



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN  
Vienna University of Technology

## DIPLOMARBEIT

# Validierung von Vorgehensweisen zur Verschleißmessung an Perlmühlen in der Lackindustrie

ausgeführt am Institut für Angewandte Physik  
der Technischen Universität Wien

in Kooperation mit Axalta Coating Systems Austria GmbH

unter der Anleitung von  
**Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.Tech. Martin Gröschl**

durch

**Filip Vuckovic**

Matr. Nr.: 01227428

Barthgasse 9/1 1030 Wien

11. Dezember 2020

## Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen von mir selbstständig erstellt wurde. Alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, sind in dieser Arbeit genannt und aufgelistet. Die aus den Quellen wörtlich entnommenen Stellen, sind als solche kenntlich gemacht.

Das Thema dieser Arbeit wurde von mir bisher weder im In- noch Ausland einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt. Diese Arbeit stimmt mit der von den Begutachterinnen/Begutachtern beurteilten Arbeit überein.

## Danksagung

An erster Stelle möchte ich meinem Betreuer Prof. Dr. Martin Gröschl danken, der mich mit den zahlreichen hilfreichen Anregungen und viel Engagement während meiner Arbeit begleitet hat.

Ich danke herzlich dem Herrn Dr. Manfred Dostl, der Fr. Barbara Froschauer und der ganzen Produktionsabteilung der Fa. Axalta Guntramsdorf für ihre zielführende Betreuung, Unterstützung und die angenehme Arbeitsatmosphäre.

Des Weiteren möchte ich mich bei Hr. Patrick Erb und seiner Instandhaltungsabteilung der Fa. Axalta Guntramsdorf bedanken, der mir ausführliche Informationen über das Problem zur Verfügung gestellt und konstruktive Anmerkungen gegeben hat.

Abschließend danke ich meinen Eltern und meiner Partnerin für ihren bedingungslosen Rückhalt und die motivierenden Worte.

## Zusammenfassung

Mögliche Methoden und Ansätze für die Detektion und Quantifizierung des Verschleißes bei Perlmühlen in der Lackindustrie werden vorgestellt und diskutiert. Die vielversprechende Vibrationsanalyse wird für die experimentelle Untersuchung ausgewählt. Dafür musste ein Messgerät samt Software konstruiert werden. Die Ergebnisse zeigen, dass das Einsetzen der Vibrationsanalyse einen Indikator für die Abnutzung der rotierenden Bauteile bereitstellen kann. Um das volle Potenzial der Methode nutzen zu können, sind weitere Untersuchungen erforderlich.

## Abstract

Possible techniques and approaches for the detection and measuring of wear in bead mills in coatings industry are presented and discussed. A highly promising technique of vibration analysis has been selected for the experimental investigation. A measuring device with software had to be built for this purpose. The results show that the usage of vibration analysis can provide an indicator of wear on the rotating components. In order to use the full potential of the method further research is required.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung: Das Problem und die Aufgabe</b>	<b>6</b>
1.1	Unterschiedliche Ansätze zur Instandhaltung	6
1.2	Perlmühlen und ihr physikalischer Hintergrund	8
1.2.1	Doppelkammer-Perlmühle	8
1.2.2	CoBall-Ringspaltkugelmühle	8
<b>2</b>	<b>Mögliche Lösungen - Bisher betrachtete Methoden</b>	<b>12</b>
2.1	Schon vorhandene Sensoren	12
2.2	Statistik für CoBall-Mühlen	13
2.3	Offiziell empfohlenes Vorgehen	13
2.4	Nicht geeignete Methoden	15
2.4.1	Messung der Infrarotstrahlung der Mühle während des Betriebes	15
2.4.2	Analyse mithilfe radioaktiver Nuklide	15
2.5	Ultraschallmessung	16
2.6	Gepulster Wirbelstrom (Pulsed Eddy Current (PEC))	19
2.7	Analyse des Mahlgutes	20
2.8	Direkte Volumenmessung	22
2.8.1	Einfaches Modell der Abhängigkeit des Mahlspalts und der Wanddicke vom Mahlspaltvolumen	24
2.9	Kooperation mit der Produktionsabteilung	28
2.10	Drehmomentmessung	29
2.11	Elektrische und/oder mechanische Leistungsmessung	30
2.12	Koordinatenmessgeräte	32
2.12.1	3D Scanner	35
2.13	Industrielle Computertomographie	37
2.14	Tangentiale Radiographie für Vollrath-Mühlen	40
<b>3</b>	<b>Vibrationsanalyse</b>	<b>43</b>
3.1	Physikalische Grundlagen der Vibrationen	43
3.2	Fourier-Analyse	44
3.3	Defekte	46
3.4	Unwucht der Rotoren	47
3.5	Mühlen und Vibrationen	50
<b>4</b>	<b>Gerät und Messsoftware</b>	<b>53</b>
4.1	Konstruktion des Gerätes	53
4.1.1	Mikrocontroller	54
4.1.2	Beschleunigungssensor	54
4.1.3	Speichermedium	57
4.1.4	Gehäuse, Verbindungen und Abschlussarbeiten	58

4.2	Die Software des Gerätes . . . . .	59
4.2.1	Einstellungen . . . . .	59
4.2.2	Einschaltung . . . . .	60
4.2.3	Formatieren . . . . .	60
4.2.4	Sensorauswahl . . . . .	61
4.2.5	Messung . . . . .	61
4.2.6	UserFunctions.cpp und Probleme . . . . .	62
4.3	GUI-Applikation . . . . .	63
4.3.1	FFT-Hauptcode . . . . .	63
4.3.2	Fenster-Funktion . . . . .	66
4.3.3	Anti-Leak-Algorithmus . . . . .	67
4.3.4	Der quadratische Mittelwert QMW (RMS) . . . . .	68
4.3.5	GUI . . . . .	69
4.3.6	Bedienungsanleitung für die GUI-Applikation . . . . .	69
<b>5</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>73</b>
5.1	Testen des Geräts . . . . .	73
5.1.1	Probleme und Fehlmessungen . . . . .	73
5.1.2	Wohnraumrauschen . . . . .	74
5.1.3	Verschiedene Sinustöne . . . . .	75
5.1.4	Dieselmotor . . . . .	76
5.2	Mühlenmessungen . . . . .	77
5.2.1	Gemittelte FFT-Spektren . . . . .	77
5.2.2	Frequenzidentifikation . . . . .	77
5.2.3	Frequenzschwankungen und Reproduzierbarkeit . . . . .	78
5.2.4	Gesamtverschleiß und Vibrationen . . . . .	80
5.2.5	Mahlprodukt und Vibrationen . . . . .	82
5.2.6	Untersuchung der Phasenverschiebung und Rotorunwucht . . . . .	84
5.2.7	Statorasymmetrie . . . . .	87
5.2.8	Vollrath-Perlmühlen . . . . .	88
5.2.9	Messstrategien für die weiteren Untersuchungen . . . . .	90
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>94</b>
	<b>Literatur</b>	<b>a</b>

# 1 Einleitung: Das Problem und die Aufgabe

In der Lackindustrie werden zahlreiche metallische Pigmente, die die Farbe des Produktes bestimmen, im Rahmen der Lackproduktion verarbeitet bzw. zerkleinert und dispergiert. Die Pigmente werden u.a. mit Lösung- und Bindemitteln gemischt und so entstandene Suspensionen gehen in die Mühlen, wo die Endverarbeitung (Dispergierung) stattfindet. Feste Komponenten werden bis zu einer gewünschten Korngröße zerkleinert. Dieser Mahlprozess ist ein grundsätzlich physikalischer Prozess, bei dem die Dispergiermittel den erneuten Aufbau von großen Partikeln chemisch verhindern sollen.

Die Arbeit wurde bei der Fa. Axalta Guntramsdorf durchgeführt. Dort werden sogenannte Perlmühlen benutzt. Diese Mühlen bestehen aus einem Stator (bzw. Mahltopf) und je nach der Mühlenart entweder einem Rotor oder einem Rührwerk (s. Kap. 1.2). Auf jeden Fall existiert ein Mahlraum, wo sich kleine und, wegen der Rotationen des Rotors bzw. Rührwerks, schnell bewegende Perlen befinden. Die gegenseitigen Stöße zwischen den Perlen und, im viel kleineren Ausmaß, zwischen den Perlen und den Wänden verursachen die gewünschte Partikelzerkleinerung. Die mechanische Leistung, die für den Mahlprozess benutzt wird, wird großenteils in die Wärme umgewandelt und nur ein kleiner Teil davon wird für den tatsächlichen Zerkleinerungsprozess ausgenutzt [1]. Das Produkt verträgt aber in der Regel keine hohen Temperaturen und deswegen werden Bauteile ständig abgekühlt. Dabei strömt das Kühlwasser durch die Hohlräume der Rotoren und Statoren. Ein, für alle Mühle gemeinsames, Wasserleitungssystem wurde dafür aufgebaut.

Obwohl die Mühlen so verschleißfest wie möglich konstruiert sind, werden sie im Laufe der Zeit langsam wegen der Wechselwirkungen mit den Perlen und dem Produkt abgenutzt. Aufgrund der Anwesenheit des Kühlwassers in den Hohlräumen von den Bauteilen führt der Verschleiß irgendwann einmal zu dem Wandbruch und Leckagen von Kühlmittel in den Mahlraum. Das zerstört nicht nur eine Charge des Produktes, die zu der Zeit im Mahlraum bearbeitet wurde, sondern kann, wegen des gemeinsamen Kühlsystems, potentiell zu der Kontaminierung des Kühlwassers führen und dadurch praktisch alle vernetzte Mühlen und Rohrleitungen beeinflussen.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, das bereits bestehende Instandhaltungssystem zu verbessern, um diese Havarien zu vermeiden. Praktisch bedeutet das, dass die Messmethoden gefunden und Strategien entwickelt werden müssen, um die Untersuchung des Mühlenverschleißes bzw. der Wanddicke der Rotoren und Statoren zuverlässiger durchzuführen. Im idealen Fall schafft man das, ohne die Mühle demontieren zu müssen.

## 1.1 Unterschiedliche Ansätze zur Instandhaltung

Es gibt drei verschiedene Hauptphilosophien der Instandhaltung bei Betrieben jeder Art:

1. **Instandhaltungsarbeiten werden, erst nach dem Problem bereits entstanden ist, durchgeführt**, was veraltet, aufwendig und kostspielig ist.
2. **Präventive Instandhaltung**. Hier wird nicht bis zum Auftreten eines Problems gewartet, sondern ist die Instandhaltung in regelmäßigen, auf Erfahrung beruhenden

Intervallen präventiv vorgenommen. Damit sind die große Kosten (z.B. Produktionspausen) des ersten Ansatzes weitgehend erspart. Allerdings werden Instandhaltungsoperationen meistens vorzeitig und umsonst vorgenommen.

- 3. Prädiktive Instandhaltung, eventuell mit einem proaktiven Ansatz.** Die Produktionsmaschinen werden auch hier präventiv untersucht, aber man hat vor Ort zusätzlich die Informationen über das tatsächliche Ausrüstungsverhalten während des Betriebes. Das ermöglicht einen Austausch von Bauteilen erst dann, wenn bestimmte Mängel bemerkt werden. Zusätzlich können dann auch die Ursachen der Abnutzung besser verstanden, und womöglich auch beseitigt werden.

Der erste Ansatz wird, außer bei der nicht so kritischen oder essenziellen Maschinen, bei modernen Betrieben fast nie benutzt.

Die Fa. Axalta Guntramsdorf benutzt für die kritische Ausrüstung bzw. ihre Mühlen einen Hybridansatz aus den präventiven und prädiktiven Methoden. Zusätzlich entstehen nicht selten Probleme und Havarien, wobei natürlich auch die großen Nachteile des ersten Ansatzes anwesend sind.

In der Praxis bedeutet dies, dass die Mühlen nach einer vorbestimmten Anzahl der Betriebsstunden demontiert und ihre Bauteile auf Defekte geprüft werden. Danach werden die problematischen Bauteile ausgetauscht und für die Anderen wird die neue Laufzeit, auf Erfahrung beruhend, geschätzt. In viel kürzeren regelmäßigen Intervallen wird aber das Auslitern der Mühlen gemacht (s. Kap. 2.8). Die Informationen über das verlorene Mahlsplattvolumen werden hier für die Korrektur der abgeschätzten Laufzeit für Rotoren und Statoren manchmal benutzt, was schon unter dem Begriff der prädiktiven Instandhaltung fällt.

Trotz des Aufwands entstehen zwischendurch verschiedene Probleme, die vorzeitige Demontagen verlangen. Je nach Problem werden die Laufzeiten von verschiedenen Bauteilen neu abgeschätzt. Das größte Problem tritt auf, wie im Kap. 1 erklärt, wenn das Kühlwasser in den Mahlsplatt durchdringt. Bei dieser Havarie muss es nicht nur um eine bloße Fehlabschätzung der Restzeit gehen, sondern ein Fehler oder ein Übersehen während der Messung vom Rotor und Stator könnte auch (s. Kap. 2.3 und 2.5) die Ursache für eine solche Havarie sein.

Die erste Aufgabe dieser Arbeit kann man, unter Verwendung der oben erklärten Terminologie, als die Verbesserung der Instandhaltung vom Rotor und Stator in die Richtung der prädiktiven Instandhaltung, zusammenfassen. Es ist aber für keine im unteren Kapitel untersuchten Methoden (oder Methodenkombinationen, s. Kap. 2) möglich die Wanddickmessung ohne Demontage genau zu bestimmen. Aus diesem Grund sind auch Methoden inkludiert, die nach Demontage viel genauer die Wanddicke bestimmen können als derzeit benutzten Messungen. (s. Kap. 2.12, 2.12.1 und 2.13)

Eine Methode, die Vibrationsanalyse (s. Kap. 3), die im Rahmen dieser Arbeit ebenfalls experimentell untersucht wurde (s. Kap. 5), kann einen Indikator für die Wahrscheinlichkeit des Wandbruchs vom Rotor bereitstellen. Zusammen mit den anderen, im Rahmen dieser Arbeit, gefundenen Möglichkeiten für eine verbesserte Verschleißverfolgung ist der Instandhaltung ermöglicht, in die Richtung einer mehr prädiktiven und sogar proaktiven Arbeitsweise sich zu entwickeln.

## 1.2 Perlmühlen und ihr physikalischer Hintergrund

Bei Axalta Guntramsdorf benutzt man überwiegend zwei verschiedene Rührwerkskugelmühlen für die Lackherstellung, die Doppelkammer-Perlmühle von Vollrath und die CoBall-Ringspaltkugelmühle von Fryma. Bei der Literaturrecherche und Methodenauswahl für die Lösung des Verschleißproblems werden beide Arten der Mühlen immer berücksichtigt. Die CoBall-Mühlen wurden aber stark bevorzugt.

### 1.2.1 Doppelkammer-Perlmühle

Die Kammern bzw. die Mahltöpfe sind mit Perlen gefüllt, die durch ein rotierendes, mit Scheiben ausgerüstetes Rührwerk zusammen mit dem Mahlgut bewegt werden. Die Töpfe sind vertikal montiert, sodass der statische Druck auf den Perlen maximal wird. Das Mahlgut geht mithilfe einer Pumpe im ersten Topf von unten ein. Der Ausgang des ersten Topfes ist mit dem Eingang des Zweiten verbunden. Die Kammern sind nebeneinander gestellt (s. Abb. 1). Die Produktsuspension wird dadurch doppelt gemahlen.

Das Rührwerk verursacht die Bewegung der Perlen und deswegen ist die Energiedichte in der Nähe von Scheiben am größten. Laut Geisler [1], nimmt mit zunehmender Entfernung davon die lokale Energiedichte mit der dritten Potenz ab. Das kann weiter eine Verbreiterung des Korngrößenspektrums bzw. ein ungleichmäßiges Mahlergebnis verursachen. Der Prallverschleiß ist hier der Hauptverschleißmechanismus. Insbesondere ist der Rührwerksverschleiß bei diesen Mühlen sehr groß.

In der Nassmahltechnik ist die gesamte Oberfläche von Perlen mehrmals größer als die Rotor- und Statoroberflächen. Deswegen ist der Hauptmechanismus der Partikelzerkleinerung in der Produktsuspension die Perle-Perle Wechselwirkungen. Für den Mahlprozess ist also die kinetische Energie der Perlen und die Häufigkeit ihrer gegenseitigen Stöße entscheidend. Deswegen ist für eine gleichmäßige Mahlleistung auch eine enge Mahlkugelgrößenverteilung erforderlich.



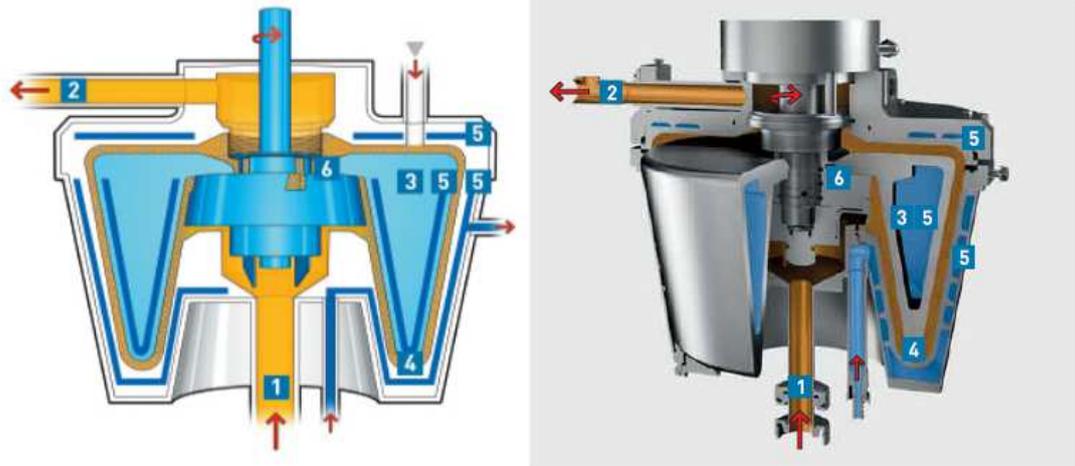
Abbildung 1: Eine moderne Variante der Doppelkammer-Perlmühle von Vollrath [35]. Im Betrieb sind derzeit viel ältere Modelle.

### 1.2.2 CoBall-Ringspaltkugelmühle

Ringspaltkugelmühlen kann man als eine Sonderbauart der Rührwerkskugelmühlen klassifizieren. In der Literatur sind diese Mühlen sehr wenig vorhanden. In der Arbeit von Geisler [1] findet man sehr gute Erklärung des Betriebsverhaltens von CoBall-Mühlen und insbesondere der Mechanik ihrer Perlenbewegung. Hier werden einige wichtige und interessante Schlüsse obengenannter Arbeit gegeben und diskutiert.

CoBall-Mühle MS-50 besteht aus den konischen Stator und Rotor glatter Oberfläche (s. Abb. 2 und 60). Sie sind parallel zueinander ausgerichtet, besitzen beide einen Innen- und Außenkonus und haben einen, im Vergleich zu den herkömmlichen Rührwerkskugelmühlen, sehr kleinen Mahlpalt konstanter Breite dazwischen. Wie schon im Unterkapitel 1 erklärt wurde, sind Stator und Rotor Hohlräume, die mit Kühlwasser ausgefüllt sind. Der 0,5 m breite Rotor (größter Durchmesser) wird an einer Welle montiert und dreht sich mithilfe eines 45 kW starken Motors ca. 500 mal pro Minute.

Das Produkt tritt von unten im ca. 9,8 l großen Mahlraum mithilfe einer Pumpe



1 Produktzufuhr 2 Produktaustrag 3 Rotor 4 Mahlraum 5 Kühlung 6 Kugelrückführung

Abbildung 2: CoBall-Ringspaltkugelmühle von Fryma [1].

ein (s. Abb. 2, 1). Der Mahlraum (4) ist mit Perlen in einem Ausmaß von ca. 70 % des gesamten Volumens, ausgefüllt. Die Produktsuspension und Perlen bewegen sich bis zum Produktaustritt (2), wo das Produkt mit einem 0,3 mm großen Trennsieb von den Perlen filtriert wird. Die Mahlkugeln werden mit kurzen Kanälen an die Startposition zurückgeführt (6).

Die Strömung, die im Mahlpalt durch die Rotation entsteht, ist eine kompliziertere, geometriebedingte Variante der Couette-Strömung eines zähflüssigen Fluids zwischen zwei unendlichen, parallelen und sich gegenseitig bewegenden Platten.

Die Bewegung der Suspension samt Perlen entsteht durch die, vom Rotor verursachte, Scherkräfte und den Pumpenstrom und sie ist annähernd spiralförmig um den Rotor in Richtung oben. Die Intensität der Vermahlung im konusförmigen Mahlpalt wächst von unten nach oben wegen der zunehmenden lokalen Geschwindigkeit des Rotors bzw. seiner Geometrie. Dadurch wird das Produkt progressiv, fortschreitend stärker, im Mahlraum gemahlen.

Im Vergleich zu den konventionellen Rührwerkskugelmühlen erreicht CoBall-Mühle höhere volumenbezogene Mahlleistungen ( $6-8 \text{ MW/m}^3$ ). Obwohl die eingebrachte Energie bis zu 99 % in Wärme umgesetzt wird, sind Ringspaltkugelmühlen viel effizienter als andere Mühlen.

Da die Bewegung des Produktstromes in Querrichtung vernachlässigbar ist und folglich das Strömungsfeld als rotationssymmetrisch angenommen wird, kann die Untersuchung der Kräfte, die auf eine Perle im Mahlpalt wirken, schon vieles über das Betriebsverhalten der Mühle erklären.

In der Abb. 3 sieht man einen Querschnitt des Mahlpaltes während des Mahlprozesses mit einer Perle drinnen. Der Rotor (links) bewegt sich, wie angezeigt, mit der Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  nach links (aus der Vogelperspektive). Man sieht die Richtung des Produktmassenstromes  $\dot{m}_p$ . Aufgrund des konusförmigen Mahlpaltes führt man Kugelkoordinaten  $r$ ,  $a$  und  $\phi$  ein.  $r$  ist die radiale Koordinate lotrecht zur Rotor- und Statoroberfläche und zeigt in Richtung des Rotors. Die axiale Koordinate  $a$  zeigt in Richtung des Produktflusses und  $\phi$  ist die tangentielle Koordinate, die in Richtung der Rotorge-

schwindigkeit zeigt.

Die Kräfte, die auf die Beispielperle offensichtlich wirken müssen, sind die Auftriebskraft  $F_A$  nach oben, Gewichtskraft  $F_G$  nach unten, Zentrifugalkraft  $F_Z$  nach außen und Reibungskraft  $F_R$  infolge der relativen (schnelleren) Bewegung der Suspension nach vorne.

Der Rotor verursacht eine Schichtbewegung der zähflüssigen Suspension in tangentialer Richtung. Die zum Rotor anliegenden Schicht bewegt sich mit der Rotorgeschwindigkeit und weiter weg, in Richtung Stator, fällt die Geschwindigkeit schrittweise bis null.

Im Gegensatz zur einer klassischen Couette-Strömung zwischen zwei unendlichen Platten, ist der Geschwindigkeitsgradient nicht konstant. Die Ursache ist die Anwesenheiten von Perlen, die die Energieübertragung in der Nähe von Rotor beschleunigen. Der Geschwindigkeitsgradient verursacht eine Rotation der Perlen in tangentialer Richtung. Die rotierende Perlen spüren nun aber eine hydrodynamische Auftriebskraft, Schergradientenkraft  $F_S$ , die ähnlich wie die turbulente Magnuskraft in Richtung Rotor wirkt. Dabei muss man berücksichtigen, dass sich die Suspension schneller als die Perle in tangentialer Richtung bewegt.

Wenn alle oben genannten Kräfte addiert und in zwei Richtungen, radialer und axialer, aufgeteilt werden, bekommt man für eine Perle mit fixen Parametern (Perle, Suspension, Rotorgeschwindigkeit usw.) zwei dreidimensionale Abbildungen (Abb. 4)

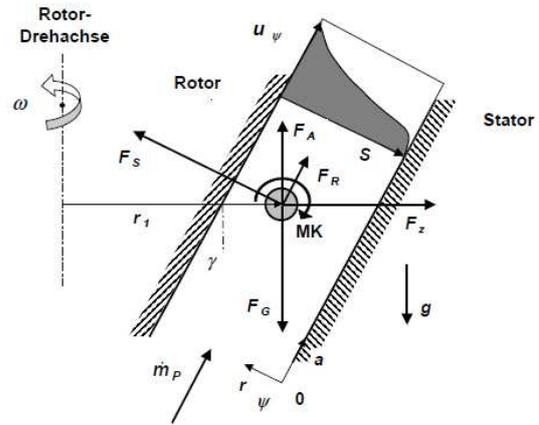


Abbildung 3: Eine schematische Darstellung von Kräften, die auf eine Perle im Mahlraum wirken [1].

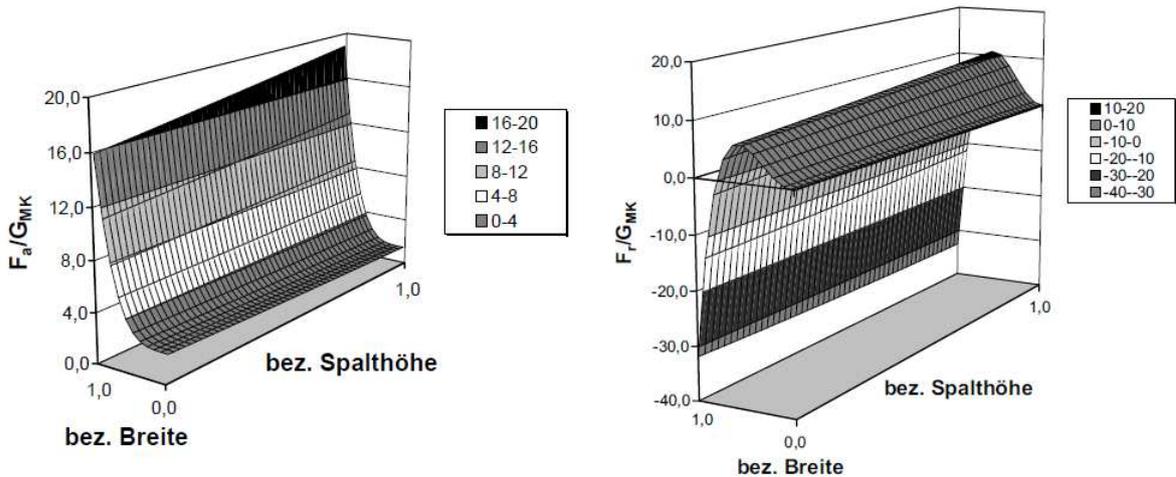


Abbildung 4: Die Graphiken der Abhängigkeit der auf eine Perle wirkenden Kraft von der Mahlsplathöhe und -breite. Rechts: axiale Kraft. Links: radiale Kraft [1].

Die 3D Abbildung 4, links, zeigt die durch die Gewichtskraft einer Perle normierte Kraft, in axialer Richtung. Die Axialkraft nähert sich einem konstanten Wert in

der Nähe von Stator. Wenn dieser Wert zu klein ist, was vom Dichteverhältnis der Perle und Produkt abhängt, kann es zur Sedimentation der Mahlperlen kommen. In der Nähe vom Rotor spürt die Perle sehr starke Kraft des axialen Teils der Zentrifugalkraft. Wegen der zunehmender Rotorgeschwindigkeit wächst diese Axialkraft auch in Richtung oben des Mahlspalts.

Die radiale Kraft in der Abb. 4, rechts, zeigt eigentlich, wieso eine CoBall-Mühle bei guten Bedingungen so effektiv ist. Hier ist das Zusammenspiel der Schergradientenkraft und des radialen Anteils der Zentrifugalkraft von entscheidender Bedeutung. Sie bauen zusammen ein Maximum der radialen Kraft in der Mitte des Mahlspalts, wo der eigentliche Mahlprozess stattfindet. Die Perlen werden dabei aufgrund der Zentripetalkraft nicht an der Statorseite angehäuft. Es passiert eine oszillierende Bewegung zwischen Stator und Rotor und deswegen ist die Wahrscheinlichkeit der Wechselwirkung der Perlen in der Mitte ziemlich hoch. Das führt zu einer effizienteren Vermahlung und einem engeren Verweilzeitspektrum des Produktes (Korngrößenverteilung).

Das labile Gleichgewicht, wo die Mühle optimal mahlt, ist durch die falsche Auswahl von Viskosität, Suspensionsdichte oder anderen Parameter relativ leicht zerstörbar. Wenn z.B. Viskosität zu gering ist, rotieren die Perlen nicht mehr intensiv genug, die Zentripetalkraft dominiert und die Mühle funktioniert wie eine Zentrifuge, mit allen Perlen auf der Statorseite. Ein wichtiger Parameter, der das Ergebnis der Vermahlung auch erheblich beeinflusst ist die Mahlspalbreite bzw. genauer die ganze Mahlspalgeometrie. Deswegen ist auch der Produktionsabteilung das Verschleißproblem ziemlich bekannt.

Wenn sich die Mahlspalbreite aufgrund des Mühlenverschleißes vergrößert, muss man Parameter des Produktes bzw. Rezeptes, obwohl es damals funktioniert hat, wieder anpassen, um das Produkt ungefähr gleich lang wie früher mahlen zu müssen. Sonst weist der Produkt bei einer üblichen Verweilzeit merkbar breitere und größere Partikelgrößenverteilung auf. Wenn die Vergrößerung der Mahlspalbreite auch ungleichmäßig und groß genug ist, was in der Regel im Laufe der Zeit passiert, hilft auch die erneute Anpassung von den Produktparametern nicht mehr viel, da die ordentliche, symmetrische Fluidbewegung in der Mühle viel turbulenter wird. Eine solche Bewegung der Perlen erhöht den bisher kleinen Prallverschleiß und die Mühle wird, ab einem Zeitpunkt viel intensiver abgenutzt.

Der Aufbau dieser Mühlen mit glatten Rotor- und Statorwänden und einem engen Mahlspalt, verursacht fast eine komplette Abwesenheit des Prallverschleißes. Die Perlen werden nur durch die oben genannten Kräfte, insbesondere Schergradientenkräfte, beeinflusst und die Wände ertragen keine direkten Stöße wie beim konventionellen Rührwerkskugelmühlen. Obwohl der Prallverschleiß das Material dreimal stärker als der Gleitverschleiß bei Ringspaltkugelmühlen zerstört [1], ist der Gleitverschleiß natürlich nicht zu unterschätzen. Wenn die Mahlparameter nicht gut genug eingestellt sind, kommt es zur Störungen bei der Perlenbewegung. Da der Rotor immer noch funktioniert, kommt es zum erhöhten Gleitverschleiß und in manchen Fällen sogar zum Perlenbruch oder Verstopfung des Rotors. Andererseits kann eine Änderung der Mahlspalgeometrie, wie oben erklärt, auch zu einem erhöhten Verschleiß führen.

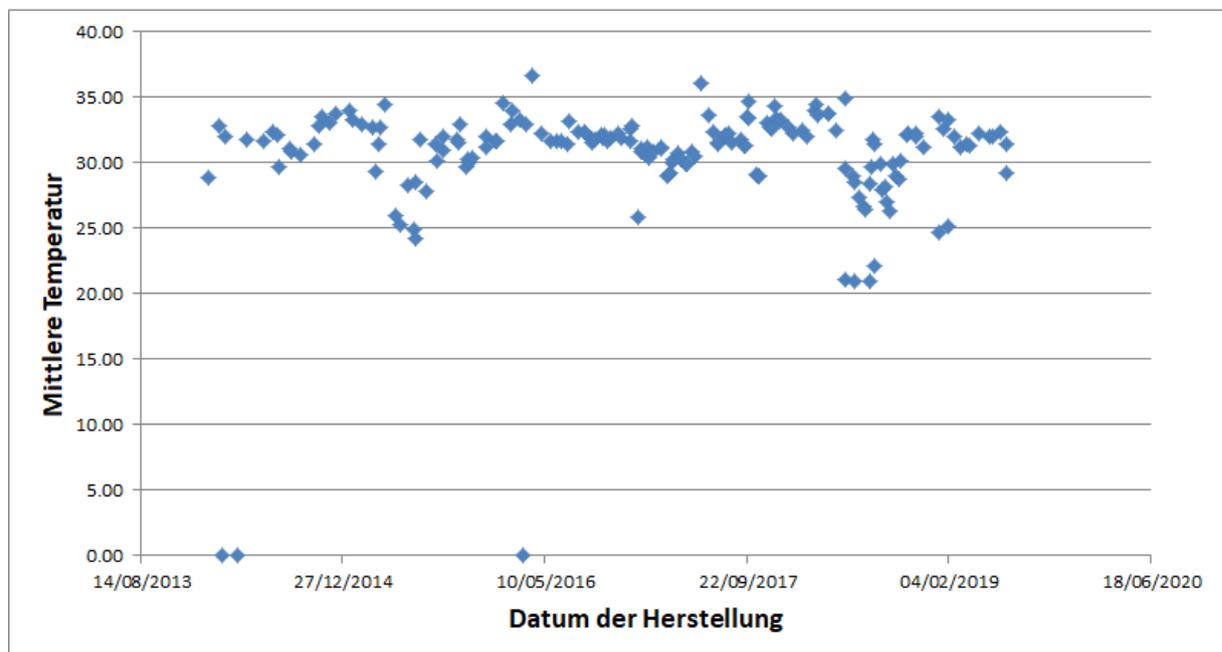
Obwohl der Stator und Rotor aus verschleißresistentem Stahl bestehen, ist sogar bei idealen Bedingungen der Gleitverschleiß nicht vernachlässigbar und sie müssen irgendwann ersetzt werden. Dabei ist, laut der Fa. Fryma, der Stator im Schnitt dreimal resistenter als der Rotor.

## 2 Mögliche Lösungen - Bisher betrachtete Methoden

Im Folgenden werden verschiedene Messmethoden und Ansätze für die Untersuchung des Mühlenverschleißes vorgestellt. Obwohl einige davon das Problem vollständig lösen können, verlangen sie eine Demontage der Mühle, die aber nicht wirklich regelmäßig durchgeführt werden kann. Man braucht also auch die Methoden und Ansätze, die die Abschätzung des Demontageintervalls verbessern können. Dabei war schon am Anfang klar, dass man eine Kombination von verschiedenen Methoden bzw. daraus abgeleiteten Informationen braucht, um ein optimales Ergebnis zu bekommen.

### 2.1 Schon vorhandene Sensoren

Für die Produktion wurde ein Softwaresystem erstellt, das verschiedene, für die Produktqualität wichtige Eigenschaften des Produkts erfasst und speichert. Sensoren werden bei jeder Mühle dafür eingebaut. In den Mühlen bzw. ihren Mahlräumen befinden sich aber keine Sensoren.



- die Produktviskositäten und Dichten sind, sogar bei gleichen Rezepten, nicht konstant.
- das Kühlwasser hat keine konstante Temperatur. Das Kühlwasserleitungssystem ist gemeinsam.
- die Perlen werden abgenutzt und in regelmäßigen Intervallen nachgefüllt usw.

In der Abb. 5 sieht man die mittlere Temperatur der CoBall-Mühle (FM07) während der Produktion desselben Produktes in einem Zeitintervall von 5 Jahren. Im Juni 2017 waren den Stator und den Rotor ausgetauscht. Die durchschnittliche Temperatur vor dem Austausch war ca. 40 °C und danach nur 30 °C. Die durchschnittliche Temperatur war aber in den ersten 6 Monaten nach dem Austausch auch ca. 40 °C. Der Temperaturabfall korreliert also, wie erwartet, nicht mit dem Austausch der Bauteile.

Angenommen, dass mit diesen gemessenen Größen der Verschleißgrad der Mühlen doch abgeschätzt werden könnte, wären dann eventuell nur die Informationen über eine absolute Vergrößerung des Mahlraumvolumens erhältlich. Das bekommt man sowieso direkt durch das regelmäßige Auslitern der Mühlen (s. Kap. 2.8).

### 2.2 Statistik für CoBall-Mühlen

Die Wartungsdaten der CoBall-Mühlen sind seit 2003 vorhanden und werden hier kurz diskutiert. Die durchschnittlichen Rotor- und Statorlaufzeiten betragen jeweils 10442 Stunden und 11037 Stunden. Meistens tauscht man die Bauteile gleichzeitig aus. Dabei wurde oft nur eine davon (Stator oder Rotor) kritisch und die Andere ist so viel abgenutzt, dass sie auch ausgetauscht wurde, um eine baldige Demontage zu ersparen. Diese Daten über die durchschnittliche Laufzeiten der Bauteile ist direkt der Behauptung des Herstellers aus der Betriebsanleitung [2] entgegengesetzt. Dort wird angeführt, dass ein Statorkörper, im Schnitt, drei Rotorkörper überlebt. Der Hersteller hat aber eine unterschiedliche Vorstellung über den Zeitpunkt, bei dem die Bauteile ersetzt werden müssen (s. Kap. 2.3). Bei Axalta Guntramsdorf wird im Prinzip nur darauf geachtet, dass es zu keinen Wandbrüchen kommt.

Wenn man nur die Bauteile zählt, für welche die Laufzeit bekannt ist bzw. die nach 2003 montiert und defekt geworden sind, hat man 16 Statoren und 13 Rotoren ausgetauscht. Davon war einmal die Wanddicke eines Rotor fälschlicherweise als kritisch abgeschätzt (s. Kap. 2.5, den Rotor und den Stator beide ausgetauscht). Zusätzlich hat man auch eine Rotor-Stator Kombination aufgrund der Produktumstellung erneuert.

Sogar 7 Rotoren und 6 Statoren wurden seit 2015 ausgetauscht. Das kann durch den Wechsel von der Perlenart in 2014 erklärt werden. Da die Perlen den Verschleiß direkt verursachen, ist ihre Härte ein Mahlparameter, der der größte Einfluss auf die Abriebmenge hat.

### 2.3 Offiziell empfohlenes Vorgehen

In FrymaKoruma Betriebsanleitung, Kap. Wartung [2] wird beschrieben, wie man mit dem Verschleiß bei Mühlen allgemein umgeht. Es ist angegeben, dass ein Stator 3 Rotoren überlebt. Die von Axalta Guntramsdorf stammende Daten (s. Kap. 2.2) können aber diese Behauptung leider nicht bestätigen (siehe vorige Unterkapitel). In der Betriebsanleitung wird ein Austausch bei gleichmäßiger Erosion des Rotors und Stators generell

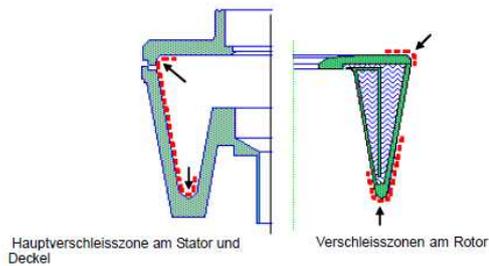


Abbildung 6: Die Zonen, die sich beim Stator und Rotor am stärksten abnutzen [2].



Abbildung 7: Profilschablone, die für die Abschätzung des Statorverschleißes benutzt wird.

empfohlen, sofern die Oberfläche stark aufgeraut ist und sich das Mahlsplattvolumen um 20% vergrößert.

Verschleiß hängt bei denselben Mühlen (z.B. bei CoBall MS50, die bei Axalta Guntramsdorf vorhanden sind) stark vom Mahlprodukt und Perlenart, aber auch vom richtigen Betrieb ab. Eine direkte Verschleißprüfung mit der Demontage ist je nach der Verschleißintensität nach 200 bis 2000 Betriebsstunden empfohlen. Das gilt nur bei einem natürlichen Verschleiß, bzw. wenn die Mühle richtig betrieben wurde. Auch dann ist der Verschleiß nicht gleichmäßig verbreitet, sondern konzentriert sich, laut Betriebsanweisung, in den Bereichen, die in der Abb. 6 angezeigt sind.

Nach Demontage misst man wichtige Dimensionen wie der größte Statordurchmesser (Wand-Wand) und die obere Wanddicke des Rotors, die obwohl etwa dicker ist, laut Abb. 6 stark erodiert. Folglich benutzt man spezielle zwei zweidimensionale Profilschablonen (s. Abb. 7), die sich relativ zu den Bereichen zentrieren, die vom Verschleiß sehr wenig beeinflusst sind, wie der Außendurchmesser des Stators und der schmalste Teil des Innenkonus vom Rotor. Das Ausmaß der Wanderosion misst man mithilfe einer Fühlerlehre an verschiedenen Stellen. Laut der Betriebsanleitung soll der Spalt zwischen der Profilschablone und Oberfläche überall kleiner als 2 - 2,5 mm sein. Das bedeutet, dass die sich ca. 12 mm dicken Wände der Bauteile nur ca. 20 % abnutzen dürfen. Das ist aber im Realbetrieb nicht der Fall. Die Wände dürfen deutlich dünner sein. Diese vorgeschlagene Methode ist konzipiert für viel kleinere Erosionen als die, die bei der Fa. Axalta Guntramsdorf normalerweise toleriert werden. Wenn sich die Wände stärker abnutzen, ist eine genauere Methode nötig. Für diese Zwecke benutzt man ein portabler Ultraschallmesser, was, insbesondere für CoBall-Mühle, auch keine ideale Lösung ist (s. Kap. 2.5).

Aufgrund einer großen Mahlsplattexpansion ist auch eine Anpassung der Prozess-

parameter für die Produktion oft nötig (s. Kap. 1.2.2). Wie schon bekannt, besteht bei den stark abgenutzten Bauteilen die Gefahr von Leckage des Kühlmittels in den Mahlraum, was durch die Auswahl einer besseren Methode verhindert werden soll. Idealerweise sollte sie keine Demontage der Mühle verlangen.

### 2.4 Nicht geeignete Methoden

Folgende zwei interessante Methoden wurden im Rahmen der Literaturrecherche betrachtet, aber aus verschiedenen Gründen als ungeeignet beurteilt. Die Abschätzung mit der ersten Methode ist messtechnisch unmöglich und die Zweite, Exotischere, ist aus offensichtlichen praktischen Gründen nicht geeignet.

#### 2.4.1 Messung der Infrarotstrahlung der Mühle während des Betriebes

Während des Betriebes wird weniger als 1% der eingefügten mechanischen Rührleistung für das tatsächliche Mahlen des Produkts benutzt [1]. Der Rest verteilt sich als Wärme auf dem Stator, Rotor und Produkt. Wie schon bekannt, muss so eine riesige Wärmemenge ständig abgeführt werden. Der ungleichmäßige Verschleiß verursacht einen problematischen asymmetrischen Mahlspace und sogar punktweise Einschüsse auf dem Rotor und Stator. Es ist plausibel anzunehmen, dass bei einem rotationsasymmetrischen Mahlspace wegen der unterschiedlichen lokalen fluidmechanischen Bedingungen bereichsspezifische Temperaturgradienten entstehen können. Es existieren dann also Bereiche des Mahlspace unterschiedlicher Temperatur. Eine Infrarot-Wärmebildkamera könnte diese Bereiche identifizieren. Das Wasser fließt aber ständig durch den Statormantel und kühlt ihn ab. Wegen der Abkühlung bzw. wegen des schnell bewegenden Kühlwassers korrespondiert die Temperatur der äußeren Statorwand nicht mehr mit der Temperatur der Inneren. Folglich kann diese Methode nicht benutzt werden, um irgendeine Information über den lokalen Temperaturunterschied des Mahlspace zu bekommen.

#### 2.4.2 Analyse mithilfe radioaktiver Nuklide

Radioaktive Nuklide sind instabile Isotope bzw. radioaktive Atome, die eine von der Atomsorte abhängige Menge von Strahlung pro Zeiteinheit abgeben. Diese Strahlung kann mithilfe des Gammaskopfes sehr genau quantifiziert werden.

Wenn man die Rotor- und Statorbauteile radioaktiv markieren würde, bestimmt eine Messung der Radioaktivität des Mahlproduktes die darin enthaltene Menge des jetzt radioaktiven Abriebs.

Mehrere Methoden wurden für diese exotische Verschleißmessung entwickelt. Man kann Bauteile mit thermischen Neutronen aus nuklearen Reaktoren bestrahlen. Dadurch bekommt man z.B. im Fall von Stahl aus einem stabilen Isotop  $^{58}\text{Fe}$  das radioaktive  $^{59}\text{Fe}$  Atom. Wenn man z.B. einen Rotor auf diese Weise bestrahlen würde, könnte man mit der Methode aus dem Kap. 2.7 auch zwischen den Stator- und Rotoranteil des Abriebs unterscheiden. Die gesamte Radioaktivität so bestrahlter Objekte wäre riesig und strenge Strahlenschutzmaßnahmen wären erforderlich.

Kein Problem mit der großen Radioaktivität hat man mit der TLA (Thin Layer Activation)-Methode. Hier dringen energiereiche Protonen oder Deuteronen aus z.B. Zyklotronen in Stahl ein. Dadurch entstehen aus stabilem Eisen die Radioisotope von Kobalt ( $^{56}\text{Co}$  und  $^{57}\text{Co}$ ). Diese Strahlen können wegen ihrer Ladung je nach der Anfangsenergie

nur dünne Schichten (bis einige Millimeter) des Materials durchdringen. Man bestrahlt eine kleine relevante Fläche eines Objektes und verfolgt die Abnutzung im Laufe der Zeit. Verschiedene Bereiche können dabei mit verschiedenen Energien bestrahlt und dadurch unterschiedliche Isotope in jeglichen Bereichen erzeugt werden.

Die Halbwertszeit der gemessenen Isotopen muss man bei einem Vergleich zwischen den Messungen bei verschiedenen Zeitpunkten einrechnen, da sich die Strahlung natürlich im Laufe der Zeit verringert. Die Halbwertszeit von  $^{59}\text{Fe}$  ist z.B. 44,5 Tage.

Diese enorm aufwendigen Methoden werden nur für die Verschleißuntersuchung von Prototypen, wie z.B. Motoren, Turbinen speziellen Werkzeugen usw., benutzt.

Im Folgenden betrachtet man die Methoden, die für die Lösung des Verschleißproblems mehr oder weniger geeignet sind.

## 2.5 Ultraschallmessung

UTM (ultrasonic thickness measurement)- Methode benutzt man am häufigsten, wenn die lokale Materialsdicke zerstörungsfrei geprüft werden soll und das Objekt nur von einer Seite zugänglich ist.

Als Ultraschall bezeichnet man eine für Menschen unvernünftige akustische Welle, mit einer Frequenz von über 20 kHz. Normalerweise werden zwecks der zerstörungsfreien Prüfung in der Industrie die Frequenzen zwischen 500 KHz und 100 MHz verwendet [7].

Die benutzte Ultraschallfrequenz hängt vom zu messenden Material ab bzw. z.B. von seiner Körnigkeit, da sie die Streuung im Material im Allgemeinen vergrößert. Generell werden die niederfrequenten Wellen weniger absorbiert, aber auch weniger gebündelt [8].

Für eine Wanddickenmessung erzeugt man mit einer piezoelektrischen Zelle eine Ultraschallwelle, die in das Material durchdringt. Die Welle wird von der anderen Seite des Materials an seiner Oberfläche reflektiert. Diese zu der Originalwelle entgegengerichtete, reflektierte Teilwelle wird danach im Messkopf bzw. in der gleichen piezoelektrischen Zelle registriert. Die Zeit, die dafür nötig ist, gibt, zusammen mit der materialabhängigen Schallgeschwindigkeit, die Wanddicke sehr genau an.

Die Wanddicke berechnet man also mit:

$$d = \frac{v_s \cdot t}{2},$$

wobei  $v_s$  die Schallgeschwindigkeit im geprüften Material und  $t$  die Flugzeit der reflektierten Schallwelle ist. Der Faktor 2 berücksichtigt, dass die Schallwelle zweimal das Material durchquert. Obwohl eine große Anzahl verschiedener Materialien mit dieser Methode untersucht werden kann, ist für jedes Material die genaue Kenntnis seiner Schallgeschwindigkeit erforderlich. Selbstverständlich muss der Messkopf genau quer zu der Oberfläche, die möglichst gerade und eben sein sollte, ausgerichtet sein.

In der Abb. 8, links, ist der Prozess der Ultraschallmessung vereinfacht angezeigt. Zwei reflektierte Wellen von zwei Seiten einer Wand werden registriert. Der Unterschied dazwischen ist die gewünschte Flugzeit.

Da Ultraschall nicht gut genug durch Luft übertragen werden kann, muss man ein zähflüssiges Kopplungsmittel zwischen dem Messobjekt und dem Messkopf auftragen, um die Reflexionswelle messen zu können. Die kleine Zeit, die während des Durchlaufs der Welle vom Piezoelement durch das Kopplungsmittel bis zur ersten Oberfläche, vergeht, kann

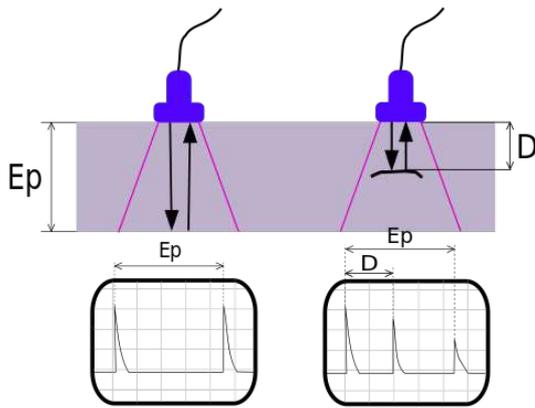


Abbildung 8: Eine vereinfachte Darstellung der Ultraschallmessung. Links: Wanddickemessung. Rechts: Defektmessung [35].



Abbildung 9: Ein aufgeschnittener Rotor nach einer Fehlmessung

mit einem Null-Offset kompensiert werden. Die Kopplungsmittelschicht muss man so dünn wie möglich halten, da größere Mengen akustisches Rauschen verursachen können.

Die Genauigkeit ist vom Objekt abhängig und normalerweise in der Größenordnung von 0,01 mm, aber kann auch präziser sein. Die minimal messbare Dicke ist aber viel größer, da der Messkopf nicht gleichzeitig Ultraschall schicken und empfangen kann.

Bei Axalta Guntramsdorf hat die Erfahrung gezeigt, dass die Messung der Statoren bei Rührwerkskugelmühlen von Vollrath zuverlässiger als bei CoBall-Bauteilen ist. Bei einer regelmäßigen Kontrolle der Wanddicke wurde mit einem tragbaren Ultraschallmessgerät festgestellt, dass sie nur noch 1,24 mm beträgt. Nach dem Aufschneiden des Rotors wurde aber festgestellt, dass die Rotorwände viel dicker sind (s. Abb. 9). Die Messung war selbstverständlich mehrmals durchgeführt, aber das Gerät zeigte immer die gleiche Wanddicke. Wenn man menschlicher Fehler ausschließt, könnte der Fehler auf eine schlechte Kalibrierung oder ein möglicherweise fehlerhaftes Gerät zurückgeführt werden. Die Messungen bei Rührwerkskugelmühlen von Vollrath funktionieren aber gut. Stahllegierungen der zwei Mühlenarten und damit ihre Schallgeschwindigkeiten unterscheiden sich, aber dieser Unterschied kann nicht größer als ca. 5% sein. Aus der obigen Gleichung sieht man, dass den Messfehler auch nicht mehr als 5% aus diesem Grund schwanken kann. Deswegen ist die Fehlerursache wahrscheinlich komplizierter.

In der Abb. 8, rechts, sieht man, was passiert, wenn während einer Messung die Welle einen Defekt im Material (z.B einen Lunker, Riss) trifft. Der Defekt verursacht eine vorzeitige Reflexion, die das Gerät fälschlicherweise als die Wandreflexion von der anderen Seite erkennen könnte. Man nutzt diese Eigenschaft oft aus, um Defektuntersuchungen durchzuführen. Das könnte wohl den falschen Messwert erklären. Der Riss könnte in einer Schwachstelle im Laufe des Mahlprozesses entstanden haben, oder das Bauteil könnte seit dem Anfang fehlerhaft (z.B. Lunkerbildung während des Gießverfahrens) gewesen sein,

was weniger wahrscheinlich ist, da der Rotor seit 2010 in Betrieb war und diese Bauteile nach der Herstellung normalerweise auf Defekte untersucht werden. Auch wenn das nicht bei dieser Fehlmessung die Ursache war, ist es nicht auszuschließen, dass in der Zukunft man deswegen falsche Werte bekommen wird. Eine erfahrene Person könnte zwischen zwei Fällen nach einer genaueren Untersuchung von Signalen unterscheiden, aber für ein relativ einfaches Gerät ist das nicht der Fall.

Eine mögliche Ursache für schlechte Messgenauigkeiten von Co-Ball Mühlen, kann das spezifische Gießverfahren und die Form sein. Wenn die Schallgeschwindigkeit anisotrop im Material ist, misst man positionsbedingt unterschiedliche Wanddicken entlang der Kurve des Objektes. Ein lokaler Unterschied der Schallgeschwindigkeit tritt auch auf, wenn beim Gießverfahren die Korngefügevariationen wegen der ungleichmäßigen Kühlung entstehen [37]. Außerdem nutzen sich Rotoren und Statoren bei der CoBall-Mühlen sehr ungleichmäßig und sogar rotationsasymmetrisch ab. Die zwei Oberflächen der zu messenden Wand sind dann nicht mehr ganz parallel und die von der inneren Wand reflektierte Welle ausbreitet sich nicht mehr in die Richtung der Originalwelle, was zusätzliche Fehlerquelle darstellt.

Ein anderes Problem bei einer Messung der Objekte mit piezoelektrischen Messköpfen ist Rauigkeit des zu messenden Objekts. Wegen extensiver Streuung bei sehr rauen Oberflächen ist eine Messung sehr schwierig durchzuführen. Die Rotor- und Statoroberflächen der Mühlen sind nach der Abnutzung zwar sehr wellenförmig aber glatt (s. Abb. 9). Die Messung kann jedoch nicht so genau wie bei ebenen Oberflächen sein, da der Messkopf eine wellenförmige Fläche abdeckt und reflektierte Welle nach dem Ausgang aus dem Material in unterschiedlichen Richtungen abgebrochen wird.

Viele Fehlerquellen eines Ultraschallmessgeräts mit piezoelektrischen Komponenten, insbesondere die Kontaktprobleme mit der Oberfläche, Oberflächenbeschaffenheit und Ausrichtung des Messkopfes, können mit einer relativ neuen Technologie eliminiert werden. EMAT (Electromagnetic acoustic transducer) oder EM-akustische Wandler braucht keinen Kontakt mit der Oberfläche. Die akustische Welle wird durch die elektromagnetisch induzierte Schwingung des Materials selbst erzeugt.

Selbst wenn die relativ ungenaue Geräte mit erfahrenen Operatoren ersetzt würden und sie die Wanddicke der CoBall-Mühlen zuverlässiger bestimmen könnten, wäre diese Methode sehr langsam, da man viele einzelne Punkte analysieren müsste. Falls nur die optisch schwächsten Stellen analysiert werden, existiert immer eine erhöhte Gefahr vom menschlichen Fehler. Außerdem ist eine Ultraschallmessung der Stator- und Rotorwanddicke ohne Demontage mit dem heutigen Technologiestand nicht möglich. Eine Welle musste die äußere Statorwand und das Kühlwasser oder Luft durchqueren, um erst dann auf die erste für die Messung relevante Oberfläche der inneren Statorwand zu kommen.

Das schon vorhandene Gerät kann und soll zusammen mit genaueren Methoden (s. Kap. 2.12 und 2.12.1) doch eingesetzt werden, um die damit gefundenen kritischen Punkte der Oberfläche noch zweifach zu untersuchen.

Ultraschall ist neben der extrem teuren Röntgentomographie und dem gepulsten Wirbelstrommessung die einzige Möglichkeit die Wanddicke direkt zu erfassen. Man muss sich aber des systematischen Messfehlers bewusst sein.

Noch eine erwähnenswerte Methode ist ständig geforschte Ultraschall-Tomographie. Damit ist es möglich, analog zu der Röntgentomographie aus mehreren Ultraschallmessungen die Struktur der Objekte abzubilden. Die Anwendung findet es hauptsächlich in der Medizin, aber die industriellen Anwendungen dieser Methode werden auch geforscht [9].

Unter anderem wurde die Methode auch für die Messung der Rohrwanddicke angewandt [10].

## 2.6 Gepulster Wirbelstrom (Pulsed Eddy Current (PEC))

Eine Alternative zu der Ultraschallmessung, die oft im Fall der Unzugänglichkeit der zu messenden Oberfläche (z.B. bei isolierten Rohren) benutzt wird, ist die PEC (Pulsed Eddy Current)-Methode.

Obwohl eine Vielfalt von unterschiedlichen Techniken für die Ausnutzung der PECs existieren, ist das physikalische Prinzip dasselbe. Die in [11] erklärte Vorgehen für die Bestimmung der Wanddicke wird hier präsentiert. Eine Sendespule wird über dem zu messenden Objekt gebracht. Ein gepulstes Signal bestimmter Frequenz und Breite wird in die Spule geschickt, was ein primäres Wechselmagnetfeld dort induziert. Das primäre Wechselmagnetfeld magnetisiert eine dünne Schicht der ersten ferromagnetischen Oberfläche (z.B. Stahl, s. Abb. 10). Nach dem Ausschalten der Sendespule verschwindet das primäre Magnetfeld. Das wechselnde Magnetfeld erzeugt Wirbelströme (Eddy currents) in der dünnen Schicht der Oberfläche. Ein sekundäres Magnetfeld wird durch diese Wirbelströme generiert, das eine Spannung in Empfängerspule erzeugt. Im Laufe der Zeit diffundieren die Wirbelströme tiefer in das Material, und die Spannung wird entsprechend kleiner. Wenn die Wirbelströme aber zur anderen Seite des Materials kommen, fällt die Spannung viel rascher ab (Abb. 11). Der Zeitpunkt dieses raschen Abfalls ist von der Wanddicke abhängig.

Die Messungen dieser Methode hängen nicht von der Oberfläche oder inneren Struktur (außer Konduktivität und Permeabilität) ab. Die relative Ausrichtung der Spulen und ihre genaue Entfernung von der Oberfläche spielt auch eine untergeordnete Rolle. Die Reproduzierbarkeit von Ergebnissen ist zwar sehr gut (typischerweise 0,005 mm [12]), aber mit der PEC-Methode kann man keine absoluten Werte sondern nur die relativen Werte in einem Objekt messen, die stark von seinem elektromagnetischen Eigenschaften abhängen. Das bedeutet in der Praxis, dass man für jedes Objekt, das Messgerät neu kalibrieren muss, um potentiellen seriellen Unterschiede der EM-Eigenschaften von Stahl zu eliminieren. Die Methode ist deutlich ungenauer

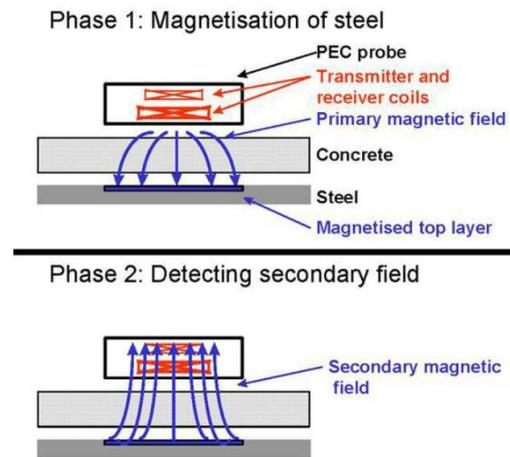


Abbildung 10: Eine schematische Darstellung der Funktionsweise der Gepulster-Wirbelstrom-Methode [11].

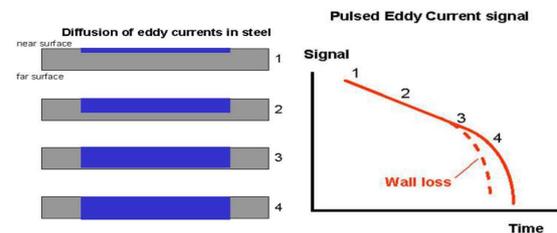


Abbildung 11: Bestimmung der Wanddicke durch den Abfall der gemessenen Spannung bei der PEC-Methode [11].

als Ultraschall, typischerweise 0,5 mm [12]. Ein weiterer Nachteil ist, dass mit der PEC-Methode keine Defekte, deren Durchmesser kleiner als ca.  $\frac{3}{2}$  der Wanddicke ist, gemessen werden können [11]. Solche Defekte bzw. Einschüsse sollen aber schon optisch erkennbar sein. Noch ein potentiell Problem ist, dass die PEC-Methode nur mit ferriten Gefügearten der Stahllegierungen funktioniert. Ob die Bauteile der CoBall-Mühle magnetisch genug für diese Methode sind, muss man zusätzlich untersuchen. Wenn das passt, könnte man damit ohne Kalibrierung z.B. bei einer Fehlmessung der Ultraschallmethode (s. Kap. 2.5) das Bauteil erneut prüfen bzw. den ganzen Bereich um die problematische Stelle scannen. Man muss auch auf die Geometrie aufpassen. Falsche Ergebnisse sind in der Nähe von Konusenden bei CoBall-Bauteilen zu erwarten. Generell ist ein Freiraumradius von 5 cm um die Messstelle erforderlich [12].

Diese Methode ist eine Variation der EC (Eddy Current)-Methode, wo die Erregungsspannung der Sendespule sinusförmig ist. Damit untersucht man generell nur eine dünne Schicht der Oberfläche (z.B. Schichtdickemessung, Defektuntersuchung usw.), aber es gibt einige Arbeiten, wo auch mit dieser Methode die Wanddickemesuchung geprüft wurde [13].

## 2.7 Analyse des Mahlgutes

Der Verschleiß verursacht eine Abnutzung der Stator- und Rotoroberfläche. Der Abrieb bzw. die Stahlpartikel, die dadurch entstehen, mischen sich mit dem Mahlprodukt. Das ist auch hinsichtlich der Produktqualität natürlich unerwünscht und in manchen Industrien und Betrieben schaltet man Magnetabscheider nach, um diese ferromagnetischen Abriebteilchen zu entfernen. Bei Axalta Guntramsdorf sind Magnetabscheider nicht vorhanden.

In der Abb. 12 ist ein Magnetabscheider dargestellt. Zwischen einer mit zwei Löcher ausgestatteten Oberplatte und einer Unterplatte wird mithilfe einer gespaltenen Abstandshalterplatte einen Strömungskanal konstruiert, durch den die Suspension mit Abriebteilchen fließt. Starke permanente Magnete, die abwechselnd mit Nord- und Südrichtung nebeneinander platziert sind, bauen ein inhomogenes Magnetfeld, das auf die ferromagnetischen Abriebteilchen in Querrichtung wirkt. Zusätzlich werden zwei Lochbleche zwischen der Abstandshalter und zwei Platten eingefügt, sodass die Suspension in direktem Kontakt mit den Lochblechen ist. Durch das Magnetfeld werden ferromagnetischen Abriebteilchen in der Löcher abgefangen und aus der strömenden Suspension entfernt. Die Lochbleche aus magnetisierbarem Stahl verzerren zusätzlich das Magnetfeld und erzeugen dadurch zusätzliche Gradienten des Magnetfeldes, was die Partikelabscheidung auch verstärkt [4].

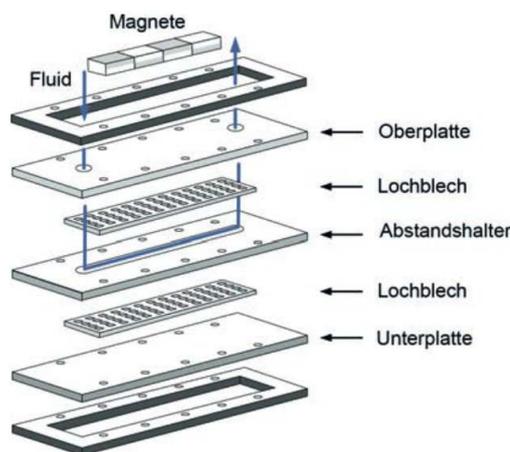


Abbildung 12: Eine schematische Darstellung der inneren Struktur von einem Magnetabscheider [3]

Man könnte theoretisch nach jedem Mahlprozess die Suspension durch Magnet-

abscheider fördern und danach die gefangene Abriebmenge messen (z.B. durch Abwiegen der Ablagerungsteile). Da es hier um keine reine Flüssigkeit geht sondern um eine Suspension, muss man die Magnetabscheider vorher mit einem Lösungsmittel abspülen, sodass die abgelagerten, nicht ferromagnetischen, Partikel entfernt werden können. Wenn eine Abspülung nicht funktioniert, kann man auf die Lochbleche verzichten und nur die Ablagerung an den Wänden messen.

Mithilfe der Abb. 13 aus dem Kap. 2.8 kann man die Abriebmenge pro Mahlprozess grob abschätzen. Die Volumenänderung beträgt bei 18 500 Betriebsstunden für die Mühle FM10 ungefähr 3,6 L. Eine durchschnittliche Mahlzeit von 10 Stunden kann als der ungünstigste Fall angenommen werden und die verlorene Gesamtmasse beträgt mit einer Stahldichte von 7,85 kg/l ca. 28 kg. Daraus ergibt sich, dass während eines Mahlvorgangs ca. 15 g des Abriebs verloren geht. Auch einen Anteil dieser Menge, der im Magnetabscheider gefangen wird, kann man also einfach abwiegen. Die gesamten Betriebsstunden der FM10 sind seit 2006. gezählt. Das bedeutet, dass die Menge von 15 g während eines Mahlvorgangs entsteht, wenn die Mühle im Schnitt 2,2 Mal pro Woche eingeschaltet wurde. Obwohl die echte Abriebmenge pro Mahlprozess wahrscheinlich viel größer ist, ist sie sehr klein im Vergleich zu der Masse einer Charge, die in der Größenordnung von einer metrischen Tonne ist.

Die auf diese Weise erhaltene Abriebmasse würde keinen genauen Absolutbetrag geben, da die Eisenpartikel nicht vollständig filtriert werden können. Auch von der Menge der filtrierten Partikel wird ein Anteil an der Wände von Platten statt in den Lochbleche abgelagert. Das könnte eventuell durch das Abwiegen des ganzen Magnetabscheiders weiter untersucht werden. Die relative Menge des entfernten Eisenabriebs zwischen Mahlvorgängen in den Lochbleche soll aber mit dem Verschleiß entsprechender Mahlvorgänge korrelieren.

Man muss nicht die gesamte Suspension durch den Magnetabscheider führen. Angenommen, dass die ferromagnetischen Abriebteilchen in der Suspension gleichmäßig verteilt sind, reicht schon ein Anteil der fertigen Suspension, um die Abriebmenge verschiedener Suspensionen vergleichen zu können. Das hat aber wenig Sinn, weil, wenn man das Produkt nicht reinigen muss, gibt es eine viel elegantere Methode für die Messung des relativen Anteils vom Abrieb im Mahlprodukt.

Röntgenfluoreszenz (XRF) ist die Messung und Analyse der abgegebenen charakteristischen Strahlung von vorher bestrahlten und dadurch angeregten Substanzen. Wenn man die Atome mit einer polychromatischen Röntgenstrahlung bestrahlt, werden ihre Elektronen aus inneren Schalen des Atoms herausgeschleudert. Wenn die Elektronen dann zurückfallen, wird eine atomspezifische Fluoreszenzstrahlung abgegeben. Durch die Frequenzanalyse der gemessenen Strahlung können nicht nur die bestrahlten Atome identifiziert, sondern auch ihre Menge gemessen werden. Man kann dadurch eine Menge von sogar bis zu 1 ppm (parts per million) nachweisen. Wenn die obige Abschätzung richtig ist, könnte man dann, durch die Untersuchung einer kleinen Stichprobe vom Mahlgut, die Menge des Abriebs drinnen bestimmen.

Mit diesen Methoden kann man die Abriebmenge pro Mahlvorgang untersuchen und dadurch den Verschleiß bei verschiedenen Mahlproduktarten, Viskositäten und Mühlen vergleichen. Diese Informationen könnten dann benutzt werden, um für den Verschleiß problematische Rezepte zu identifizieren, Viskositäten der Suspension anzupassen und, im Fall des Magnetabscheiders, das Endprodukt sauberer zu halten. Damit könnte rechtzeitig eine Erhöhung des Verschleißes, die wegen der Änderung der Mahlsplattengeometrie entsteht (s. Kap. 1.2.2), erkannt werden.

Die Menge des gesamten Verschleißes könnte theoretisch aus dem Eisenabrieb von mehreren Mahlvorgängen abgeschätzt werden. Das ist aber unnötig, da sie schon durch die direkte Volumenmessung beim Auslitern viel genauer bestimmt (s. Kap. 2.8) wird.

Obwohl die Methode nützlich für die Datensammlung und das bessere Verständnis der Abhängigkeit der Abriebsmenge von den verschiedenen Mahlparametern ist, bekommt man damit keine Informationen über den aktuellen Zustand der Mühle (Asymmetrie, Einschüsse usw.). Außerdem, wenn die Rezepte magnetische Pigmente, wie z.B. Eisenoxide ( $Fe_3O_4$ ,  $Fe_2O_3$ ), Eisenhydroxide ( $Fe_2O_3 \cdot xH_2O$ ), Bariumferrit ( $BaFe$ ), Eisenpulver ( $Fe$ ), Chromdioxid ( $CrO_2$ ) [57] enthalten, darf man die Magnetabscheider-Methode nicht einsetzen und die Röntgenfluoreszenz kann zwischen dem Abriebeisen und Produkteisen nicht unterscheiden.

## 2.8 Direkte Volumenmessung

Das Auslitern ist ein Prozess des Ausmessens vom Mahlraumvolumen. Das wird aber nicht primär für die Zwecke der Verschleißquantifizierung gemacht, sondern für das Nachfüllen der Perlen, die im Ausmaß von 70 % des Mahlraumvolumens unbedingt vorhanden werden sollen. Außerdem sind sie auch sehr vom Perlenverschleiß betroffen.

Die Perlen werden in den regelmäßigen, relativ kurzen Intervallen durch den Kugelablass ausgelassen und die Mühle wird mit einer Flüssigkeit (meist ein Lösungsmittel) gefüllt. Danach ablässt man die Flüssigkeit durch den Kugelablass in ein Messgefäß und misst ihre Menge. Davon muss man das Volumen, das zu dem Mahlraum nicht gehört, etwa  $510 \text{ cm}^3$ , abziehen (oberhalb des Differentialspaltes und innerhalb des Labyrinthringes [2]). Ein Zettel wird dann mit dem derzeitigen Volumen und dem Soll-Wert des Perlenvolumens geschrieben und auf das Mühlengehäuse geklebt. Die vorigen Zettel werft man weg. Die Daten werden also nicht gespeichert, was leider jegliche Art von der Trendanalyse unmöglich macht. Alle derzeit bekannte Daten sind in der Abb. 14 zusammengefasst.

	FM01	FM02	FM03	FM04	FM05	FM06	FM07	FM08	FM09	FM10	FM11	FM12	FM13	FM14
Datum des Ausliterns	15.10.19	02.10.19	15.10.19	08.10.19	14.10.19	24.09.19	09.09.19	05.08.19	07.10.19	02.09.19	02.09.19	14.10.19	19.07.19	19.07.19
Betriebsstunden [h]	3420	51018	46657	51450	42612	48672	28017	45756	33020	25117	24797	22092	7995	100
Mahlraumvolumen [L]	11,6	12,3	12,6	12	12,2	9,7	10,1	10,8	10	13,3	10,6	11,6	11,8	11,8
Datum des Ausliterns	20.01.20	11.12.19	16.01.20	17.01.20	13.01.20	17.01.20	16.12.19	13.11.19	02.12.19	25.11.19	08.01.20	02.12.19	02.12.19	04.11.19
Betriebsstunden [h]	51169	51169	46775	51722	42833	48944	28270	48018	33111	25358	25246	22272	8243	354
Mahlraumvolumen [L]	11,6	12,4	12,7	12	12,2	9,7	10,1	10,8	10	13,3	10,6	11,6	11,8	11,8

Abbildung 13: Mahlraumvolumina beim Auslitern.

Selbst wenn alle Daten vorhanden wären, ist die Messung nicht genau genug, um den Verschleiß gut zu beobachten. Das Volumen wird in Liter und auf eine Dezimalstelle angegeben, z.B. 10,1 l. In zwei Monaten hat sich das Volumen nur bei zwei Mühlen um 0,1 l (nach der Rundung) geändert. Bei anderen Mühlen war die Änderung kleiner und mit dieser Messgenauigkeit unsichtbar. Das ist aber erwartet, da sich den Rotor und Stator sehr langsam abnutzen sollen. In der Abb. 13 sieht man die gemessenen Werte in Liter, zusammen mit der damaligen Betriebsstunden und dem Datum der Messung. Die oberen Felder sind frühere und die Unteren spätere Messungen. Durch den Querverweis dieser Daten mit den Instandhaltungsdaten über den letzten Rotor- und Statoraustausch bei den Mühlen ist die Graphik der Änderung des Mahlraumvolumens über die Betriebsstunden entstanden (s. Abb 14). Dabei sind nur die Mühlen berücksichtigt, bei denen

der Rotor- und Statoraustausch gleichzeitig vorgenommen wurde. Das sind alle Mühlen außer FM03 und FM08. Die Betriebsstunden werden ab dem Zeitpunkt des Rotor- und Statoraustausches gezählt und die Volumenänderung bezieht sich auf die Mühle FM06 mit dem kleinsten Volumen von 9,7 l. Dieses Anfangsvolumen muss nicht für jede Mühle gleich sein. Das theoretische Mahlraumvolumen ist laut dem Datenblatt 9,83 l und die neuste Mühle FM09 hatte z.B. nach nur 70 Stunden ein Mahlraumvolumen von 10 l, was bedeutet, dass es schon ein nicht vernachlässigbarer Volumenunterschied für neue Mühlen geben muss.

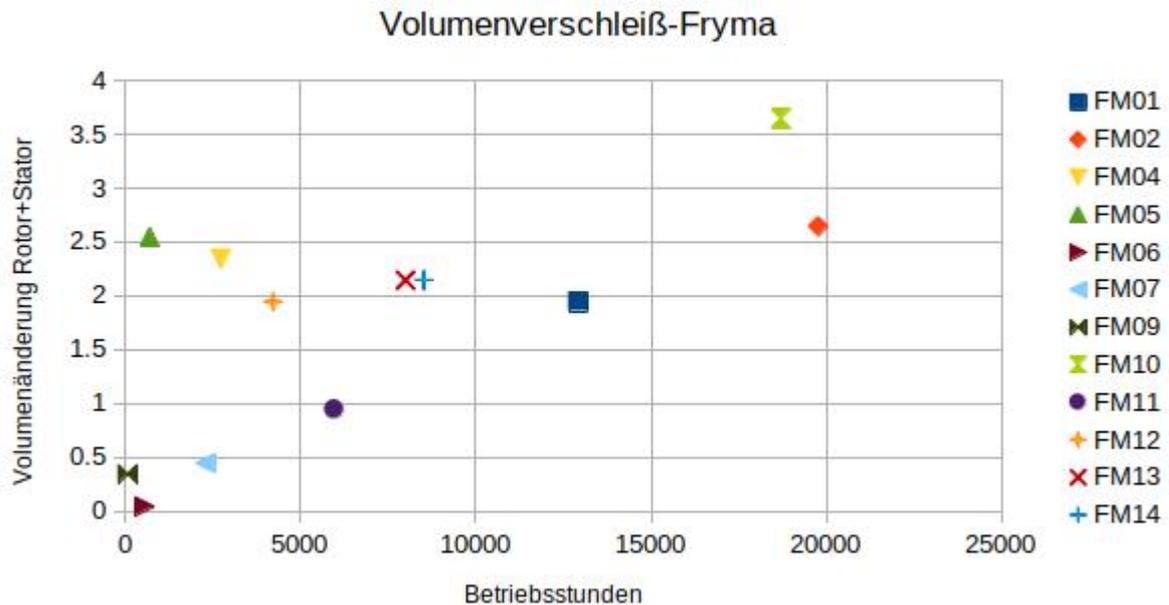


Abbildung 14: Die Graphik der Abhängigkeit des Mahlraumvolumens von den Betriebsstunden bei den CoBall-Mühlen.

Schon nur aus der Abb. 14 kann man den natürlichen Zusammenhang zwischen Betriebszeiten und Verschleiß bemerken. Allerdings ist auch zu erkennen, dass sich einige Mühlen augenscheinlich viel schneller abnutzen als andere. Für FM13, FM14 und FM10 kann man es z.B. durch die unterschiedlichen Mahlprodukte erklären. Auch für die FM12 kann das der Fall sein, weil den Rotor und Stator in 2007, 2010 und dann wieder in 2014 gewechselt wurden. Jeweils nach ca. 4000 Betriebsstunden.

Die Mühlen FM04 und FM05 sind jedoch problematischer zu verstehen. Bei der FM04 war in 2016 den Rotor (nach 9628 Betriebsstunden) und den Stator (nach 4801 Betriebsstunden) ausgetauscht. Nun hat die Mühle angeblich nach nur 2772 Betriebsstunden schon mehr als 2 l verloren. Die zweite Messung nach 277 Betriebsstunden zeigte aber keine Änderung, was bedeutet, dass die tatsächliche Änderung weniger als 0,1 l sein musste, obwohl man mehr als 0,2 l aufgrund voriger Statistik erwarten könnte. Das kann viele potentiellen Ursache haben, aber die Abwesenheit von Daten über das genaue Anfangsvolumen der Mühlen macht jegliche Analyse sinnlos.

Sogar erheblicher ist das Problem für die FM05, wo, laut der Instandhaltungsdaten, die komplette Maschine in 2019 wegen Produktumstellung erneuert wurde. Ihr Stator und Rotor liefen fast 11000 Betriebsstunden und jetzt sind angeblich nach nur 700 Betriebsstunden fast 2,5 l abgenutzt. Genau wie bei der FM04 ist die Änderung bei

der nächsten Messung nach 221 Betriebsstunden kleiner als 0,1 l. Die neuen eingebauten Bauteile sind aber nicht dieselbe wie die Alten, sondern beschichtet, was ein viel größeres Anfangsvolumen als potentielle Ursache dieser Diskrepanz identifizieren könnte.

Hier kann man drei Verbesserungsvorschläge geben:

1. Die alten Volumenmessungen soll man aufbewahren und, wenn es möglich ist, elektronisch speichern.
2. Auch bei dem Austausch der alten Bauteile sollte man das Mahlraumvolumen im Anfangszeitpunkt der neuen Bauteile abmessen und speichern, um die Daten in der Zukunft genau vergleichen zu können.
3. Die Messung soll präziser sein, zumindest auf zwei Dezimalstellen, da den Verschleiß gering ist und sein Verlauf einfacher zu folgen ist.

Diese Methode ist unverzichtbar für die schnelle, einfache und relativ genaue Erfassung des aktuellen Verschleißstands der Mühlen. Es ist auch wichtig zu verstehen, dass das vergrößerte Mahlraumvolumen nicht nur vom Rotor- und Stator-, sondern auch vom Deckelverschleiß abhängt. In diesem Bereich soll die Erosion aber deutlich kleiner sein (s. Abb. 6). Wenn man dann die Deckelabnutzung vernachlässigt, bleibt das Problem, dass man nur die Summe des Stator- und Rotorverschleißes messen kann. Das könnte durch das Abwiegen des Stators gelöst werden, da die Dichte natürlich konstant ist. Der Aufwand für die Demontage ist aber laut der Instandhaltung zu groß, um so was während des Ausliterns durchzuführen. Auf jeden Fall ist es besser, sofern man schon die Mühle demontieren muss, eine der Demontagemethoden (s. Kap. 2.12, 2.12.1 und 2.13) anzuwenden, die zusätzlich das Problem des ungleichmäßigen Verschleißes lösen und sogar sehr problematische Einschüsse quantifizieren können.

### 2.8.1 Einfaches Modell der Abhängigkeit des Mahlspalts und der Wanddicke vom Mahlspaltvolumen

Da, wie oben erklärt, weder die Daten über das Mahlspaltvolumen beim Auslitern gespeichert werden, noch die Daten über die mit Ultraschall gemessene Wanddicke vorhanden sind (s. Kap. 2.5), wird hier ein kleines mathematisches Modell für die gegenseitige Abhängigkeit beider Größe dargestellt. Zwischen dem Rotor und Stator befindet sich ein gleichmäßiger Mahlspalt. Für diese Zwecke ist nur dieser Spalt und die Wände vom Rotor und Stator, die den Spalt erzeugen, relevant. Deswegen wird nur das Rotorvolumen für zwei verschiedenen Rotordimensionen approximiert. Zuerst für die genauen Dimensionen des Rotors und danach samt des dazu addierten Mahlspalts. Der Unterschied dazwischen ist das Mahlraumvolumen. Dadurch teilt der vergrößerte Rotor mit dem Stator samt Deckel eine Oberfläche, die auch die äußere Oberfläche des Mahlraumvolumens ist. Der Verschleiß verkleinert den Stator und den Deckel und vergrößert gleichzeitig diesen imaginären vergrößerten Rotor, der um den Mahlspalt größer als der reale Rotor ist.

In der Abb. 15 ist das Vorgehen für die Abschätzung des Rotorvolumens illustriert. Angezeigt ist ein realistischer Rotor mit Kühlwasser drinnen. Die dicken Linien um den Rotor zeigen das Volumen, das berechnet werden soll. Aufgrund der abgerundeten Ecken des Rotors ist dieses Volumen größer und deswegen zieht man den schraffierten Teil am Ende ab, um die Genauigkeit zu verbessern. Die Geometriedaten, die dafür benutzt werden, sind die Radien  $r_1 = 250\text{mm}$   $r_2 = 125\text{mm}$   $r_3 = 185\text{mm}$ , der Mahlspaltbreite

$d = 9\text{mm}$  und die Winkel  $\omega = 80^\circ$ . Diese Größen können natürlich je nach dem Rotor abweichen. Das Volumen bekommt man mithilfe drei, in der Abb. 15 angezeigten Kegel: Kegel 1 (himmelblau plus grün), Kegel 2 (gelb) und Kegel 3 (gelb plus grün). Die Kegel 3 ist identisch mit dem Teil der Kegel 1, der außerhalb des Rotors ist. Das Volumen jeder Kegel bekommt man mit:

$$V_k = \frac{\pi}{3} \cdot r^3 \cdot \tan(\omega),$$

wobei  $r \cdot \tan(\omega)$  die Höhe der Kegel ist und der Winkel  $\omega$  für alle drei Kegel gleich ist. Das Volumen vom abgeschätzten Rotor wird durch das doppelte Abziehen der Kegel 3 von der Kegel 1 und die Addition der Kegel 2 berechnet:

$$V_r = \frac{\pi}{3} \cdot \tan(\omega)(r_1^3 - 2 \cdot r_3^2 + r_2^2)$$

Danach wird das Volumen vom, um den Mahlspace vergrößerten, Rotor berechnet. In der Abb. 15 ist der Mahlspace abgeschattet gezeichnet. Die Berechnung erfolgt analog und man muss nur die neuen Radien trigonometrisch berechnen.  $r'_1 = r_1 + d \cdot (\sin(90^\circ - \omega) + \frac{1}{\sin(\omega)})$  und  $r'_2 = r_2 - d \cdot \frac{1}{\tan((180^\circ - \omega)/2)}$

Am Ende braucht man nur den Volumenunterschied beider Rotoren, um den Mahlspace zu bekommen. Wie schon oben erwähnt, ist dieser Mahlspace größer als realer Mahlspace, was durch das Abziehen des schraffierten Teiles im unteren Teil des Mahlraums etwa amortisiert wird. Die trigonometrische Berechnung dieses Teilvolumens wird hier nicht ausgeführt. Für den Zweck dieser Modellierung wurde ein kleines Python-Programm geschrieben, das auch für spätere einfache Simulationen benutzt wurde.

Mit den oben angeführten Geometriedaten bekommt man mit dieser Rechnung das Mahlraumvolumen von 10,09 l, Das in der Betriebsanleitung angeführten theoretisches Mahlraumvolumen beträgt 9,83 l. Der Unterschied ist u.a. aufgrund der abgerundeten Ecken von einem realen Rotor entstanden. Obwohl ein Volumenteil abgezogen wurde, ist es aus der Abb. 15 ersichtlich, dass im unteren Bereich immer noch ein zusätzliches Volumen vorhanden ist. Außerdem ist der Bereich, oberhalb des Rotors, durch die Antriebswelle ausgefüllt. Da man hier nicht um den physikalischen Mahlprozess oder anderen komplizierteren Simulationen interessiert ist, ist dieses Modell ausreichend.

Verschleiß verursacht eine Radiusverkleinerung des kleineren Rotors bzw. eine Radiusvergrößerung des Größeren. Der Mahlspace wird dabei, wie im Realfall, vergrößert. Angenommen, dass der Mahlspace gleichmäßig bleibt bzw. überall gleich wächst, kann man den Verschleißprozess mit diesem Modell rechnerisch simulieren. Dabei kann auch der Einfluss von potentiellen Verhältnissen zwischen den Rotor- und Statorverschleiß untersucht werden.

In der Abb. 16 ist die Abhängigkeit des Mahlspace vom Mahlraumvolumen für verschiedene Verhältnisse des Rotor- und Statorverschleißes dargestellt. Obwohl die Abhängigkeit linear aussieht, ist die Linie eigentlich eine Parabel.

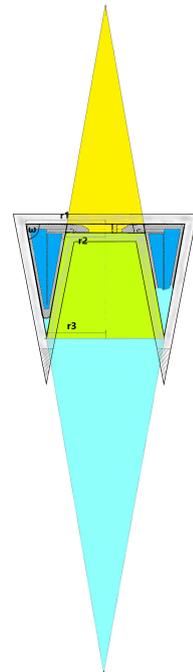


Abbildung 15: Skizze des mathematischen Vorgehens für die Abschätzung des Mahlspacevolumens.

Bei einer gleichen Abnutzung des Rotors und Stators würde die Mahlpaltbreite langsamer wachsen und bei einem sehr verschleißfestem Stator schneller. Die Graphik wird bis zur vollständigen Abnutzung einer der Wände geplottet. Wenn sich der Rotor und Stator gleich schnell abnutzen, kann die Mühle das größte Mahlraumvolumen erreichen. Laut der Betriebsanweisung (s. Kap. 2.3) überlebt ein Stator im Schnitt drei Rotoren. Wenn das bedeutet, dass sich der Rotor dreimal schneller als der Stator abnutzt, entspricht den Faktor 0,3 gut der Realität. Die Instandhaltungsdaten bei Axalta Guntramsdorf können diese Behauptung nicht bestätigen, da sie zeigen, dass die Rotoren und Statoren fast gleich lang dauern (s. Kap. 2.2). Die tatsächliche Wandstärke wurde aber nie systematisch gemessen und dokumentiert. Ohne die genaueren Daten, die nur durch Messmethoden in den Kap. 2.12, 2.12.1 und 2.13 gesammelt werden können, ist das unmöglich zu klären.

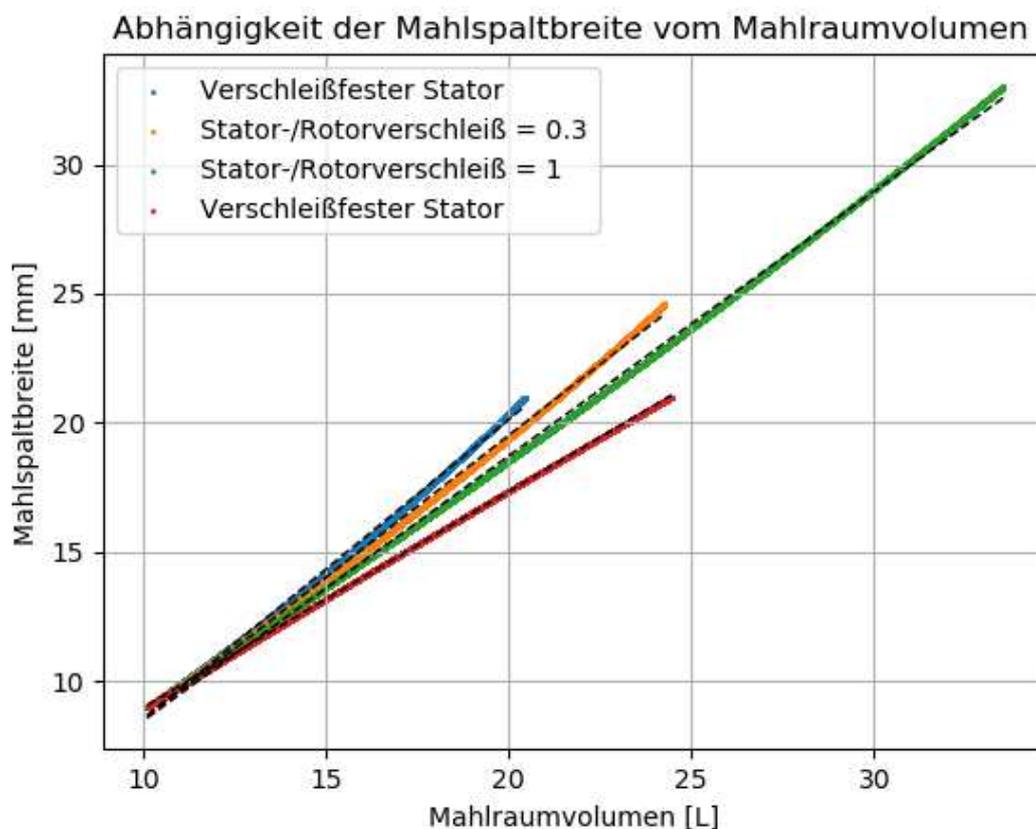


Abbildung 16: Die Abhängigkeit der Mahlpaltbreite vom Mahlraumvolumen bei verschiedenen Verhältnissen von Rotor- und Statorabnutzung.

Der Materialverlust zwischen dem Rotor und Deckel oder im inneren Konus des Rotors ist viel kleiner als der Verlust im äußeren Konus. Deswegen ist es sinnvoll den Fall, wenn die Erosion im äußeren Konus deutlich mehr vorhanden ist, zu simulieren. Der Rotor verkleinert sich dann nicht symmetrisch, aber der Winkel  $\omega$  bleibt erhalten. Das Ergebnis ist in der Abb. 17 zusammen mit seiner linearen Approximation sichtbar. Hier wird wieder angenommen, dass sich der Rotor dreimal schneller abnutzt. Einfachheit halber wird der schraffierte Teil des Volumens (s. Abb. 15) nicht abgezogen und deswegen sind die Volumenwerte etwa größer als im vorigen Fall gleichmäßiger Abnutzung. Die Linien werden bis zum Bersten des Rotors, der sich schneller abnutzt, geplottet. Logischerweise verursacht dasselbe Mahlraumvolumen jetzt eine größere Mahlpaltbreite im äußeren Konus.

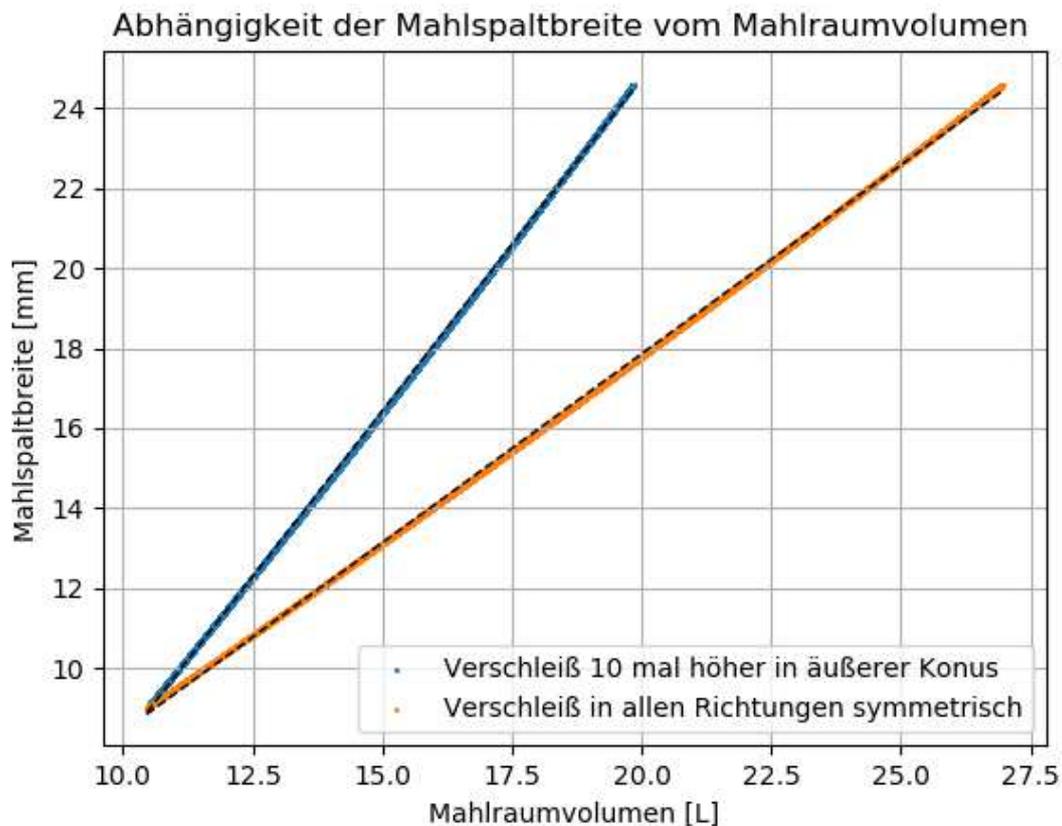


Abbildung 17: Ein Vergleich der Mahlpaltbreite-Mahlraumvolumen Abhängigkeit für den Fall der überall gleichen Abnutzung und den Fall, wenn sich die Bauteile zehnmals schneller im äußeren Konus abnutzen. Es wird angenommen, dass sich der Stator dreimal langsamer abnutzt.

Die Wanddicke des Rotors und Stators kann auch berechnet werden. In der Abb. 18 ist die Abnutzung der Wanddicke über das Mahlraumvolumen bei einer zehnmals höheren Abnutzung im äußeren Konus dargestellt. Die orange Linie entspricht dem Fall, dass sich der Rotor dreimal schneller abnutzt. Folglich kann man nur ein kleineres Mahlraumvolumen erreichen.

In diesem Modell sind die Ergebnisse nicht wirklich aussagekräftig, da sich die Wände wesentlich ungleichmäßiger in den Verschleißzonen abnutzen (s. Abb. 6). Zusätzlich nutzen sich die Bauteile asymmetrisch hinsichtlich der Rotationssymmetrie ab und oft entstehen auch Einschüsse, die sowieso nicht vorhersehbar sind. Außerdem ist bei einer starken Abnutzung und folglich einer ungleichmäßigen Änderung der Mahlpaltgeometrie ein erhöhter Verschleiß wegen der jetzt mehr turbulenten Bewegungen des Produkts und der Perlen zu erwarten. Dieses Modell untersucht also ein idealer Fall der Abnutzung und die Werte aus der Abb. 18 entsprechen dem theoretisch maximal erreichbaren Mahlraumvolumen.

Laut der Instandhaltung halten die CoBall-Mühlen, wenn keine tiefen Einschüsse vorhanden sind, bis 15, 16 l aus, was viel weniger als die Werte, die mit diesem Modell bekommen wurden, ist. Das war aber zu erwarten. Eine ganz rotationssymmetrische Abnutzung ist natürlich ganz unwahrscheinlich.

Mit dieser Methode könnte auch die Masse des Rotors abgeschätzt werden (89 kg). Dabei wird angenommen, dass er ein Hohlraum mit der überall gleichen Wanddicke

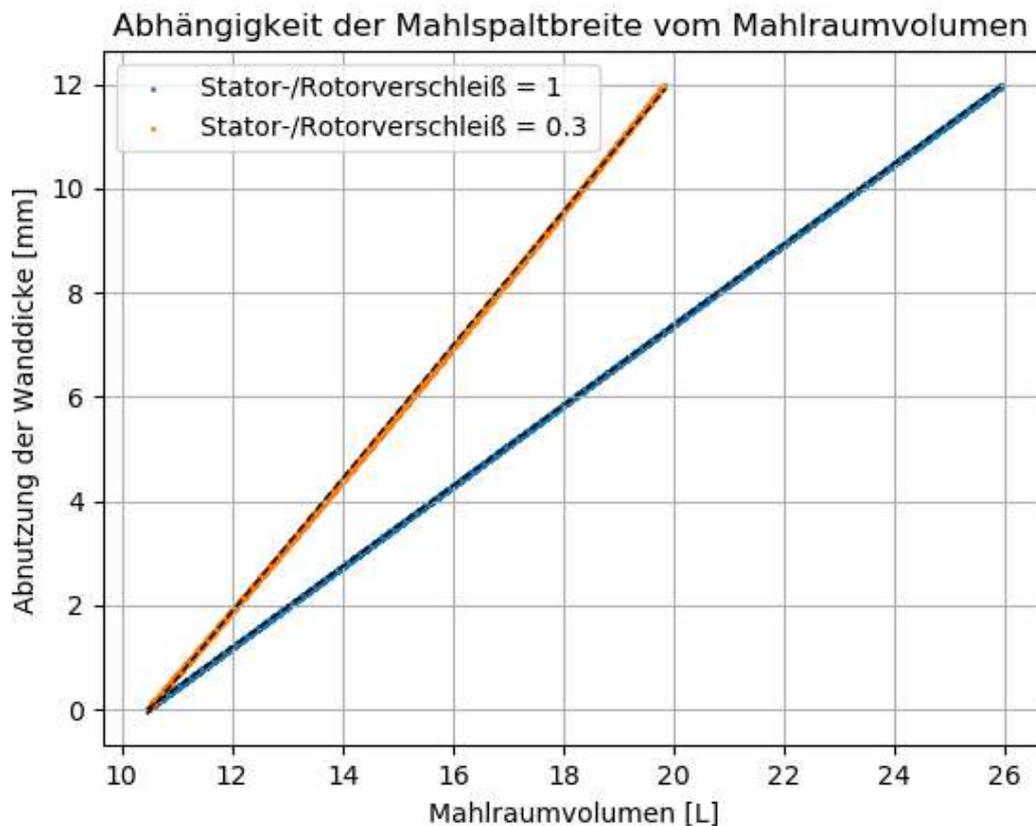


Abbildung 18: Abhängigkeit der Wanddicke der Bauteile von dem Mahlraumvolumen. Die Abnutzung im äußeren Konus ist wieder als 10 mal intensiver angenommen. Die Graphen für unterschiedliche Verhältnisse zwischen Rotor- und Statorverschleiß sind geplottet.

von 12 mm ist. Zusätzlich wird auch die Masse des im Hohlraum befindenen Kühlwassers berechnet (16,6 kg). Diese Abschätzungen werden weiter im Kap. 3.4 benutzt.

## 2.9 Kooperation mit der Produktionsabteilung

Im Kap. 1.2.2 wurde über den Einfluss der Mahlsplattgeometrie auf die Produktqualität diskutiert. Wenn sich die Mahlsplattbreite gleichmäßig vergrößert, kann man es theoretisch durch die Anpassung anderer Produktparameter (z.B. Viskosität) korrigieren, sodass die Verweilzeit ungefähr gleich bleibt. Sonst lässt man einfach das Produkt länger mahlen. Die Betrachtung der Produktqualität im Laufe der Zeit bei einer Co-Ball Mühle weist indirekt auf ihr Verschleiß hin. Wenn die Mahldauer durch die Anpassung der Produktparameter erheblich verkleinert werden kann, bedeutet das, dass die Mühle wahrscheinlich keine große ungleichmäßige Abnutzung aufweist. Sonst ist der Mahlprozess turbulent und die Abnutzung passiert mit einer viel größeren Intensität. Genau dieser Zeitpunkt ist vom besonderen Interesse und wenn er, mithilfe der Produktionsabteilung, erkannt werden könnte, dann kann die problematische Mühle sofort geprüft werden. Möglicherweise kann dieser Zeitpunkt auch durch Vibrationsanalyse (3) erkannt werden.

## 2.10 Drehmomentmessung

Ein Drehmoment  $\vec{M}$  wird durch eine Kraft  $\vec{F}$  in einem Punkt erzeugt, der sich auf der Position  $\vec{r}$  relativ zu der Wirkungslinie der Kraft befindet:

$$\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}$$

Wenn sich der Rotor dreht, besitzt er ein Eigendrehmoment

$$M = I \cdot \alpha,$$

wobei  $I$  das Trägheitsmoment und  $\alpha$  die Winkelbeschleunigung ist.

Das Trägheitsmoment für homogene rotierende Körper ist definiert als:

$$I = \rho \int_V r_{\perp}^2 dV,$$

wobei  $\rho$  die Dichte des Körpers und  $r_{\perp}$  der vertikale Abstand von der Drehachse ist. Dieser Abstand wird über das ganze Volumen integriert.

Beim Rotorverschleiß ändert sich das Trägheitsmoment des Rotors, indem das Integral, je nachdem, wo genau die Masse verloren ist, mehr oder weniger verkleinert wird. Die Drehmomentmessung kann also einen indirekten Indikator für den Verschleißgrad bereitstellen. Diese Methode gibt aber nur einen Betrag an und damit ist die genaue Menge des verschleißenen Materials schwierig abzuschätzen, weil die exakte räumliche Verteilung des Materialverlustes unbekannt bleibt. Man könnte aber mithilfe der schon bekannten Zonen stärkerer Abnutzung (s. Abb. 6) die verlorene Masse besser abschätzen.

Als dynamischen bzw. rotativen Drehmomentsensoren werden meist Dehnungsmessstreifen (DMS) benutzt. DMS ändern ihren elektrischen Widerstand bei geringen Deformationen bzw. Dehnung oder Stauchung. Die Rotorwelle der Mühle wird während des Betriebs tordiert. Vier, in einer Vollbrücke geschalteten, DMS werden auf der Welle, meist mit einem speziellen Klebstoff, so befestigt, dass zwei DMS gleichzeitig gedehnt und zwei gestaucht werden (Abb. 19). Die Ausgangsspannung der Brücke ist dann zum Drehmoment proportional. Die Signal- und Energieübertragung auf die DMS-Schaltung auf der rotierenden Welle erfolgt entweder über ein Funksystem (Signal) und eine induktive Stromschleife (Versorgung), oder über die Bürsten und Schleifringe wie in der Abb. 19 dargestellt. Man kann auch das komplette System als ein Wellenzwischenstück über die Anschlussflansche einbauen. Dafür muss man aber die Welle natürlich zerschneiden. Dort können statt DMS auch piezoelektrische Kristalle als Drehmomentsensoren benutzt werden. Sie erzeugen Ladung unter Schubkräften.

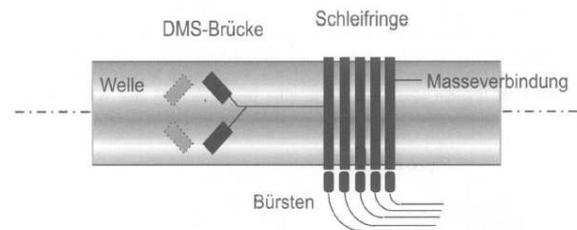


Abbildung 19: DMS-Ausrüstung für die Drehmomentmessung [14].

Man kann auch kontaktlos mittels hochfrequenter Magnetfelder das Drehmoment messen. Diese magnetoelastische Sensoren sind vielversprechend, aber relativ neu, störungsanfällig durch Vibrationen und noch nicht in der Industrie so verbreitet. Eine kontaktlose Messung ist auch theoretisch durch die Benutzung von Körperschallwellen,

die sich auf die Oberfläche des Messmediums verbreiten und sich bei einer Veränderung des Materials (z.B. Torsion) auch entsprechend ändern. Das ist allerdings immer noch fast nur in Laborbedingungen realisierbar.

Obwohl die Montage kompliziert ist und die daraus erhaltenen Ergebnissen wahrscheinlich nur einen Indikator für die verlorene Rotormasse bereitstellen würden, ist diese Methode von großer Bedeutung, weil sie für die Bestimmung der mechanischen Leistung (s.u.) benutzt werden kann.

## 2.11 Elektrische und/oder mechanische Leistungsmessung

Elektrische Leistung bei Gleichstrom ist:

$$P = U \cdot I$$

Durch eine gleichzeitige Messung des Stroms und der Spannung ist die Leistung leicht zu bestimmen.

Im Fall des Wechselstroms ist die Leistung nicht nur von den Effektivwerten  $U$  und  $I$ , sondern auch von der relativen Verschiebung zwischen Spannung und Strom abhängig, für einen sinusförmigen Verlauf ist:

$$P = \overline{u \cdot i} = U I \cos \varphi$$

Streng genommen ist dies die Wirkleistung, die für die Umwandlung in z.B. mechanische Leistung verfügbar ist. Da für die Übergabe der Energie an die Welle der Mühle nur die Wirkleistung relevant ist, kann man die Blindleistung ignorieren.

Leistungsmesser messen und multiplizieren mit höher Frequenz die Augenblickswerte von Strom und Spannung. Der gemittelte Wert entspricht der Wirkleistung.

Für symmetrische Drehstromverbraucher kann man die Wirkleistung, unabhängig davon ob der Verbraucher in Dreieck- oder Schternschaltung betrieben wird, mit:

$$P = \frac{3}{\sqrt{3}} U I \cos \varphi$$

berechnen, wobei  $U$  die effektive Spannung zwischen zwei Phasenleitungen,  $I$  der effektive Strom entlang jedes Leiters und  $\cos \varphi$  die Verschiebung ist. Wenn der Verbraucher symmetrisch ist, muss man also die Spannung zwischen mehreren Phasenkombinationen und den Strom entlang jeder drei Leiter nicht messen, da die Leitergrößen gleich groß sind und eine Multiplikation mit dem Faktor 3 reicht. Der Faktor  $\sqrt{3}$  kommt vom Unterschied zwischen den Leitergrößen bzw. den Größen, die außerhalb des Verbrauchers gemessen werden, und den Stranggrößen, die nur im Verbraucher selbst gemessen werden können [15].  $\cos \varphi$  wird als Leistungsfaktor bei Verbraucherspezifikationen angegeben, da er den Anteil der Wirkleistung in Gesamtleistung (Scheinleistung) angibt.

Der Motor der CoBall-Mühlen ist Lohers 45 kW starken, vierpoligen Drehstrommotor (mit Käfigläufer) (DNGW-225MB-04) mit einer druckfesten Kapselung und Umdrehungszahl von ca. 1500 rpm. Laut [16] dürfen diese Motoren auf 400V in Dreieckschaltung bzw. 690V in Sternschaltung oder in Stern-Dreieck-Anlaufschaltung bis 400V betrieben werden. Unabhängig von der Auswahl kann man für die Wirkleistung die obige Formel benutzt werden. Für jede CoBall-Mühle bei Axalta Guntramsdorf wird schon den verbrauchten Strom während des Betriebes gemessen. Da der Leistungsfaktor des Motors

beim Nennbetrieb bekannt ist  $\cos \varphi = 0,84$  [16], braucht man nur noch die Spannung, die entweder auch gemessen werden oder nur als allgemeine Betriebsspannung abgeschätzt werden könnte (z.B. 400V). Die zulässige Spannungsabweichung in Österreich ist  $\pm 10\%$ . Obwohl die tatsächliche Spannungsabweichung normalerweise nicht in der Nähe dieser Grenze ist [17], können die Abweichungen vom wahren Wert, nicht nur wegen der nicht konstanten Spannung, sondern auch wegen des von der Last abhängigen Leistungsfaktors [18], relativ groß sein. Deswegen ist auf jeden Fall die Benutzung von professionellen Geräten, die zuverlässig und genau Wirk- und Blindleistung, Leistungsfaktor usw. messen und speichern können, empfehlenswert. Mit dem obigen Verfahren bekommt man fast kostenlos bzw. mit der schon vorhandenen Ausrüstung eine relativ gute Approximation der elektrischen Leistung beim normalen Betrieb.

Angenommen, dass die elektrische Leistung sehr genau gemessen wird. Man braucht allerdings die in den Rotor eingespeiste mechanische Leistung. Sie ist einfach durch die Motoreffizienz zu berechnen, die beim Nennbetrieb für diesen Motor 93,2 % beträgt. Das Problem ist, dass den Wirkungsgrad nicht konstant und von der Last abhängig ist. Die Abweichung ist bei großen Lasten relativ klein, aber die mechanische Leistung kann man deswegen, durch die Messung der elektrischen Leistung, nur abschätzen.

Eine direkte Messung der mechanischen Leistung erzielt viel genauere Ergebnisse. Die mechanische Leistung kann man aus dem Drehmoment und der Drehzahl der Antriebswelle berechnen:

$$P_m = M \cdot f,$$

wobei  $f$  die in [Hz] umgewandelte Drehzahl ist. Das Drehmoment kann man, wie schon im Kap. 2.10 erklärt, mit mehreren verschiedenen Methoden messen. Hier werden übliche Methoden für die Drehzahlmessung kurz erwähnt.

Eine elegante Methode ist das Einsetzen der Spannung eines kleinen, elektrischen, durch die Welle betriebenen Generators, sogenannten Tachogenerators. Seine generierte Spannung ist zu der Winkelgeschwindigkeit der Welle proportional und wird als die Antriebsspannung für die DMS-Brücke benutzt. Dadurch ist die Ausgangsspannung der Messbrücke direkt proportional zur Leistung [14].

Das Zählen der elektrischen Impulse, die durch die Rotation der Scheibe entstehen ist noch eine übliche Methode für die Drehzahlmessung. Man benutzt z.B. eine auf der Welle montierte Lochscheibe und eine um die Scheibe positionierte Gabelschranke mit einer Lichtquelle auf einer Seite und einem Photodetektor auf der Anderen. Eine Alternative ist ein auf der Welle montiertes Eisenzahnrad, das sich in der Nähe von einem Magnet dreht. Ein Hallensensor misst dann das Magnetfeld dazwischen. Ein Nachteil dieser Methode ist der kleine Sensoroutput für niedrige Drehzahlen [14].



Abbildung 20: Ein System für die Messung der mechanischen Leistung mit induktiver Spannungsversorgung am Fahrzeug [19].

Eine moderne Lösung sind MEMS (Micro Electro-Mechanical System) basieren-

de Gyroskope [19]. Während der Rotation werden Gitterstrukturen in dem Sensor wegen der Corioliskraft gegeneinander ausgelenkt. Folglich ändert sich die Kapazität dazwischen und zwar proportional zur Drehzahl. In der Abb. 20 sieht man ein System, das diese Methode für die Drehzahlmessung bzw. mechanische Leistungsmessung benutzt. Unter dem Gehäuse befindet sich eine angeklebte DMS-Brücke. Das System kommuniziert telemetrisch und wird durch eine induktive Schleife versorgt.

Wie im Kap. 1.2.2 erklärt, hängt die Effizienz der Mühlen von vielen Faktoren, die untereinander abgestimmt werden müssen, ab. Wenn sich der Mahlpalt aufgrund des Verschleißes deutlich vergrößert, muss man die Produktparameter korrigieren, um dieselbe Verweilzeiten wie zuvor wieder zu haben. Ohne Parameteranpassung ändert sich u.a. (größtenteils wegen einer Massenänderung des Rotors) auch die Last in der Mühle und damit die mechanische Leistung. Die gemessene Leistung kann dann einen Indikator für die Änderungen der Fluidmechanik und insbesondere der Mahlpaltgeometrie in der Mühle sein. Die Beobachtung der mechanischen Leistung wäre auch für die Produktion im Allgemeinen von großer Bedeutung. In [26] hat man die Änderung der elektrischen Leistung, des Stroms und des Leistungsfaktors bei verschiedenen Verschleißgraden der Rührwerke bei den großen Rührwerkskugelmühlen in der Bergbauindustrie untersucht. Dort sieht man den erwarteten Abfall der Leistung für ältere, mehr abgenutzte Rührwerke. Interessanterweise wurde hier die Standardabweichung des Leistungsfaktor als einen Indikator für den Rührwerkverschleiß genannt. Dieser Indikator hängt sogar nicht vom Last ab. Das könnte man bei den Vollrath-Mühlen anwenden.

Folgende zwei Methoden sind die einzige im Rahmen dieser Arbeit gefundenen Möglichkeiten die Rotor- und Statortopologie bzw. die Wandstärke jedes Punktes genau und systematisch zu messen. Sie erfordern allerdings eine Demontage der Mühle.

## 2.12 Koordinatenmessgeräte

Man darf annehmen, dass das Kühlwasser, das durch das Innere des Rotors und Stators ständig fließt, im Gegensatz zum Mahlprodukt, das sich über die äußere Oberfläche von Rotor und Stator bewegt, keinen Abrieb verursacht. Daraus folgt, dass der Verschleiß durch die Betrachtung der äußeren Oberflächen sehr gut quantifiziert werden kann. Wie im Kap. 2.3 erklärt, benutzt die von der Fa. FrymaKoruma offiziell angebotene Lösung, obwohl etwa primitiv, auch diese Strategie für die Messung des Verschleißes.

Koordinatenmessgeräte sind händisch geführten oder CNC (Computerized Numerical Control)-gesteuerten Maschinen, die aus Sensoren verschiedener Arten und einem System für die Positionierung dieser Sensoren bestehen. Sie werden am häufigsten beim Qualitätsprüfungsprozess benutzt. Die Idee ist, die räumlichen Koordinaten des Messobjektes durch die Abtastung verschiedener Punkte zu bekommen und dann rechnerisch ein 3D-Modell zu erstellen. Die Koordinaten zeigen im Fall des Volumenverschleißes die verbliebene Wandstärke der Mühlen. Dafür sind jedoch die Kenntnisse der Koordinaten und der Wandstärken der Mühle bei dem Anfangszustand nötig. Nur dann kann man die Dimensionen beider 3D-Modelle vergleichen und die verbliebene Wanddicke genau berechnen. Angenommen, dass die Anfangsdimensionen von verschiedenen Exemplaren von Stator und Rotoren annähernd gleich sind, müsste man nicht jede Mühle im Neuzustand messen, um einen späteren Vergleich nach der Abnutzung durchzuführen. Wie im Kap. 2.8 erklärt, ist das Mahlraumvolumen von Mühlen, obwohl ähnlich, nicht identisch. Das bedeutet, dass auch Rotor- bzw. Statordimensionen je nach dem Exemplar unterschiedlich sein können. Wenn man den Rotor und Stator wie im Kap. 2.8.1 beschreibt und annimmt,

dass eine zehn prozentige Vergrößerung des Mahlraumvolumens durch eine gleichmäßige und dem Verschleiß ähnliche Verbreiterung des Mahlspalts zur Zustände kommt, ergibt sich, dass sich der größten Durchmesser des Rotors um ca. 0,5 mm verkleinern muss. Wenn aber der Stator während dieses Prozesses bleibt gleich, muss sich der Rotor um ca. 1,1 mm verkleinern. Die Ähnlichkeit verschiedener Exemplare vom Rotor und Stator könnte man auch relativ einfach experimentell untersuchen, wenn diese Methode eingesetzt würde. Um die große Genauigkeit der räumlichen Koordinatenbestimmung, die diese Methode bietet, ausnutzen zu können, muss man also, außer der Neuzustandskoordinaten eines Rotors und Stators, auch die Wandstärke einer neuen Mühle überall genau kennen. Das wäre eventuell nur mit der CT-Tomographie möglich (s. Kap. 2.13), was aber die Benutzung eines Koordinatenmessgeräts an erster Stelle gegenstandslos macht. Angenommen aber, dass die überalle Anfangswandstärke des Rotors bzw. Stators einfach durch die Messung weniger Punkte gut abschätzbar ist, kann man durch den Einsatz von Ultraschall oder Wirbelstrom an wenigen Punkten die überalle Anfangswandstärke der Bauteile abschätzen. Je nachdem, wie viel sich die seriell produzierten Rotor- bzw. Statorexemplaren voneinander unterscheiden und welche Genauigkeit man erzielen möchte, können natürlich auch die offiziellen Daten von der Fa. Frymakoruma aus technischen Zeichnungen für die Abschätzung der überallen Anfangswandstärke benutzt werden. Die Wanddicke soll normalerweise ca. 12 mm betragen. Da man generell nicht sehr genau die Anfangswanddicke des Rotors und Stators bestimmen kann, ist die Genauigkeit im Mikrometerbereich, die einige Arten von Koordinatenmessgeräten erzielen können, nicht wirklich nützlich.

Man kann diese Geräte in die händisch geführten (s. Abb. 21, links) und völlig automatisierten Systeme (s. Abb. 21, rechts) unterteilen, die dahingegen mit sog. schaltenden oder messenden Messköpfen ausgestattet sein können. Die erste Art der Sensoren nimmt die Werte nach einem Signal auf, das durch das Drucken des Sensors auf der Oberfläche entsteht (also Punkt für Punkt). Sie ist in der Regel viel billiger und langsamer als die zweite Art. Messende Sensoren, die z.B. den kapazitiven inneren Maßstab benutzen, können dahingegen über die Oberfläche gezogen werden und dabei eine viel größere Datenmenge schneller und genauer erfassen. Viele Geräte bieten die Möglichkeit des Scannens und der Einzelpunktuntersuchung. Man kann also das ganze Objekt schnell scannen und danach interessante Stellen genauer und langsamer untersuchen. Händisch geführte Geräte können entweder eine starre Einrichtung haben oder ihre aktuelle Position kabellos mit Hilfe eines optischen Trackers verfolgen (s. Abb. 22).

Für viele Betriebe ist es wichtig,



Abbildung 21: Verschiedene Arten von Koordinatenmessgeräten. Links oben: händisch geführt, ortsfest [38]. Links unten: händisch geführt, portabel. [39]. Rechts oben: automatisch, ortsfest. [40]. Rechts unten: automatisch, portabel [41].

dass robuste Teile nicht bis zum Koordinatenmessgerät getragen werden müssen, was den Bedarf für portable Geräte auf dem Markt erhöhte. Diese Koordinatenmessgeräte sind je nach der Umgebung weniger präzise und sind häufiger händisch geführt, aber es gibt auch einige Hersteller, die völlig automatisierte tragbare Systeme anbieten (s. Abb. 21, rechts, unten).

Ein Koordinatenmessgerät besteht also immer aus einem Sensorsystem, mit dem die Geometrie eines Gegenstands abgetastet wird, und aus einem dreiachsigen Positioniersystem, das das erste System bewegt oder zumindest seine Position bestimmt. Das Positioniersystem ist also auch selbst mit Sensoren ausgestattet, die die aktuelle Lage ablesen.

Das Sensorsystem gibt einen Messpunkt relativ zu der Position an, die mithilfe des Positioniersystems schon bekannt ist. Die abgetastete Lage wird durch den dreidimensionalen Vektor beschrieben und gespeichert. Danach erfolgt die Berechnung und rechnerische Modellierung der Ergebnisse. Für die einfache Untersuchung von den rotationssymmetrischen Objekten (z.B. Mühlen) kann man auch einen Drehtisch als Teil des Positioniersystems einsetzen.

Es ist noch erwähnenswert, dass für die genaueren Messungen auf Vibrationen (insbesondere bei tragbaren Geräten, die in geräuschvollen Produktionsbereichen getragen werden) geachtet werden soll. Außerdem ist auch die Umgebungstemperaturschwankung für viele Geräten sehr problematisch. Die Genauigkeit, die für das Verschleißproblem erreicht werden sollte (bis idealerweise ca. 0,1 mm) ist für die meisten modernen Geräte problemlos erreichbar.

Man kann verschiedene Sensorarten benutzen. Bisher werden hier Modellen mit taktilen bzw. elektro-mechanischen oder elektrischen Messköpfen beschrieben. Die Koordinatenmessgeräte können aber mithilfe optischer Abstandssensoren auch berührungslos messen. Das Scannen mit diesen Geräten ist im nächsten Unterkapitel genauer untersucht und ist wahrscheinlich die eleganteste Methode für die präzise Bestimmung der Rotor- und Statorgeometrie. Die Geräte können aber für besonders anspruchsvolle Aufgaben auch mehrere Sensorarten benutzen.

Für die Untersuchung der Stator- und Rotorabnutzung mit dieser Methode ist selbstverständlich die Demontage der Mühlen erforderlich. Im ersten Szenario demontiert man einen Stator und Rotor und transportiert sie in ein automatisiertes ortsfestes Koordinatenmessgerät, wo die Topologie sehr genau und ohne viel Aufwand bestimmt werden kann. Außerdem braucht man keine dafür ausgebildeten Techniker, die die Objekte sorgfältig per Hand scannen müssen. Im idealen Fall findet man ein tragbares automatisiertes Gerät, das auch relativ große Bauteile scannen kann, und erspart dadurch den Transportaufwand und vielleicht sogar die Demontage des Rotors (Stator muss auf jeden Fall demontiert werden). Die Genauigkeit wird sich dann etwa verringern, aber sie muss sowieso in diesem Fall nicht sehr groß sein. Im zweiten Szenario benutzt man ein tragbares händisch geführtes Gerät, das in der Regel günstiger ist und abtastet damit den Stator und den eventuell nicht demontierten Rotor vor Ort. Die Geräte mit nicht optischen Messköpfen besitzen entweder eine starre Einrichtung mit Gelenkarmen (Abb. 21) oder ein optisches Positioniersystem (Abb. 22). Die völlig optische, tragbare Geräte, mit denen alles noch viel einfacher durchgeführt werden kann,



Abbildung 22: Ein tragbares Koordinatenmessgerät mit einem optischen Positioniersystem, ohne starre Einrichtung. [42].

werden im nächsten Unterkapitel beschrieben.

### 2.12.1 3D Scanner

Streng genommen sind alle oben beschriebenen Koordinatenmessgeräte auch 3D Scanner und umgekehrt. Als 3D Scanner werden hier aber immer mehr populäre tragbare oder ortsgebundene (Koordinaten)Messgeräte mit einer berührungslosen optischen Abtastung des Objektes bezeichnet. Solche Geräte werden nicht nur bei der Qualitätssicherung oder Reverse-Engineering in der Industrie eingesetzt, sondern haben ein viel breiteres Anwendungsspektrum. Ihre Funktionalität basiert sich wesentlich mehr auf das Softwareteil mit den sehr fortgeschrittenen Algorithmen, die viel mehr als reine Positionsberechnungen aus Sensordaten ermitteln. Die Anzahl der aufgenommenen Daten bzw. gescannten Punkte, ist, auch im Vergleich zu den schnellsten automatisierten oben beschriebenen Systemen, sehr groß. Folglich ist das Bild viel aussagekräftiger mit einer sehr kleinen Auflösung von bis zu 0,1 mm [43]. Damit kann man kaum eine Fehlstelle bzw. einen Einschuss auf den Bauteilen verpassen. In der Abb. 23 sind einige Modellen angezeigt.



Abbildung 23: Einige 3D-Scanner Modelle [44]. Oben: ortsgebundene. Unten: tragbare.

Obwohl die ortsgebundene 3D Scanner auch verbreitet sind (s. Abb. 23, erste Reihe), insbesondere wenn sehr große oder sehr kleine Objekte gescannt werden müssen, sind vor allem die tragbaren Alternativen hier interessant. Die mittelgroßen Gegenstände, wie Rotoren und Statoren von CoBall-Mühlen, können, je nach der gewünschten Auflösung, unter einer halbe Stunde vollständig gescannt werden. Dabei kann man eine Genauigkeit von bis zu 0,05 mm bei einigen teuren Scanner-Modellen erreicht werden [44].

Ein großer Unterschied zu den oben beschriebenen Koordinatenmessgeräten ist, dass die 3D Scanner weder eine starre Einrichtung noch ein externes optisches Tracking-System für die Positionierung benutzen. Sie machen sog. Selbstpositionierung bzw. benutzen als Referenz den gescannten Gegenstand, um ihre absolute Position im Raum zu bestimmen. Sie sind aus diesem Grund viel praktischer einzusetzen. Der Algorithmus findet und speichert für jedes Objekt einige charakteristische Merkmale. Während

der Bewegung der Benutzer, verfolgt der (Tracking-)Algorithmus diese Merkmale. Einige Modellen haben auch eine Vielfalt von Sensoren (z.B. Kompass, Beschleunigung- und Gyrosensoren), die den Prozess erleichtern. Sehr einheitliche Figuren (wie z.B. glatte Kugeln) sind schwieriger zu scannen. Die eventuellen Probleme kann man durch das Einsetzen von Targets auf der Oberfläche, die dem Tracking-Algorithmus helfen können, lösen [20].

Das physikalische Prinzip der Messung bei den tragbaren 3D Scannern ist am häufigsten das strukturierte Licht (Abb. 24). Geometrische Lichtmuster werden auf die Oberfläche des Objektes projiziert (z.B. gerade Streifen). Die Bildverzerrung, die der Geometrie der Oberfläche entspricht, wird von den Kameras dann aufgenommen. Daraus werden dann die 3D Koordinaten aller betroffenen Punkte der gescannten Seite berechnet. Eine Punktwolke entsteht durch das Scannen des Objektes mehrmals von jeder Seite. Einige Modelle können bis 4 Millionen Punkte pro Blitz aufnehmen [44]. Aus der Punktwolke wird in Realzeit ein Polygonnetzmodell bzw. eine 3D Oberfläche erstellt, die dem Benutzer meistens farbkodiert indiziert, wann die bestimmten Bereiche genug gescannt wurden.

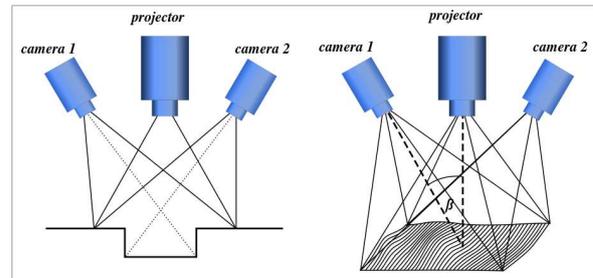


Abbildung 24: Strukturiertes Licht bei 3D-Scannern [45].

Genau wie bei den im vorigen Kapitel beschriebenen Geräten ist die Temperatur eine potenzielle Fehlerquelle. Außerdem kann jetzt auch die Luftfeuchtigkeit und insbesondere eine nicht ausreichende oder exzessive Belichtung ein Problem sein. Bei besseren Modellen sind diese Einflüsse minimalisiert. Außerdem sind einige schwarze, durchsichtige oder glänzende Oberflächen schwierig oder unmöglich zu untersuchen. Die Oberfläche der Mühlen sollte aber problemlos scannbar sein. Noch ein potenzieller Nachteil stellt die minimale Entfernung von dem Objekt für ein optimales Scannergebnis dar. Sie beträgt üblicherweise ca. 0,5 m. Für die Geometrie vom CoBall-Rotor und -Stator ist das kein Problem. Bei dem Einsetzen dieser Methode auf die Vollrath-Mühlen, deren Stator eine zylindrische Kammer ist, kann es allerdings je nach dem ausgewählten Modell zu Schwierigkeiten kommen.

Man muss bei dem Scannen vorsichtig und ohne schlagartige Bewegungen operieren, da sonst der Tracking-Algorithmus möglicherweise nicht gut genug funktionieren wird.

Normalerweise können Geräte nur in der Kombination mit einem PC funktionieren, auf dem eine mitgelieferte Software installiert wurde. Man verbindet das Messgerät mit dem PC, und verfolgt den Ablauf des Messprozesses in Realzeit. Es existieren auch einige Modelle, die mit dem eingebauten leistungsstarken PC und einem Bildschirm ausgestattet sind. Diese Modelle erzeugen ein Messbild ganz selbständig.

Erwähnenswert ist auch eine Expansion von sehr billigen Open-Source Alternativen wie Ciklop oder Murobo [46] (Abb. 23, erste Reihe in der Mitte). Leider ist die Software hier noch nicht gut genug um eine Profiausrüstung bei diesem Verschleißproblem ersetzen zu können.

Die Genauigkeit und Auflösung dieser Methode sind mehr als ausreichend für die Messung der Mühlenoberfläche zwecks der Wandstärkenabschätzung. In der Abb. 25

sieht man ein 3D-Modell eines Motors und viele Details seiner Oberfläche.

Nach dem Scannen muss man noch das erhaltene 3D-Modell mit dem Neuzustandsmodell vergleichen. Eine gute Zentrierung und Übereinanderlagerung beider Modellen im Programm ist deswegen entscheidend. Da sowohl der Stator als auch der Rotor Bereiche besitzt, die minimal oder überhaupt nicht vom Verschleiß beeinflusst sind (z.B. Außendurchmesser des Stators und Innenkonus des Rotors), sollte man keine großen Schwierigkeiten damit haben. Das eventuelle Problem, dass aufgrund der Rotationssymmetrie mit der Orientierung entstehen könnte, kann durch das Einsetzen der Markierungen an einer Stelle des Gegenstands gelöst werden. Am Ende bekommt man eine farbkodierte 3D Verschleißmappe ähnlich zu der in der Abb. 26. Keine andere Methode (außer eventuell CT-Tomographie) kann so umfangreiche Informationen über die durch den Verschleiß abgenutzten Bauteile bereitstellen.

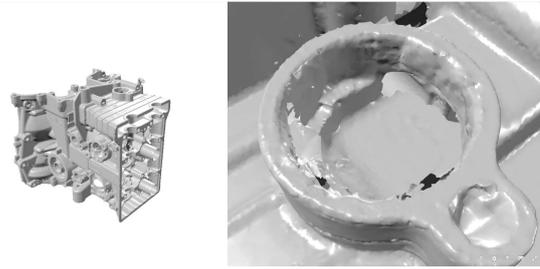


Abbildung 25: Links: 3D-Modell eines Motors. Rechts: kleine herangezoomte Oberfläche [47].

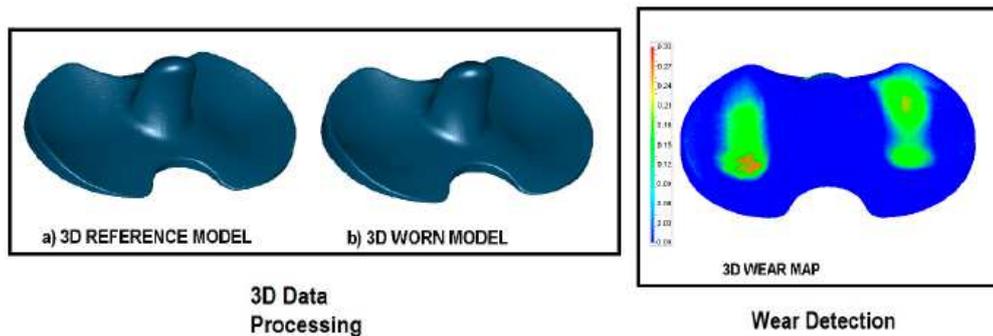


Abbildung 26: Eine farbkodierte 3D-Verschleißmappe [21].

Das abgenutzte Volumen kann auch rechnerisch aus dem Modellenunterschied separat für Rotor und Stator extrahiert werden. Die Summe kann man dann mit dem vergrößerten Anteil des Mahlräumvolumens vergleichen. Wegen der Deckelabnutzung soll diese Summe etwa kleiner sein.

### 2.13 Industrielle Computertomographie

Mit den Koordinatenmessgeräten bzw. 3D Scannern kann die Oberfläche sehr genau bestimmt werden. Wie im Kap. 2.12 erklärt, ist die Wanddicke bei einem Neuzustand der Mühle immer noch unbekannt. Sie kann zwar abgeschätzt werden (z.B. aus technischen Zeichnungen) oder in einzelnen Punkten mehr oder weniger erfolgreich gemessen werden (s. Kap. 2.5 und 2.6), aber die Genauigkeit einer solchen Abschätzung oder Messung ist deutlich schlechter als die Genauigkeiten der oben angeführten Methoden, mit denen die Oberflächengeometrie gemessen werden kann. Dieser Nachteil ist allerdings nicht entscheidend, da die Demontage sowieso nicht oft genug durchgeführt werden kann, um die Mühlen mit der Wanddicke in einem Punkt von z.B. 0,9 oder 1,5 mm wieder im

Betrieb zu setzen. Bei solchen Mühlen werden die problematischen Teile auf jeden Fall ausgetauscht, da die Chancen für Leckage schon gefährlich groß sind.

Wenn man jedoch die überalle Wanddicke direkt und mit einer Genauigkeit im Submillimeterbereich messen möchte, gibt es in nur eine dafür geeignete Methode, die Computer-Tomographie, die auch bei weitem die teuerste Methode ist. Damit kann nicht nur die äußere sondern auch die innere Geometrie der Gegenstände geprüft werden.

Die Computertomographie ist eine Methode zur zerstörungsfreien Schicht-für-Schicht-Untersuchung der inneren Struktur eines Objekts durch wiederholtes Bestrahlen in verschiedene Richtungen. Am Ende fügt man der resultierenden Schnitte mathematisch, mithilfe der speziellen Algorithmen zusammen. Die Strahlen, die für industrielle Zwecke benutzt werden können, sind Röntgen (auch Gamma), Ultraschall und Neutronenstrahlen. Daraus sind die letzten zwei Methoden noch im Forschungsstadium und hier wird nur über die Röntgen-Computertomographie diskutiert.

Ein typischer Röntgentomograph wird in der Abb. 27 dargestellt. In einer Röntgenröhre werden Elektronen beschleunigt, kontrolliert und auf einen Target fokussiert. In dem Target strahlen die Elektronen durch ihre Abbremsung die kontinuierliche oder durch die Aufregung der Atome die charakteristische Röntgenstrahlung ab. Die Strahlungsintensität wird durch die Elektronenanzahl bestimmt und die Strahlungsenergie, die von der Beschleunigungsspannung abhängt, bestimmt zusammen mit dem Material des gescannten Objekts seine Durchstrahllänge. Die Beschleunigungsspannung ist aber für herkömmliche Röntgenröhre auf 450 kV begrenzt, weil die Elektronen mit größeren Energien den Target zu viel aufheizen und dadurch zerstören können. Man kann alternativ auch Synchrotronen oder Betatronen als Quellen benutzen. Außerdem werden auch neue Technologien ständig geforscht. (z.B. MetalJet) und mittlerweile existieren am Markt Röntgenröhren mit höheren Spannungen [48]. Für die Bauteile aus Stahl beträgt die maximale Durchstrahllänge bei 450 kV ca. 70 mm [22] und bei 600 kV 90 mm [48]. Diese Durchstrahllänge ist auf ersten Blick genug für einen demontierten Rotor oder Stator der CoBall-Mühle, aber, um die Wanddicke zu messen, braucht man eine tangentielle und nicht quere Bestrahlung (s. Kap. 2.14). Intelligente Algorithmen können zwar helfen, aber wenn ein Objekt nicht völlig durchstrahlbar ist, kann man schwierig ein nützliches 3D-Modell erstellen. Daraus folgt, dass, unabhängig davon ob eine CoBall-Mühle demontiert ist oder nicht, bessere Quellen als 450 kV-starke klassische Röntgenröhre benötigt werden.

Generell kann man entweder mit einem Fächerstrahl (2D) oder einem Kegelstrahl (3D) scannen. Im ersten Fall scannt man das Objekt schichtweise. Folglich ist der Prozess langsamer aber weniger störungsanfällig. Die Entwicklung von besseren Algorithmen, die die Störeffekten beheben, hat die viel schnellere Kegelstrahlmethode als Standard in der Industrie etabliert [22]. Das ganze Volumen des Objekts wird also mit einem Kegelstrahl bestrahlt und die verdünnte Strahlung gelangt auf andere Seite und wird mit Röntgendektoren aufgenommen. Die üblichen Szintillationsdetektoren erzeugen ein Signal, das zur Strahlungsenergie proportional ist und diese in sichtbares Licht umwandeln. Das Licht

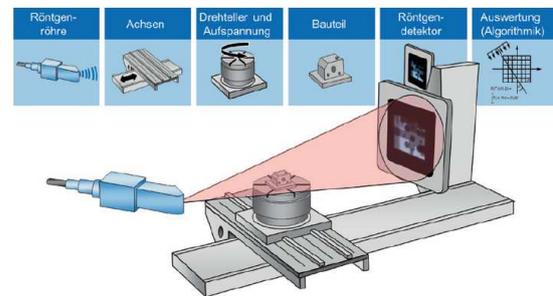


Abbildung 27: Darstellung eines Computer-Röntgentomographs für industrielle Anwendungen [22]

wird danach von Photodioden aufgenommen und eine Abbildung des durchgestrahlten Objekts wird erstellt.

Das gerade beschriebene Verfahren ist schon eine hundert Jahre alte Technologie. Ähnlich wie bei den 3D-Scannern ist der Kern eines Computer-Röntgentomographes seine Software. Das Objekt wird automatisch gedreht und mehrere Bilder aus allen Richtungen werden aufgenommen. Die fortgeschrittenen Algorithmen berechnen und bauen daraus ein 3D-Voxelmodell (Voxel = 3D Pixel) mit innerem Struktur auf. Das Hauptverfahren der Rekonstruktion basiert sich meist auf die gefilterte Rückprojektion. Andere Algorithmen detektieren die Kanten oder korrigieren zahlreiche Störeffekte (Artefakte). Ein Beispiel sind Strahlaufhärtungsartefakte, die wegen der Verwendung von nicht monochromen Röntgenstrahlungsquellen (langsamere Photonen werden dadurch stärker absorbiert) und nicht energetisch filtrierenden Detektoren entstehen.

Im Gegensatz zu den 3D Scannern messen sogar die besten Computer-Tomographen nicht automatisch. Je nach dem Objekt muss ein erfahrener Operator viele Variablen der Messung (Belichtungszeit, Spannung usw.) so einstellen, dass ein gutes Ergebnis erzielt werden kann. Für die ähnlichen Objekte, wie Rotoren und Statoren verschiedenes Verschleißgrades, müsste man aber nur einmal die richtigen Einstellungen finden.

In der Abb. 28 sieht man, wie mithilfe der Computertomographie die Wanddicke eines Kunststoffbauteils gemessen werden kann. Verschiedene Schnittbilder werden dargestellt (a) und ein Bild daraus ausgewählt für eine Wanddickmessung zwischen den Punkten A und B (b). Die Graphik (c) zeigt die Kantendetektion (x-Achse) anhand der Grauwertgradienten (y-Achse). Der Positionsunterschied zweier Kanten ist die gewünschte Wanddicke. Die Abmessungen dieses Objekts waren laut [22] 100 mm x 100 mm x 40 mm und die Messzeit samt Auswertung betrug 45 Minuten. Modernere Geräte sind noch schneller.

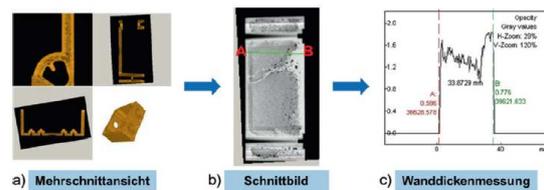


Abbildung 28: Messverfahren für die Bestimmung der Wanddicke eines Objektes aus Kunststoff [23].

Generell ist die Wanddickenmessung ein sehr gefragtes Feature der CT-Scanner und dafür existieren oft gute Analysemodule, die schon entweder integriert in mitgelieferter 3D-Analysesoftware oder als Stand-Alone-Software angeboten werden [23].

Ein Soll-Ist Modell, das durch die Untersuchung der Wanddicke bei einer Webenplatte entstanden ist, wird in der Abb. 29 angezeigt. Es ist in Form einer praktischen 3D-Mappe geplottet, wo die abgenutzten farbkodierten Bereiche klar erkennbar sind.

Ein allgemeiner Nachteil von der Computertomographie ist, dass die Benutzung dieser Geräte neben sehr ausgebildeten Operatoren auch selbstverständlich Strahlenschutzmaßnahmen verlangt.

Angenommen, dass man einen speziellen *mobilen* Röntgentomograph bauen oder kaufen könnte, müsste er die Radioisotope bzw. Gammaquellen wie z.B.  $^{60}\text{Co}$  benutzen. Es ist fragwürdig ob solche Quellen genug für die CT-Tomographie von Objekten dieser Größe sind (für CTPWT Verfahren aus nächstem Unterkapitel ist es bei weitem nicht genug). Außerdem sind solche Quellen für Menschen äußerst gefährlich und können nicht wie elektrische Strahlungsquellen einfach ausgeschaltet werden. Deswegen kann man schon annehmen, dass die Mobilität einer solchen Konstruktion auch durch den Stromanschluss

begrenzt sein wird. Der Computertomograph könnte dann in der Produktionshalle gebracht und um einen nicht demontierten Stator positioniert werden. Solches Gerät müsste auch in der Lage sein, um den Stator zu rotieren, sodass das 3D Bild erzeugt werden kann. Das Scannen vorne und hinten ist deswegen ausgeschlossen und wird höchstwahrscheinlich nie möglich sein. Folglich kann man eine Messung der Wandstärke ohne Demontage auch mit dieser Methode völlig ausschließen.

Im Fall eines ortsgebundenen Röntgentomographs kann, wie weiter oben erklärt, die Durchstrahllänge bei den dicken Bauteilen der Mühlen ein Problem sein. In der Abb. 30 sind zwei ortsgebundene Modelle sehr hoher Leistung (9 MW bei dem Modell links) für die Untersuchung großer und dichter Teile angezeigt. Diese Geräte sind viel teurer als beste 3D-Scanner. Angenommen, dass die Anfangswandstärke der Mühle im Millimeterbereich variiert, kann man Wandstärke mit CT direkt und vielleicht genauer messen, aber die Auflösung ist für große Objekte, wegen größeren Betriebsspannungen in der Regel deutlich niedriger (Millimeterbereich). Da für beide Methoden die Mühlen demontiert werden müssen, sind 3D-Scanner eine viel bessere Option.

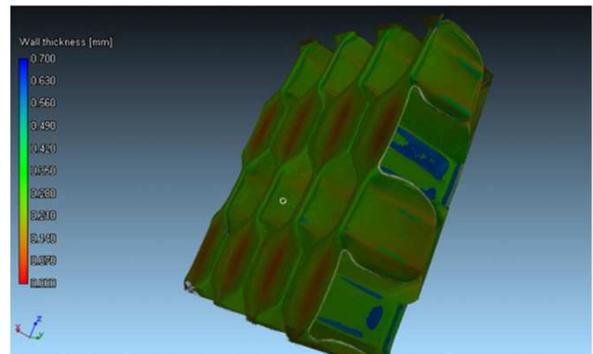


Abbildung 29: Eine farbkodierte 3D-Mappe der Wabenplatte-Wanddicke [23].



Abbildung 30: Computertomographen für größere Bauteile. Rechts: [49]. Links: [50].

Außerdem werden die potenziellen Kosten für so ein großer Computertomograph (s. Abb. 30) die Verluste, die jetzt durch die gelegentlichen Mühlenbrüche und anschließenden Produktionspausen oder vorzeitig ausgetauschten Bauteilen, wahrscheinlich bei weitem überschreiten.

### 2.14 Tangentiale Radiographie für Vollrath-Mühlen

Für die Untersuchung der zylindrischen Statoren von Vollrath Mühlen, ist noch eine einfachere und viel billigere Methode, die auch auf Röntgen- oder Gammastrahlen beruht, theoretisch einsetzbar.

Tangentiale Radiographie wird oft für Untersuchungen von Rohrleitungen benutzt. Dabei muss sie nicht demontiert werden. Eine Strahlungsquelle ist vor dem Rohr gestellt (Abb. 31) und eine Speicherfolie oder ein Röntgenfilm nehmen die durchgelassene Strahlung auf. Die Belichtungszeit ist für die Qualität der Aufnahme entscheidend. Äußere Bereiche dürfen nicht überbelichtet und innere Bereiche nicht unterbelichtet sein. Aus der Schattenaufnahme kann man die tangential bestrahlte Wanddicke bestimmen. Dafür sollten die Kanten erkannt werden, was eine große menschliche Fehlerquelle üblicherweise darstellt. Deswegen wird die Kantenerkennung heute fast immer der Software überlassen.

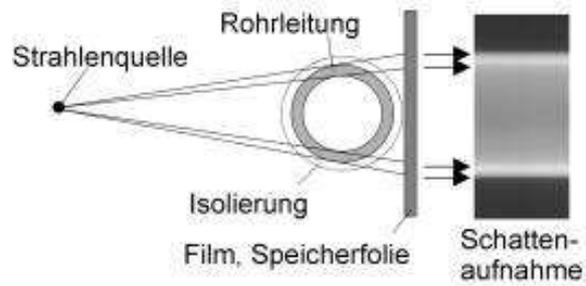


Abbildung 31: Messprinzip der tangentialen Radiographie [24].

Entlang tangentialer Richtung ist die Absorption der Strahlung am größten, da die durchgestrahlte Strecke maximal ist. Die Strecke hängt also nicht nur von der Wanddicke, sondern auch von dem Rohrdurchmesser ab. Die Frage ist, ob die benutzte Strahlung genug Energie besitzt. Wenn die Primärstrahlen bei einer Messung mit den Streustrahlen hinsichtlich der Intensität ähnlich sind, kann man kein nützliches Bild erzeugen. Eine Graphik mit den Grenzen der verschiedenen Strahlungsquellen bei verschiedenen Rohrabmessungen ist in der Abb. 32 dargestellt. Dort werden natürlich nicht alle modernen Strahlungsquellen angezeigt. Ein Betatron ist zwar nicht portabel, aber kann deutlich höhere Energien erreichen [25].

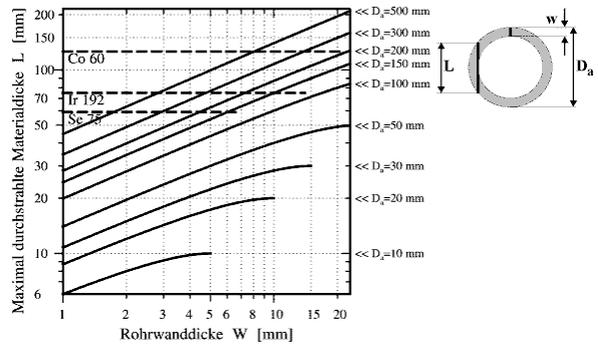


Abbildung 32: Eignung verschiedener Strahlungsquellen für tangentiale Radiographie im Abhängigkeit von der Rohrgeometrie [24] + Betatronlinie aus [25].

Das CTPWT-Verfahren (Computed Tomographic Pipe Wall Thickness (CT-PWT)), das für die Auswertung benutzt wird, beruht auf der Computer-Tomographie. Im Gegensatz dazu braucht man eigentlich nur eine digitalisierte Aufnahme des Gegenstandes, um die Wanddicke zu berechnen. Die gewünschte Stelle muss vor Bearbeitung mit einer Linie manuell markiert werden [24].

Problemlos kann man auch die gekrümmten Rohre auswerten. Das bedeutet, dass möglicherweise auch Fryma Mühle auf diese Weise untersucht werden können. Aus der Abb. 32 sieht man jedoch, dass für einen CoBall-Rotor (der größte Rotordurchmesser = 500 mm) und seine Wanddicke sehr starke Strahlungsquellen erforderlich wären. Wenn CoBall-Mühle demontiert ist, sieht das Schnittbild des Rotors nicht wie bei einem klassischen Rohr aus. Der Unterschied ist im inneren Bereich, der im Gegensatz zu den Rohren nicht leer ist. Man sieht u.a. auch die Wände des inneren Konus. Für eine Messung des äußeren Konus, wo Verschleiß am größten ist (s. Abb. 6), ist das irrelevant. Wenn man der innere Konus des Stators messen möchte, müssen die Strahlen no Das Schnittbild des Stators ähnelt auch einem Schnittbild eines doppelwandigen Rohrs. Wenn mit dieser

Methode der innere Konus eines Rotors oder ein Stator gemessen werden, ist die Graphik aus der Abb. 32 also nicht mehr relevant, weil eine noch höhere Energie benötigt wird, um die innere Wände genug belichten zu können. Das sollte theoretisch kein Problem sein, solange eine stärkere Strahlungsquelle zur Verfügung steht. In der Abb. 33 sieht man, wie theoretisch Rotor und Stator ohne Demontage mit dieser Methode untersucht werden können. Dann müssen Strahlen allerdings noch mehr Wände durchqueren, wodurch noch größere Energien verlangt werden.

Vollrath-Statoren haben im Gegensatz dazu kleinere Durchmesser und deswegen wäre ihre Wanddicke auf diese Weise etwa einfacher zu bestimmen. Diese Statoren sind auch wie CoBall-Statoren doppelwandig. Darauf ist also auch die Graphik aus der Abb. 32 nicht anwendbar, da größere Energien benötigt werden.

Selbst wenn die neuen Bauteilen wegen ihrer dicken Wänden mit dieser Methode nicht gemessen werden können, kann man damit die schwer abgenutzten Bauteile überprüfen.

Mit dieser Methode kann man im Gegensatz zu den oben beschriebenen Geräten nicht überall scannen, sondern nur in einer Richtung. Die Strahlungsschutzmaßnahmen müssen noch strenger als bei Computertomographen sein (Gammastrahlung bei tragbaren Geräten).

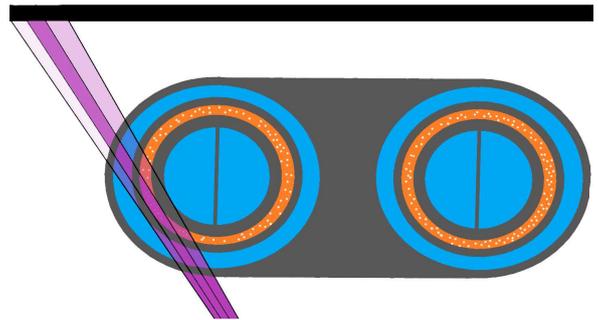


Abbildung 33: Eine Darstellung gleichzeitiger Bestrahlung einer nicht demontierten CoBall-Mühle. Grau: Stahl. Blau: Kühlwasser. Orange: Produkt. Weiß: Perlen. Violett: Strahlung. Schwarz: Röntgenfilm.

### 3 Vibrationsanalyse

Keine der bisher berücksichtigten Methoden lässt eine Messung von Wandstärken ohne vorherige Demontage des Stators zu (mit 3D-Scanner muss man den Rotor nicht unbedingt demontieren). Ohne Demontage kann man nur über die Wahrscheinlichkeiten für einen Wandbruch reden. Im Gegensatz zu dem, bereits regelmäßig durchgeführten, Auslitern und der, nicht schwer umzusetzenden, Methode der elektrischen Leistungsmessung ist ein relativ anspruchsvolles Verfahren im Rahmen dieser Arbeit vorgestellt und untersucht, die vielversprechende Vibrationsanalyse.

Sie ist die einzige Methode, die auch experimentell angewendet wurde. Die Ergebnisse (5) und die Ausrüstungsbeschreibung (4) werden in den nächsten Kapiteln behandelt. Hier wird die Methode theoretisch bearbeitet und die Gründe für ihre Auswahl erklärt.

Die Vibrationsanalyse ist die Hauptmethode der prädiktiven Instandhaltung (s. Kap. 1.1) bei rotierenden Maschinen. Damit werden oft Motoren, Turbinen, Pumpen, Kompressoren, Werkzeugmaschinen und auch Mühlen untersucht. Jede unvollkommene rotierende Maschine erzeugt, für diese Maschine spezifische, Vibrationen. Wenn größere Defekte anwesend sind oder im Laufe der Zeit entstehen, wird auch die Intensität der Vibrationen größer. Der größte Vorteil dieser Methode ist, dass nicht nur ein allgemeiner Zustand einer Maschine erfasst werden kann, sondern können verschiedene Defekte selbst identifiziert und genau gemessen werden.

Um die Vibrationsanalyse durchführen zu können, muss man erstens die Vibrationsdaten erfassen. Dabei misst man direkt entweder die Auslenkung des Objekts, oder eine ihrer Ableitungen (Geschwindigkeit oder Beschleunigung) über die Zeit, indem man in regelmäßigen Zeitintervallen die gewählte Größe abtastet. Danach folgt die (Fourier-)Analyse der Daten. Durch die Interpretation den so erhaltenen Informationen, wird die Identifikation und Quantifizierung von Problemen und Defekten ermöglicht.

#### 3.1 Physikalische Grundlagen der Vibrationen

Mechanische Vibrationen oder Schwingungen sind oszillierende Bewegungen um einen Gleichgewichtszustand. Sie müssen nicht periodisch sein.

Ein einfaches und für die spätere Diskussion relevantes Beispiel ist ein eindimensionales gedämpftes Schwingungssystem unter dem Einfluss einer harmonischen Anregungskraft, die z.B. durch die Unwucht eines Rotors entstanden werden könnte. In der Abb. [34] ist das System dargestellt. Eine, mit einer Feder befestigte, Masse wird durch eine externe Kraft bewegt. Ein angeschlossenes Dämpfungselement entschleunigt die Masse. Die differentielle Gleichung für die Bewegung eines solchen Systems aus der Abb. 34 ist:

$$m\ddot{x}(t) = F_0 \sin \omega_0 t - c\dot{x}(t) - kx(t),$$

wobei die linke Seite beschreibt die resultierende Kraft des Systems mit ihrer Masse  $m$

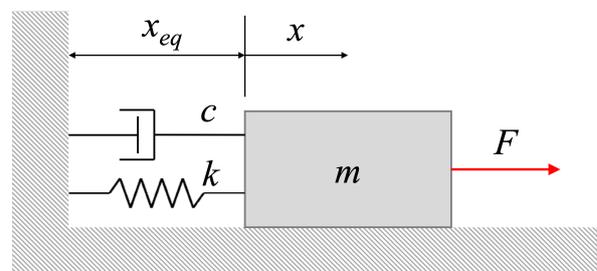


Abbildung 34: Ein eindimensionaler gedämpfter erzwungener Oszillator [23].

und ihrer zeitabhängigen Beschleunigung  $\ddot{x}(t)$ . Auf der rechten Seite ist die Summe aller wirkenden Teilkräfte, wobei  $F_0 \sin \omega_0 t$ , die harmonisch oszillierende Anregungskraft mit der Frequenz  $\omega_0$  ist,  $\dot{x}$  und  $x$  jeweils die zeitabhängige Geschwindigkeit und Position, und letztendlich  $k$  und  $c$  die Feder- und Dämpfungskonstanten, die jeweils die Steifigkeit der Feder und die Dämpfungsintensität des System beschreiben, sind.

Nach der anfänglichen Aufregung geht das System in einen stationären Zustand über:

$$x_{stat}(t) = A \sin(\omega_0 t + \phi),$$

wobei  $A$  die Amplitude und  $\phi$  die Phasenverschiebung ist. Man bekommt also eine, der Erregungskraft äquivalente, sinusförmige Bewegung.

*Die Frequenz* ist gleich der Anregungsfrequenz.

*Die Amplitude* gibt die maximale Auslenkung des schwingenden Systems an. Ihre Größe hängt in dem Fall von den Systemeigenschaften (Dämpfung und Eigenfrequenz  $\omega = \sqrt{k/m}$ ) und der Anregungskraft ab. Es gibt ein gefährliches Anregungsfrequenzintervall mit einer (maximalen) Resonanzfrequenz, wo die Amplituden des Systems je nach Dämpfungskonstante so groß sind, dass die Maschinen beschädigt werden können. Für die weitere Diskussion und die Anwendung dieser Methode ist das aber nicht relevant.

*Die Phasenverschiebung* ist eine konstante, immer negative Winkelverschiebung in der Intervall von 0 bis  $-\pi$  zwischen der Anregungskraft und der erzeugten stationären Schwingung und sie hängt nur von den Systemeigenschaften ab.

Vibrationen hängen also nicht nur von der Anregungskraft, sondern auch vom ganzen bewegenden System ab, das durch seine Masse  $m$ , Steifigkeit  $k$  und Dämpfung  $c$  völlig beschreibbar ist. Jedes komplizierte System (z.B. ein Elektromotor, eine Pumpe oder eine Mühle) hat auch genau dieselben Eigenschaften, die seine Systemreaktion auf eine externe oder interne Anregung bestimmen. Wenn ein Defekt detektierbar ist, sind die Vibrationen bereits groß genug im Vergleich zu den, durch die Systemeigenschaften definierten, Kräften, die der Vibrationsbewegung entgegenwirken.

## 3.2 Fourier-Analyse

Die Lösung der Differentialgleichung aus Kap. 3.1 ist eine einfache sinusförmige Funktion, die der sinusförmigen Anregungskraft entspricht. In Wirklichkeit sind die Kräfte, die auf einem System wirken, deutlich komplizierter, wie z.B. Rechteck-, Sägezahn-, Sinuspulse oder ganz willkürliche Funktionen. Dann sind auch die Lösungen entsprechend kompliziert oder sogar nicht periodisch.

Angenommen, dass das System jetzt durch mehrere sinusförmige Kräfte unterschiedlicher Frequenzen und Amplituden angeregt wurde, ist die dadurch entstandene Vibration eine Summe aller Teilvibrationen, die entstehen, wenn nur die, zu der Teilvibration entsprechende, Kraft auf das System wirken würde. Das folgt unmittelbar aus der Linearität der Differentialgleichung. Dabei müssen die Kräfte nicht sinusförmig sein, sondern können eine beliebige Form haben. Jede Kraft eines beliebigen Zeitverlaufs kann aber laut der Fourier-Theorie mithilfe einer Funktionenreihe aus Sinus- und Kosinusfunktionen beliebig genau approximiert werden. Jede sinusförmige Kraft ist die Ursache einer sinusförmigen Teilvibration. In einem komplizierten System, wo die gemessene Vibration zu groß ist, muss man, um die Defekte zu identifizieren, die Kräfte verstehen, die auf das System wirken. Dafür braucht man statt der gemessenen Gesamtvibration die darin bestehenden Teilvibrationen.

Mithilfe der komplexen Fourier-Analyse findet man die Teilvibrationen aus der gemessenen Daten. Genauer gesprochen werden die Daten dadurch vom Zeitbereich in den Frequenzbereich transformiert:

$$\hat{x}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-i\omega t} dt$$

oder in einem diskreten Fall (DFT), der für die Anwendungen, wo die Rohdaten abgetastet wurden, relevant ist:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{2\pi i}{N} kn}, \quad (k = 0, \dots, N-1),$$

wobei  $N$  die Anzahl der (Mess-)Punkte und  $x_n$  die (gemessene) Amplituden im Zeitbereich sind.

Daraus erhaltene komplexe Funktion gibt nicht nur die Amplituden über Frequenz an, sondern auch die relative Phasenverschiebung. Sie ist sehr wichtig für die Unterscheidung zwischen Defekten, die im Amplitudenspektrum ähnlich aussehen bzw. dieselbe Frequenz anregen.

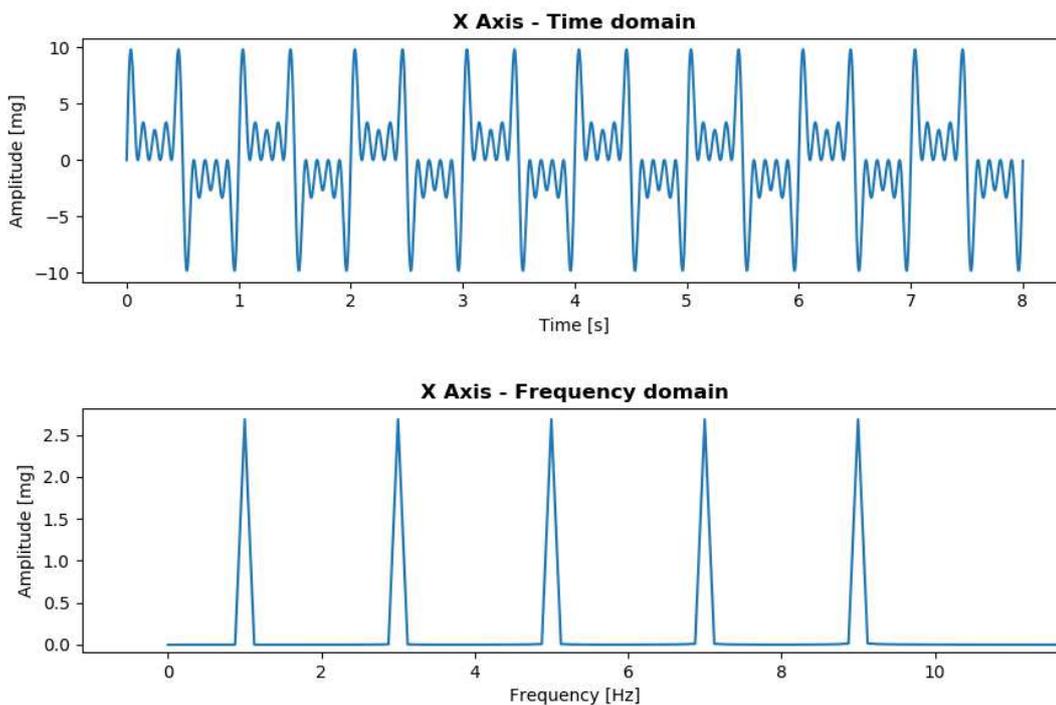


Abbildung 35: Eine rechnerisch erzeugte Vibrationswelle und ihr, mithilfe FFT-Algorithmus erhaltenes, Fourier-Spektrum.

In der Abb. 35 sieht man das Fourier Spektrum von der Funktion  $x(t) = \sin(\omega t) + \sin(3 \cdot \omega t) + \sin(5 \cdot \omega t) + \sin(7 \cdot \omega t) + \sin(9 \cdot \omega t)$ , wobei  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot 1 \text{ Hz}$  ist. Im Spektrum kann man alle beteiligten Frequenzen sehr gut erkennen. Die Amplituden sind in [mG] angegeben, wobei G die Erdbeschleunigung ist. Die Vibrationswelle ist hier rechnerisch erzeugt und mit einem, für die Zwecke dieser Arbeit, geschriebenen GUI-Programm verarbeitet. Dabei

wurde der FFT(Fast Fourier transform)-Algorithmus benutzt, das eine erheblich kleinere Berechnungszeit als die oben dargestellte DFT Berechnung aufweist ( $N \log N$  statt  $N^2$ , wobei N die Anzahl der Messpunkte ist).

Ein komplizierteres Beispiel wären die Rohdaten und FFT-Spektrum einer im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messung (Abb. 36). Auch hier sind die Amplituden der stärksten Frequenzen gut erkennbar. Allerdings ist auch ein gewisser Anteil von Rauschen vorhanden. Er stammt von den Sensoren, Digitalisierung, Umgebung usw.. Diese Spektren werden genauer im Kap. 5 behandelt.

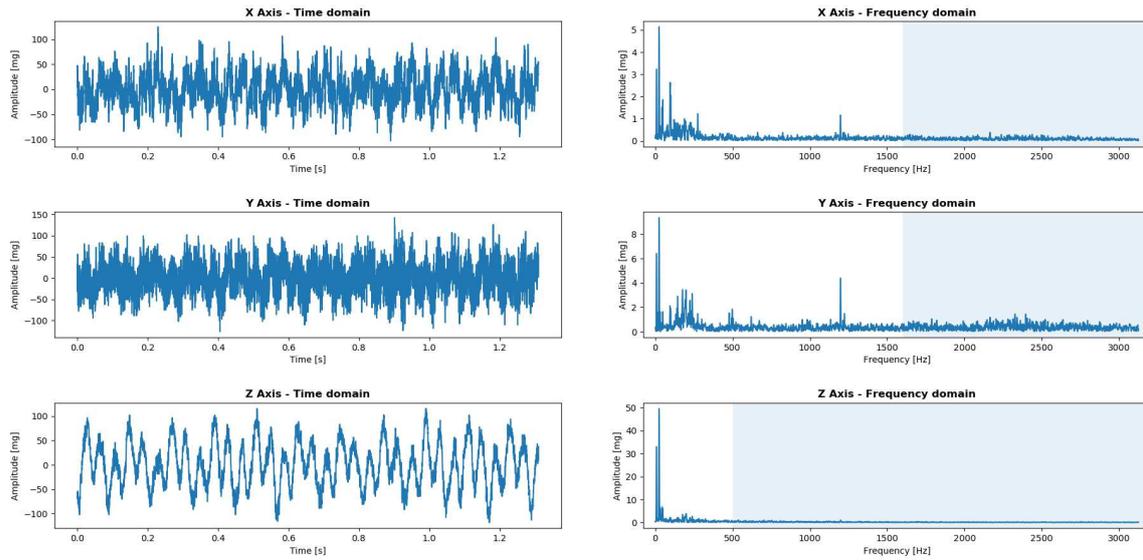


Abbildung 36: Die, im Rahmen dieser Arbeit gemessene Vibrationsdaten für eine Mühle und daraus berechnete FFT-Spektrum.

### 3.3 Defekte

Aus den Fourier-Spektren von realen rotierenden Maschinen kann man viele Defekte erkennen und quantifizieren:

- **Unwucht der Rotoren** ist eine der häufigsten Defekten und tritt auf, wenn die Masse uneben um die Rotationsachse verteilt ist. Sie erzeugt ein großer Peak bei der Umdrehungsfrequenz und wird genau wie die Zentrifugalkraft, die während der Rotation eines unsymmetrischen Rotors erzeugt wird, quadratisch mit der zunehmenden Rotationsgeschwindigkeit wachsen.
- **Falsche Ausrichtung von Wellen.** Wenn zwei Teilwellen entweder unter einem Winkel stehen, oder parallel, aber verschoben zueinander sind, spricht man von einem Ausrichtungsfehler. Im Spektrum können auch die Oberwellen der Umdrehungsfrequenz dominieren.
- **Exzentrizität.** Wenn ein Bauteil exzentrisch zu der Rotationsachse ist, kommt es auch zum Peak bei der Umdrehungsfrequenz. Die Amplitude hängt hier aber auch von der Last ab.

- **Lockerung.** Wenn z.B die Lager zu locker befestigt sind oder oder wenn zwischen Maschine und Fundamentplatte eine Lockerung besteht, kann man im Spektrum viele Oberwellen, aber auch Unterwellen sehen (z.B  $\frac{1}{2}$ ·Umdrehungsfrequenz).
- **Lagerdefekte.** Verschleißene Lager erzeugen je nach Grad der Abnutzung hohe Frequenzen, die keine Oberwellen der Umdrehungsfrequenz sind. Hier wird die Vibrationsanalyse häufig eingesetzt, um die Defekte früh genug zu erkennen und zu beobachten, bevor die Schaden kritisch sind.
- usw.

Normalerweise überprüft man die Maschinen auf diese Defekten erst dann, wenn die Vibrationen bemerkbar erhöht sind. Hier wird man die Maschinen untersuchen, die keine erheblichen Vibrationen und Defekten aufweisen, um zu versuchen, den aktuellen Verschleißzustand der Bauteile abzuschätzen.

### 3.4 Unwucht der Rotoren

Im Kap. 2.8 wurde über die Mahlräumvolumen- und damit auch die direkte Verschleißmessung diskutiert. Aus den Modellen, die dort hergeleitet wurden, sieht man, dass das Mahlräumvolumen bei gleichmäßiger Abnutzung bis mehr als 20 l wachsen kann (s. Abb. 16, 17 und 18). In der Praxis passiert das aber nie und der Grund ist die asymmetrische Abnutzung (relativ zur Drehachse) der Bauteile. Diese asymmetrische Abnutzung kann dann im Fall des Rotors durch Vibrationsanalyse betrachten werden.

Das erste Problem ist die Unterscheidung der Unwucht des Rotors von anderen Defekten, die auch einen Peak bei der Umdrehungsfrequenz erzeugen. Wie schon erwähnt, wächst die Amplitude nur bei diesem Defekt quadratisch mit der zunehmenden Rotationsgeschwindigkeit, wenn sie unter der ersten kritischen Geschwindigkeit ist (Resonanz). Die Umdrehungszahl bei den Mühlen ist aber konstant und hängt von der Netzfrequenz (50 Hz) ab. Man könnte einen VFD (Variable Frequency Drive) einbauen und damit die Abhängigkeit der ersten Peak von der Frequenz untersuchen. Das ist aber teuer und relativ unpraktisch. Die einfachere Methode ist die

Betrachtung des Phasenunterschieds in der radialen Ebene zwischen der horizontalen und vertikalen Vibration beim Peak der Umdrehungsfrequenz. Wenn der Phasenunterschied  $\frac{\pi}{2}$  bzw.  $90^\circ$  beträgt, ist der Defekt durch einen asymmetrischen Rotor entstanden. In der Praxis charakterisiert man oft  $90^\circ \pm 30^\circ$  als ein überwiegendes Unwuchtproblem [27] [28]. In der Abb. 37 ist eine Überprüfung auf Rotorunwucht mit einem einachsigen Sensor graphisch angezeigt. Da der Phasenunterschied in dem Fall  $85^\circ$  ist, ist die Rotorunwucht die überwiegende Vibrationsursache. Hier sind die quasi absoluten Phasenwerte bekannt ( $25^\circ$  und  $100^\circ$ ). Man braucht natürlich eine Referenz, zu der diese Werte gemessen werden.

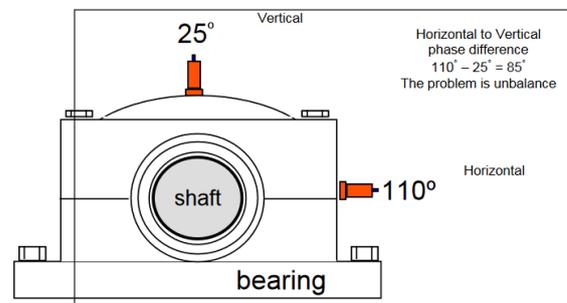


Abbildung 37: Messung des Phasenunterschieds zwischen der vertikalen und horizontalen Richtung in der Nähe vom Lager für die Unwucht-Diagnose [54].

Dafür benutzt man normalerweise die Umdrehungsperiode der rotierenden Maschine mit Hilfe z.B. eines Stroboskops. Wenn man beide Stellen (horizontal und vertikal) gleichzeitig (oder fast gleichzeitig) messen kann, braucht man keine äußere Referenz, da nur der Phasenunterschied von Bedeutung ist. Im Experimentalteil dieser Arbeit benutzt man diese Strategie.

Um diese Tatsache zu verdeutlichen, wird ein einfaches Modell der Rotorunwucht untersucht. In [29] wurde u.a. dieses Modell benutzt, um die für das Wuchten benötigten Massen zu berechnen.

In der Abb. 38 sieht man einen Scheibenrotor mit der Masse  $m$ , dessen Massenschwerpunkt wegen der zusätzlichen Masse  $m_s$  auf einer Seite des Rotors nicht auf der Rotationsachse liegt. Diese Masse erzeugt eine Zentrifugalkraft  $F_c = m_s \omega^2 (r + \sqrt{x^2 + y^2})$ , die von der Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  des Rotors und dem Abstand zwischen der Masse  $m_s$  und der Rotationsachse abhängt. Dabei sind  $x$  und  $y$  die momentanen, aufgrund der Vibrationen entstandenen, Auslenkungen entlang der X- und Y-Achse in radialer Ebene. Wenn die Steifigkeit und Dämpfung der Lager durch zwei Feder der Steifigkeit  $k_x$  und  $k_y$  und zwei Dämpfer mit den Dämpfungskoeffizienten  $b_x$  und  $b_y$  für jeweils eine Richtung der X-Y-Ebene approximiert werden, bekommt man zwei gekoppelte Differentialgleichungen zweiter Ordnung:

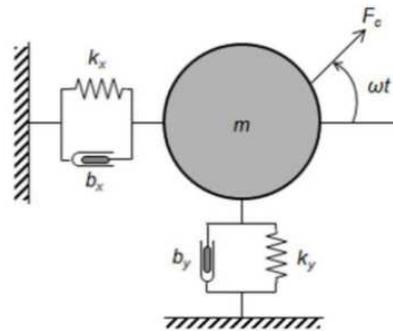


Abbildung 38: Modellierung der Unwucht einer Scheibe [29]

$$m\ddot{x}(t) + b_x\dot{x}(t) + k_x x = F_c \cos(\omega * t)$$

$$m\ddot{y}(t) + b_y\dot{y}(t) + k_y y = F_c \sin(\omega * t),$$

dabei ist die Kraft  $F_c$  trigonometrisch auf zwei Kräften entlang der X- und Y-Richtung zerlegt (Abb. 38).

Ein kleines Programm wurde geschrieben, um diese gekoppelten Gleichungen numerisch lösen zu können. Für die Masse der Scheibe wird die Abschätzung der Masse eines leeren Rotors von  $89\text{kg}$ , die im Kap. 2.8.1 berechnet wurde, benutzt. Feder- und Dämpfungskonstanten sind als konstant und gleich in X- und Y-Richtung  $k_x = k_y$ ,  $b_x = b_y$  angenommen. Die Werte  $k$  und  $b$  der Lager wurden grob mit  $100 \cdot 10^6 \text{ N/m}$  und  $0,005 \text{ Ns/m}$  abgeschätzt, aber sie verändern sowieso die Schlussfolgerung dieses Modells nicht (s.u.). Winkelgeschwindigkeit wird schrittweise innerhalb von  $0,1 \text{ s}$  bis zum maximalen Wert von  $8,3 \cdot 2\pi \text{ rad/s}$  erhöht, der gleich der Umdrehungsfrequenz von CoBall-Mühlen ist.

In der Abb. 39, links, ist die Bewegung des Rotors in der X-Y Ebene für die ersten 3 Sekunden dargestellt. Daneben sieht man die gesamte Auslenkung  $z = \sqrt{x^2 + y^2}$  des Rotors über die Zeit. Für dieses Unterkapitel ist aber die Abb. 40 relevant. Hier sind die Auslenkungen in X- und Y-Richtung über die Zeit geplottet. Rechts sind die sinusförmigen Peaks herangezoomt. Sie haben überall eine uniforme Phasenverschiebung, die ca.  $0,03 \text{ s}$  beträgt. Da die Umdrehungsfrequenz  $8,3 \text{ Hz}$  ist, ist eine Periode ca.  $0,12 \text{ s}$  lang. Das bedeutet, dass die Phasenverschiebung zwischen der radialen und tangentialen Richtung,

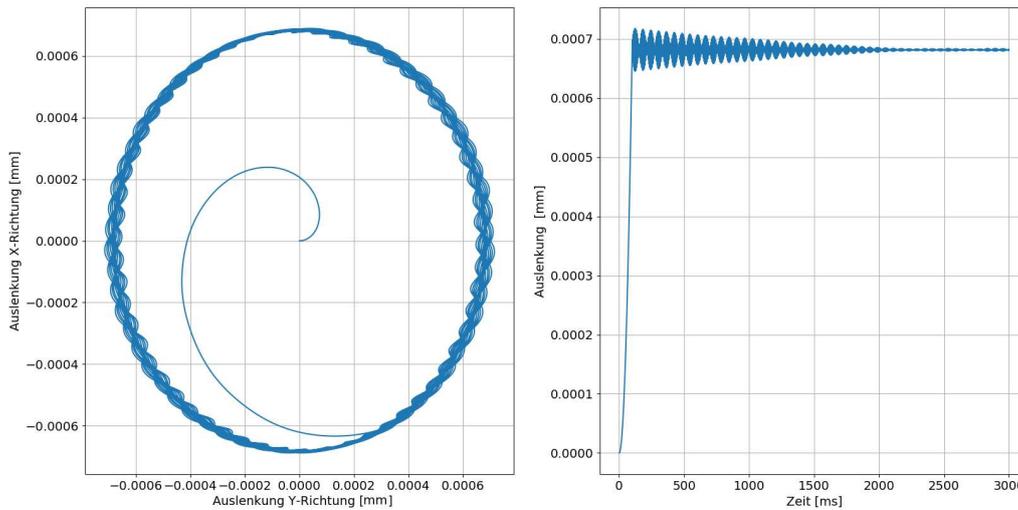


Abbildung 39: Links: die Bewegung des modellierten Rotors in der radialen X-Y-Ebene. Rechts: gesamte Auslenkung über die Zeit

wie oben schon behauptet,  $\frac{\pi}{2}$  bzw.  $90^\circ$  beträgt. In diesem Fall ist die durch die Vibrationen erzeugte Beschleunigungsamplitude ca. 80 mG groß, wobei [mG] Milli-Erdbeschleunigung ist.

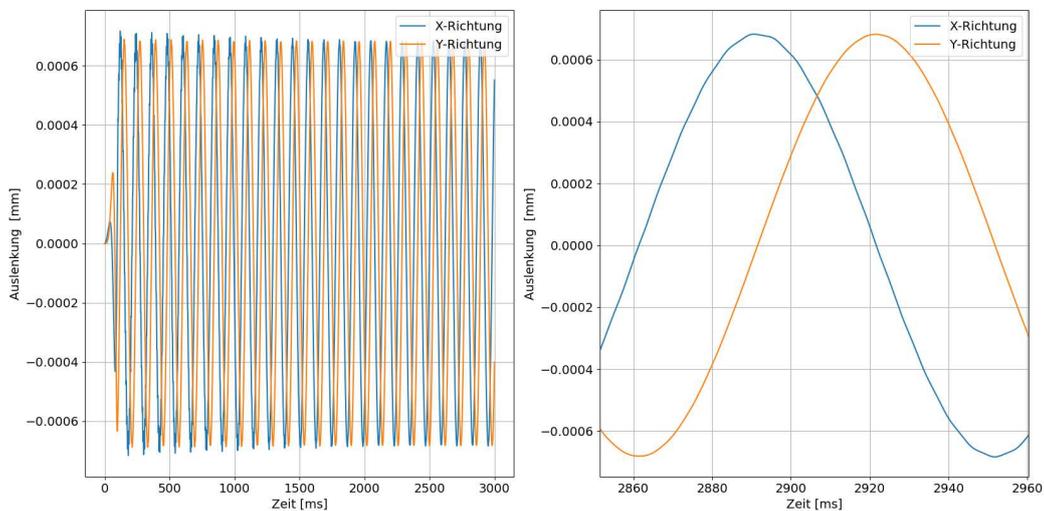


Abbildung 40: Die Bewegung des modellierten Rotors in der radialen X-Y-Richtungen über die Zeit. Rechts ist einen Peak herangezoomt.

Dieses einfache Modell beschreibt nur die sogenannte statische Unwucht, wo der Massenverlust entlang der Rotationsachse gleichmäßig ist und folglich die Rotation- und Massenachse parallel sind (s. Abb. 41) Die zweite Art ist die gekoppelte Unwucht. Sie passiert, wenn zwei gleiche Massen in zwei verschiedenen Ebenen um  $180^\circ$  voneinander stehen. Die Rotation- und Massenachse kreuzen sich. Beide reinen Unwuchtarten sind aber eher unwahrscheinlich bei einem Rotor zu treffen. In der Praxis passiert am häufigsten

eine Kombination davon, eine dynamische Unwucht. Die Achsen kreuzen sich nicht im Rotor, stehen aber auch nicht parallel zueinander.

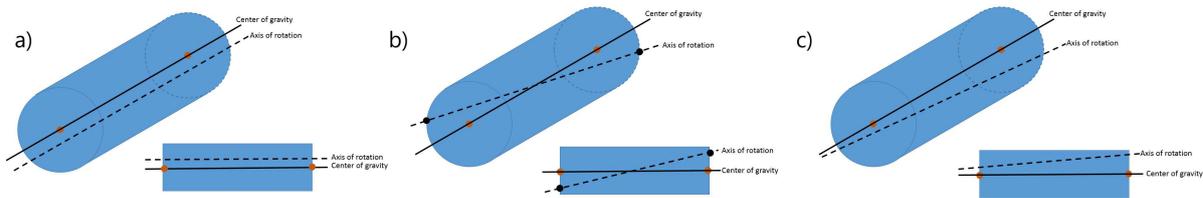


Abbildung 41: Drei Unwuchtarten: a) statisch b) gekoppelt und c) dynamisch [53].

Die verschiedenen Unwuchtarten kann man durch die Betrachtung der Vibrationen an zwei Lagern entlang der Welle unterscheiden. Die Amplituden bei Umdrehungsfrequenz sind für jede radiale Richtung (horizontal und vertikal) bei der statischen Unwucht zwischen verschiedenen Lagern in Phase. Dagegen sind bei der gekoppelten und dynamischen Unwucht die Amplituden der Umdrehungsfrequenz zwischen verschiedenen Lagern um  $180^\circ$  verschoben [51].

Die Mühlen sind aber eine spezielle Art der rotierenden Maschinen. Sie haben fliegend gelagerte Rotoren, die nicht zwischen zwei Lagern liegen, sondern hängen auf einer Seite über. Die axialen Vibrationen sind hier unabhängig von der Art der Unwucht anwesend [27]. Bei diesen Rotoren wird infolge der Unwucht der Phasenunterschied zwischen zwei Lagern in axialer Richtung zu  $0$  tendieren (bzw. in Phase sein) und in radialer Richtung instationär sein [27]. Andere allgemeine Eigenschaften der Unwucht sind aber gleich.

Für alle Unwucht- und Rotorarten gilt:

**Bei einem reinen Unwuchtproblem ist der Phasenunterschied zwischen Vibrationen bei der Umdrehungsfrequenz in einer radialen Ebene (bei einem Lager) gleich  $90^\circ$**

Bei den realen Rotoren ist für die Diagnose der Rotorunwucht eine Phasenverschiebung von ca.  $90^\circ \pm 30^\circ$  vorausgesetzt. Ein Beispiel experimenteller Untersuchung der Unwucht bei fliegend gelagerten Rotoren ist im [28] zu finden.

Diese Abschätzung der Abnutzung der Bauteile anhand der Unwucht kann nur bei einer um die Rotationsachse asymmetrischen Abnutzung funktionieren. Wenn z.B. zwei große abgenutzte Bereiche erzeugt wurden, die aber an gegenüberliegenden Seiten des Rotors liegen oder, wenn sich der Rotor symmetrisch abnutzt, wird diese Methode leider nichts bringen. Wie oft das passiert, kann nur durch genaue Verfolgung des Verschleißes im Laufe der Zeit und mithilfe einiger der oben beschriebenen Methoden (Kap. 2.12, 2.12.1 und 2.13) bestimmt werden.

### 3.5 Mühlen und Vibrationen

Die Mühlen sind leider keine im Sinne des vorigen Kapitels einfachen rotierenden Konstruktionen. Der Rotor bewegt sich nicht im Luft, sondern in einer Mischung vom Produkt und Mahlperlen.

Angenommen dass die Mühle leer ist, dann hängen die Vibrationen nur von der Welle und dem Rotor ab. Eine gleichmäßige, symmetrische Abnutzung des Rotors kann selbst keine Vibrationen erzeugen. Anderenfalls ist der vorige Kapitel relevant.

Wenn die Mühle jedoch mit den Perlen und dem Produkt ausgefüllt ist, ist

die allgemeine Situation komplizierter. Auf jeden Fall ist eine zusätzliche Dämpfung zu erwarten, weil jetzt statt Luft eine hochviskose Suspension anwesend ist. Diese Dämpfung sollte dann die Vibrationsamplituden verringern. Die Perlen sollen laut Kap. 1.2.2 beim adäquaten Betrieb die Wände sehr wenig stoßen und im symmetrischen Spiralbahnen um den Rotor reisen. Trotzdem ist aufgrund der Perlen ein gewisses Vibrationsrauschen zu erwarten. Eine interessante Frage wäre hier, ob eine relativ turbulenter Bewegung eines Produkt-Perlen-Gemisches mit der Vibrationsanalyse erkannt werden kann. Wenn das der Fall ist, kann der kritische Zeitpunkt, bei dem die Vermahlung wegen des wesentlich abgenutzten Mahlraums viel turbulenter wird, bestimmt werden. Die Mühlen mit einer solchen Vibrationssignatur sind die ersten Kandidaten für einen Wandbruch.

Falls sich die Mahlpaltbreite symmetrisch vergrößert, ändert sich, in erster Näherung und bei gleichen Pumpenleistung, nur der hydrostatische Druck in der Mühle und zwar überall. Dadurch kann keine resultierende Kraft entstehen. Die komplizierteren fluidmechanischen und Perlen-Effekte (s. Kap. 1.2.2) können die Vibrationssignatur ändern, insbesondere dann, wenn aufgrund einer großen Abnutzung der ordentliche Mahlprozess chaotischer wird. Gleichzeitig wird ein schlechteres Mahlergebnis bemerkt (s. Kap. 2.9).

Die Rotordynamik kann sich aber wegen der lokalen Druckunterschiede ändern. Wenn sich z.B. der Rotor symmetrisch abnutzt und im Stator ein asymmetrischer Bereich starker Abnutzung vorhanden ist, dann herrscht in diesem Bereich ein höherer Druck als im anderen Bereichen des Mahlpalts (Venturi-Effekt). Wenn also die Mahlpaltbreite in einem Bereich größer als im gegenüberliegenden Bereich (um 180° verschoben) ist, ergibt sich eine resultierende Kraft aufgrund des Druckunterschieds. Diese Kraft ist aber dann stationär und kann keine Vibrationen des Rotors erzeugen. Nur eine zusätzliche Belastung des Lagers kann daraus entstehen. Eine periodische Kraft kann in diesem Bereich z.B. aufgrund periodischer Variationen der Pumpenleistung generiert werden, was normalerweise nicht passiert.

Wenn die eventuelle Rotorasymmetrie nicht nur die Zentrifugalkraft wegen des Massenverlustes verursacht, sondern auch die Fluidmechanik in der Mühle merkbar ändert, und dadurch neue periodische Kräfte mit der Umdrehungsfrequenz erzeugt, lohnt es sich zu untersuchen, ob dann diese Kräfte Vibrationen generieren, die mit den Vibrationen der Zentrifugalkraft, von der Intensität her, vergleichbar sind. (5.2.9)

Es wäre auch interessant der Einfluss des Kühlwassers, das durch den Stator und Rotor ständig fließt, auf die Vibrationssignatur der Mühle zu untersuchen. Wenn sich das Wasser in dem Hohlraum des Rotors befindet, ist er natürlich schwerer, was schon die Amplitude bei der Umdrehungsfrequenz im Fall der Unwucht erheblich ändert. Laut dem Modell aus dem Kap. 2.8.1 ist die Masse des Wassers im Rotor ca. 17 kg. Wenn die Strömung aber laminar und stationär ist, sollte man außer der Massenveränderung keinen oder zumindest keinen nicht konstanten Einfluss auf die Vibrationen erwarten.

Die Pumpe hat ihre eigene Umdrehungszahl, die sichtbar im FFT-Spektrum sein wird. Eine schwankende Pumpenleistung muss auch das Spektrum wesentlich beeinflussen, da die Fluidmechanik in der Mühle stark davon abhängt.

Im Fall der Vollrath-Mühlen entsteht auch eine zusätzliche Dämpfung wegen des hochviskosen Produktes. Die Bewegung der Perlen und der Mühlen ist wesentlich chaotischer und man kann hier ein höheres Rauschen erwarten.

Auf jeden Fall müssen die Vibrationen von den Produkt- und Betriebsparametern abhängig sein und darauf muss besonders geachtet werden. Im Kap. 5 wird das genauer untersucht.

Ob kleine Einschüsse detektiert werden können ist fragwürdig. Beim im vorigen Kapitel entwickelten Modell erzeugt eine punktförmige Masse von 1 g, die am Rand einer 25 cm langen und 89 kg schweren Scheibe liegt, eine Beschleunigungsamplitude von 1 mG, was durch das Gerät schon, je nach dem Rauschen, detektiert werden kann. Der dreidimensionale, fliegend gelagerte Rotor komplizierter Geometrie und das ganze System, wo andere Defekten anwesend sein können (bei der Welle, Lager, Motor, Pumpe usw.), sind aber mit diesem vereinfachten Modell kaum vergleichbar.

## 4 Gerät und Messsoftware

Für die Vibrationsanalyse, die für den Experimentalteil ausgewählt wurde, brauchte man teure Ausrüstung. Diese professionellen All-in-one Geräte bieten auch viele fortgeschrittene aber unnötige Funktionen. Außerdem wurde für viele etwas billigere Modelle eine Frequenzuntergrenze ihrer relativ billigen Piezobeschleunigungssensoren von 10 Hz angegeben. Da, wie schon besprochen, Rotorgeschwindigkeit von der CoBall-Mühle ca 8 Hz beträgt, kamen auch diese Modelle überhaupt nicht in Frage.

Um die Kosten niedrig zu halten und alle spezifischen Bedürfnisse für diese spezielle Situation zu erfüllen, wurde (inspiriert durch [30], [31], [32]) ein Messsystem für die Vibrationsmessungen entwickelt.

Das Messsystem sollte in der Lage sein, Messungen aufzunehmen und zu speichern. Dazu wurde ein kleines Gerät gebastelt (s. Abb. 42). Weiters muss man die gespeicherten Daten verarbeiten, um die FFT-Spektren der Mühlen, anschauen und verstehen zu können. Alle Daten werden also nach der Messung mit dem Gerät mithilfe einer selbstgemachten PC-Software verarbeitet.

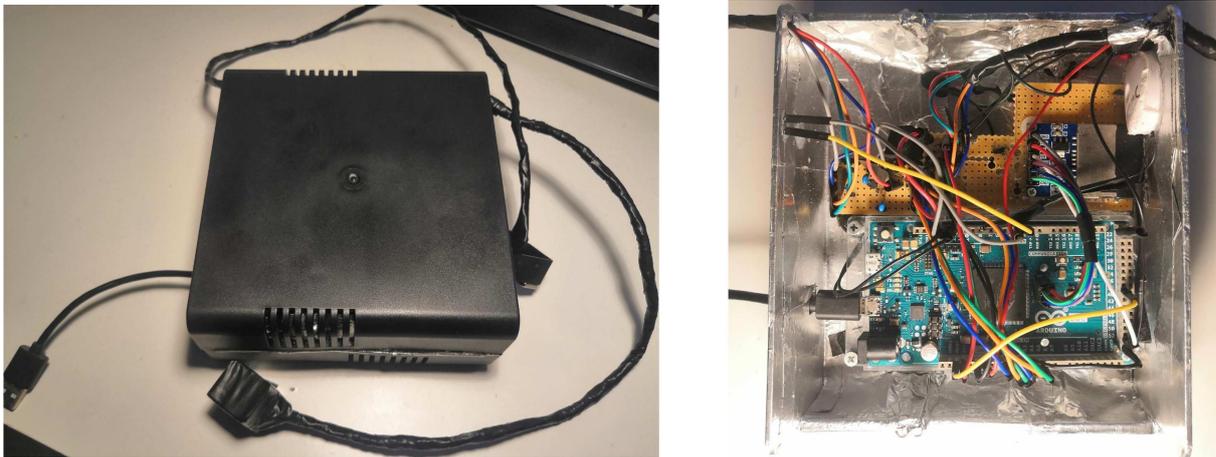


Abbildung 42: Das gebastelte Vibrationsmessgerät. Links: einsatzbereit. Rechts: geöffnet.

### 4.1 Konstruktion des Gerätes

Das Messgerät sollte vor allem mobil und kompakt sein, sodass man es einfach in die Produktionshalle mitbringen kann. Der Brandschutz war aber potenziell problematisch. In der Halle darf man ungeschützte elektronische Geräte wegen der Zündgefahr nicht benutzen. Vor Ort waren allerdings Explosimeter vorhanden, die man dann einfach mitbringen kann und dadurch auch ungeschützte elektronische Geräte benutzen darf. Solange das Explosimeter keine explosionsfähigen Gas-Luftgemische registriert, kann man messen.

Drei Hauptkomponenten des Geräts sind:

- Mikrocontroller (s. Abb. 43, links)
- Beschleunigungssensor(en) (s. Abb. 45)
- Speichermedium (s. Abb. 43, rechts)

### 4.1.1 Mikrocontroller

Für die Steuerung der Messung ist natürlich ein Mikroprozessor nötig. Als eine elegante, billige und einfache Lösung wurde den Arduino-Mikrocontroller gewählt. Dank einer großen Anzahl von Bibliotheken und fertigen Funktionen ist das Arduino-Board einfach in C bzw. C++ zu programmieren. Den Code wird schnell über die Arduino IDE (integrated development environment) hochgeladen und der Board kann man dann sofort einsetzen.

Aus der Vielzahl von möglichen Arduino-Boards wurde der Arduino-Due ausgewählt. Sein Atmel SAM3X8E 84Mhz CPU ermöglicht die Erfassung und Speicherung von Daten auf die SD-Karte mit einer maximalen Abtastfrequenz von 6,25 kHz, was kein anderes Arduino-Board kann. Laut des Nyquist-Theorems bedeutet das, dass damit die maximal messbare Frequenz 3,125 kHz beträgt, was für die relativ langsamen Mühlen mehr als genug ist. Außerdem hat der ADC (Analog-Digital Converter) vom Due die 12-Bit-Auflösung bzw.  $2^{12} = 4096$  Intervalle für die digitalisierten Spannungswerte, die über die analogen Eingänge ins ADC gelangen. Die Umwandlung ist damit also genauer als bei den üblicheren 10bit Arduino-Boards. Ein relativer Nachteil ist die Betriebsspannung des Boards. Die beträgt 3,3 V, statt üblichen 5 V und deswegen muss man aufpassen bei der Verbindung anderer Komponenten.

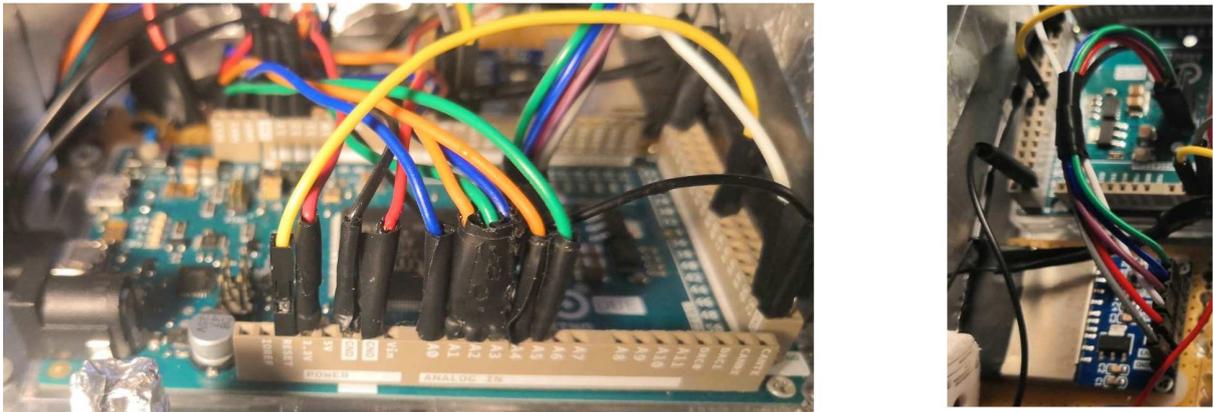


Abbildung 43: Links: Arduino Due. Rechts: SD-Modul

### 4.1.2 Beschleunigungssensor

Um die Vibrationen auffassen zu können, gibt es drei verschiedene Hauptarten von Sensoren, die unterschiedliche physikalische Einheiten messen:

- Weggebern. Diese Art von Sensoren misst den Abstand bzw. Verlagerung der Maschinen während der Vibration. Sie müssen relativ zur Maschine fixiert sein. Ein mögliches Messprinzip ist der reflektierende Laser. Im Fall einer bewegenden Konstruktion ändert sich dann sein Reflexionswinkel und dadurch misst man die Verlagerung. Ein anderes Prinzip ist die berührungslose Wirbelstrommessung. Der Wechselstrom wird in der Probe generiert. Dadurch entstehen dann auch die Wechselströme in der Oberfläche der Maschine. Folglich wird die gegenseitige Wechselwirkung von daraus resultierenden Magnetfeldern gemessen. Sie hängt direkt vom Abstand ab. Die Sensoren muss man also relativ zur Maschine fest montieren, was für die Zwecke dieses Projektes nicht geeignet war. Außerdem ist eine relativ ruhige Umgebung nötig, was auch hier nicht der Fall ist.

- Geschwindigkeitssensoren, die elektromagnetische Spulen und darin bewegliche Magnete benutzen, um den Strom zu generieren. Dieses Stromsignal ist der Vibrationsgeschwindigkeit des Objektes proportional. Die Geschwindigkeitssensoren sind teuer, brauchen keine externe Versorgung und finden Anwendung bei sehr großen Temperaturen. Sie sind nicht so verbreitet wie die nächste Sensorart.
- Beschleunigungssensoren, die meistens bei der Vibrationsmessung angewendet wurden, kann man wieder auf verschiedene Funktionsprinzipien unterteilen. Piezoelektrische Beschleunigungssensoren dominieren in der Industrie und besonders bei der Vibrationsmessung. Sie sind in der Lage sehr hohe Frequenzen zu messen. Das Funktionsprinzip ist der piezoelektrische Effekt bzw. eine Erzeugung der Spannung bei Umformung spezieller Kristalle (Blei-Zirkonat-Titanat (PZT)). Die Kristalle werden durch die Kraft der Vibrationen deformiert und erzeugen dabei ein elektrisches Signal, das proportional zu der durch Vibrationen induzierte Beschleunigung ist. Diese Sensoren, obwohl sehr verbreitet waren entweder zu teuer für das Projekt oder nicht für eine Messung von Frequenzen unter 10 Hz geeignet. Das Problem wird durch eine andere Technologie, sogenannte MEMS Sensoren (Microelectromechanical systems) gelöst, die obwohl etwa schlechter hinsichtlich der Sensitivität und des Signal-Rausch-Verhältnisses dagegen viel billiger und einfacher für den Einbau im System sind. Für die Untersuchungen von den Maschinen mit den niedrigeren Rotorgeschwindigkeiten (z.B CoBall-Mühle 8,3 Hz) sind die MEMS-Sensoren mehr als genug (s. Kap. 5.2).

### MEMS Beschleunigungssensoren

MEMS ist billig, klein, ideal für die Kleinleistungsanwendungen und für die Verbindung zum Arduino-Board.

Es ist sehr in der Auto- und Smartphone-Industrie verbreitet. Die Herstellung solcher Sensoren wird durch die Entwicklung der Halbleitertechnik und ihren Methoden ermöglicht.

Hier geht es um die kapazitiven MEMS-Beschleunigungssensoren, die die Beschleunigung durch die Änderung der inneren Kapazität aufgrund der Vibrationsbewegung von Sensorelementen auffassen (Abb. 44).

### ADXL335-Beschleunigungssensor

ADXL335 ist ein MEMS, das sehr klein, billig (auch im Vergleich mit den ähnlichen Modellen wie z.B. ADXL355 oder ADXL377) und verbreitet ist. Mehrere Stücke wurden erworben, um mit dem Sensor auch experimentieren zu können. Es ist dreiaxial, was bedeutet, dass die Beschleunigung in alle drei Achsen gleichzeitig gemessen werden kann. Die drei Achsen haben eine niedrige Cross-Axis-Empfindlichkeit ( $\pm 1\%$ ), aber sie sind nicht physikalisch gleich, da der Sensor nicht würfelförmig, sondern in Form eines Quaders mit einer kürzeren Kante Z (s. Abb. 45, links) ist. Die Z-Achse hat also etwa schlechtere Spezifikationen als X- und Y-Achse: die Bandbreite bzw. maximale Frequenz, bei der der Sensor zuverlässig ist, beträgt 550 Hz für Z-Achse und 1600 Hz für X- und Y-Achse. Die Rauschdichte, beschreibt das elektronische Gaußsche-Rauschen, das über alle Frequenzen gleich ist. Sie beträgt bei der Z-Achse  $300 \frac{\mu g}{\text{Hz}}$  rms und bei der X- und Y-Achse  $150 \frac{\mu g}{\text{Hz}}$  rms. Das Rauschen hängt von der Wurzel der Bandbreite ab und ist durch den Tiefpassfilter mittels Kondensatoren relativ leicht einstellbar. FFT-Mittelung löst auch das Problem des elektrischen Rauschens sehr gut (s. Kap. 4.3). Der Messbereich ist  $\pm 3$  G, wobei  $G = 9,81 \text{ m/s}^2$  (die Erdbeschleunigung) ist. Das wurde als genug für die Vibrationsmessungen bei diesem Projekt abgeschätzt, da die vibrierenden Maschinen sehr

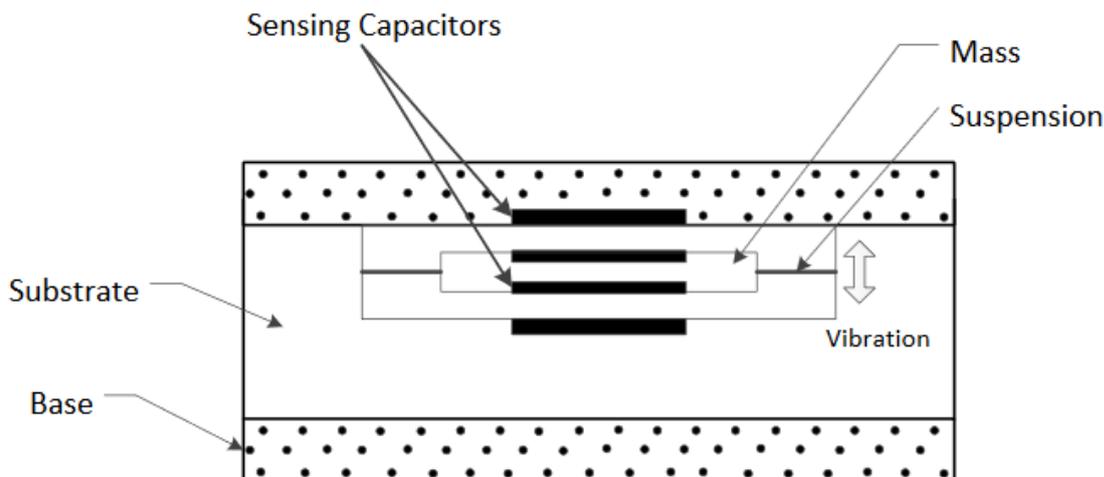


Abbildung 44: Eine Skizze des Funktionsprinzips von kapazitiven MEMS-Beschleunigungssensoren. Die Vibration bewegt der Sensorelemente und ändert dabei die gegenseitige Kapazität.[33]

selten die 1 G übersteigen. Im Kap. 5.2 sieht man, dass diese Annahme richtig war. Die Spannungsversorgung darf maximal 3,6 V sein, was für den Arduino-Due kein Problem ist. Man braucht keinen Spannungsregler.

Wie schon oben erwähnt, muss man die Bandbreite mit Kondensatoren einstellen. Der Sensor hat einen eingebauten Widerstand von  $32 \text{ k}\Omega \pm 15 \%$ , der zusammen mit den auf den Pins aufgetragenen Kondensatoren einen Tiefpass bildet und die Frequenzen höher als  $f = \frac{5mF}{C_{(X,Y,Z)}}$  unterdrückt [34]. Man muss Kondensatoren immer einbauen, sodass das Aliasing eliminiert werden kann. Das Aliasing ist das Phänomen, wo die Frequenzen, die größer als die halbe Abtastfrequenz bzw. maximale messbare Frequenz sind, einen Einfluss auf das Signal haben. Wenn diese Frequenzen nicht durch den Tiefpass unterdrückt werden, erzeugen sie falsche Peaks im Spektrum.

Der erworbene Sensormodul hatte schon für je 3 Achsen auf der Platine integrierte Kondensatoren von  $0,1 \mu\text{F}$ , die die Frequenz laut der obigen Formel auf 50 Hz begrenzen. Noch einen Kondensator war auf die Versorgung angekoppelt, so dass Versorgungsrauschen minimalisiert werden kann. Ein Spannungsregler von 5 V auf 3,3 V war auch dabei, da diese Sensormodule oft mit dem Arduino Uno benutzt werden, der auf 5 V arbeitet. Alles außer des Versorgungskondensators wurde entfernt und stattdessen wurden Kondensatoren einer minimalen Größe für je Achse verlötet. Z-Achse: 10 nF bzw. Begrenzung auf 500 Hz. X und Y-Achse: 3,3 nF bzw. Begrenzung auf 1,6 kHz. Später wurde einen zweiten Sensor installiert, für den die 100nF großen Kondensatoren eingebaut wurden. Man kann also bei ihm ein niedrigeres elektrisches Rauschen erwarten.

Man schloss GND (Masse) und VCC (3,3V) von Sensormodul direkt an dem Arduino-Board an. Danach wurden andere drei Drähte, die je ein Analogsignal tragen, an einer Platine verlötet. Dort baute man gewünschte Kondensatoren ein, indem eine Seite des Kondensators mit der Masse (GND) und die Andere mit dem Draht verbunden wurde. Daraus wurde das Signal direkt in die analogen Pins geleitet. X (blau) in A3, Y (orange) in A1 und Z (grün) in A2 (Abb. 43, links).

Der zweite Sensor wird analog angeschlossen. Hier gehen die Drähte in die folgenden Pins: X (blau) in A0, Y (orange) in A4 und Z (grün) in A5 (Abb. 43, links).

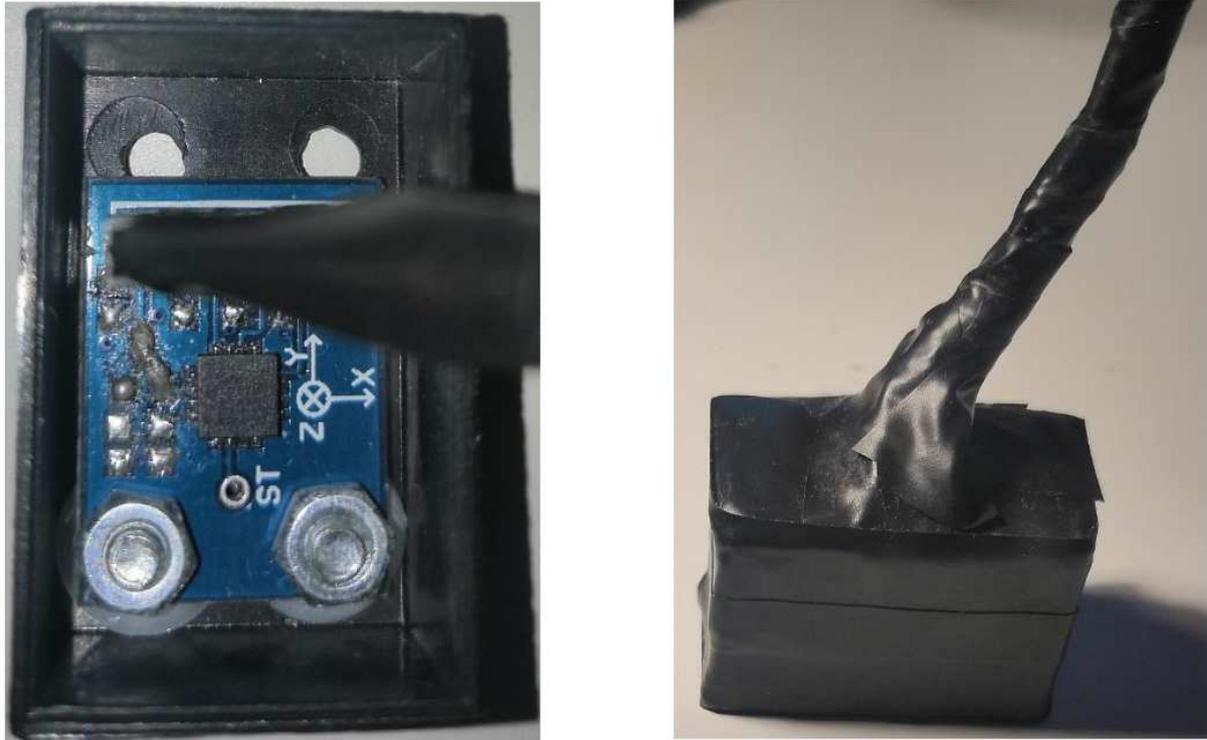


Abbildung 45: Links: das modifizierte ADXL-335 Sensormodul im Gehäuse. Rechts: das elektrostatisch und akustisch isolierte Gehäuse mit dem Sensor Modul drinnen

### 4.1.3 Speichermedium

Ein Arduino-Board hat keine Speichermöglichkeiten außer des Flash-Speichers (512 KB), der für das Programm da ist. Die durch den Sensor aufgenommenen Daten müssen aber irgendwo gespeichert werden. Dafür ist eine SD-Karte vorgesehen, die über SPI (Serial Peripheral Interface) mit dem Arduino-Board verbunden ist (s. Abb. 43, rechts).

Eine SD (Secure Digital)-Karte darf nicht direkt mit 5 V betrieben werden, sondern mit maximal 3,6 V, was gut zu dem Arduino-Due passt. Die Karte war zuerst direkt auf den Arduino verlötet, um die maximale mögliche Schreibgeschwindigkeit zu gewährleisten. Das hat sich später als unnötig erwiesen, da die SD-Module, samt gesamter Elektronik für Abwärtstransformation (5 V auf 3,3 V), die Schreibgeschwindigkeit nicht beeinflusst haben. Das SD-Modul wird dann behalten, da es viel praktischer war, mit der ganzen SD-Hülle zu operieren, statt nur mit der kleinen Micro-SD-Karte.

Man benutzt die SdFat-Bibliothek, um auf der SD-Karte zu schreiben und generell damit umzugehen. Das Arduino-Board benutzt SPI für Kommunikation mit der Karte. Moderne SD-Karten kommunizieren normalerweise durch den 4-Bit SDIO-Bus mit Geräten. SPI Schreibleistung ist daher problematisch und sie hängt sehr vom Hersteller ab. Einige SD-Karten funktionieren besser mit der SdFat als der Andere. Die Schreiblatenz ist ein regelloser Effekt, der bis zu ein paar hundert Mikrosekunden dauern kann. Während dieser Zeit werden interne Prozesse der Karte erledigt. Die Schreiblatenz hängt von vielen unbekanntenen Faktoren und, da die SD-Karte kein offenes Format ist, kann man nichts machen, um die Karte zu beschleunigen. Für größere Datenmengen, die schnell aber nicht in ordentlichen Intervallen abgespeichert werden müssen, ist die Schreiblatenz kein Problem. In diesem Fall darf man aber überhaupt nicht warten, da die Messungen je ein paar hundert Mikrosekunden (z.B. 3 Werte je  $160 \mu\text{s}$ ) aufgenommen werden müs-

sen, um das FFT-Spektrum daraus berechnen zu können. Deswegen müssen die speziellen Algorithmen benutzt werden, die sich glücklicherweise schon in den Beispielen der SdFat-Bibliothek befinden. Man speichert mehrere Buffers (12 in dem Fall von Arduino Due) von je 512 Bytes in SRAM (static random access memory) von Arduino und wartet bis die SD-Karte, die durch die Schreiblatenz beeinflusst wurde, wieder schreibbar ist.

Mit einigen Karten könnte man eine gute Abtastrate nicht erreichen. Sogar funktionieren einige sehr gute SD-Karten mit größeren Speicherkapazitäten bzw. z.B. einige SDHC-Karten nicht ideal, obwohl die SdFat das FAT32-Format auch unterstützt.

Die Grenze von 160  $\mu\text{s}$  ist mit 2 GB SD-Karte, die richtig (FAT16) formatiert werden muss (s. Kap. 4), erreicht.

Das SD-Modul hat folgende Pins für die SPI-Kommunikation, die man an das Board anschließen muss:

- SCLK (Serial Clock): Für das Synchronisieren zwischen der SD-Karte und dem Arduino-Board
- MOSI (Master Out Slave In): Datenstrom vom Arduino-Board zur SD-Karte
- MISO (Master In Slave Out): Datenstrom von der SD-Karte zum Arduino-Board
- CS (Chip Select): Identifikation von Slave (in diesem Fall, die SD Karte)
- GND: Masseanschluss
- VCC: Versorgung

Auf dem Arduino-Due-Board sind sechs SPI-Pins gruppiert auf der rechten Seite (s. Abb. 43, rechts). Man schließt alle Drähte außer CS-Pin an diese Stelle an. CS-Pin verbindet man mit pin52 auf dem Board.

#### 4.1.4 Gehäuse, Verbindungen und Abschlussarbeiten

Das Arduino-Board und SD-Modul sind in einem Plastikgehäuse gesetzt (s. Abb. 42, rechts). Die Platine, wo sich die Tiefpasskondensatoren befinden, ist auch dabei.

Ein Ton- und Lichtsignalssystem wurde ebenfalls eingebaut, um den Messprozess leichter folgen zu können. Ein Loch wurde seitens gebohrt und drinnen wurde eine rote LED-Diode befestigt. Sie wurde durch den LED\_BUILTIN Pin (pin13) und einen 220  $\Omega$  Widerstand an das Arduino-Board angeschlossen. Ein Piezo-Summer ist an der Masse und pin8 des Arduino-Boards verbunden. Das Arduino-Board erzeugt Wechselstrom mittels Software an diesem Pin (s. Kap. 4.2) und dadurch entsteht einen Ton einer steuerbaren Frequenz und Dauer.

Das Gehäuse wird mit Aluklebeband und Folie grob elektrostatisch isoliert und durch die Masse geerdet.

Für die Sensorkabel werden auch zwei Löcher gebohrt. Erster Sensor wurde in einem kleinen Minigehäuse gelegt, das mittels vier Schrauben mit zwei starken Magnetplättchen verbunden ist. Das Innere wurde mit Schaumstoff und Bitumen gegen Schall isoliert, so dass die durch die Luft übertragenden störenden Vibrationen minimalisiert werden können. Folglich ist das ganze Sensorgehäuse und sein Kabel mit Alufolie abgeschirmt und mit dem Hauptgehäuse verbunden. Am Ende ist das Sensorgehäuse und Kabel mit Isolierklebeband geschützt (s. Abb. 45, rechts).

Das zweite Sensorgehäuse wurde nicht so gut geschützt wie das Erste. Es dient aber nur für die eventuelle Bestimmung des Phasenunterschieds zwischen gleichen Richtungen verschiedener Lager in der Zukunft. Dafür sind sie Umgebungsstörungen nicht so relevant.

Noch ein Loch wurde für ein USB-Kabel gebohrt. Damit versorgt man das Gerät mithilfe einer mobilen Powerbank und verbindet es, bei Bedarf, mit dem PC, um ein modifiziertes Programm hochzuladen.

Einen Button und einen Schalter werden auch eingebaut. Ihre Kombinationen steuern das Gerät. Mehr dazu im nächsten Unterkapitel.

## 4.2 Die Software des Gerätes

Das Programm für den Arduino ist eine modifizierte Version von **LowLatency-Logger.ino**. Das ist ein C++-Beispielprogramm der SdFat-Bibliothek. Hier werden nur die wichtigen Modifikationen erklärt und die relevanten Informationen über die Benutzung des Gerätes angegeben.

### 4.2.1 Einstellungen

Die Einstellungen sind am Anfang der Datei zu finden und hier in Deutsch zusätzlich auskommentiert:

---

```
1 #define ABORT_ON_OVERRUN 1 //Abbrechen nach dem Overrun
2 uint32_t LOG_INTERVAL_USEC = 160; //Abtastrate in Mikrosekunden
3 uint32_t LOG_DURATION_USEC =8192000; //Dauer einer Messung in Nanosekunden
4 const uint32_t AVERAGING_NUMBER = 16; //Anzahl der Messung pro Messvorgang
5 const uint32_t timer = 1000; // Wartezeit vor ersten Messung in Millisekunden
6 const uint8_t SD_CS_PIN = 52; // PIN, an dem die SD-Karte angeschlossen ist
7 const uint8_t formatPin=2; //PIN des Formatbuttons
8 const uint8_t sensor_switchPin=22; //PIN des Schalters
9 const uint8_t resetPin=38; //PIN dessen Zustand Neustart des Gerts verursacht
10 const uint8_t groundPin0=12; // Masseanschluss fr die LED-Diode
11 const uint8_t groundPin1=3; // Masseanschluss fr den Formatbutton
12 #ifdef ERROR_LED_PIN
13 #undef ERROR_LED_PIN
14 #endif // ERROR_LED_PIN
15 const int8_t ERROR_LED_PIN = 13; // PIN der internen LED Diode, der auch die
    externe rote Diode kontrolliert
16 ...
17 #ifndef FILE_BASE_NAME
18 #define FILE_BASE_NAME "data" //der Grundname der Dateien
19 #endif // FILE_BASE_NAME
20 ...
21 uint32_t noteDuration=100; // die Dauer des Tons
22 uint32_t noteFrequency= 3154; // die Frequenz des Tons
23 uint8_t buzzer = 8; // PIN, an dem der Buzzer angeschlossen ist
24 ...
```

---

Die Messeinstellungen kann man leicht ändern und danach das modifizierte Programm auf das Gerät hochladen. Die PIN-Einstellungen sollen selbstverständlich ohne Modifikation

der Hardware nicht geändert werden.

Für die Vorgabeeinstellungen (Abtastrate=  $160\mu\text{s}$ , 16 Messungen pro Messvorgang, je ca. 8 s lang) beträgt die Datei-Größe ca. 19 MB, was für ca. 100 Messvorgänge reicht. Die obere Grenze, die durch die Architektur des FAT16-Formats bestimmt wird, ist 512 Verzeichnisse bzw. Dateien in root-Verzeichnis der SD-Karte. Da man 16 Einzelmessungen pro Messvorgang aufnimmt, muss das Gerät immer ein neues Verzeichnis erstellen und die aktuellen Einzelmessungen drinnen speichern. Diese Funktionalität wurde auch eingebaut.

### 4.2.2 Einschaltung

Man verbindet zuerst das Gerät mit einer Powerbank. Ein eingeschalteter Arduino führt den Code, der im **loop**-Funktion geschrieben ist, ständig aus. Der Code in **setup**-Funktion wird im Gegensatz dazu nur einmal aufgerufen. Im Fall des originalen Codes musste man der Arduino mit dem PC verbinden und bestimmte Befehle über den Serial Monitor eingeben, um die Messung zu starten. Da für dieses Gerät keine Eingabe- und Ausgabemöglichkeiten (außer eines Buttons und Schalters) eingebaut wurden, muss es nach dem Einschalten in der Lage sein, nur mit einem Knopfdruck vollständig zu messen. **Serial**-Funktionen wurden deswegen entfernt.

Nach dem Einschalten des Gerätes werden alle benutzten PINs mit **pinMode** und **digitalWrite** initialisiert. Für **formatPin** und **sensor\_switchPin** benutzt die **digitalWrite**-Funktion den Pull-Up-Widerstand, um eine wohldefinierte Spannung zu gewährleisten. Die rote LED leuchtet und das Gerät befindet sich in einer **while**-Schleife, die durch das Drücken auf den Formatbutton abgebrochen wird. Folglich hört man einen Signalton(**start\_signal**) und die Messung läuft.

### 4.2.3 Formatieren

Nach einer abgebrochenen oder fehlerhaften Messung funktioniert das Gerät wegen der SD-Karte manchmal nicht mehr. Deswegen wurde direkt in dem Code eine Formatoption eingebaut, sodass man gleich vor Ort potentielle Probleme durch das Formatieren beheben kann. Der Code wurde aus der Datei **SDFormatter.ino** derselben Bibliothek übernommen und minimal modifiziert, sodass es automatisch funktioniert.

Wenn es dazu kommt, formatieren zu müssen, wird aber die Benutzung vom **SDFormatter** (SD Association) empfohlen, den dieses Arduino-Format-Programm nur emuliert. Die Benutzung von der eingebauten Formatfunktion könnte im Vergleich zur offiziellen Software die SD-Karte verlangsamen bzw. Latenzzeit für das Schreiben vergrößern und sogar ihre Lebensdauer verkürzen.

Wenn, während des Abspielens des Startsignals der Formatbutton gedrückt ist und der Schalter auf HIGH gesetzt ist, gelingt das Gerät im Formatmodus und ein Warnungston (**format\_signal**) wird abgespielt.

Wenn man während des Abspielens vom Warnungston den Schalter auf LOW setzt, wird die SD-Karte irreversibel formatiert. Sonst kann man nach 5 s wieder den Formatbutton drücken, um aus der Warnungsschleife rauszukommen und das Gerät neu zu starten.

#### 4.2.4 Sensorauswahl

Man kann während des Abspielens des Startsignals wählen, mit welchem Sensor gemessen werden soll (Hauptsensor, Nebensensor oder Beide), indem man die richtige Kombination vom Schalter und Button drückt, was in **setup(void)**-Funktion definiert ist. Die aktuelle Lage des Schalters (HIGH oder LOW) während des Startsignals des Gerätes bestimmt welcher Sensor benutzt wird (Hauptsensor oder Nebensensor), indem die bool-Variable **bool\_highcap** entsprechend geändert und weiter benutzt wird.

Falls man während des Startsignals den Formatbutton drückt und der Schalter auf LOW ist, wird die bool-Variable **bool\_both** auf *true* gesetzt und beide Sensoren werden gleichzeitig mit der Abtastrate  $250\ \mu\text{s}$  benutzt. Jeder Modus hat ein eigener Signalton (**lowcap\_signal**, **highcap\_signal** **both\_signal**).

Am Anfang jedes Messvorgangs wird die Funktion **start** aufgerufen. In **start** stellt man die analoge Auflösung auf 12bit mit **analogReadResolution(12)** ein. Danach werden alle drei Kanäle initialisiert (**uint16\_t l1=analogRead(1)** usw.) und die SD-Karte überprüft und initialisiert. Schließlich wird ein neues Verzeichnis für das Speichern aktuellsten Dateien erstellt, indem man jedes mal ein neuer (nächster) 3 stelliger Integer-Wert für den Name des Verzeichnisses nimmt.

#### 4.2.5 Messung

In der **loop(void)** geschieht die tatsächliche Messung. Mit dem Drücken auf den Formatbutton kann man jederzeit (außer wenn der Messprozess aktiv ist) die **reset**-Funktion aufrufen. Damit wird die Messung abgebrochen und das Gerät neu gestartet.

Die Hauptfunktion der Vibrationsaufnahme ist **logData**, die aus drei Funktionen besteht: **createBinFile**, **recordBinFile** und **renameBinFile**.

**createBinFile** generiert eine temporäre TMP-Datei und **renameBinFile** benennt die Datei nach der Messung ordnungsgemäß um.

**recordBinFile** ist die Funktion, die tatsächliche Messung durchführt. Sie ruft je  $160\ \mu\text{s}$  je nach dem ausgewählten Sensor die Modifikationen der alten Funktion **acquireData**: **acquireData\_highcap** oder **acquireData\_lowcap** auf. Die Funktionen befinden sich in einer separaten Datei **UserFuncitons.cpp** und nehmen die Sensorwerte auf, die dann weiter in **recordBinFile** mit einem Algorithmus, der die Schreiblatenz bekämpft (s.o.), auf die SD-Karte gespeichert werden.

Das Originalprogramm nimmt die Dateien im BIN-Format (binär) auf, da damit das Speichern schneller abläuft, und wandelt sie danach in CSV-Format um. Zusätzlich wird hier aus speichersparenden Gründen das automatische Löschen von BIN-Dateien mit der Funktion **remove\_binFiles** eingebaut. Man findet also nur CSV-Dateien auf der SD-Karte.

Wenn man mit beiden Sensoren misst bzw. **bool\_both** eingeschaltet wird (s.o.), wird in der dazu verbundenen Teilschleife die Funktion **logData\_2x** bzw. **recordBinFile\_2x** aufgerufen und folglich mit beiden Sensoren mit einer Abtastrate von  $250\ \mu\text{s}$  gemessen. Die Daten werden dann auf Overruns überprüft und, wenn alles in Ordnung ist, mit **binaryToCsv\_2x** in CSV Datei umgewandelt. Die ursprünglichen BIN-Datei wird mit **remove\_binFiles** gelöscht. Am Ende wird ein LED- und Tonsignal ausgelöst. Dieser Prozess wiederholt sich 16 mal (Vorgabewert).

Am Ende des Messvorgangs hört man ein längeres Tonsignal und die LED leuchtet ständig. Dann kann man wieder den Formatbutton drücken und eine neue Messung

mithilfe der `reset`-Funktion starten.

Um das Tonsignal zu ermöglichen addiert man in der Funktion `fatalBlink`, die beim Auftreten eines Fehlers aufgerufen wird, die Tonfunktionen (`tone(...)`, `notone(...)`) dazu [52].

Außer `LowLatencyLogger.cpp` lädt man noch zwei Dateien auf das Gerät hoch. Header-Datei `UserTypes.h` definiert die Funktionen und Variablen in `UserFunctions.cpp`, wo sich die wichtigsten Funktionen für die Messung befinden.

#### 4.2.6 UserFunctions.cpp und Probleme

In `UserFunctions.cpp` wurden drei ähnliche Funktionen geschrieben, die mithilfe der ADXL335-Sensoren die Beschleunigungsdaten aufnehmen. Je nachdem welche Sensoren man gewählt hat, benutzt das Programm `acquireData_highcap`, `acquireData_lowcap` oder `acquireData_both`.

Hier wurde als Beispiel, die erste geschriebene Funktion `acquireData_lowcap`, die für die Steuerung des Hauptsensors benutzt wurde, näher beschrieben.

---

```
1 void acquireData_lowcap(data_t* data) {
2     data->time = micros();
3     a=analogRead(3);
4     a=analogRead(3);
5     a=analogRead(3);
6     data->adc[0] = a;
7     if (ADC_DIM >= 2) {
8         a=analogRead(1);
9         a=analogRead(1);
10        a=analogRead(1);
11        data->adc[1] = a;
12    }
13    if (ADC_DIM >= 3) {
14        a=analogRead(2);
15        a=analogRead(2);
16        a=analogRead(2);
17        data->adc[2] = a;
18    }
19    r=random(0,2);
20    delayMicroseconds(r);
21 }
```

---

Zuerst wird die Zeit mit der Zeile 2 aufgenommen. Die Zeit bei dem ersten Aufruf von der Funktion wird als  $0 \mu\text{s}$  gesetzt und andere Zeitdaten werden dann ab  $0 \mu\text{s}$  weiter gespeichert. Jeder Pin wird dreimal ausgelesen (z.B. Zeile 3 bis 5) bevor die Daten in Array und folglich auf SD-Karte gespeichert werden. Der Arduino hat nur einen AD Konverter und folglich benutzen ihn alle drei Kanäle nacheinander. Da die Genauigkeit des Auslesens, wegen der Einmischung verschiedener Signale, problematisch sein kann, liest man sicherheitshalber jeden Wert dreimal aus. Die gegenseitige Abhängigkeit der Kanälen bzw. ihrer Ablesungen wird dadurch minimalisiert.

Bei den Testmessungen ist ein Problem aufgetreten. Nachdem die Kontaktprobleme gelöst wurden und den Zeitbereich gut aussah, war es bemerkbar, dass das wesentliche

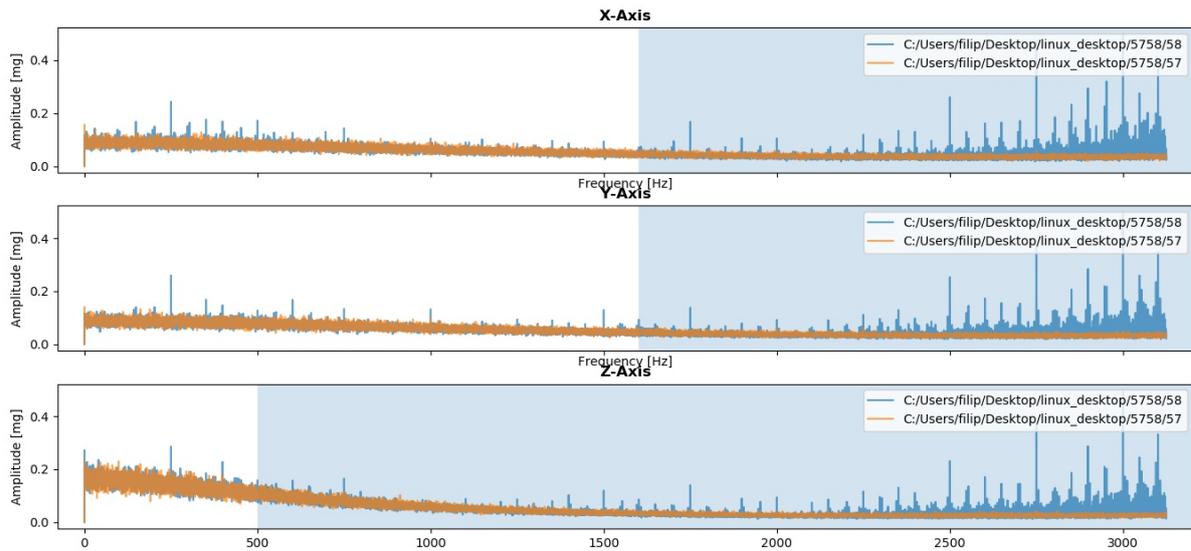


Abbildung 46: Eine Umgebungsmessung bei Zimmerbedingungen mit (orange) und ohne (blau) Random-Delay-Funktion

Rauschen im FFT-Signal, insbesondere bei höheren Frequenzen, immer noch vorhanden ist. Durch die Mittelung 16 Messungen (Vorgabewert), war es zu erwarten, dass das Rauschen eliminiert wird. Das war aber nicht der Fall. Nach der Mittelung war das Rauschen erheblich sichtbarer und sogar ein Muster der Frequenzen auf dem gleichen gegenseitigen Abstand ist dadurch entstanden (Abb. 46). Das heißt, dass das Problem systematisch ist. Alle Drähte und Verbindungen wurden wieder geprüft, andere Sensoren wurden getestet und das Gerät wurde zusätzlich abgeschirmt. Das Problem war am Ende auf das Arduino selbst bzw. seine interne Schaltung zurückzuführen. Eine provisorische Lösung war das Einfügen einer Random-Funktion, die die Zeit für die Delay-Funktion bestimmt (Z. 19 und 20). Bei jedem Aufruf der `acquireData`-Funktion wartet nun die Programmschleife nach jeder neuen Messwerterfassung unterschiedlich lang. Dadurch war das interne Rauschen komplett entfernt. Das Einfügen von der Random-Funktion beeinflusst die Messergebnisse nicht, da die Programmschleife sowieso am Ende auf den Ablauf des vorher definierten Abtastintervalls ( $160 \mu\text{s}$  bzw.  $250 \mu\text{s}$ ) wartet. Die Funktion beeinflusst jetzt aber die internen periodischen Störungen, die jetzt also nicht mehr aufgenommen werden. Die Abb. 46 zeigt den Unterschied ohne und mit der zusätzlichen Random-Funktion in `acquireData`.

## 4.3 GUI-Applikation

Für die PC-Software wurde zuerst nur ein relativ einfaches Python-Programm geschrieben, das eine Fourieranalyse der gespeicherten Daten durchführt und danach die Ergebnisse graphisch darstellt. Weitere statistische und graphische Funktionen wurden im Laufe des Projekts dazu addiert. Am Ende ist eine ganz funktionelle und selbständige GUI-Applikation entstanden. Hier werden die wichtigen Elementen und Eigenschaften erklärt und eine kurze Bedienungsanleitung erstellt.

### 4.3.1 FFT-Hauptcode

Dieses Teil des Codes bzw. die Funktion `FFT` führt die FFT Analyse der gespeicherten Daten durch.

```

1 def FFT(self, filename):
2     g_scale = (3.3 / 4096) * (1000/300) *1000
3     ...
4     with open(filename) as csvfile:
5         plots = csv.reader(csvfile, delimiter=',')
6         for row in plots:
7             try:
8                 t.append(row[0])
9                 x1.append(int(float(row[1])))
10                y2.append(int(float(row[2])))
11                z3.append(int(float(row[3])))
12            ...
13        us1 = int(round((float(t[2])-float(t[1]))/10,0)*10)
14        self.sr1= 1000000/us1
15        self.sample_rate=self.sr1
16        try:
17            if self.antileak_bool ==1:
18                canal_1_B = x1[:len(x1)-self.aleak]
19                canal_2_B = y2[:len(x1)-self.aleak]
20                canal_3_B = z3[:len(x1)-self.aleak]
21            elif self.fastmode ==1:
22                quo = math.floor(math.log(len(x1),2))
23                canal_1_B = x1[:2**quo]
24                canal_2_B = y2[:2**quo]
25                canal_3_B = z3[:2**quo]
26            ...

```

Wie schon im Kapitel 4.1.1 erklärt, werden Daten mit der 12-Bit Auflösung gespeichert.  $g\_scale$  Konstante (Zeile 2) wandelt dann die Daten in physikalische Einheiten [mG]=  $10^{-3} \cdot 9.81[\frac{m}{s^2}]$  um. Der erste Faktor  $3.3/4096$  gibt das Verhältnis zwischen der maximalen Spannung und dem maximalen digitalen Wert einer Ablesung. Folglich wird mit dem Kehrwert der Empfindlichkeit des Sensors ( $300\frac{mV}{g}$ ) und am Ende noch mit 1000 multipliziert, um [mG] zu bekommen. Bevor man die Beschleunigung in [mG] in beider Richtungen (positiv und negativ) bekommt, muss man den Mittelwert berechnen und von jedem gespeicherten Wert abziehen (Z. 4 und 6 im Code unten). Der Sensor misst auch die statische Beschleunigung, die man im FFT Bild als ein großer Wert bei Frequenz 0 Hz erkennen kann. Durch Subtraktion des Mittelwerts wurde auch diese unnötige Beschleunigung entfernt. Am Ende bekommt man die Daten, die auch negative Werte für die entgegengesetzte Richtung der Beschleunigung beinhalten und in physikalischen Einheiten [mG] gegeben sind.

Die Daten werden dann aus der CSV-Datei eingelesen (Z. 4-11) und wichtige Informationen wie die Messungsdauer und Abtastrate in Mikrosekunden (Z. 13-15), werden vor FFT Bearbeitung automatisch entnommen und gespeichert.

Normalerweise sollen die Datenlisten so gekürzt werden, dass die Anzahl der Werte eine Potenz von 2 ist. Dadurch wird der FFT Algorithmus am schnellsten. Da man aber hier mit einer relativ kleinen Datenmenge zu tun hat und da jeder Wert wegen der Frequenzauflösung nützlich ist, wird die **self.fastmode**-Variable auf 0 gesetzt und folglich wird keine Abkürzung durchgeführt. Wenn der Anti-Leak-Algorithmus eingeschaltet ist, was automatisch bei einer Messung der Phasenverschiebung passiert, wird das aber doch gemacht. Darüber wird im Kap. 4.3.3 weitergesprochen.

Im Code erfolgt danach die FFT-Berechnung, die dank dem **scipy**-Modul **fft-pack** (Z. 29) nur in ein paar Zeilen erledigt ist:

```

1 def FFT(self, filename):
2     ...
3     #X-Channel
4     mean_1 = mean(canal_1_B)
5     self.time = us1*len(canal_1_B)
6     canal_1 = [ g_scale*(a- mean_1) for a in canal_1_B]
7     if self.add0_bool==1:
8         for ki in range (len(x1)-len(canal_1_B)):
9             canal_1.append(0)
10    ncanal = np.array(canal_1)
11    canal_fft = []
12    canal_fft = canal_1
13    N = len(canal_fft)      # length of the signal
14    #Window function
15    if(win_var == 2):
16        w = signal.hann(N, sym=False) #Hann window
17        self.k_E = 1.63
18        self.k_A = 2.0
19    elif(win_var == 3):
20        w = signal.flattop(N, sym=False) #Flattop window
21        self.k_E = 2.3893083
22        self.k_A = 4.6386433
23    else:
24        w = 1 #Rectangular window
25        self.k_E = 1
26        self.k_A = 1
27    T = 1.0 / self.sr1
28    y = canal_fft
29    yf = fftpack.fft(y*w)*(2/N)
30    yf = yf[:int(N/2)]
31    xf = np.linspace(0.0, 1.0/(2.0*T), int(N/2))
32    self.yfAx = np.abs(yf)
33    for x in xf:
34        if x>=self.rotor-1:
35            ind_max8_begin = np.where(xf == x)
36            break
37    for x in xf:
38        if x>=self.rotor+1:
39            ind_max8_end = np.where(xf == x)
40            break
41    self.max8x=max(self.yfAx[int(ind_max8_begin[0]):int(ind_max8_end[0])])
42    self.ind_max8x = np.where(self.yfAx == self.max8x)
43    self.ind_max8x = int(self.ind_max8x[0])
44    phase_x = np.degrees(cmath.phase(yf[self.ind_max8x]))
45    ...

```

Komplexe und symmetrische **yf**-Variable (Liste), die Informationen über die Amplituden und Phasen des Signals beinhaltet, wird berechnet und nur eine Hälfte ihrer nützlichen Werte behalten (**yf** ist symmetrisch). Danach wird **xf**-Variable, die Frequenz-Achse darstellt, konstruiert (Z. 31) und die **yfAx**-Liste, die die Amplituden des Signals im Frequenzbereich angibt, wird aus **yf** berechnet (Z. 32).

Weiters wird die genaue Amplitude und Frequenz des Peaks in einem schmalen, durch die Eintragung einer erwarteten Frequenz **self.rotor** vorgegebenen Bereich bestimmt. Die Vorgabe-Frequenz ist 8,3 Hz (die Umdrehungsfrequenz des Rotors bei einer CoBall-Mühle). Dieser Wert kann man in der GUI ändern.

Nach der genauen Bestimmung der Amplitude und der Frequenz des gewünschten Peaks berechnet man auch die Phase dieses Kanals bei dem Peak (Z. 44). Die auf diese Weise bestimmte Phase bei einem Peak ist eine relative Größe, die nur mit den Phasen der anderen Achsen verglichen werden kann. Das wurde später ausgenutzt, um die Phasenverschiebung zwischen der X- und Z-Richtung zu bestimmen. Das ist später für die Untersuchungen der Rotorunwucht von der entscheidenden Bedeutung (s. Kap. 3.4 und 5.2.6).

### 4.3.2 Fenster-Funktion

Die Fenstermethode (eng. Windowing) ist ein Vorgehen in der Signalverarbeitung, bei dem die Originaldaten vor der FFT-Berechnung mit einer Funktion multipliziert sind. Der Grund ist der sogenannte Signalverlust (Leakage).

Wenn man die Messung durchführt, diese muss irgendwann abgebrochen werden. Bei einem Zeitpunkt bzw. Abbruchpunkt, der im Mitte eines gemessenen Schwingungszyklus ist, kommt es durch die Anwendung des FFT-Algorithmus zu der Umverteilung des Signals über den gesamten Frequenzbereich (eng. Leakage). Die Werte von manchen Amplituden variieren, je nachdem wann genau die Messung abgebrochen wurde.

Man kann ja die Messung so einstellen, dass der Anfang und das Ende mit dem Rotor harmonisiert sind (z.B. mit einem Stroboskop). In dem Fall hätte man keinen Signalverlust für Frequenzen, die durch den Rotor entstanden sind. Für dieses Gerät und die Anwendung (s. Kap. 1.2) war das nicht möglich und man musste andere Lösungen finden.

Fenster-Funktionen können das Leakage vermindern und stellen eine Kompromiss zwischen Frequenz- und Amplitudengenauigkeit dar. Die Funktionen drücken das Signal am Anfang und am Ende gleichmäßig gegen null. Dadurch wird den Signalverlust etwa lokalisiert und Amplitude wird genauer. Drei verschiedene Fensterfunktionen werden angeboten (Kap. 4.3.6):

1. **Rechteckige Funktion**, die überall gleich 1 ist. Effektiv also keine Änderung bzw. keine Fensterfunktion
2. **Hanning-Funktion**, die eine gute Kompromiss zwischen Frequenz- und Amplitudengenauigkeit bietet. Für eine generelle Anwendung ist diese Funktion sehr üblich.
3. **Flattop-Funktion**, die die beste Amplitudengenauigkeit hat. Die benachbarten Frequenzen, können, abhängig von der Messdauer, zusammengepresst und nicht voneinander unterscheidbar sein. Die Funktion benutzt man normalerweise bei bekannten Signalen, wenn die Größe der Amplitude einer einzelnen und einsamen Frequenz von großer Bedeutung ist.

Flattop und Hanning beeinflussen stark das Spektrum (s. Abb. 47). Nach der Anwendung sind die Peaks breiter, aber die Amplituden auch viel systematisch kleiner als ohne Fensterfunktion. Man muss mit je einem Koeffizient das FFT-Spektrum multiplizieren, um die reale Größe der Amplituden wieder zu bekommen. Für Hanning ist das:  $\text{self.k\_A} = 2.0$  und für Flattop  $\text{self.k\_A} = 4.64$ . Die Amplituden sind danach in der Regel genauer dargestellt als mit der rechteckigen Funktion. Wenn sich man aber, für die Energie (z.B RMS-Wert des Spektrums) interessiert (s. Kap. 4.3.4), muss man andere Koeffizienten anwenden (Hanning:  $\text{self.k\_E} = 1.63$ , Flattop:  $\text{self.k\_E} = 2.39$ ). Diese Werte

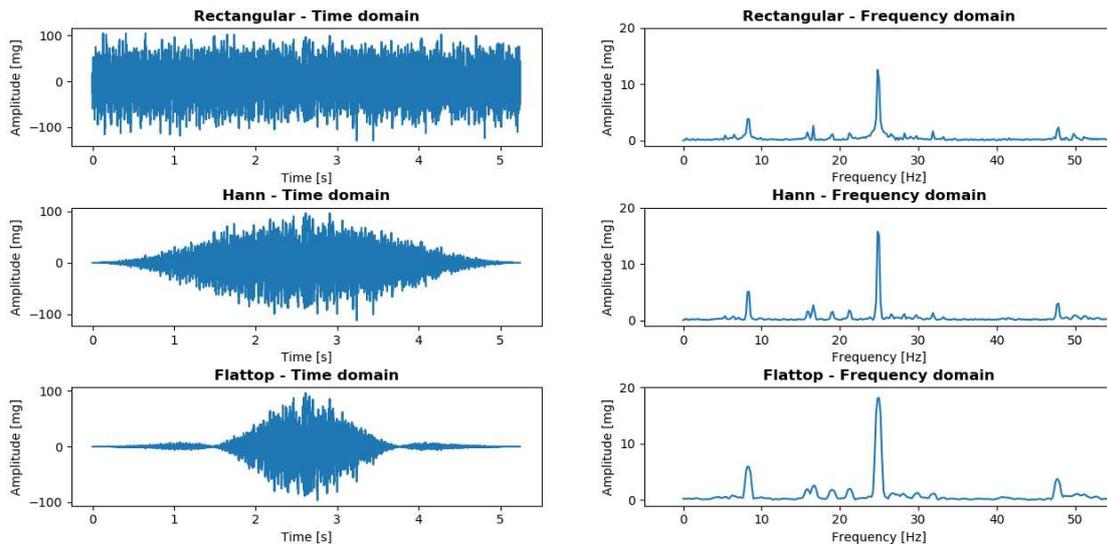


Abbildung 47: Ein Vergleich des Einflusses verschiedener Fensterfunktionen auf das Signal und das Spektrum einer Fryma-Mühle.

sind kleiner als diese bei der Amplitudenkorrektur, da die Peaks jetzt breiter sind und folglich mehr Fläche besitzen. Die Energie und die Amplitude eines Peaks können also nicht gleichzeitig richtig dargestellt werden.

### 4.3.3 Anti-Leak-Algorithmus

Eine andere Möglichkeit den Signalverlust zu bekämpfen, aber nur für eine einzige Frequenz wäre der Anti-Leak-Algorithmus. Wenn die Länge des Signals  $N$  mal die Periode einer Frequenz ( $\frac{1}{f}$ ) beinhaltet, entsteht kein Signalverlust bei dieser Frequenz. Das Problem ist, dass die genaue Frequenz des Peaks oft nicht bekannt ist. Man wählt eine Frequenz wie z.B CoBall-Rotorfrequenz aus und sucht das Maximum der Amplitude in einem Intervall um diese Frequenz in Abhängigkeit von der Anzahl der Dateneinträge. Man werft also die letzten Messpunkte nacheinander weg und misst dabei die Amplitude des gewünschten Frequenzintervalls. Für die Suche nach die Extrema wird der Goldener Schnitt-Algorithmus benutzt. Dadurch bekommt man dieselbe Ergebnisse, wie mit dem Flattop-Fenster aber mit einem schmalen Peak. Der Nachteil ist, dass das nur für eine ausgewählte Frequenz (und idealerweise ihre Moden) gleichzeitig funktionieren kann. Das Flattop-Fenster löst zusammen mit einer längeren Messdauer die Probleme der Amplitudengröße ausreichend gut und zwar für alle Frequenzen gleichzeitig. Wenn man aber den Phasenunterschied zwischen X- und Z-Achse messen möchte, ist dieses Verfahren sehr nützlich, da bei dieser Messung die Lage der gemessenen Amplitude genau bestimmt sein muss, was bei Flattop-Funktion nicht der Fall ist und bei Rectangular-Funktion kann der Peak wegen Signalverlust deformiert sein.

Der Algorithmus hat auch den Nachteil, dass es deutlich länger dauert. Das ist aber oft die einzige Möglichkeit die Phasenverschiebung zwischen zwei Achsen genau zu messen.

In der GUI kann man dieser Algorithmus nicht einschalten. Bei der Auswahl von **Calculate phase differences in Preferences** (Berechnung der Phasenverschiebung) wird der Anti-Leak Algorithmus automatisch angewendet.

In der Abb. 48 sieht man der Unterschied zwischen der Datenverarbeitung mit

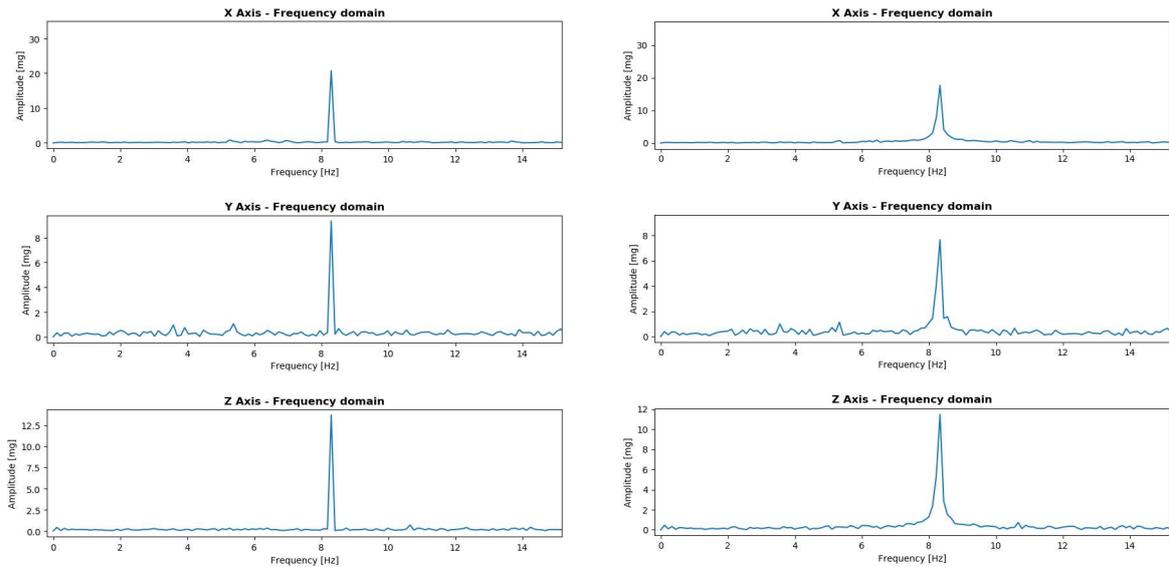


Abbildung 48: FFT-Spektrum, herangezoomt auf einen Peak. Links: Anti-Leak-Algorithmus angewendet. Rechts: ohne Anti-Leak-Algorithmus.

und ohne Algorithmus für die Umdrehungsfrequenz einer CoBall-Mühle.

#### 4.3.4 Der quadratische Mittelwert QMW (RMS)

RMS(Root mean square)-Wert vom ganzen Frequenzspektrum ist ein Indikator für die Energie, die bei den Vibrationen entsteht bzw. die die Maschine erträgt und wird im Programm auch berechnet (Z. 12 unten), indem man auf den Originalsignal die Formel

$$\text{QMW(RMS)} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i^2}$$

angewendet. Dabei sind  $A_i$  die Zeitamplituden des Signals. Dieser Wert ist sehr nützlich, um einen allgemeinen Zustand der Maschine schnell zu merken. Es wurde auch eine Option eingebaut, die ermöglicht, Frequenzintervalle zu definierten, wo der RMS-Wert berechnet werden soll (s. Kap. 4.3.6). Die Zeile 10 bzw. die Funktion `calc_rms` unten rechnet den Wert aus. Das Argument dieser Funktion ist die Frequenzamplitude multipliziert mit dem Energiekoeffizient des Fensters (s. Kap. 4.3.2) und dem Korrekturwert `rms_corr = 0.707` [53].

```

1  def FFT(self, filename):
2      ...
3      ...
4      self.resolution = xf[1]-xf[0]
5      if self.rms_range_bool==1:
6          self.ind_a = np.where(abs(xf - self.rms_range_a)<=self.resolution)
7          self.ind_a = int(self.ind_a[0][0])
8          self.ind_b = np.where(abs(xf - self.rms_range_b)<=self.resolution)
9          self.ind_b = int(self.ind_b[0][0])
10         self.rmsx=self.calc_rms(self.yfAx[self.ind_a:self.ind_b]* self.k_E *
11                                 self.rms_corr)
12     else:
13         self.rmsx=(np.sqrt(np.mean((ncanal)**2)))

```

### 4.3.5 GUI

Python-Modul **tkinter** wurde für die Bildung der graphischen Benutzeroberfläche benutzt. Die Klasse **Window(tk)**, die, außer für **tkinter** benötigten Methoden, auch FFT und andere Rechnungsfunktionen beinhaltet, wurde geschrieben. Danach ruft man eine Instanz der Klasse **Window** (Zeile 7) auf und startet mit der tkinter-Methode **mainloop()** die Hauptschleife (Zeile 8).

```

1 class Window(Tk):
2     def __init__(self):
3         ...
4     def FFT(self):
5         ...
6         ...
7 win = Window()
8 win.mainloop()

```

**Tkinter** und andere GUI-Module funktionieren auf dem Prinzip der Schleifen (Loops) und der Events, die durch das Klicken auf Buttons oder andere graphische Elementen registriert werden und die den Verlauf von Schleifen in gewünschten Richtungen bestimmen. Hier wird auf eine vollständige Beschreibung jeder Methode verzichtet. Stattdessen wird eine Bedienungsanleitung für die App geschrieben.

### 4.3.6 Bedienungsanleitung für die GUI-Applikation

Das Programm wird am Ende in eine ausführbare Datei (.exe) mithilfe des **pyinstaller**-Programms umgewandelt. Man startet es wie alle anderen Windowsprogramme.

Nach dem Öffnen des Programms taucht ein Fenster mit zwei Tabs auf. In der Tab **Plot** sieht man die drei leeren Graphen (s. Abb. 49, links), die später durch den Auswahl von den Daten ausgefüllt werden. Die leere Tab **Data** zeigt später einige statistische Parameter der ausgewählten Daten.

Ganz oben am Fenster sieht man den Programm- und Hilfebutton.

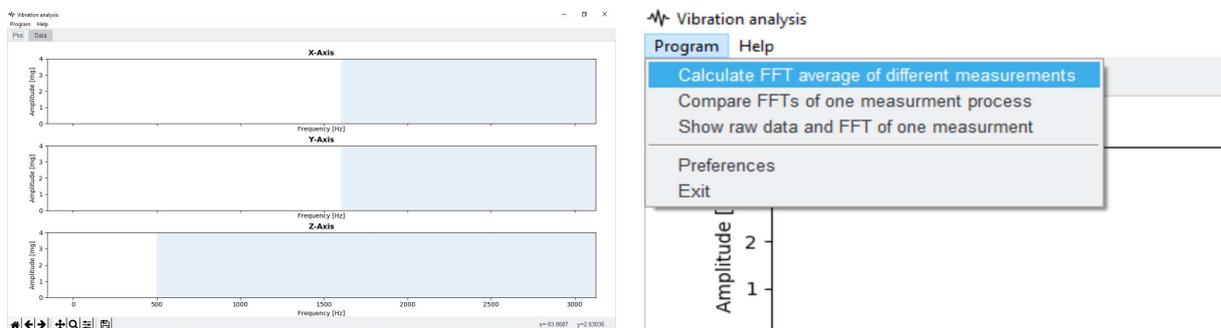


Abbildung 49: GUI vor Dateiauswahl. Links: GUI Vollansicht. Rechts: Optionen unter Programm-Button herangezogen.

Um die Daten zu bearbeiten, muss man den gewünschten Rechnungsmodus unter dem **Programm**-Button auswählen. Je nach der Auswahl taucht ein Fenster auf, wo

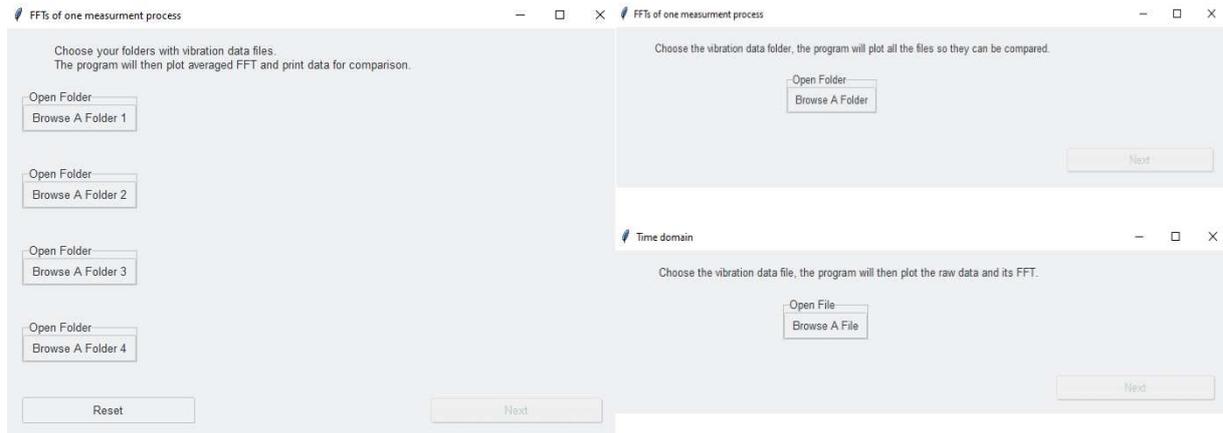


Abbildung 50: Browsen von Verzeichnissen bzw. Dateien. Links: Erste Option, Vergleich verschiedener Messungen. Rechts oben: Zweite Option, Plotten aller Aufnahmen (Vorgabewert 16) einer Messung. Rechts unten: Dritte Option, Plotten einer Datei.

man das zu plottende Verzeichnis oder Verzeichnisse oder Datei browsst (s. Abb. 50). Drei Optionen sind vorhanden (s. Abb. 49 rechts):

### 1. Calculate FFT average of different measurements

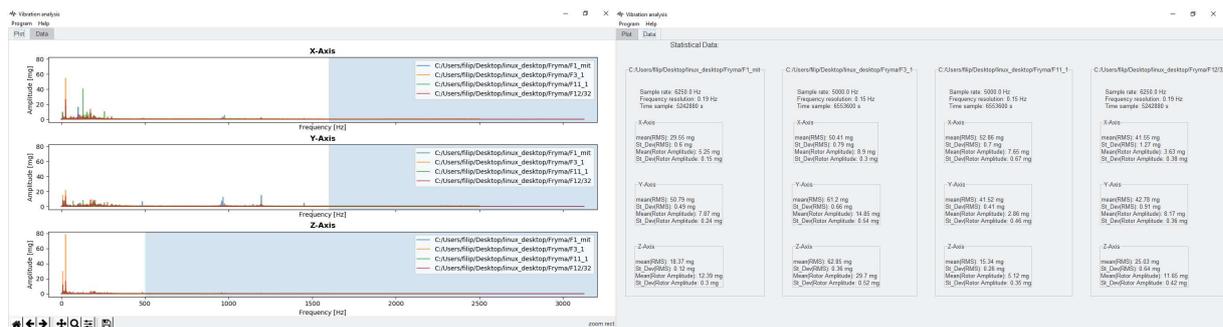


Abbildung 51: Bearbeitung von vier Messungen im Frequenzbereich . Links: Plot-Tab. Rechts: Data-Tab.

Hier vergleicht das Programm bis zu vier verschiedenen Messungen der Mühlen. Jede Messung beinhaltet 16 (s. Kap. 4.2) nacheinander gemessenen Aufnahmen der Vibration einer Maschine. Für jede Aufnahme wird FFT-Spektrum berechnet und dann wird ein Mittelspektrum gebildet, das dann in der **Plot-Tab** geplottet wird (s. Abb. 51, links). In der **Data-Tab** sieht man die statistischen Daten für ausgewählte Messungen (s. Abb. 51, rechts). Die Abtastrate, Frequenzauflösung, Messdauer und für je drei Achsen: der gemittelte RMS-Wert mit seiner Standardabweichung (s. Kap. 4.3.4) und die gemittelte Rotoramplitude bei der Umdrehungsfrequenz mit ihrer Standardabweichung werden angezeigt.

### 2. Compare FFTs of one measurement process

Man wählt eine Messung aus und plottet alle Aufnahmen dieser Messung gleichzeitig (s. Abb. 52, links). Zusätzlich werden dann sowohl RMS Werte aller 16 Aufnahmen als auch alle 16 Rotoramplituden aufgezeigt (s. Abb. 51, rechts). Hier wird auch den Phasenunterschied zwischen X- und Z-Achsen bei der Rotorfrequenz berechnet und angezeigt, aber nur, wenn die Option **Calculate phase differences in Preferences** ausgewählt wird. Dabei benutzt man den Anti-Leak-Algorithmus (s. Kap. 4.3.3).



Abbildung 52: Bearbeitung aller Dateien einer Messung im Frequenzbereich . Links: Plot-Tab. Rechts: Data-Tab.

### 3. Show raw data and FFT of one measurement

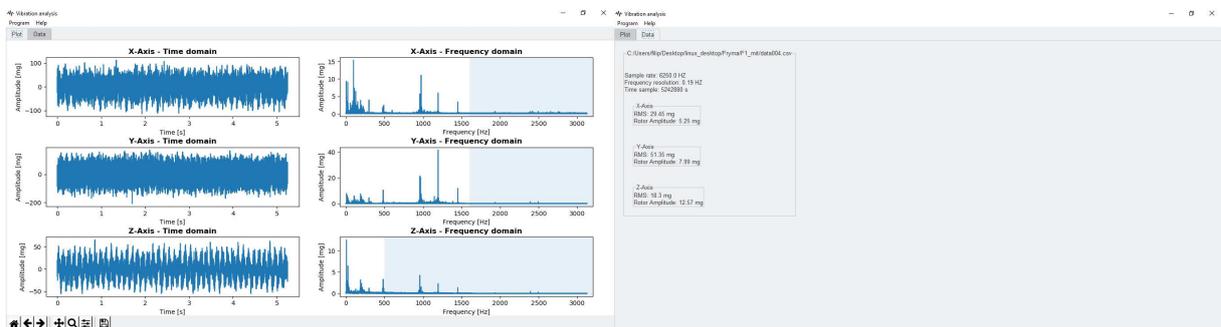


Abbildung 53: Bearbeitung einer Datei im Zeit- und Frequenzbereich . Links: Plot-Tab. Rechts: Data-Tab.

Hier wird nur eine Datei bzw. eine Aufnahme im Zeit- und Frequenzbereich geplottet. In der **Data-Tab** sieht man wieder oben beschriebene Parameter.

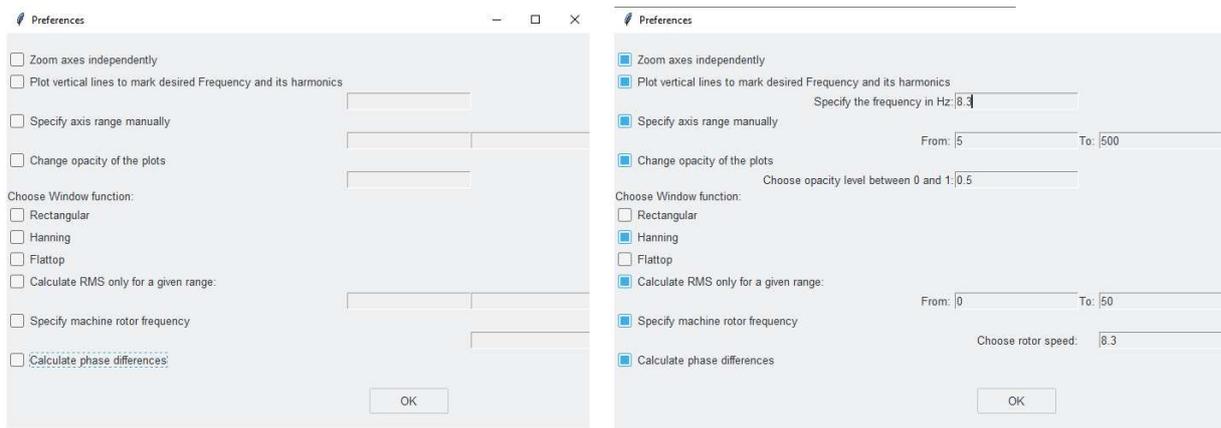


Abbildung 54: Einstellungen für die FFT-Berechnung. Links: Vorgabeeinstellung (nichts ausgewählt). Rechts: Alle Parameter eingetragen.

Unabhängig von diesen Optionen wählt man weiter unten unter **Preferences** die Einstellungen für alle drei Moden. Von oben nach unten in **Preferences**-Fenster (Abb. 54) kann man einstellen :

1. Einschalten des Heranzoomens der X-, Y- und Z-Aufnahmen unabhängig voneinander. Ohne dieser Option werden alle 3 Graphen heranzoomt, wenn man auf einen klickt.

2. Plotten der vertikalen Linien, die sich auf einem gleichen gegenseitigen Abstand befinden, für die Bestimmung der harmonischen Frequenzmoden.
3. Festlegung des Frequenzbereiches, der geplottet werden sollte.
4. Einstellung der Opazität von den Linien, was nützlich im Fall mehrerer Plots ist.
5. Auswahl von der Fensterfunktion (s. Kap. 4.3.2).
6. Bestimmung des Bereichs für die QMW (RMS) Berechnung, falls man nicht an dem ganzen Spektrum interessiert ist.
7. Definieren der Rotorgeschwindigkeit, falls man nicht die CoBall-Mühle untersucht.
8. Einschaltung der Berechnung von den Phasenunterschieden, was aber deutlich länger dauert (s. Kap. 4.3.2).

Man kann durch das Klicken auf schon eingebaute **matplotlib** Button *Save the figure* die Graphiken speichern.

## 5 Ergebnisse

Die Abhängigkeit der Vibrationssignaturen vom Mühlenverschleiß wird im Folgenden untersucht.

Im Kap. 3 wurde gezeigt, dass die Vibrationsanalyse benutzt werden kann, um den Asymmetriegrad eines Rotors abzuschätzen. Aufgrund der Vielzahl der möglichen Defekte, die gleichzeitig bei einer Maschine auftreten können, wäre auch die Benutzung von VFD (Variable Frequency Drive) für den Motor der Mühlen sehr ratsam. Dadurch kann man den Anteil des Unwuchtdefektes bei der Amplitude der Umdrehungsfrequenz genauer abschätzen, da nur bei der Unwucht die Amplitude quadratisch mit der Rotorgeschwindigkeit wächst. Da keine VFDs vor Ort vorhanden waren, wurde diese Option nicht weiter untersucht. Sie ist aber wahrscheinlich der Mühe wert.

Im Gegensatz dazu könnte man mithilfe der dreiachsigen Sensoren die Phasenverschiebung zwischen der horizontalen und vertikalen Richtung einer Ebene leicht messen. In dem, im Kap. 4.2 beschriebenen, Code sieht man, dass die Messungen von verschiedenen Achsen zwar nacheinander statt gleichzeitig durchgeführt werden. Das Arduino-Board hat nur einen einkanaligen AD-Konverter, aber die Zeit, die zwischen Messungen verläuft, ist in der Größenordnung von ein paar Mikrosekunden. Das ist im Vergleich mit 125 ms langer Rotorperiode vernachlässigbar. Man muss also bei so niedrigen Frequenzen nicht gleichzeitig beide Richtungen messen, um den Phasenunterschied zu bekommen. Zwecks der Messung an zwei verschiedenen Lagern, um die Rotorunwucht genauer zu untersuchen, ist auch ein zweiter Sensor eingebaut. In der Regel sind die axialen Richtungen bei zwei Lagern in Phase, wenn die Unwucht beim fliegend gelagerten Rotor vorhanden ist [27]. Dieser Sensor sollte im Zweifelsfall zusätzlich versichern, dass es tatsächlich um Unwuchtvibration geht. Er wurde jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht ausprobiert.

Bevor man mit den Mühlenmessungen anfangen konnte, war das Testen des im Kap. 4 beschriebenen Geräts nötig. Wenn nicht anderes angegeben, sind die geplotteten FFT-Spektren mit der Flattop-Fensterfunktion (s. Kap. 4.3.2) berechnet. Obwohl damit die Frequenzauflösung wesentlich verschlechtert ist, garantiert dieses Fenster eine genaue Größe von den gemessenen Amplituden.

### 5.1 Testen des Geräts

#### 5.1.1 Probleme und Fehlmessungen

Nachdem das Gerät erstes Mal mithilfe einer Steckplatine zusammen gebaut wurde, wurde bei den ersten Messungen ein Rauschmuster erkannt (Abb. 55). Das wurde durch die vollständige Verlötlung aller Kabel an einer Platine gelöst. Ein anderes Rauschmuster war aber immer noch im FFT-Spektrum der Messungen sichtbar. Dieses Problem wurde ebenfalls gelöst und über die Lösung wurde im Kap. 4.2.6 schon diskutiert.

Später wurde auf einmal erhöhtes Rauschen auf der z-Achse registriert. Es ging wieder um eine schlechte Lötstelle, die vielleicht während des Transportes entstanden war. Das Gerät ist im Allgemeinen sehr fehleranfällig, wenn irgendwo ein halbwegs schlechter Kontakt existiert, was natürlich nicht verwunderlich ist. Deswegen ist es sehr wichtig mit dem Gerät vorsichtig zu operieren.

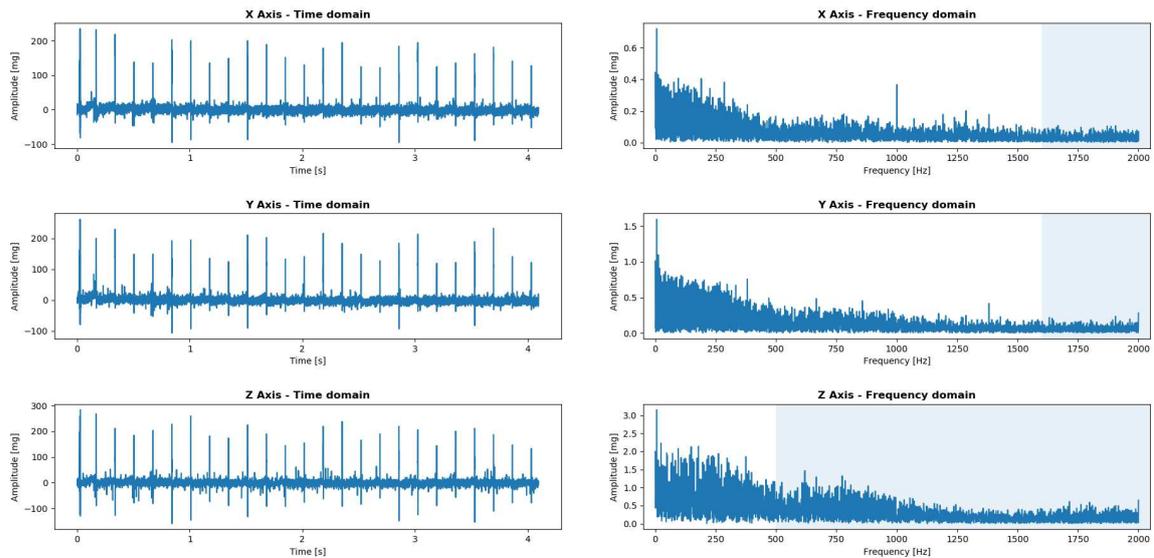


Abbildung 55: Das Anfangsrauschen, das durch die schlechten Verbindungen zwischen Komponenten entstanden war

### 5.1.2 Wohnraumrauschen

Nachdem alle Fehler behoben wurden, bekam man endlich akzeptable Messungen bei den Wohnraumbedingungen, wo also fast keine Umgebungsvibrationen existieren. In der Abb. 56 ist eine solche Messung dargestellt. Man merkt, dass sowohl die Messdaten als auch ihre FFT-Spektren komplett willkürlich sind. Dieses normale Rauschen ist eine Mischung aus dem Rauschen der Umgebung, der elektrischen Schaltung, und des Beschleunigungssensors selbst. Die in dem Gerät eingebauten Tiefpässe unterdrücken dieses Rauschen genauso wie alle anderen Signale, deren Frequenz größer als 1,6 kHz bei X- und Y-Achse bzw. 500 kHz bei der Z-Achse (s. Kap. 4.1) ist. Das Rauschen ist im niederfrequenten Bereich (ca. 0,3 mG für X und Y, und ca. 0,5 mG für Z) am größten.

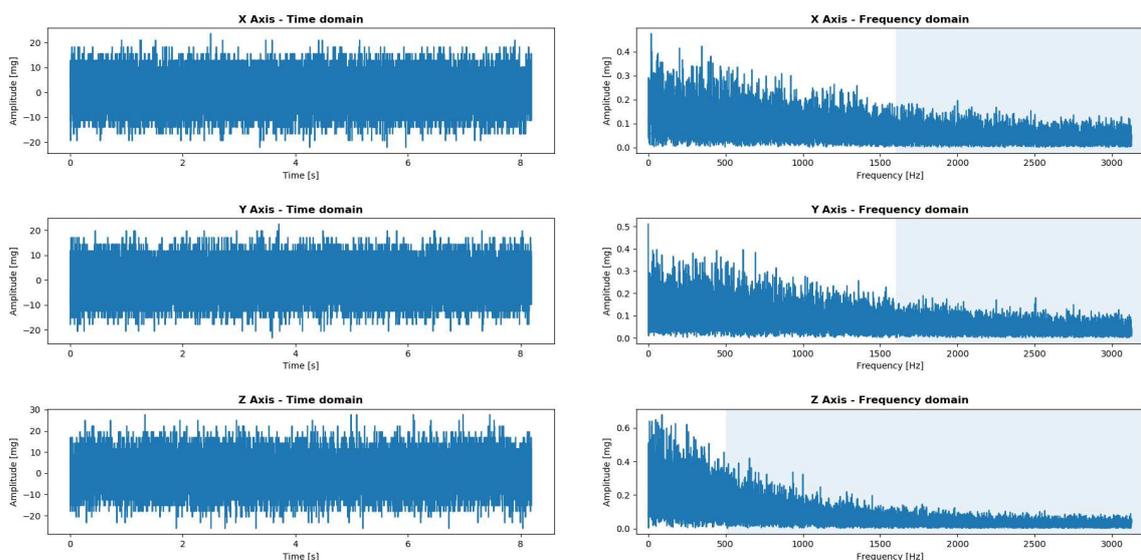


Abbildung 56: Messung des Gesamtrauschens des Systems bei ruhiger Umgebung.

### 5.1.3 Verschiedene Sinustöne

Um die Frequenzgenauigkeit zu prüfen, wurde der Sensor für einen Lautsprecher mithilfe eines Metallteils befestigt. Sinustöne verschiedener Frequenz werden dann abgespielt und die daraus entstandenen Vibrationen mit dem Sensor gemessen.

Eine einzelne Messung von 165 Hz ist in der Abb. 57 zu sehen. Der Sinuston ist deutlich sichtbar. Interessant ist, dass auch zwei Oberwellen im Spektrum vorhanden sind. Die Oberwellen entstehen möglicherweise in dem vibrierenden Metallteil oder im Lautsprecher selbst.

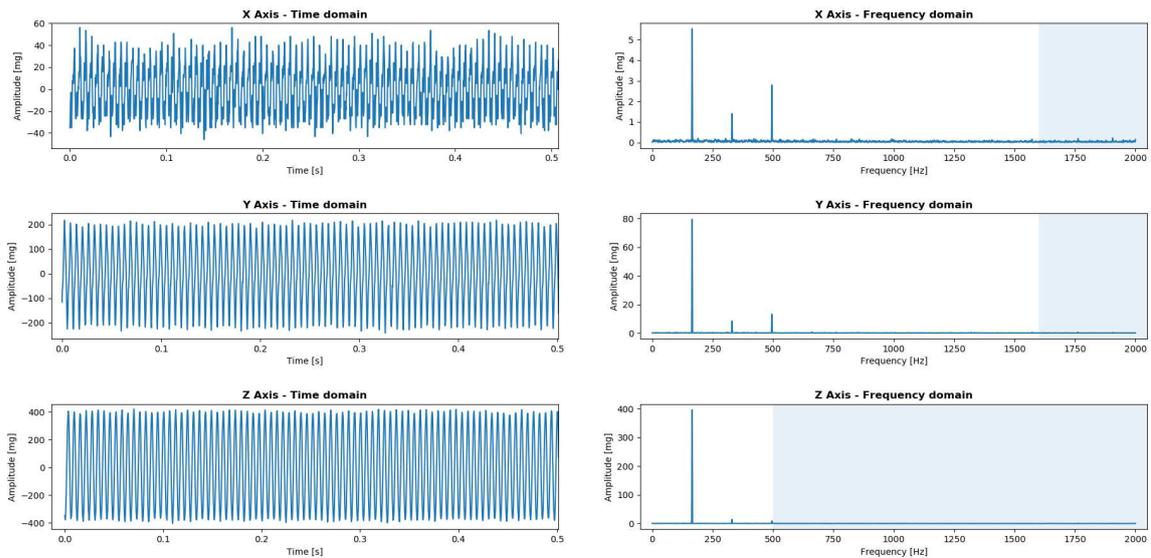


Abbildung 57: Messung und Bearbeitung eines Sinustons von 165 Hz, der vom Lautsprecher gespielt wurde. Die FFT-Spektren wurden gemittelt.

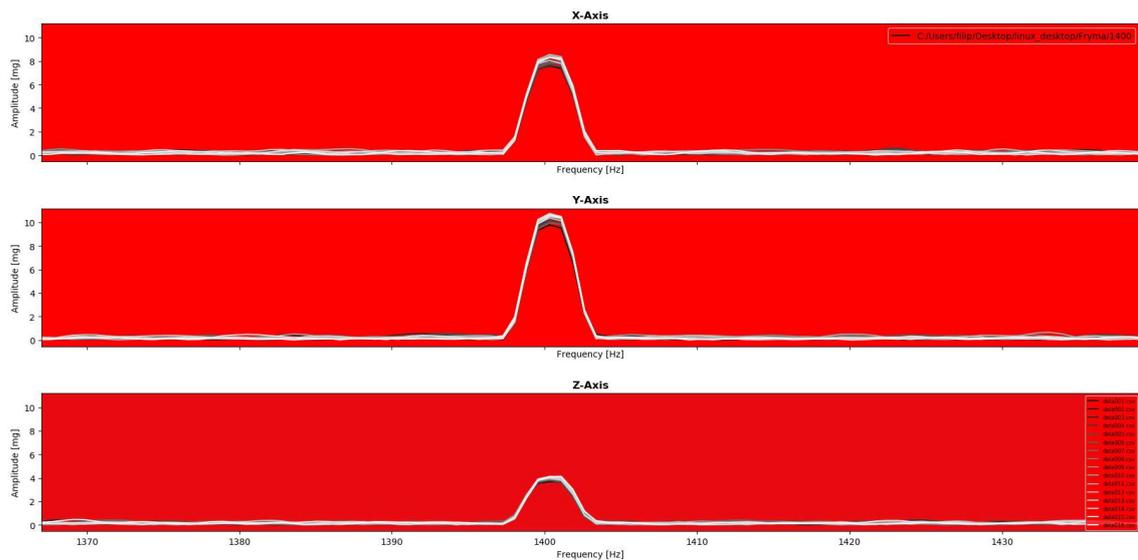


Abbildung 58: Ein Vergleich von verschiedenen Einzelmessungen eines Sinustons von 1400 Hz, der vom Lautsprecher gespielt wurde.

Die Frage ist aber nicht nur, ob die Frequenz der gemessenen Amplitude richtig ist, sondern auch, wie reproduzierbar die Messungen sind. In der Abb. 58 ist ein Vergleich

zwischen verschiedenen Einzelmessungen eines Sinustons von 1,4 kHz angegeben, der in der Nähe von der Obergrenze für die X- und Y-Achse ist. Auch bei so hohen Grenzfrequenzen ist die Reproduzierbarkeit für den Beschleunigungssensor trotzdem gut. Diese Frequenz übersteigt die maximal (richtig) messbare Frequenz der Z-Achse von 500 Hz [34]. Die Frequenz wird doch detektiert, aber wahrscheinlich mit einem ungenauen Amplitudenwert und zwar auch wenn man den Effekt vom Tiefpass einrechnet. Messabweichungen zwischen einzelnen Messungen bei der Rotorfrequenz sind bei den Mühlen normalerweise nicht größer als das umgebende Rauschen (s. Kap. 5.2).

#### 5.1.4 Dieselmotor

In einem eingeschalteten Auto wurden Vibrationen beim Leerlauf gemessen. Die Brennstoffverbrennung im Motor mit den vier Kolben, die die Luft-Brennstoff-Mischung paarweise komprimieren, erzeugt die Vibrationen, deren Frequenz zweimal größer als die Umdrehungszahl der Kurbelwelle ist. Die Abb. 59 zeigt das gemittelte FFT-Spektrum von 32, 1,6 s langen Messungen. Da liegt der größte Peak bei ca. 27 Hz. Daraus ergibt sich eine Umdrehungszahl von 810 Umdrehungen pro Minute beim Leerlauf, was ziemlich genau dem Wert auf dem Tachometer entspricht.

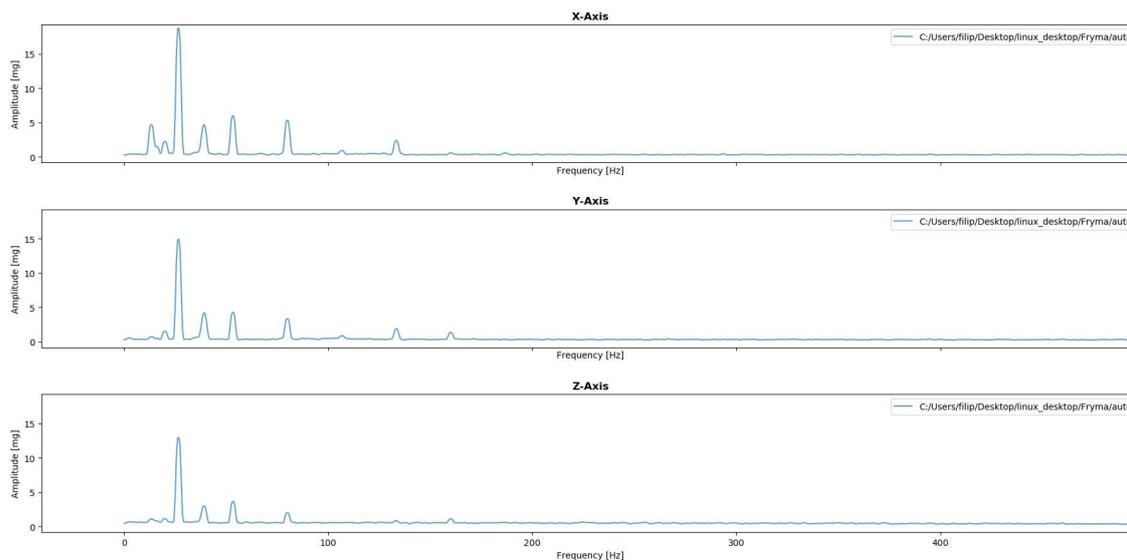


Abbildung 59: Vibrationsmessung im Fahrzeug beim Leerlauf.

Das Gerät hat sich also bei dem Testen als gut erwiesen. Im Folgenden werden die vorgenommenen Messungen der Mühlen präsentiert.

## 5.2 Mühlenmessungen

Für alle CoBall-Mühlen wurden die Messungen an derselben Stelle, vorne auf dem äußeren Deckel ausgeführt (Abb. 60). Die Magneten konnten besser an dieser Stelle fixiert werden als an der äußeren Statorwand. Das kann durch die Unterschiede der Stahllegierungen, aus denen die beiden Bauteile bestehen, erklärt werden, was auch dann für einige der schon beschriebenen Methoden (s. Kap. 2.7 und 2.6) relevant sein kann. Der Messkopf soll sowieso parallel zu der Welle sein. Im Folgenden wird ausschließlich über die CoBall-Mühlen diskutiert. Am Ende findet man aber ein Unterkapitel, in dem die Vollrath und andere Arten kurz gedeckt werden.

### 5.2.1 Gemittelte FFT-Spektren

Die Mühlen vibrieren sehr wenig. Keine gemessene Mühle übersteigt den RMS-Wert(s. Kap. 4.3.4) von 100 mG pro Achse. Die Messsoftware im Gerät nimmt 16 Einzelmessungen. Die FFT-Spektren werden dann für je Messung berechnet und in der Regel gemittelt, um das Rauschen zu entfernen. Vier gemittelte FFT-Spektren von den CoBall-Mühlen FM04, FM08, FM13 und FM14 in drei gemessenen Richtungen (zwei radiale (X und Z) und eine axiale (Y)) sind in der Abb. 61 zu sehen. Man merkt, dass die größte Aktivität im niederfrequenten Bereich (unter 500 Hz) vorhanden ist, was für diese relativ langsamen Mühlen nicht überraschend ist. Genau in diesem Bereich findet man die Vibrationspeaks, die direkt vom Rotor stammen. Man darf nicht vergessen, dass die Mühle einen Motor und eine Pumpe hat, die ebenfalls Vibrationen erzeugen und sich in einer lauten und vibrierenden Umgebung befindet. Diese Einflüsse können einige externe Peaks verursachen, die nicht von der gemessenen Mühle stammen.

### 5.2.2 Frequenzidentifikation

Als Erstes soll die Umdrehungsfrequenz des Rotors im Spektrum gefunden werden. In der Abb. 62 sieht man mögliche Drehzahlwerte für die CoBall-Mühle. Sie hängen von der Riemenscheibe auf dem Antriebsmotor bzw. vom Zähnezahlnverhältnis zwischen dem Rotor und dem Motor ab. Eine Einzelmessung von der CoBall-Mühle ist im Zeit- und Frequenzbereich geplottet (Abb. 63). Keine Fenster-Funktion wurde angewendet und der Frequenzbereich wird hier nur bis 30 Hz dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass der erste



Abbildung 60: Position des Messkopfs bei allen Messungen von CoBall-Mühlen [56].

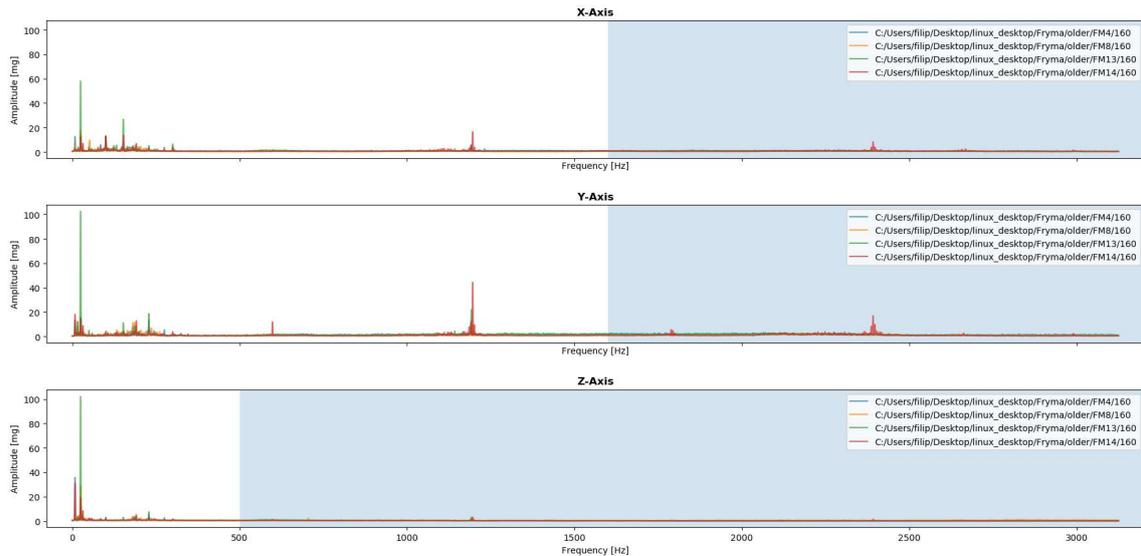


Abbildung 61: Gemittelte FFT-Spektrum von vier verschiedenen Mühlen. Abtastrate: 6,25. kHz Frequenzauflösung: 0,49 Hz. Messdauer: 2 s.

MS-50	Umfangsgeschwindigkeit (m/s)	8	9,6	10,7	11,8	12,3	12,9	14	15
	Drehzahl $\text{min}^{-1}$	308	370	411	452	472	493	534	575
	Zähnezahl Motor / Rotor	30/144	36/144	40/144	44/144	46/144	48/144	52/144	56/144

Abbildung 62: Liste von den verschiedenen Riemenscheiben, die die Rotorgeschwindigkeiten bzw. Drehzahlen der CoBall-Mühle bestimmen [2].

große Peak 8,29 Hz beträgt. Das ist ziemlich genau die Frequenz, die der Riemenscheibe 48/144 aus der Abb. 62 und der Drehzahl ( $493 \text{ min}^{-1} = 8,22 \text{ Hz}$ ) entspricht. Dabei muss man beachten, dass die Frequenzauflösung 0,11 Hz beträgt. Der Anti-Leak-Algorithmus wird um die gefundene Frequenz angewendet, um Leakage daraus zu entfernen (s. Kap. 4.3.3) Man sieht auch, insbesondere in axialer Richtung, die zwei große nahe zueinander liegenden Peaks. Einer davon liegt bei ca. 16,6 Hz und ist daher die erste Oberwelle. Interessant ist auch, dass anscheinend auch die zweite Oberwelle bei ca. 24,9 Hz vorhanden ist, die sogar erheblich größer als die Erste und im Fall der horizontalen (X-)Richtung sogar größer als die Grundwelle ist. Diese Frequenz ist, genauso wie die Umdrehungsfrequenz bei ca. 8,3 Hz bei jeder gemessene CoBall-Mühle anwesend. Das ist aber keine Oberwelle, sondern die Grundvibration des Elektromotors, dessen Frequenz laut der Tabelle aus der Abb. 62 wegen des Zähnezahlverhältnisses dreimal größer als die Rotorfrequenz ist.

### 5.2.3 Frequenzschwankungen und Reproduzierbarkeit

Da bei einem Messvorgang 16 Einzelmessungen für die Mittelwertbildung aufgenommen werden, stellt sich die Frage, ob das Frequenzspektrum und Amplituden der Peaks unterschiedlicher Messungen äquivalent sind.

Abb. 64 zeigt deutlichheitshalber das Spektrum einer Mühle ohne Fensterfunktion bis zu 50 Hz und mit dem Anti-Leak-Algorithmus bei 8,3 Hz für alle 16 Einzelmessungen.

Die Frequenzen einzelner Messungen im Spektrum überlappen sich. Man kann also annehmen, dass sich die Peaks für jede Einzelmessung bei den gleichen Frequenzen innerhalb der Auflösungsgrenze (in dem Fall 0,11 Hz) befinden.

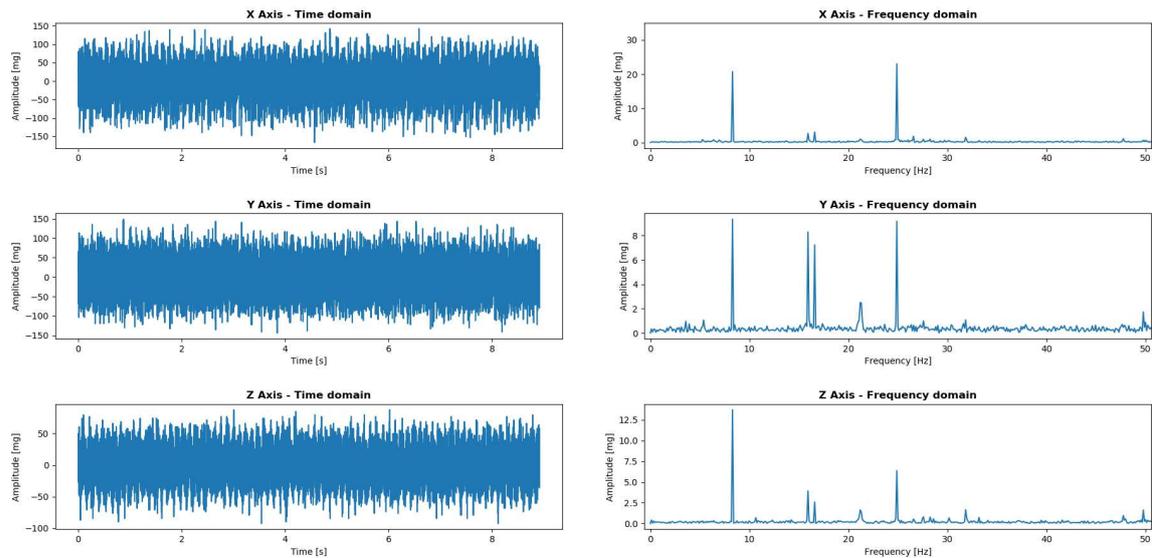


Abbildung 63: Identifikation der Umdrehungsfrequenz der CoBall-Mühle durch die Untersuchung einer Einzelmessung ohne Fenster-Funktion und mit dem Anti-Leak Algorithmus. Abtastrate: 5 kHz. Frequenzauflösung: 0,11 Hz. Messdauer: 8,924 s

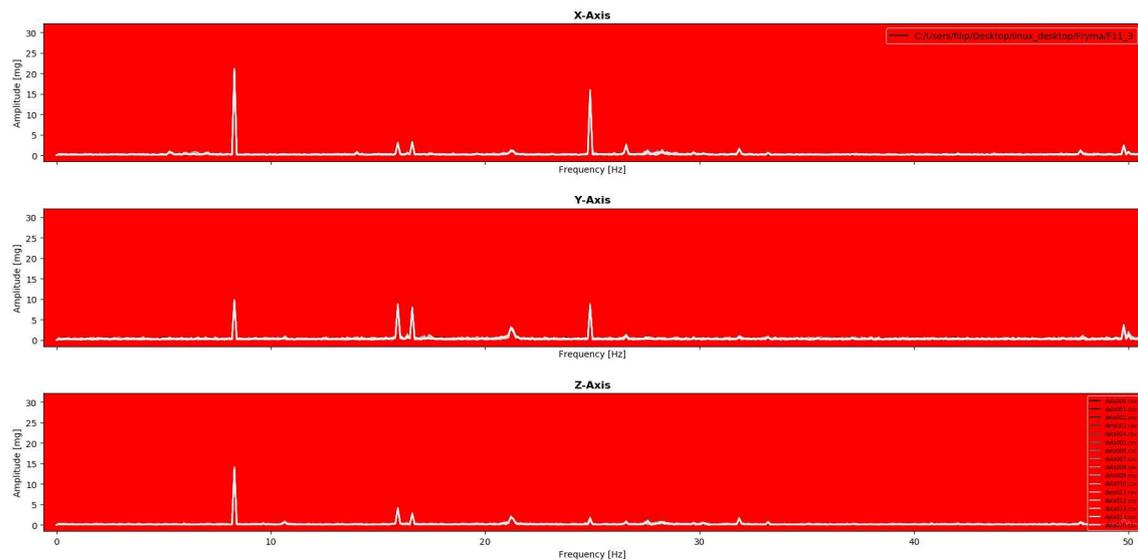


Abbildung 64: Alle 16 Einzelmessungen einer CoBall-Mühle. Abtastrate: 5 kHz. Frequenzauflösung: 0,11 Hz. Messdauer: 8,924 s.

Aus den statistischen Daten im zweiten Tab (nicht in der Abb. 64 dargestellt, s. z.B. Abb. 51), die u.a. die gemittelten Werte und Standardabweichungen der Amplitude bei der Umdrehungsfrequenz in alle drei Richtungen zeigen, ergeben sich die Variationskoeffizienten für X-, Y-, Z-Richtung jeweils: 7,14%, 17,64% und 9,35%. Man könnte daraus schließen, dass die Amplituden der axialen Vibrationen stärker schwanken. Das ist aber nicht der Fall, da das Rauschen bei jeder Einzelmessung eine gleich große absolute Ungenauigkeit erzeugt. Wenn die Peaks kleiner sind, wird ihr Variationskoeffizient natürlich größer. Die absoluten Unterschiede zwischen der größten und der kleinsten Messung für je Richtung sind: 0,57 mG, 0,5 mG, 0,42 mG, was in der Größenordnung vom Umgebungsrauschen ist.

Noch eine wichtige Größe ist der RMS-Wert (4.3.4) des ganzen FFT-Spektrums einer Einzelmessung. Er stellt einen Indikator für die gesamte gemessene Vibrationsenergie dar. Die Variationskoeffizienten des RMSs sind für die X-, Y-, Z-Richtung jeweils: 4,94%, 4,73% und 5,28%.

Die Umdrehungsfrequenz ist bei verschiedenen Einzelmessungen einer Mühle innerhalb der Auflösungsgrenze gleich. Die Abb. 65 zeigt, wie sie beim Vergleich verschiedener Mühlen mit verschiedenen Produkten aussieht. Hier ist der inverse Zusammenhang zwischen der Messdauer und Frequenzauflösung bemerkbar. Die Mühlen FM04, FM07, FM08, FM13, FM14 werden nur ca. 2 s (statt 8 s wie bei den Anderen) gemessen und weisen einen breiteren Peak und eine schlechtere Auflösung auf. Alle Peaks der Grundvibration befinden sich, mit kleinen Abweichungen, auf ca. 8,3 Hz. Die Abweichungen sind durch den Anti-Leak-Algorithmus entstanden, da er ein paar Datenpunkte von jeder Einzelmessung entfernt, um eine Messdauer, die periodisch mit der Umdrehungsfrequenz ist, zu bekommen. Dadurch ändert sich ein bisschen das Gitter, in dem die berechneten FFT-Punkte aufgetragen werden und folglich die Peakposition.

Um die Umdrehungsfrequenz genauer bestimmen zu können, muss man länger messen, da  $\text{Auflösung} = 1 / \text{Messdauer}$  ist. Für eine Auflösung von 0,01 Hz muss eine Einzelmessung 100 s lang dauern.

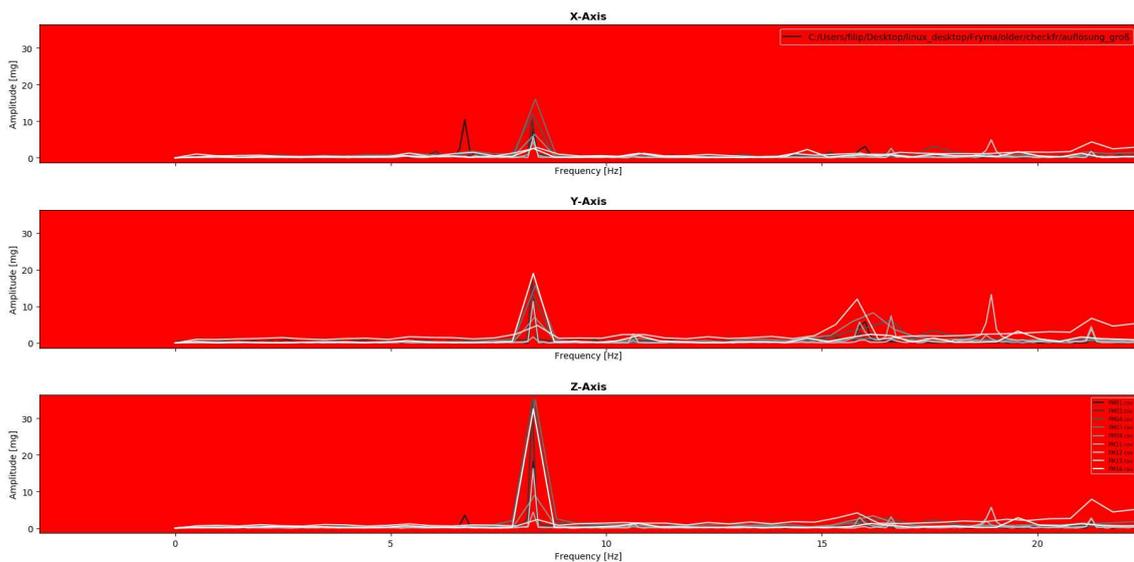


Abbildung 65: Untersuchung der Umdrehungsfrequenz verschiedener Mühlen und bei verschiedenen Messparametern.

#### 5.2.4 Gesamtverschleiß und Vibrationen

Im Kap. 3.5 wurde über die möglichen Einflüsse des Rotor- und Statorverschleißes auf die Vibrationen diskutiert. Abgesehen von der Rotorunwucht sollte eine Vergrößerung des Mahlspalts im Regelbetrieb zu keinen (großen) Vibrationsänderungen führen. Vielmehr sollten die Eigenschaften des Produktes und die Perlenmenge von Bedeutung sein. In der Abb. 66 ist ein Vergleich statistischer Daten von vier Mühlen, die ein unterschiedliches Mahlräumvolumen haben, dargestellt.

Die FM13 (Abb. 61, grün) und FM14 (Abb. 61, rot) haben das gleiche Mahlräumvolumen von 11,8 l und ein wesentlich unterschiedliches Spektrum. Der RMS-Wert

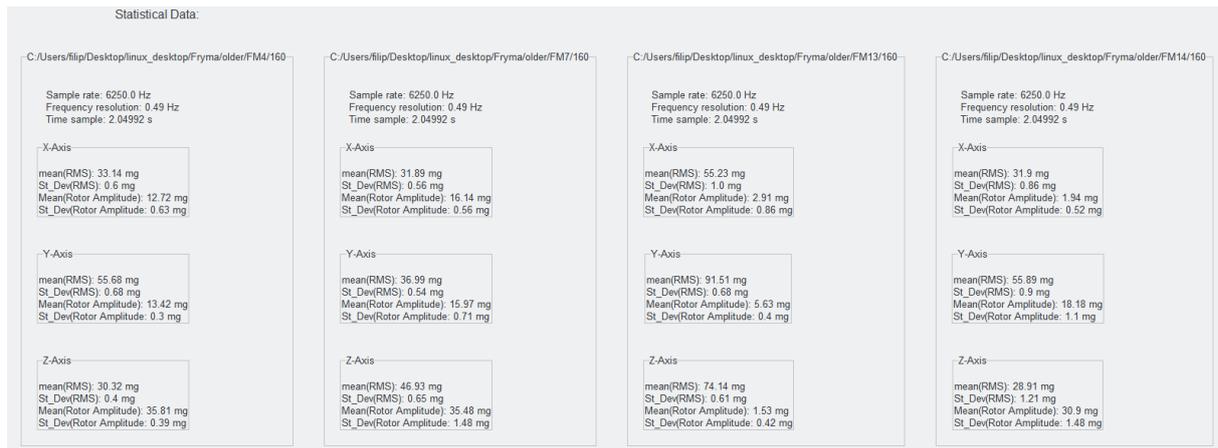


Abbildung 66: Ein Vergleich statistischer Daten von vier CoBall-Mühlen, die unterschiedliche Mahlraumvolumina haben. FM04, FM07, FM13 und FM14

von der FM13 ist in allen Richtungen fast doppelt so groß wie der bei der FM14. Andererseits ist ihre Amplitude bei der Umdrehungsfrequenz viel kleiner (Y- und Z-Richtung) oder ähnlich (X-Richtung). Die Mühlen wurden zusammen in einem Kreislauf geschaltet und die Unterschiede von Produktparameter können nicht so groß sein, um so was erklären (s. Kap. 5.2.5). Bei der Umdrehungsfrequenz des Rotors sind die Vibrationen sehr gering. Deswegen können die energetischen Vibrationen der FM13 auch nicht von irgendwelchen Rotordefekten stammen. Wenn man das FFT-Spektrum aber anschaut, sieht man bei der FM13 eine riesige Amplitude bei der Grundfrequenz des Motors. Daher ist irgendeiner Defekt an der Motorseite der Mühle wahrscheinlich die Ursache für erhöhte Vibrationen.

Man betrachtet dann die Mühlen FM04 und FM07 (Abb. 66), deren Mahlraumvolumen sich um ca. 2 l unterscheidet (FM04 = 12 l und FM07 = 10,1 l). Im Gegensatz zum vorigen Beispiel sind die RMS-Werte und insbesondere die Amplituden ähnlich.

Mithilfe der Abb. 67 werden zwei weitere Beispiele diskutiert. Die FM1 und FM2 haben wieder das gleiche Mahlraumvolumen und ihre statistische Daten (RMS-Wert und Rotoramplitude) sind ähnlich. Ihre Spektren schauen aber ganz anders aus (s. Abb. 68). Die Mahlraumvolumina von der FM03 und FM11 unterscheiden sich um 2 l, aber im Gegensatz zum obigen FM04-FM07-Fall sind jetzt sowohl der RMS-Wert als auch die Rotoramplitude der Vibrationen bei der größeren Mühle viel größer. Das hat wieder wahrscheinlich nichts mit der Volumenvergrößerung zu tun, da die vibrationsreiche FM03-Mühle wieder einen großen Peak bei der Motorfrequenz und einen wesentlichen Peak bei der Rotorfrequenz besitzt. Die relativ großen Amplituden bei der Umdrehungsfrequenz könnten durch die Rotorunwucht entstanden sein. Das ist aber nicht der Fall, da die Messung der Phasenverschiebung zwischen der horizontalen X-Richtung und vertikalen Y-Richtung 160° beträgt, was eher auf eine Exzentrizität des Rotors hinweist.

Daraus kann man schließen, dass die Vibrationen sehr vom allgemeinen Zustand der Maschine abhängen. Ob die untersuchten Indikatoren der Vibration (RMS und Rotorpeak) mit dem Gesamtverschleiß korrespondieren, kann hier nicht endgültig bestimmt werden, da u.a. das Produkt bei den Messungen immer eine zusätzliche Variable war. Selbst wenn das nicht der Fall wäre, ist die Abhängigkeit vom reinen Mahlraumvolumen, d.h. bei einer symmetrischen Abnutzung des Rotors, schwierig zu untersuchen. Das ist allerdings nicht so wichtig, da das Mahlraumvolumen sowieso regelmäßig und genau gemessen werden muss (s. Kap. 2.8). Einige Vorschläge für die weitere Untersuchung die-

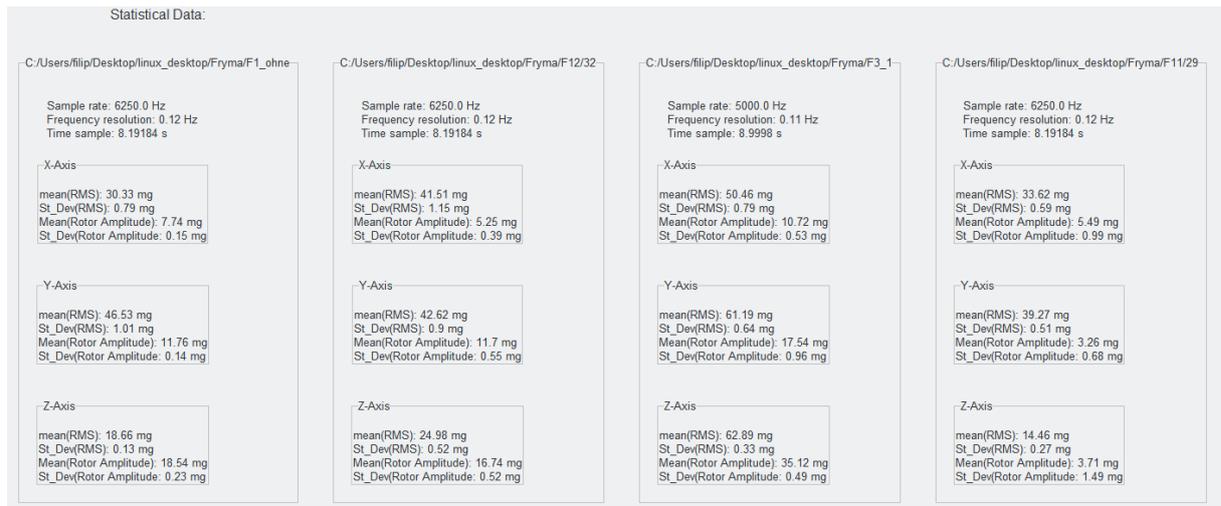


Abbildung 67: Ein Vergleich statistischer Daten von vier CoBall-Mühlen, die unterschiedliche Mahraumvolumina haben. F01, F12, F03, F11

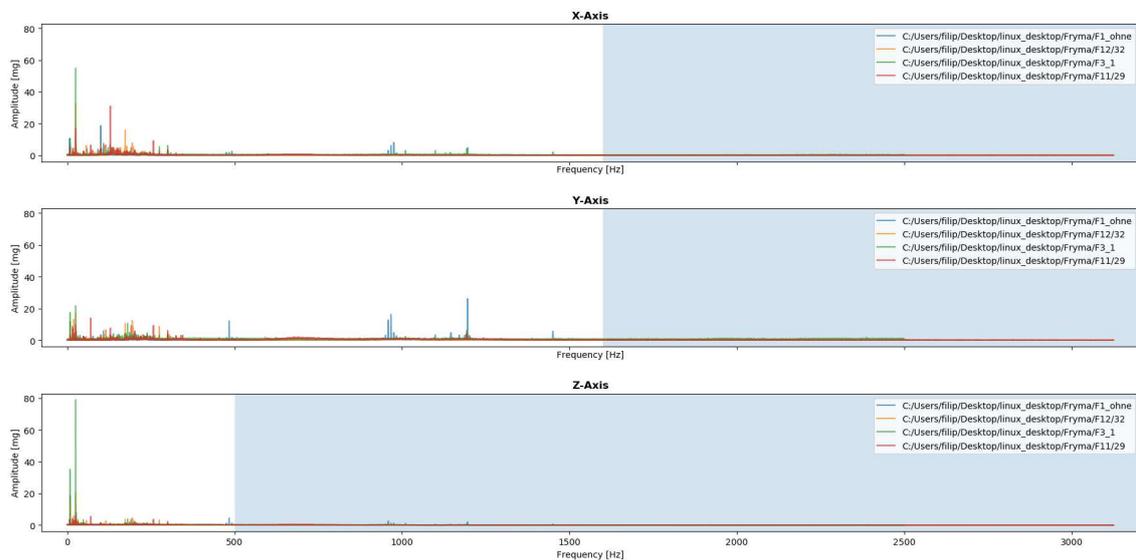


Abbildung 68: Gemittelte FFT-Spektrum von vier verschiedenen Mühlen. F01, F12, F03, F11.

ser Abhängigkeit sind im Kap. 5.2.9 zu finden. Die Abhängigkeit vom Produkt wird im nächsten Unterkapitel diskutiert.

Hier diskutiert man nur noch kurz über den Einfluss der Turbulenzen des Produkt-Perlen-Gemisches auf die Vibrationen bei stark abgenutzten Mühlen. In diesem Fall sind die wahrscheinlichsten Indikatoren RMS-Werte. Um die eventuellen Turbulenzen mit den RMS-Werten in Beziehung zu setzen, ist eine Kooperation mit der Produktionsabteilung nötig, da die Mahldauer und die Produktqualität stark von der Fluidmechanik in der Mühle abhängen.

### 5.2.5 Mahlprodukt und Vibrationen

Es ist nicht ungewöhnlich, dass viele Produkte zweimal durch die Mühle gelassen werden. Um den Einfluss des Mahlprodukts auf die Vibrationssignatur der Mühlen zu untersuchen, wurden an zwei verschiedenen Tagen Messungen an demselben Produkt

durchgeführt (einmal während des ersten Durchlaufs und danach während des Zweiten). Die Produkteigenschaften (Partikelgröße, Viskosität) ändern sich mit der Mahldauer. Erwartet wurde, dass das auch die Vibrationssignaturen verändern würde. Die Messungen wurden für zwei verschiedenen Mühlen FM11, FM03 durchgeführt.

In der Abb. 69 sieht man das Ergebnis für die FM11. Die erste Messung (blau), die am ersten Tag entstanden ist, ist mit drei Messungen des zweiten Durchlaufs (orange, grün und rot) gemeinsam dargestellt. Die drei späteren Messungen wurden innerhalb einer halben Stunde gemacht. Die 16 Einzelmessungen aller vier Messvorgänge besitzen übliche Messabweichungen. Der Peak bei der Motorgrundfrequenz hat sich bei jeder Messung geändert. Zuerst wurde vermutet, dass ein schwerer angeschlossener Schlauch an der Statoroberfläche die Ursache sein könnte. Das wurde allerdings später entlarvt (s. Kap. 5.2.7). Die Peak-Variationen könnten möglicherweise auf unterschiedliche temporäre Belastungen des Antriebs zurückgeführt werden. Das ist aber auch eine reine Spekulation.

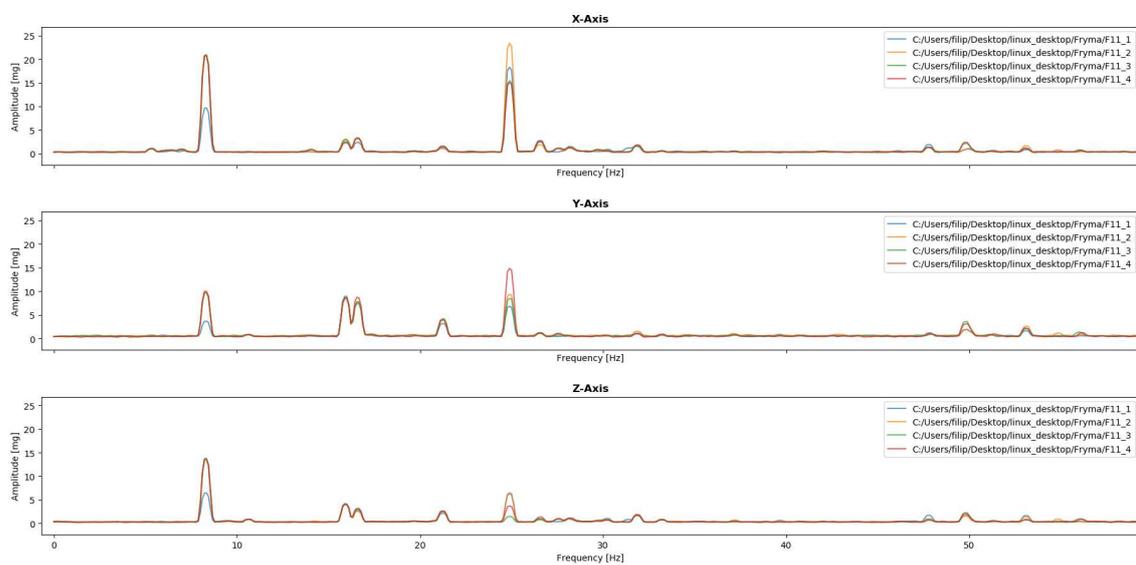


Abbildung 69: Ein Vergleich der Vibrationsspektren der Mühle FM11, deren Produkt unterschiedlich lang gemahlen wurde. Blau: der erste Tag. Orange, Grün und Rot: der zweite Tag

Der Peak bei der Umdrehungsfrequenz, der hier eigentlich von Bedeutung ist, war viel stabiler. Man kann den Unterschied zwischen dem ersten (blau) und dem zweiten (orange, rot, grün) Tag klar erkennen. Nebenbei sind alle drei Peaks vom zweiten Tag fast gleich. Das Problem hier ist, dass sich beim Mahlprozess die Viskosität normalerweise erhöht. Da eine höhere Viskosität in der Regel einen höheren Dämpfungskoeffizienten verursacht, wurde hier eine Verminderung des Peaks am zweiten Tag erwartet. Man darf aber nicht vergessen, dass die Mühle ein komplexeres System ist, in dem sich die Perlen befinden, deren Bewegung auch von der Viskosität und anderen Parameter abhängt (s. Kap. 1.2.2). Außerdem haben sich die Standardabweichungen im zweiten Tag um einen Faktor 4 bis 5 verringert. Das weist auf den Einfluss der Produktzustand (grob gegen fein) auf die Stabilität der Amplituden hin. Man kann auf jeden Fall daraus schließen, ohne die Gründe komplett zu verstehen, dass das Produkt hier einen Einfluss auf den sehr wichtigen Peak der Umdrehungsfrequenz hat.

In den Spektren der beiden FM03-Messungen (Abb. 70) bemerkt man dagegen keinen großen Unterschied. Der Rotorpeak ist dort sogar identisch, was bedeutet, dass sich die Dynamik der Defekte, die den Peak verursachen überhaupt nicht geändert hat.

Die RMS-Werte sind auch gleich geblieben.

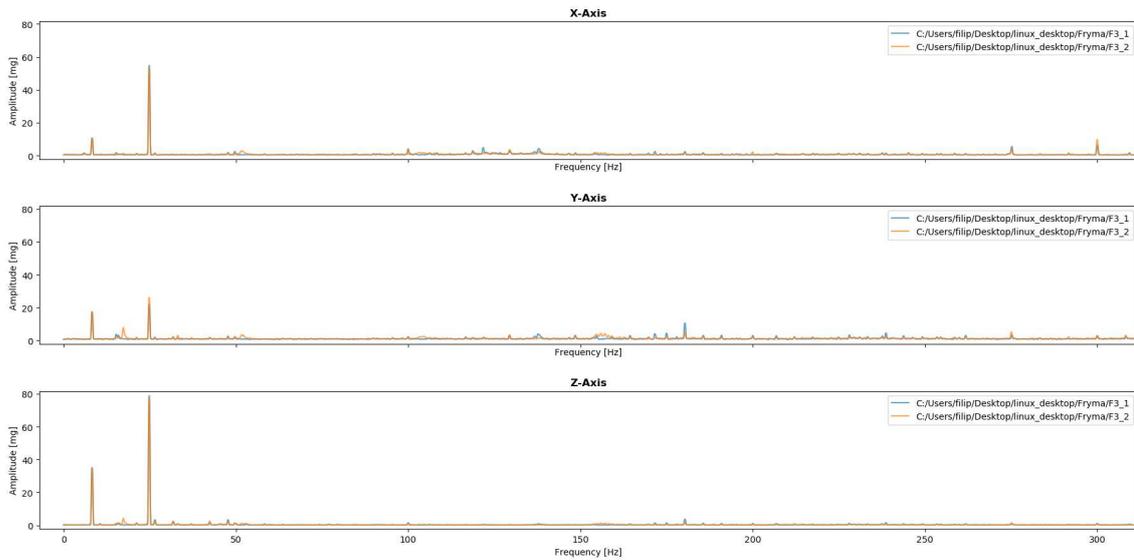


Abbildung 70: Ein Vergleich der Vibrationsspektren der Mühle FM03, deren Produkt unterschiedlich lang gemahlen wurde. Blau: der erste Tag. Orange: der zweite Tag

Im Kap. 5.2.7 wird aus anderen Gründen erneut die FM11-Mühle gemessen und der Rotorpeak bei einem neuen Produkt hat wieder eine verschiedene Größe aufweist.

Obwohl es aus obigen Messungen nicht klar ist, wie genau die Produkteigenschaften mit den Vibrationen zusammenhängen, ist die Benutzung einer derselben Suspension bei der Vergleichsmessungen einer Mühle über die Zeit sehr ratsam (s. Kap. 5.2.9).

### 5.2.6 Untersuchung der Phasenverschiebung und Rotorunwucht

Da die Änderung der Rotorgeschwindigkeit ohne speziellen Ausrüstung (VFD) nicht möglich ist, bleibt nur eine Möglichkeit für die Unterscheidung der Unwucht von anderen Defekten übrig. Man muss also die Messung der Phasenverschiebung zwischen X- und Z- Amplitudenmesswerten der radialen Ebene bei der Umdrehungsfrequenz durchführen.

Mühle Nr.	Phasenverschiebung in radialer Ebene für 16 Einzelmessungen [°]	$\mu$ (X)	$\sigma$ (X)	$\mu$ (Z)	$\sigma$ (Z)	V
FM01	[130, 130, 129, 130, 129, 129, 130, 129, 129, 129, 131, 131, 130, 130, 130]	7,78	0,1	18,39	0,15	11,6
FM03	[167, 166, 166, 166, 165, 162, 166, 164, 164, 165, 165, 166, 168, 164, 163, 165]	10,55	0,28	34,98	0,47	12,7
FM04	[155, 153, 152, 155, 153, 156, 155, 153, 153, 155, 155, 154, 153, 155, 155, 154]	12,35	0,37	35,77	0,36	12
FM07	[167, 169, 170, 169, 169, 170, 167, 170, 165, 167, 169, 165, 165, 169, 169, 168]	16,21	0,47	35,56	1,25	10,1
FM08	[89, 91, 93, 91, 88, 85, 89, 81, 81, 80, 80, 86, 81, 86, 86, 94]	6,9	0,47	9,92	0,57	10,8
FM11	[95, 96, 96, 95, 98, 99, 98, 98, 98, 97, 96, 99, 99, 100, 101, 102]	9,34	1,07	6,25	0,56	10,6
FM12	[176, 176, 175, 179, 171, 179, 163, 179, 165, 179, 172, 178, 175, 167, 179, 165]	5,12	0,48	17,12	0,99	11,6
FM13	[19, 37, 128, 41, 94, 57, 18, 4, 37, 101, 86, 15, 28, 78, 79, 4]	2,71	0,6	2,05	0,6	11,8
FM14	[13, 12, 4, 3, 15, 1, 10, 10, 8, 12, 16, 30, 34, 20, 22, 20]	1,89	0,53	30,9	1,54	11,8

Abbildung 71: Zusammenfassung von allen gemessenen Phasenverschiebungen der CoBall-Mühlen. Alle 16 Einzelwerte wurden gegeben. Im weiteren Spalten sind nur die Mittelwerte der Rotoramplitude und ihre Standardabweichungen in [mG] zu finden.

Die Ergebnisse für alle gemessenen Mühlen sind in der Abb. 71 zusammengefasst. Der zweite Spalt beinhaltet die Phasenverschiebungen zwischen X- und Z-Achse für alle 16 Einzelmessungen pro Mühle. In weiteren Spalten sind die gemittelte Amplituden und

ihre Standardabweichungen in [mG] für X- und Z-Achse bei der Umdrehungsfrequenz des Rotors und das Mahlsplattvolumen für je Mühle angegeben. Daraus ist sofort ersichtlich, dass, außer bei der Mühle FM13, die Phasenverschiebung sehr wenig pro Einzelmessung variiert. Die FM13 war schon im Unterkapitel 5.2.4 behandelt und dort wurde ein riesiger Peak (Abb. 61) bei der Motorfrequenz gefunden. In der Abb. 72, oben sieht man, wie die deutlich kleinere Peaks der Umdrehungsfrequenz für alle 16 Einzelmessungen ausschauen. Das umgebende Rauschen ist so groß, dass die genaue Messung unmöglich war. Zuerst wurde gedacht, dass das Leakage vom Motorpeak ein so schlechtes Ergebnis verursacht, aber nach der Anwendung des Anti-Leak-Algorithmus auf den Motorpeak (25 Hz, s. Abb. 72, unten) haben sich auch die 8,3 Hz-Peaks bei der Z-Achse verkleinert. Mit einer gemittelten Amplitude von 1,07 mG und ihre Standardabweichung von 0,41 mG kann man keine vernünftigen Phasenverschiebungswerte bekommen. Ähnlich ist es auch bei der Mühle FM14, die im Vergleich zur FM13 wesentlich kleinere Abweichungen (bis 35°) zwischen Einzelmessungen aufweist. Diese Schwankungen der Phasenverschiebung sind aber deutlich größer als bei anderen Mühlen. Der Sensor liest entlang der X-Achse bei der FM14 eine gemittelte Amplitude von 1,89 mit der Standardabweichung von 0,53. Um die Phasenverschiebung zwischen X- und Z-Achse bei einem Peak genau zu messen, ist ein höheres Verhältnis zwischen der gemittelten Amplitude und ihrer Standardabweichung bei diesem Peak erforderlich. Da die Standardabweichung durch das Umgebungsrauschen bestimmt wird, braucht man je nach der Menge des Rauschens eine höhere Amplitude des zu untersuchenden Peaks, um diese Messung durchzuführen. In dem Kap. 5.2.5 hat man gesehen, dass die Amplitude bei der Umdrehungsfrequenz möglicherweise durch die Produktauswahl gesteuert werden könnte.

Die Mühlen FM03, FM04, FM07, FM12 haben sehr unterschiedliche Mahlraumvolumina und ähnliche Phasenverschiebungen von 160° bis 180°. In der Praxis weist das auf andere Defekte, wie Exzentrizität oder gekrümmte Welle hin. Idealerweise würde das bedeuten, dass die Rotoren von allen diesen Mühlen bisher nur symmetrisch abgenutzt wurden. Das ist aber wahrscheinlich nicht der Fall, da eine kleinere Menge der Unwucht leicht unter diesen anderen Defekten verborgen werden könnte. Man kann aber behaupten, dass bei diesen Mühlen keine Unwucht vom Rotor mit einer Intensität vorhanden ist, die die anderen Defekten überwiegen kann. Die gemittelten Amplituden in alle Richtungen bei der untersuchten Frequenz beschreiben die Intensität von vorhandenen Defekten. Solange diese anderen Defekte überwiegen, kann man wenig über den Grad der Unwucht des Rotors mit dieser Methode sagen. Eine Untersuchung und Verfolgung im Laufe der Zeit könnte hier helfen. Mehr darüber wird im nächsten Unterkapitel diskutiert.

Im Gegensatz dazu kann man für die Mühlen FM08 und FM11 und möglicherweise die Mühle FM01 einen überwiegenden Unwucht diagnostizieren. Das bedeutet, wie im Kap. 3.4 erklärt, dass der Peak bei der Umdrehungsfrequenz hauptsächlich durch die Asymmetrie des Rotors entstanden ist. Zudem sind hier diese Amplituden ein Indikator für den Asymmetriegrad des Rotors und folglich, indirekt, für die Wahrscheinlichkeit für einen frühzeitigen Wandbruch. Dabei ist immer die Amplitude aus axialer Richtung auch wichtig, da es hier um einen fliegend gelagerteren Rotor geht.

Die Rotoramplituden (bei der Umdrehungsfrequenz) der Mühlen FM08 und FM11 sind (samt Y-Richtung) kleiner oder ungefähr gleich den Rotoramplituden anderer Mühlen. Sie sind aber potentiell viel gefährlicher, da die Unwucht überwiegend ihre Ursache ist. Für jeden Vergleich muss man auch das Mahlraumvolumen betrachten. Je größer es ist, desto problematischer sind die Vibrationen, weil ein Wandbruch immer wahrscheinlicher ist.

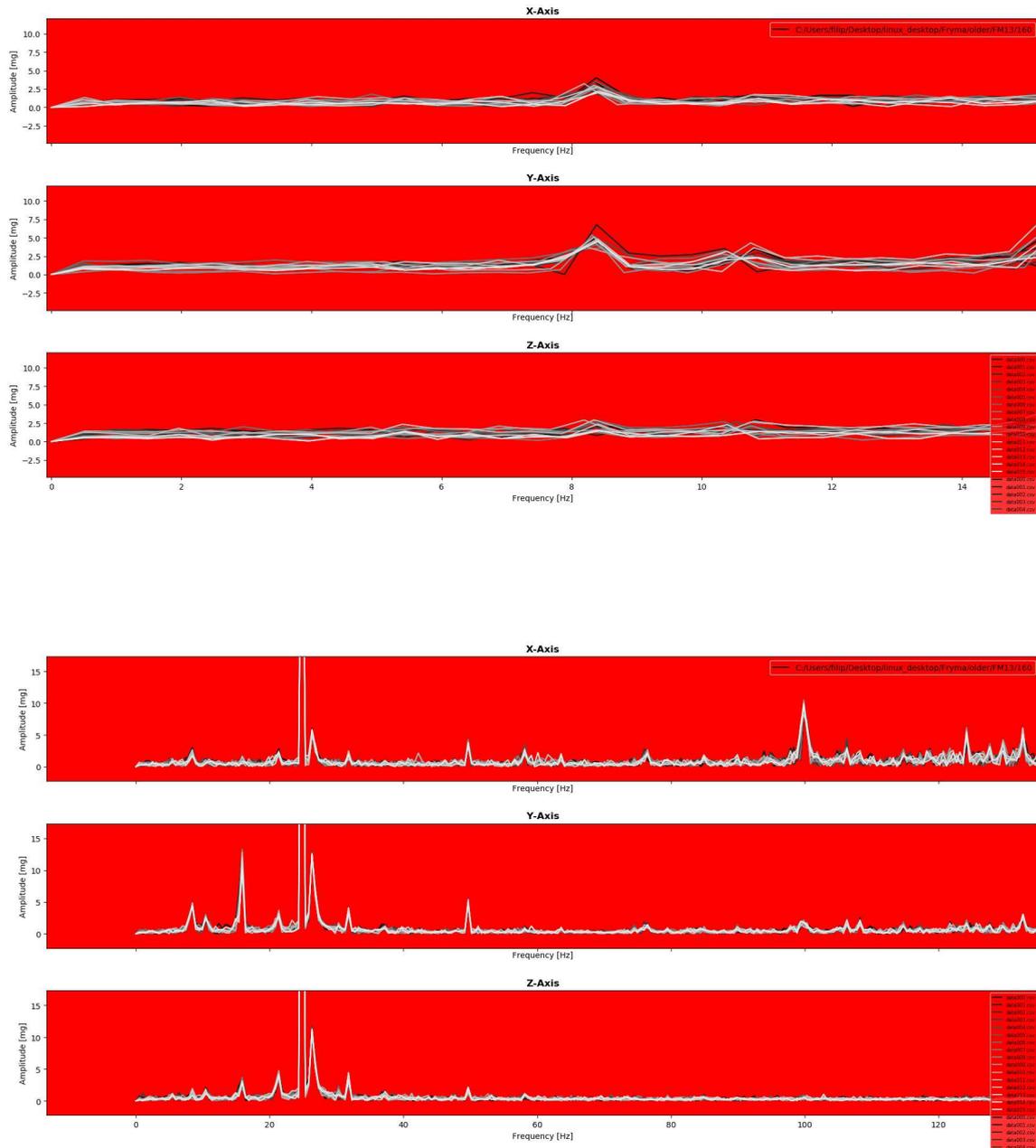


Abbildung 72: Untersuchung der möglichen Gründe für die Schwankung der Phasenverschiebung bei der Mühle FM13. Oben: Mit dem Leakage vom großen Motorpeak. Unten: das Leakage wurde mit dem Anti-Leak-Algorithmus entfernt.

Im Folgenden betrachtet man noch die Tabelle in der Abb. 73. Hier ist die Abhängigkeit der Phasenverschiebung von verschiedenen Messungen an denselben Mühlen angezeigt. Die Messung wurde bei den Mühlen FM07 und FM12 in einem kürzeren Zeitraum wiederholt. Erwartungsgemäß sind keine Änderungen sichtbar. Bei der FM03 und FM11 wird, wie im vorigen Unterkapitel beschrieben, die Messung desselben, doppelt gemahlten Produktes an zwei verschiedenen Tagen durchgeführt. Für die FM03 hat sich die gemittelte Phasenverschiebung um ca.  $4^\circ$  verringert und für FM11 um mehr als  $10^\circ$  vergrößert. Dabei haben die Messungen für die FM11 Nr. 2, 3, 4, die alle nacheinander gemacht wurden fast gleiche Phasenverschiebungen. Wieder bekommt man also wider-

Mühle Nr.	Messung Nr.	Phasenverschiebung in radialer Ebene für 16 Einzelmessungen [°]	$\mu$ (X)	$\sigma$ (X)	$\mu$ (Z)	$\sigma$ (Z)
FM03	1	[167, 166, 166, 166, 165, 162, 166, 164, 164, 165, 165, 166, 168, 164, 163, 165]	10,55	0,28	34,98	0,47
FM03	2	[161, 161, 160, 163, 159, 160, 160, 161, 160, 162, 162, 163, 160, 162, 162, 160]	10,62	0,21	34,58	0,5
FM07	1	[167, 169, 170, 169, 169, 170, 167, 170, 165, 167, 169, 165, 165, 169, 169, 168]	16,21	0,47	35,56	1,25
FM07	2	[171, 170, 169, 172, 170, 168, 169, 169, 169, 167, 170, 172, 169, 171, 172, 174]	16,6	0,24	36,24	0,89
FM11	1	[95, 96, 96, 95, 98, 99, 98, 98, 97, 96, 99, 99, 100, 101, 102]	9,34	1,07	6,25	0,56
FM11	2	[111, 108, 108, 109, 109, 109, 110, 110, 108, 110, 108, 110, 109, 109, 109]	20,78	0,19	13,63	0,15
FM11	3	[109, 108, 109, 109, 108, 109, 109, 108, 109, 109, 107, 108, 108, 109, 108, 109]	21	0,15	13,89	0,13
FM11	4	[108, 108, 108, 107, 107, 107, 107, 106, 107, 107, 107, 106, 107, 107, 108, 106]	20,75	0,14	13,68	0,15
FM11	5	[51, 100, 53, 102, 58, 105, 53, 102, 56, 99, 64, 96, 83, 93, 87, 83]	5,23	1,04	3,64	1,51
FM11	6	[95, 90, 83, 105, 67, 107, 50, 101, 75, 93, 95, 75, 106, 46, 103, 65]	5,34	1,14	3,78	1,19
FM12	1	[176, 176, 175, 179, 171, 179, 163, 179, 165, 179, 172, 178, 175, 167, 179, 165]	5,12	0,48	17,12	0,99
FM12	2	[160, 177, 159, 179, 158, 178, 157, 176, 156, 175, 165, 175, 163, 179, 161, 178]	5,21	0,33	16,67	0,34

Abbildung 73: Untersuchung der Abhängigkeit der Phasenverschiebungen von Produktparametern. Die Tabelle zeigt die Werte der Phasenverschiebung bei verschiedenen Messungen derselben Mühlen

sprüchliche Ergebnisse für diese zwei Mühlen, die auf dieselbe Weise untersucht werden. Man sieht aber hier (Abb. 71), dass die Defekte bei diesen Mühlen, die die Vibrationen erzeugen, unterschiedlich sind. Ihre Reaktion auf eine Änderung der Produkteigenschaften könnte daher auch anders sein. Anhand dieser Messung könnte man schließen, dass die Phasenverschiebung vom Produkt abhängig ist, aber das sollte keinen Einfluss auf die Diagnose eines Defektes haben, die durch die Phasenbetrachtung gestellt wurde

Die Messungen Nr. 5 und 6 der Mühle FM11 wurden später bei einem völlig anderen Produkt durchgeführt. Obwohl die meisten Werte hier um 90° schwanken, zeigen einige Einzelmessungen einen Phasenunterschied von weniger als 60°. Das kann auch durch die Berücksichtigung der Verhältnisse von der gemittelten Amplitude und ihrer Standardabweichung bei der Umdrehungsfrequenz erklärt werden. Die Produktauswahl ist nicht nur für die einzelnen Messwerte wichtig, sondern auch für eine erfolgreiche Messung, weil bei einem falsch ausgewählten Produkt die Messung überhaupt nicht durchgeführt werden kann.

### 5.2.7 Statorasymmetrie

Inspiziert vom merkwürdigen Verhalten (FM11-Mühle) des Peaks bei der Motorfrequenz im Kap. 5.2.5 wurde eine Untersuchung der Vibrationen bei einer künstlichen Statorbelastung durchgeführt. Bei drei Mühlen (FM01, FM11, FM12) wurde eine Masse von ca. 1 kg mit Magneten auf den Stator befestigt und der Unterschied zu dem normalen Fall (ohne Masse) untersucht. Die zusätzliche Masse hat fast keine Änderungen der FFT-Spektren verursacht. Die Peaks, die sich unterscheiden, sind sehr klein und variieren stark innerhalb der 16 Einzelmessungen. Außerdem liegen sie bei jeder Mühle auf unterschiedlichen Frequenzen. Sie sind also nicht durch den zusätzlichen Last entstanden. In der Abb. 74 sind drei FFT-Spektren der FM11-Mühle dargestellt. Blau: ohne Last, Orange: mit Last und Grün: wieder ohne Last. Wenn sich ein Einschuss auf der Statoroberfläche befindet, ist eine viel kleinere Masse (einige Gramm) des Stators verloren. Anhand des oberen Experimentes, kann man schon erraten, dass die Detektion einer so kleinen Masse bei dem Stator wahrscheinlich nicht möglich ist. Das hängt auch davon ab, ob und wie viel turbulenter und chaotischer die Bewegung des Produkt-Perlen-Gemisches aufgrund eines Einschusses ist. Weitere Informationen zu den Vorschlägen für weitere Untersuchungen ist im Kap. 5.2.9 zu finden.

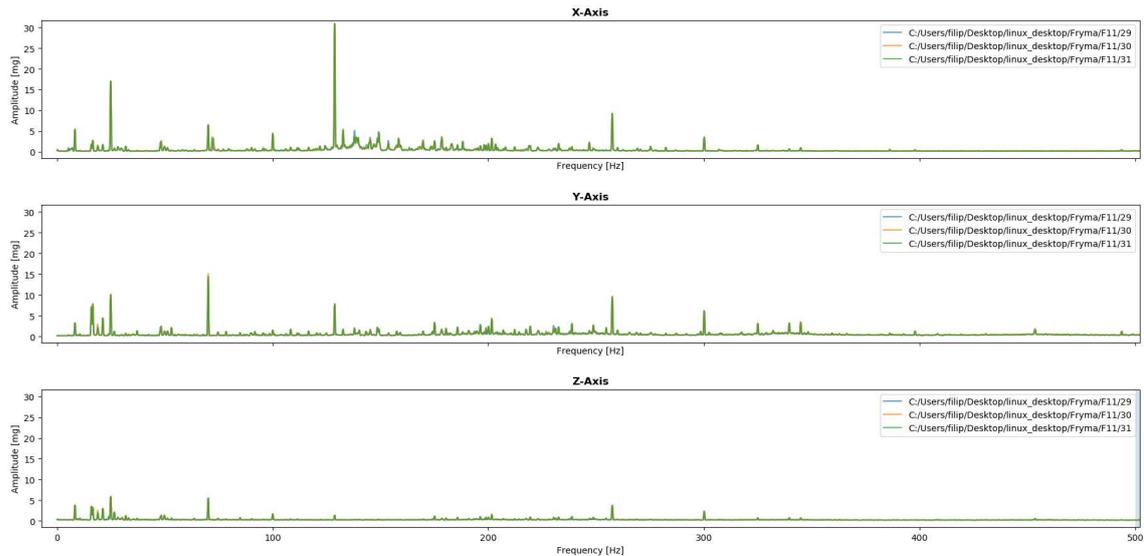


Abbildung 74: Messungen der Mühlenvibrationen unter dem Einfluss von einer zusätzlichen Masse an der äußeren Statoroberfläche. Blau und grün: ohne Last. Orange: mit Last

### 5.2.8 Vollrath-Perlmühlen

Die Rührwerkskugelmühle von Vollrath haben, wie im Kap. 1.2.1 beschrieben, zwei Kammern. In jede Kammer drehen sich ihre Rührwerke mit derselben Umdrehungszahl. Jeder Rührwerk hat also eine eigene Welle. Zwei Kammern einer Mühle wurden während des Betriebes nacheinander gemessen. In diesem Fall darf man auch nicht vergessen, dass die beiden Kammern das Produkt etwa unterschiedlicher Viskosität mahlen. Die Suspension geht aus der ersten Mühle direkt in die Zweite. Die Messungen wären auf jeden Fall genauer, wenn ein viskoses Lösungsmittel verwendet würde.

In der Abb 75 sieht man einen Vergleich zweier FFT-Spektren. Das Ergebnis wird herangezogen, da keine großen Amplituden über 1000 Hz sichtbar waren. Die Spektren unterscheiden sich deutlich im Mittenbereich (500-1000 Hz), wo die höheren Amplituden der ersten Mühle (blau) durch die unterschiedlichen Lagerzustände beider Wellen erklärt werden könnten [27].

Für eine Diskussion über den Verschleiß der Rührwerke ist die Abb. 76 übersichtlicher. Aufgrund der größeren Frequenzauflösung werden die ersten 50 Hz des FFT-Spektrums ohne Fensterfunktion angezeigt. Die erste große Amplitude bei ca. 17 Hz ist die Umdrehungsfrequenz des Rührwerks. Zufällig ist kein Leakage (s. Kap. 4.3.2) bei der Umdrehungsfrequenz anwesend. Man kann also ohne den Anti-Leak-Algorithmus (s. Kap. 4.3.3) fortfahren. Analog zu den obigen Messungen führt man eine Phasenmessung zwischen X- und Y-Achsen durch. Für den ersten Rührwerk ergibt sich für je Einzelmessung : 67, 69, 61, 76, 61, 79, 59, 75, 59, 66, 61, 61, 73, 56, 71, 55 und für den Zweiten: 97, 132, 121, 122, 133, 104, 130, 107, 130, 107, 130, 107, 130, 126, 118, 131, 99, 132, 118, 127. Die Amplitudengrößen sind ähnlich aber die Phasenunterschiede sind deutlich unterschiedlich. Eine erhebliche Asymmetrie ist aber bei den beiden Rührwerken wahrscheinlich anwesend, da diese Werten in den Bereich von  $90^\circ \pm 30^\circ$  fallen. Der Verschleiß beim Rührwerk ist aber nicht wirklich so relevant wie der Rotorverschleiß bei den CoBall-Mühlen, da es sich nicht um einen mit Kühlwasser gefüllten Hohlraum handelt. Ein Wandbruchgefahr besteht hier nur bei dem Stator. Der Statorverschleiß bzw. insbesondere problematische

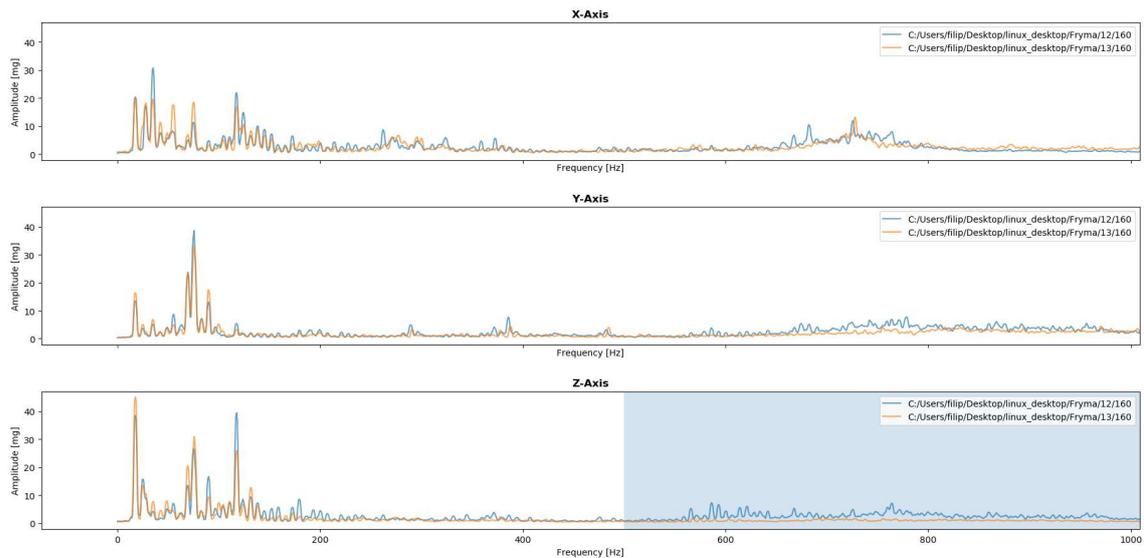


Abbildung 75: FFT-Spektren einer Vollrath-Mühle an zwei Kammer.

Statorasymmetrie (Einschusse usw.) kann jedoch genau wie bei den CoBall-Mühlen mit der Vibrationsanalyse wahrscheinlich nicht quantifiziert werden.

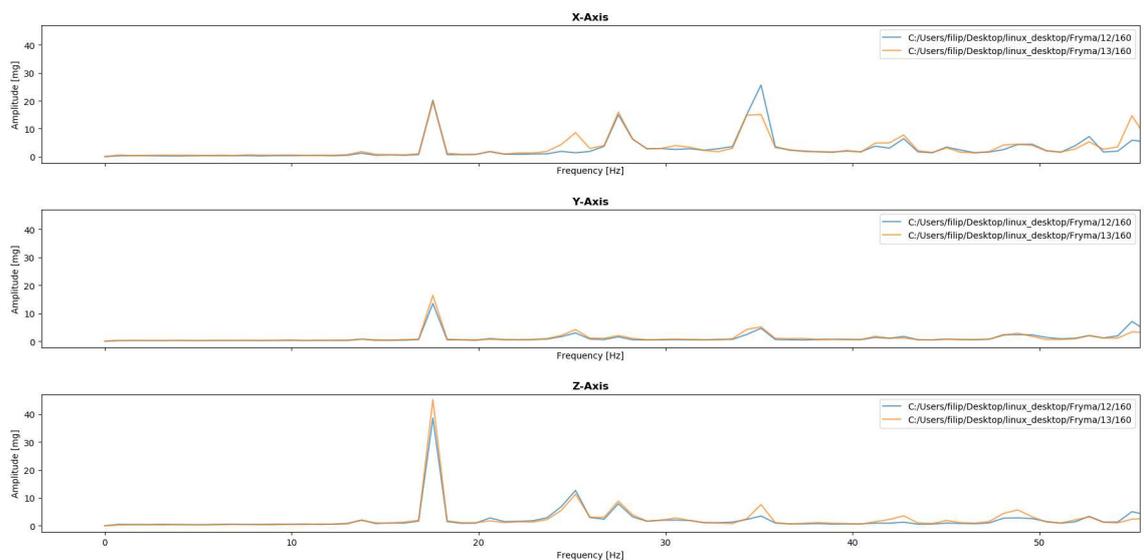


Abbildung 76: FFT-Spektren einer Vollrath-Mühle an zwei Kammer. Herangezoomt.

Wenn man doch an den Rührwerk und seine Asymmetrie interessiert ist, besteht das Problem darin, dass die beiden Kammern starr miteinander verbunden sind und folglich, dass sich die Vibrationen des ersten Rührwerks mit den Vibrationen des Zweiten überlagern können und umgekehrt. Wie groß diese Störung genau ist, kann man nur durch das Hochfahren der Kammern nacheinander untersuchen. Die Störvibrationen der ersten Kammer können dann an der Anderen gemessen werden. Laut der Instandhaltung ist so was aber nicht möglich. Das bedeutet aber nicht, dass die Vibrationsmessung für die Untersuchung des Rührwerks bei der Doppelkammer-Perlmühle ungeeignet ist. Das kann nur ein systematischer Vergleich der Vibrationssignaturen mit dem tatsächlichen Rührwerkszustand im Laufe der Zeit zeigen.

In der Abb. 77 sind die FFT-Spektren der zwei anderen Mühlenarten (blau-Longly und orange-Netzsch) dargestellt, die nicht im Rahmen dieser Arbeit untersucht wurden. Beide Arten sind horizontale Rührwerkskugelmühlen. Daraus ist ersichtlich dass der Sensor weit über die 1,6 kHz bzw. 500 Hz Grenze empfinden kann. Die Genauigkeit der Amplitudengrößen ist, auch wenn man die Verminderung durch den Tiefpass einrechnet, aber fragwürdig.

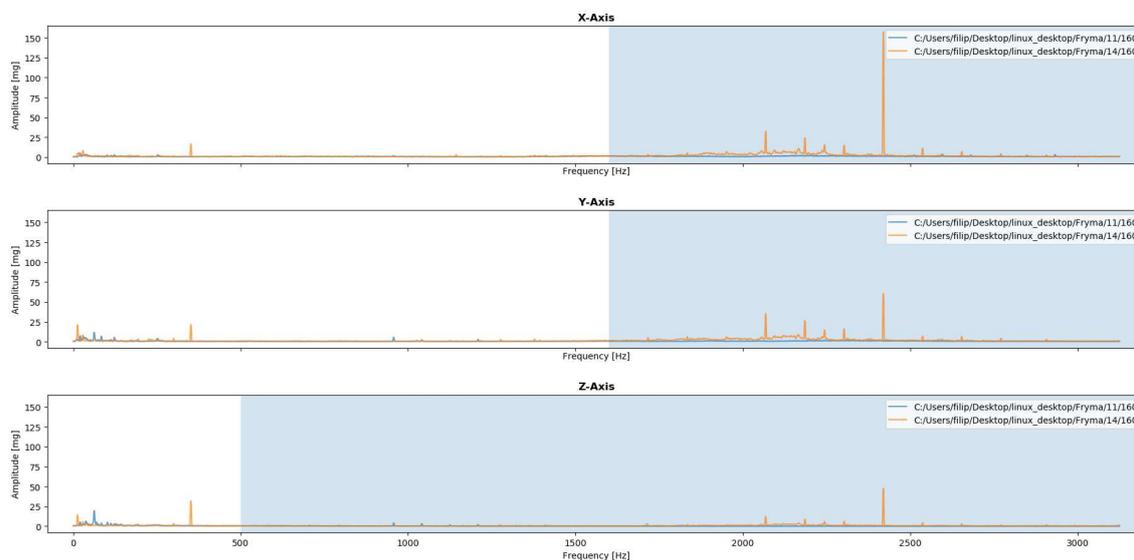


Abbildung 77: FFT-Spektren von der Longly- (blau) und Netzsch-Mühlen (orange).

### 5.2.9 Messstrategien für die weiteren Untersuchungen

Man hat in diesem Kapitel gezeigt, wie die Vibrationsanalyse für die Untersuchung vom Rotorverschleiß benutzt werden kann. Zwei Mühlen wurden dabei gefunden, bei denen ein asymmetrischer Rotor ganz sicher die Ursache des Vibrationspeaks bei der Umdrehungsfrequenz ist. Bei diesen Mühlen kann auch das Ausmaß der Asymmetrie bedingt quantifiziert werden. Problematischer sind die Mühlen, die andere große Defekte besitzen. Dort kann jedoch eine Änderung ihres Rotorpeaks und Phasenverschiebung im Laufe der Zeit ein Indikator für die vergrößerte Rotorasymmetrie sein. Das kann man nur über einen relativ großen Zeitraum untersuchen.

Viele Sachen bleiben ungeklärt:

- **Produkt- Perlenmenge-, Kühlwasser- und Pumpenabhängigkeit der Vibrationen.** Die Vibrationen, die vom Rotor stammen, müssen vom Dämpfungskoeffizient des Produktes abhängig sein. Die schon vorgenommenen Messungen können aber keine definitive Antwort geben. Es gibt Indikationen, dass die Produktabhängigkeit selbst von der Art des Defekts abhängt. Das soll aber weiter untersucht werden. Andere Parameter wurden nicht untersucht aber einige theoretische Überlegungen sind im Kap. 3.5 zu finden. Man kann alle diese Parameter künstlich gleich halten, um Messungen einer Mühle im Laufe der Zeit zu vergleichen. Deswegen ist das volle Verständnis dieser Parameter nicht notwendig. Wenn man aber sie besser kennen würde, wäre eine spezielle und umfangreiche Vorbereitung für die Vergleichsmessungen vielleicht nicht erforderlich.

- **Verhältnis zwischen der echten abgenutzten Menge des Rotors und der gemessenen Rotoramplitude.** Wenn die Unwucht eines Rotors und ihr Ausmaß festgestellt wurden, stellt sich die Frage, wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, dass dieser Rotor bis zur nächsten Überprüfung nicht aushaltet. Das hängt natürlich auch vom aktuellen Mahlpaltvolumen der Mühle ab. Eine endgültige Antwort kann nur die Erfahrung bereitstellen. Man kann aber die Unwucht weiter experimentell untersuchen, um darauf möglicherweise schneller antworten zu können (s. u.).
- **Einschüsse und ihre Detektion.** Ob und wie viel die relativ kleine Einschüsse (unter  $1\text{ cm}^3$  bzw. unter ca. 8 g), die im Laufe der Produktion entstehen können, die Unwucht des Rotors merkbar ändern, bleibt unbekannt. Im Modell aus dem Kap. 3.4 erzeugt eine Punktmasse von 10 g bei einer 89 kg schweren (im Kap. 2.8.1 abgeschätzte Rotormasse, ohne Wasser drinnen) rotierenden Scheibe ca. 8 mG große Beschleunigungsamplitude. Bei einer Scheibe größerer Masse, die einem mit Kühlwasser gefüllten Rotor entspricht, verringert sich die Amplitude um ca. 10%. Dabei ist die Punktmasse 25 cm (größter Rotordurchmesser) von der Drehachse entfernt. Die Dämpfung- und Federkonstanten werden dabei grob abgeschätzt. Diese Amplitudenänderung ist mehr als genug, um mit dem vorhandenen Gerät detektiert zu werden. Das hängt natürlich auch von den anderen potentiellen Defekten in der Mühle ab. Ob dieses, sehr vereinfachte Modell mit dem deutlich komplizierteren System, hinsichtlich zumindest der Größenordnung der entstandenen Amplituden vergleichbar ist, kann nur experimentell untersucht werden.
- **Einfluss des gesamten Mahlraumvolumens auf den Rotorpeak.** Obwohl theoretisch keine großen Einflüsse bei einer nicht turbulenten Strömung zu erwarten sind (s. Kap. 3.5), sind weitere empirische Untersuchungen wegen einer genaueren Bestimmung des Rotorpeaks empfehlenswert.
- **Einfluss der Turbulenzen vom Produkt-Perlen-Gemisch auf das Vibrationsspektrum.** Die Turbulenzen sind bei einer stark abgenutzten CoBall-Mühle zu erwarten (s. Abb. 1.2.2). Wenn man sie erkennen könnte, würden die Mühlen identifiziert, die ab diesem Zeitpunkt eine viel höhere Verschleißrate aufweisen. Das wäre für die Verhinderung eines Wandbruchs von großer Bedeutung.
- **Die Unwucht der Mühlen mit anderen überwiegenden Defekten,** bzw. wie eine Vergrößerung der Unwucht die Mühlen mit anderen Defekten beeinflusst. Das kann entweder durch die Verarbeitung der Daten, die von vielen Messungen im Laufe der langen Zeit gesammelt wurden, oder eventuell durch das Einsetzen einer Serie von Experimenten (s.u.) beantwortet werden. Man darf aber nicht vergessen, dass manchmal auch die anderen Defekte entstehen, die die Messungen einer Mühle im Laufe der Zeit stören können. Hier kann nur die langjährige Untersuchung helfen.
- **Statorasymmetrie.** Bisher wurden keine Indikationen gefunden, dass eine asymmetrische Belastung des Stators irgendwas messbares auf dem Vibrationsspektrum ändert. Physikalisch ist es auch sinnvoll, dass der Stator keinen direkten Einfluss auf die Vibrationen hat. Darüber wurde im Kap. 3.5 auch diskutiert. Da für den Stator keine Lösung ohne Demontage gefunden werden konnte und da es noch nicht klar ist, ob und wie ein Einschuss auf der Statoroberfläche das Spektrum verändert, ist eine weitere Untersuchung des Vibrationsspektrum bei der Mühlen mit solchen Ein-

schüssen empfehlenswert. Einschüsse könnte man auch künstlich im alten Statoren erstellen.

- **Unwucht des Rührwerks beim Vollrath.** Die zweite Mühlenart wurde nur wenig untersucht. Die ersten Daten zeigen dass die Phasenverschiebung relativ stabil bleibt. Ferner ist sie sogar bei beiden Kammern an der Grenze für eine Unwucht-Diagnose. Das Problem ist, wie im Kap. 5.2.8 erklärt, dass hier nur der Stator hinsichtlich des Wandbruchs problematisch ist. Hier gibt es noch wenige Chancen, einen Einschuss oder Asymmetrie bei dem Stator zu detektieren, da, wegen der viel chaotischeren Bewegung im Mahlraum, ein Einschuss keine Änderung der Fluidmechanik erzeugen würde. Die Rührwerke kann man dagegen untersuchen. Man muss aber dabei auch beachten, dass beide Kammer starr verbunden sind. Weitere Untersuchungen des Störungsfaktors einer Kammer auf die Andere müssen noch durchgeführt werden. Wenn das geklärt würde, könnte man den Rührwerkverschleiß bzw. seine Asymmetrie quantifizieren.

Folgende weitere Messungen kann man durchführen, um einige Unklarheiten aus der obigen Liste besser zu verstehen.

- **Messung aller Mühlen bei möglichst identischen Produkt- und Betriebsparametern.** Hier kann ein Zeitnullpunkt für die weitere Messungen gestellt werden. Alle Mühlen haben schon einen, fast gleichen Anteil der Mahlperlen im Mahlraumvolumen, da das sehr wichtig für die Produktion ist. Die Perlen werden also relativ oft nachgefüllt. Als Produkt könnte man möglicherweise ein hochviskoses Lösungsmittel benutzen. Dann kann die Kühlwasserzufuhr temporär abgedreht und dadurch sein potentieller Einfluss auf die Messung auch eliminiert werden. Der durch die Pumpe entstandene Durchfluss sollte auch für jede Mühle konstant sein. Eventuell könnte eine weitere Untersuchung des Einflusses der Produkt- und Betriebsparameter auf das Vibrationsspektrum dazu führen, dass eine Vorbereitung für jede Vergleichsmessung überhaupt nicht mehr nötig sein wird. Bis dann sollten diese Parameter, auch für alle unten vorgeschlagenen Messungen selbstverständlich möglichst gleich gehalten werden.
- **Untersuchung der Einflüsse des Mahlraums auf Vibrationen.** Dabei misst man nach normalen Vibrationsaufnahmen das Vibrationsspektrum der Mühle mit dem demontierten Stator. Also man misst effektiv nur den rotierenden Rotor. Dadurch würde man besser verstehen, wie die komplizierte Fluidmechanik im Mahlraum die Ergebnisse beeinflusst. Wenn man dazu eine mit Unwucht diagnostizierte Mühle mit zwei unterschiedlichen Statoren, die erheblich verschiedene Abnutzungsgrade aufweisen, misst, bekommt man Informationen über den Einfluss des Mahlraumvolumens oder der Statortopologie auf den Rotorpeak.
- **Untersuchung der Turbulenzen vom Produkt-Perlen-Gemisch auf das Vibrationsspektrum.** Diese Untersuchung ähnelt der Untersuchung der Einflüsse des Produktes. Hier sollte man aber die Mühlen anschauen, bei denen ein wesentlich schlechteres Mahlergebnis gemeldet wurde.
- **Messung einer Mühlen mit zwei unterschiedlichen Rotoren.** Man wählt eine Mühle, die überwiegend wegen der Rotorunwucht vibriert und deren Vibrationen generell klein sind. Also die Mühle in einem guten Zustand hinsichtlich aller Komponenten (Welle, Motor, Pumpe, Befestigung usw.), z.B die Mühle FM08. Nach

dem Einsetzen eines noch asymmetrischeren alten Rotors, misst man die Änderung der Amplitude und Phasenverschiebung bei der Umdrehungsfrequenz. Die Asymmetrie dieses alten Rotors kann z.B durch die Anwendung eines 3D Scanners sehr genau charakterisiert und mit dem anderen ausgebauten Rotor verglichen werden. Weiters kann durch eine künstliche Erzeugung eines Einschusses auf der Oberfläche eines alten Rotors auch eine Änderung der resultierenden Amplitude bei der Umdrehungsfrequenz untersucht werden. Dabei sollte man unbedingt einen leeren Rotor (ohne Kühlwasser) messen, da sich dann die Amplitude erheblich vergrößern kann (beim Modell aus 3.4 sogar um 12,5%).

- **Messung eines Rotors mit zwei unterschiedlichen Mühlen.** Hier kann man den Einfluss von anderen Defekten, die z.B durch die Welle, Antrieb, Befestigung und Position der Mühle entstanden sind und die die Vibrationsamplitude des Rotorpeaks beeinflussen, auf die Detektion der Unwuchtgrad eines alten asymmetrischen Rotors untersuchen. Ein alter, stark asymmetrischer Rotor, der auch künstliche (oder natürliche) Einschüsse besitzen könnte, kann auch, im Gegensatz zum vorigen Experiment, in einer defekten (im Sinne der Vibrationen beim Rotorpeak) Mühle eingebaut werden. Die Änderungen des Peaks und Phasenverschiebung können dann auch bei der Anwesenheit anderer Defekte untersucht werden.
- **Vergleich der Vibrationsanalyse mit den Demontage-Methoden, insbesondere aus den Kapiteln 2.12, 2.12.1, 2.13.** Vor jeder Demontage misst man die Vibrationen der Mühle und vergleicht mit dem mithilfe z.B. eines 3D-Scanners rechnerisch erhaltenen Massenschwerpunkt und mit der gesamten Geometrie der Bauteile. Dadurch untersucht man nicht nur die Abhängigkeit des Vibrationsspektrums von der tatsächlichen Asymmetrie, sondern auch das Verhältnis zwischen dem Asymmetriegrad und der Wanddicke im asymmetrischen Bereich.
- **Untersuchung der weiteren Produkt- und Betriebsparameter:** Messungen bei unterschiedlicher Pumpenleistung, Mahlperlenmenge, Produktviskosität und -dichte. Dazu können noch weitere Einflüsse der Kühlwasserströmung (außer der offensichtlichen Massenvergrößerung des Rotors) untersucht werden.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Nach einer umfangreichen Literaturrecherche kann man schließen, dass derzeit keine Methode existiert, die ohne Demontage der Mühle die Wanddicke direkt messen kann.

Die Ergebnisse dieser Arbeit können in zwei Kategorien zusammengefasst werden, deren Kombination die schon bestehende Strategie der Instandhaltung wesentlich verbessern kann.

Die erste Kategorie sind die Methoden und Ansätze der Verschleißverfolgung, die ohne aufwendige Demontage und mit wenigen Kosten durchgeführt werden können. Derzeit wird in dieser Kategorie nur das Auslitern benutzt. Diese Methoden können aber die Wanddicke nicht wirklich messen, sondern nur eine Wahrscheinlichkeit für den Wandbruch geben:

- Datensammlung beim Auslitern für die Trendanalyse der Abnutzung bei verschiedenen Mühlen.
- Messung der elektrischen (oder noch besser mechanischen) Leistung, die u.a. direkt von dem Abnutzungsgrad der Mühle abhängt.
- Kooperation mit der Produktionsabteilung, die die durch den Verschleiß verursachten Änderungen der Produktqualität sofort merken kann.
- Einsetzen und weitere Untersuchung der Vibrationsanalyse.

In der zweiten Kategorie sind die Methoden, die nach Demontage eingesetzt werden können, um die derzeit verwendete, wenig effiziente Ultraschallmessung zu komplementieren. Die Methoden sind etwa teurer, aber sie sind im Gegensatz zur obigen Kategorie ohne weitere Untersuchungen sofort einsatzbereit, da damit die Geometrie der Bauteile direkt gemessen wird und man nicht mehr über Wahrscheinlichkeiten sondern über tatsächliche Maße redet:

- 3D-Scanner, mit dem die ganze Oberfläche sehr präzise und in wenig Zeit gemessen werden kann.
- Gepulster Wirbelstrommessung, die die Ultraschallmessung bei der Untersuchung der durch den 3D-Scanner gefundenen Schwachstellen komplementieren kann.

## Literatur

- [1] R. Geisler. *Optimierter Einsatz von Ringspaltkugelmöhlen zur Nassvermahlung*. Chemie Ingenieur Technik, Vol.74, 2002, S.41-54.
- [2] Romaco GmbH. *FrymaKoruma Betriebsanleitung*. 2004.
- [3] A. Vetter, S. Ripperger, S. Antonyuk. *Magnetische Separation feinsten Partikeln aus Flüssigkeiten*. F&S Filtrieren und Separieren Nr.2, 2016, S.66.
- [4] A. Möhrle, S. Ripperger. *Abtrennung von Partikeln aus Schmier- und Hydraulikölen durch magnetische Separation*. F&S Filtrieren und Separieren Nr.6, 2010, S.290.
- [5] J. Asher, P.H. Schwabe. *Thin layer activation*. Industrial Lubrication and Tribology, Vol.40, 1988, S.4-7.
- [6] IAEA TECDOC SERIES. *Radiotracer Technologies for Wear, Erosion and Corrosion Measurement*. 2020.
- [7] K. A. Fowler, G. M. Elfbaum, K. A. Smith, T. J. Nelligan. *Theory and application of precision ultrasonic thickness gaging*. NDTnet, 1997, S.4-7.
- [8] Sauter GmbH. *Betriebsanleitung Digitales Ultraschall Materialdickenmessgerät*. 2014 .
- [9] M. T. M. Khairi et al. *Ultrasound computed tomography for material inspection: Principles, design and applications*. Measurement, Vol.146, 2019, S.490-523.
- [10] K.R. Leonard, E.V. Malyarenko, M.K. Hinders. *Ultrasonic lamb wave tomography*. Inverse Probl., Vol.18, 2002, S.1795–1808.
- [11] Innospection Ltd. *Pulsed Eddy Current Testing (PECT) Inspection Technique*. 2017.
- [12] TÜV Rheinland Sonovation B.V.. *Pulsed Eddy-Current (PEC) Inspection through Insulation*.
- [13] Y. Shin, D. Choi, Y. Kim, S. Lee. *Signal characteristics of differential-pulsed eddy current sensors in the evaluation of plate thickness*. NDTE International, Vol.42, 2009, S.215-221.
- [14] N. Weichert, M. Wülker. *Messtechnik und Messdatenerfassung*. Oldenbourg, 2000.
- [15] U. Beckert. *Drehstrom Skriptum für Nichtelektrotechniker*. 2001.
- [16] FLENDER LOHER Business Unit IM. *Technical List Industrial Motors IM 01 en*.
- [17] Österreichs Energie. *Statistik über die Spannungsqualität in Österreich*. 2019.
- [18] M. Khodapanah, A.F. Zobaa, M. Abbod. *Estimating power factor of induction motors at any loading conditions using support vector regression (SVR)*. Electr Eng, Vol.100, 2018, S.2579–2588.
- [19] M. Köberle, A. Mathes. *Mechanische Leistungsmessung an Antriebssystemen*. Sensor magazin, Nr. 2, 2017, S.23-24.

- [20] P. Allard, J. Lavoie. *Differentiation of 3D scanners and their positioning method when applied to pipeline integrity*. 9th Pipeline Technology Conference, Berlin, Germany, 2014, S.10.
- [21] M.C. Valigi, S. Logozzo, S. Affatato. *New Challenges in Tribology: Wear Assessment Using 3D Optical Scanners*. Materials (Basel, Switzerland), Vol. 10, S.548.
- [22] R. Schmitt, C. Isenberg. *Computertomografie für industrielle dimensionelle Messtechnik*. Technisches Messen, Vol.81, 2014, S.201–208.
- [23] J.P. Kruth, M. Bartscher, S. Carmignato, R. Schmitt, L. De Chiffre, A. Weckenmann. *Computed tomography for dimensional metrology*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol.60, 2011, S.821–842.
- [24] Y. Onel, U. Ewert. *Präzise Wanddickenmessung an In-liner-Rohrleitungen mit Hilfe der Projektionsradiographie*. ZfP in Anwendung, Entwicklung und Forschung, Berlin, Berichtsband 75, 2001.
- [25] U. Ewert et al. *Corrosion monitoring with tangential radiography and limited view computed tomography*. AIP Conference Proceedings Vol.1706, 2016, S.110003.
- [26] P.M. Esteves et al. *Predictive modelling of vertical steered mills liner wear using vibration signature analysis*. 11th International Comminution Symposium, Cape Town, South Africa, 2018.
- [27] P. Girdhar, C. Scheffer. *Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance*. Newnes Verlag, 2004.
- [28] B. Kiran Kumar, G. Diwakar, M.R.S. Satynarayana. *Determination of Unbalance in Rotating Machine Using Vibration Signature Analysis*. International Journal of Modern Engineering Research (IJMER), Vol.2, 2012, S.3415-3421.
- [29] V. Fedák, P. Záskalický, Z. Gelvanič. *Analysis of Balancing of Unbalanced Rotors and Long Shafts using GUI MATLAB*. MATLAB Applications for the Practical Engineer, Kelly Bennett, IntechOpen, 2014.
- [30] A. Hjort, M. Holmberg. *Measuring mechanical vibrations using an Arduino as a slave I/O to an EPICS control system*. FREIA Report, Nr.4, 2015.
- [31] V.K. Patel, M.N. Patel. *Development of Smart Sensing Unit for Vibration Measurement by Embedding Accelerometer with the Arduino Microcontroller*. International Journal of Instrumentation Science, Vol.6, 2017, S.1-7.
- [32] T. Chaitanya, G. Divyasree, P. Akshitha. *Vibration Analysis of DC Motor with ADXL335 and MATLAB*. International Journal of Engineering Research in Electrical and Electronic Engineering (IJEREEE), Vol.4, 2018, S.2395-2717.
- [33] A. Albarbar, S. Mekid, A. Starr, R. Pietruszkiewicz. *Suitability of MEMS Accelerometers for Condition Monitoring: An experimental study*. Sensors, Vol.8, 2008, S.784-799.
- [34] Analog Devices. *Small, Low Power, 3-Axis  $\pm 3$  g Accelerometer ADXL335*.
- [35] <https://vollrath-huerth.de/wp-content/uploads/perlmuehlen-ruehrwerkskugelmuehlen.pdf>

- [36] <https://imrsteel.com/de/how-to-identify-the-quality-of-seamless-steel-pipe/>
- [37] <https://www.olympus-ims.com/de/ndt-theory/thickness-gage/factors/>
- [38] <https://www.faro.com/de-de/produkte/3d-manufacturing/farogage/features/>
- [39] <http://www.xpertgate.de/produkte/Handgefuehrte-Koordinatenmessgeraete.html>
- [40] <https://www.industrial-production.de/sensorik—messtechnik/bilder/taktil>
- [41] <https://www.trimos.com/de/3d-messtechnik/tragbare-cmm>
- [42] <https://www.creaform3d.com/de/messtechnik/tragbares-koordinatenmessgeraet-cmm-handyprobe>
- [43] <https://www.artec3d.com/learning-center/how-choose-3d-scanner>
- [44] <https://all3dp.com/1/best-3d-scanner-diy-handheld-app-software>
- [45] <https://en.wikipedia.org/wiki/File:3-proj2cam.svg>
- [46] <https://reprap.org/wiki/Ciclop>
- [47] <https://sketchfab.com/3d-models/engine-block-3d-scan-e5968de5b81f4d0f8886427f4dd170e5>
- [48] <https://qualitech.ch/dienstleistung/ueberblick-industrielle-computertomographie-ict/s>
- [49] <https://www.bakerhughesds.com/waygate-technologies/radiography-ct/high-energy-ct-inspection>
- [50] <https://www.zeiss.com/metrology/products/systems/computed-tomography/metrotom.html>
- [51] <https://vibralign.com/condition-monitoring/how-to-differentiate-unbalance-and-looseness-on-the-spectrum/>
- [52] <https://forum.arduino.cc/index.php?topic=136500.0>
- [53] <https://community.sw.siemens.com/s/article/root-mean-square-rms-and-overall-level>
- [54] [https://media.noria.com/sites/web\\_exclusives/Ludeca\\_images100710.pdf](https://media.noria.com/sites/web_exclusives/Ludeca_images100710.pdf)
- [55] <https://scipy-cookbook.readthedocs.io/items/CoupledSpringMassSystem.html>
- [56] <https://www.pharma-food.de/muehle-coball-mill/>
- [57] K. May, J. Ashlers. *Magnetische Pigmente*. FH Münster, Präsentation, 2004.