlichen von AHM dazu entschieden haben, bei der Versuchsdurchführung auf vorhandenes Messequipment zu setzen, war die Auswahl der Messgeräte eingeschränkt. Die benötigten Sensoren und die Datenerfassungseinheit wurden für den jeweiligen Versuchstag ausgeliehen. Dadurch verzögerte sich die eigentliche Versuchsdurchführung, da die Anbringung der Messgeräte an jedem Versuchstag neu erfolgte.

5.5.1 Beschleunigungssensoren

Zur Signalerfassung wurden piezoelektrische Mini-Beschleunigungssensoren der Firma Dytran verwendet. Aufgrund ihrer kleinen Bauform eignen sie sich gut für den Einbau in den Maschinenraum, ebenso verfügen sie über einen ausreichend hohen Frequenzbereich.



Abbildung 39: Beschleunigungssensor DYTRAN Model 3224A1 (Dytran 2017)

Bei der Montage der Sensoren ist darauf zu achten, dass die Übertragungskabel zur Datenerfassungseinheit so verlegt werden, dass sie durch die heißen wegfliegenden Späne nicht beschädigt werden. Deshalb wurde über die Sensoren und Kabel ein Aluminium-Tape zum Schutz geklebt, welches über eine höhere Temperaturbeständigkeit verfügt, als die Kunststoffkabel.

Tabelle 11: DYTRAN 3224A1 (Dytran 2017)

Produktspezifikationen

Sensorgewicht (ohne Kabel)	0,2 g
Art des Sensors	Piezoelektrischer Beschleunigungssensor
Sensitivität	9,68 mV/g
Frequenzbereich	0,3 – 20.000 Hz
Resonanzfrequenz	95 kHz
Temperaturbereich	-51 bis 141°C

5.5.2 Datenerfassungseinheit

Das SQuariga II von HEAD kann entweder im Stand-alone Betrieb (Speicherung auf SD-Karte), mit bis zu 6 Stunden Akkubetrieb, oder als Frontend (USB Verbindung zu PC) Daten aufzeichnen.

Das Gerät eignet sich nicht nur rein zur Aufnahme, es führt ebenso eine Vorverarbeitung und Analyse der Signale durch und kann diese akustisch wiedergeben. Für die Versuche bei AHM wird der Datensammler offline betrieben und im Anschluss werden die Signale mit der Software von HEAD Acoustics aufbereitet.

Tabelle 12: Datenerfassungseinheit (Head SQuadriga II 2017)

Produktspezifikation



Abbildung 40: (Head SQuadriga II 2017)

Aufnahmeformat: 16 oder 24-Bit

Abtastfrequenzen:

8,16,32; 44,1; 48; 51,2;64;
88,2; 96 kHz

FFT basierte Echtzeitanalysen:

FFT, Oktave, Terz, Spez. Lautheit

Anschlüsse: 6x ICP/Line; Kopfhörer,
USB, Headset für gehörliche
Aufnahme

5.5.3 Analysesoftware

Wie bereits erwähnt, verwendet HEAD Acoustics ihre eigene Software, Artemis SUITE. Mit diesem Programm können alle grundlegenden Analysen, wie FFT, Oktav-, Terz, Wavelet- und Ordnungsanalysen etc., durchgeführt werden. Des Weiteren erlaubt die Software die Dateien in Formate zu exportieren, welche eine Datenverarbeitung in Excel, MatLab oder einem ähnlichen Programm zulässt.

Im Rahmen der Versuche wurden die Signale in Artemis SUITE aufbereitet und in Excel analysiert. Die 2D-Spektren (Amplitude über Zeit) und 3D-Farbspektren (Farbe indiziert die Amplitudenstärke) werden direkt mit der Software erstellt.

5.5.4 Drehzahlsensor

Da eine Ordnungsanalyse eine Drehzahlerfassung voraussetzt, musste die Drehzahl extern mit einem laseroptischen Drehzahlsensor mitgemessen werden.

Dazu wurde die kompakte Bauform des Triggersignal-Geber / Drehzahlsensor Typ VIB 6.631 verwendet. (db-Prüftechnik 2017)

5.6 Produktionslinienauswahl für Umsetzung

Aufgrund der Zusammenarbeit im TPM 4.0 Projekts zwischen der TU Graz und Audi an der Pilot-Pleuellinie, war anfänglich eine Zustandsüberwachung an dieser Linie angedacht. Einen Überblick über die Bearbeitungsschritte der Pilot-Pleuellinie soll Abbildung 41 geben. Für die Anwendung der Werkzeugzustandsüberwachung sind prinzipiell alle Arbeitsfolgen (AF), bei denen eine Schleif-, Bohr- oder Fräsbearbeitung stattfindet, geeignet. Jedoch weisen alle diese AF eine geringe Ausfallsrate und hohe Verfügbarkeit auf, deshalb würde es, im Zeitraum der geplanten Betrachtung, keine merklichen Veränderungen am Werkzeug geben und dadurch auch keine zufriedenstellenden Ergebnisse. Ausgehend von dieser ersten Betrachtung soll eine AF gefunden werden, die höhere Ausfallraten aufweist, denn nur dann ist eine Zustandsüberwachung wirtschaftlich und technisch sinnvoll.

Parallel zu dieser Arbeit wird eine weitere Diplomarbeit verfasst, die sich unter anderem mit der Bewertung der Kritikalität der AF auseinandersetzt. Als Ergebnis dieser und auch weiterer Untersuchungen im Rahmen des TPM Projekts, wurde die AF40 als kritische AF der Pilot-Pleuellinie identifiziert. Die Schwachstelle und somit auch Ursache der Stillstände der AF40 ist unter anderem die Verschraubung des Crackkopfes. Der zweiteilige Crackkopf wird mit Hilfe von 4 Schrauben zusammengehalten, welche zu schwach dimensioniert sind. Bricht eine dieser Schrauben, kommt es beim Crackvorgang zu Abweichungen von der geforderten Produktqualität. Technisch gesehen ist eine Zustandsüberwachung der Crackanlage umsetzbar, jedoch spricht der wirtschaftliche Faktor dagegen. Der Aufwand für die Überwachung wäre zu groß. Wesentlich einfacher ist, die Konstruktion des Crackkopfes zu ändern und Schrauben mit höherer Festigkeit zu verwenden.

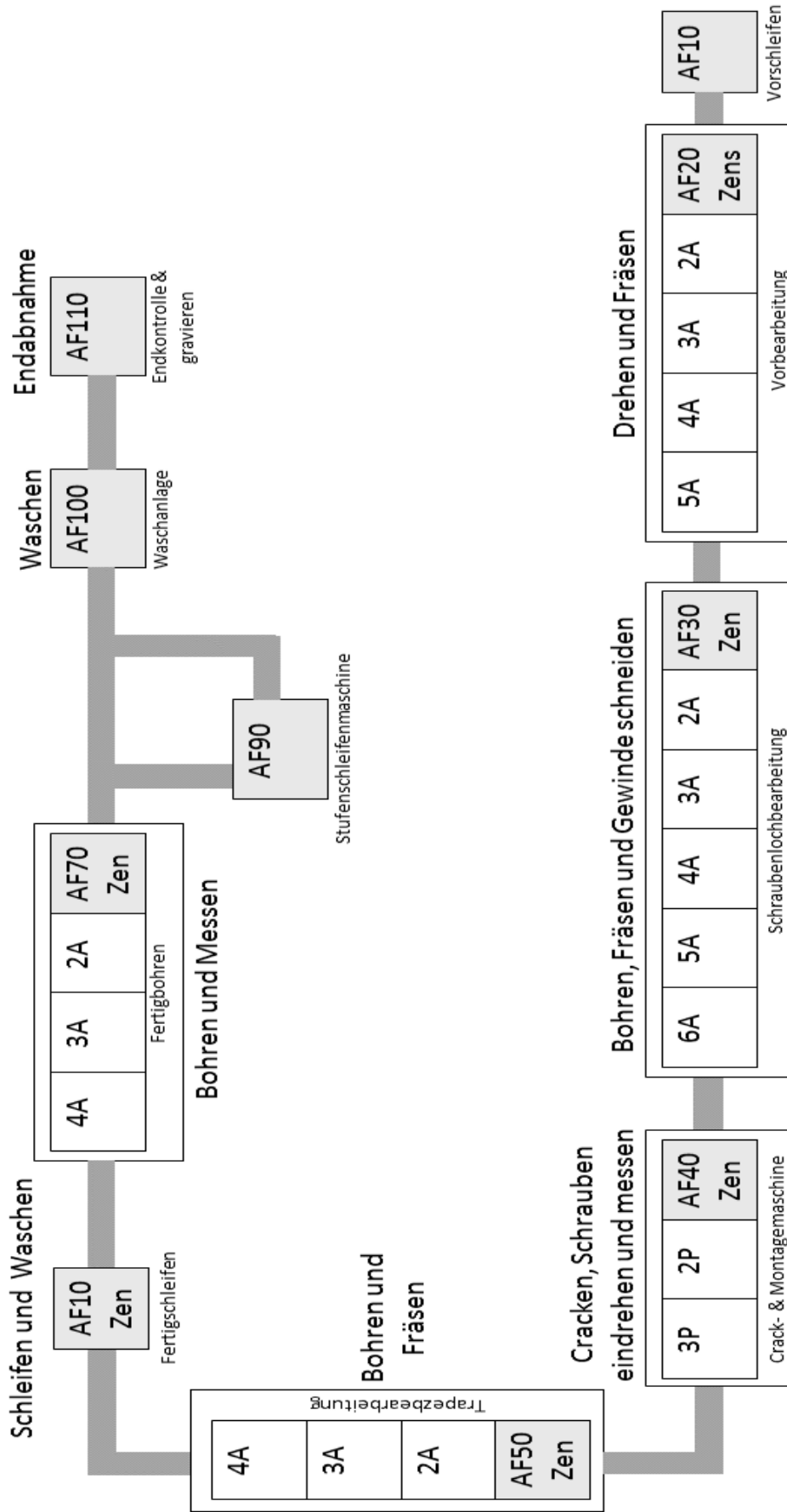


Abbildung 41: Bearbeitungsschritte Pilot-Pleuelinie

Bezüglich dieser technisch und wirtschaftlich begründeten Tatsachen, wird die Zustandsüberwachung nicht an dieser Linie umgesetzt und der Fokus wird auf Bearbeitungsmaschinen gelegt, welche bei vielen Produktionslinien des Unternehmens im Einsatz sind. Deshalb ist der Maschinentyp ebenso ein entscheidender Faktor bei der Umsetzung. Die experimentellen Untersuchungen dieser Arbeit sollen als Grundlage für eine flächendeckende Umsetzung in der gesamten Produktion dienen.

Ebenso entscheidend ist die Tatsache, dass beim Aufbau des Überwachungssystems die Anlage bzw. die gesamte Linie im Stillstand sein muss. Da bei den meisten Linien keine geplanten Stillstände vorgesehen waren und ein Produktionsstopp wirtschaftlich nicht denkbar ist, wurde gemeinsam mit den Verantwortlichen entschieden, die Zustandsüberwachung an einer Anlage umzusetzen, die nicht direkt im Produktionsprozess eingebunden ist.

Die Umsetzung der Zustandsüberwachung erfolgte an einer 5-Achsen CNC Maschine der Firma GROB (Typ 500), welche als alleinstehende Maschine für Sonderarbeiten verwendet wird.



Abbildung 42: CNC Maschine G500 (Grob Werke 2017)

- 5-Achsen
CNC-Maschine
- 1 Hauptspindel für
Werkzeugantrieb
- Werkzeugrevolver mit
bis zu 25 Werkzeugen
- Drehzahlen bis
16000 U/min
- Drehmoment bis
690 Nm

Der einzige Unterschied zu den Produktionslinien ist, dass die Maschine, welche für unsere Untersuchungen ausgewählt wurde (Typ: GROB G500), über eine Antriebsspindel für das Werkzeug verfügt, in der Produktion verfügen die Maschinen über zwei Hauptantriebsspindeln (Typ: GROB G520 und G320).

Im Tagesgeschäft werden mit dieser Anlage Spezialanfertigungen für die Produktion hergestellt und auch neue Fertigungsverfahren, welche nach erfolgreicher Durchführung an den Linien umgesetzt werden sollen, erprobt.

6. Experimentelle Versuchsdurchführung

Ziel der Versuche ist ein Vergleich der Schwingungssignale von neuem und verschlissenem Werkzeug, um daraus eine Aussage treffen zu können, ob es möglich ist den Werkzeugzustand abzuleiten. Die Durchführung der Versuche mit dem verschlissenen Werkzeug dient zur Abschätzung der Grenzwerte. In Abbildung 43 sieht man einen beispielhaften Signalverlauf, mit definierten Zuständen, eines Werkzeuges mit festgelegtem Verschleißgrenzwert, welcher durch den Signalverlauf eines verschlissenen Werkzeuges definiert wird.

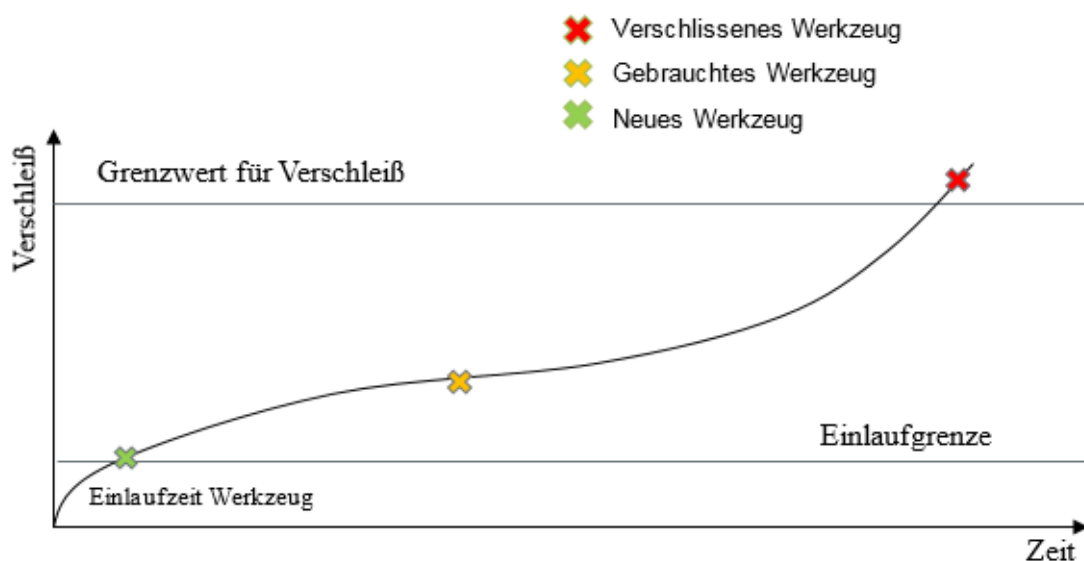


Abbildung 43: Werkzeugverschleißkurve (vgl. Weck, Brecher 2006, p. 361)

Grundsätzlich können die Versuchsreihen in zwei Gruppen unterteilt werden.

- Vorversuche
Die Voruntersuchungen dienen in erster Linie zur Bestimmung der optimalen Sensorposition und sollen die erste Abschätzung geben, ob es möglich ist die unterschiedlichen Werkzeugzustände im Schwingungssignal zu erkennen.
- Hauptversuche
Die Ergebnisse der Vorversuchsreihe dienen als Grundlage für die Versuchsdurchführung. Es wird konkret auf die Untersuchung verschiedener Materialien, bei gleicher Bauform, eingegangen. Dies soll auf einen produktionsnahen Realversuch überleiten.

Alle Versuche wurden mit den zuvor erwähnten Messgeräten (Kapitel 5.5, Seite 74), an derselben Bearbeitungsmaschine (GROB G500) durchgeführt. Die Versuchsdurchführung bedient sich unterschiedlicher Bearbeitungsparameter, da die Versuche unterschiedliche Ziele verfolgen.

Die Bearbeitungen während den Versuchen sind reine Fräsbearbeitungen, dabei werden mindestens zwei Werkzeuge miteinander verglichen. Im ersten Hauptversuch werden drei Werkzeuge eingesetzt. Deshalb kommt es hier zum Vergleich von drei Werkzeugzuständen.

Tabelle 13: Begriffsdefinition Werkzeugzustände

Neues Werkzeug	Als neues Werkzeug wird in den Versuchen ein Fräser beschrieben, der entweder noch nie im Einsatz war oder mit neuen Wendeschneidplatten bestückt ist. Daraus leitet sich auch der Zustand, neuer Werkzeugzustand ab.
Gebrauchtes Werkzeug	Als gebrauchtes Werkzeug wird ein Fräser (Wendeschneidplatten des Fräasers) beschrieben, welches schon über eine gewisse Zeit im Einsatz war. Dieses Werkzeug befindet sich, bezogen auf dem Verschleiß, zwischen dem neuen und dem verschlissenen Werkzeug. Eine exakte Aussage an welchem Punkt der Verschleißkurve dieser Werkzeugzustand sich befindet, kann hinsichtlich unzureichender Informationen nicht getroffen werden.
Verschlissenes Werkzeug	Als verschlissenes Werkzeug wird ein Fräser (Wendeschneidplatten des Fräasers) bezeichnet, welches in der Produktion hinsichtlich fortgeschrittenen Verschleißes nicht mehr zum Einsatz kommt. Das Werkzeug ist an den jeweiligen Linien aussortiert worden, da das Werkzeug die festgelegte Lebensdauer bereits überschritten hat. Die Grenze des zulässigen Werkzeugverschleißes wurde mit diesem Werkzeug überschritten, deshalb die Bezeichnung, verschlissener Werkzeugzustand.

Tabelle 14: Übersicht Versuchsparemeter

	1. Vorversuch	2. Vorversuch	1. Hauptversuch	2. Hauptversuch
Werkstück	ZKG (R4)	ZKG (R4)	Speziell angefertigte Rundproben	ZKG (R4, V6)
Material	Stahlguss	Stahlguss	Aluminium Stahlguss Grauguss	Stahlguss Aluminiumguss
Anzahl Sensoren	3	2	3	3
Bearbeitungsparameter				Stahlguss / Aluminium
Drehzahl	n = 1500 U/min	n = 1500 U/min	n = 1500 U/min	n = 533 / 8000 U/min
Vorschub	v _c = 1500 U/min	v _c = 1500 U/min	v _c = 1500 U/min	v _c = 1551 / 17280 U/min
Bearbeitung/WKZ				
Materialabtrag	0,5 mm	0,5 mm	0,5 mm	0,5
Zyklen	5	5	2	4
Bearbeitungsschritte/Zyklus	3	3	2	3 / 2
=Bearbeitungsschritte gesamt	15	15	4	12 / 8
Verwendete Werkzeuge	Neues und verschlissenes Werkzeug	Neues und verschlissenes Werkzeug	Neues, gebrauchtes und verschlissenes Werkzeug	Neues und verschlissenes Werkzeug pro Werkstück
Abtastrate	44100 Hz	24000 Hz	24000 Hz	24000 Hz

6.1 Erster Vorversuch

Dieser Vorversuch dient in erster Linie um geeignete Positionen für die Anbringung der Sensoren zu finden. Dazu wurden drei Beschleunigungssensoren an verschiedenen Position der Spindel angebracht und im Anschluss die Signale verglichen, um entscheiden zu können welche Position besser geeignet ist.

6.1.1 Vorgehensweise

Tabelle 15: Parameter des ersten Vorversuchs

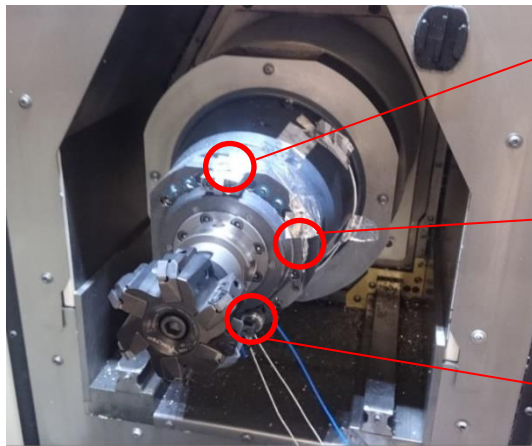
Ziel	Bestimmung der idealen Sensorposition; Vergleich der Schwingungssignale der Werkzeuge
Werkstück	Stahlguss ZKG
Werkzeuge	Stirnfräser Ø 80 mm 6 Wendeschneidplatten Neues Werkzeug Verschlissenes Werkzeug
Bearbeitungsparameter	
Drehzahl	n = 1500 U/min
Vorschub	v _c = 1500 mm/min
Sensoren	
Beschleunigungssensoren	2 einaxiale Sensoren 1 triaxialer Sensoren
Bearbeitung pro Werkzeug	
Zyklen	5
Bahnen/Zyklus	3
Abtrag/Zyklus	0,5 mm
Bearbeitungsschritte gesamt (= Zyklen x Bahnen)	15 (2,5 mm Gesamtmaterialabtrag)

6.1.2 Durchführung

Um die Werkzeugschwingungen erfassen zu können, ist es notwendig, dass die Sensoren so nah wie möglich an der Quelle positioniert sind. Da die Schwingungen über die Maschinenstruktur weitergeleitet werden, erfolgt die Montage der Sensoren am stehenden Spindelgehäuse. Prinzipiell ist immer darauf zu achten, dass im Bereich des Kraftflusses eine möglichst steife Maschinenstruktur vorhanden ist, nur so können die Schwingungssignale so gut wie möglich übertragen werden.

Sensorpositionierung

Die Montage der Sensoren erfolgte durch eine Klebeverbindung, da eine Verschraubung der Sensoren, laut den Vorgaben des Maschinenherstellers, an dieser Antriebsspindel nicht möglich ist.



Position 1:
Einaxialer Sensor Fa. Dytran

Position 2:
Einaxialer Sensor Fa. Dytran

Position 3:
Triaxialer Sensor Fa. IMI-Sensors

Abbildung 44: Übersicht Sensoren

In diesem Vorversuch wurde zusätzlich ein triaxialer Sensor verwendet, welcher über eine Montagevorrichtung mit Haftmagneten verfügt. Wenn möglich, sollte der Sensor immer eingeschraubt werden, da sich dadurch eine bessere Schwingungsübertragung von der Maschine an den Sensor einstellt und die Sensorposition eindeutig bestimmt ist, dies erhöht die Reproduzierbarkeit der Versuche.

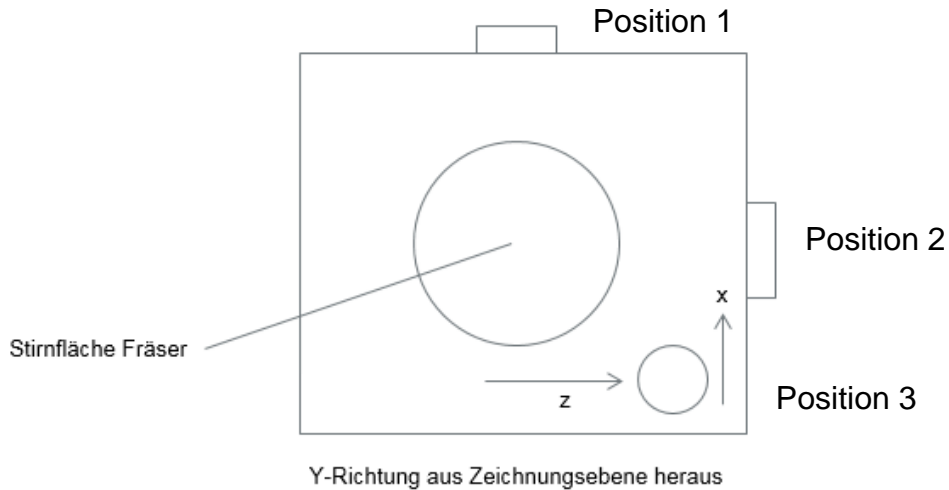


Abbildung 45: Skizze Sensorpositionen

In dieser Untersuchung wurden die Bearbeitungen mit neuem und verschlissenem Werkzeug direkt hintereinander durchgeführt, was bedeutet, dass die Sensorposition dieselbe und der Dämpfungseinfluss des Klebers bei beiden Werkzeugen gleich groß war.

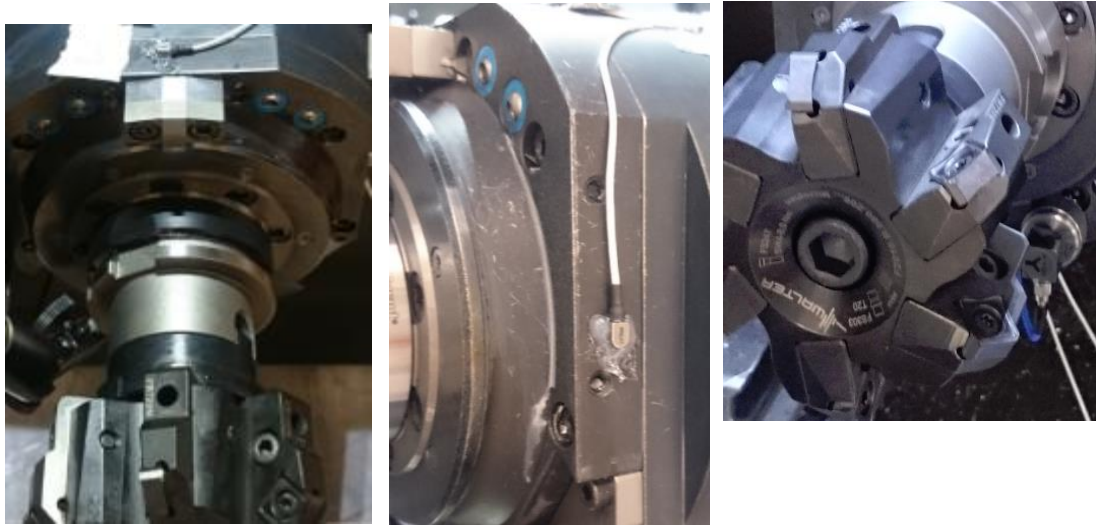


Abbildung 46: Sensorenposition

Links: obere Position 1, Mitte: seitliche Position 2, Rechts: stirnseitige Position 3

In Zusammenarbeit mit den Akustikern von Audi wurde entschieden, dass die Position 1 am besten zur Auswertung geeignet ist, ebenso ist die Anbringung der Sensoren besser als auf der Seite.

Werkstück



Abbildung 47: R4 ZKG aus Stahlguss

Bearbeitungsvorgang

Es handelt sich um das ZKG eines Vierzylindermotors, bei dem im Versuch die Kopffläche, einmal mit dem neuen und einmal mit dem verschlissenen Werkzeug, stirngefräst wurde. Mit der CNC Maschine wurden fünf Bearbeitungszyklen pro Werkzeug, zu je drei Bearbeitungsbahnen und 0,5 mm Abtrag gefahren. Der Grund, dass mehrere Bearbeitungsschritte gefahren wurden, ist dass stochastische Fehler ausgeschlossen werden können und auch dass die Maschine sich bereits im eingeschwungene Zustand befindet.

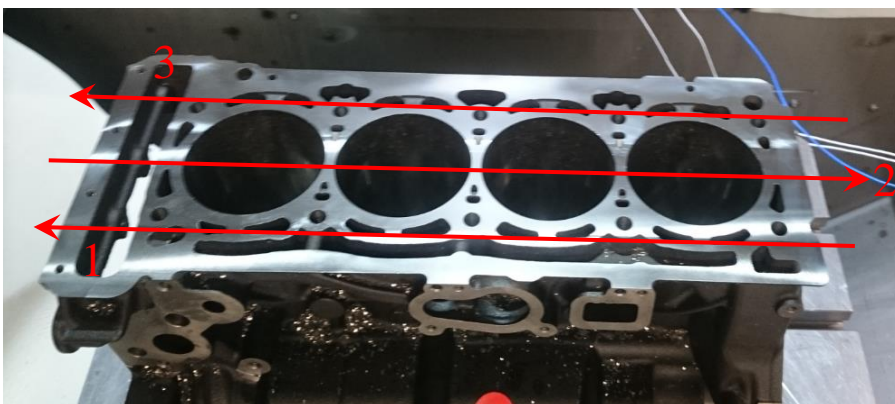


Abbildung 48: Bearbeitungsschritte eines Abtrages
3 Bearbeitungsschritte = 1 Bearbeitungszyklus

6.1.3 Ergebnis

Da bereits die geeignete Sensorposition mittels Vorabschätzungen und Beratung der Akustikabteilung während des Versuches ermittelt wurde, werden in den Ergebnissen nur die Spektren des Sensors der ersten Position aufgezeigt.

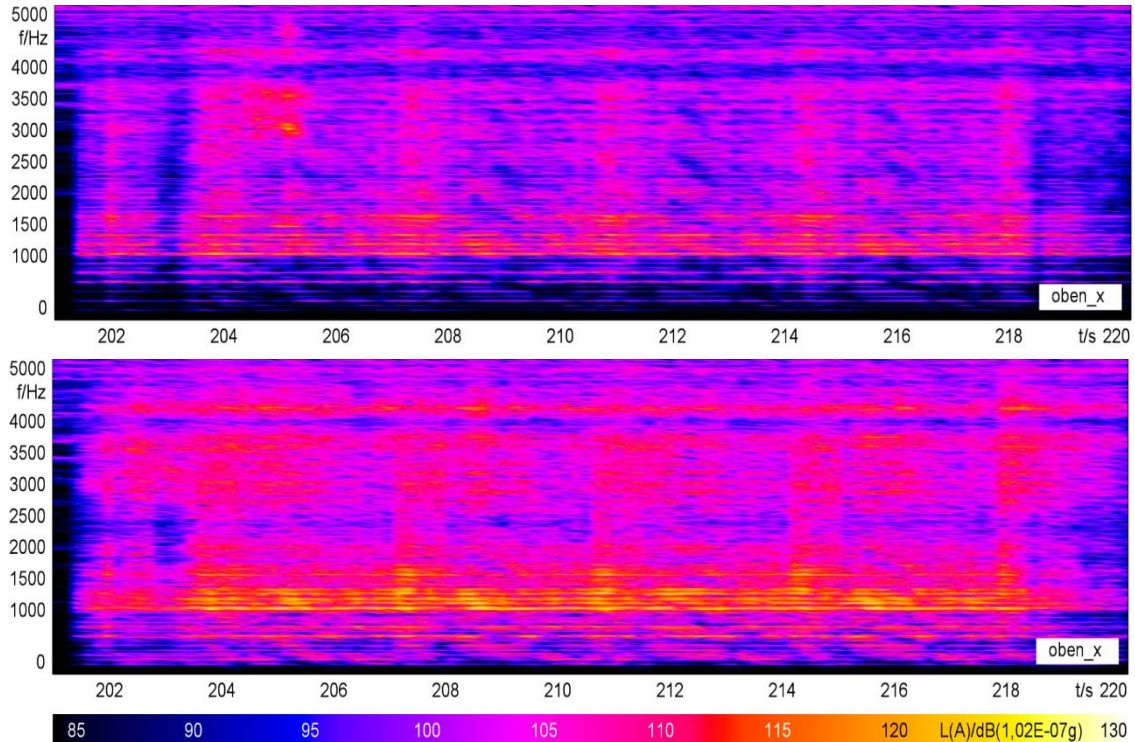


Abbildung 49: 3D-Frequenzspektrum

oben: neues Werkzeug; unten: verschlissenes Werkzeug

Es geht beim ersten Vorversuch rein um eine erste Vorabschätzung, ob es mit Signalanalysen möglich ist, Werkzeugzustände aus dem aufgezeichneten Signal abzuleiten. Deshalb wird hier vorerst auf genaue Signalanalysen verzichtet. Bei der Analyse werden immer die gleichen Bearbeitungsschritte miteinander verglichen, wie in diesem Versuch, der neunte Bearbeitungsschritt (= neunte Messung) des neuen Werkzeuges mit dem neunten des verschlissenen Werkzeuges. Diese neunte Messung wurde hier zum Vergleich herangezogen, da die dritte Bahn des Zyklus die höchsten Amplituden im Signal aufweist (Bearbeitungsschritte/Zyklus, siehe Anhang, Tabelle 28). Aus dem 3D-Spektrum ist es möglich zu jedem Zeitpunkt, bei einer gewissen Frequenz die dazugehörige Amplitude (Farbskala) zu ermitteln.

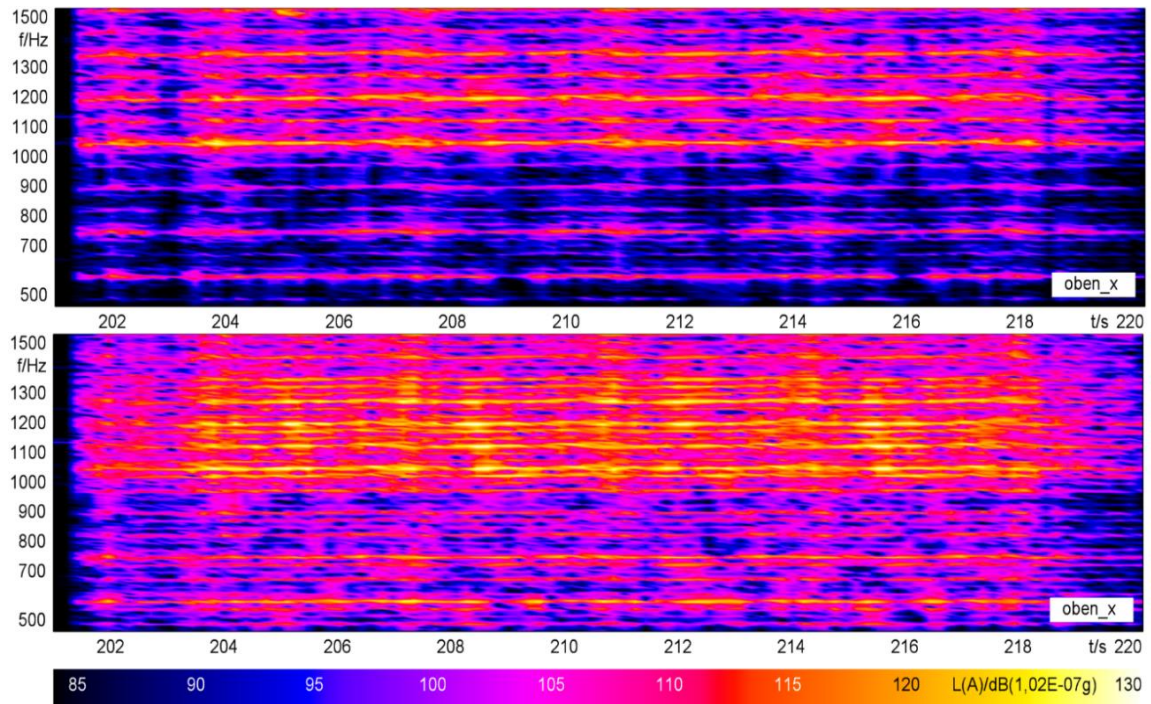


Abbildung 50: 3D-Frequenzspektrum (eingeschränkter Frequenzbereich)
oben: neues Werkzeug; unten: verschlissenes Werkzeug

6.1.4 Diskussion

In Abbildung 49 ist im Bereich von 1000 – 1500 Hz einen eindeutigen Anstieg der Amplitude erkennbar, die Bereiche von 120dB und mehr sind beim verschlissenen Werkzeug über den ganzen Bearbeitungszeitraum zu erkennen.

Allgemein kann im gesamten Spektrum ein leichter Amplitudenanstieg identifiziert werden. Abbildung 50 zeigt das 3D-Spektrum mit eingeschränktem Frequenzbereich, um diese Bereiche höherer Amplituden besser hervorzuheben.

Die Datenmenge, die bei der Auswertung dieses Versuches angefallen ist war sehr groß, dies ist auf die hohe Abtastrate bei der Datenerfassung zurückzuführen. Deshalb wurde diese bei den Folgeversuchen gesenkt, da auch eine Abtast-rate von 24000 Hz, laut dem Abtasttheorem nach Shannon, für die Auswertung vollkommen ausreichend ist (siehe Kapitel 3.9.2; Seite 47).

Als schwierig erwies sich die Interpretation des Signales des triaxialen Sensors. Dieser verzeichnete mehr Rauschen im Signal als die anderen Sensoren. Der Vorteil eines triaxialen Sensors gegenüber mehreren Sensoren ist die Gewichtseinsparung gegenüber mehreren einaxialen Sensoren. Des Weiteren muss beim triaxialen Sensor nur ein Verbindungskabel verlegt werden, jedoch werden wie bei drei einaxialen Sensoren drei Anschlüsse an der Datenerfassungseinheit benötigt. Da für die Zustandsbeurteilung nur die Schwingungen, welche durch die radiale Kraftkomponente verursacht wird, relevant sind, konnte auf den Einsatz eines triaxialen Sensors verzichtet werden.

Aus diesem Zustandsvergleich ist erkennbar, dass das verschlissene Werkzeug zu deutlich höheren Schwingungen anregt. Somit lässt der Vorversuch bereits vermuten, dass es möglich ist aus dem Schwingungssignal den Zustand des Werkzeuges ableiten zu können.

Aufbauend auf diesem Ergebnis, soll ein weiterer Vorversuch mit Drehzahlerfassung durchgeführt werden, um die Bandbreite der Analysemöglichkeiten zu erweitern.

6.2 Zweiter Vorversuch

Nachdem im ersten Vorversuch bereits erfolgreich ein Unterschied zwischen den Werkzeugzuständen aufgezeigt wurde, zielt dieser Vorversuch darauf ab, die Spektren der zwei Vergleichszustände genauer zu betrachten. Im Gegensatz zum ersten Versuch, wird zusätzlich ein Drehzahlsensor an der Maschine angebracht, um eine Ordnungsanalyse des Signales durchführen zu können (siehe Kapitel 3.10.2, Seite 55)

6.2.1 Vorgehensweise

Tabelle 16: Parameter zweiter Vorversuch

Ziel	Vergleich Schwingungssignale verschiedener Werkzeuge, Ordnungsanalyse
Werkstück	Stahlguss ZKG
Werkzeuge	Stirnfräser Ø 80 mm 6 Wendeschneidplatten Neues Werkzeug Verschlissenes Werkzeug
Bearbeitungsparameter	
Drehzahl	$n = 1500 \text{ U/min}$
Vorschub	$v_c = 1500 \text{ mm/min}$
Sensoren	
Beschleunigungssensoren	2 einaxiale Sensoren
Drehzahlsensor	laseroptisch
Bearbeitungszyklen/Wkz.	5
Bahnen/Zyklus	3
Abtrag/Zyklus	0,5 mm
Bearbeitungsschritte gesamt (= Zyklen x Bahnen)	15 (2,5 mm Gesamtmaterialabtrag)

6.2.2 Durchführung

Von dem Bearbeitungsverlauf und den Bearbeitungsparameter gleicht der Versuch exakt dem ersten Vorversuch. Auch dasselbe Werkstück wurde verwendet, nur die Sensoranordnung unterscheidet sich.

Sensorpositionen

Theoretisch wäre ein Sensor ausreichend, jedoch wurde vor der Durchführung entschieden, einen zweiten Sensor anzubringen. Dies dient rein zur Absicherung, sollte der eine Sensor Probleme bei der Aufzeichnung haben oder, im schlechtesten Fall, ausfallen, könnten die Signale des zweiten Sensors ausgewertet werden. Der optische Drehzahlsensor wurde mit Hilfe eines Haftmagnets seitlich am stehenden Spindelgehäuse fixiert. Für den seitlichen Sensor wurde eine neue Position für die Platzierung ausgewählt, um zu sehen, ob im Signal Unterschiede zum ersten Versuch zu erkennen sind.

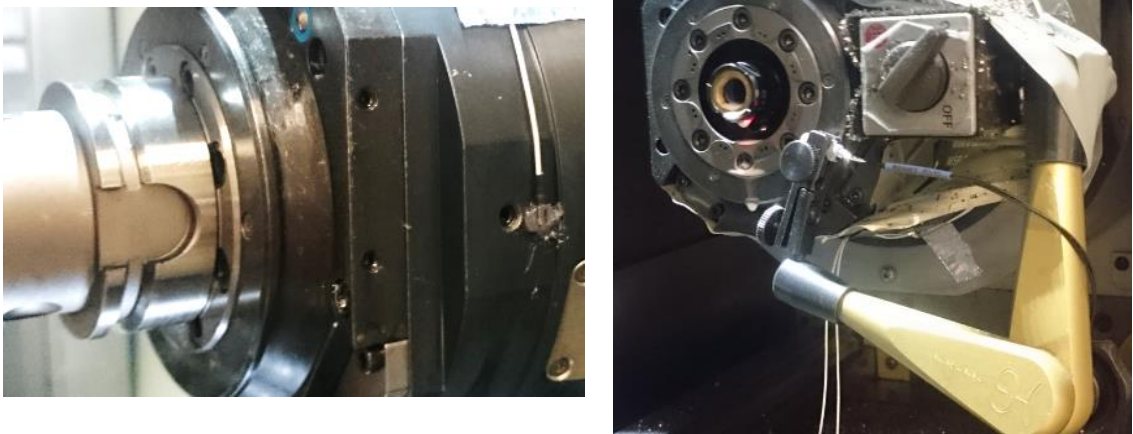


Abbildung 51: links: versetzte Sensorposition; rechts: laseroptischer Drehzahlsensor

Für die Drehzahlerfassung wurde ein reflektierender Klebestreifen an der drehenden Welle angebracht, welcher den Laserstrahl an den Sensor zurückreflektiert und so die Drehzahl erfasst. Dabei muss darauf geachtet werden, dass die Oberfläche fettfrei ist, da ansonsten der Streifen abfällt und die Messung wiederholt werden muss.

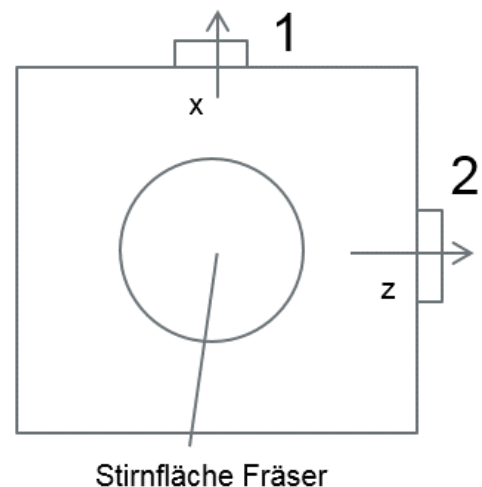


Abbildung 52: Sensorposition Maschinenvorderansicht

Bearbeitungsvorgang

Wie bereits zuvor erwähnt, unterscheidet sich der Bearbeitungsvorgang nicht vom ersten Vorversuch, die Bearbeitungsparameter wurden ebenso gleich gewählt, da diese wie schon im ersten Versuch vom Maschinenbediener empfohlen wurden. Die Wendeschneidplatten, welche im ersten Versuch verwendet wurden, wurden ausgetauscht, um wieder den Vergleich mit neuen Wendeschneidplatten zu erhalten. Daraus ergeben sich wieder 15 Bearbeitungsschritte pro Werkzeug. Bei den untersuchten Gusswerkstoffen kann Materialinhomogenität nicht ausgeschlossen werden. Dies kann sich als Abweichungen im Signal des Bearbeitungsverlaufes widerspiegeln. Beim Vergleich der Signale der beiden Werkzeuge, im 2D-Spektrum (Abbildung 55 und Abbildung 56), musste die Nullpunktsetzung manuell erfolgen, das bedeutet es könnte vorkommen, dass die Zeiten der Signale leicht versetzt verglichen werden.

Einen Überblick über die Bearbeitungsschritte soll das Bypasssignal in Abbildung 53 zeigen. Ein Bypass zeigt das Zeitsignal (Amplitude über die Zeit) einer Schwingung, ohne dass im Vorhinein Analysen benötigt werden.

(vgl. Head Acoustics 2016a)

6.2.3 Ergebnis

1-15 = Bearbeitungsschritte (entspricht einer Messung)

1. Bearbeitungsschritt = 1. Messung

X = Zyklus (Materialabtrag gesamte Oberfläche = 3 Bearbeitungsschritte)

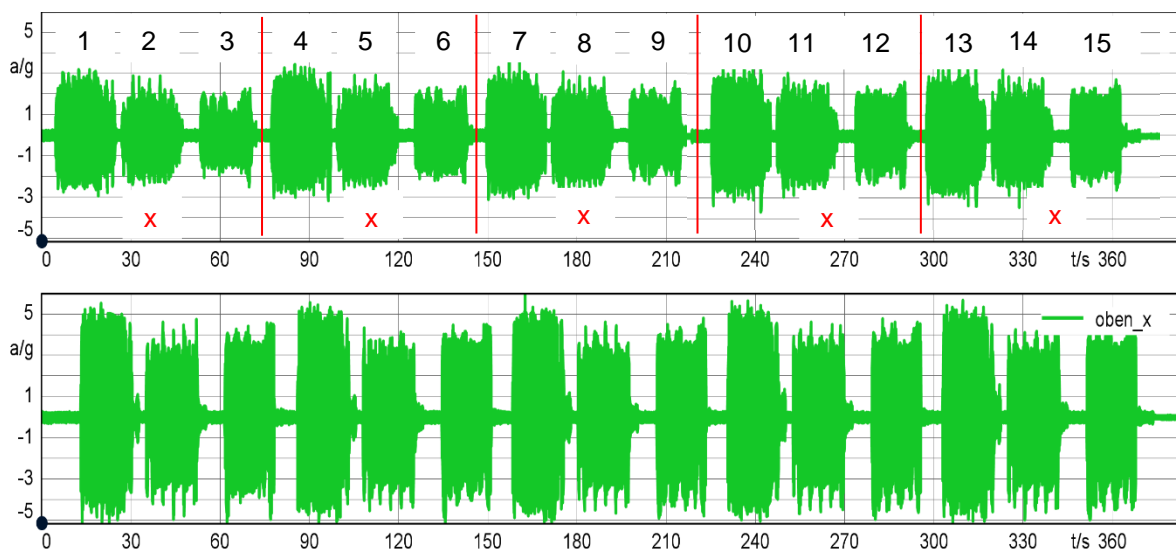


Abbildung 53: Bypass der Bearbeitung (5 Zyklen, 15 Bearbeitungsschritte);

oben: neues Werkzeug, unten: verschlissenes Werkzeug

Da der erste, vierte, usw. Bearbeitungsschritt, welcher den Eintritt des Werkzeuges in das Material kennzeichnet, leicht höhere Amplituden aufweist, sollen unter anderem diese „Eintrittssignale“ miteinander verglichen werden. Zusätzlich betrachtet wird der sechste Bearbeitungsschritt, welcher geringere Ausschläge aufweist, als die anderen.

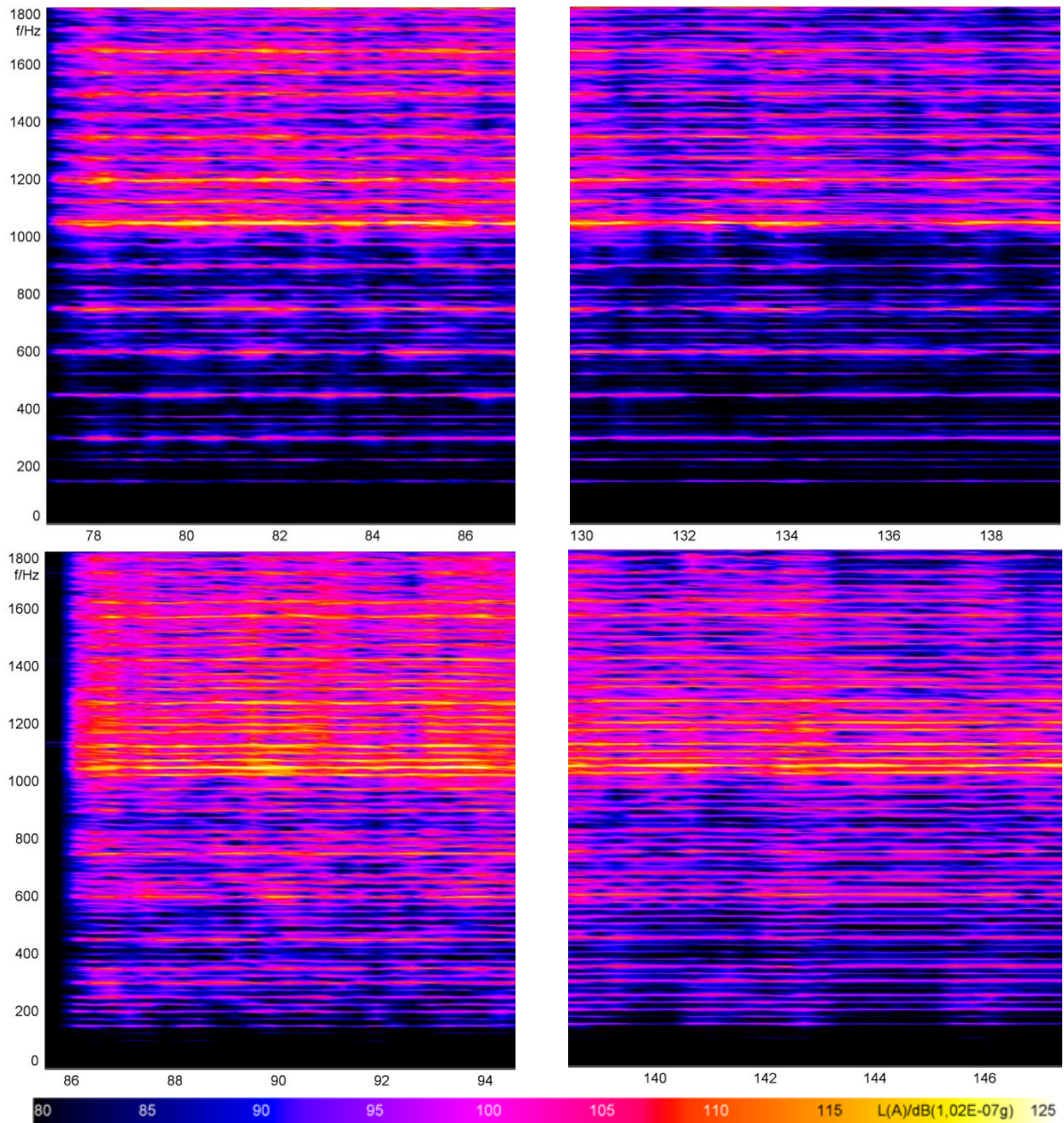


Abbildung 54: links: 3D- Spektrum vierte Bearbeitung; rechts: 3D- Spektrum sechste Bearbeitung
oben: neues Werkzeug; unten verschlissenes Werkzeug

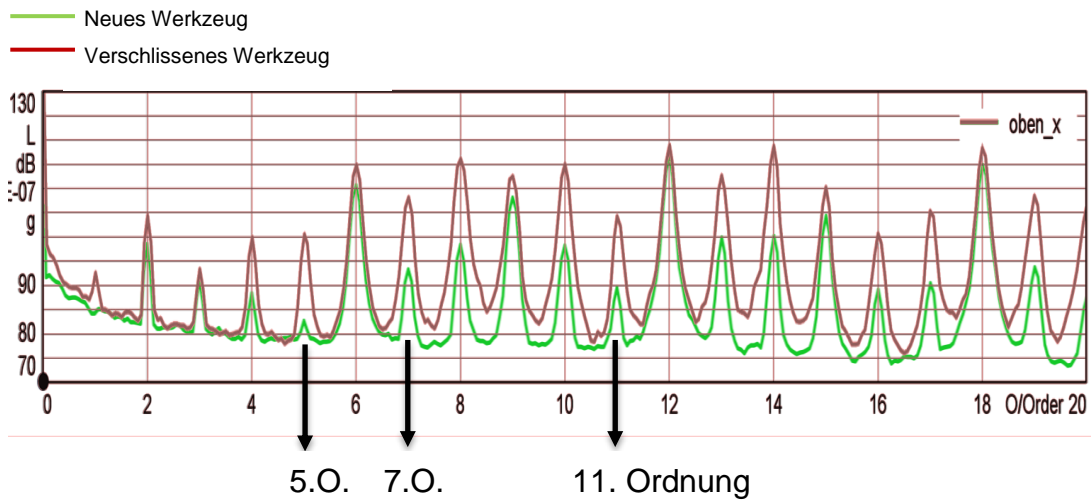


Abbildung 57: Ordnungsspektrum: Überlagerung der vierte Bearbeitungen

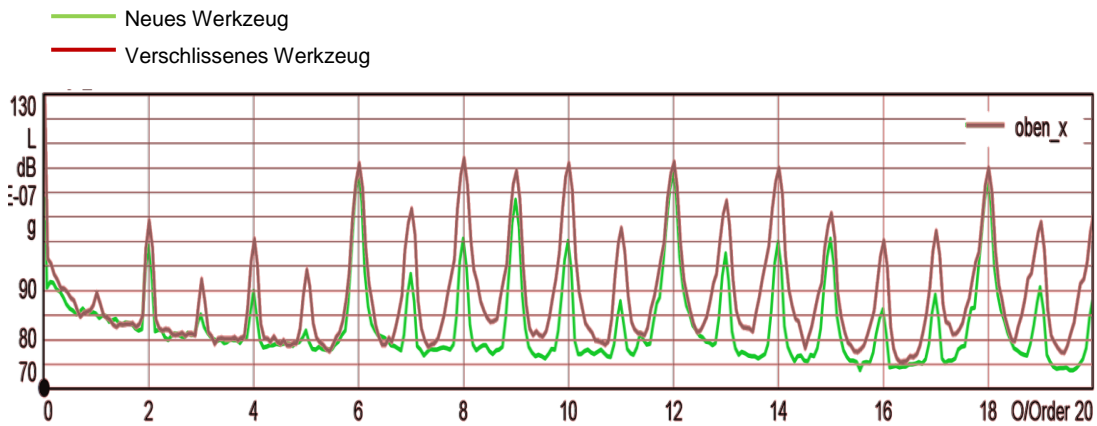


Abbildung 58: Ordnungsspektrum: Überlagerung der sechste Bearbeitungen

6.2.4 Diskussion

Im 3D-Spektrum (Abbildung 54) sieht man im Bereich von 300 bis 1800 Hz die deutliche Amplitudenanstiege. Besonders beim vierten Bearbeitungsschritt ist zu erkennen, dass die Bereiche von 110 dB und mehr (gelbe Farbbereiche) zunehmen. Die Amplitudenanstiege sind auch im Frequenzbereich von 200 – 1000 Hz gut erkennbar, Bereiche <85 dB gehen fast vollständigen in die Bereiche um die 95 - 100 dB über.

Einen exakten Überblick über die Signalanstiege sollen die Abbildung 55 und Abbildung 56 zeigen. Diese 2D-Spektren entstehen durch Schnitte des 3D-Spektrums zu bestimmten Zeitpunkten. Hierzu wurden pro Bearbeitungsschritt vier Schnitte, sowohl beim neuen, als auch beim verschlissenen Werkzeug, erzeugt. Zur Veranschaulichung wurde je ein Schnitt pro Bearbeitung ausgewählt.

Tabelle 17: Zeitpunkte für 2D-Schnitte

Vierte Messung/Bearbeitung		Sechste Messung/Bearbeitung	
Neues Werkzeug t = 87 Sekunden	Verschlissenes Werkzeug t = 94 Sekunden	Neues Werkzeug t = 138 Sekunden	Verschlissenes Werkzeug t = 146 Sekunden

Im 2D-Spektrum können, besonders beim vierten Bearbeitungsschritt, starke Amplitudenerhöhungen, bei einigen Frequenzen, erkannt werden. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich über den gesamten Verlauf eine höhere mittlere Amplitude einstellt. Die Problematik der Nullpunktanpassung wurde durch Setzen mehrerer Schnitte und Abgleich der beiden Werkzeuge, so gut als möglich, optimiert.

Zusätzlich zur FFT wurden Ordnungsanalysen durchgeführt. Für diese Analysen ist eine externe Drehzahlmessung erforderlich, da die Ordnungen aus der Bezugswellendrehzahl gebildet werden. Abbildung 57 zeigt die Ordnungsanalyse für den vierten Bearbeitungsschritt und Abbildung 58 für den sechsten. Diese Ordnungsanalysen wurden für beide Werkzeuge durchgeführt und die Verläufe überlagert. Auch hier ist auf den ersten Blick ersichtlich, dass die Amplituden des verschlissenen Werkzeugs in der Regel deutlich höher sind. Besonders starke Anstiege der Amplitude sind bei der fünften, siebenten und elften Ordnung zu erkennen. Die veränderte Sensorposition an der Seite zeigt keine merklichen Änderungen gegenüber den anderen Positionen.

Reduziert man den Messaufbau auf einen einfachen Einmassenschwinger, kann gesagt werden, wenn keine Änderungen an der Maschine und ihren Aufbau vorgenommen werden, dass das Feder-Dämpfer System bei beiden Werkzeugzu-

ständen dasselbe war. Auch die Masse der Maschine blieb bei beiden Vergleichen unverändert. Somit bleibt nur eine Einflussgröße die sich unterscheidet, die Kraftanregung. Daraus lässt sich ableiten, dass diese Amplitudenanstiege auf eine Erhöhung der anregenden Kräfte zurückzuführen sind, die durch den schlechteren Zustand des Werkzeuges hervorgerufen werden.

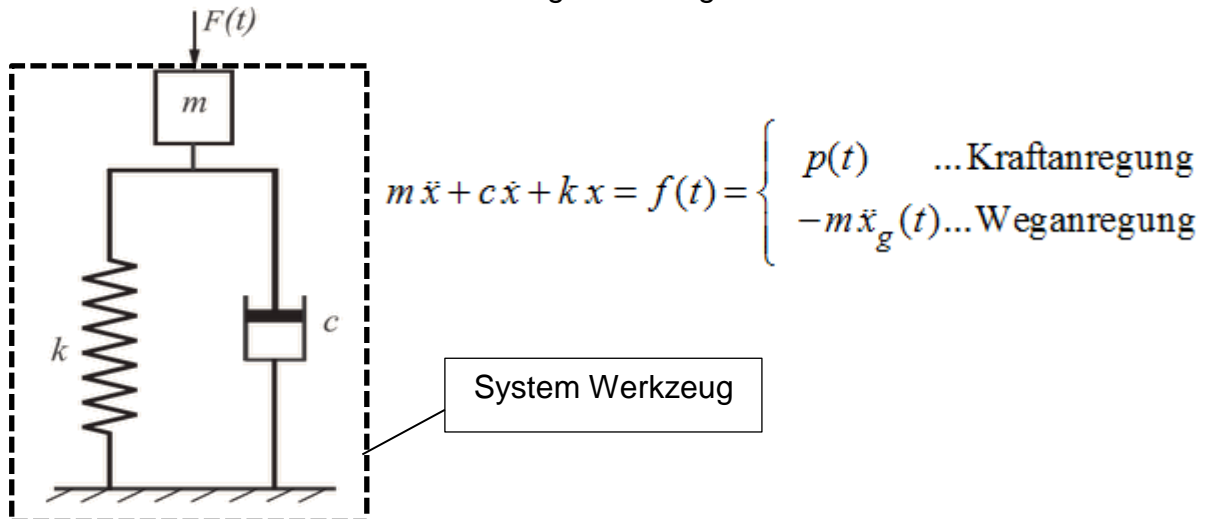


Abbildung 59: Einmassenschwinger (Giljohann 2008)

Dieser zweite Vorversuch zeigt, dass auch mit der Ordnungsanalyse eine einfache Aussage über die Signalunterschiede getätigt werden kann. Der Vorteil der Ordnungsanalyse ist, dass der Abgleich des Nullpunktes nicht erfolgen muss, da diese mit gemittelten Amplituden, wie es hier der Fall war, oder mit Maximalamplituden über die einzelnen Bearbeitungen erstellt wird. Deshalb wird bei den Hauptversuchen, unter anderem eine Ordnungsanalyse zur Signalinterpretation herangezogen.

6.3 Erster Hauptversuch

Ziel des ersten Hauptversuches ist es, die Erkenntnisse der Vorversuche an verschiedenen Materialien umzusetzen. Es soll aufgezeigt werden, ob bei all diesen Materialien die Signalunterschiede so eindeutig sind, wie in den Vorversuchen. Insbesondere soll abgeschätzt werden, welche Materialien sich eignen. Dazu werden spezielle Rundproben aus Aluminium, Grauguss und Stahlguss angefertigt, die alle dieselben Abmessungen haben. Die Werkstoffe, mit denen die Versuche durchgeführt werden, sind Materialien die in verschiedenen Bereichen der Produktion am häufigsten verwendet werden.

6.3.1 Vorgehensweise

Tabelle 18: Parameter des ersten Hauptversuchs

Ziel	Vergleich Schwingungssignale von 3 verschiedenen Werkzeugzuständen; Prüfung der Übertragbarkeit auf andere Materialien	
Werkstück	Grauguss, Aluminium, Stahlguss	
Werkzeuge	Stirnfräser (Ø 80 mm) mit 6 Wendeschneidplatten Neues-, Gebrauchtes-, Verschlissenes Werkzeug	
Bearbeitungsparameter	Programm 1	Programm 2
Drehzahl	n = 1500 U/min	n = 1500 U/min
Vorschub	$v_c = 1500$ mm/min	$v_c = 2000$ mm/min
Sensoren	3 einaxiale Sensoren (Dytran)	
Beschleunigungssensoren	3 einaxiale Sensoren (Dytran)	
Drehzahlsensor	laseroptisch	
Bearbeitung pro Werkzeug		
Zyklen	2	
Bahnen/Zyklus	2	
Abtrag/Zyklus	0,5 mm	
Bearbeitungsschritte gesamt	4 (1 mm Gesamtmaterialabtrag)	

6.3.2 Durchführung

Die Versuche wurden für jedes Material zuerst mit dem Programm 1 mit allen drei Werkzeugzuständen durchgeführt, erst danach wurde das zweite Programm, wiederum mit allen drei Werkzeugzuständen, gefahren. Der Grund, warum die beiden Programme nicht direkt hintereinander, mit den jeweiligen Werkzeugen, gefahren werden ist, dass die Vergleichbarkeit zwischen gutem, gebrauchten und verschlissenen Werkzeugzustand besser ist, wenn diese Bearbeitungen direkt hintereinander durchgeführt werden. Es sollen nicht noch weitere, nicht vergleichbare Messungen dazwischen durchgeführt werden, da auch das Restmaterial einen Einfluss auf die Schwingung haben kann. Zwischen Programm 1 und Programm 2 findet kein Vergleich statt und deshalb wurde diese Variante des Ablaufs gewählt.

Sensorpositionierung

Gleich wie im zweiten Vorversuch wurden, trotz der bekannten optimalen Sensorposition, zur Sicherstellung der Signalaufzeichnung mehrere Sensoren angebracht. Bei der Analyse wurden, wie in den anderen Versuchen, die aufgezeichneten Signale des Sensors (Abbildung 60 mit der 3 gekennzeichnet), ausgewertet.

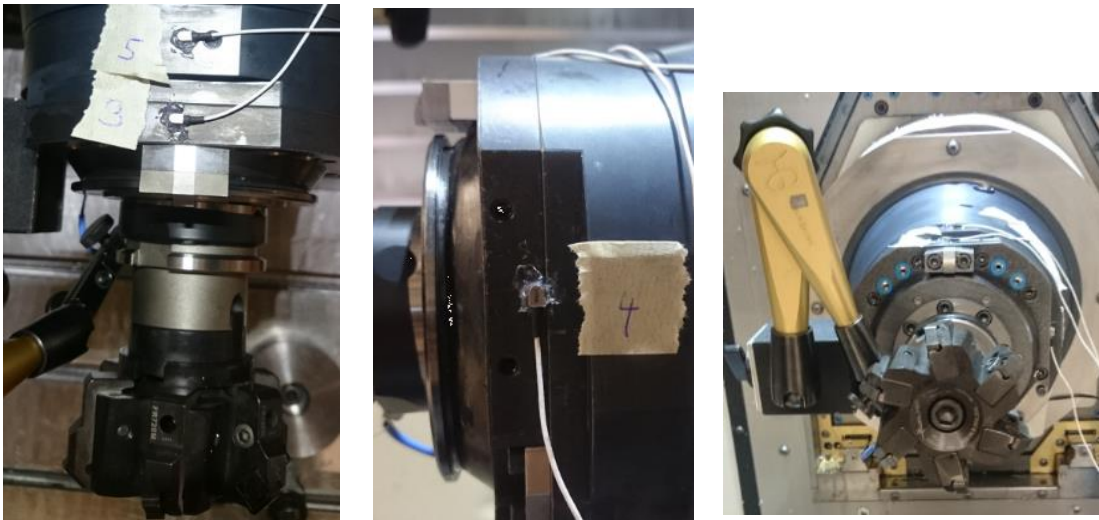


Abbildung 60: Sensorposition erster Hauptversuch

Werkstücke

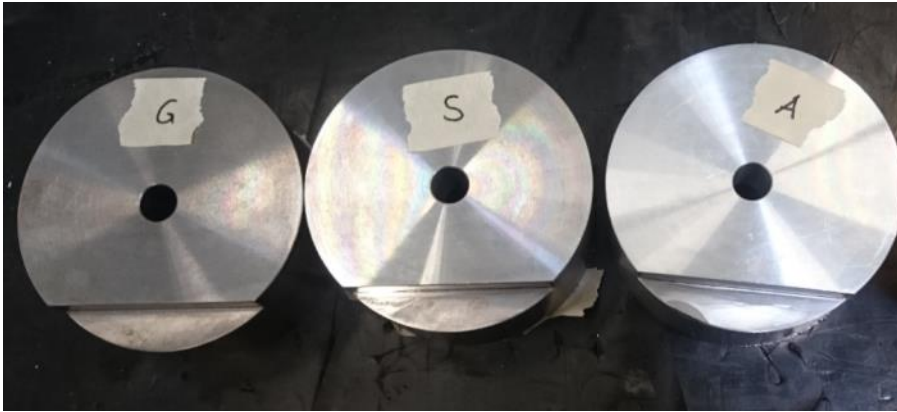


Abbildung 61: verschiedene Versuchsmaterialien

Tabelle 19: Materialbezeichnungen

Grauguss	Stahlguss	Aluminium
GGG 60 (GJS-600)	16MnCr5 (1.7131)	AlZn5,5MgCu (3.4365)

Bearbeitungsvorgang

Alle Materialien wurden nach denselben Programmen bearbeitet. Bei jedem Werkzeug wurde insgesamt 1mm abgetragen. Das bedeutet die Bearbeitung erfolge in vier Einzelschritten und ergibt ebenso viele einzelne Vergleichsmessungen.

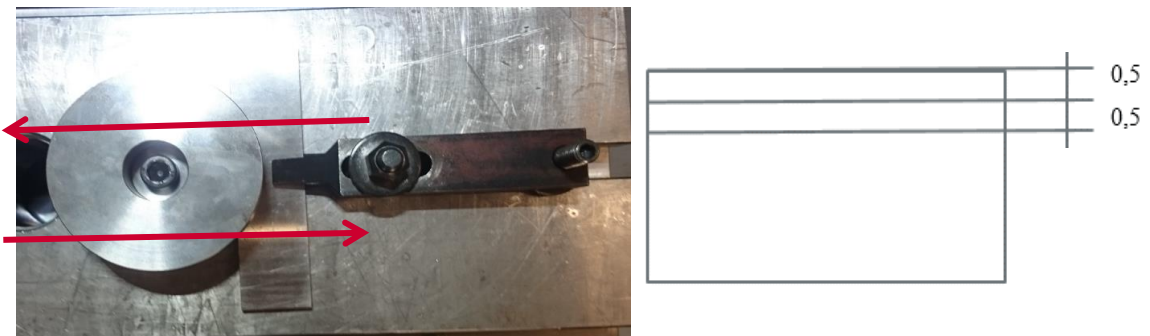


Abbildung 62: Bearbeitung pro Werkzeug und Werkstück

Für den zweiten Durchlauf wurde eine schnellere Vorschubgeschwindigkeit gewählt. Ansonsten ist die Versuchsdurchführung deckungsgleich wie die des Ersten. Die Ergebnisse waren mit dem schnelleren Vorschub, vom Verlauf her ge-

sehen, gleich, einzig der Signalausschlag war stärker. Da es sich um einen Relativvergleich handelt ist es nicht notwendig die Ergebnisse des zweiten Durchlaufs zusätzlich aufzuzeigen.

In den Vorversuchen wurden immer nur ein neuer und verschlissener Werkzeugzustand verglichen. Bei diesem Versuch soll noch ein dritter Werkzeugzustand verglichen werden, der eines gebrauchten Werkzeugs (siehe Seite 81, Tabelle 12). Im Rahmen der Ergebnisanalyse wird zunächst nur der Vergleich zwischen neuem und verschlissenem Werkzeug gezeigt. Im Anschluss wird auf den Vergleich der drei Werkzeugzustände eingegangen. Um einen direkten Vergleich der drei verschiedenen Werkzeugzustände zu erhalten, wurden die Messdaten im Excel aufbereitet und als Ordnungsspektrum ausgegeben. Beispielhaft für den Zustandsvergleich zwischen den drei Werkzeugzuständen, wurde der erste Bearbeitungsschritt jedes Materials ausgewählt (Siehe: Abbildung 66, Abbildung 67, Abbildung 68)

Bereits während der Versuchsdurchführung konnte erkannt werden, dass die Wendeschneidplatten (aller Werkzeugzustände) nicht für weiche Materialien geeignet sind, da jedoch keine anderen Wendeschneidplatten zur Verfügung standen, musste der Versuch mit dem für Aluminium ungeeigneten Werkzeugen durchgeführt werden.

Auf die Darstellung im 3D-Spektrum wird bei diesem Versuch verzichtet, da diese Vergleiche gut aufgelöst sein müssen, jedoch nur eine geringe Aussagekraft haben. Eine genauere Aussage ist mit Hilfe der Ordnungen möglich, deshalb wird vermehrt auf die Ordnungsanalyse eingegangen.

6.3.3 Ergebnis

Der Vergleich der Ordnungsspektren vom guten und verschlissenen Werkzeugzustand (Abbildung 63 bis Abbildung 65) wird mit der dritten (oben in den Abbildungen) und der vierten Bearbeitung als Beispiel aufgezeigt.

Die nachfolgenden Vergleiche der Werkzeugzustände und Materialien wurden direkt mit der Analysesoftware erstellt.

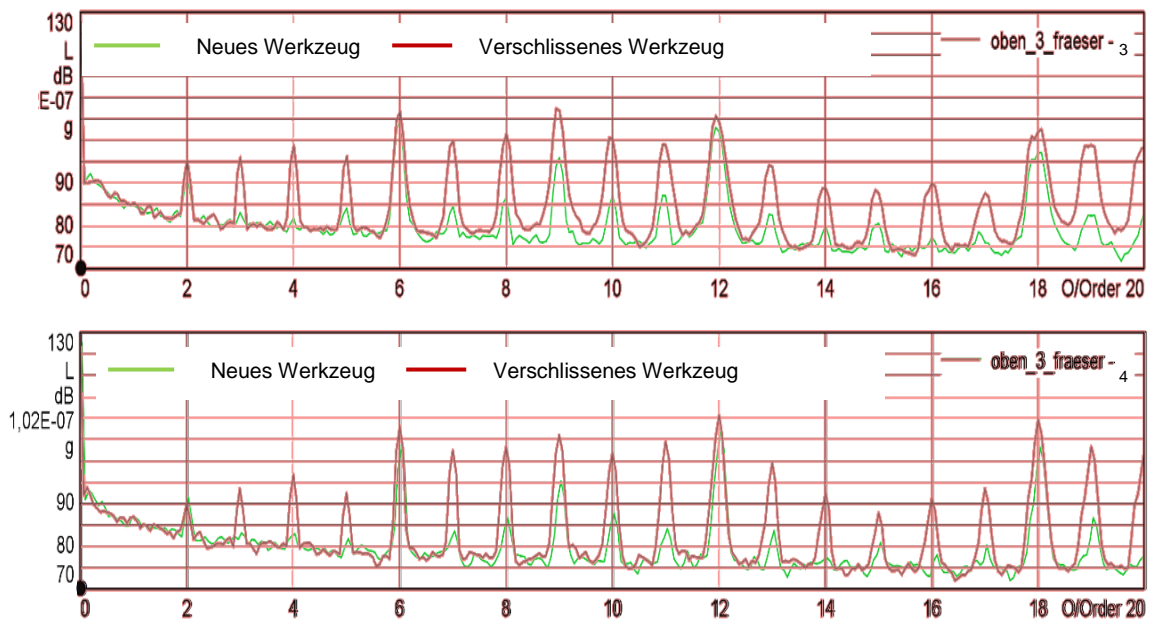


Abbildung 63: Ordnungsspektren im Vergleich Aluminium,

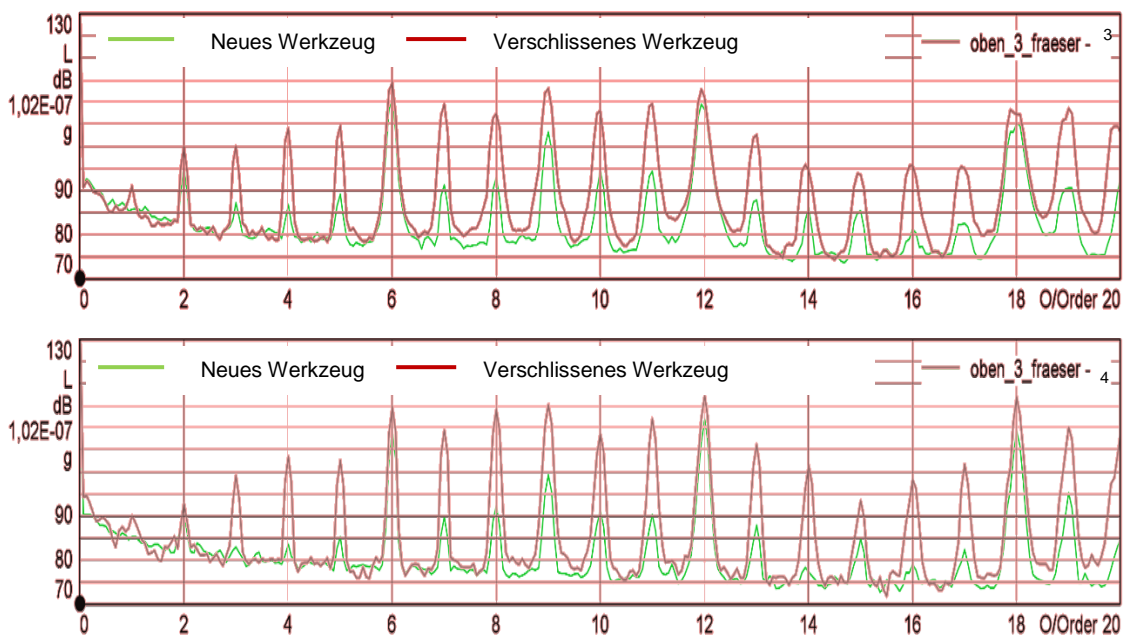


Abbildung 64: Ordnungsspektren im Vergleich Gusseisen

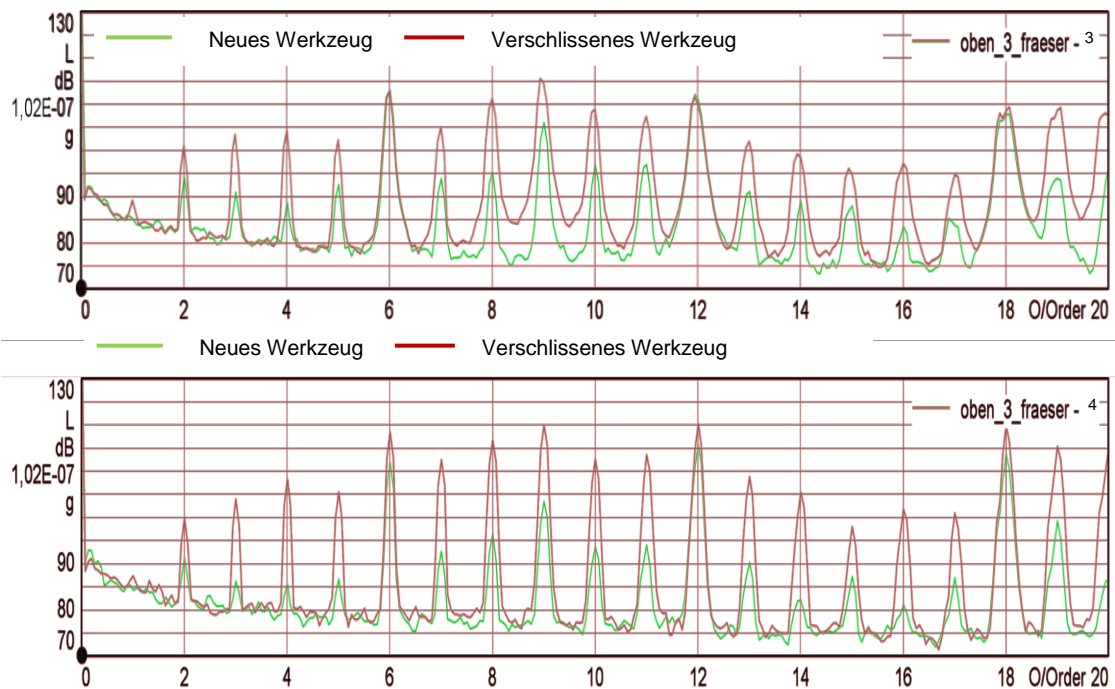


Abbildung 65: Ordnungsspektren im Vergleich Stahlguss

Die darauffolgenden Vergleiche zeigen die Amplituden über die einzelnen Ordnungen des ersten Bearbeitungsschrittes. Ziel ist es, die drei unterschiedlichen Werkzeugzustände miteinander vergleichen zu können. In Tabelle 20 finden sich diese Amplituden von der ersten und zweiten Bearbeitung, als prozentueller Vergleich zum schlechten Werkzeugzustand wieder. Als Vergleichswert wurde noch das arithmetische Mittel der zehn Ordnungen herangezogen.

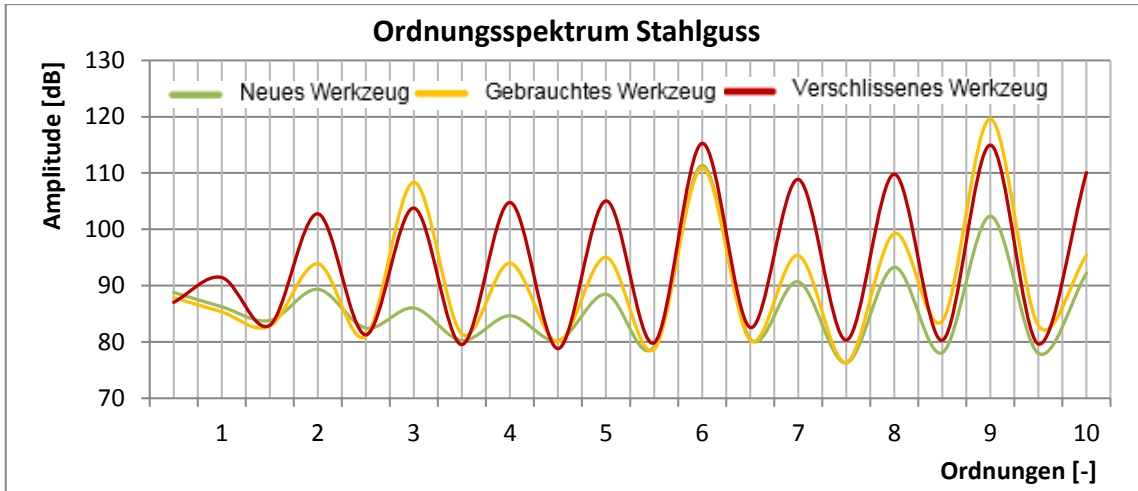


Abbildung 66: Stahlguss erste Bearbeitung

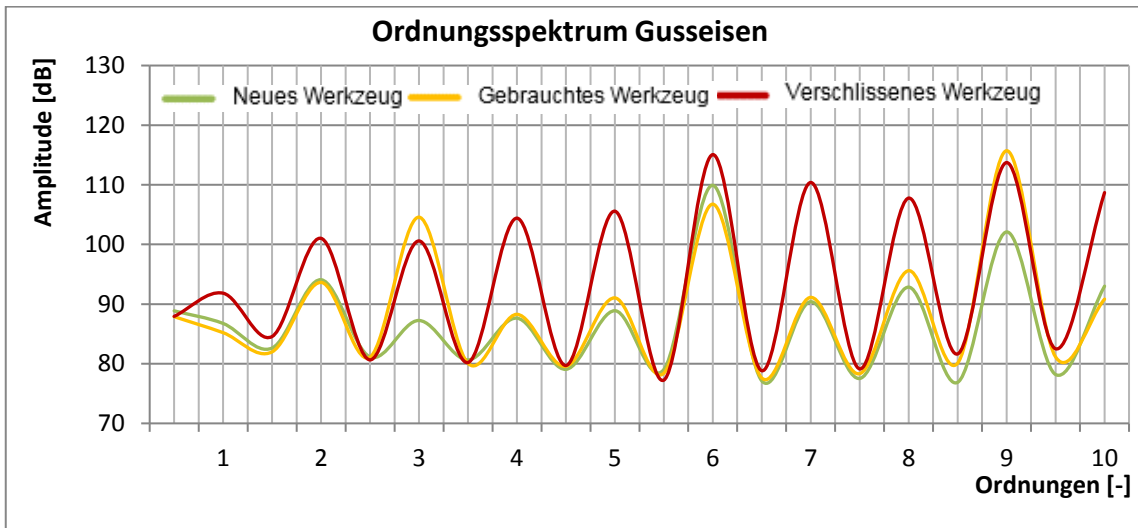


Abbildung 67: Gusseisen erste Bearbeitung

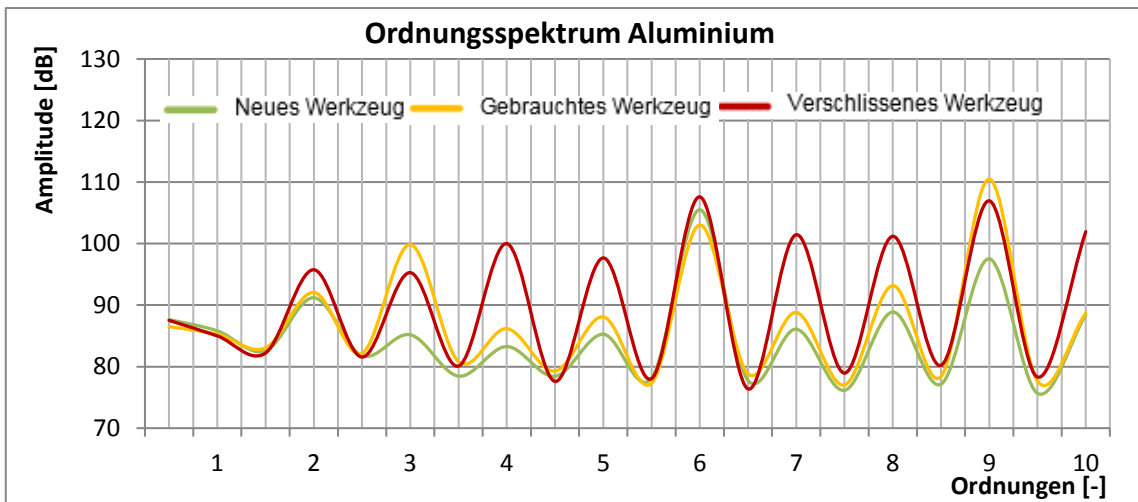


Abbildung 68: Aluminium erste Bearbeitung

Tabelle 20: Vergleich Amplitudenstärke der Ordnungen⁷

	Aluminium		Stahlguss		Gusseisen	
1. Bearbeitung	Neu	Gebr.	Neu	Gebr.	Neu	Gebr.
1. Ordnung	100.97%	100.30%	94.32%	93.32%	94.48%	92.79%
2. Ordnung	95.25%	96.14%	86.95%	91.36%	93.13%	92.69%
3. Ordnung	89.41%	104.80%	82.89%	104.42%	86.74%	103.96%
4. Ordnung	83.28%	86.17%	80.80%	89.71%	83.94%	84.55%
5. Ordnung	87.30%	90.19%	84.22%	90.48%	84.19%	86.23%
6. Ordnung	98.05%	95.75%	96.59%	96.22%	95.53%	92.78%
7. Ordnung	84.87%	87.54%	83.30%	87.58%	81.89%	82.55%
8. Ordnung	87.84%	92.07%	84.93%	90.39%	86.15%	88.71%
9. Ordnung	91.19%	103.29%	89.02%	104.02%	89.77%	101.74%
10. Ordnung	86.74%	87.03%	83.77%	86.67%	85.57%	83.57%
Mittel	90.49%	94.33%	86.68%	93.42%	88.14%	90.96%

2. Bearbeitung	Neu	Gebr.	Neu	Gebr.	Neu	Gebr.
1. Ordnung	98.92%	99.59%	95.87%	95.01%	94.48%	92.79%
2. Ordnung	102.44%	101.24%	94.73%	92.44%	93.13%	92.69%
3. Ordnung	84.90%	106.06%	84.00%	105.19%	86.74%	103.96%
4. Ordnung	83.37%	83.98%	78.75%	81.55%	83.94%	84.55%
5. Ordnung	86.10%	89.08%	82.13%	84.83%	84.19%	86.23%
6. Ordnung	94.74%	94.62%	94.53%	96.08%	95.53%	92.78%
7. Ordnung	81.03%	83.56%	82.67%	82.77%	81.89%	82.55%
8. Ordnung	83.49%	89.61%	83.00%	87.25%	86.15%	88.71%
9. Ordnung	88.73%	106.33%	87.07%	104.27%	89.77%	101.74%
10. Ordnung	83.25%	85.79%	84.19%	85.15%	85.57%	83.57%
Mittel	88.70%	93.99%	86.69%	91.45%	86.25%	90.58%

⁷ Referenz mit 100% = verschlissener Werkzeugzustand

In Tabelle 20 werden die Amplituden vom guten und gebrauchten Werkzeugzustand (in Prozent), der einzelnen Ordnungen und Materialien, mit dem verschlissenen Werkzeugzustand, verglichen. Der verschlissene Zustand soll dabei als Referenz für den maximalen zulässigen Verschleiß (100%) angenommen und prozentuell mit den Amplituden vom guten und mittleren Zustand verglichen werden.

Tabelle 21: Legende zum Amplitudenvergleich

Legende

<i>Neu</i>	Neuer Werkzeugzustand
<i>Gebr.</i>	Gebrauchter Werkzeugzustand (siehe Definition Tabelle 13, Seite 81)
<i>Mittel</i>	Arithmetisches Mittel über die 10. Ordnungen

Zur besseren Übersicht werden in Abbildung 69 und Abbildung 70 die Mittelwerte der zehn Ordnungen in einem Balkendiagramm aufgezeigt.

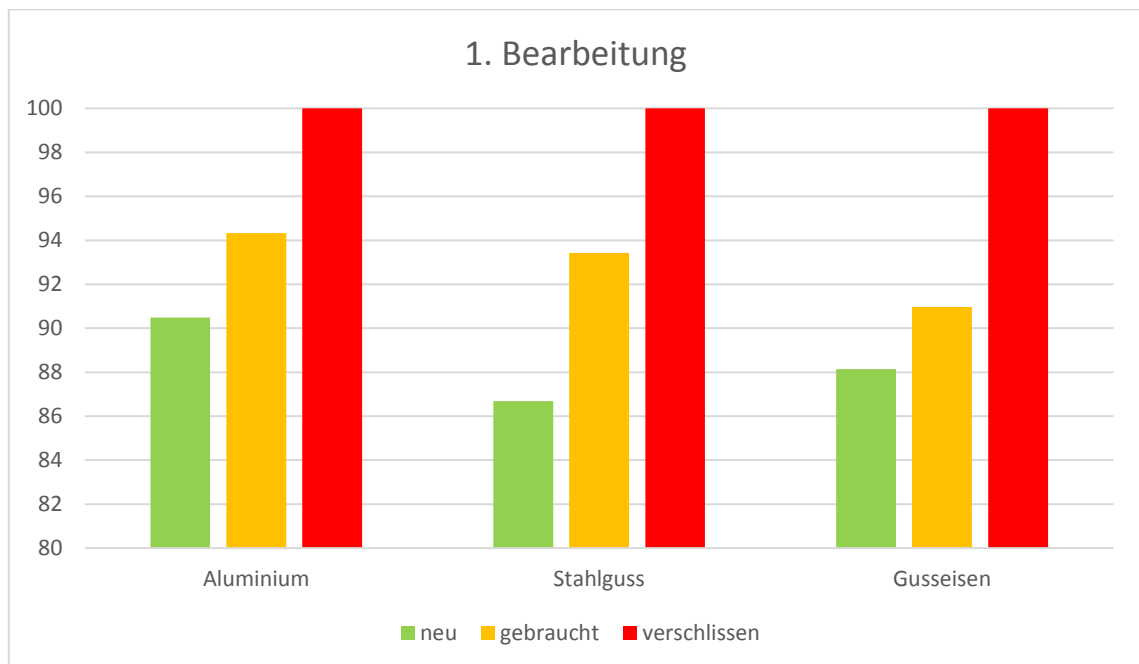


Abbildung 69: arithmetisches Mittel der 1. Bearbeitung

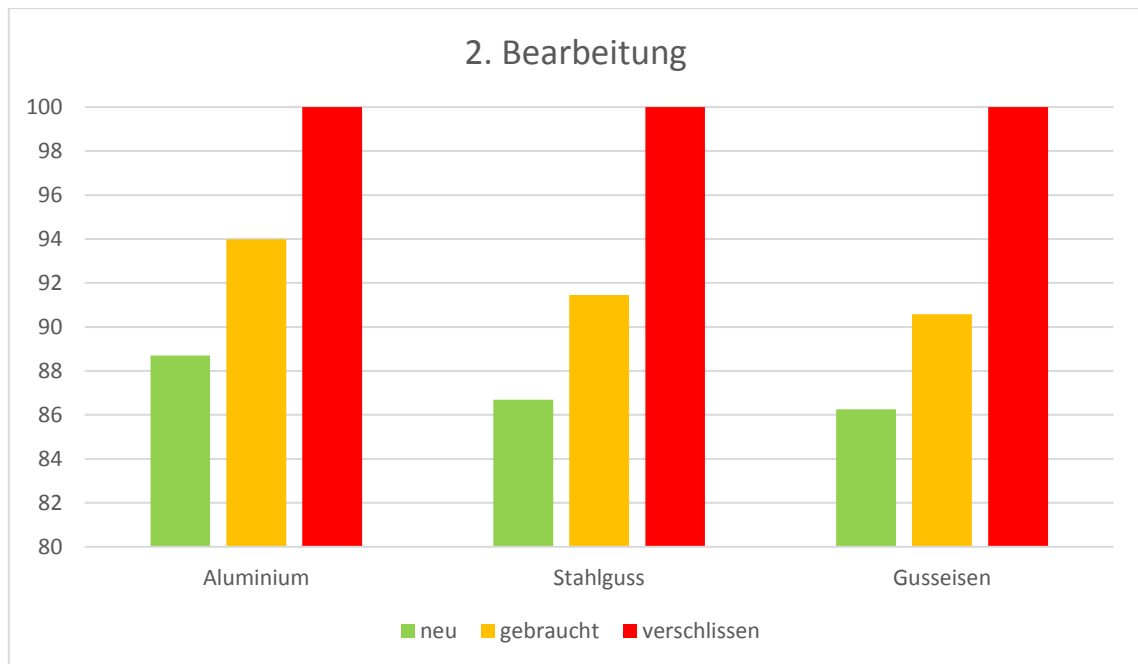


Abbildung 70: arithmetisches Mittel der 2. Bearbeitung

6.3.4 Diskussion

Die Ergebnisse der Vorversuche haben gezeigt, dass sich im Schwingungssignal eindeutige Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Werkzeugen einstellen. Das konnte im Hauptversuch mit Vergleich zwischen gutem und verschlissenen Werkzeugzustand (Abbildung 63 - Abbildung 65) bestätigt werden. Das Resultat zeigt, dass der verschlissene Werkzeugzustand die Maschine zu deutlich höheren Schwingungen anregt, dies deckt sich mit den Ergebnissen der Vorversuche.

Schwieriger wird die Interpretation der Verläufe der drei verschiedenen Werkzeugzustände, da sich die Amplituden des gebrauchten Werkzeugzustandes oft nicht eindeutig vom guten Werkzeugzustand differenzieren.

Tabelle 20 soll einen besseren Überblick über die Amplitudenausschläge der drei Werkzeugzustände schaffen. Über die gesamten Ordnungen betrachtet, sind die Amplituden des guten Werkzeuges, im Mittel, geringer als die des gebrauchten. Betrachtet man die erste Bearbeitung von Aluminium, so sieht man dass die Amplituden vom guten Werkzeugzustand durchschnittlich um 4% geringer sind als die vom gebrauchten. Das entspricht, bei einem betrachteten Schallpegel von

90 dB, einer Pegeldifferenz von mehr als 3 dB. Bezieht man sich auf die Abbildung 13, die die Auswirkungen von bestimmten Pegeländerungen beschreibt, können die Unterschiede gut interpretiert werden. Eine Änderung von +3 dB, bedeutet die Wahrnehmung der 1,2-fachen Lautstärke, dass sich der 1,4-fache Schalldruck einstellt und die Schallintensität verdoppelt wird.

Beim Vergleich vom guten zum verschlissenen Zustand können in der Tabelle 20 Amplitudenunterschiede größer 10 % entnommen werden (Bezogen auf die 100% des verschlissenen Zustandes). Am deutlichsten sind die signifikanten Unterschiede zwischen neuem und verschlissenem Werkzeugzustand, an den Ordnungen 4, 5 und 7 erkennbar. Hier bewegt man sich im Bereich der Lautstärkenverdoppelung, während der Bearbeitung. Auch ohne zusätzliche Sensorik werden diese Verschlechterungen akustisch wahrgenommen. Das direkte Erkennen von starken Veränderungen in der Bearbeitung, durch erfahrene Mitarbeiter, wird auch von vielen Unternehmen erwartet und vereinzelt als „zustandsorientierte Instandhaltung“ praktiziert. (vgl. Matyas 2013, p. 120)

Diese Ergebnisse bestätigen jene aus den Vorversuchen. Als Schlussfolgerung des ersten Hauptversuchs kann daher abgeleitet werden, dass unabhängig vom bearbeiteten Material, eine Aussage über den Werkzeugzustand möglich ist. Die Schwierigkeit der Deutung des gemessenen gebrauchten Werkzeugzustandes ist auf Individualität der Verschleißkurve zurückzuführen, welche im Regelfall nicht linear verläuft. Informationen über den exakten Punkt an der Verschleißkurve waren nicht vorhanden, daher ist die Interpretation im Regelfall nicht eindeutig.

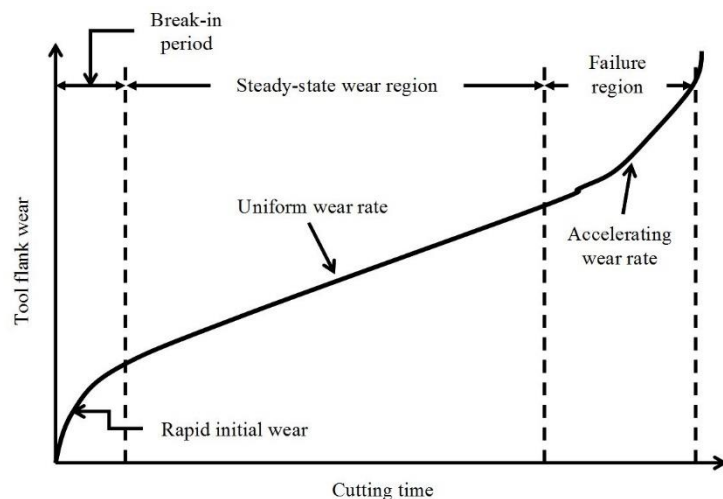


Abbildung 71: Beispielhafter Verlauf Werkzeugverschleißkurve (mohdalaamri 2013, p. 8)

Mit Hilfe einer kontinuierlichen, akustischen Überwachung einer Produktionsanlage können solche Verschleißkurven für spezifische Werkzeuge, aus den gesammelten Signalen, abgeleitet werden.

6.4 Zweiter Hauptversuch

Die im ersten Hauptversuch erhaltenen idealen Erkenntnisse sollen an einen produktionsnahen Versuch, so real wie möglich, übertragen werden. Produktionsnah bedeutet, dass die Werkstücke und Werkzeuge von den jeweiligen Linien sind und die Bearbeitung wie an diesen Linien erfolgt. Man wählt somit dieselben Bearbeitungsparameter und den gleichen Ablauf. Einziger Unterschied zur Produktion ist der Materialabtrag, bei den Versuchen werden mehrere Schritte gefahren, da mehrere Messungen zur Interpretation benötigt werden.

6.4.1 Vorgehensweise

Tabelle 22: Parameter des zweiten Hauptversuchs

Ziel	Vergleich der Schwingungssignale der verschiedenen Werkzeugzustände, Test mit Produktionsbedingungen	
Werkstück	2 ZKG R4 (Aluminium, Stahlguss), 1 ZKG V6 (Stahlguss)	
Werkzeuge	2 Fräser für Stahlguss (ein neuer und ein verschlissener Werkzeugzustand) 2 Fräser für Aluminium (ein neuer und ein verschlissener Werkzeugzustand)	
Bearbeitungsparameter	Stahlguss	Aluminium
Drehzahl	$n = 533 \text{ U/min}$	$n = 8000 \text{ U/min}$
Vorschub	$v_c = 1551 \text{ mm/min}$	$v_c = 17280 \text{ mm/min}$
Sensoren	3 einaxiale Sensoren	
Drehzahlsensor	laseroptisch	
Bearbeitung pro Werkzeug		
Zyklen	4	
Bahnen/Zyklus	2 Aluminium; 3 Stahlguss	
Abtrag/Zyklus	0,5 mm	
Bearbeitungsschritte gesamt	8; 12 (2 mm Gesamtmaterialabtrag)	

6.4.2 Durchführung

Die Versuchsdurchführung zielt darauf ab, dass Ergebnisse aus den vorhergehenden Versuchen bestätigt werden können. Des Weiteren soll mit den Realparametern gezeigt werden, dass diese Überlegungen nicht nur theoretisch umsetzbar sind, sondern auch direkt an den Produktionslinien angewendet werden können. In diesen Untersuchungen werden für jedes Werkstück die realen Bearbeitungsparameter, der jeweiligen Produktionslinien, verwendet. Zusätzlich wird für jeden Werkstoff das passende Werkzeug (Stirnfräser) verwendet werden, dabei werden pro Werkstück je ein neuer und ein verschlissener Werkzeugzustand verglichen. Bei den neuen Werkzeugen handelt es sich um Fräser, die noch nicht in der Bearbeitung verwendet worden sind, jedoch nach Fertigstellung der Versuche an den jeweiligen Linien zum Einsatz kommen. Bei den verschlissenen Werkzeugen wurde die gesamte Lebensdauer des Fräsers in der Bearbeitung ausgenutzt, diese wurden direkt an den Produktionslinien aussortiert.

Sensorpositionierung

Der Messstands Aufbau gleicht dem des ersten Hauptversuches, es wurden wiederum drei Beschleunigungssensoren eingesetzt, an den gleichen Positionen wie zuvor. Zur Drehzahlerfassung wurde, wie auch schon in den Vorversuchen, ein optischer Drehzahlsensor angebracht.

Werkstücke



Abbildung 72: links: Fräser für Stahlguss; rechts: Fräser für Aluminium

Bei der Aluminiumbearbeitung wurde, im Gegensatz zur Stahlbearbeitung, der komplette Fräser ausgetauscht und nicht nur die Wendeschneidplatten, wie es auch in den Vorversuchen gemacht wurde. Der Fräferschaft für Stahlguss war bei den beiden Stahlguss-ZKG's Bearbeitungen derselbe, nach der ZKG-R4 Bearbeitung wurden für die Durchführung des Versuches am ZKG-V6 wieder neue Wendeschneidplatten angebracht. Auch bei der Messung mit dem verschlissenen Werkzeugzustand waren bei beiden Stahlgussbearbeitungen unterschiedliche Wendeschneidplatten im Einsatz.

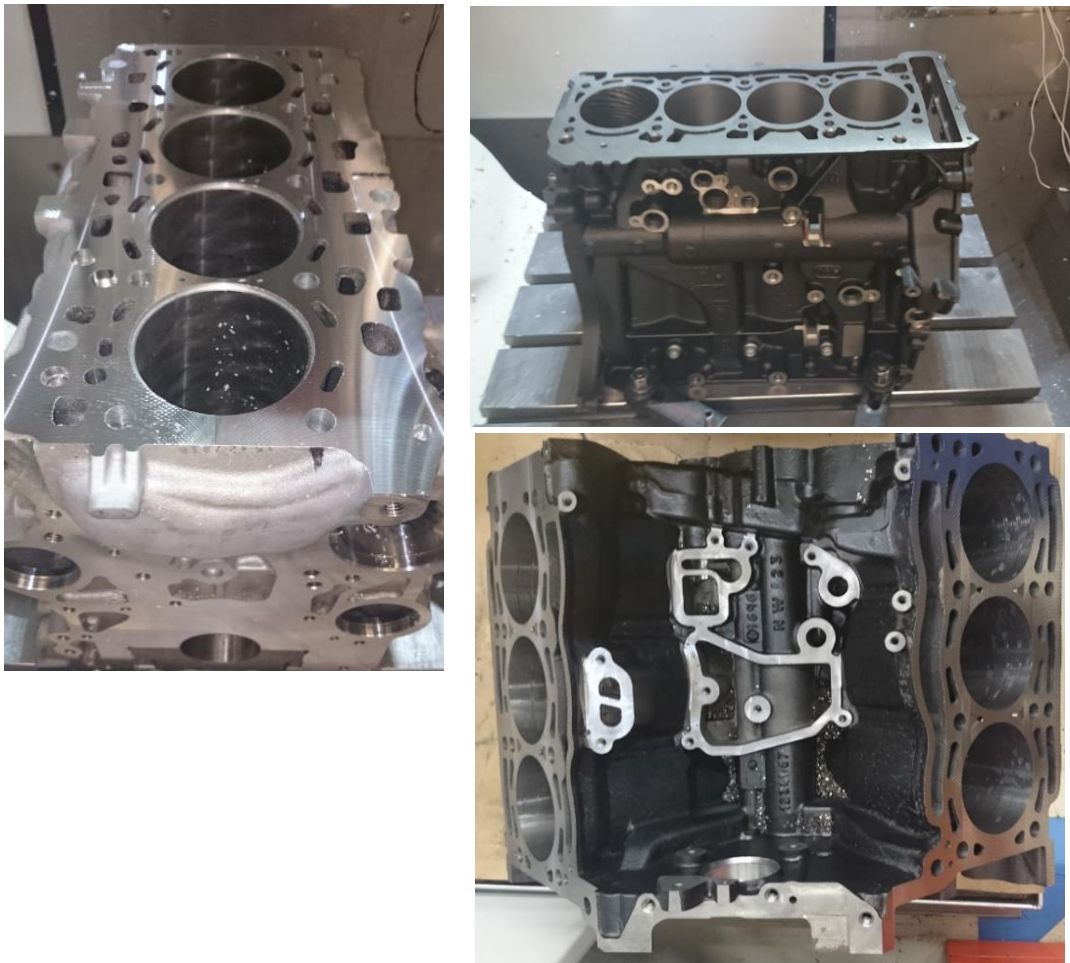


Abbildung 73: links: Aluminium ZKG R4; rechts oben: Stahlguss ZKG R4;
rechts unten: Stahlguss ZKG V6

Tabelle 23: Versuchsdaten

	R4 Stahlguss	V6 Stahlguss	R4 Aluminium
Drehzahl [U/min]	533	533	8000
Vorschub [mm/min]	1551	1551	17280
Werkzeug	8 neue und 8 verschlossene Wen- deschneidplatten	8 neue und 8 Verschlissene Wen- deschneidplatten	1 neuer Fräser mit 18 Zähnen, 1 verschlisse- ner Fräser mit 18 Zähnen

Bearbeitungsvorgang

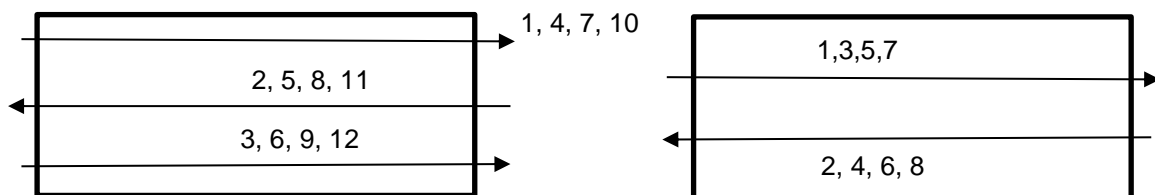


Abbildung 74: Bearbeitungsverlauf, Draufsicht ZKG

links: Stahlguss; rechts: Aluminium

Die Durchführung der Messung war leicht unterschiedlich, im Vergleich zu den anderen Versuchen. Wie im zweiten Vorversuch ausführlich beschrieben, entsprach eine Bearbeitungsbahn (in Abbildung 74 mit den Zahlen von 1-12 nummeriert) einer Messung. Da es an den Produktionslinien sinnvoller ist, die Messungen über die gesamte Bearbeitung zu vergleichen, wurde auch hier die Messung über einen kompletten Materialabtrag durchgeführt. Die Zuteilung der Bahnen zu den einzelnen Messungen sollen in Tabelle 24 dargelegt werden.

Tabelle 24: Messungen am Beispiel Stahlguss-ZKG

	Messung 1	Messung 2	Messung 3	Messung 4
Bearbeitungsbahnen	1-3	4-6	7-9	10-12

Durch diese Änderung der Messdurchführung können die Messungen 1 bis 4 untereinander verglichen werden. Bei den Vorversuchen war es nur möglich immer die gleichen Bahnen miteinander zu vergleichen, z.B. Bahn 1 und Bahn 4.

Die Mittelung bei der Ordnungsanalyse über mehrere Bahnen, verringert die möglichen stochastischen Einflüsse.

6.4.3 Ergebnis

Um die Ähnlichkeit der Messergebnisse von den unterschiedlichen Bearbeitungen aufzuzeigen, werden beim Aluminium ZKG-R4 zwei Bearbeitungsschritte bzw. Messungen (Messung 3 und 4) als überlagerte Ordnungsanalysen dargestellt. Bei den Messungen am Stahlguss ZKG-R4 und ZKG-V6 wird nur eine Messung als überlagerte Ordnungsanalyse dargestellt (Messung 3, siehe Abbildung 75 bis Abbildung 78). Die in Artemis erstellten Ordnungsspektren werden bis zur 20. Ordnung betrachtet, im Excel werden die Daten bis zur 10. Ordnung miteinander verglichen (Abbildung 79 bis Abbildung 81). Die erstellten Verläufe sollen zur besseren Übersicht, über alle Bearbeitungen, in Tabelle 25 als prozentuelle Amplitudenstärken abgebildet werden.

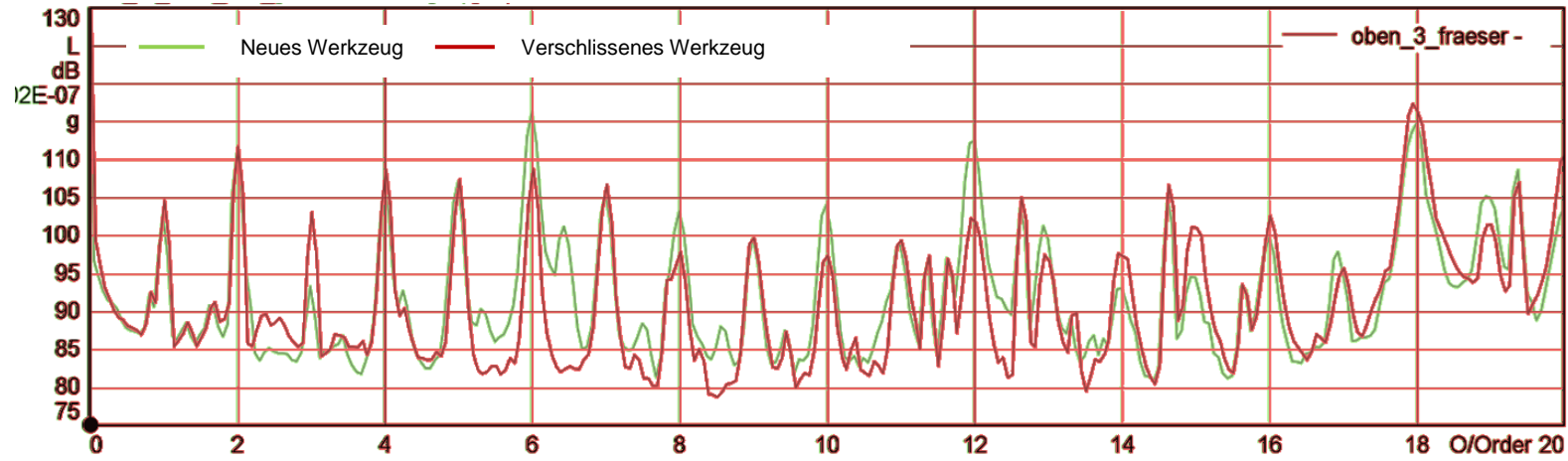


Abbildung 75: Überlagertes Ordnungsspektrum Bearbeitungsschritt 3 Aluminium ZKG-R4

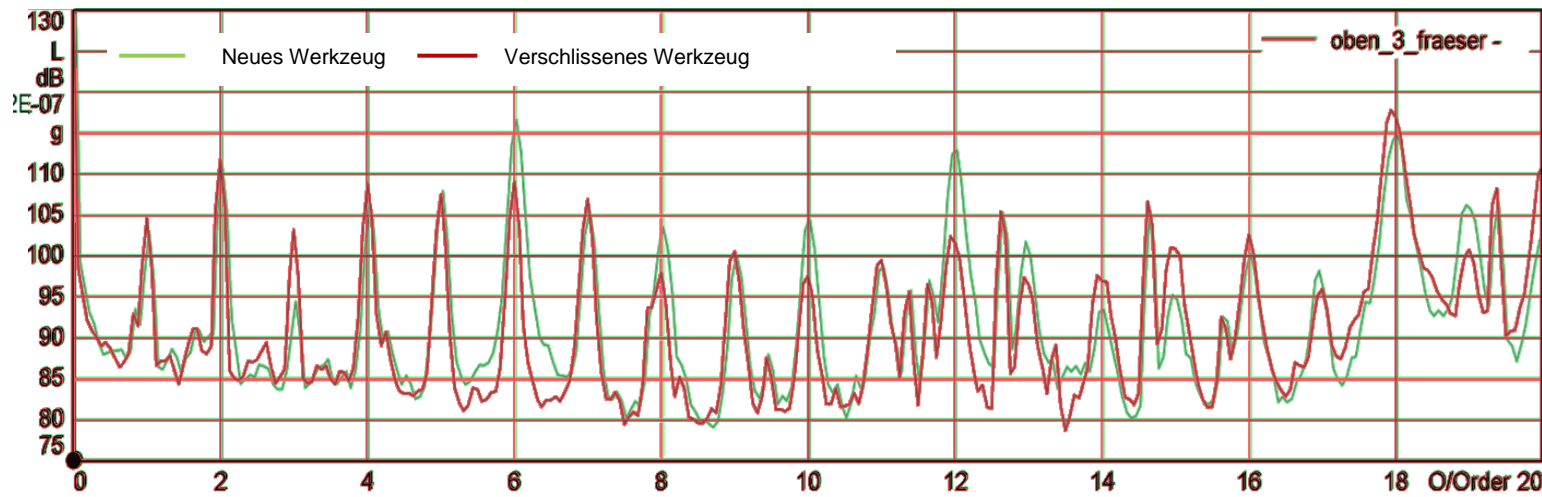


Abbildung 76: Überlagertes Ordnungsspektrum Bearbeitungsschritt 4 Aluminium ZKG-R4

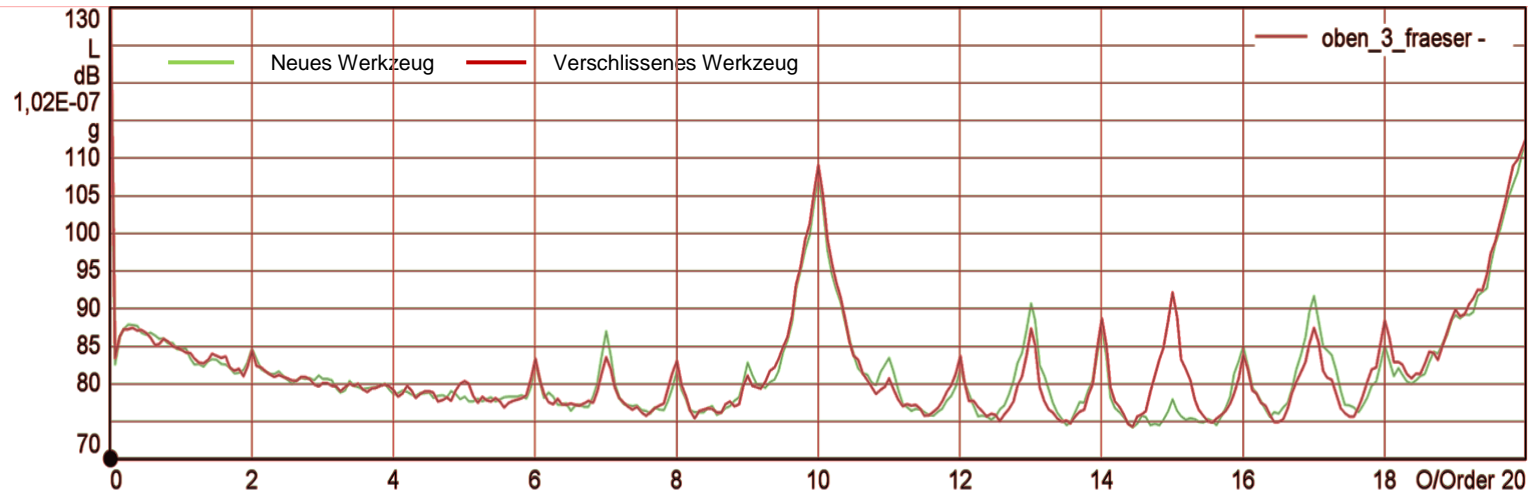


Abbildung 77: Überlagertes Ordnungsspektrum Bearbeitungsschritt 3 Stahlguss ZKG-R4

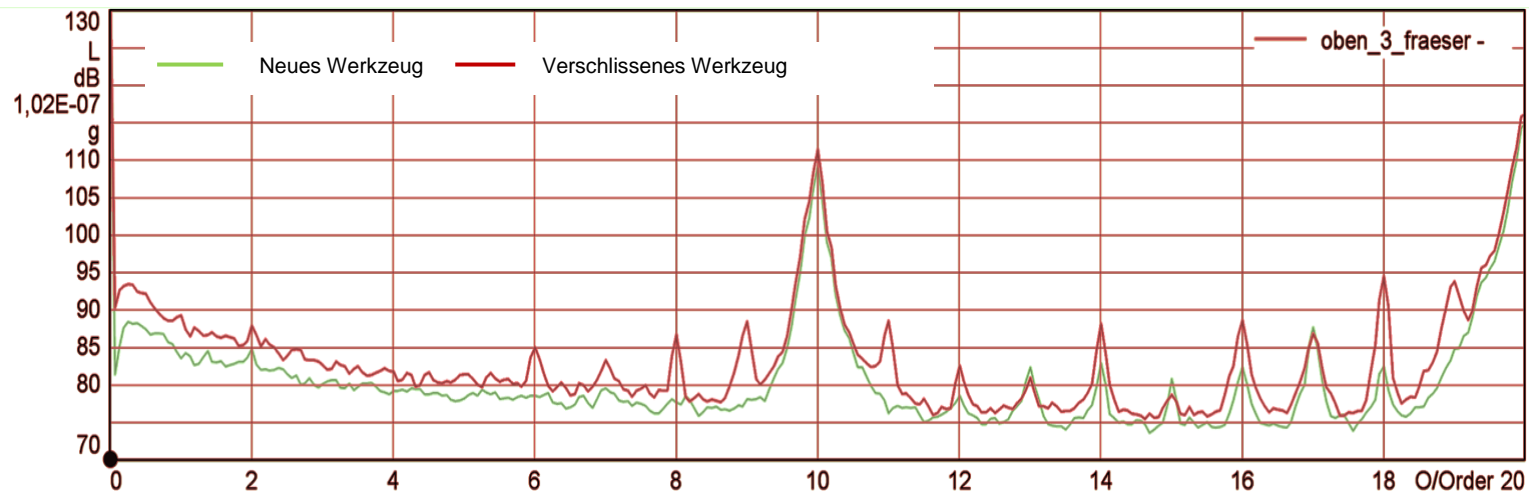


Abbildung 78: Überlagertes Ordnungsspektrum Bearbeitungsschritt 3 Stahlguss ZKG-V6

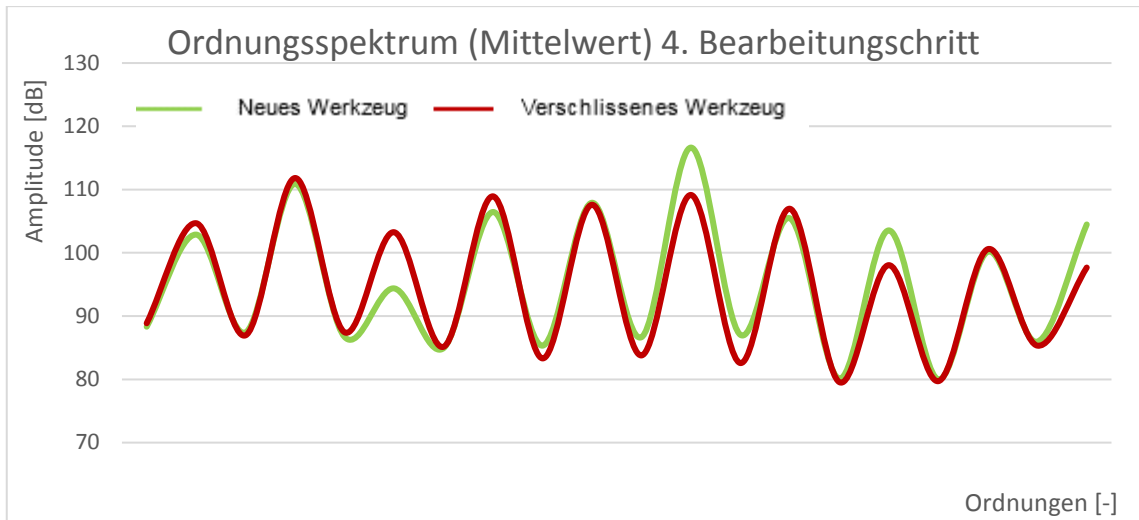


Abbildung 79: gemitteltetes Ordnungsspektrum der vierten Bearbeitung Aluminium ZKG-R4

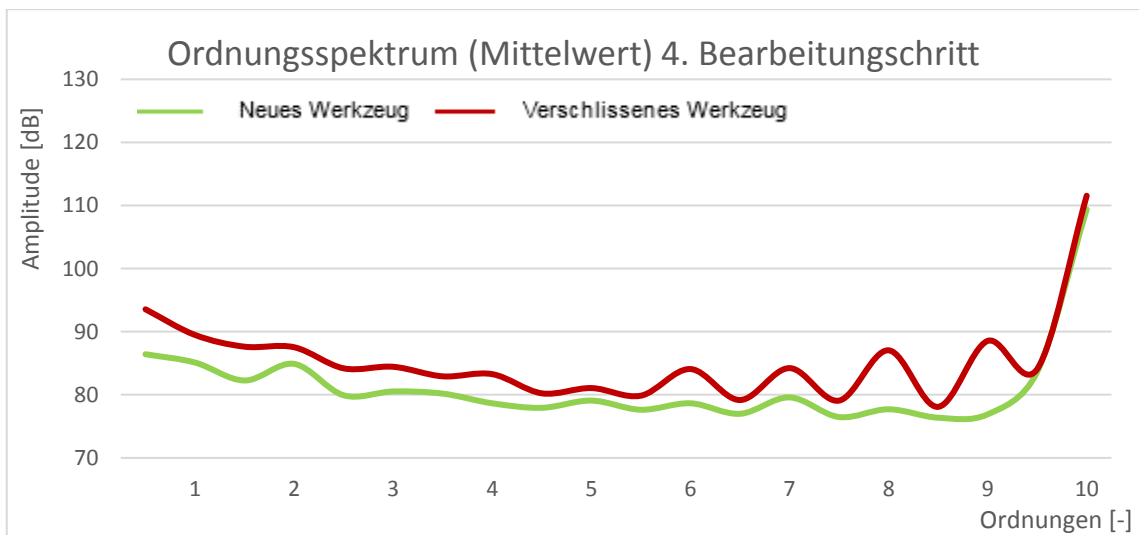


Abbildung 80: gemitteltetes Ordnungsspektrum der vierten Bearbeitung Stahlguss ZKG-V6

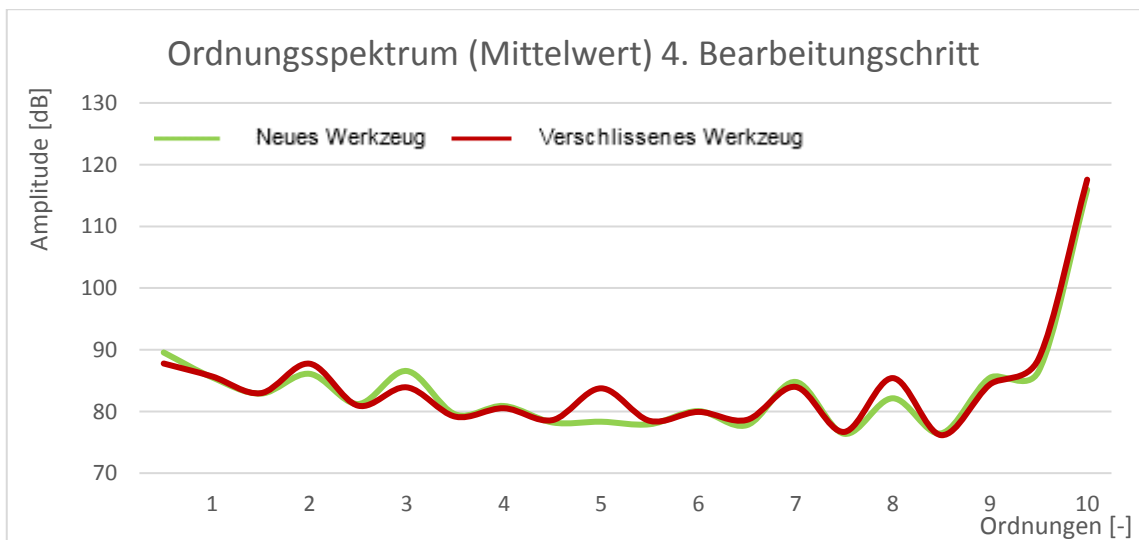


Abbildung 81: gemitteltetes Ordnungsspektrum der vierten Bearbeitung Stahlguss ZKG-R4

Tabelle 25: Amplitudenstärke (bezogen auf den verschlissenen Werkzeugzustand in Prozent)

	1. Bearbeitung			2. Bearbeitung		
	Al-R4	St-R4	St-V6	Al-R4	St-R4	St-V6
	Neu	Neu	Neu	Neu	Neu	Neu
1. Ordnung	98.07%	99.51%	94.37%	98.09%	98.63%	96.07%
2. Ordnung	99.23%	98.96%	97.39%	99.36%	97.82%	99.09%
3. Ordnung	90.24%	103.95%	96.38%	91.02%	102.79%	97.56%
4. Ordnung	100.19%	100.28%	96.74%	98.35%	100.23%	98.22%
5. Ordnung	99.79%	94.65%	96.48%	99.40%	93.62%	97.50%
6. Ordnung	107.96%	99.56%	93.30%	106.92%	99.90%	92.01%
7. Ordnung	99.45%	100.71%	96.09%	99.20%	100.98%	94.75%
8. Ordnung	104.59%	95.67%	91.02%	105.17%	96.90%	90.93%
9. Ordnung	95.68%	100.49%	89.17%	96.79%	100.78%	88.28%
10. Ordnung	105.13%	98.77%	98.13%	106.35%	98.80%	97.87%
Mittel	100.03%	99.03%	94.91%	100.07%	99.04%	95.23%

	3. Bearbeitung			4. Bearbeitung		
	Al-R4	St-R4	St-V6	Al-R4	St-R4	St-V6
	Neu	Neu	Neu	Neu	Neu	Neu
1. Ordnung	98.15%	99.70%	93.64%	98.28%	99.81%	95.12%
2. Ordnung	99.22%	98.96%	96.51%	99.16%	98.13%	96.99%
3. Ordnung	90.57%	103.16%	96.97%	91.40%	103.16%	95.37%
4. Ordnung	97.84%	99.02%	96.93%	97.73%	100.45%	94.45%
5. Ordnung	99.75%	93.83%	96.10%	100.29%	93.54%	97.55%
6. Ordnung	106.87%	99.81%	92.42%	106.86%	99.68%	93.54%
7. Ordnung	98.88%	101.41%	95.60%	98.59%	100.96%	94.49%
8. Ordnung	105.45%	96.86%	89.65%	105.61%	96.17%	89.27%
9. Ordnung	100.03%	101.60%	88.34%	99.57%	101.28%	86.85%
10. Ordnung	106.89%	98.75%	98.04%	106.97%	98.62%	98.07%
Mittel	100.37%	99.31%	94.42%	100.45%	99.18%	94.17%



Abbildung 82: Vergleich der arithmetischen Mittel über die Bearbeitungen

Tabelle 26: Legende zu Tabelle 25

Legende

<i>Neu</i>	Neuer Werkzeugzustand
<i>Al-R4</i>	Aluminium ZKG-R4
<i>St-R4</i>	Stahlguss ZKG-R4
<i>St-V6</i>	Stahlguss ZKG-V6
<i>Mittel</i>	Arithmetisches Mittel über die 10. Ordnungen

6.4.4 Diskussion

Die Erkenntnisse des ersten Hauptversuches, dass die Werkzeugzustandsüberwachung bei allen Materialien umsetzbar ist, konnte mit dem zweiten Hauptversuch nur teilweise bestätigt werden. Die beiden Messungen an den Stahlguss ZKG's konnten die Ergebnisse bekräftigen, jedoch kann für die Messung am Aluminium ZKG keine eindeutige Aussage getroffen werden. Man darf sich nicht von dem Umstand beirren lassen, dass der gute Werkzeugzustand bei manchen Ordnungen über dem verschlissenen Vergleichszustand liegt. Diese Tatsache ist nicht immer nur auf das Werkzeug zurückzuführen. Materialinhomogenität, Lunker und/oder Einschlüsse haben ebenso Einfluss auf die Messungen.

Das Ordnungsspektrum des Stahlguss ZKG-V6 (Abbildung 80) zeigt, dass die Amplituden vom verschlissenen Werkzeugzustand, über alle betrachteten Ordnungen, deutlich über den Amplituden des neuen Werkzeugzustands liegen. Tabelle 25 zeigt diese Unterschiede der Amplituden im prozentuellen Vergleich. Wie schon im ersten Hauptversuch, wurde der neue Werkzeugzustand auf den verschlissenen referenziert, wobei die 100% des verschlissenen Zustandes den maximalen Verschleiß repräsentieren.

Die Messung am Stahlguss ZKG-R4 (Abbildung 81) konnte nicht über alle Ordnungen, des verschlissenen Werkzeugzustand, höhere Amplituden aufzeigen. Die 3. Ordnung ist hierbei die einzige bei der der neue Werkzeugzustand deutlich über dem verschlissenen liegt, die anderen liegen nur im zehntel Prozentbereich darüber. Die 8. Ordnung sticht ebenso heraus, hier kann man eine um 4,5% geringeren Amplitudenstärke, als die des verschlissenen, ablesen. Tabelle 25 zeigt

somit, dass diese Unterschiede nicht mehr so signifikant sind wie in den Vorversuchen, aber im Mittel ist die Amplitudenstärke des neuen Werkzeugzustands geringer, demnach sind Unterschiede messbar und können interpretiert werden.

Bei den Messungen am Aluminium ZKG konnten keine zufriedenstellenden Ergebnisse (siehe Abbildung 75 und Abbildung 76) erhalten werden, obwohl der erste Hauptversuch gezeigt hat, dass auch Aluminium für die Zustandsüberwachung geeignet ist.

Diese unterschiedlichen Aussagen können darauf zurückzuführen sein, dass die Bearbeitungsparameter der beiden Versuche stark auseinander gehen.

Tabelle 27: Bearbeitungsparameter erster und zweiter Hauptversuch

	Erster Hauptversuch	Zweiter Hauptversuch
<i>Drehzahl</i>	n = 1500 U/min	n = 8000 U/min
<i>Vorschub</i>	$v_c = 1500$ mm/min	$v_c = 17280$ mm/min

Wie in der Versuchsbeschreibung erwähnt, wurde bei dieser Messung das komplette Werkzeug gewechselt und nicht nur die Wendeschneidplatten.

Das kann ebenso die Messung beeinflussen. Wenn der Schaft des Werkzeuges Schäden aufweist oder vom Aufbau her gering anders ist, als der des verschlissenen Werkzeuges, können Abweichungen im Signal entstehen.

Dies sind nur Annahmen die einen Einfluss auf die Messung haben können, welche natürlich überprüft werden müssen. Da die Projektlaufzeit zeitlich beschränkt war und die Maschinenbelegung zu dieser Zeit ausgelastet war, war es nicht möglich die Versuche noch einmal zu fahren. Um eine genaue Aussage über die Umsetzbarkeit der Zustandsüberwachung bei Aluminiumbearbeitung zu erhalten, sind jedoch weitere Untersuchungen notwendig oder es werden zeitnah direkt Langzeitversuche gestartet.

6.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Trotz der Schwierigkeiten der Interpretation im zweiten Hauptversuch kann aus den Messungen vorwiegend Positives abgeleitet werden. In den Signalen der Vorversuche und des ersten Hauptversuches sind die Unterschiede zwischen dem neuen und verschlissenen Werkzeugzustand deutlich erkennbar.

Die Einführung eines dritten Vergleichszustandes (gebrauchtes Werkzeug), beim ersten Hauptversuch, war grundlegend eine gute Idee. Jedoch wären mehr Informationen bezüglich des Zustandes des Werkzeuges hilfreich gewesen (z.B. bisherige Nutzungsdauer, Verschleißkurve etc.). Die gemittelten Amplituden der drei Werkzeugzustände, zeigten das erwartete Ergebnis. Die Amplitudenstärke des gebrauchten Werkzeugzustands liegt, im Mittel, zwischen der Amplitudenstärke des neuen und verschlissenen Werkzeugzustands. Auch im zweiten Hauptversuch konnte gezeigt werden, dass mit Beschleunigungssensoren die verschiedenen Werkzeugzustände im Signal erkannt werden können, jedoch nur für härtere Werkstoffe (Gusseisen, Stahl). Wie bereits in Kapitel 6.4.4 erwähnt müssen weitere Versuche zur Zustandsüberwachung bei der Bearbeitung von Aluminium durchgeführt werden, um eine Aussage für die Eignung treffen zu können. Alles in Allem konnten die Signale der verschiedenen Werkzeugzustände gut interpretiert werden und liefern eindeutige Grundlagen zur weiteren Betrachtung der Vorhersage des Werkzeugverschleißes.

7. Zusammenfassung

Bereits in der theoretischen Betrachtung konnte eine Zustandsüberwachung mittels Luftschallsensoren ausgeschlossen werden, da der Umgebungslärm in den Produktionshallen die Messung stark beeinflusst. Aus diesem Grund lag der Fokus der Versuchsdurchführung, von Anfang an, auf den Körperschalluntersuchungen von Bearbeitungsmaschinen.

Im Rahmen des Technologiescreenings wurden die Möglichkeiten der zu überwachenden Komponenten eingeschränkt. Die meisten Maschinenkomponenten, bei denen eine Zustandsüberwachung sinnvoll ist, verfügen über eine Lebensdauer von über einem halben Jahr. Angesichts dieser Betrachtung wurde entschieden eine Werkzeugzustandsüberwachung umzusetzen.

Die Versuchsdurchführung mit unterschiedlichen Werkzeugzuständen dient dazu, Amplitudenunterschiede im Signal, als Augenblickswert, zu erfassen. Hinsichtlich der vielen verschiedenen Materialien, die in der Produktion bearbeitet werden, ist die Versuchsdurchführung zur Übertragung auf unterschiedliche Werkstoffe angedacht. Hierbei werden jene Materialien getestet, die am häufigsten in der Motorenproduktion verwendet werden.

Bereits in den Vorversuchen sind eindeutige Amplitudenunterschiede zwischen dem neuen und den verschlissenen Werkzeugzustand identifizierbar. Dieses Ergebnis kann im ersten Hauptversuch, für alle getesteten Materialien, bestätigt werden. Die Auswertungen der Messungen bei den harten Werkstoffen (Stahlguss und Grauguss) und beim weicheren Aluminium zeigen die Eignung einer akustischen Zustandsüberwachung zur Werkzeugbewertung bei Bearbeitungsmaschinen. Beim zweiten Hauptversuch liefert die Auswertung der Messungen der Stahlguss-ZKG's (V6, R4) Ergebnisse, die die Umsetzbarkeit der Zustandsüberwachung bei Stahlguss bekräftigen.

Einzig die Messung beim Aluminium-ZKG konnte die Machbarkeit nicht bestätigen. Diese Untersuchung muss wiederholt werden, um eine allgemeine Aussage treffen zu können. Eine Wiederholung der Versuche war im Rahmen der Arbeit nicht möglich, da die Maschinenverfügbarkeit für dieses Projekt nicht ausreichend war.

Die Durchführung der Versuche erfolgte mit einem Zustandsüberwachungssystem, welches für eine Echtzeitanalyse ungeeignet ist. Dies bezieht sich jedoch nur auf die Nutzung der Software, welche eine Online Überwachung nicht unterstützt. Die ausgeführte Methodik sowie die verwendete Sensorik sind direkt übertragbar und für Echtzeitüberwachung geeignet. Deshalb werden in Kapitel 5 zwei Systeme von Messgeräten miteinander verglichen, die der Anforderung eines echtzeitfähigen CM-Systems entsprechen. Die Beschleunigungssensoren IMI 607A61 sind besonders für die Anwendung im Innenraum einer Bearbeitungsmaschine geeignet. Diese können in Kombination mit der Datenerfassungseinheit TPI 9034 und der Software TPI C-Trend II als Online Überwachungssystem installiert werden. Der Messaufbau, der für die Versuchsdurchführung verwendet wurde, ist direkt übertragbar und kann bei der Installation des Online-CM-Systems gleich aussehen.

8. Ausblick

Nicht nur aus dem Grund, dass bei der Versuchsdurchführung der Aluminiumbearbeitung die erhofften Ergebnisse ausblieben, sollen an den Produktionslinien Langzeitversuche durchgeführt werden. Da es auch bei den Bearbeitungsmaschinen, trotz desselben Maschinentyps, Unterschiede im Aufbau gibt (z.B. Werkstückbefestigung), sind die Langzeitversuche wichtig, um die Schwingungen zu interpretieren, welche die Messung beeinflussen können.

Die Durchführung dieser Langzeitversuche ist an Maschinen, welche häufig Probleme mit dem Werkzeug haben, am sinnvollsten umzusetzen. Nach erfolgreicher Testphase kann dieses Werkzeugüberwachungssystem flächendeckend in der Produktion umgesetzt werden. Wichtig ist es, während der Langzeitversuche alle Ereignisse (Werkzeugwechsel, -bruch, Wartungen, Spindelwechsel etc.) zu dokumentieren, um sie dem Signal zuordnen zu können. Essentiell ist demnach die Dokumentation des Werkzeugwechsels, diese Informationen werden in der Signalanalyse benötigt, um die Unterschiede der verschiedenen Werkzeugzustände interpretieren zu können.

Diese Einlaufphasen werden so ziemlich bei allen CMS benötigt und können als Anlernen der Parameter verstanden werden. Es ist nicht möglich ein solches CMS-System ohne Einlaufphase umzusetzen, da immer ein Sollzustand angelernt werden muss. In dieser Phase soll der Vergleichszustand (Sollzustand) mit einem neuen Werkzeug aufgezeichnet werden, um in Zukunft alle aktuellen Zustände (Istzustände) auf dieses Signal referenzieren zu können. (Weck, Brecher 2006, p. 269)

Angesichts der Erkennung eines verschlissenen Werkzeug im Betrieb, muss die Einlaufphase mindestens so lange sein, wie die Werkzeugstandzeit. Eine Vorhersage des Zeitpunktes, wann ein Werkzeug gewechselt werden muss, ist nur bei bekanntem Signalverlauf (abgeleitete Verschleißkurve) möglich. Nur so können im Signal gewisse Warngrenzen geschaffen werden, die vorgeben wann ein Werkzeugwechsel erfolgen muss.

Kommt es an der Linie des Öfteren zu Problemen aufgrund von Werkzeugbrüchen, muss auch dieses Ereignis erfasst werden. Um stochastische Fehler ausschließen zu können, wäre es wünschenswert diese Signale öfters als einmal zu erfassen. Das Signal wird bereits vor dem Bruch signifikante Änderungen, hervorgerufen durch Rissbildung im Werkzeug, zeigen, die dezidiert auf einen zeitnahen Bruch hinweisen. Wenn es bereits zum Bruch gekommen ist, dann ist dem Messsignal eine Frequenzverschiebung zu entnehmen, jedoch ist das Ziel, Werkzeugbrüche und andere Störungen bzw. Fehler frühzeitig zu erkennen.

Nach der Einlaufphase des Systems, ist es möglich die Standzeitgrenzen des Werkzeuges besser auszunutzen. Dazu wird eine Korrelation mit den qualitätsüberprüfenden Maßnahmen benötigt. Das bedeutet die Oberfläche der bearbeiteten Bauteile soll Rückschlüsse auf den wirklichen Verschleiß des Werkzeuges geben. Die Qualität des Bauteils muss nach Ablauf der Werkzeugstandzeit regelmäßig kontrolliert werden. Dies geschieht so lange bis die Oberflächengüte nicht mehr in der Toleranz liegt und Ausschuss produziert wird. Dann ist die Werkzeugstandzeit für diese spezifischen Fertigungen überschritten.

Hierbei ist eine lückenlose Aufzeichnung der Schwingungssignale besonders wichtig. Die erfassten Schwingungssignale zu dem Zeitpunkt, an dem die Oberfläche nicht mehr den gewünschten Vorgaben entspricht, spiegeln den maximalen Verschleiß des Werkzeuges wider und können als Abschaltgrenze der Maschine in das CM-System implementiert werden.

Wesentliche Signalveränderungen werden sich auch beim Spindel- oder Lagertausch ergeben, sollten diese zu warten sein. Da die Beschleunigungssensoren am Spindelgehäuse angebracht sind, können Zustandsveränderungen der Spindel zeitgleich zu den Veränderungen des Werkzeugs erfasst werden. Für die Interpretation der Spindelschwingungen müssen ebenso Langzeittests (mindestens so lange wie die zweifache Spindellebensdauer) durchgeführt werden, da hier noch keine Untersuchungen angestellt wurden. Das bedeutet, dass auch hier während den Langzeittest ein Spindelaustausch stattfinden muss, um die Signalunterschiede zu identifizieren. Es ist sinnvoll diese Untersuchungen an mehreren Bearbeitungsmaschinen, des gleichen Typs, umzusetzen, um die Spindelschwin-

gungen von anderen Einflüssen unterscheiden zu können. Wenn die Signalcharakteristik der Spindel, nach Abschluss der Langzeitversuche, bekannt ist, kann dieses CMS zwei oder auch mehr Komponentenzustände bewerten.

Diese Art der Instandhaltung, soll es AHM ermöglichen, die Wartungsintervalle besser zu planen und geeignete Maßnahmen vorzubereiten. Zusätzlich kann die Lebensdauer von Maschinenkomponenten verlängert werden. Daraus resultieren geringere Ausschussstückzahlen in der Produktion und geringere Kosten in der Wartung und Instandhaltung. Da diese Art der Überwachung von Bearbeitungsmaschinen an jedem Bearbeitungszentrum umgesetzt werden kann, führt eine zukünftige flächendeckende Umsetzung zu einer erheblichen Kostenreduktion in der Produktion (Überführung einer ungeplanten in eine geplante Reparatur) und zu einer Verringerung von technischen Verlust, Werkzeug-, Qualitäts-, TPM-, Rüst- und Leistungsverlust. (vgl. AUDI Hungaria 2012, p. 26)

9. Literaturverzeichnis

Amt für Umweltschutz (2017): Lärmfibel. URL: <http://www.staedtebauliche-laermfibel.de/?p=87&p2=2.4.1>, Stand: 11.1.2017.

Antoni; Randall (2002): Differential Diagnosis of Gear and Bearing Faults. In J. Vib. Acoust. 124 (2), p. 165. DOI: 10.1115/1.1456906.

AUDI Hungaria (2012): TPM Handbuch.

Byrne; Dornfeld; Inasaki; Ketteler; König; Teti (1995): Tool Condition Monitoring (TCM) — The Status of Research and Industrial Application. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60503-4.

Capdessus; Sidahmed; Lacoume (2000): Cyclosationary Process. Application in gear faults early diagnosis. In Mechanical Systems and Signal Processing 14 (3), pp. 371–385. DOI: 10.1006/mssp.1999.1260.

db-Prüftechnik (2017): Drehzahlsensoren. URL: <http://www.prueftechnik.com/de/produkte/condition-monitoring-systeme/sensoren-und-zubehoer-fuer-condition-monitoring/drehzahlsensoren-keyphaser.html>, Stand: 20.1.2017.

DIN 31051:2012-09: Grundlagen der Instandhaltung.

Dytran (2017): Model 3224A1, Miniature Accelerometer. URL: <http://www.dytran.com/Model-3224A1-Miniature-Accelerometer-P2325.aspx>, Stand: 15.1.2017.

Fraunhofer Institut (2009): Online Prozessüberwachung mittels Körperschallsensoren. URL: <http://www.ipt.fraunhofer.de/de/kompetenzen/Produktionsmaschinen/Projekte/Online-Prozessueberwachung.html>, Stand: 18.5.2016.

Giljohann (2008): akustische Abkopplung.

URL: http://www.computational-acoustics.de/html/akustische_abkopplung.html, Stand: 20.1.2017.

Grob Werke (2017): Bearbeitungszentren/G-Module . URL: <http://www.grobgroup.com/produktbereiche/systemloesungen/bearbeitungszentren-g-module.html>, Stand: 28.2.2017.

Grote; Feldhusen (Eds.) (2001): Dubbel. Maschinenakustik. With assistance of P.W. Gold. 21. Auflage. Berlin: Springer. ISBN: 978-3-540-26620-4

Head Acoustics (2016a): ArtemiS suite Basic Analysis Module. URL: https://www.head-acoustics.de/downloads/de/artemis/D5001_ArtemiS_suite_Basic_Analysis_Module_g.pdf, Stand: 20.1.2017.

Head Acoustics (2016b): FFT - 1/n Oktavanalyse - Wavelet. URL: https://www.head-acoustics.de/downloads/de/application_notes/FFT_Wavelet_Terzpegel_d.pdf, Stand: 28.2.2017.

Head Acoustics (2016c): Ordnungsanalyse. URL: https://www.head-acoustics.de/downloads/de/application_notes/Ordnungsanalyse_d.pdf, Stand: 30.12.2016.

Head SQuadriga II (2017): Bereich NVH - Frontends - Mobiles Aufnahme- und Wiedergabesystem. URL: https://www.head-acoustics.de/de/nvh_squadriga_II.htm, Stand: 15.1.2017.

Hemmati, F.; Orfalib, W.; Gadala, M. S. (2016): Roller bearing acoustic signature extraction by wavelet packet transform, applications in fault detection and size estimation. DOI: 10.1016/j.apacoust.2015.11.003.

Henn, Hermann; Fallen, Manfred; Sinambari, Gh. Reza (2008): Ingenieurakustik. Physikalische Grundlagen und Anwendungsbeispiele. 4., überarbeitete und erw. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag. ISBN: 978-3-8348-9537-0

Hering Ekbert; Martin Rolf; Stohrer Martin (2009): Taschenbuch der Mathematik und Physik. Akustik. 5. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer. ISBN: 978-3-540-78684-9

IMI Armored Sensors (2017): IMI Model 607A61. URL: <https://www.imi-sensors.com/Products?tx=217>, Stand: 15.1.2017.

IMI Sensors (2017): IMI Model 607A61. URL: https://www.imi-sensors.com/Industrial_Accelerometers/Low_Cost_for_Permanent_Installation, Stand: 15.1.2017.

Jardine, Andrew K.S.; Lin, Daming; Banjevic, Dragan (2006): A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. In *Mechanical Systems and Signal Processing* 20 (7), pp. 1483–1510. DOI: 10.1016/j.ymssp.2005.09.012.

Klocke, Fritz; König, Wilfried (2008): *Fertigungsverfahren 1. Drehen, Fräsen, Bohren*. 8 Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag (VDI-Buch). ISBN: 978-3-540-23458-6

Kollmann, Franz G.; Schösser, Thomas F.; Angert, Roland (2006): *Praktische Maschinenakustik*. 1. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag (VDI-Buch). ISBN: 978-3-540-30975-8

Lerch, Reinhard; Sessler, Gerhard; Wolf, Dietrich (2009): *Technische Akustik. Grundlagen und Anwendungen*. Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN: 978-3-540-49833-9

Lexikon - Luftschall (2017): Luftschall - Bedeutung Erklärung Definition. URL: <http://www.info-magazin.com/?suchbegriff=Luftschall>, Stand: 11.1.2017.

Maier (2002): *Wavelets: Ein neues Werkzeug in der digitalen Signal- und Bildanalyse*. FH München. URL: <http://dodo.fb06.fh-muenchen.de/maier/Wavelet-Transformation.pdf>, Stand: 12.1.2017.

Marcus Bengtsson; Erik Olsson; Peter Funk; Mats Jackson (2004): *Design of Condition Based Maintenance System. A Case Study using Sound Analysis and Case-Based Reasoning*. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.122.2614&rep=rep1&type=pdf>. Stand: 10.12.2016.

Márquez, F. P. (2012): *Condition monitoring of wind turbines: Techniques and methods*. DOI: 10.1016/j.renene.2012.03.003.

Matyas (2002): Ganzheitliche Optimierung durch individuelle Instandhaltungsstrategien. URL: http://www.imme2000.de/dokumente/FachspezifischerTeil/Technik/Foerdertechnik/Instandhaltungsstrategien_e.pdf, Stand: 14.1.2017.

Matyas, Kurt (2013): Instandhaltungslogistik. Qualität und Produktivität steigern. 5. Auflage, aktualisierte Aufl. München [u.a.]: Hanser (Praxisreihe Qualitätswissen). ISBN: 978-3-446-43589-6

Mba D.; Rao R. B. (2006): Development of Acoustic Emission Technology for Condition Monitoring and Diagnosis of Rotating Machines; Bearings, Pumps, Gearboxes, Engines and Rotating Structures. DOI: 10.1016/j.ymssp.2010.06.010.

Michael Möser (Ed.) (2010): Messtechnik der Akustik. Wandler für Luftschallmessungen. S. 1-52. With assistance of Erhard Wallner. Berlin: Springer. ISBN: 978-3-540-68086-4

mohdalaamri (2013): Factors affecting tool life in machining processes. URL: <http://www.slideshare.net/mohdalaamri/factors-affecting-tool-life-in-machining-processes>, Stand: 23.1.2017.

Moubray, John (1996): RCM - die hohe Schule der Zuverlässigkeit von Produkten und Systemen. Landsberg: Moderne Industrie. ISBN: 978-3-478-91630-1

N Tandon A. C. (1999): A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings. DOI: 10.1016/S0301-679X(99)00077-8.

National Instruments (2012): Definition der Ordnungsanalyse. URL: http://zone.ni.com/reference/de-XX/help/370858K-0113/genmaths/genmaths/calc_orderanalysis/, Stand: 31.12.2016.

ÖNORM EN 13306:2010: Instandhaltung - Begriffe der Instandhaltung

Pawellek, Günther (2013): Integrierte Instandhaltung und Ersatzteillogistik. Vorgehensweisen, Methoden, Tools. Berlin, Heidelberg: Springer (Springer-Link : Bücher). ISBN: 978-3-642-31383-7

PCB Piezotronics (2015): Machine Tool Spindles. URL: https://www.imi-sensors.com/contentStore/mktg/IMI_Downloads/IMI-App-MAchineTools_Low-Res.pdf, Stand: 20.12.2016.

PCB Piezotronics Inc. (2016): Acoustic Measurement Sensors & Instrumentation. URL: http://www.pcb.com/Linked_Documents/Acoustics/TM_AC_Mics_Lowres.pdf, Stand: 28.2.2017.

Promotec (2011): Umfassende Spindelüberwachung. URL: http://www.promotec.com/download/datasheets_machining/3SA_Ring.GE.pdf, Stand: 20.05.2016.

Promotec (2016): Spindelüberwachung. URL: http://www.promotec.com/download/datasheets_machining/MCI.GE.pdf, Stand: 20.12.2016.

Prosig (2017): Prosig - Vaughn Associates, Inc. URL: <http://www.vaughn-associates.com/prosig/>, Stand: 15.1.2017.

Wirth (1998): Maschinendiagnose an Industriegetrieben. praktische Signalidentifikation. URL: http://machine-diagnostics.de/downloads/Maschinendiagnose_Teil_2.pdf, Stand: 20.12.2016.

Randall, R. B. (1982): A New Method of Modeling Gear Faults. In *J. Mech. Des.* 104 (2), p. 259. DOI: 10.1115/1.3256334.

Randall (2004): State of the Art in Monitoring. Rotating Machinery - Part 1. URL: <http://www.sandv.com/downloads/0403rand.pdf>, Stand: 10.12.2016.

Salgado; Alonso (2007): An approach based on current and sound signals for in-process tool wear monitoring. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2007.04.013.

Schenk, Michael (Ed.) (2010): Instandhaltung technischer Systeme. Methoden und Werkzeuge zur Gewährleistung eines sicheren und wirtschaftlichen Anlagenbetriebs. Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN: 978-3-642-03948-5

Schoen, R. R.; Habetler, T. G.; Kamran, F.; Bartfield, R. G. (1995): Motor bearing damage detection using stator current monitoring. In *IEEE Trans. on Ind. Appl. cat.* 31 (6), pp. 1274–1279. DOI: 10.1109/28.475697.

Sengpiel, Eberhard (2014): Der Pegel und die empfundene Änderung der Lautstärke. sengpielaudio. URL: <http://www.sengpielaudio.com/Rechner-pegelaenderung.htm>, Stand: 11.1.2017.

Shiroishi, J.; Li, Y.; Liang, S.; Kurfess, T.; Danyluk, S. (1997): Bearing condition diagnostics via vibration and acoustic emission measurements. In *Mechanical Systems and Signal Processing* 11 (5), pp. 693–705. DOI: 10.1006/mssp.1997.0113.

Shure (Ed.) (2013): Mikrofongrundlagen: Richtcharakteristik. URL: <https://shure-deutschland.wordpress.com/2013/02/08/mikrofongrundlagen-richtcharakteristik/>, Stand: 15.11.2016.

Siart (2014): Das Dezibel – Definition und Anwendung. URL: <http://www.siart.de/lehre/dezibel.pdf>, Stand: 11.1.2017.

Sinha, Jyoti K.; Elbhah, Keri (2013): A future possibility of vibration based condition monitoring of rotating machines. In *Mechanical Systems and Signal Processing* 34 (1-2), pp. 231–240. DOI: 10.1016/j.ymsp.2012.07.001.

SKF (2016): Vibration Sensors. URL: <http://www.skf.com/binary/49-267858/CM-P1-11604-14-EN-Vibration-Sensor-Catalog.pdf>, Stand: 20.05.2016.

Strunz, Matthias (2012): Instandhaltung. Grundlagen - Strategien - Werkstätten. Berlin, Heidelberg u.a.: Springer Vieweg. ISBN: 978-3-642-27389-6

Tan, Chee Keong; Irving, Phil; Mba, David (2007): A comparative experimental study on the diagnostic and prognostic capabilities of acoustics emission, vibration and spectrometric oil analysis for spur gears. In *Mechanical Systems and Signal Processing* 21 (1), pp. 208–233. DOI: 10.1016/j.ymsp.2005.09.015.

TPI Europe (2017): TPI 9034&9038. URL: <https://www.tpieurope.com/vibration-analyzers-condition-based-monitoring/9034-9038-smart-vibration-monitor/>, Stand: 15.1.2017.

Weber, Manfred (2009): Bedienungsanleitung 8-Kanal- IEPE Messverstärker M208A. URL: <http://www.mmf.de/iepe-standard.htm>, Stand: 14.1.2017.

Weck, Manfred; Brecher, Christian (2006): Werkzeugmaschinen 3. Mechatronische Systeme, Vorschubantriebe, Prozessdiagnose. 6., neu bearbeitete Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (VDI-Buch).

ISBN: 978-3-540-32506-2

Weller; Schrier; Weichbrodt (1969): What sound can be expected from a worn tool? DOI: 10.1115/1.3591621.

Werner, Martin (2000): Diskrete Fouriertransformation (DFT). In Martin Werner (Ed.): Signale und Systeme. Lehr- und Arbeitsbuch. Wiesbaden, s.l.: Vieweg+Teubner Verlag (Studium Technik), pp. 208–222. URL: <https://ti.tuwien.ac.at/cps/teaching/courses/dspv/files/DFT-FFT.pdf>, Stand: 22.12.2016.

Xiaozhi Chen; Beizhi Li (2007): Acoustic emission method for tool condition monitoring based on wavelet analysis. DOI: 10.1007/s00170-006-0523-5.

Zeller, Peter (2012): Handbuch Fahrzeugakustik. Grundlagen, Auslegung, Berechnung, Versuch. 2., überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag (ATZ/MTZ-Fachbuch). ISBN: 978-3-8348-8657-6

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Instandhaltungsstrategien	7
Abbildung 2: Abnutzungsvorrat im Vergleich.....	11
Abbildung 3: Vorgehensweise zur Auswahl der Strategie nach Moubray	14
Abbildung 4: Überwachung und Diagnose in der Qualitätssicherung.....	16
Abbildung 5: Einflussgrößen und Zielgrößen der Diagnose	18
Abbildung 6: Informationsfluss einer Überwachungseinrichtung	20
Abbildung 7: Aufbau Messkette.....	20
Abbildung 8: Beschleunigungssensor an Drehmeißel	24
Abbildung 9: Quellen des Körperschalls bei der Zerspanung.....	25
Abbildung 10: Oktavbandanalyse einer Drehschieberpumpe	25
Abbildung 11: Phon in Relation zum Schalldruckpegel und der Frequenz.....	30
Abbildung 12: gerichtete Bewertung des Schalldruckpegels.....	31
Abbildung 13: Vergleich Pegeländerung mit Lautstärke-, Schalldruck- und Schallintensitätsfaktor	31
Abbildung 14: Schallentstehungsmechanismen.....	33
Abbildung 15: akustische Messkette	36
Abbildung 16: Bauformen der piezoelektrischen Körperschallsensoren	38
Abbildung 17: Aufbau Kondensatormikrofon	44
Abbildung 18: Kugelcharakteristik	45
Abbildung 19: Nierencharakteristik.....	45
Abbildung 20: Supernierencharakteristik.....	45
Abbildung 21: Achtercharakteristik	46
Abbildung 22: Kondensatormikrofon	46
Abbildung 23: Aufbau Frequenzanalysator	48
Abbildung 24: Zeit-Frequenzebene	52

Abbildung 25: Vorgehen der Wavelet-Analyse	53
Abbildung 26: Frequenz-Zeitauflösung bei FFT und Wavelet-Analyse	54
Abbildung 27: Wasserfalldiagramm und Sonogramm Graustufendarstellung ..	56
Abbildung 28: Wasserfalldiagramm drehwinkelbasierten Frequenzanalyse	57
Abbildung 29: zweidimensionales Ordnungsspektrum.....	58
Abbildung 30: Körperschallsensoren zur Lagerüberwachung	60
Abbildung 31: Werkzeugüberwachung AE Sensoren.....	60
Abbildung 32: Sensoren zur Spindel- und Werkzeugüberwachung	61
Abbildung 33: Kondensatormikrofon mit Vorverstärker	64
Abbildung 34: Spindelüberwachung mittels Körperschall-/AE Sensor	65
Abbildung 35: empfohlene Sensorposition und dazu geeigneter Sensor	65
Abbildung 36: links: Sensoren zur Zustandsüberwachung mit Kabelschutz	68
Abbildung 37: P8004 mit 4 ICP-Eingängen und 1 Tacho Eingang	70
Abbildung 38: Datenerfassungseinheit TPI 9038	71
Abbildung 39: Beschleunigung-sensor DYTRAN Model 3224A1	74
Abbildung 40: (Head SQuadriga II 2017)	75
Abbildung 41: Bearbeitungsschritte Pilot-Pleuellinie	77
Abbildung 42: CNC Maschine G500	78
Abbildung 43: Werkzeugverschleißkurve	80
Abbildung 44: Übersicht Sensoren.....	84
Abbildung 45: Skizze Sensorpositionen	85
Abbildung 46: Sensorenposition.....	85
Abbildung 47: R4 ZKG aus Stahlguss.....	86
Abbildung 48: Bearbeitungsschritte eines Abtrages.....	86
Abbildung 49: 3D-Frequenzspektrum.....	87
Abbildung 50: 3D-Frequenzspektrum (eingeschränkter Frequenzbereich)	88

Abbildung 51: links: versetzte Sensorposition; rechts: laseroptischer Drehzahlsensor.....	91
Abbildung 52: Sensorposition Maschinenvorderansicht.....	91
Abbildung 53: Bypass der Bearbeitung (5 Zyklen, 15 Bearbeitungsschritte); ...	92
Abbildung 54: links: 3D- Spektrum vierte Bearbeitung; rechts: 3D- Spektrum sechste Bearbeitung	93
Abbildung 55: 2D- Spektrum: Überlagerung vom neuen und verschlissenen Werkzeugzustand der vierte Bearbeitung	94
Abbildung 56: 2D- Spektrum: Überlagerung vom neuen und verschlissenen Werkzeugzustand der sechsten Bearbeitung	94
Abbildung 57: Ordnungsspektrum: Überlagerung der vierte Bearbeitungen ..	95
Abbildung 58: Ordnungsspektrum: Überlagerung der sechste Bearbeitungen	95
Abbildung 59: Einmassenschwinger	97
Abbildung 60: Sensorposition erster Hauptversuch	99
Abbildung 61: verschiedene Versuchsmaterialien.....	100
Abbildung 62: Bearbeitung pro Werkzeug und Werkstück	100
Abbildung 63: Ordnungsspektren im Vergleich Aluminium,	102
Abbildung 64: Ordnungsspektren im Vergleich Gusseisen	102
Abbildung 65: Ordnungsspektren im Vergleich Stahlguss	103
Abbildung 66: Stahlguss erste Bearbeitung	104
Abbildung 67: Gusseisen erste Bearbeitung	104
Abbildung 68: Aluminium erste Bearbeitung	104
Abbildung 69: arithmetisches Mittel der 1.Bearbeitung	106
Abbildung 70: arithmetisches Mittel der 2. Bearbeitung	107
Abbildung 71: Beispielhafter Verlauf Werkzeugverschleißkurve	108
Abbildung 72: links: Fräser für Stahlguss; rechts: Fräser für Aluminium	111
Abbildung 73: links: Aluminium ZKG R4; rechts oben: Stahlguss ZKG R4; ...	112

Abbildung 74: Bearbeitungsverlauf, Draufsicht ZKG	113
Abbildung 75: Überlagertes Ordnungsspektrum Bearbeitungsschritt 3 Aluminium ZKG-R4	115
Abbildung 76: Überlagertes Ordnungsspektrum Bearbeitungsschritt 4 Aluminium ZKG-R4	115
Abbildung 77: Überlagertes Ordnungsspektrum Bearbeitungsschritt 3 Stahlguss ZKG-R4.....	116
Abbildung 78: Überlagertes Ordnungsspektrum Bearbeitungsschritt 3 Stahlguss ZKG-V6.....	116
Abbildung 79: gemittelttes Ordnungsspektrum der vierten Bearbeitung Aluminium ZKG-R4.....	117
Abbildung 80: gemittelttes Ordnungsspektrum der vierten Bearbeitung Stahlguss ZKG-V6.....	117
Abbildung 81: gemittelttes Ordnungsspektrum der vierten Bearbeitung Stahlguss ZKG-R4.....	117
Abbildung 82: Vergleich der arithmetischen Mittel über die Bearbeitungen ...	119
Abbildung 83: ZKG Draufsicht.....	141

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Strategien und ihre Anwendung	15
Tabelle 2: Frequenzbereiche.....	27
Tabelle 3: Messgeräte Körperschall.....	38
Tabelle 4: Aufbauarten Elektrodynamischer Wandler	43
Tabelle 5: Übersicht Möglichkeiten der Signalanalyse	50
Tabelle 6: Übersicht der Techniken und ihrer Anwendungen.....	63
Tabelle 7: Sensoren zur Werkzeugzustandsüberwachung	69
Tabelle 8: Vergleich Datenerfassungseinheiten	71
Tabelle 9: Softwarevergleich	73
Tabelle 10: empfohlenes Messequipment.....	73
Tabelle 11: DYTRAN 3224A1	74
Tabelle 12: Datenerfassungseinheit.....	75
Tabelle 13: Begriffsdefinition Werkzeugzustände	81
Tabelle 14: Übersicht Versuchsparameter	82
Tabelle 15: Parameter des ersten Vorversuchs	83
Tabelle 16: Parameter zweiter Vorversuch	90
Tabelle 17: Zeitpunkte für 2D-Schnitte.....	96
Tabelle 18: Parameter des ersten Hauptversuchs	98
Tabelle 19: Materialbezeichnungen	100
Tabelle 20: Vergleich Amplitudenstärke der Ordnungen.....	105
Tabelle 21: Legende zum Amplitudenvergleich	106
Tabelle 22: Parameter des zweiten Hauptversuchs	110
Tabelle 23: Versuchsdaten	113
Tabelle 24: Messungen am Beispiel Stahlguss-ZKG	114

Tabelle 25: Amplitudenstärke (bezogen auf den verschlissenen Werkzeugzustand in Prozent).....	118
Tabelle 26: Legende zu Tabelle 24	120
Tabelle 27: Bearbeitungsparameter erster und zweiter Hauptversuch.....	121
Tabelle 28: Bearbeitungsschritte Vorversuch.....	141

Anhang

Erster Vorversuch Bearbeitungsschritte Übersicht

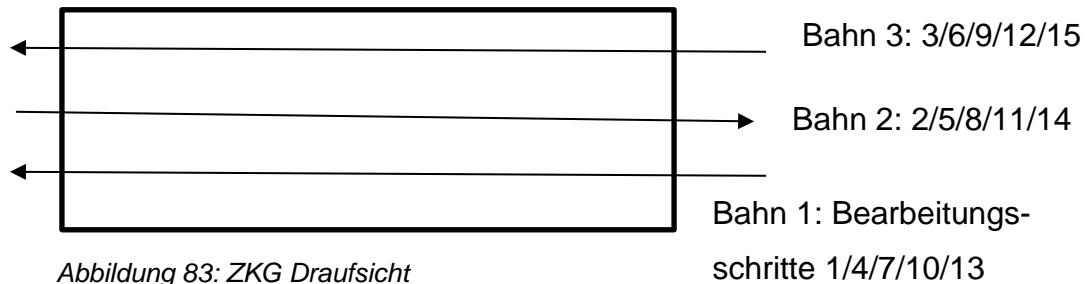


Abbildung 83: ZKG Draufsicht

Drei Bearbeitungsschritte ergeben einen Zyklus, da fünf Mal 0,5 mm abgetragen wurden, ergibt das 15 Bearbeitungsschritte pro Werkzeug. Jeder Bearbeitungsschritt entspricht einer Messung während den Versuchen. Diese 15 Bearbeitungsschritte wurden zuerst mit einem neuen Werkzeug gefahren und dann mit einem verschlissenen. Verglichen wurden immer die gleichen Bearbeitungsschritte/Messungen untereinander, z.B. Messung 3 gutes Werkzeug mit Messung 3 verschlissenes Werkzeug.

Tabelle 28: Bearbeitungsschritte Vorversuch

Messung	Werkzeug	Bahn	Abtrag vor Messung
1	Gut/Schlecht	1	0
2	Gut/Schlecht	2	0
3	Gut/Schlecht	3	0
4	Gut/Schlecht	1	0,5
5	Gut/Schlecht	2	0,5
6	Gut/Schlecht	3	0,5
7	Gut/Schlecht	1	1
8	Gut/Schlecht	2	1
9	Gut/Schlecht	3	1
10	Gut/Schlecht	1	1,5
11	Gut/Schlecht	2	1,5
12	Gut/Schlecht	3	1,5
13	Gut/Schlecht	1	2
14	Gut/Schlecht	2	2
15	Gut/Schlecht	3	2