



Diplomarbeit

**Implementierung eines Systems zur
Schwingungsüberwachung an Maschinen mit rotierenden
Bauteilen in den MVAs Spittelau und Flötzersteig**

erstellt für
Fernwärme Wien Gmbh

Vorgelegt von:

Alexander Simon Weiler 0535072

Betreuer/Gutachter:

Dipl.-Ing Alexander Kirchner
o.Univ.Prof.Dipl.Ing.Dr.mont. Werner L. Kepplinger

Leoben, 10. September 2010

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe

AFFIDAVIT

I declare in lieu of oath, that I wrote this thesis and performed the associated research myself, using only literature cited in this volume.

Datum

Unterschrift

Kurzfassung

Implementierung eines Systems zur Schwingungsüberwachung an Maschinen mit rotierenden Bauteilen in den MVAs Spittelau und Flötzersteig

Diese Arbeit wurde im Zuge der Implementierung eines Systems zur Schwingungsüberwachung in der Abteilung Spittelau/Flötzersteig der Fernwärme Wien erstellt.

Der theoretische Teil gibt einen Überblick über den Begriff Instandhaltung und Instandhaltungsstrategien, die rudimentären Grundlagen der Schwingungslehre werden kurz abgehandelt, die Technik der Schwingungsmessung zur Maschinenüberwachung vorgestellt und die gängigsten Methoden der Messtechnik mit der anschließenden Signalverarbeitung beschrieben.

Im praktischen Teil wird die technische und organisatorische Umsetzung der Schwingungsüberwachung erläutert und eine wirtschaftliche Analyse in Bezug auf Selbstkosten, Einkaufskosten für externe Durchführung und Kostenersparnis im Versicherungsbereich durchgeführt.

Durch die Implementierung von Schwingungsüberwachungen erhöht sich die Anlagensicherheit und die Planbarkeit von Instandhaltungsmaßnahmen, in der Folge ist eine Erhöhung der Verfügbarkeit möglich die einen wirtschaftlichen Vorteil für den Anlagenbetreiber darstellt.

Abstract

Implementation of a vibration monitoring system for rotating equipment in the waste incineration plants Spittelau and Flötzersteig

This thesis documents the project of implementation of a vibration monitoring system in the Spittelau/Flötzersteig department of the Fernwärme Wien.

The theoretical part provides an overview of the concepts of maintenance and maintenance types, touches on the basics of the theory of oscillations and describes the common vibration measurement methods and the relevant signal analysis.

The practical part focuses on the technical and organizational aspects of the implementation of the monitoring system and cost analysis.

Through the implementation of a vibration monitoring system, the reliability of the plant is improved and the ability to plan maintenance measures is enhanced. As a result, the availability of the plant is increased, which represents an economical advantage for the company.

Danksagung

Mein Dank gilt Hr. DI Kirchner, der mich bereits mit meiner Bachelorarbeit auf dieses Thema brachte, und mir durch die Weiterführung des Projektes die Möglichkeit gab, ein Projekt in der Industrie schon während meiner Studienzeit von Anfang bis Ende zu begleiten.

Hr. Grünauer und Hr. Seidelberger, die das Projekt an der Maschine „leben“ und mir immer hilfreich zur Seite standen.

Hr. Prof. Kepplinger, der die universitäre Betreuung der Arbeit innehatte und einen vollkommen reibungslosen Ablauf ermöglichte.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Problemstellung	1
1.2. Zielsetzung	1
I. Grundlagen (Theorieteil)	3
2. Allgemeines	4
2.1. Instandhaltungsbegriffe und Strategien vgl. [1],[2]	4
2.2. Zustandsüberwachung vgl. [3]	6
2.3. Anlagenbeschreibung	7
2.3.1. Spittelau vgl. [4]	7
2.3.2. Flötzersteig vgl. [5],[6]	12
3. Schwingungslehre	17
3.1. Grundlagen der Harmonischen Schwingung vgl. [7]	17
3.2. Addition von Schwingungen vgl. [7]	22
3.3. Harmonische Synthese vgl. [7]	26
4. Schwingungsmessungen	29
4.1. Messgröße	31
4.2. Messpunkte vgl. [3]	31
4.3. Kopplungssysteme vgl. [8], [1]	33
4.4. Messaufnehmer vgl. [8], [1]	34
4.5. Filter vgl. [8], [9]	36
4.6. Fourieranalyse, Fourierreihe und Fouriertransformation vgl. [7],[10] . . .	36
4.7. Fehler der Signalaufbereitung vgl. [8]	45
4.8. Hüllkurvenanalyse vgl. [11]	49
4.9. Kenngrößen eines Schwingungssignales	50
4.10. Schadensfrequenzen vgl. [11],[8]	51



II. Umsetzung (Praktischer Teil)	53
5. Technische Umsetzung	54
5.1. Schwingungsaufnehmer vgl. [12]	54
5.2. Mobiler Datensammler vgl. [9]	56
5.3. Analysesoftware vgl. [9]	57
6. Organisation	60
6.1. Organisation der Abteilung Spittelau/Flötzersteig	60
6.2. Prozessschema	61
6.3. Reporting und Dokumentation	62
6.4. Personalbedarf	65
7. Wirtschaftliche Betrachtung	71
7.1. Kosten Eigenleistung	71
7.2. Kosten Fremdleistung	75
7.3. Vergleich Fremdleistung und Eigenleistung	76
7.4. Versicherungskosten [13]	76
8. Ergebnisse und Diskussion	77
9. Zusammenfassung	78
III. Verzeichnisse	79
Literaturverzeichnis	80
Abkürzungsverzeichnis	82
Tabellenverzeichnis	85
Abbildungsverzeichnis	86
IV. Anhang	A-1



1. Einleitung

Innerhalb der Abteilung Spittelau/Flötzersteig der Fernwärme Wien wird an der Umsetzung einer Zustandsorientierten Instandhaltungsstrategie gearbeitet. Im Zuge dieses Projektes wurde an vorausgewählten Aggregaten eine Risikoanalyse mit dem Fokus auf die Verfügbarkeit der Anlage durchgeführt, siehe [14].

Gemäß des Ergebnisses dieser Risikoanalyse wurde den einzelnen Aggregaten ein bestimmtes Maß an Überwachungsbedarf zugeteilt. Zusätzlich zum Ausmaß der Zustandsüberwachung wurden auch technisch mögliche Überwachungsmethoden erhoben.

1.1. Problemstellung

Im Zuge dieser Diplomarbeit soll in den beiden Müllverbrennungsanlagen der Abteilung, ein System zur Schwingungsmessung und -überwachung von Absolutschwingungen an Maschinengehäusen und Lagern implementiert werden. Die Implementierung ist auf organisatorischer Basis vorzunehmen, da die Geräte und die rudimentär geschulten Mitarbeiter bereits vorhanden sind.

Das Überwachungssystem soll von der wirtschaftlichen Seite beurteilt werden. Diese Beurteilung umfasst die Selbstkosten, die Kosten bei Zukauf der Leistung, sowie Auswirkungen auf die Versicherungskosten der Anlage.

1.2. Zielsetzung

Ziel dieses Projektes ist es die Schwingungsüberwachung in den Instandhaltungsprozess organisatorisch einzugliedern und die Voraussetzungen (Lagerdaten, Datenbank, Freistellung des Personals,...) für regelmäßige Messung und Auswertung der ausgewählten Aggregate zu schaffen.

Die Kosten und der Nutzen des Systems sind zu erheben und zu vergleichen um eine



wirtschaftliche Grundlage für weitere Entscheidungen in diesem Bereich zu schaffen. Unter anderem stellt sich hier die Frage, ob man die Überwachung selbst durchführen oder auslagern soll.



Teil I.

Grundlagen (Theorieteil)

2. Allgemeines

2.1. Instandhaltungsbegriffe und Strategien vgl. [1],[2]

Instandhaltung ist ein nicht eindeutig definierter Begriff und wird im allgemeine Sprachgebrauch auch breit verwendet. Die DIN 31 051 definiert Instandhaltung wie folgt:

„Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements während des Lebenszyklus einer Betrachtungseinheit zur Erhaltung des funktionsfähigen Zustandes oder der Rückführung in diesen, so dass sie die geforderte Funktion erfüllen kann“ [15]

Instandhaltung ist in Betrieben von großer Bedeutung, wird allerdings innerhalb der Prioritäten der Unternehmens oft als nebensächlich wahrgenommen, da der Beitrag zum Wertschöpfungsprozess indirekt ist.

Instandhalter kommen erst ins Spiel wenn etwas ausgefallen ist und instand gesetzt werden muss, werden also vornehmlich auf die Instandsetzung reduziert. Instandhaltungsmaßnahmen die zeitlich vor einem Ausfall liegen werden meist nicht wahrgenommen, obwohl die Instandhaltung im laufenden Betrieb eigentlich immer aktiv ist. Die Teilbereiche der Instandhaltung, die neben der Instandsetzung häufig nicht wahrgenommen werden, sind in der Norm klar als Aufgaben derselben definiert und lauten wie folgt:

- Wartung

„Maßnahmen zur Verzögerung des Abbaus des vorhandenen Abnutzungsvorrats“ [15]

- Inspektion

„Maßnahmen zur Feststellung und Beurteilung des Istzustandes einer Betrachtungseinheit einschließlich der Bestimmung der Ursachen der Abnutzung und dem Ableiten der notwendigen Konsequenzen für eine künftige Nutzung“ [15]



- Instandsetzung

„Maßnahmen zur Rückführung einer Betrachtungseinheit in den funktionsfähigen Zustand, mit Ausnahme von Verbesserungen“ [15]

- Verbesserung

„Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements zur Steigerung der Funktionssicherheit einer Betrachtungseinheit, ohne die von ihr geforderte Funktion zu ändern“ [15]

Aus dem Zusammenhang dieser Teilbereiche ergeben sich verschiedene Instandhaltungsstrategien, die mögliche Antworten auf die Frage „Wann ist etwas wie instand zu setzen“ darstellen. Zur Veranschaulichung zeigt Abbildung 2.1 beispielhaft den Abnutzungsverlauf eines beliebigen verschleiß- und abnutzungsbehafteten Systems.

Schadensorientierte: Es wird nach Ausfall des Aggregates instand gesetzt bzw. gewartet. Eine Strategie, die für unwichtige bzw. redundante Anlagenteile aufgrund ihrer geringen Kosten- und Personalintensität sinnvoll ist.

Zeitorientierte: Instandsetzungs- und Wartungsarbeiten finden in festen zeitlichen Intervallen statt. Die Perioden werden entweder vom Hersteller vorgegeben oder sind Erfahrungswerte. Dieser Ansatz eignet sich für Anlagenteile deren Ausfall nicht einfach hinnehmbare Folgen hat aber deren Verschleißteile billig sind oder eine Überwachung technisch und wirtschaftlich nicht sinnvoll ist.

Zustandsorientierte: Unter Anwendung von Techniken der Maschinendiagnostik (z.B.: Thermographie, Schwingungsüberwachung, Prozessparameterüberwachung,...) werden die Instandsetzungs- und Wartungsmaßnahmen genau zum Zeitpunkt ihrer Notwendigkeit gesetzt. Diese Strategie erlaubt es durch die Bekanntheit des Maschinenzustands die Tätigkeiten sehr gut zu planen. Diese Vorgehensweise eignet sich für Aggregate, deren Funktion für den Betrieb einer Anlage unerlässlich ist bzw. deren Verschleißteile und Betriebsmittel einen so großen Kostenfaktor darstellen, dass der Aufwand wirtschaftlich gerechtfertigt ist.



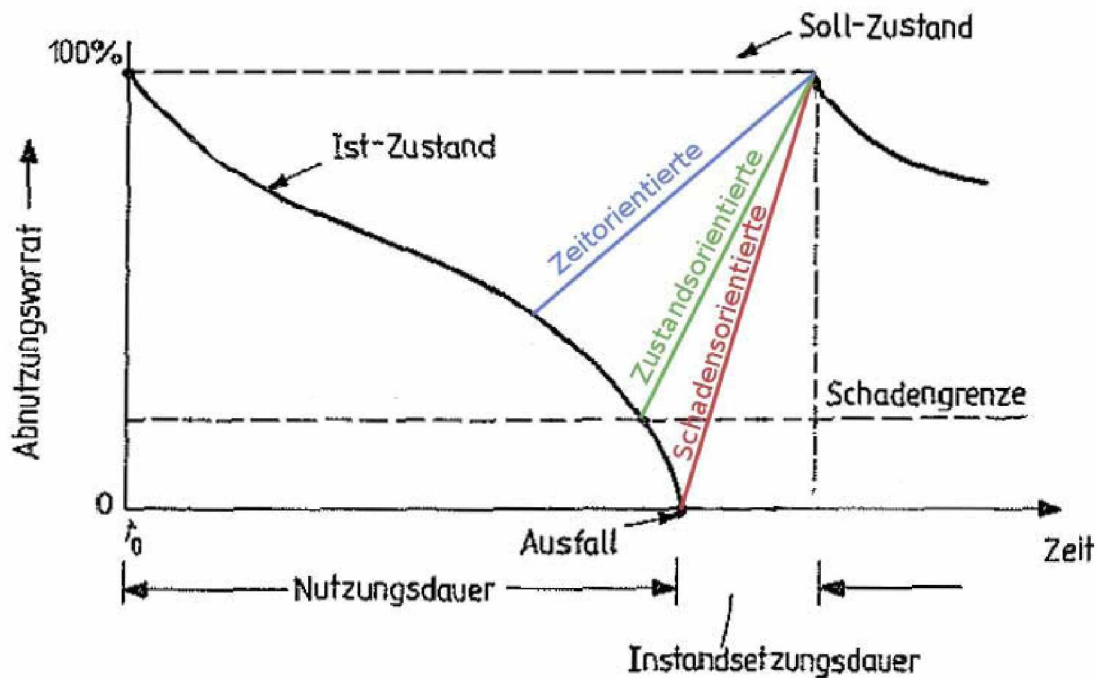


Abbildung 2.1.: Abnutzungsverlauf einer Maschine mit den Instandhaltungszeitpunkten der unterschiedlichen Strategien. Rot Schadensorientiert; Blau Zeitorientiert; Grün Zustandsorientiert in Anlehnung an RÖTZEL [2] S.14

2.2. Zustandsüberwachung vgl. [3]

Mittels Methoden und Techniken der Maschinendiagnostik soll der aktuelle Zustand einer Maschine festgestellt werden um ihre Betriebssicherheit und/oder ihre Restlaufzeit einzuschätzen. Dieser Anspruch ist in der Praxis nicht einfach umzusetzen.

Im Bereich der Betriebssicherheit ist die periodische Zustandsüberwachung seit Langem Stand der Technik, man denke an das Pickerl beim Auto oder die periodischen Überprüfungen von Druckgeräten gemäß der Druckgeräteverordnung. Diese Überprüfungen bestätigen allerdings nur, dass zum Zeitpunkt der Begutachtung alles in Ordnung war, sie geben keine Prognose über die Zukunft des begutachteten Objektes ab.

Zustandsüberwachung in Bezug auf Abnutzung und Restlaufzeit ist etwas jünger und hängt unter anderem mit dem zunehmenden wirtschaftlichen Druck im Produktionssektor zusammen und folgt somit dem Gebot der optimalen Ressourcenverwendung.

In diesem Bereich soll aus wiederholt erfassten Zuständen gezielt eine Prognose über den Zeitpunkt des Schadenseintritts erstellt werden bzw. Fehler frühzeitig erkannt wer-

den, um aufwändige Maßnahmen zur Fehlerbehebung planbar zu machen, teure Ersatzteile bis zum Ende des Abnutzungsvorrates zu nützen und erweiterte Standzeiten durch Beschaffungsvorgänge zu vermeiden. Zu diesem Zweck kann der Zustand des Betrachtungsobjektes periodisch oder kontinuierlich erfasst werden.

Bei einem kontinuierlich überwachten Objekt ist der zeitliche Verlauf des Zustands unempfindlicher gegenüber Streuwerten und auch der Einfluss von Betriebs- und Umgebungsparametern lässt sich besser erkennen. Der Nachteil einer kontinuierlichen Überwachung ist, dass die Zustandserfassung mit fix installierten Geräten erfolgt, die für eine flächendeckende Überwachung zu teuer sind und bereits in der Planung einer Anlage vorgesehen werden sollten. Eine Nachrüstung eines solchen Systems ist sehr kostenintensiv.

Periodische Zustandserfassungen erschweren die Einschätzung des Einflusses von Betriebs- und Umgebungsparametern und sind auch anfälliger gegenüber Streuwerten. Der Vorteil liegt aber in ihrer einfachen Anwendung an bereits bestehenden Anlagen, der jederzeit möglichen Anpassung des Überwachungsausmaßes und ihrer relativ einfachen Bedienung.

2.3. Anlagenbeschreibung

2.3.1. Spittelau vgl. [4]

Kurzbeschreibung:

„Die MVA (Müllverbrennungsanlage) Spittelau (siehe Abbildung 2.2) besteht mit geringen Abänderungen in ihrer jetzigen Form seit 1989, wobei die Müllkessel noch aus der Zeit vor dem Brand von 1987 stammen. Die thermische Leistung aus Müll beträgt 60MW und wird vollständig ins Wiener Fernwärmenetz eingespeist, zusätzlich ist auch eine Gegendruck-Dampfturbine mit 6MW elektrischer Leistung installiert. Der Durchsatz beträgt 270.000t[16] Restmüll aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen pro Jahr.“[14]





Abbildung 2.2.: MVA Spittelau Copyright Wien Energie Fernwärme/ Hubert Dimko

Verfahrensbeschreibung:

„Die Abfallbehandlung erfolgt in zwei getrennten Linien mit jeweils eigener Rauchgasreinigung mit Ausnahme der Entstickungsanlage, für diese werden die Abgasströme der beiden Linien zusammengeführt. Die schematische Darstellung einer Linie ist der Abbildung 2.3 zu entnehmen.

Vom 7000m³ großen Müllvorratsbunker, in welchen die täglich angelieferten Abfälle über 8 Kippstellen entladen werden, werden die beiden Verbrennungslinien mit 2 Brückenkränen beschickt, welche den Abfall zur Vergleichmäßigung des Heizwertes nach dessen Anlieferung durchmischen. In den beiden Schurren wird der Müll getrocknet und vorgewärmt, bevor er dann über ein hydraulisch betriebenes Beschickersystem, welches sich aus zwei Vorschubblöcken zusammensetzt, auf einen 34,5m² großen und 26° geneigten Rückschubrost fällt. Die Roste der beiden Linien sind jeweils in zwei Bahnen unterteilt, welche gegen gleich laufen, um eine optimale Schürung und folglich einen idealen Ausbrand zu gewährleisten. Die Verbrennungsgasführung im Brennraum erfolgt im Gegenstrom, durch die Ein-

düsung von Sekundärverbrennungsluft im ersten Zug wird eine vollständige Verbrennung der Rauchgase garantiert. Der heiße Rauchgasstrom geht durch zwei weitere Züge mit Kesselheizflächen, in denen ihr Wärmeinhalt zur Produktion von bis zu 45t/h Satttdampf (33bar) verwendet wird. Das Rauchgas verlässt den Müllkessel durch den Economizer (Speisewasservorwärmung) und erreicht nach einem weiteren Zug mit der Verbrennungsluftvorwärmung den E-Filter.

Die beiden E-Filter (einer pro Linie) stellen den trockenen Teil der Rauchgasreinigungsanlage (RRA) dar und verfügen über jeweils 3 Felder, die mit einer Spannung von 60kV betrieben werden. Dieses Reinigungssystem reduziert den Staubgehalt des Abgases auf unter $5 \frac{mg}{Nm^3}$, die dabei anfallende Flugasche wird mithilfe eines Transportsystems aus mechanischen und pneumatischen Förderaggregaten in einen Lagersilo überführt. Mittels LKWs wird die Asche von dort einer Verwertung/Deponierung zugeführt.

Nach den E-Filtern durchläuft das Abgas ein dreistufiges Wäschersystem aus saurem, basischem und elektrodynamischem Wäscher. Das Rauchgas wird in der Quench von 180°C auf ungefähr 60°C abgekühlt, der erste (saure) Wäscher scheidet bei einem pH-Wert von 1 und turbulenten Durchmischungsverhältnissen von Gas- und Flüssigphase Halogenwasserstoffe (HCL, HF), Reststaub sowie partikelgebundene Schwermetalle ab. Der zweite (basische) Wäscher wird im Gegenstrom gefahren, die eingedüστε Kalkmilch reagiert mit dem im Rauchgas enthaltenen Schwefeldioxid (SO₂) zu Gips. Im elektrodynamischen Venturiwäscher wird der Reststaubgehalt auf unter $1 \frac{mg}{Nm^3}$ vermindert.

Die bei der Abgasreinigung belasteten Wasserströme werden in der Abwasserreinigungsanlage (ARA) aufbereitet und mithilfe von Umwälzpumpen im Kreis geführt. Bei der Wiederaufbereitung anfallende Schlämme werden in zwei Kammerfilterpressen entwässert und anschließend fachgerecht deponiert.

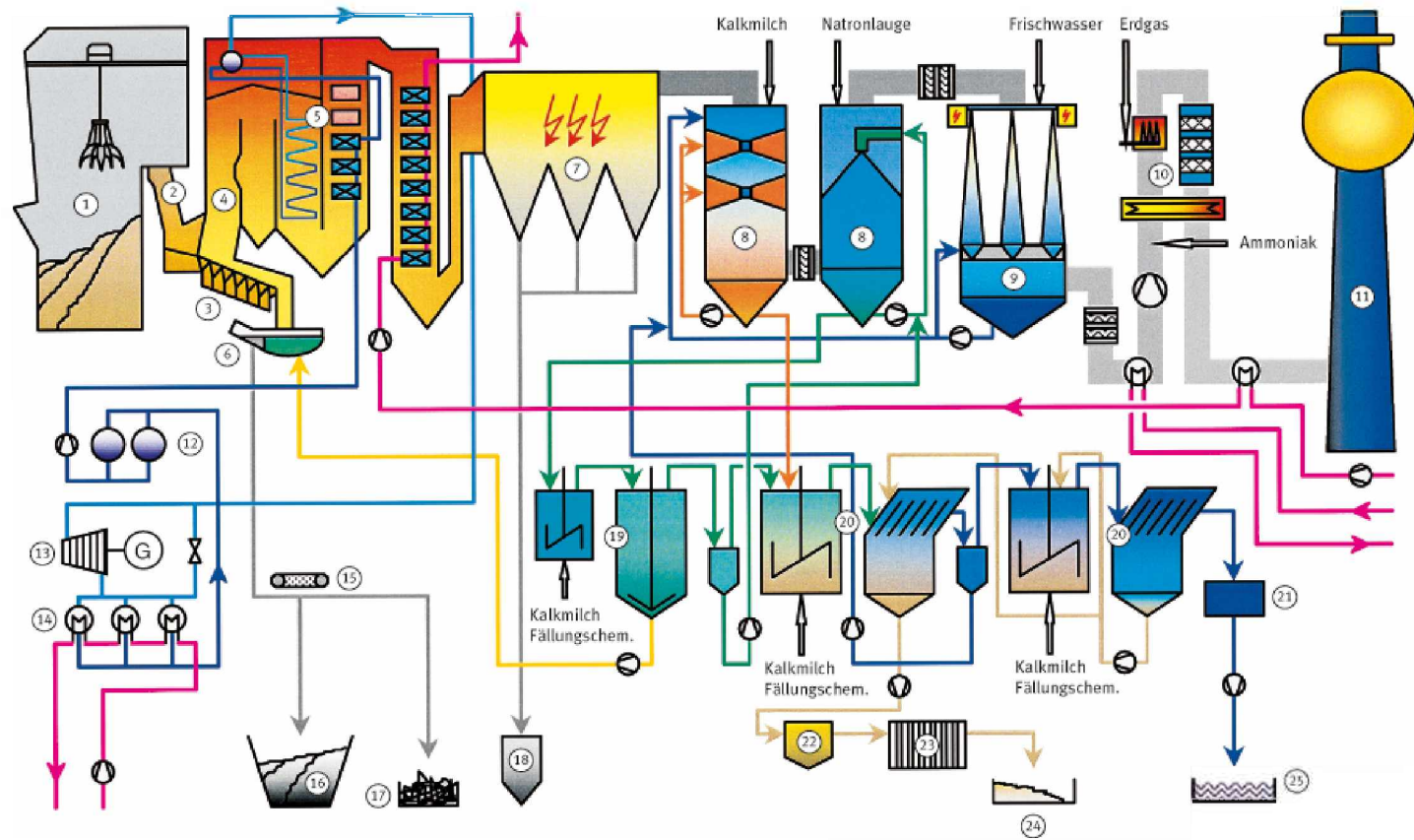
Um Verschleppungen der Waschwässer zu verhindern sind zwischen den einzelnen Wäschern und nach der elektrodynamischen Venturi Wäsche (EDV) Tropfenabscheider eingebaut. Die Abgasströme werden in einem Wärmetauscher erwärmt und über die beiden Saugzüge in die anschließende Entstickungsanlage, die letzte Stufe der Abgasreinigung, geführt.

Vor der Entstickungsanlage werden die beiden Linien zusammengeführt, innerhalb der Anlage am Wärmerohr vorgewärmt, mit Ammoniakwasser-



dampf vermischt und durch Flächenbrenner auf Reaktionstemperatur gebracht. Die Stickoxide werden nun in drei Katalysatorlagen zu Wasser, Sauerstoff und Stickstoff abgebaut. Die gespeicherte Wärme des Stroms wird auf der kalten Seite des Wärmerohrs abgegeben und das Gas verlässt die Anlage nach einem weiteren Wärmetauscher mit 130°C durch den Kamin. Dort angebrachte amtliche Messgeräte überwachen die Abgasqualität rund um die Uhr.“[14]





- | | | | | | |
|--------------------|------------------------------------|------------------------|----------------------------|--------------------------|---|
| ① Abfallbunker | ⑥ Nassentschlacker | ⑪ Kamin | ⑬ Schlackenbunker | ⑰ Reinwasserbehälter | <ul style="list-style-type: none"> — Frischwasser — Basisches Prozesswasser — Saures Prozesswasser — Sattendampf — Filterasche/Schlacke — Hydroxidschlamm — Gippschlamm — Fernwärme |
| ② Schure | ⑦ Elektrofilter | ⑫ Speisewasserbehälter | ⑱ Schrottcontainer | ⑲ Schlammtank | |
| ③ Verbrennungsrost | ⑧ Rauchgas-Nasswäsche (zweistufig) | ⑬ Turbine & Generator | ⑲ Filteraschesilo | ⑲ Kammerfilterpresse | |
| ④ Feuerraum | ⑨ Feinstaubabscheider | ⑭ Wärmetauschergruppe | ⑲ Multi-Recycling-Anlage | ⑲ Filterkuchenbox | |
| ⑤ Abhitzeessel | ⑩ SCR-Entstickungsanlage | ⑮ Magnetabscheider | ⑲ Abwasserreinigungsanlage | ⑲ Vorfluter (Donaukanal) | |



Abbildung 2.3.: Verfahrensschema der MVA Spittelau

2.3.2. Flötzersteig vgl. [5],[6]

Kurzbeschreibung:

„Die MVA Flötzersteig (siehe Abbildung 2.4) ist 1963 von der Gemeinde Wien fertig gestellt worden. Sie verfügte bei ihrer Inbetriebnahme über 3 Linien mit je einer Rostbrennkammer, E-Filter und Zyklonabscheider. Durch große Investitionen in den 80er und 90er Jahren ist die Anlage auch heute noch auf dem neuesten Stand der Technik und emittiert nur 10 bis 25% der gesetzlich zulässigen Grenzwerte. Die installierte thermische Leistung aus Müll beträgt 51MW bei einem Jahresdurchsatz von durchschnittlich 200.000t.“[14]



Abbildung 2.4.: MVA Flötzersteig Copyright Wien Energie Fernwärme/ Hubert Dimko



Verfahrensbeschreibung:

„Der Restmüll aus Haushalten und haushaltsähnlichen Einrichtung wird an jedem Wochentag von bis zu 190 Sammelfahrzeugen angeliefert und in den in Tages- und Vorratsbunker unterteilten Bunker gekippt. In Abbildung 2.5 ist das Verfahrensschema der Anlage schematisch dargestellt.

Im Bunker wird der Müll von zwei Brückenkränen zur Vergleichmäßigung des Heizwertes durchmischt und in drei Schurren überführt. Am Ende der Schurre wird der Müll von einem hydraulischen Zuteiler auf den horizontalen einbahnigen Gegenlauf-Überschub-Rost geschoben. Der Rost wird mit demselben Ölhydrauliksystem angetrieben, welches auch die Zuteiler antreibt. Die Rostbewegung lockert und schürt das Müllbett, um eine gute Verbrennung zu ermöglichen, und fördert den Ausbrand zugleich kontinuierlich nach dem Schlackeabwurf. Die vorgewärmte Verbrennungsluft kann nach den Anforderungen der Feuerung zonenspezifisch geregelt werden. Die Brennkammern sind jeweils mit 2 Gasbrennern ausgestattet, um einen geregelten An- und Abfahrbetrieb zu ermöglichen, und können mit ihrer thermischen Leistung von je 11,5MW den Kessel auch alleine mit Erdgas heizen, um die Wärmelieferung an die umliegenden Großabnehmer zu garantieren. Das heiße Rauchgas wird nun durch einen Eckrohr-Naturumlauf-Dampfkessel mit Verdampfer, Überhitzer und Economizer geführt. Der Kessel verfügt durch das historisch bedingte Wachstum über zwei Trommeln, welche allerdings speiswasserseitig getrennt sind. In den ersten 3 Zügen entsteht Satttdampf mit 200°C und 16bar_ü, wird in den Trommeln gesammelt, im Überhitzer auf ca. 280°C erhitzt und mittels Abspritzkühlung auf die voreinstellbare Temperatur von 270°C gekühlt. Der im letzten Zug installierte Economizer erwärmt das Speisewasser von 105°C auf 140°C. Insgesamt sind im Kessel 8½ Züge vorhanden, dadurch wird Grobstaub bereits gut abgeschieden und mittels Schneckenförderer zum Aschezwischensilo ausgetragen.

Beim Verlassen des Kessels verlangsamt sich das Rauchgas durch die Querschnittserweiterung und strömt in den Schlauchfilter, wo es mit Aktivkohlepartikeln vermischt wird, an denen Schwermetalle adsorbiert werden. Das Gas passiert das Filtergewebe der Schläuche, die Staubpartikel werden vom Gewebe zurückgehalten, auf diese Weise wird der Staubgehalt von 4000 $\frac{mg}{m^3}$ auf $\frac{mg}{m^3}$ reduziert. Das Zusetzen der Gewebeschicht erhöht



die Filterleistung, bis der Druckverlust ein vorgegebenes Niveau erreicht, bei welchem automatisch mit Gegendruck abgereinigt wird. Der abgeschiedene Staub wird über Schneckenförderer zu Aschezwischensilo transportiert und von dort pneumatisch in die beiden Aschesilos überführt.

In der Quench wird das ca. 200°C heiße Rauchgas mit Wasser, welches durch zwei Kreuzstrom-Ringdüsen eingespritzt wird, auf 60°C abgekühlt und durch den Überschuss an Wasser mit Wasserdampf gesättigt. Der erste Wäscher ist ohne bauliche Abgrenzung an die Quench angeschlossen und verfügt auch über zwei Düsen desselben Typs. Durch die horizontale Eindüsung des Wassers ergeben sich in dieser Anordnung vier „Waserebenen“ welche den gesamten Querschnitt der Wäscherrohre ausfüllen und eine intensive Vermischung von Gas und Flüssigkeit verursachen, sodass keine weiteren Einbauten zur Verwirbelung mehr nötig sind. Um der pH-Wert-Erniedrigung durch die abgeschiedenen sauren Rauchinhaltsstoffe entgegenzuwirken, wird Kalkmilch zugegeben und der pH-Wert so bei 1,1 konstant gehalten. Zwei Umwälzpumpen führen das Wasser aus dem Sumpf über getrennte Leitungen wieder den Düsen zu.

Um einer übermäßigen Aufkonzentration von Halogenwasserstoffen (HCl, HF), Partikeln und Reststaub im Waschwasser und der damit einhergehenden Leistungsverminderung des Wäschers entgegenzuwirken wird ein konstanter Volumsstrom von $3,5 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ abgezogen und in die Abwasserreinigungsanlage (ARA) überführt.

Schwefeldioxid (SO_2) kann aus chemischen Gründen nicht gemeinsam mit Halogenwasserstoffen abgeschieden werden, weswegen der Abgasstrom nach einem Tropfenabscheider in einen zweiten Rauchgaswäscher eintritt. Dort wird das Gas im Gegenstrom durch einen Natronlauge-Sprühregen geführt, wobei sich Natriumsulfat (NaSO_4) bildet, welches in den Nassentschlacker geleitet wird und dort mit dem im Schlackewasser enthaltenen Kalzium (Ca) zu Gips (CaSO_4) reagiert. Auch bei diesem Wäscher sorgen zwei unabhängig Kreiselpumpen mit einer Förderleistung von je $400 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ für eine Umwälzung des Waschwassers. Im Normalbetrieb wird nur eine der Pumpen benötigt, um eine Abscheidung von $250 \frac{\text{mgSO}_2}{\text{m}^3}$ auf $7 \frac{\text{mgSO}_2}{\text{m}^3}$ zu erreichen.

Über einen Tropfenabscheider und das Saugzuggebläse wird der Abgasstrom in die von allen Linien gemeinsam genutzte Entstickungsanlage (DeN-Ox) geleitet. Das 60°C heiße Abgas wird mittels eines neuen Wärmever-



schubsystems auf die benötigte Reaktionstemperatur von 180°C gebracht und mit Ammoniakdampf vermischt. Die im (durch Einbauten homogenisierten) Gasstrom enthaltenen Stickoxide werden in Katalysatorlagen abgebaut. Auch Dioxine und Furane zerfallen in den wabenförmigen Einsätzen. Nach einer Abkühlung mittels des Wärmeerschubsystems und zwei Gebläsen, die den Druckverlust der DeNOx kompensieren, gelangt das Abgas über einen Schalldämpfer in den Kamin und anschließend ins Freie.“[14]



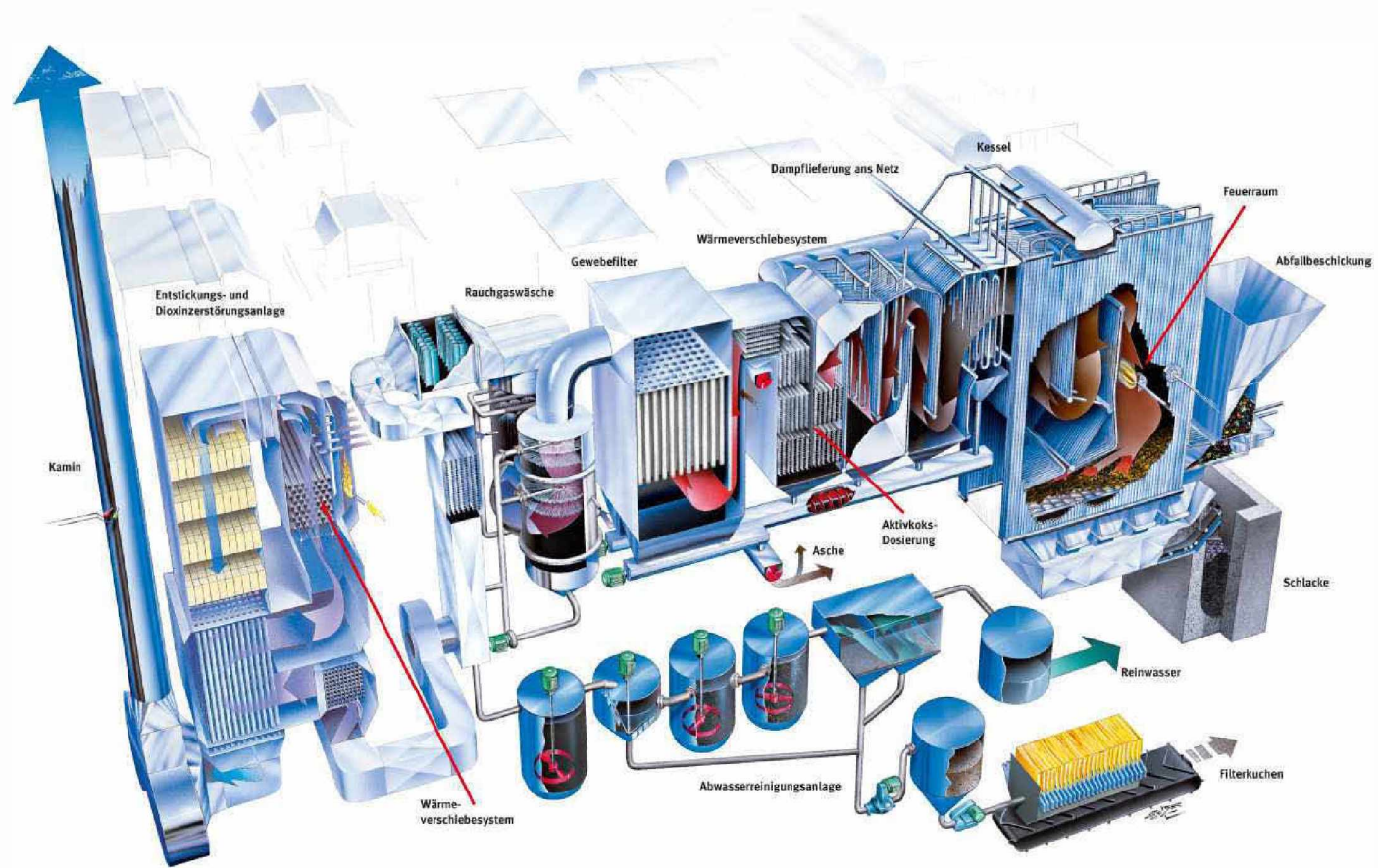


Abbildung 2.5.: Verfahrensschema der MVA Flötzersteig

3. Schwingungslehre

3.1. Grundlagen der Harmonischen Schwingung vgl. [7]

Schwingung

Ein sich nach einer bestimmten Zeit T wiederholender Vorgang wird als periodisch bezeichnet. Wenn sich nach diesem Zeitraum, der als Periodendauer bezeichnet wird ($T = \Delta t$), eine Größe wiederholt (Weg, Geschwindigkeit), spricht man von einer Schwingung und Gleichung 3.1 trifft zu.

$$x(t) = x(t + \Delta t) \quad (3.1)$$

Diese Gleichung beschreibt, dass nach Verstreichen der Zeit T wieder der gleiche Funktionswert, z.B. Ort, erreicht ist. Um beim Beispiel Ort zu bleiben, muss es folglich einen Ort geben, an dem die Bewegung begonnen hat und an dem sie wieder zur Ruhe kommt. Dieser Ort wird als Null-Lage bezeichnet.

In der Dynamik bezeichnet eine Schwingung die periodische Bewegung einer Masse um ihre Null-Lage. Wenn während der Schwingung keine Energie zugeführt oder abgezogen wird, spricht man von einer freien ungedämpften Schwingung. Bei diesem Schwingungssystem wechselt die Energie von potentieller Energie zu kinetischer Energie und umgekehrt.

Wird während des Schwingungsvorganges Energie entzogen, z.B. durch Reibung, liegt eine gedämpfte Schwingung vor. Beide Schwingungsarten sind in Abbildung 3.1 dargestellt.



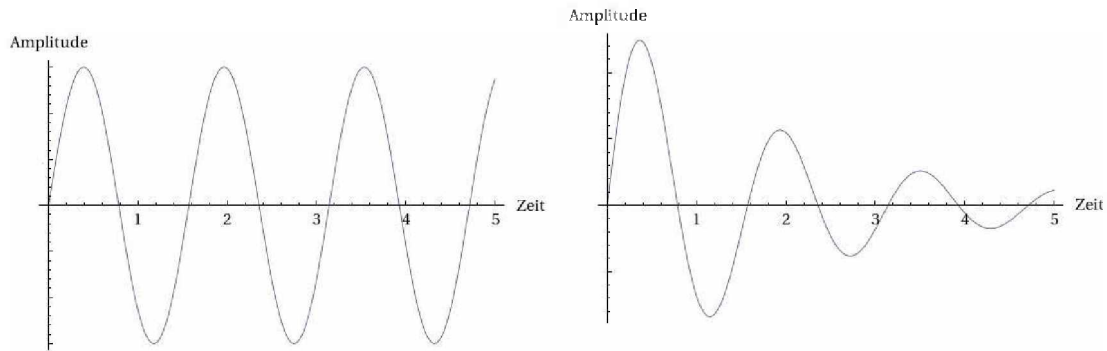


Abbildung 3.1.: Links eine freie ungedämpfte Sinusschwingung, rechts eine gedämpfte Sinusschwingung

Mathematisch werden Schwingungen mittels Sinus und Cosinus Funktionen beschrieben, dass dies auch physikalisch berechtigt ist, ist durch Abbildung 3.3 leicht nachvollziehbar. Der Ansatz für Weg ($x(t)$), Geschwindigkeit ($v(t)$) und Beschleunigung ($a(t)$) ist in den Gleichungen 3.2 bis 3.4 dargestellt.

$$x(t) = \hat{x} \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (3.2)$$

$$v(t) = \hat{x} \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (3.3)$$

$$a(t) = \hat{x} \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (3.4)$$

Um Schwingungen zu beschreiben verwendet man Ersatzbilder und Freiheitsgrade. Die Zahl der Freiheitsgrade wird durch die minimale Anzahl an Koordinaten festgelegt, die notwendig sind um eine Bewegung eindeutig zu beschreiben. Beispiele für Schwingungssysteme mit 1 und 2 Freiheitsgraden sind der Abbildungen 3.2 zu entnehmen.



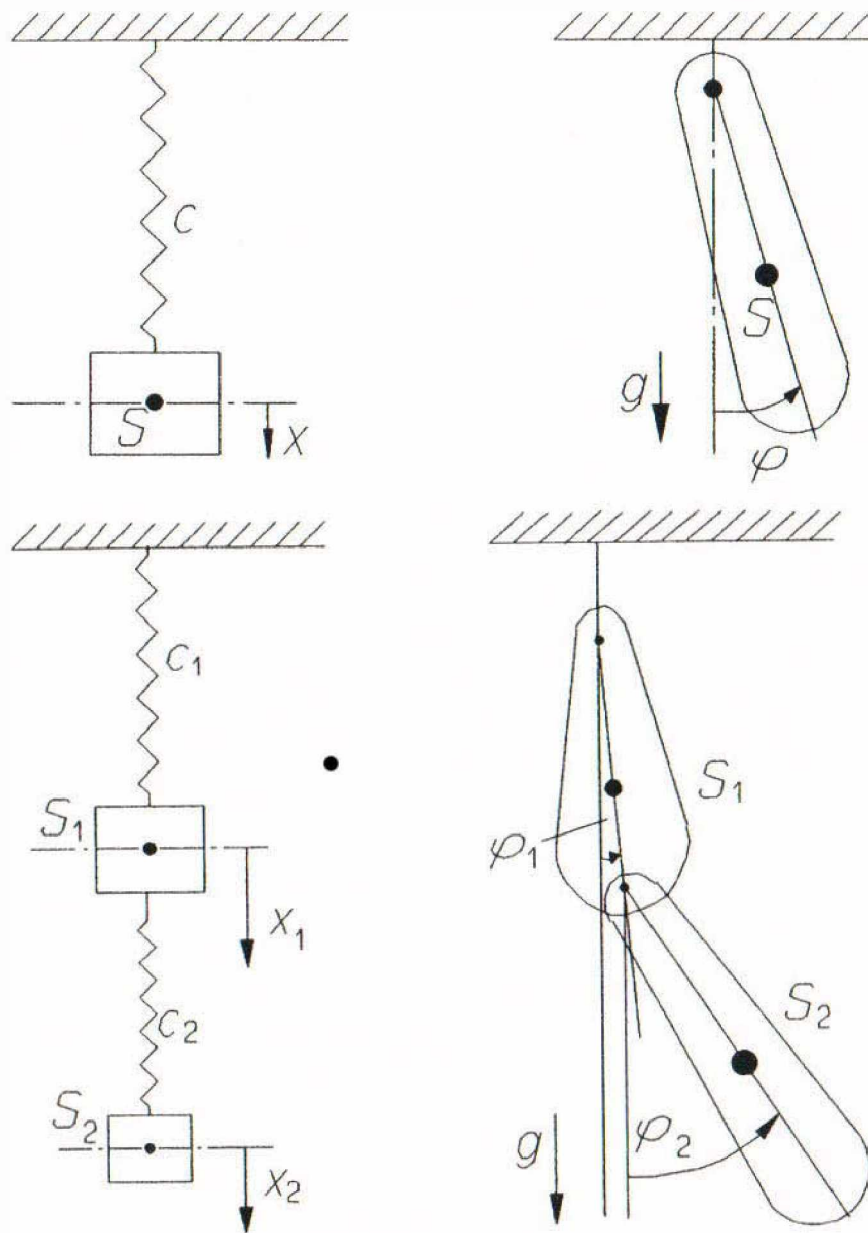


Abbildung 3.2.: Schwere- und Federpendel mit 1 Freiheitsgrad oben und 2 Freiheitsgraden unten aus JÜRGLER [7] S. 5

Einige Begriffe, die im Zusammenhang mit Schwingungen stehen, sollen hier kurz erwähnt werden und sind auch in Abbildung 3.3 dargestellt.

- Amplitude (A, \hat{x}): Der maximale Ausschlag der Schwingung. Sie kann sich sowohl auf den Weg, die Geschwindigkeit als auch auf die Beschleunigung beziehen. Sie



bezeichnet jedoch immer ein betragsmäßiges Maximum (es kann sich auch um ein negatives Maximum handeln) in der Schwingung.

- Periode: Bereich zwischen zwei Amplituden gleichen Vorzeichens.
- Periodendauer T : Die Zeit die zwischen dem zweimaligen Erreichen des selben Ausschlags (der Periode) vergeht. In Zusammenhang mit der Sinus bzw. Cosinus-Darstellung von Schwingungen wird die Periode als das Winkelmaß 2π dargestellt, da sich diese Funktionen ab diesem Winkelmaß wiederholen.
- Frequenz f : Die Anzahl der vollen Perioden pro Sekunde, also der Kehrwert der Periodendauer T . Die Einheit der Frequenz ist das Hertz (Hz) mit der Dimension $[s^{-1}]$.
- Winkelgeschwindigkeit ω : Umlaufgeschwindigkeit der Schwingung in der Kreisbahndarstellung (siehe in Abbildung 3.3) rad pro Sekunden. Mit Bezug auf die Periodendauer T ergibt sie sich mit $\frac{2\pi}{T}$.

Amplituden Zeitdiagramm

Eine Möglichkeit, eine sich wiederholende Bewegung darzustellen, ist die Betrachtung einer Kreisbahn. Durch die Projektion einer Kreisbewegung in eine zeitabhängige Darstellung, mit der Zeit auf der Abszisse und dem Weg auf der Ordinate, erhält man den in Abbildung 3.3 dargestellten Sinus. Schwingungen, die sich durch einen Sinus oder Cosinus darstellen lassen, bezeichnet man als harmonische Schwingungen.

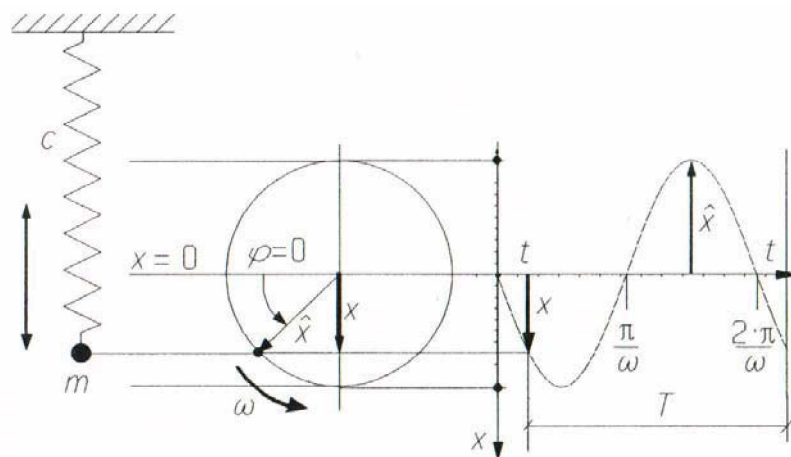


Abbildung 3.3.: Projektion eines Schwerependels in die Kreisbahndarstellung und in eine zeitabhängige Darstellung aus JÜRGLER [7] S. 9

Um Bewegungen darzustellen die bereits vor der Zeitmessung begonnen haben, führt man den Phasenwinkel φ ein, der den zu Beginn der Aufnahme bereits zurückgelegten Weg repräsentiert, siehe Abbildung 3.4.

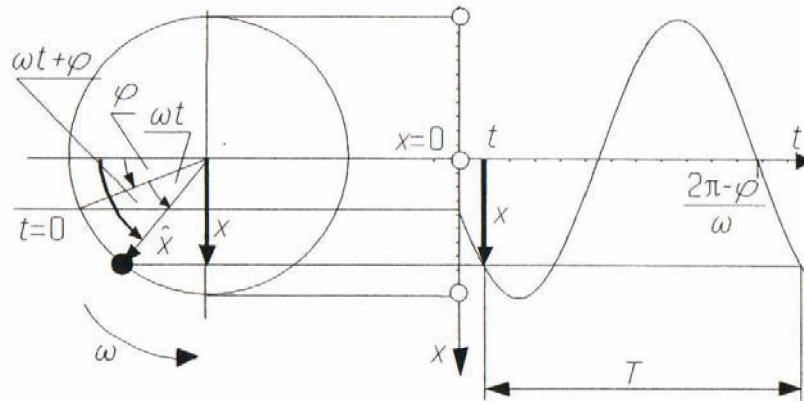


Abbildung 3.4.: Schwingung mit Nullphasenwinkel in Kreisbahndarstellung und zeitabhängiger Darstellung aus JÜRGLER [7] S. 10

Die Gleichung für den Weg lautet dann

$$x(t) = \hat{x} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) \quad (3.5)$$

Unter Berücksichtigung des trigonometrischen Additionstheorems

$$\sin(a + b) = \sin(a) \cdot \cos(b) + \cos(a) \cdot \sin(b) \quad (3.6)$$

gilt dann auch

$$x(t) = \hat{x} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) = \hat{x} \cdot [\sin(\omega \cdot t) \cdot \cos(\varphi) + \cos(\omega \cdot t) \cdot \sin(\varphi)] \quad (3.7)$$

$$x(t) = \underbrace{A}_{A=\hat{x} \cdot \cos(\varphi)} \cdot \sin(\omega \cdot t) + \underbrace{B}_{B=\hat{x} \cdot \sin(\varphi)} \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (3.8)$$

Man sieht, dass jede Schwingung als sin-Schwingung mit Phasenwinkel oder als Summe von sin- und cos-Schwingung dargestellt werden kann.



3.2. Addition von Schwingungen vgl. [7]

Gleichfrequente Schwingungen

Wenn zwei harmonische Schwingungen mit der gleichen Frequenz an einem Objekt auftreten, überlagern sie sich zu einer Schwingung. Diese Schwingung hat die gleiche Frequenz wie die beiden Teilschwingungen, jedoch eine resultierende Amplitude und einen resultierenden Phasenwinkel siehe Gleichung 3.9.

$$A_1 \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_1) + A_2 \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_2) = A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) \quad (3.9)$$

Mit dem Additionstheorem aus Gleichung 3.6 ergibt sich nach einigem Umformen

$$[A_1 \cdot \cos(\varphi_1 + A_2 \cdot \cos(\varphi_2) - A \cdot \cos(\varphi)] \cdot \sin(\omega \cdot t) + \quad (3.10)$$

$$[A_1 \cdot \sin(\varphi_1 + A_2 \cdot \sin(\varphi_2) - A \cdot \sin(\varphi)] \cdot \cos(\omega \cdot t) = 0$$

Da Sinus und Cosinus um 90° versetzt sind, kann Gleichung 3.10 nicht für jedes t erfüllt werden. Setzt man jede eckige Klammer für sich Null, erhält man die zwei unabhängigen Gleichungen 3.11 und 3.12, mittels derer man die Unbekannten A und φ berechnen kann.

$$A_1 \cdot \cos(\varphi_1) + A_2 \cdot \cos(\varphi_2) = A \cdot \cos(\varphi) \quad (3.11)$$

$$A_1 \cdot \sin(\varphi_1) + A_2 \cdot \sin(\varphi_2) = A \cdot \sin(\varphi) \quad (3.12)$$

Die beiden Gleichungen werden quadriert und addiert und ergeben 3.13.

$$A^2 \cdot [\cos^2(\varphi) + \sin^2(\varphi)] =$$

$$A_1^2 \cdot [\cos^2(\varphi_1) + \sin^2(\varphi_1)] + A_2^2 \cdot [\cos^2(\varphi_2) + \sin^2(\varphi_2)] + \quad (3.13)$$

$$2A_1A_2 \cdot [\cos(\varphi_1) \cdot \cos(\varphi_2) + \sin(\varphi_1) \cdot \sin(\varphi_2)]$$

Eine Vereinfachung mit den Gleichungen 3.14 und 3.15 ergibt den Term für die resultierende Amplitude A (siehe Gleichung 3.16)



$$\sin^2(\varphi) + \cos^2(\varphi) = 1 \quad (3.14)$$

$$\cos(a - b) = \cos(a) \cdot \cos(b) + \sin(a) \cdot \sin(b) \quad (3.15)$$

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2 \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot \cos(\varphi_1) \cdot \cos(\varphi_2)} \quad (3.16)$$

Durch die Division von Gleichung 3.11 und 3.12 lässt sich der Phasenwinkel φ berechnen.

$$\tan(\varphi) = \frac{A_1 \cdot \sin(\varphi_1) + A_2 \cdot \sin(\varphi_2)}{A_1 \cdot \cos(\varphi_1) + A_2 \cdot \cos(\varphi_2)} \quad (3.17)$$

Die resultierende Schwingung ist dann, bei Schwingungen ohne Phasenverschiebung, gegeben durch 3.18, und mit Phasenverschiebung durch 3.19. Wobei φ durch 3.17 und A durch 3.16 gegeben ist. Die graphische Addition sowie das Ergebnis der beiden Fälle sind in der Abbildung 3.5 dargestellt.

$$x_{res} = (A_1 + A_2) \cdot \sin(\omega \cdot t) = A \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (3.18)$$

$$x_{res} = A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) \quad (3.19)$$



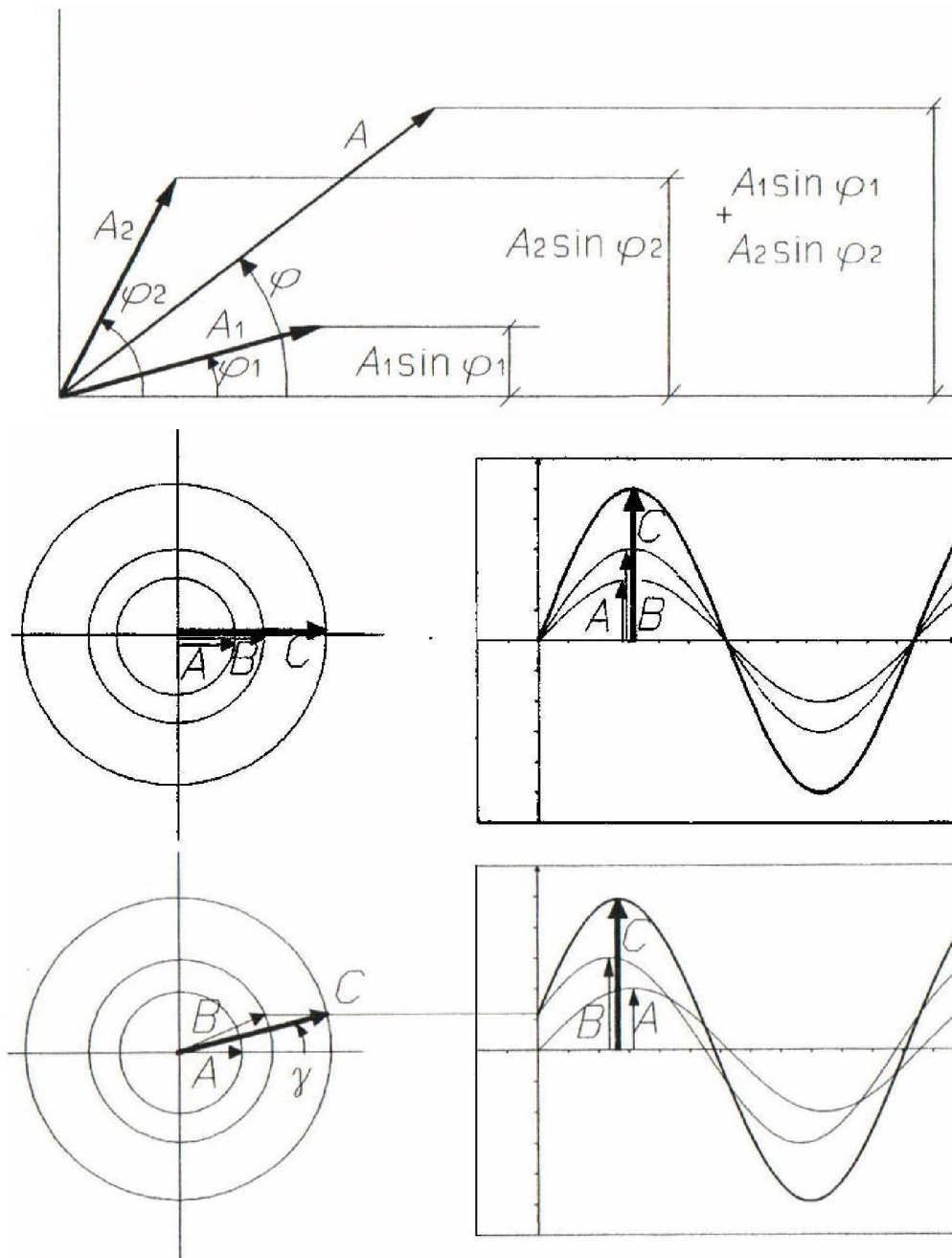


Abbildung 3.5.: Aus JÜRGEN [7] S. 16/17

Oben: Addition von zwei gleichfrequenten Schwingungen mit Phasenunterschied

Mitte: Graphische Addition zweier gleichfrequenter Schwingungen ohne Phasenunterschied

Unten: Graphische Addition zweier gleichfrequenter Schwingungen mit Phasenunterschied

Nicht gleichfrequente Schwingungen

Bei zwei Schwingungen mit gleicher Amplitude und verschiedenen Frequenzen ergibt sich eine Schwingung wie in Abbildung 3.6. Bei der Überlagerung verstärken bzw. schwächen sich die Amplituden der beiden Signale gegenseitig.

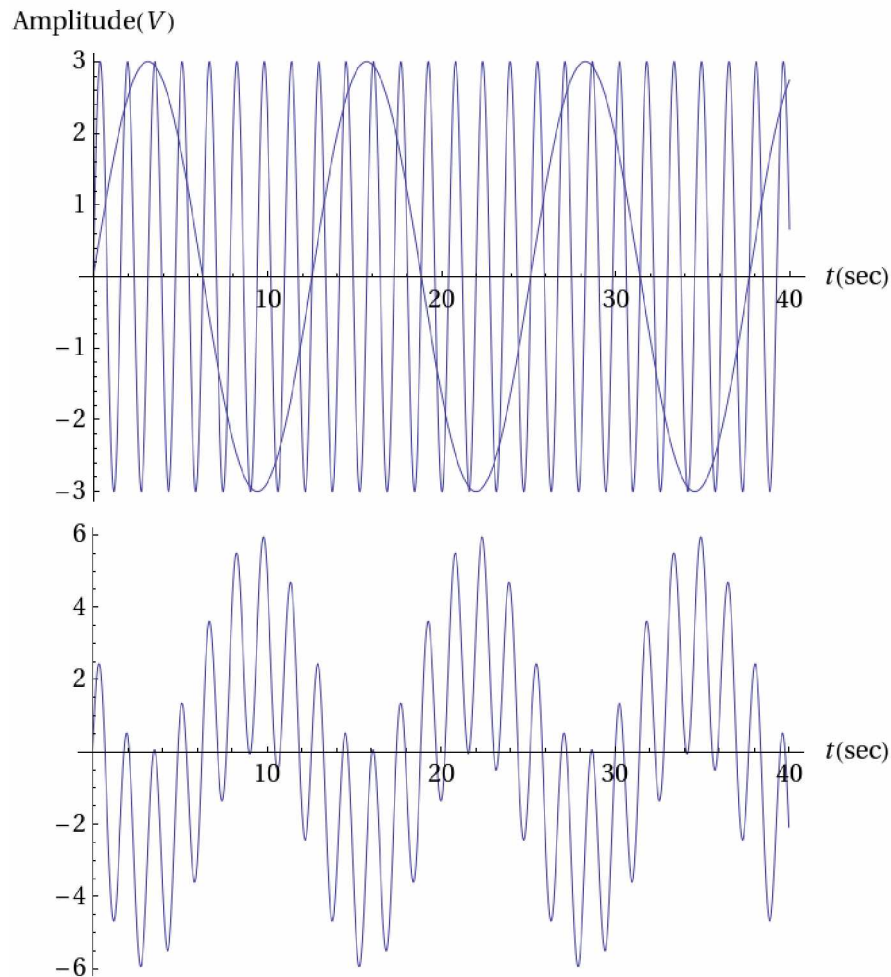


Abbildung 3.6.: Addition zweier Schwingungen mit unterschiedlicher Frequenz und gleicher Amplitude (Amplitudenmaßstab unterschiedlich).

Sind die Frequenzen der beiden Schwingungen annähernd gleich wird, die Überlagerung als Schwebung bezeichnet. Dazu die entsprechenden Gleichungen für die Einzelschwingungen 3.20 und 3.21 und die resultierende Schwingung 3.22.

$$x(t) = \hat{x} \cdot \sin(\omega_1 \cdot t) \quad (3.20)$$



$$x(t) = \hat{x} \cdot \sin(\omega_2 \cdot t) \quad (3.21)$$

$$x = \hat{x} \cdot [\sin(\omega_1 \cdot t) + \sin(\omega_2 \cdot t)] = 2 \cdot \hat{x} \cdot \cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2} \cdot t\right) \cdot \sin\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2} \cdot t\right) \quad (3.22)$$

Bei der Vereinfachung von Gleichung 3.22 kommt das Additionstheorem aus Gleichung 3.23 zur Anwendung.

$$\sin(a) + \sin(b) = 2 \cdot \sin\left(\frac{a+b}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{a-b}{2}\right) \quad (3.23)$$

3.3. Harmonische Synthese vgl. [7]

Die im vorherigen Unterkapitel beschriebene Addition von Schwingungen lässt sich mit beliebig vielen Schwingungen durchführen, dadurch kann man Schwingungen mit speziellen Eigenschaften gezielt erzeugen. Zwei technisch relevante Beispiele sind hier angeführt.

Rechteckschwingung

Abbildung 3.7 zeigt eine Addition der Schwingungen aus den Gleichungen 3.24 und 3.25 mit dem Ergebnis 3.26. Durch eine Fortsetzung dieser Reihenentwicklung kann man sich immer stärker einem Rechteck annähern.

$$f_1(x) = A_1 * \sin(x) \quad (3.24)$$

$$f_2(x) = A_3 * \sin(3x) \quad (3.25)$$

$$f = A_1 * \sin(x) + A_3 * \sin(3x) \text{ mit } A_1 = 1 \text{ und } A_3 = \frac{1}{3} \quad (3.26)$$



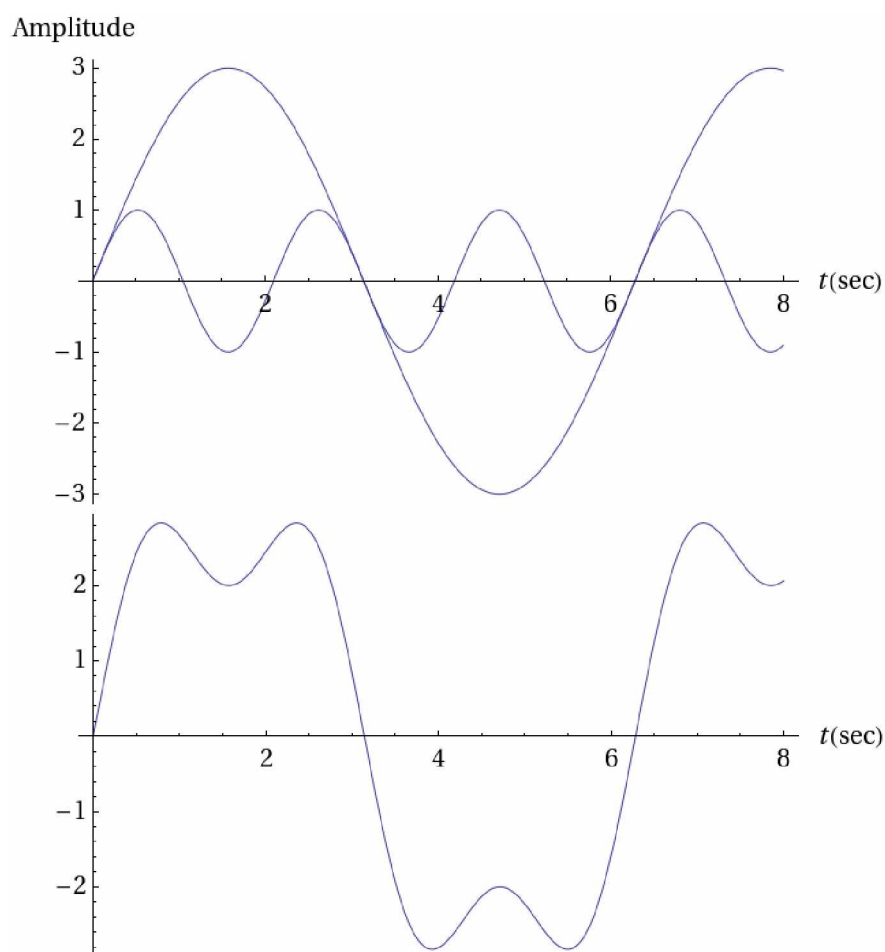


Abbildung 3.7.: Oben: Die ersten 2 Glieder der Rechteckentwicklung
Unten: Summe der beiden Einzelschwingungen

Sägezahnswingung

Eine weitere Schwingung, die mittels harmonischer Synthese erzeugt werden kann, ist die in Abbildung 3.8 gezeigte Sägezahnswingung, deren Reihe in Gleichung 3.27 dargestellt ist.

$$\begin{aligned}
 f(t) &= A_1 \cdot \sin(\omega \cdot t) + A_2 \cdot \sin(\omega \cdot 2 \cdot t) + \\
 &A_3 \cdot \sin(\omega \cdot 3 \cdot t) + A_4 \cdot \sin(\omega \cdot 4 \cdot t) + \dots
 \end{aligned}
 \tag{3.27}$$

mit $A_1 = 1$, $A_2 = \frac{1}{2}$, $A_3 = \frac{1}{3}$ und $A_4 = \frac{1}{4}$



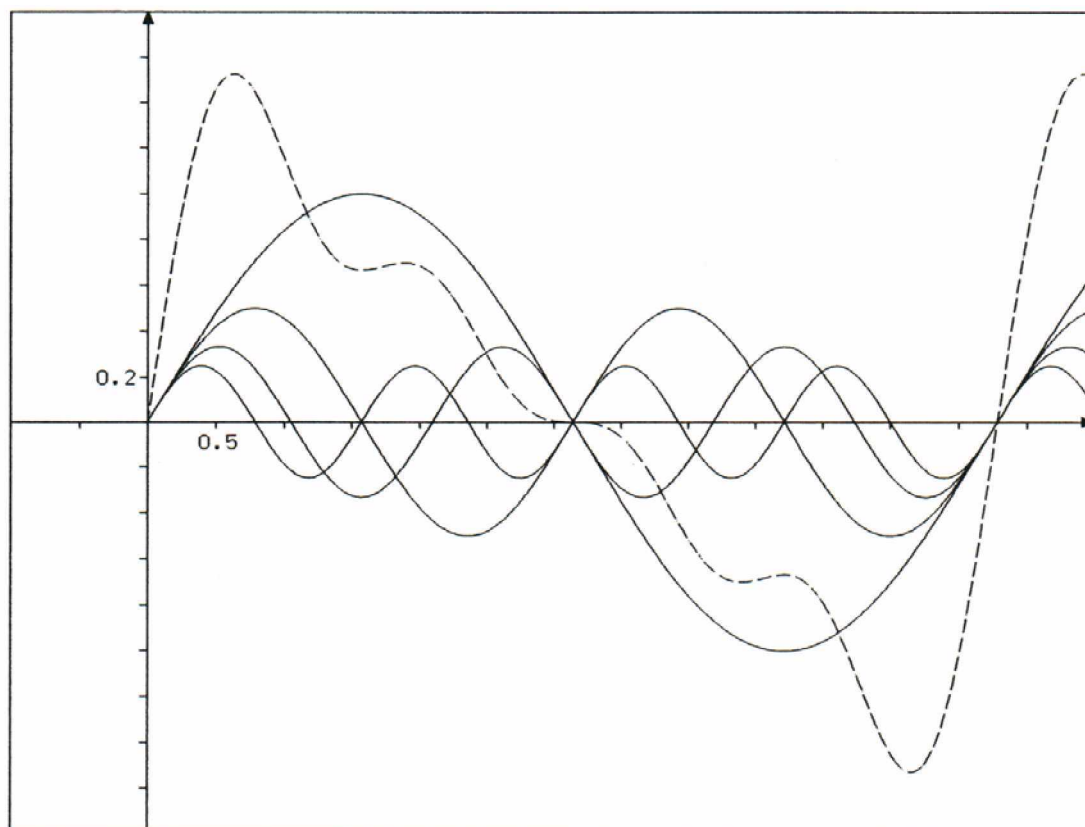


Abbildung 3.8.: Die ersten vier Glieder aus der Reihenentwicklung für Sägezahnschwingung mit Resultierend (gestrichelt) aus JÜRGEN [7] S. 26

4. Schwingungsmessungen

Die Schwingungen, die durch den Betrieb einer Maschine auftreten, haben unterschiedliche Ursachen. Eine schwingungsfreie Maschine gibt es nicht, selbst perfekt produzierte, montierte, ausgerichtete und gewartete Maschinen schwingen aufgrund unvermeidlicher Imperfektionen.

Fehler und Abnützungen an Bauteilen verursachen ebenfalls Schwingungen, die fehlertypische Frequenzen haben. Dadurch ist es möglich von den Schwingungen auf die Fehlerquelle zu schließen.

An Maschinen können unterschiedliche Schwingungen gemessen werden, zum Beispiel die Absolutschwingungen nicht rotierender Teile wie dem Maschinengehäuse oder Relativschwingungen zwischen Welle und Gehäuse.

Der Begriff Schwingungsmessung ist ein Überbegriff, der Teilgebiete mit unterschiedlichen Zielsetzungen umfasst, nämlich die bereits seit langem in der Industrie angewendeten Breitbandmessungen und die etwas jüngeren und noch nicht so weit verbreiteten Schwingungsmessungen in der Zustandsüberwachung. Die beiden Teilbereiche unterscheiden sich in ihrer Motivation und in der Signalverarbeitung.

Breitbandmessungen sind seit langem Grundlage für die Abnahme von Maschinen mit rotierenden Teilen. Die Normungsinstitute geben für diese Messungen an der Maschinengröße orientierte Grenzwerte für die Summenschwingung von Maschinen vor, siehe als Beispiel die aus der DIN 10816-1 entnommenen Abbildung 4. Die Norm-Werte sind nicht verbindlich sondern als Anhaltspunkte gedacht. Bei diesen Messungen werden die Schwingungen über einen festgelegten Frequenzbereich, der vom Maschinentyp abhängig ist, gemessen und zu einem Kennwert, zum Beispiel dem Effektivwert, zusammengefasst.



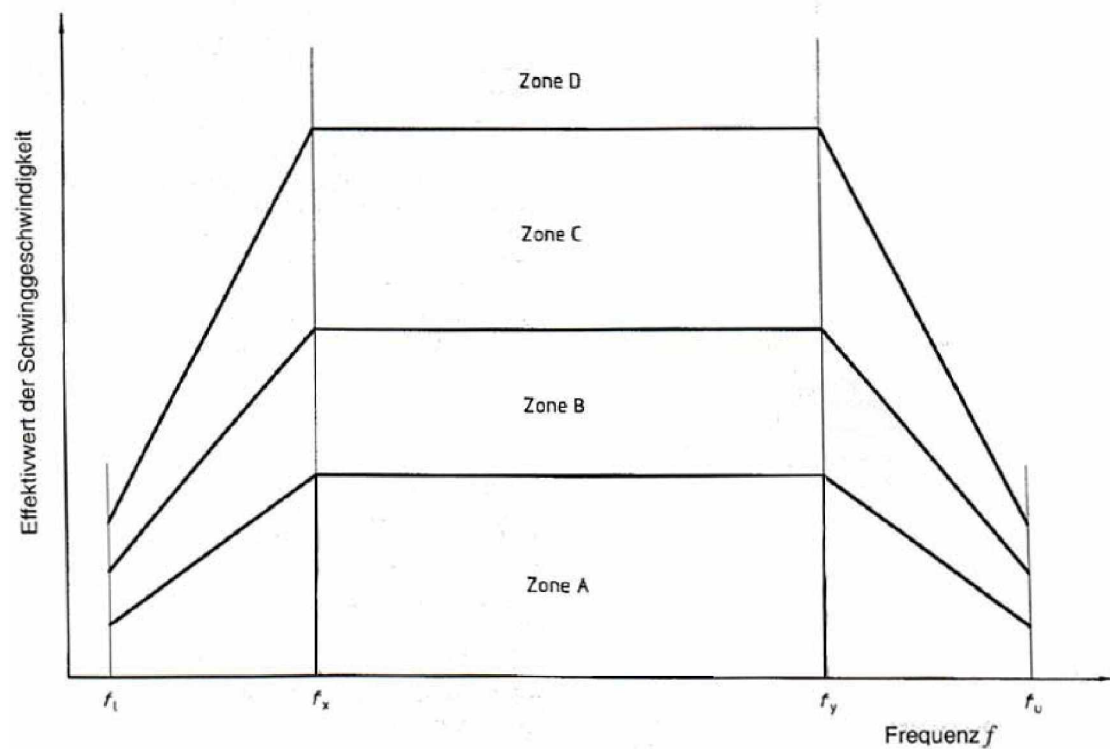


Abbildung 4.1.: Allgemeiner Verlauf der Schwingungsgeschwindigkeit als Beurteilungsgröße aus DIN ISO 10816-1 [17]

- Zone A Neue Maschinen sind meist in diesem Bereich
- Zone B Maschine für den Dauerbetrieb geeignet
- Zone C Maschine nicht für den Dauerbetrieb geeignet, jedoch bis zur nächsten Instandsetzungsmöglichkeit
- Zone D Maschine nicht für den Betrieb geeignet, Schadensgefahr

Bei der Zustandsüberwachung werden die Schwingungen gemessen und in ihre Frequenzkomponenten zerlegt. Anhand dieser Komponenten wird versucht, den Zustand von Maschinenelementen wie z.B. Lager festzustellen. Die Normen zur Zustandsüberwachung geben daher nur Empfehlungen zur Durchführung der Messungen und der Messtechnik ab, aber keine Werte die herangezogen werden könnten um Maschinenteile zu beurteilen.

Zur Verdeutlichung ist in Abbildung 4 die unterschiedliche Vorgehensweise dargestellt.

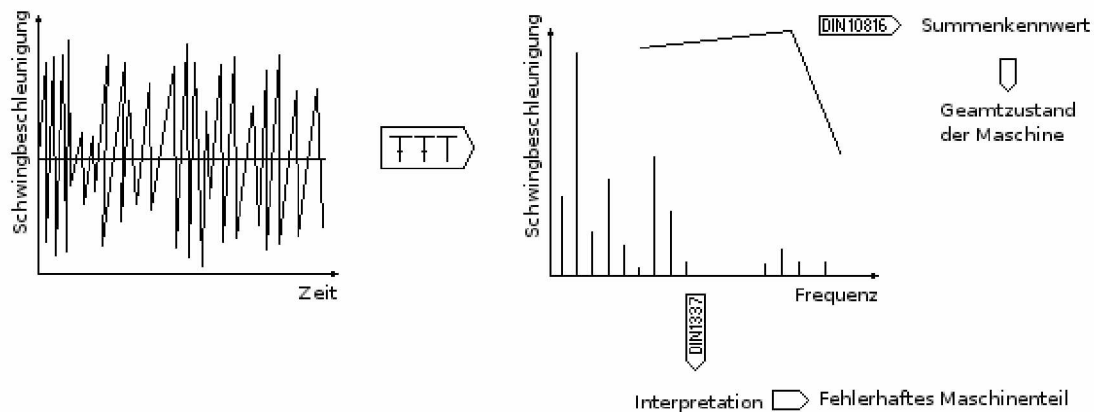


Abbildung 4.2.: Unterschiedliche Herangehensweise und Zielsetzung der Normenreihen DIN ISO 10816 und DIN ISO 13373

4.1. Messgröße

Als Messgrößen können die Schwinggeschwindigkeit, der Schwingweg oder die Schwingbeschleunigung verwendet werden. Die Größen sind durch Integration bzw. Differenzieren überführbar, siehe Gleichung 3.2 bis 3.4. Abhängig vom Ziel der Schwingungsmessung sollte auch die Messgröße mit zugehörigem Messverfahren gewählt werden. Im Bereich der Zustandsüberwachung wird vorwiegend die Schwingbeschleunigung herangezogen, da diese auch in hohen Frequenzbereichen, welche für die Beurteilung von Lagerzuständen wichtig sind, zuverlässige Messwerte ermöglicht.

4.2. Messpunkte vgl. [3]

Die Messpunkte bezeichnen die Stellen an den Aggregaten die überwacht werden. Bei der Überwachung von Maschinen ist die Auswahl der Messpunkte ein wichtiger Aspekt. Dem wurde Rechnung getragen, indem im umfangreichen Normenwerk zu Schwingungsmessungen und Conditionmonitoring diese Messpunkte festgelegt wurden. In Abbildung 4.3 ist beispielhaft eine Maschinengruppe mit Antriebs- und Arbeitsmaschine und den vorgeschlagenen Messpunkten dargestellt.

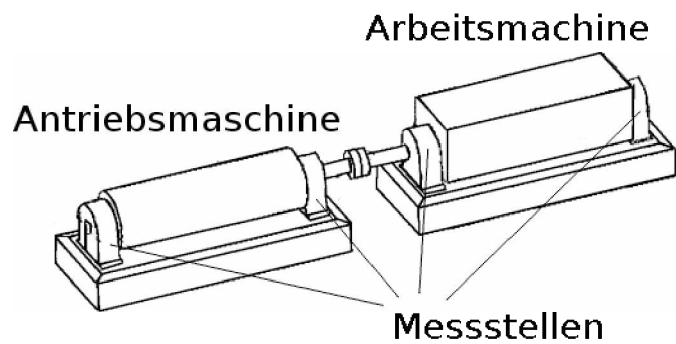


Abbildung 4.3.: Maschinengruppe mit Messpunkten abgeändert übernommen von DIN ISO 13373-1 [17]

An jedem Messpunkt werden zwei radiale und eine axiale Messung durchgeführt. Bei Maschinen mit horizontaler Welle sollten die radialen Messungen wenn möglich horizontal und vertikal durchgeführt werden. Die Messpunkte sind in der Norm DIN ISO 13373-1 für Aggregate mit vertikaler bzw. horizontaler Welle (Abbildung 4.4) dargestellt.

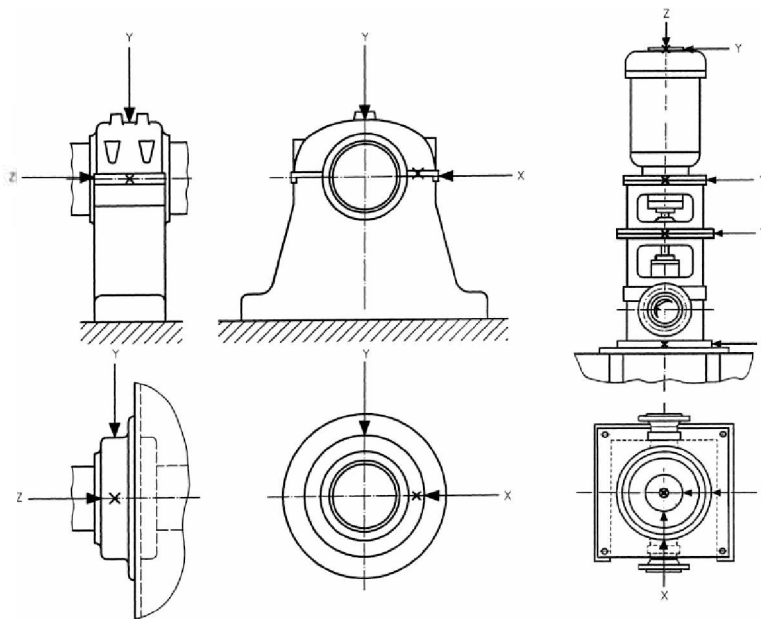


Abbildung 4.4.: Messpunkte an Lagerstellen bei Aggregaten mit horizontaler bzw. vertikaler Welle aus DIN ISO 13373-1; X und Y bezeichnen die radialen und Z die axialen Messpunkte. [3]

4.3. Kopplungssysteme vgl. [8], [1]

Um die Messungen durchzuführen muss der Sensor an der Maschine angekoppelt werden. Diese Kopplung sollte starr sein um die Schwingungen nicht zu verfälschen. Es gibt eine Vielzahl von Kopplungsmöglichkeiten, einige wichtige sind hier dargestellt. In den Abbildungen 4.5 und 4.6 ist zusätzlich das frequenzabhängige Übertragungsverhalten (oben) zur Anregung (unten), mit dem resultierenden Ausgangssignal (ebenfalls unten) dargestellt.

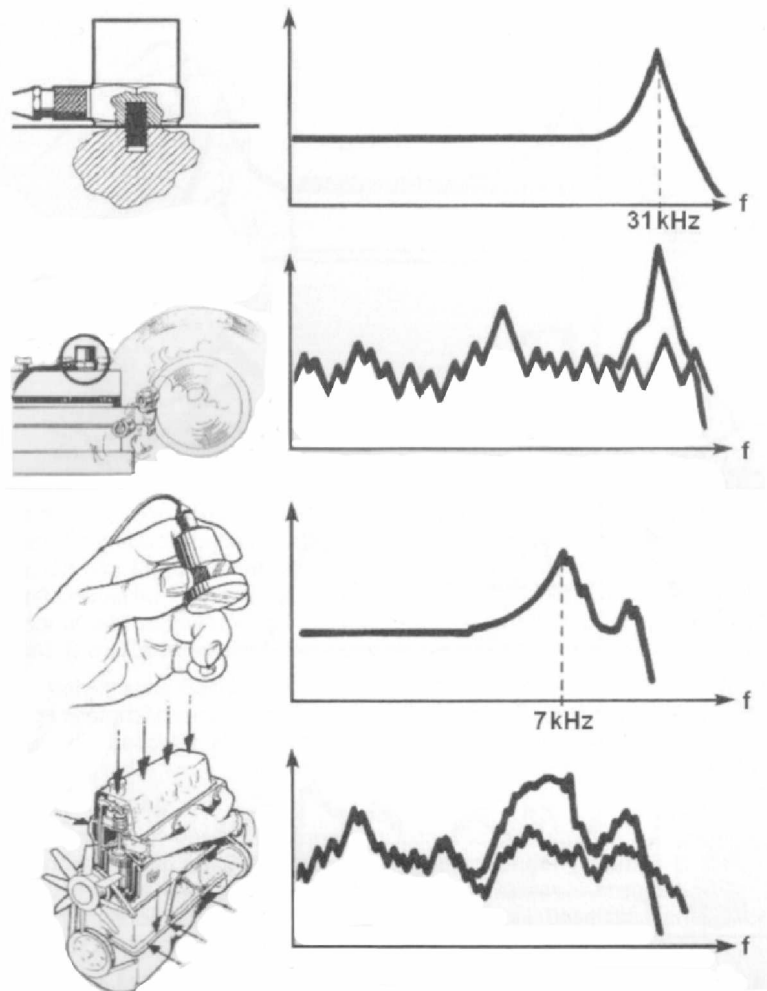


Abbildung 4.5.: Oben: Sensorkopplung mittels Stahl-Madenschraube, ideale Verbindung, oft schwer zu realisieren
 Unten: Magnetkopplung, starke Reduktion des Aufnahmebereichs aber hochflexibel
 aus KOLERUS/WASSERMANN [8]

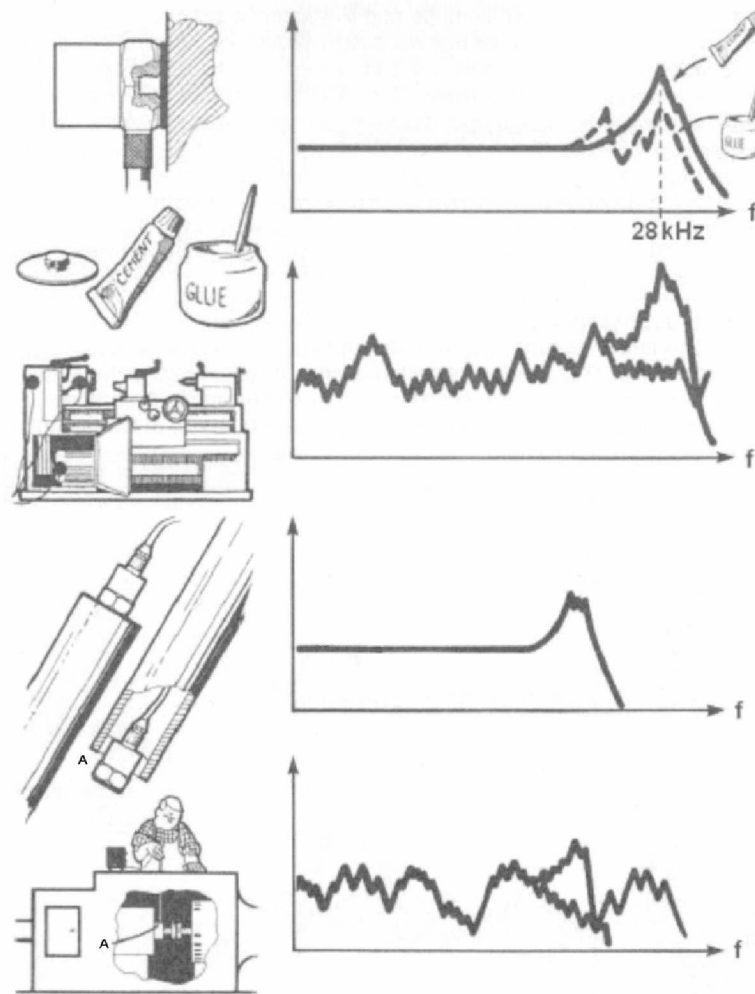


Abbildung 4.6.: Oben: Schraube mit Klebstoff am Messpunkt befestigt, bei gut aushärtenden Klebern vergleichbar mit einer Stahl Madenschraube
 Unten: Rohr mit in Gummi eingebettetem Sensor messobjektseitig
 aus KOLERUS/WASSERMANN [8]

4.4. Messaufnehmer vgl. [8], [1]

Es gibt verschiedene Messprinzipien, um die Schwingungen einer Maschinen in ein Messsignal umzuwandeln. Sie unterscheiden sich in der gemessenen Größe ebenso wie im verwendeten Umwandlungsmechanismus. Es soll hier ein kurzer Überblick gegeben werden, der keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt.

Wirbelstromaufnehmer

Ein hochfrequentes magnetisches Feld im Aufnehmer induziert in dem schwingenden ferromagnetischen Objekt ein Gegenfeld, das proportional zu seiner Entfernung auf das primäre Feld rückwirkt. So wird der Schwingweg $x(t)$, die Distanzänderung zwischen feststehendem Aufnehmer und Objekt, berührungslos abgenommen. Dieses Messprinzip setzt voraus, dass der Aufnehmer still steht, und wird häufig für Wellenschwingungen angewandt. Der Nachteil ist, dass Exzentrizität und Werkstoffinhomogenitäten der Welle ein Messsignal vortäuschen.

Elektrodynamischer Geschwindigkeitsaufnehmer

Der Aufnehmer wird mit dem schwingenden Objekt fest verbunden. Ein Permanentmagnet ist im Aufnehmer federnd gelagert und befindet sich innerhalb einer Spule. Die übertragenen Schwingungen bewegen die mit dem Gehäuse fest verbundene Spule relativ zum Permanentmagnet und induzieren so ein Messsignal, das nach der Formel für die Induktivität der Schwinggeschwindigkeit $v(t)$ proportional ist.

Piezoelektrischer Aufnehmer

Der piezoelektrische Effekt beschreibt eine Ladungsverschiebung innerhalb eines Materials. Mechanische Belastung (Druck, Schub) führt bei piezoelektrisch aktiven Materialien (z.B. Quarz) zur Ausbildung von Oberflächenladung. Die Ladung wird mit Leitern abgenommen und führt zu einer Spannung die der Schwingbeschleunigung $a(t)$ streng proportional ist. Diese Aufnehmer sind in unterschiedlichen Ausführungen erhältlich und weit verbreitet, da ihre Eigenschaften den Ansprüchen der Schwingungsmessung am besten gerecht werden.

Dehnmessstreifen

Ein elektrischer Leiter wird über seine gesamte Länge mit dem Messobjekt starr verbunden. Wird das Objekt gedehnt, ändert sich der Widerstand des Leiters proportional zur Dehnung und damit dem Schwingweg $x(t)$. Dieses Messprinzip eignet sich um Torsions- bzw. Biegeschwingungen an Wellen aufzunehmen.

Bei allen Messaufnehmern sollte beachtet werden, dass ihre Masse nicht größer ist als $\frac{1}{10}$ der Maschinenmasse und ihre Eigenfrequenz ausreichenden Abstand zur höchsten



interessierenden Frequenz hat. Die Eigenfrequenz oder Resonanzfrequenz ist die Frequenz, mit der ein schwingungsfähiges System nach einmaliger Anregung ausschwingt.

4.5. Filter vgl. [8], [9]

Das Messsignal muss durch verschiedene Filter aufbereitet und verstärkt werden, um die Schwingungskomponenten, die einen Rückschluss auf den Zustand der Maschine zulassen, zu isolieren und eine Interpretation zu ermöglichen.

Dieser Filter lässt nur die Frequenzanteile einer Schwingung durch, die je nach Filter unterhalb, oberhalb oder innerhalb seiner Grenzfrequenz liegen. Die Schärfe dieser Trennung ist ein Qualitätskriterium für Filter. Es werden drei Filtertypen unterschieden.

Tiefpassfilter

Beim Durchlaufen eines Tiefpassfilters werden Signalanteile oberhalb der Grenzfrequenz aus dem Signal entfernt.

Hochpassfilter

Ein Hochpassfilter entfernt Schwingungsanteile mit Frequenzen unter der Grenzfrequenz.

Filter mit einstellbarem Frequenzbereich

Als Bandpass bezeichnet man Filter, die nur Frequenzen zwischen zwei Grenzfrequenzen durchlassen. Bandpässe mit einstellbarem Frequenzbereich ermöglichen es, ein Signal Frequenzband für Frequenzband abzutasten. Bei ausreichender Filterqualität und Bandbreite (ausreichend schmal) ist es möglich, ein Summensignal mit diesen Filtern, ähnlich zur Fouriertransformation, in seine Frequenzanteile zu zerlegen.

4.6. Fourieranalyse, Fourierreihe und Fouriertransformation vgl. [7],[10]

Bei der Messung von Schwingungen an Maschinen ist nur das Gesamtsignal aller Anregungen zugänglich, z.B. die gestrichelte Kurve in Abbildung 3.8. Da viele gängige Schäden und Verschleißerscheinungen ein typisches Schwingungsbild aufweisen, ist



die Zerlegung des gemessenen Summensignals in die einzelnen Komponenten für die Maschinenüberwachung eine grundlegende Voraussetzung. Für diese Zerlegung liefert die Mathematik die Fourieranalyse, auch Harmonischen Analyse genannt, als Werkzeug. Dabei werden Fourierreihen für periodische Funktionen und die Fouriertransformation für nicht periodische Funktionen angewandt. Hier soll nur ein kurzer Einblick in das Thema gegeben werden, genauere Informationen finden sich in der Literatur z.B. [10],[8].

Fourierreihen

Eine periodische Funktion kann mithilfe einer Fourierreihe angenähert werden. Die Periode beträgt für diese Funktionen 2π , und es gilt wie für jede periodische Funktion der Grundsatz $f(x) = f(x + 2\pi)$.

Eine Fourierreihe ist definiert als die trigonometrische Reihe $S_F(t)$ einer Funktion $f(t)$ die gleichmäßig gegen diese konvergiert.

$$\begin{aligned}
 f(t) \sim S_f(t) = & A_0 + A_1 \cdot \cos(\omega t) + A_2 \cdot \cos(2 \cdot \omega t) + \\
 & A_3 \cdot \cos(3 \cdot \omega t) + \dots + A_n \cdot \cos(n \cdot \omega t) \\
 & + B_1 \cdot \sin(\omega t) + B_2 \cdot \sin(2 \cdot \omega t) + \\
 & B_3 \cdot \sin(3 \cdot \omega t) + \dots + B_n \cdot \sin(n \cdot \omega t)
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

In Summenschreibweise

$$S_f(x) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \cdot \cos(n \cdot x) + B_n \cdot \sin(n \cdot x)] \tag{4.2}$$

Unter Berücksichtigung der Euler'schen Formel $e^{i\varphi} = \cos\varphi + i \cdot \sin\varphi$ ergibt sich aus Gleichung 4.2 die Exponentialschreibweise in Gleichung 4.3.

$$S_f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k e^{ik\omega t} \tag{4.3}$$

$\sin(\omega t)$ und $\cos(\omega t)$ sind dabei die Grundschwingungen, während alle folgenden Glieder mit $n \geq 1$ die Oberschwingungen darstellen. Statt $\omega \cdot t$ kann auch x eingesetzt werden. ω entspricht $\frac{2\pi}{T}$, das bedeutet, dass mit zunehmendem n bzw. k bei der Exponentialschreibweise die Periode der Schwingungsanteile immer kleiner wird und folglich die Frequenz immer höher. Die Koeffizienten $A_0, A_1 \dots A_n$ und $B_1 \dots B_n$ bzw. c_k nennt man



Fourierkoeffizienten.

Die Koeffizienten sind durch die Formeln von Euler-Fourier bestimmbar, deren Herleitung DRMOTA, GITTENBERGER, KARIGL, PANHOLZER [10] zu entnehmen ist.

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cdot \cos(n \cdot x) \cdot dx \quad (4.4)$$

$$B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cdot \sin(n \cdot x) \cdot dx \quad (4.5)$$

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cdot e^{-ikx} \cdot dx \quad (4.6)$$

Für eine Schwingung mit der Periode T sieht die Reihe mit ihren Bestimmungsgleichungen wie folgt aus.

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[A_n \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{T} \cdot t\right) + B_n \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{T} \cdot t\right) \right] \quad (4.7)$$

$$A_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{T} \cdot t\right) \cdot dt \quad (4.8)$$

$$B_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{T} \cdot t\right) \cdot dt \quad (4.9)$$

$$\frac{1}{T} \int_0^T f(t) \cdot e^{-ikwt} \cdot dt \quad (4.10)$$

Diskrete Fouriertransformation

Ein kontinuierliches periodisches Signal wird angenähert, indem ein zeitlich begrenzter Abschnitt diskretisiert und auf beiden Seiten periodisch fortgesetzt wird. Diese Diskretisierung wird durch eine Abtastung umgesetzt und ergibt zum Beispiel für einen Sinus ein Bild wie in Abbildung 4.6. Die Funktion ist also nur an m Stellen bestimmt. Die Abtastrate Δt innerhalb einer Periode ist gegeben mit $\frac{T}{m}$.



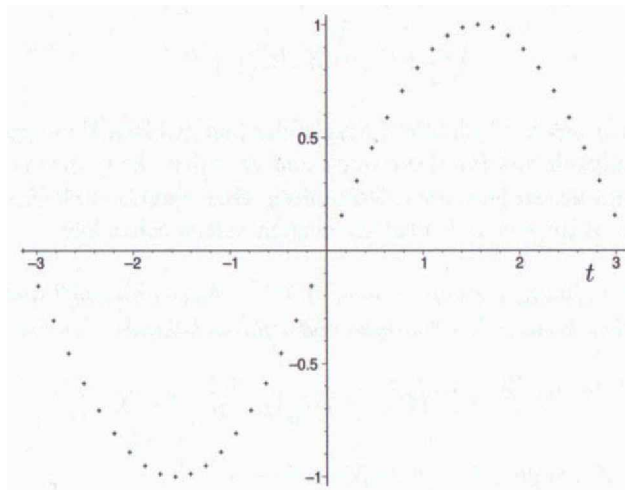


Abbildung 4.7.: Eine Abgetastete Sinusfunktion aus DRMOTA, GITTENBERGER, KARIGL, PANHOLZER [10]

Die Überführung der Koeffizienten von der Funktion zur diskret abgetasteten Funktion erfolgt gemäß der Trapezregel siehe DRMOTA, GITTENBERGER, KARIGL, PANHOLZER [10].

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} F(\varphi) \cdot d\varphi \Rightarrow A_0 = \frac{1}{m} \sum_{i=0}^{m-1} F(i) \quad (4.11)$$

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} F(\varphi) \cdot \cos(n \cdot \varphi) \cdot d\varphi \Rightarrow A_n = \frac{2}{m} \sum_{i=0}^{m-1} F(i) \cdot \cos(n \cdot \varphi_i) \quad (4.12)$$

$$B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} F(\varphi) \cdot \sin(n \cdot \varphi) \cdot d\varphi \Rightarrow B_n = \frac{2}{m} \sum_{i=0}^{m-1} F(i) \cdot \sin(n \cdot \varphi_i) \quad (4.13)$$

Mithilfe dieser Formeln ist die Berechnung der einzelnen Koeffizienten möglich ohne die Funktion zu kennen, es sind nur die Funktionswerte nötig und diese sind durch Messungen zugänglich.

Für die harmonische Komponente der n -ten Ordnung gilt dann

$$F_n(\varphi) = A_n \cdot \cos(n \cdot \varphi) + B_n \cdot \sin(n \cdot \varphi) = C_n \cdot \sin(n \cdot \varphi + \varphi_n) \quad (4.14)$$

wobei C_n nicht mit c_k dem Fourierkoeffizienten der Exponentialschreibweise verwechselt werden darf.

Die Amplitude ist gegeben durch



$$C_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \quad (4.15)$$

Der Phasenwinkel jeder Harmonischen ist

$$\tan(\varphi_n) = \frac{A_n}{B_n} \quad (4.16)$$

Anhand eines Beispiels soll die Diskrete Transformation vorgeführt werden. Heute wird diese Methode von Computern mittels schneller Algorithmen wie z.B. der Fast Fourier Transformation eingesetzt.

Beispiel Harmonische Analyse vgl. [7]

Angabe

Es sollen die Einzelkomponenten des Signalabschnitts aus Abbildung 4.8 berechnet werden. Der Signalabschnitt wird an beiden Enden periodisch fortgesetzt und nähert dadurch ein entsprechendes periodisches Signal an.

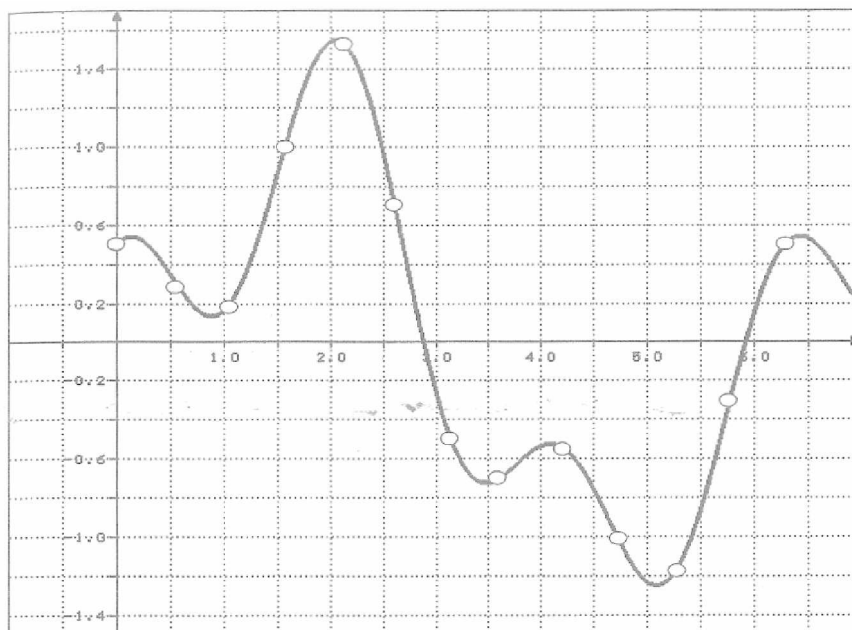


Abbildung 4.8.: Meßschrieb einer Schwingung aus JÜRCEL [7] S. 33

Die dargestellte Schwingungsfunktion wird in $m = 12$ gleiche Teile zerlegt, siehe Abbildung 4.9 und die beschriebene Vorgehensweise angewendet.



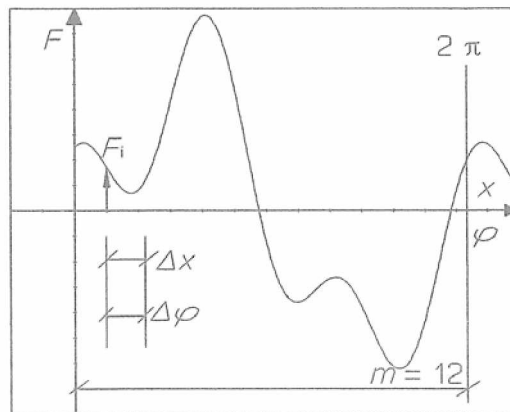


Abbildung 4.9.: Diskretisierung einer Schwingung aus JÜRCEL [7] S. 33

Berechnung

Tabelle 4.1.: Berechnungstabelle für die 1. Ordnung

i	$F(i)$	$n \cdot \varphi$	$F(i) \cdot \cos(n \cdot \varphi)$	$F(i) \cdot \sin(n \cdot \varphi)$
0	0,5	0	0,5	0,0
1	0,33	30	0,286	0,165
2	0,19	60	0,095	0,165
3	1,0	90	0,0	1,0
4	1,54	120	-0,77	1,334
5	0,67	150	-0,58	0,335
6	-0,5	180	0,5	0,0
7	-0,67	210	0,58	0,335
8	-0,54	240	0,27	0,468
9	-1,0	270	0,0	1,0
10	-1,19	300	-0,595	1,031
11	-0,33	330	-0,286	0,165
			Summe: 0,0	Summe: 6,0

Für die Fourierkoeffizienten 1. Ordnung erhält man:

$$A_1 = \frac{2}{12} \cdot \sum_{i=1}^{11} F(i) \cdot \cos(n \cdot \varphi) = \frac{1}{6} \cdot 0 = 0 \quad (4.17)$$



$$B_1 = \frac{2}{12} \cdot \sum_{i=1}^{11} F(i) \cdot \sin(n \cdot \varphi) = \frac{1}{6} \cdot 6 = 1 \quad (4.18)$$

Die Amplitude und der Phasenwinkel sind:

$$C_1 = \sqrt{0^2 + 1^2} = 1 \quad (4.19)$$

$$\tan(\varphi_1) = \frac{0}{1} = 0 \Rightarrow \varphi_1 = 0^\circ \quad (4.20)$$

Zusammengefasst ist die Schwingungskomponente 1. Ordnung in Gleichung 4.21

$$F_1(\varphi) = 0 \cdot \cos(1 \cdot \varphi) + 1 \cdot \sin(1 \cdot \varphi) = 1 \cdot \sin(1 \cdot \varphi + 0) \quad (4.21)$$

Der Amplitudenfaktor der Schwingung beträgt 1, und der Frequenzfaktor ebenfalls, die Schwingung tritt also mit Drehfrequenz auf.

Tabelle 4.2.: Berechnungstabelle für die 2. Ordnung

i	$F(i)$	$n \cdot \varphi$	$F(i) \cdot \cos(n \cdot \varphi)$	$F(i) \cdot \sin(n \cdot \varphi)$
0	0,5	0	0,5	0,0
1	0,33	60	0,165	0,286
2	0,19	120	-0,095	0,165
3	1,0	180	-1,0	0,0
4	1,54	240	-0,77	-1,334
5	0,67	300	0,335	0,58
6	-0,5	360	-0,5	0,0
7	-0,67	420	-0,335	-0,58
8	-0,54	480	0,27	-0,468
9	-1,0	540	1,0	0,0
10	-1,19	600	0,595	1,031
11	-0,33	660	-0,165	0,286
			Summe: 0,0	Summe: -1,194



Die Berechnung nach dem selben Schema wie für die 1.Ordnung führt zum Ergebnis für die zweite Ordnung 4.22.

$$F_2(\varphi) = 0 \cdot \cos(2 \cdot \varphi) + (-0,2) \cdot \sin(2 \cdot \varphi) = 0,2 \cdot \sin(2 \cdot \varphi + \pi) \quad (4.22)$$

Dieser Schwingungsanteil tritt mit doppelter Drehfrequenz und einem Amplitudenfaktor von 0,2 auf. Zusätzlich ist sie um 180° phasenverschoben zur Schwingung 1.Ordnung.

Tabelle 4.3.: Berechnungstabelle für die 3. Ordnung

i	$F(i)$	$n \cdot \varphi$	$F(i) \cdot \cos(n \cdot \varphi)$	$F(i) \cdot \sin(n \cdot \varphi)$
0	0,5	0	0,5	0,0
1	0,33	90	0,0	0,33
2	0,19	180	-0,19	0,0
3	1,0	270	0,0	-1,0
4	1,54	360	1,54	0,0
5	0,67	450	0,0	0,67
6	-0,5	540	0,5	0,0
7	-0,67	630	0,0	0,67
8	-0,54	720	-0,54	0,0
9	-1,0	810	0,0	-1,0
10	-1,19	900	1,19	0,0
11	-0,33	990	0,0	0,33
			Summe: 3,0	Summe: 0,0

Die Schwingungskomponente 3. Ordnung folgt mit 4.23, alle anderen Ordnungen ergeben null.

$$F_3(\varphi) = 0,5 \cdot \cos(3 \cdot \varphi) + 0 \cdot \sin(3 \cdot \varphi) = 0,5 \cdot \sin(3 \cdot \varphi + \frac{\pi}{2}) \quad (4.23)$$

Die 3. Ordnung hat die dreifache Drehfrequenz ist um 90° phasenverschoben und hat einen Amplitudenvergrößerungsfaktor von 0,5.

Die Schwingung besteht somit aus 3 Einzelschwingungen wie in Abbildung 4.10 dargestellt. Die Winkel unter denen die Schwingungen zueinander stehen zeigt das Phasendiagramm in Abbildung 4.11 .



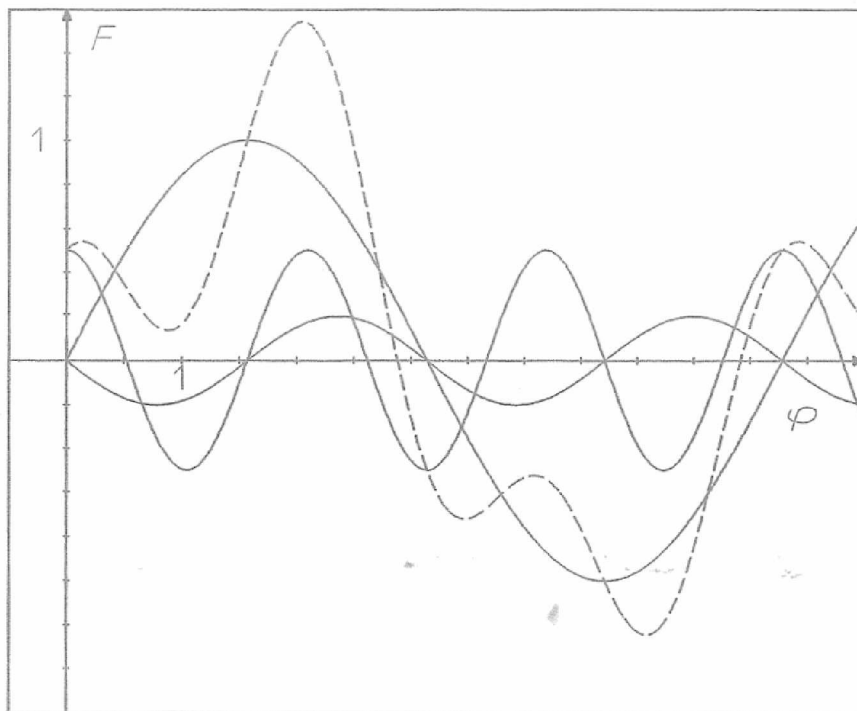


Abbildung 4.10.: Die Schwingungskomponenten der gemessenen Schwingung mit der daraus resultierenden Schwingung (gestrichelt) aus JÜRCEL [7] S. 34

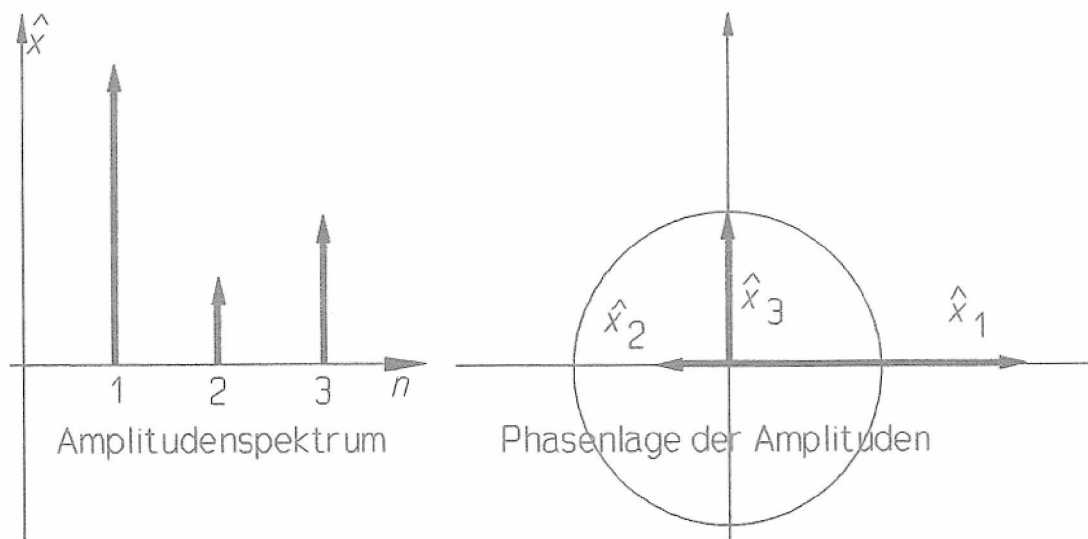


Abbildung 4.11.: Die Schwingungskomponenten mit ihren Amplituden und den Winkeln zueinander aus JÜRCEL [7] S. 34

4.7. Fehler der Signalaufbereitung vgl. [8]

Bei der diskreten Fourieranalyse wird, wie bereits erwähnt, ein Signalabschnitt herangezogen um das gesamte Signal anzunähern. Der entsprechende Abschnitt wird diskretisiert, sprich abgetastet, und anschließend periodisch wiederholt und liefert somit ein Ersatzsignal, dessen Fourierreihe berechnet wird.

Durch dieses Vorgehen kann es zu Erscheinungen kommen, die das Ergebnis verfälschen. Hier sollen nur ein Überblick über zwei der wichtigsten Phänomene gegeben werden. Genauere Informationen und weitere Literaturverweise findet man in KOLERUS/ WASSERMANN [8].

Aliasing

Aliasing wird ein Phänomen genannt welches durch ein unzureichende Abtastfrequenz zustande kommt. Die Abtastfrequenz f_s sollte mindestens doppelt so groß sein wie die größte im Signal interessierende Frequenz. Wenn diese Bedingung nicht erfüllt ist, ist eine eindeutige Rekonstruktion des Ausgangssignals nicht möglich. Dieser Zusammenhang wird das Nyquist-Shannonsche-Abtasttheorem genannt.

Daraus folgt, dass ein diskretes Signal nur eindeutig ist, wenn das Zeitsignal keine Anteile enthält, deren Frequenz größer als die halbe Abtastfrequenz sind. Sollte dies doch der Fall sein kommt, es zu Aliasing, bei dem plötzlich Anteile mit Frequenzen auftreten, die nicht vorhanden sind. Eine anschauliche Darstellung des Phänomens ist in Abbildung 4.12 gezeigt.

Um Aliasing auszuschließen werden Antialiasingfilter in die Messgeräte eingebaut. Diese sind als Tiefpassfilter ausgeführt, die nur Frequenzen unterhalb der halben Abtastfrequenz durchlassen. Trotz des Vorhandenseins des Filters sollte das Abtasttheorem bei Messungen berücksichtigt werden.



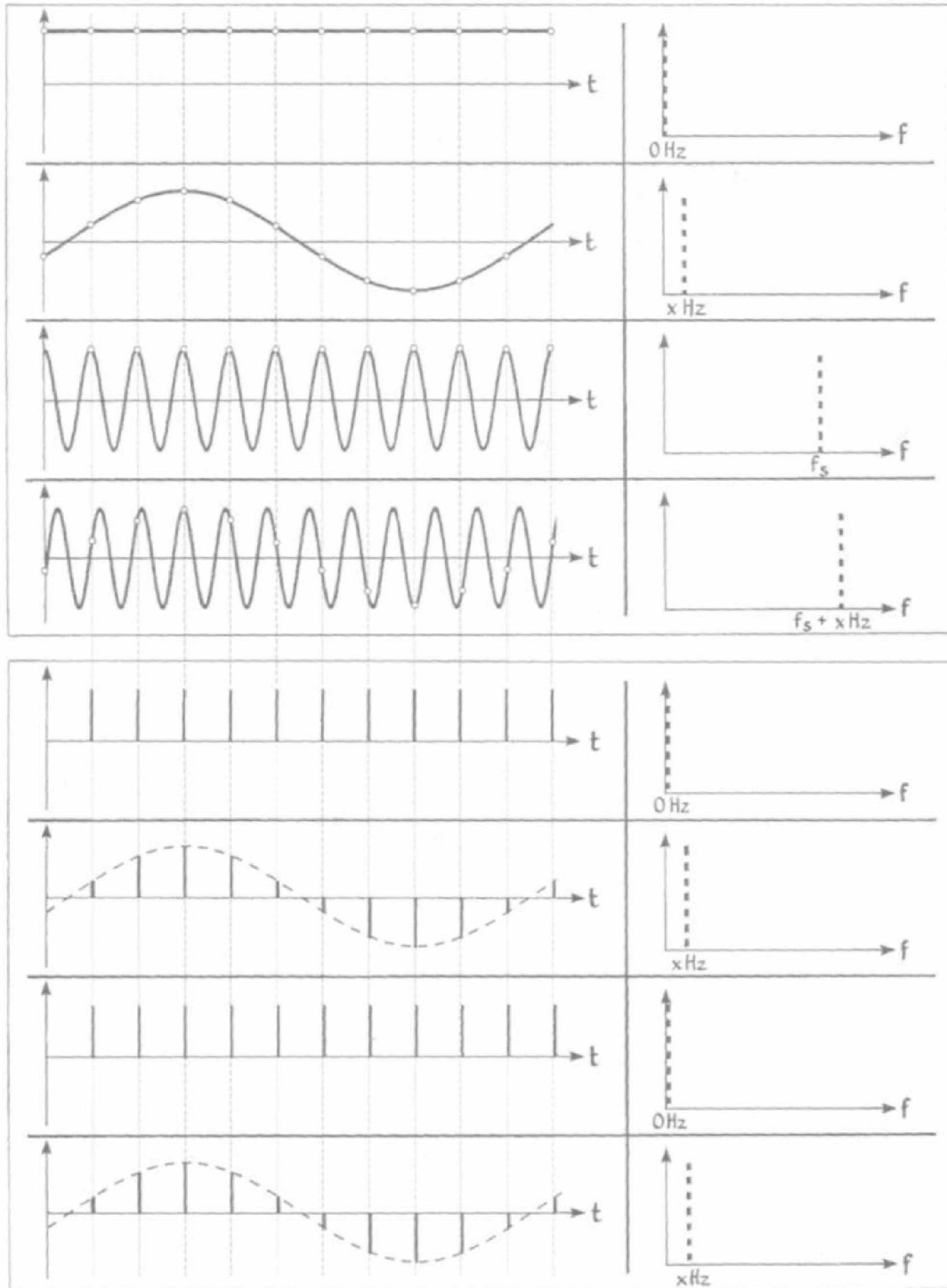


Abbildung 4.12.: In der oberen Bildhälfte sieht man die Eingangssignale mit ihren Abtastpunkten. In der Unteren die sich ergebenden Ausgangssignale. Nur die ersten beiden Fälle lassen sich wieder zurück transferieren, die beiden anderen produzieren Anteile die im Ausgangssignal nicht vorhanden sind. Grafik aus KOLERUS/WASSERMANN S99



Leakage

Durch die periodische Fortsetzung des Signalabschnittes vor der Entwicklung der zugehörigen Fourierreihe kommt es meist zu einem Unterschied zwischen Ursprungssignal und dem Ersatzsignales.

Um dem entgegenzuwirken wird der Abschnitt bewertet. Dabei werden die Funktionswerte des Abschnittes mit einer Funktion, der Bewertungsfunktion, multipliziert. Hier werden nur die Rechteckbewertung und die Hanningbewertung herangezogen um das Vorgehen zu verdeutlichen, es gibt aber auch noch andere solche sogenannten Fensterfunktionen, die aber in der Schwingungsüberwachung nur wenig verwendet werden. Die Wirkungsweise der Fenster lässt sich am besten graphisch veranschaulichen 4.13.

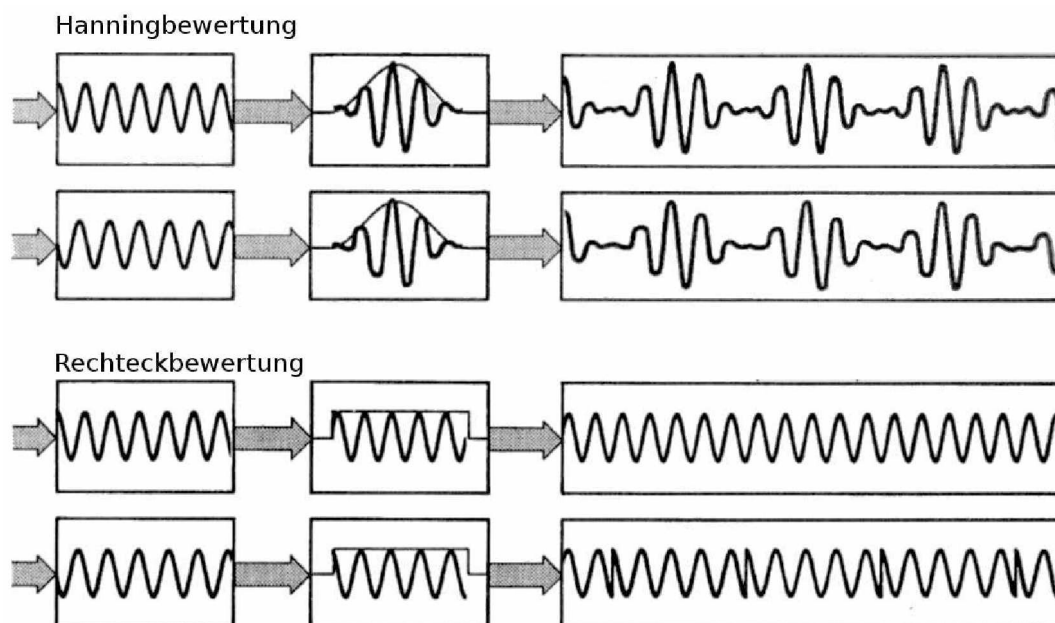


Abbildung 4.13.: Signalabschnitt mit der Fensterbewertung und dem sich ergebenden Ersatzsignal.
Grafik übernommen und abgeändert aus KOLERUS/WASSERMANN S101 ff

Durch die Hanningbewertung scheint das Ersatzsignal stärker verändert zu sein als bei einer Rechteckbewertung. Der Vorteil der Hanningbewertung zeigt sich erst nach der Fouriertransformation im Frequenzspektrum, siehe Abbildung 4.14.

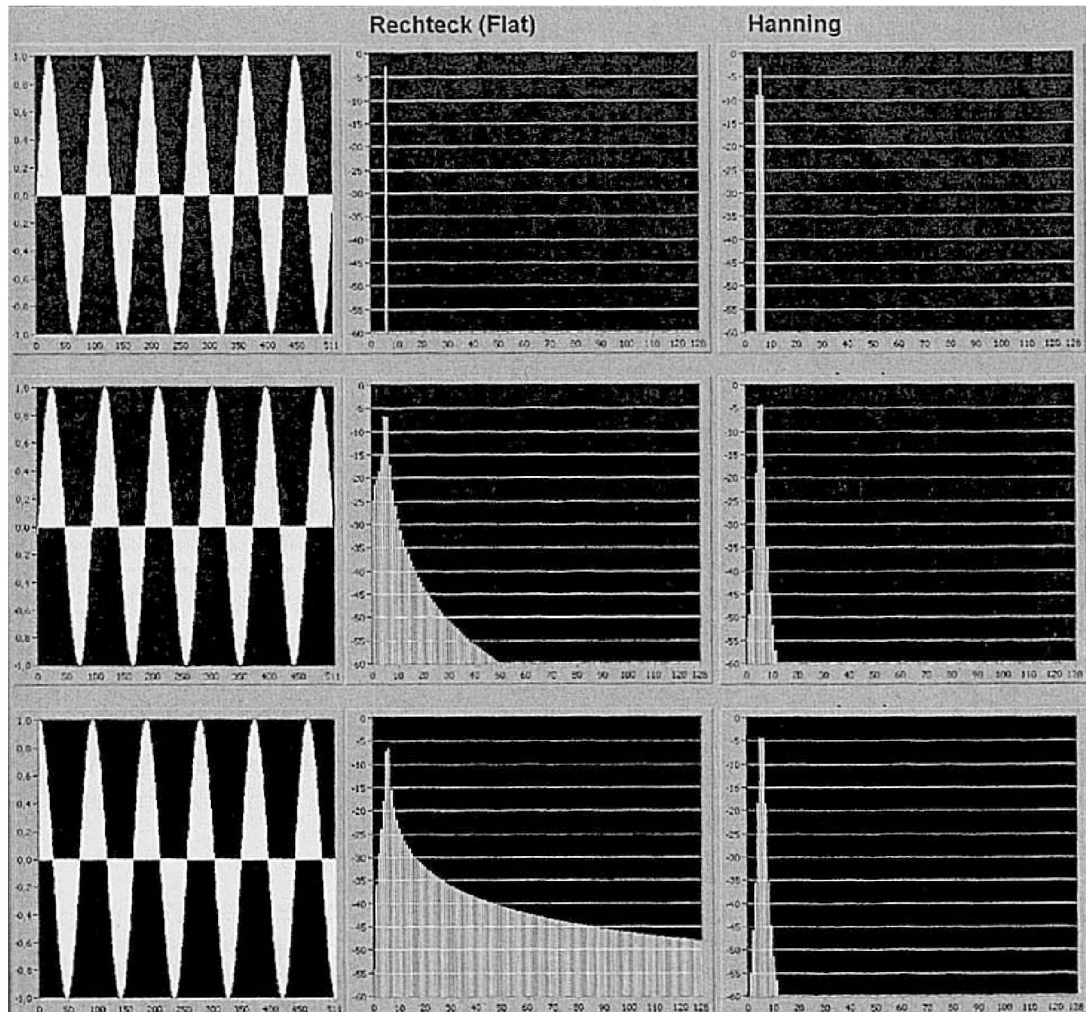


Abbildung 4.14.: Signalabschnitt mit der Fensterbewertung und dem sich ergebenden Spektrum aus KOLERUS/WASSERMANN S105

Die rechteckbewerteten Ersatzsignale ergeben nur dann ein brauchbares Ergebnis, wenn sich volle Perioden im ausgewählten Abschnitt befinden. Wenn Perioden „geschnitten“ werden, tritt eine starke Verbreiterung des Spektrums auf, die Energie „leckt“ sozusagen in benachbarte Frequenzbereiche = Leakage.

Da es nur selten der Fall sein wird, dass man genau eine volle Periodenanzahl erwischt, empfiehlt es sich die Hanningbewertung anzuwenden. Es tritt zwar auch hier eine Verbreiterung auf, und zwar in jedem Fall, jedoch bildet der maximale Ausschlag in allen Feldern die Hauptfrequenz eindeutig ab.

4.8. Hüllkurvenanalyse vgl. [11]

Eines der Ziele der Schwingungsüberwachung ist es, den Lagerzustand zu überwachen. Klassische Lagerfehler wie Außenring-, Innenring- und Wälzkörperschäden äußern sich in Stoßanregungen. Diese haben am Gesamtschwingungspegel nur einen sehr geringen Anteil. Die Stoßanregung durch die Lagerschäden klingt sehr schnell ab und ist vor der nächsten Anregung durch ein weiteres Überrollen des Schadens schon verklungen. Diese kurzen Impulse werden von anderen Schwingungen der Maschine noch überlagert und sind im Gesamtsignal kaum auszumachen.

Um diese Anteile aus dem Gesamtsignal zu isolieren wird die Hüllkurvenanalyse angewandt. Dabei wird das Frequenzspektrum der Hüllkurve analysiert, siehe auch Kapitel 4.10. Die Hüllkurve selbst kommt durch eine Signalaufbereitung zustande, die hier kurz beschrieben werden soll. Für eine Ausführliche Erklärung siehe KAINZ [11].

Zur Erläuterung wird eine idealisierte Stoßimpulsfolge im Zeitbereich herangezogen und der Aufbereitungsweg dargestellt (Abbildung 4.15). Das Zeitsignal wird hochpassgefiltert um niederfrequente Modulationen und Signalanteile zu entfernen. Es bleiben die Einzelanregungen durch den Schaden und deren Abklingvorgänge. Anschließend wird gleichgerichtet und tiefpassgefiltert. Dadurch verschwindet der hochfrequente Abklingvorgang der Einzelanregungen. Das verbleibende Signal ist die gleichgerichtete Hülle des ursprünglichen Signals. In diesem Signal ist die Schadfrequenz die Grundfrequenz. Eine abschließende Fourieranalyse überführt das Signal in den Frequenzbereich. Daher auch der Name Hüllkurvenanalyse.



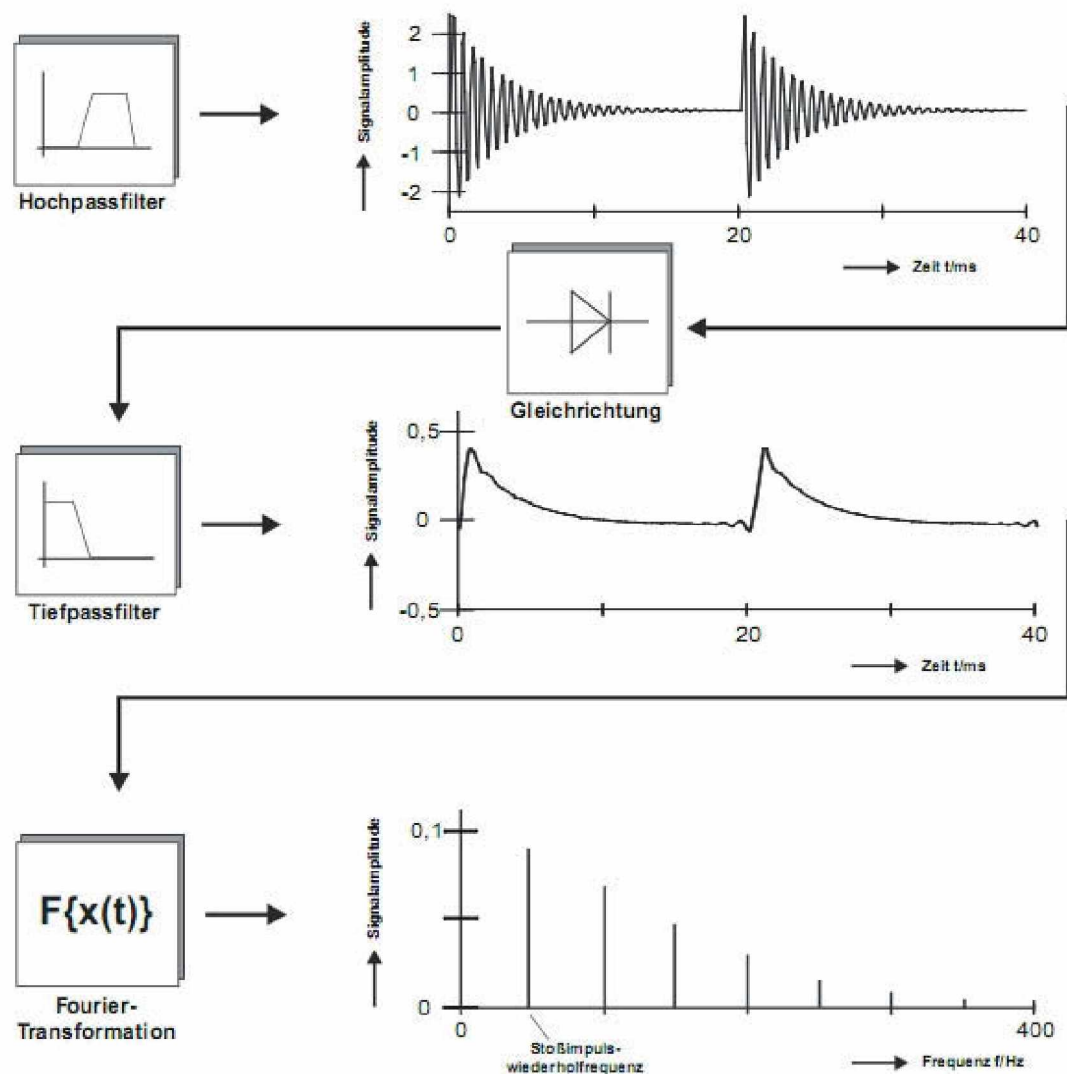


Abbildung 4.15.: Signalverarbeitungsweg der Hüllkurvenanalyse nach der Digitalisierung
Grafiken übernommen und verändert aus [9] S227

4.9. Kenngrößen eines Schwingungssignales

Der Schwingungszustand einer Maschine kann zu Kennwerten zusammengefasst werden. Dabei werden unterschiedliche Werte herangezogen, die sich auch auf die unterschiedlichen Größen Weg, Geschwindigkeit und Beschleunigung beziehen. Die Werte die zur Anwendung sind meist Effektivwerte in bestimmten Frequenzbereichen. Diese



Kennwerte können herangezogen werden, um den Gesamtschwingungszustand der Maschine zu beschreiben, eignen sich aber nur schlecht zur Fehlerfrüherkennung oder -diagnose.

4.10. Schadensfrequenzen vgl. [11],[8]

Um in einem Messspektrum, auf dem z.B. Schwingbeschleunigung gegen Frequenz aufgetragen, ist Schäden aufzufinden, sollten die möglichen Schadfrequenzen an diesem Messpunkt bekannt sein.

Wälzlager

Bei bekannter Wälzlagergeometrie sind Frequenzen für eine Innenring-, Außenring-, Wälzkörperschaden mit den Folgenden drei Gleichungen gegeben.

$$f_{Innenring} = \frac{n}{2} \cdot z \cdot \left[1 + \frac{KD}{RD} \cdot \cos(\alpha) \right] \quad (4.24)$$

$$f_{Außenring} = \frac{n}{2} \cdot z \cdot \left[1 - \frac{KD}{RD} \cdot \cos(\alpha) \right] \quad (4.25)$$

$$f_{Waelzkoerper} = n \cdot \frac{RD}{KD} \cdot \left[1 - \left(\frac{KD}{RD} \cdot \cos(\alpha) \right)^2 \right] \quad (4.26)$$

Dabei steht n für die Drehzahl, z für die Anzahl der Wälzkörper, KD für den Kugeldurchmesser und RD für den Teilkreisdurchmesser (= Durchmesser vom Mittelpunkt des Lagers bis zu dem Kreis auf dem die Mittelpunkte der Wälzkörper liegen).

Für die Gleichungen wird eine konstante Drehzahl und eine schlupffreie Abrollbewegung der Wälzkörper angenommen. In der Realität können die tatsächliche Schadensamplituden in Diagrammen etwas neben den berechneten Schadensfrequenzen liegen.



Unwucht

Unwuchten an rotierenden Teilen treten mit der Frequenz ihrer Drehzahl auf. Fluchtungsfehler und verbogene Wellen schlagen sich auch in der Drehzahlfrequenz und häufig auch bis in deren vierte Harmonische nieder. Die Umrechnung von Drehzahl auf Frequenz ist in Gleichung 4.27 dargestellt.

$$f[\text{Hz}] = \frac{n[\text{min}^{-1}]}{3600} \quad (4.27)$$

Einen kleinen Überblick über Schäden und deren Frequenzen gibt die Tabelle 4.4.

Tabelle 4.4.: Kleine Fehlertabelle in Anlehnung an KOLERUS/WASSERMAN [8] S161

Schadensursache	Dominante Frequenz	Fre-	Richtung	Bemerkung
Unwucht an rotierenden Teilen	$1 \cdot n$		Radial	Gewöhnlich Ursache bei sehr starken Schwingungen von Maschinen
Fluchtfehler & verbogene Welle	gewöhnlich n oftmals $2n$ manchmal $3n$		radial & axial	Häufige Fehlerquelle
Beschädigte Wälzlager (Kugel, Rollen, ...)	Stoßimpulse bei der Frequenz der Beschädigten Lagerkomponente siehe oben		radial & axial	Ungleichmäßige Schwingungspegel, oft mit Stößen
Mechanisches Spiel	$2n$		-	Auch Harmonische und Subharmonische
Kurbeltriebe, Kupplungen	Drehzahl und Vielfache		radial	Konstruktionsbedingte Schwingungen (kein Fehler)



Teil II.

Umsetzung (Praktischer Teil)

5. Technische Umsetzung

Die technischen Möglichkeiten für ein Überwachungssystem von Maschinenschwingungen reichen von online Komplettsystemen, die ins Prozessleitsystem integriert sind, bis zu einfachen tragbaren Geräten zur Datensammlung, die an einem Host-PC ausgewertet werden. Eine nachträgliche Installation eines Onlinesystems ist mit baulichen und dadurch kostenintensiven Maßnahmen verbunden. Aus diesem Grund wird in den Werken Spittelau und Flötzersteig ein mobiles System verwendet. Ein Vorteil der mobilen Überwachung ist, dass sich der Umfang der überwachten Aggregate jederzeit erweitern bzw. verkleinern lässt.

5.1. Schwingungsaufnehmer vgl. [12]

Beim verwendeten Messaufnehmer handelt es sich um einen piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmer der Firma IMI/ICP, Modell 603C01. Der Sensor ist in Abbildung 5.1 zu sehen.

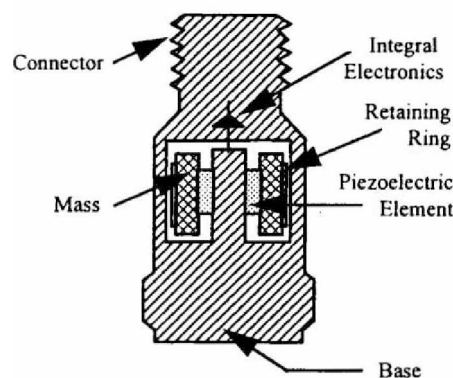


Abbildung 5.1.: Prinzip-Skizze des verwendeten Piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmers aus [12]

Der Messbereich geht von $-490 \frac{m}{s^2}$ bis $+490 \frac{m}{s^2}$, in einem Frequenzbereich von 0,5-10.000 Hz. Die Eigen-/Resonanzfrequenz des Aufnehmers beträgt 25.000 Hz. Die Masse des Sensors ist mit 51g angegeben, der Haftmagnet ist dabei nicht berücksichtigt. Das vollständige Datenblatt und eine Konstruktionszeichnung des Sensors findet sich im Anhang.

Die Auswirkungen der Kopplung auf den Frequenzbereich ist in Abbildung 5.1 dargestellt.

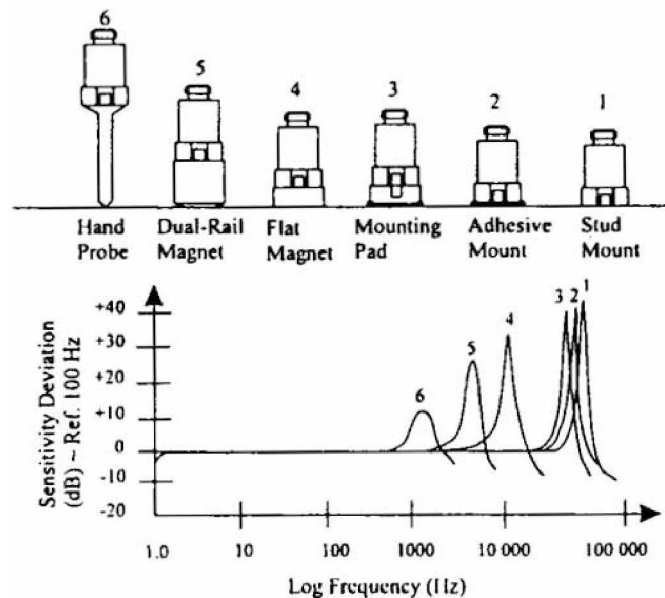


Abbildung 5.2.: Nutzbarer Frequenzbereich unter Berücksichtigung des Kopplungssystems aus [12]

Zur Kopplung wird ein Magnetsystem verwendet. Hinweise zur korrekten Anwendung der Kopplung werden vom Sensorhersteller gegeben (Abbildung 5.1). In der Abteilung Spittelau/Flötzersteig ist nur ein Flachmagnet vorhanden. Zur Zeit sind noch keine Scheiben auf runde Oberflächen angebracht worden.

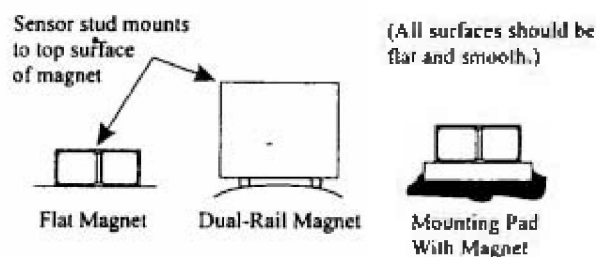


Abbildung 5.3.: Hinweise zur korrekten Verwendung der Magnetkopplung aus [12]

5.2. Mobiler Datensammler vgl. [9]

Bei der Schwingungsüberwachung in den beiden MVAs Spittelau und Flötzersteig wird der FAG Detector III, Abbildung 5.4, eingesetzt. Dieses Gerät kann zur Schwingungsmessung und zum Betriebsauswuchten verwendet werden.



Abbildung 5.4.: FAG Detector III mit Zubehör

Die Auswuchtfunktion wird derzeit nicht genutzt, da der dafür notwendige Drehzahl-



sor nicht vorhanden ist. Das Gerät verfügt auch über einen anschließbaren Sensor zur berührungslosen Temperaturmessung.

Die Speicherausstattung des Detektors ermöglicht es, einen Rundgang mit 6 Aggregaten auf den Detektor zu laden. Bei 6 Aggregaten ergeben sich mit 4 Messpunkten und drei Messrichtungen (1 mal axial, 2 mal radial) 72 Messungen, bei denen das Zeitsignal gespeichert wird.

Eine Übersicht über die relevanten technischen Daten des Detektors gibt Tabelle 5.1.

Tabelle 5.1.: Auszug der technische Daten des Detektors FAG DETECTOR III [9]

Messbereiche	Beschleunigung/Schwinggeschwindigkeit 0,1 Hz bis Tiefpass 0,1 Hz bis 200 Hz; 0,1 Hz bis 500 Hz; ... Hüllkurve 0 Hz bis Tiefpass Tiefpässe 200 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 5 kHz, 10 kHz, 20 kHz Hochpass (Hüllkurvenzweig) 750 Hz Temperatur -20 °C bis +550 °C (Temperaturbereich abhängig vom eingesetzten Sensor, frei konfigurierbarer Eingang)
Kennwerte	A_{eff} (2 kHz bis Tiefpass), Effektivwert der Schwingbeschleunigung A_{sel} Effektivwert der Schwingbeschleunigung im frei definierbarem Frequenzbereich. ISO 10816 (10 Hz bis 1000 Hz), Effektivwert der Schwinggeschwindigkeit V_{sel} Effektivwert der Schwinggeschwindigkeit im frei definierbaren Frequenzbereich D_{eff} (Frequenzband abhängig von der Tiefpasseckfrequenz), Effektivwert des Hüllkurvensignals D_{sel} Effektivwert des Hüllkurvensignals im frei definierbaren Frequenzbereich Crestfaktor, Drehzahl, Temperatur
Fensterfunktion	Hanning
Abtastrate	Linear max. 51,2 kHz, abhängig von eingestellter Tiefpasseckfrequenz (eingestellter Tiefpass * 2,56)
Frequenzauflösung	1600, 3200 Linien

5.3. Analysesoftware vgl. [9]

Die Herstellerfirma des Detektors (f'is FAG Industrial Service) liefert mit „Trendline“ die passende Software zur Datenverwaltung, Analyse und Archivierung. In diesem Programm ist jedes Werk in einer eigenen Datenbank erfasst.



Die Datenbank enthält für jedes Aggregat ein Foto der Maschine und die Messpunkte mit allen bisher aufgezeichneten Messwerten und Zeitsignalen (Abbildung 5.5). Anmerkungen über Instandsetzungs- und Wartungsarbeiten werden auch hier gespeichert.

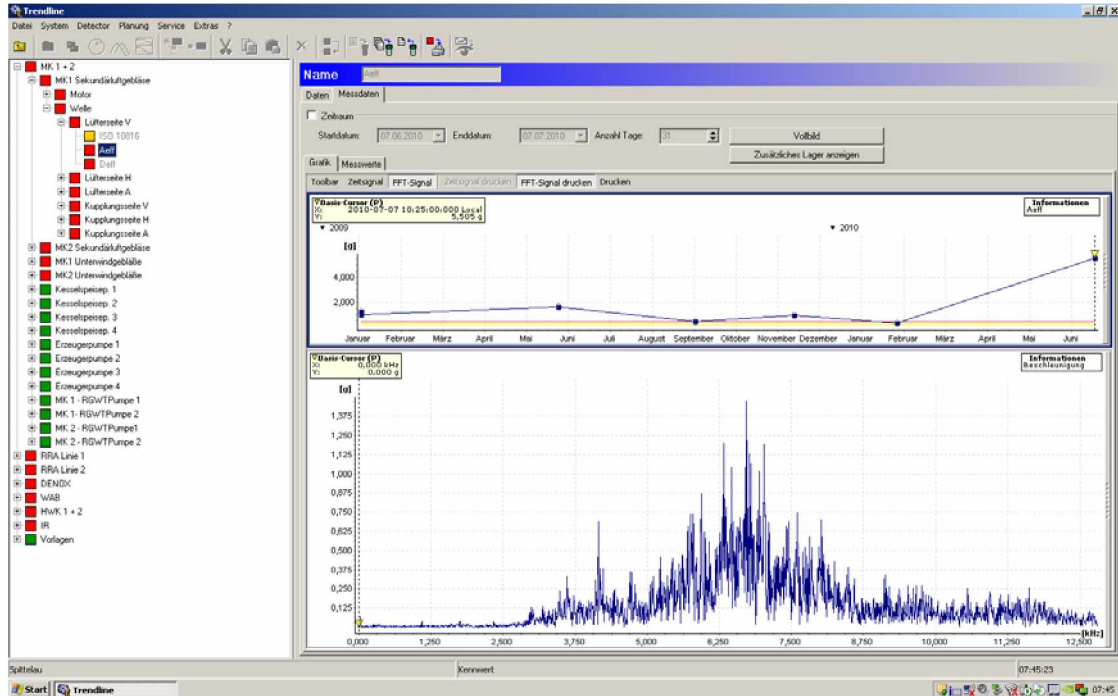


Abbildung 5.5.: Der Screenshot zeigt das Programm Trendline, welches für die Datenbankadministration und die Analyse sowie die Archivierung der Messdaten verwendet wird. Im Linken Bereich ist die Datenbank mit Anlagenbereichen, den dortigen Aggregaten und deren Messpunkten dargestellt. Der Rest zeigt den Verlauf des angewählten Kennwertes und dem aktuellsten Spektrum dieses Wertes.

Des weiteren steht eine umfangreiche Lagerdatenbank zur Verfügung. In dieser Datenbank sind die gängigsten Lager verschiedener Hersteller mit ihren Schadensfrequenzen vorhanden. Sollte ein Lager nicht in der Datenbank vorhanden sein, ist es möglich es hinzuzufügen. Dabei kann man entweder die Geometriedaten eingeben und das Programm errechnet sich die Schadensfrequenzen selbst, oder man gibt die errechneten Schadensfrequenzen direkt ein. Jedem Aggregat werden die entsprechenden Lager zugewiesen.

Abbildung 5.6 zeigt das Hüllkurvenspektrum eines Lagers. Die feinen grauen Linien zeigen die Schadfrequenzen des Lageraußenringes an, die Übereinstimmung der Spek-



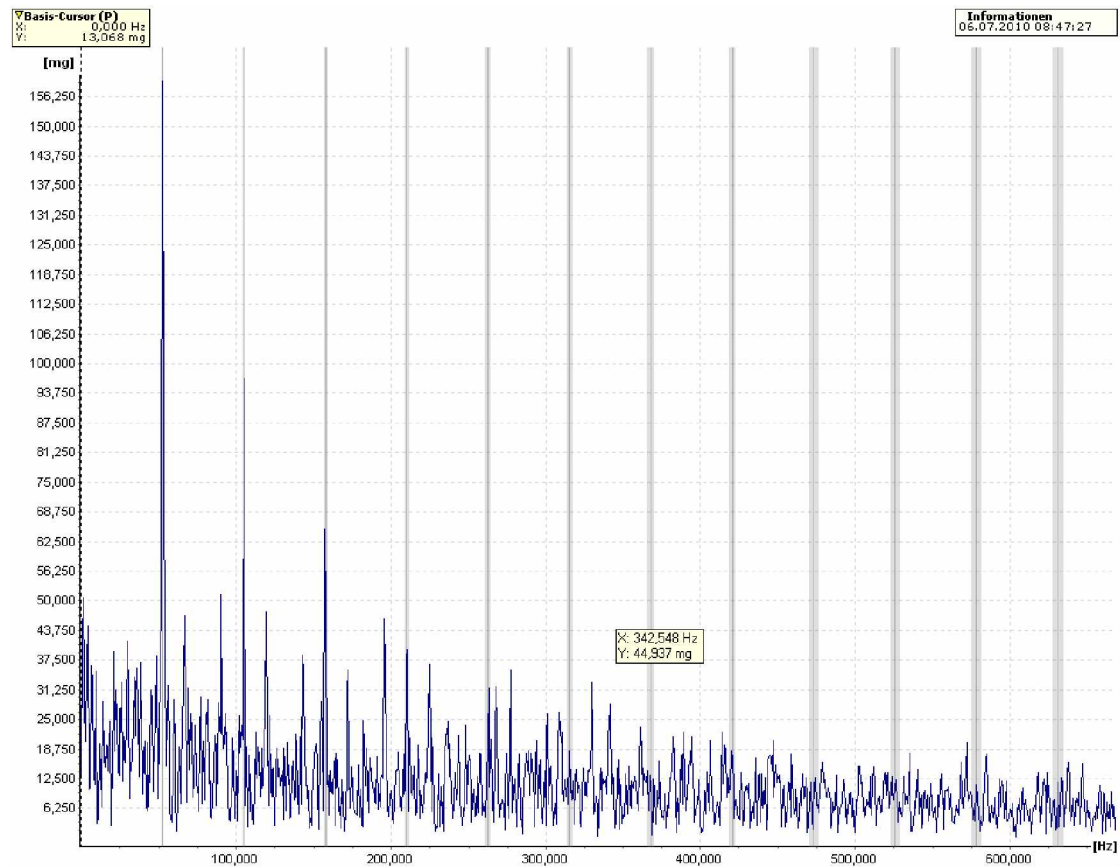


Abbildung 5.6.: Außenringsschaden an einem Kugellager mit der Bezeichnung 6326-M

trallinien mit diesen Schadfrequenzen und das Abklingen der Amplituden in den höheren Schadfrequenzen lassen auf einen beginnenden Außenringsschaden schließen.



6. Organisation

6.1. Organisation der Abteilung Spittelau/Flötzersteig

Die Abteilung untersteht einem Abteilungsleiter, der durch einen Betriebsleiter und Instandhaltungsleiter unterstützt wird.

Der Bereich Betrieb ist für den sicheren, gesetzeskonformen und wirtschaftlichen Betrieb der Anlage verantwortlich. In diesem Bereich sind die Schichten angesiedelt, welche ihrerseits jeweils von einem Meister geleitet werden und die Anlage fahren. In beiden Werken sind jeweils fünf Schichten vorhanden. Eine eigene Gruppe kümmert sich um die Rest- und Abfallstofflogistik in den Werken.

Die Instandhaltung der Abteilung verfügt über eine E-Werkstatt und eine mechanische Werkstätte. Die Werkstätten werden von Meistern geleitet. Übergeordnete Koordinationsaufgaben werden von den Gruppenleitern Mechanik und Elektrotechnik wahrgenommen, denen der Instandhaltungsleiter der Abteilung vorsteht. Innerhalb der Werkstätten bilden mehrere Mitarbeiter Expertengruppen, wie zum Beispiel die Expertengruppe Schwingungsüberwachung.

Die Organisation der Abteilung ist in Abbildung 6.1 dargestellt.



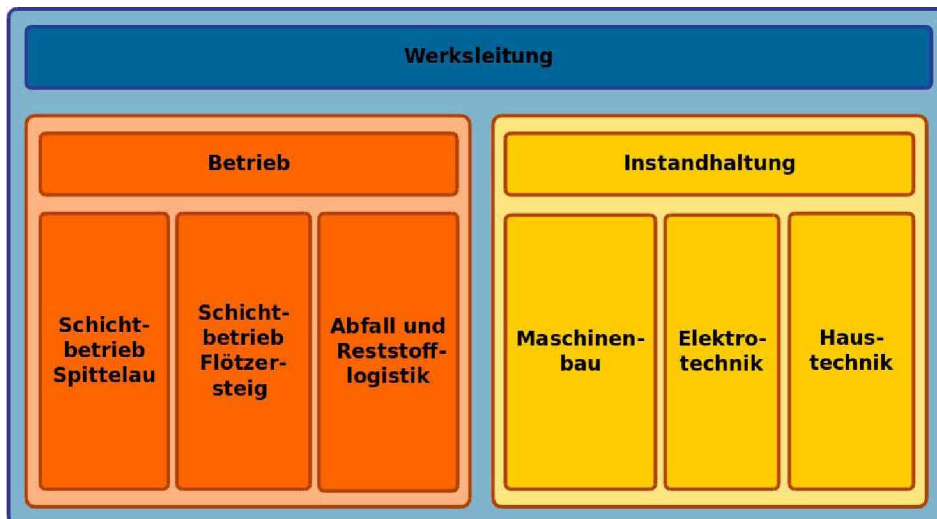


Abbildung 6.1.: Organisationsstruktur der Abteilung Spittelau/Flötzersteig

6.2. Prozessschema

Ein System zur Schwingungsüberwachung ist nur dann sinnvoll, wenn die Informationen, die dabei gewonnen werden, auch in den IH-Prozess einfließen. Auf einen sich ankündigenden Schaden kann nur reagiert werden, wenn die verantwortlichen Personen rechtzeitig davon erfahren und mit allen involvierten Stellen eine auf den Fall zugeschnittene Lösung erarbeiten.

Um die Zuständigkeiten und Informationsflüsse eindeutig festzulegen, wurde das Prozessflussdiagramm in Abbildung 6.2 erstellt. Die Expertengruppe Schwingungsüberwachung ist für die Durchführung der Messungen, die Dokumentation und das Reporting zuständig. Die Instandsetzungsentscheidung und die zeitliche Planung der Durchführung liegt beim technischen Referenten, die Instandsetzung selbst bei den Werkstätten.

Um den Lerneffekt für die Expertengruppe zu steigern, ist es wichtig, dass Rückmeldungen an diese Gruppe erfolgen. Insbesondere soll hier hervorgehoben werden, dass schadhafte bzw. gewechselte Teile immer an dieses Personal gehen sollen, sodass Diagnosen bestätigt oder entkräftet werden können. Die Teile mit ihren zugehörigen Messdaten bilden eine Referenz für zukünftige Diagnosen. Auch auf anderen Wegen veranlasste Instandsetzungen und Wartungsmaßnahmen sollten der Expertengruppe mitgeteilt werden, um Fehlmessungen und Falschinterpretationen zu vermeiden.



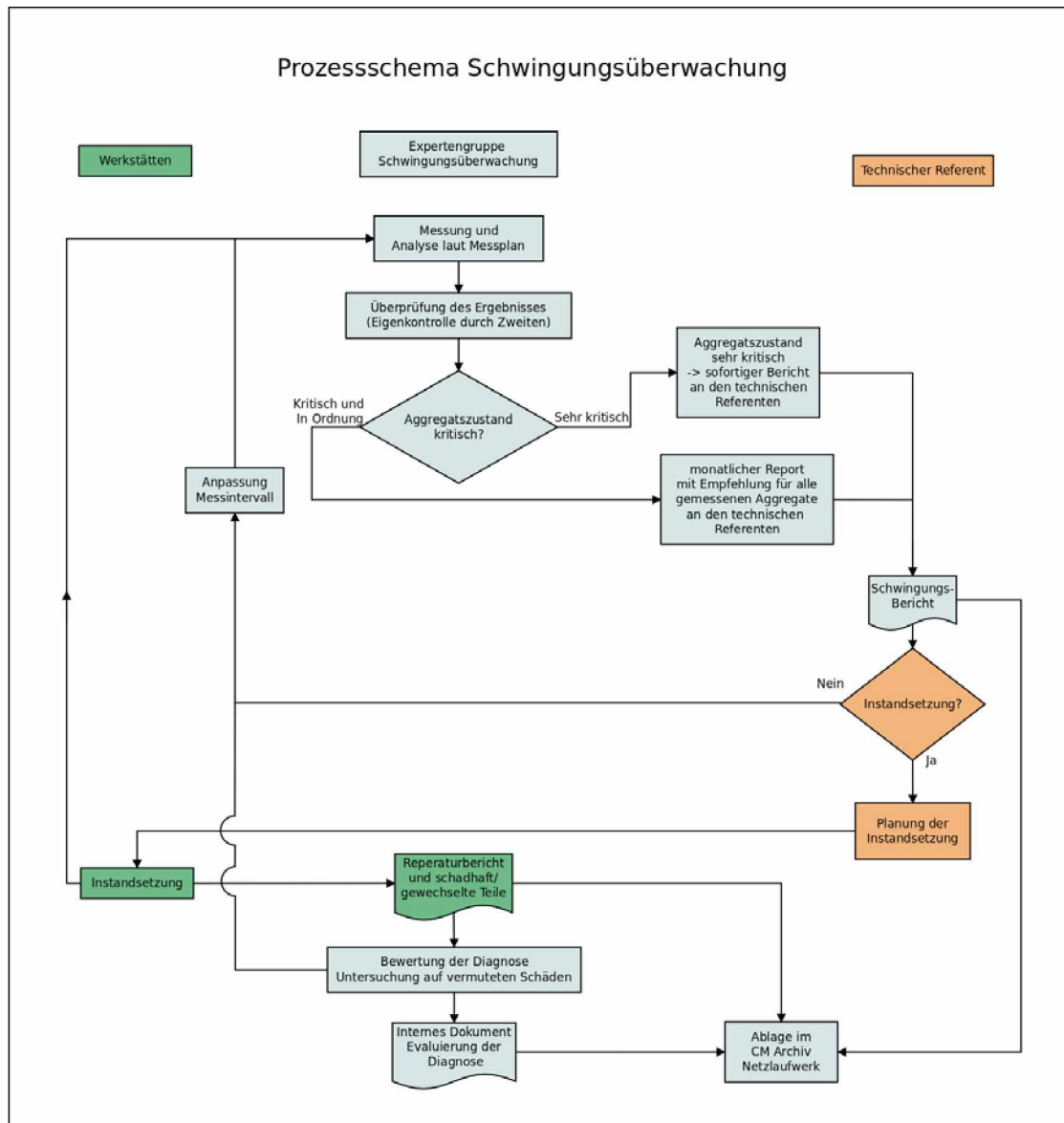


Abbildung 6.2.: Prozessflussdiagramm für die Schwingungsüberwachung

6.3. Reporting und Dokumentation

Das Reporting erfolgt monatlich an die zuständigen technischen Referenten in Form eines Berichtes. In diesem Bericht werden die gemessenen Aggregate mit Namen und Kraftwerks-Kennzeichnungs-System-Nummern (KKS-Nr.) in Tabellenform (Tabelle 6.1)



aufgeführt. Es wird das Messdatum angegeben und auf einer dreistufigen Farbskala der Zustand der Maschine, mit grün für „In Ordnung“, gelb für „Kritisch“ und rot für „Sehr Kritisch“ eingeschätzt. Die letzte Spalte enthält eine kurze Bemerkung über das weitere Vorgehen und optional über den vermuteten Schaden.

Tabelle 6.1.: Übersichtstabelle des Schwingberichtes

Aggregat	KKS Nr.	Zustand	Messintervall in Monaten	Letzte Messung	Bemerkung
Rauchgasreinigung Linie 2					
Prozesswasserpumpe 1	12HTF21AP001		3	6.7.2010	-
Prozesswasserpumpe 2	12HTF21AP002		3	6.7.2010	-
Prozesswasserpumpe 3	12HTF22AP001		3	6.7.2010	Intervall verkürzt auf 2 Monat
Prozesswasserpumpe 5	12HTF23AP001		3	6.7.2010	Siehe Detailblatt
Saugzug	18BCA09GS001		1,5	6.7.2010	Intervall verkürzt auf 1 Monat

Für sehr kritische, sprich rote Aggregate wird zusätzlich ein Detailblatt erstellt, siehe Abbildung 6.3. Dieses Blatt enthält:

- Namen und Kraftwerks-Kennzeichnungs-System-Nummer des Aggregates
- Foto des Aggregates
- aktuelle und vergangene Werte von Kennwerten in Tabellenform
- Diagramm zur zeitlich weiter zurückreichenden Trenddarstellung

Diese Kennwerte dienen nicht der Beschreibung des Fehlers, sondern sollen den technischen Referenten den Trend der Entwicklung verdeutlichen.



Schwingungsüberwachung
Spittelau

Prozesswasserpumpe 5 Linie2
12HTF23AP001


Letzte Messung


6.7.2010

Kennwerte:

	März	Juli
D_{eff} [mg]	682,66	2210,68

Gesamteinstufung





Trendlinien der Kennwerte




Abbildung 1: Verlauf des Meßwerts $D_{eff,aktiv}$ im letzten Jahr, signifikanten Anstieg innerhalb der letzten 4 Monate.

Empfehlung:

Bei nächstem planmäßigen oder außerplanmäßigen Stillstand sollte die Pumpe Instand gesetzt werden. Verdacht auf ausgeschlagenen Lagerstz in der Pumpe.




Abbildung 6.3.: Beispielhaftes Detailblatt eines Schwingungsberichtes



6.4. Personalbedarf

Um den Personalbedarf zu erheben wurde ein Messrundgang mit 6 Aggregaten durchgeführt. Dieser Messrundgang beinhaltet die Vorbereitung des mobilen Datensammlers, die Reinigung der Messstellen, die Messung sowie die Rückübertragung der Messwerte auf den Host-PC, die Interpretation der Messwerte und zugehöriger Spektren sowie das Reporting. Der Ablauf ist in Abbildung 6.4 schematisch dargestellt.

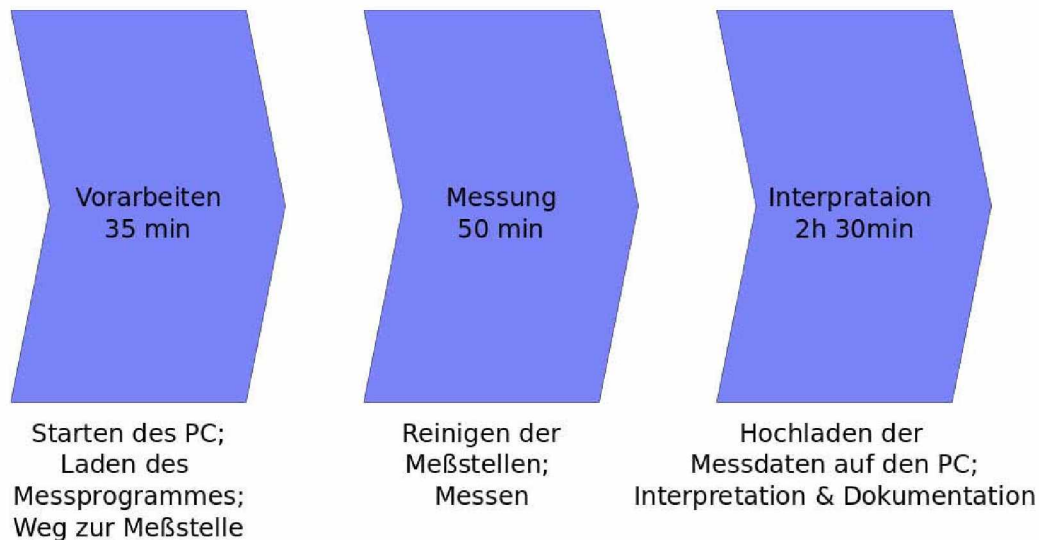


Abbildung 6.4.: Ablauf Messrundgang und Reporting des Referenzrundganges zur Arbeitszeiterhebung

Die Tabellen 6.2, 6.3, 6.4 und 6.5 zeigen die Messpläne mit dem Stundenaufwand pro Messrundgang. Dieser Zeitaufwand wurde mit dem Referenzrundgang errechnet, dabei wurde die Dauer des besagten Rundgangs durch die Anzahl der Aggregate dividiert und mit der Anzahl der Aggregate des betreffenden Rundgangs multipliziert, siehe Gleichung 6.1.

$$T_i = \frac{T_{Referenz}}{n_{Referenz}} \cdot n_i \quad (6.1)$$

Die Spalte Risikoklasse in den Tabellen ist eine Gewichtung der Aggregate nach Ausfallwahrscheinlichkeit und Ausfallkonsequenzen. Für genauere Informationen dazu siehe KÖSSLBACHER/WEILER [14].



An der Risikoklasse orientiert sich die Überwachungsintensität. Die Risikoklassen sind:

- I „Inakzeptabel“
- II „Kurzfristig Annehmbar“
- III „Annehmbar“
- IV „Vernachlässigbar“

Manche Aggregate in den Messplänen sind noch nicht in Risikoklassen eingeteilt und verfügen deswegen über keine Angabe zur Risikoklasse (k.A).



7. Wirtschaftliche Betrachtung

7.1. Kosten Eigenleistung

Personal

Die Berechnung der Jahresarbeitszeit und deren Aufteilung nach Risikoklassen ist in den Tabellen 7.2, 7.3 und 7.4 aufgelistet. Im Falle des Werkes Flötzersteig gibt es die Berechnungen zweimal, da einmal die Getriebeantriebe (Variante I) berücksichtigt wurden und einmal nicht (Variante II).

Um die Überwachung laut den Messplänen aus Kapitel 6 durchzuführen, sind für die Variante I, für beide Werke insgesamt 568 Arbeitsstunden pro Jahr notwendig. Werden die Getriebeantriebe außen vor gelassen, reduziert sich die Stundenanzahl für die beiden Werke um 136 Stunden auf 432 Mannstunden pro Jahr. Bei einem Stundensatz von 43,2 € und 31,7 € belaufen sich die Personalkosten je nach Variante auf 21.271,6 € bzw. 16.178,4 €. Diese Kosten beinhalten die Durchführung der Messungen wie in Abbildung 6.4 dargestellt.

Es soll hier erwähnt werden, dass die Messintervalle zur Zeit noch eher kurz angelegt sind, und auch Aggregate mit niederen Risikoklassen gemessen werden, um einen besseren Lerneffekt für das Personal zu erzielen. Mit zunehmender Routine und Sicherheit der Verantwortlichen auf diesem Gebiet können die Intervalle verlängert und der Aggregatumfang reduziert werden.

Tabelle 7.1.: Gesamtkosten Eigenleistung für das Überwachungssystem

Mitarbeiter	Variante I	Variante II
A	$284 \cdot 43,2$	$216 \cdot 43,2$
B	$284 \cdot 31,7$	$216 \cdot 31,7$
Summe der Kosten	21.271,6 €	16.178,4 €



Tabelle 7.2.: Jahreszeitaufwand nach Risikoklassen Spittelau pro Mitarbeiter

Rundgang	Anzahl pro Jahr	Rundgang [min]	Minuten pro Jahr
Müllkessel	4	160	640
Kesselspeisepumpen und MK-Erzeuger 1	3	160	480
Kesselspeisepumpen und MK-Erzeuger 2	3	160	480
RRA Linie 1 (ohne Saugzug einzeln)	4	200	800
RRA Linie 2 (ohne Saugzug einzeln)	4	200	800
Saugzüge einzeln	8	80	640
DeNox	4	160	640
Rauchgaswärmetauscherpumpen	4	160	640
Wasserburg 1	2	200	400
Wasserburg 2	2	200	400
HWK 1'	2	160	320
HWK 2'	2	160	320
Internes Rohrnetz ohne AKH Pumpen	2	160	320
AKH Pumpen	4	80	320
Summe Jahresminuten			7200
Summe Jahresstunden			120

Mannstunden nach Risikoklassen	Farbe und Kurzzeichen	Anzahl der Aggregate	Anzahl der Rundgänge
Inakzeptabel	I	2	16
Kurzfristig Annehmbar	II	12	48
Annehmbar	III	22	72
Vernachlässigbar	IV	9	18
keine Angaben	k.A.	11	26

Mannstunden nach Risikoklassen	Farbe und Kurzzeichen	Minuten pro Jahr	% Gesamtstunden
Inakzeptabel	I	640	8,89
Kurzfristig Annehmbar	II	1920	26,67
Annehmbar	III	2880	40
Vernachlässigbar	IV	720	10
keine Angaben	k.A.	1040	14,44
Dauer pro Aggregat [min]	Summe pro Jahr	7200	100

*Annahme für Berechnungen es wird zweimal im Jahr gemessen

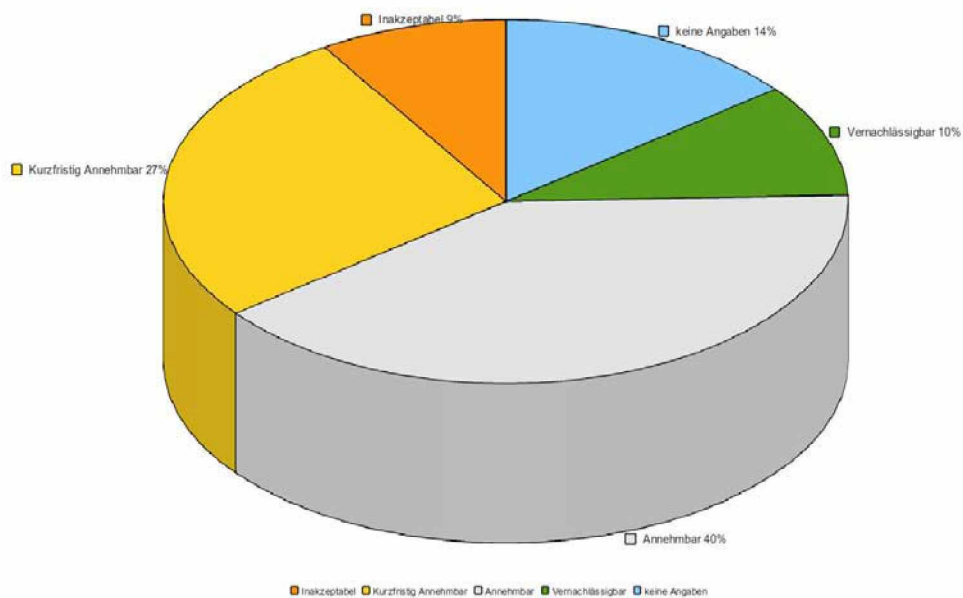


Abbildung 7.1.: Jahreszeitaufwand nach Risikoklassen Spittelau pro Mitarbeiter



Tabelle 7.3.: Jahreszeitaufwand nach Risikoklassen Floetzersteig Variante I pro Mitarbeiter

Rundgang	Anzahl pro Jahr	Rundgang [min]	Minuten pro Jahr
Müllkessel	4	240	960
Kesselspeisepumpen	2	240	480
DeNox Wärmeversorgung	2	240	480
Umformstation	2	320	640
Hydraulik	2	160	320
Wäscherpumpen Sauer	3	240	720
Wäscherpumpen Basisch	3	240	720
Saugzüge	4	200	800
RRA und ARA	2	320	640
Entschlacker	4	120	480
Ascheschnecken Kessel 1	4	240	960
Ascheschnecken Kessel 2	4	240	960
Ascheschnecken Gewebefilter Linie 3	2	280	560
Ascheschnecken Gewebefilter Linie 3	2	280	560
Ascheschnecken Gewebefilter Linie 3	2	280	560
Summe Jahresminuten			9840
Summe Jahresstunden			164

Mannstunden nach Risikoklassen	Farbe und Kurzzeichen	Anzahl der Aggregate	Anzahl der Rundgänge
inakzeptabel	I	0	0
Kurzfristig Annehmbar	II	16	72
Annehmbar	III	43	86
Vernachlässigbar	IV	18	36
keine Angaben	k.A.	12	40

Mannstunden nach Risikoklassen	Farbe und Kurzzeichen	Minuten pro Jahr	% Gesamtstunden
inakzeptabel	I	0	0
Kurzfristig Annehmbar	II	2880	30,77
Annehmbar	III	3440	36,75
Vernachlässigbar	IV	1440	15,38
keine Angaben	k.A.	1600	17,09
Dauer pro Aggregat [min]	Summe pro Jahr	9360	100

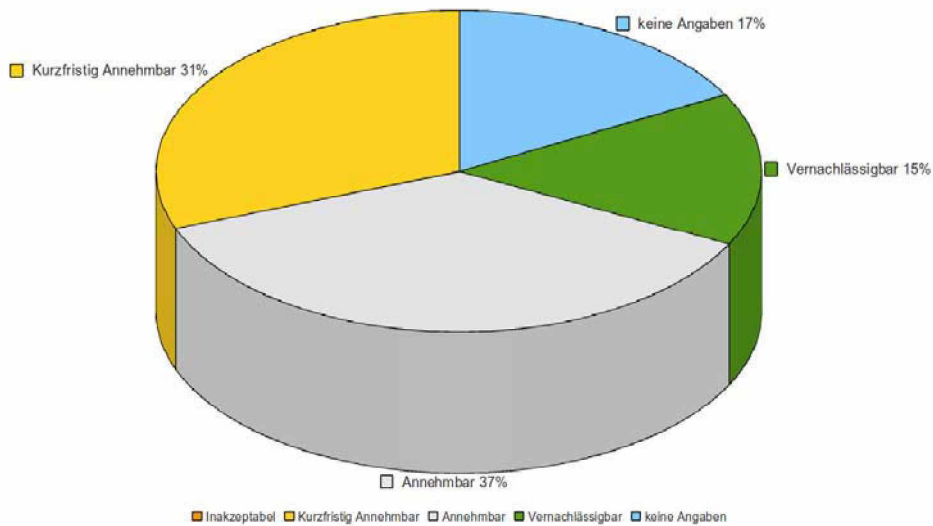


Abbildung 7.2.: Jahreszeitaufwand nach Risikoklassen Floetzersteig Variante I pro Mitarbeiter



Tabelle 7.4.: Jahreszeitaufwand nach Risikoklassen Floetzersteig Variante II pro Mitarbeiter

Rundgang	Anzahl pro Jahr	Rundgang [min]	Minuten pro Jahr
Müllkessel	4	240	960
Kesselspeisepumpen	2	240	480
DeNox Wärmeversorgung	2	240	480
Umformstation	2	320	640
Hydraulik	2	160	320
Wäscherpumpen Sauer	3	240	720
Wäscherpumpen Basisch	3	240	720
Saugzüge	4	200	800
RRA und ARA	2	320	640
Summe Jahresminuten			5760
Summe Jahresstunden			96

Mannstunden nach Risikoklassen	Farbe und Kurzzeichen	Anzahl der Aggregate	Anzahl der Rundgänge
Inakzeptabel	I	0	0
Kurzfristig Annehmbar	II	9	36
Annehmbar	III	43	48
Vernachlässigbar	IV	18	36
keine Angaben	k.A.	6	16

Mannstunden nach Risikoklassen	Farbe und Kurzzeichen	Minuten pro Jahr	% Gesamtstunden
Inakzeptabel	I	0	0
Kurzfristig Annehmbar	II	1440	26,47
Annehmbar	III	1920	35,29
Vernachlässigbar	IV	1440	26,47
keine Angaben	k.A.	640	11,76
Dauer pro Aggregat [min]	Summe pro Jahr	5440	100

40

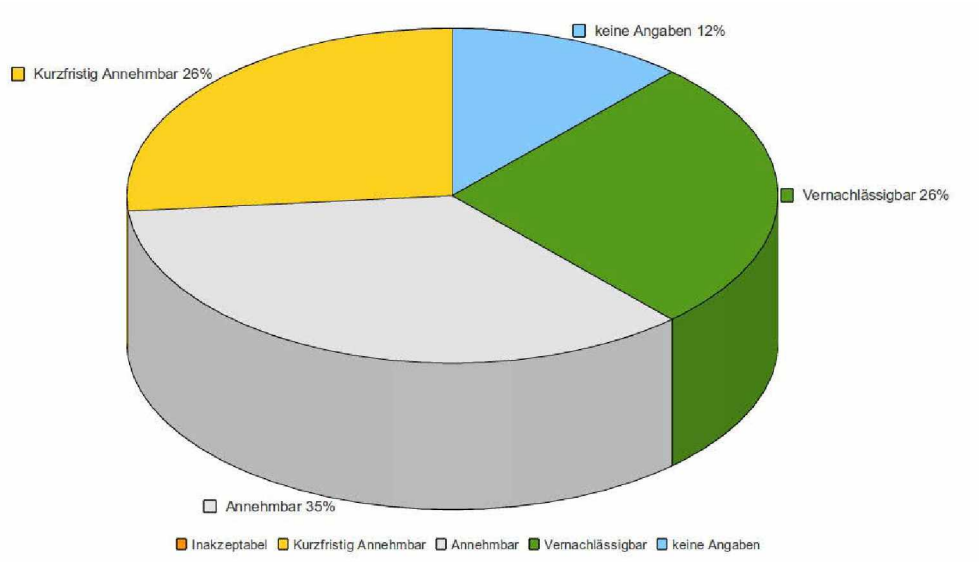


Abbildung 7.3.: Jahreszeitaufwand nach Risikoklassen Floetzersteig Variante II pro Mitarbeiter



Schulungen und Sonstiges

Um die Qualität der Überwachung zu erhöhen und dem Personal die Möglichkeit zur Abklärung von unklaren Schadensbildern zu geben, wäre es sinnvoll, einmal pro Jahr ein Training mit einem Experten auf diesem Gebiet abzuhalten. Die Kosten dafür dürften im Rahmen der bisherigen Schulungen liegen, welche ca. 4000 € für zwei Tage betragen. Mit Neuanschaffungen im Bereich der Hardware ist nicht zu rechnen, da der Support durch die Herstellerfirma inklusive laufender Softwareupdates gegeben ist. Auch für das Analyseprogramm werden vom Hersteller regelmäßig kostenlose Updates bzw. neue Versionen zum Download zur Verfügung gestellt.

7.2. Kosten Fremdleistung

Schwingungsüberwachung wird von vielen Dienstleistern angeboten. Die Leistungen erstrecken sich von periodischen Vorortmessungen bis zur kontinuierlichen Überwachung mittels Remotesensoren auf UMTS-Basis. Um einen Kostenvergleich zu internen Leistung zu ermöglichen, wurde ein Kostenvoranschlag eingeholt.

Das komplette Angebot der Firma wurde nur für die Lösung inklusive Getriebeantriebe erstellt. Die Eckdaten der angebotenen Leistung:

- Maschinen mit Risikoklasse I & II werden alle 3 Monate gemessen
- Maschinen mit Risikoklasse III & IV und nicht bewertete werden alle 6 Monate gemessen
- Getriebeantriebe werden zusätzlich Schmiermittelüberwacht
- Saugzüge mit Remote-Sensoren
- Erstellung von Messprotokollen mit Befund und IH-Empfehlung
- Die erhobenen Daten werden nur unter bestimmten Voraussetzungen kostenlos zur Verfügung gestellt
- Es werden keine Garantien für Produktionsausfälle übernommen



- Die Gesamtkosten (inkl. Umsatzsteuer) betragen jährlich ohne einmalige Leistungen 32.117,6 €
- Einmalkosten (Datenbankaufbau, permanent Überwachung Gebläse) 4.599,37 € (inkl. Umsatzsteuer)

7.3. Vergleich Fremdleistung und Eigenleistung

Mit 21.271,6 € Kosten für die umfangreichere Variante ist das Betreiben einer Schwingungsüberwachung durch betriebsinterne Mitarbeiter um jährlich 10.864 € günstiger als das Angebot des externen Dienstleisters, wobei die Überwachungsintervalle von diesem angepasst wurden (siehe Angebot im Anhang).

Bei einer betriebsinternen Lösung wird das Getriebeöl der Getriebeantriebe zwar nicht analysiert, eine Ölanalyse wurde bei diesen Aggregaten jedoch innerhalb der Abteilung bereits angedacht und aufgrund von Unwirtschaftlichkeit wieder verworfen.

Es soll an dieser Stelle erwähnt werden, dass die Leistung der internen Mitarbeiter noch nicht an die Qualität eines externen Dienstleisters heran reicht. Die Expertengruppe Schwingungsmessungen ist derzeit in der Lage Fehler frühzeitig zu erkennen, kann jedoch noch keine seriöse Restlebensdauerabschätzung abgeben.

Fazit:

Eine interne Durchführung ist kostengünstiger und flexibler. Mit zunehmender Routine der mit der Schwingungsüberwachung betrauten Mitarbeiter werden die Kosten für das System sinken und die Qualität steigen, ein positiver Effekt der bei der Fremdvergabe nicht zu tragen kommt.

7.4. Versicherungskosten [13]

Eine positive Auswirkung auf die Prämien der Versicherung sind bei der Implementierung eines Systems zur Schwingungsüberwachung laut den Versicherungsverantwortlichen der Fernwärme zu erwarten. Das System muss jedoch in allen Anlagen etabliert sein und gemäß den anerkannten Normen für Schwingungsüberwachung betrieben werden.



8. Ergebnisse und Diskussion

Die Implementierung des Systems in der Abteilung Spittelau/Flötzersteig ist erfolgreich durchgeführt worden. Die verantwortlichen Mitarbeiter führen die Messungen regelmäßig durch und geben die Ergebnisse in prägnanter und verständlicher Form an die zuständigen technischen Referenten weiter.

Auf der technischen Seite der Überwachung ist eine Verbesserung der Reproduzierbarkeit der Messungen durch das Anbringen von Kleber-Beilagscheiben-Kombinationen an den Messpunkten möglich.

Der Informationsfluss in der Abteilung gemäß Abbildung 6.2 auf Seite 62 sollte nach einer Einlaufzeit kontrolliert und wenn notwendig angepasst werden.

Die wirtschaftliche Betrachtung zeigt einen Kostenvorteil bei Eigenleistung von zirka 10.000 € pro Jahr im Vergleich zu am Markt zugekauftem Service. Es ist zu erwarten, dass der Zeitaufwand und folglich die Kosten des Systems weiter fallen, da noch viel Aggregate gemessen werden, deren Überwachung vorwiegend dem Sammeln von Erfahrung dient.

Eine Einsparung von Versicherungskosten wird von den verantwortlichen Personen innerhalb der Fernwärme als möglich erachtet, jedoch muss das System dann auch in den anderen Abteilungen die MVAs betreiben etabliert sein. Durch die Implementierung der Schwingungsüberwachung ist es möglich die Laufzeit der Aggregate zu erhöhen. Durch die regelmäßigen Messungen erhöht sich die Anlagensicherheit ebenfalls. Diese beiden Aspekte führen zu einer möglichen Verbesserung der Verfügbarkeit und damit einem wirtschaftlichen Vorteil für den Anlagenbetreiber



9. Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird die Implementierung eines Systems zur Schwingungsüberwachung in zwei Müllverbrennungsanlagen der Fernwärme Wien behandelt.

Der theoretische Teil der Arbeit gibt eine Einführung in den Begriff Instandhaltung und Instandhaltungsstrategien, weiters einen kurzen Überblick über die physikalischen Grundlagen von Schwingungen und Schwingungsmessungen. Dabei werden die Messprinzipien zur Signalaufnahme, die Signalverarbeitung mit der mathematischen Methode der Fourieranalyse und Schwingungskennwerte vorgestellt. Die Interpretation der durch die Messungen gewonnenen Informationen wird kurz erläutert.

Der Praktische Teil behandelt die Umsetzung des Systems aus technischer, wirtschaftlicher und organisatorischer Sicht. In der technischen Betrachtung wird das verwendete Messequipment beschrieben und das Programm zur Datenanalyse, -verwaltung und -archivierung vorgestellt. Im Zuge des wirtschaftlichen Teils werden die zur Durchführung der Überwachung notwendigen Personalstunden erhoben und die resultierenden Personalkosten errechnet. Die ermittelten Selbstkosten werden mit einem am Markt durch die Fernwärme Wien eingeholten Angebot des selben Leistungsumfangs verglichen. Um den Informationsgewinn, der durch die Überwachung der Aggregate entsteht, in den Instandhaltungsprozess einfließen zu lassen, wird ein Prozessflussdiagramm für den Bereich der Schwingungsüberwachung erstellt, siehe 6.2 auf Seite 62. Die Ergebnisse der Messungen werden so monatlich an die Verantwortlichen weitergeleitet.



Teil III.

Verzeichnisse

Literaturverzeichnis

- [1] Förster R. Sturm A. *Maschinen und Anlagendiagnostik für die zustandsbezogene Instandhaltung*. B.G. Teubner, Stuttgart, 1990.
- [2] Rötzel A. *Instandhaltung - eine betriebliche Herausforderung*. VDE Verlag GMBH, Berlin, Offenbach, 2009.
- [3] *DIN ISO 13373-1 Zustandsüberwachung und -diagnostik von Maschinen Schwingungs-Zustandsüberwachung Teil 1: Allgemeine Anleitungen Teil 1: Allgemeine Anleitungen(ISO 13373-1:2002)*.
- [4] Kirchner A. *Beitrag zur Optimierung der Kesselwasserkonditionierung der MVA Spittelau in betriebstechnischer Hinsicht*. Institut für Verfahrenstechnik des Industriellen Umweltschutzes, Montanuniversität Leoben, 2004. Magisterarbeit.
- [5] Fernwärme Wien Gmbh (Hrsg). *Die Technik der thermischen Abfallbehandlungsanlage Flötzersteig*. Broschüre.
- [6] Fernwärme Wien Gmbh (Hrsg). *Umweltinformation 2008 der Anlage Flötzersteig*. [http://www.wieneregie.at/media/files/2008/Umweltinforamtion_ FS08 _ 5109.pdf](http://www.wieneregie.at/media/files/2008/Umweltinforamtion_FS08_5109.pdf), 2009.
- [7] Jürgler R. *Maschinendynamik 3.Auflage*. Springer, Berlin, 2003.
- [8] Wassermann J. Kolerus J. *Zustandsüberwachung von Maschinen Das Lehr- und Arbeitsbuch für den Praktiker 4. Auflage*. Expert-Verlag, Renningen, 2008.
- [9] *Handbuch Detector III/Trendline 3*. fis FAG Industrial Service, Herzogenrath, 2008.
- [10] Karigl G. Panholzer A. Drmota M., Gittenberger B. *Mathematik für Informatiker*. Helderman Verlag, Lemgo, 2008.



- [11] Kainz M. *Zustandsüberwachung von Wälzlagern mittels Hüllkurvenanalyse*. TU Wien, 1999. Diplomarbeit.
- [12] *Model 603C01 Industrial ICP Accelerometer Installation an Operating Manual*. PCB Piezotronics a IMI Division, Depew, NY, USA.
- [13] Fr. Boxberger Versicherungsverantwortliche der Ferwärme Wien. *Besprechung am 2. Juli 2010*.
- [14] Koesslbacher M. Weiler A. *Methoden der Zustandsorientierten Instandhaltung am Beispiel der MVA Spittelau & Floetzersteig*. Institut für Verfahrenstechnik des Industriellen Umweltschutzes, Montanuniversität Leoben, 2009. Bachelorarbeit.
- [15] *DIN 31051- Grundlagen der Instandhaltung(DIN 31051:2003)*.
- [16] Umweltbundesamt; Abteilung für Abfallwirtschaft (Hrsg). *Die Bestandsaufnahme der der Abfallwirtschaft in Österreich - Statusbericht 2008*. <http://www.bundesabfallwirtschaftsplan.at/>, 2009.
- [17] *DIN ISO 10816- Bewertung der Schwingungen von Maschinen durch Messungen an nicht- rotierenden Teilen Teil 1: Allgemeine Anleitungen(ISO 10816-1:1995)*.
- [18] Univ.-Prof.Dr.Werner Doralt (Herausgeber). *Kodex des Österreichischen Rechts, Umweltrecht 2010*. LexisNexis, Wien, 2010.





Abkürzungsverzeichnis

°	Winkelmaß in Grad
°C	Grad Celsius
%	Prozent
A, \hat{x}	Amplitude
ARA	Abwasser Reinigungsanlage
barü	bar Überdruck
BSc	Bachelor of Science
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
Ca	Kalzium
CaSO_4	chemische Formel für Kalziumsulfat
CM	Condition Monitoring
dB	Dezibel
Denox	Entstickungsanlage
DIN	Deutsche Industrie Norm
E-Filter	Elektrofilter
EDV	Elektrodynamischer Venturi
elektr.	elektrisch
FS	Flötzersteig
HCL	chemische Formel für Salzsäure
HF	chemische Formel für Flusssäure
Hz	Herz
ISO	International Organisation for Standardisation
kHz	Kilo Herz
KKS-Nr.	Kraftwerks-Kennzeichnungssystem-Nummern
kont.	kontinuierlich
kV	Kilo Volt
lg/log	Logarithmus = mathematische Funktion



LKW	Lastkraftwagen
m	Meter
m ²	Quadratmeter
m ³	Kubikmeter
$\frac{mg}{m^3}$	Milligramm pro Kubikmeter
$\frac{mg}{Nm^3}$	Milligramm pro Normkubikmeter
min ⁻¹	1 pro Minute = Einheit für die Umdrehung
$\frac{mm}{s^2}$	Millimeter pro Quadratsekunde Einheit der Beschleunigung
MW	Megawatt
NaSO ₂	chemische Formel für Natriumsulfat
RMS	root mean square, Effektivwert
RRA	Rauchgasreinigungsanlage
SCR	Selective Catalytic Reduction
SO ₂	chemische Formel für Schwefeldioxid
usw.	und so weiter
vgl.	vergleiche
z.B	zum Beispiel



Tabellenverzeichnis

4.1. Berechnungstabelle für die 1. Ordnung	41
4.2. Berechnungstabelle für die 2. Ordnung	42
4.3. Berechnungstabelle für die 3. Ordnung	43
4.4. Kleine Fehlertabelle in Anlehnung an KOLERUS/WASSERMAN [8] S161	52
5.1. Auszug der technische Daten des Detektors FAG DETECTOR III [9] . . .	57
6.1. Übersichtstabelle des Schwingberichtes	63
6.2. Messplan Spittelau und Zeitaufwand nach Messrundgängen	67
6.3. Messplan Flötzersteig und Zeitaufwand nach Messrundgängen (inklusi- ve Getriebeantriebe) I	68
6.4. Messplan Flötzersteig und Zeitaufwand nach Messrundgängen (inklusi- ve Getriebeantriebe) II	69
6.5. Messplan Flötzersteig und Zeitaufwand nach Messrundgängen	70
7.1. Gesamtkosten Eigenleistung für das Überwachungssystem	71
7.2. Jahreszeitaufwand nach Risikoklassen Spittelau pro Mitarbeiter	72
7.3. Jahreszeitaufwand nach Risikoklassen Floetzersteig Variante I pro Mit- arbeiter	73
7.4. Jahreszeitaufwand nach Risikoklassen Floetzersteig Variante II pro Mit- arbeiter	74



Abbildungsverzeichnis

2.1. Abnutzungsverlauf einer Maschine mit den Instandhaltungszeitpunkten der unterschiedlichen Strategien. Rot Schadens-orientiert; Blau Zeit-orientiert; Grün Zustands-orientiert in Anlehnung an RÖTZEL [2] S.14	6
2.2. MVA Spittelau Copyright Wien Energie Fernwärme/ Hubert Dimko	8
2.3. Verfahrensschema der MVA Spittelau	11
2.4. MVA Flötzersteig Copyright Wien Energie Fernwärme/ Hubert Dimko	12
2.5. Verfahrensschema der MVA Flötzersteig	16
3.1. Links eine freie ungedämpfte Sinusschwingung, rechts eine gedämpfte Sinusschwingung	18
3.2. Schwere- und Federpendel mit 1 Freiheitsgrad oben und 2 Freiheitsgraden unten aus JÜRGLER [7] S. 5	19
3.3. Projektion eines Schwerependels in die Kreisbahndarstellung und in eine zeitabhängige Darstellung aus JÜRGLER [7] S. 9	20
3.4. Schwingung mit Nullphasenwinkel in Kreisbahndarstellung und zeitabhängiger Darstellung aus JÜRGLER [7] S. 10	21
3.5. Aus JÜRGLER [7] S. 16/17 Oben: Addition von zwei gleichfrequenten Schwingungen mit Phasenunterschied Mitte: Graphische Addition zweier gleichfrequenter Schwingungen ohne Phasenunterschied Unten: Graphische Addition zweier gleichfrequenter Schwingungen mit Phasenunterschied	24
3.6. Addition zweier Schwingungen mit unterschiedlicher Frequenz und gleicher Amplitude (Amplitudenmaßstab unterschiedlich).	25
3.7. Oben: Die ersten 2 Glieder der Rechteckentwicklung Unten: Summe der beiden Einzelschwingungen	27
3.8. Die ersten vier Glieder aus der Reihenentwicklung für Sägezahnschwingung mit Resultierend (gestrichelt) aus JÜRGLER [7] S. 26	28



4.1. Allgemeiner Verlauf der Schwinggeschwindigkeit als Beurteilungsgröße aus DIN ISO 10816-1 [17] -Zone A Neue Maschinen sind meist in diesem Bereich -Zone B Maschine für den Dauerbetrieb geeignet -Zone C Maschine nicht für den Dauerbetrieb geeignet, jedoch bis zur nächsten Instandsetzungsmöglichkeit -Zone D Maschine nicht für den Betrieb geeignet, Schadensgefahr	30
4.2. Unterschiedliche Herangehensweise und Zielsetzung der Normenreihen DIN ISO 10816 und DIN ISO 13373	31
4.3. Maschinengruppe mit Messpunkten abgeändert übernommen von DIN ISO 13373-1 [17]	32
4.4. Messpunkte an Lagerstellen bei Aggregaten mit horizontaler bzw. vertikaler Welle aus DIN ISO 13373-1; X und Y bezeichnen die radialen und Z die axialen Messpunkte. [3]	32
4.5. Oben: Sensorkopplung mittels Stahl-Madenschraube, ideale Verbindung, oft schwer zu realisieren Unten:Magnetkopplung, starke Reduktion des Aufnahmebereichs aber hochflexibel aus KOLERUS/WASSERMANN [8] .	33
4.6. Oben: Schraube mit Klebstoff am Messpunkt befestigt, bei gut aushärtenden Klebern vergleichbar mit einer Stahl Madenschraube Unten: Rohr mit in Gummi eingebettetem Sensor messobjektseitig aus KOLERUS/WASSERMANN [8]	34
4.7. Eine Abgetastete Sinusfunktion aus DRMOTA, GITTENBERGER,KARIGL, PANHOLZER [10]	39
4.8. Meßschrieb einer Schwingung aus JÜRCEL [7] S. 33	40
4.9. Diskretisierung einer Schwingung aus JÜRCEL [7] S. 33	41
4.10. Die Schwingungskomponenten der gemessenen Schwingung mit der daraus resultierenden Schwingung (gestrichelt) aus JÜRCEL [7] S. 34 . . .	44
4.11. Die Schwingungskomponenten mit ihren Amplituden und den Winkeln zueinander aus JÜRCEL [7] S. 34	44
4.12. In der oberen Bildhälfte sieht man die Eingangssignale mit ihren Abtastpunkten. In der Unteren die sich ergebenden Ausgangssignale. Nur die ersten beiden Fälle lassen sich wieder zurück transferieren, die beiden anderen produzieren Anteile die im Ausgangssignal nicht vorhanden sind. Grafik aus KOLERUS/WASSERMANN S99	46
4.13. Signalabschnitt mit der Fensterbewertung und dem sich ergebenden Ersatzsingal. Grafik übernommen und abgeändert aus KOLERUS/WASSERMANN S101 ff	47






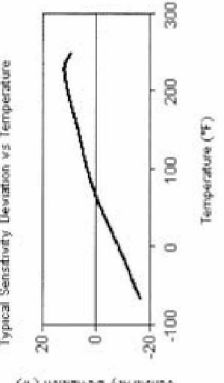

4.14. Signalabschnitt mit der Fensterbewertung und dem sich ergebenden Spektrum aus KOLERUS/WASSERMANN S105	48
4.15. Signalverarbeitungsweg der Hüllkurvenanalyse nach der Digitalisierung Grafiken übernommen und verändert aus [9] S227	50
5.1. Prinzip-Skizze des verwendeten Piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmers aus [12]	54
5.2. Nutzbarer Frequenzbereich unter Berücksichtigung des Kopplungssystems aus [12]	55
5.3. Hinweise zur korrekten Verwendung der Magnetkopplung aus [12]	55
5.4. FAG Detector III mit Zubehör	56
5.5. Der Screenshot zeigt das Programm Trendline, welches für die Datenbankadministration und die Analyse sowie die Archivierung der Messdaten verwendet wird. Im Linken Bereich ist die Datenbank mit Anlagenbereichen, den dortigen Aggregaten und deren Messpunkten dargestellt. Der Rest zeigt den Verlauf des angewählten Kennwertes und dem aktuellsten Spektrum dieses Wertes.	58
5.6. Außenringsschaden an einem Kugellager mit der Bezeichnung 6326-M	59
6.1. Organisationsstruktur der Abteilung Spittelau/Flötzersteig	61
6.2. Prozessflussdiagramm für die Schwingungsüberwachung	62
6.3. Beispielhaftes Detailblatt eines Schwingungsberichtes	64
6.4. Ablauf Messrundgang und Reporting des Referenzrundganges zur Arbeitszeiterhebung	65
7.1. Jahreszeitaufwand nach Risikoklassen Spittelau pro Mitarbeiter	72
7.2. Jahreszeitaufwand nach Risikoklassen Floetzersteig Variante I pro Mitarbeiter	73
7.3. Jahreszeitaufwand nach Risikoklassen Floetzersteig Variante II pro Mitarbeiter	74



Teil IV.

Anhang

Beschleunigungsaufnehmer

Model Number 603C01	<h2 style="margin: 0;">INDUSTRIAL ICP® ACCELEROMETER</h2>		Revision: H ECN #: 26667
Performance Sensitivity(± 10 %) Measurement Range Frequency Range(± 3 dB) Resonant Frequency Broadband Resolution(1 to 10,000 Hz) Non-Linearity Transverse Sensitivity Environmental Overload Limit(Shock) Temperature Range Temperature Response Enclosure Rating Electrical Settling Time(within 1% of bias) Discharge Time Constant Excitation Voltage Constant Current Excitation Output Impedance Output Bias Voltage Spectral Noise(10 Hz) Spectral Noise(100 Hz) Spectral Noise(1 kHz) Electrical Isolation(Case)	ENGLISH 100 mV/g ± 50 g 30 to 600,000 cpm 1500 kcpm 350 µg ± 1 % ± 7 % 5000 g pk -65 to +250 °F See Graph IP68 ≤ 2.0 sec ≥ 0.3 sec 18 to 28 VDC 2 to 20 mA <150 ohm 8 to 12 VDC 8 µg/√Hz 5 µg/√Hz 4 µg/√Hz >10 ⁵ ohm 11/16 in x 1.65 in 1.8 oz. 1/4-28 Female 2 to 3 ft-lb Ceramic Shear Stainless Steel Welded Hermetic 2-Pin MIL-C-5015 Top	SI 10.2 mV/(m/s ²) ± 490 m/s ² 0.9 to 10,000 Hz 25 kHz 3434 µm/s ² ± 1 % ± 7 % 49,050 m/s ² pk -54 to +121 °C See Graph IP68 ≤ 2.0 sec ≥ 0.3 sec 18 to 28 VDC 2 to 20 mA <150 ohm 8 to 12 VDC 78.5 µm/s ² /√Hz 49.1 µm/s ² /√Hz 39.2 µm/s ² /√Hz >10 ⁵ ohm 18 mm x 42.2 mm 51 gm No Metric Equivalent 2.7 to 8.8 N-m Ceramic Shear Stainless Steel Welded Hermetic 2-Pin MIL-C-5015 Top	OPTIONAL VERSIONS Optional versions have identical specifications and accessories as listed for the standard model except where noted below. More than one option may be used. EX - ATEX or ATEX and CSA Hazardous Area Approval Hazardous Area Approval EEX Ia IIC T4, -40°C to +121°C, II 1 G Hazardous Area Approval CI, Div I, Groups A, B, C, D; ClII, Div I, Groups E, F, G, ClIII, Div I Hazardous Area Approval Exia IIC T4, AExia IIC, T4 Hazardous Area Approval Cl, Div 2, Groups A, B, C, D; ExL, IIC T4, AExL IIC T4 Hazardous Area Approval EEX nL IIC T4, -40°C to +121°C, II 3 G M - Metric Mount Supplied Accessory: Model M081A61 Mounting Stud 1/4-28 to M5 X 1 (1)
Physical Size (Hex x Height) Weight Mounting Thread Mounting Torque Sensing Element Sensing Geometry Housing Material Sealing Electrical Connector Electrical Connection Position	TO - Temperature Output Temperature Output Range Temperature Scale Factor Electrical Connector Electrical Connections(Pin A) Electrical Connections(Pin B) Electrical Connections(Pin C) Size - Height Weight	+36 to +250 °F 5.56 mV/°F + 32 3-Pin MIL-C-5015 Acceleration Output Ground Temperature Output 1.86 in 2.0 oz. +2 to +121 °C +10 mV/°C	NOTES: [1] Typical. [2] Conversion Factor "g = 9.81 m/s ² ". [3] The high frequency tolerance is accurate within ±10% of the specified frequency. [4] Zero-based, least-squares, straight line method. [5] 1/4-28 has no equivalent in SI units. [6] See PCB Declaration of Conformances PS023 or PS060 for details.
 [6]			
		Typical Sensitivity Deviation vs Temperature 	
All specifications are at room temperature unless otherwise specified. In the interest of constant product improvement, we reserve the right to change specifications without notice. ICP® is a registered trademark of PCB Group, Inc.		SUPPLIED ACCESSORIES: Model M081A61 Mounting Stud Model ICS2 NIST-traceable single-axis single-point amplitude response calibration at 6000 cpm (100 Hz) (1)	
Entered: <i>[Signature]</i> Engineer: <i>[Signature]</i> Sales: <i>[Signature]</i> Approved: <i>[Signature]</i> Spec Number: Date: 1/3/07 Date: 1/3/07 Date: 1/3/07 Date: 1/3/07		13145	
		Phone: 800-959-4464 Fax: 716-684-3823 E-Mail: imi@pcb.com 3425 Walden Avenue, Depew, NY 14043	



