



## **Technische Hochschule Ingolstadt**

Fakultät: Elektro- und Informationstechnik

Studiengang: Elektro- und Informationstechnik

# **Bachelorarbeit**

Thema:

Predictive Maintenance in der Gepäckförderanlage im  
Terminal 1 am Flughafen München

Umsetzung von Predictive Maintenance in der  
Gepäckförderanlage am Beispiel der Sortierrundläufe und einiger  
Kurven

Vor- und Zuname: Bernhard Meyer

ausgegeben am: 14.11.2023

abgegeben am: 12.01.2023

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Lorenz Gaul

Zweitprüfer: Prof. Dr.-Ing. Rainer Krämer

## Abstract

---

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Frage, wie eine Implementierung eines Predictive Maintenance-Systems in der Gepäckförderanlage im Terminal 1 des Flughafen München aussehen könnte. Zu diesem Zweck wurde eine Auswertung der bestehenden Sensordaten der Sortierrundläufe gemacht, eine Implementierung eines “mobilen“ Sensorkonzepts und die Auswertung der Daten des Konzepts durchgeführt. Die Daten werden dahingehend analysiert, ob man eine Aussage über den mechanischen Zustand eines Förderers treffen kann. Die Analyse ergab, dass man mithilfe der Vibrationsdaten eine Aussage darüber treffen kann, ob eine defekte Laufrolle an einem Förderer vorhanden ist oder nicht. Zur automatisierten Auswertung der Daten wurde zudem ein Decision Tree trainiert. Um die Kategorisierung zu verbessern, wurde zudem eine Normalverteilung und ein Wert für die Welligkeit der Sensordaten berechnet und an den Entscheidungsbaum übergeben. Jeweils ein Decision Tree wurde für einen Förderertyp verwendet. Die Entscheidungsbäume lieferten für die Validierungsdaten in über 97% der Fälle das richtige Ergebnis, dennoch bedarf es noch mehr Arbeit in diese Richtung, um ein System zu implementieren, welches mehr als einen Fehlerfall abdeckt.

## Erklärung

---

Ich erkläre hiermit, dass ich die Arbeit selbständig verfasst, noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benützt sowie wörtliche und sinngemäße Zitate als solche gekennzeichnet habe.

Freising, den 12.01.2024

---

Bernhard Meyer

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abstract</b>	<b>I</b>
<b>Glossar</b>	<b>V</b>
<b>1 Gepäckverarbeitung am Flughafen München</b>	<b>1</b>
<b>2 Aktueller Stand der Wissenschaft</b>	<b>3</b>
2.1 Abgrenzung verschiedener Wartungsmodi	3
2.1.1 Corrective Maintenance	4
2.1.2 Preventive Maintenance	5
2.1.3 Predictive Maintenance	6
2.1.4 Vorausschauende Instandhaltung	6
2.2 Mögliche Analysearten für Predictive Maintenance	7
2.2.1 Vibrationsanalyse	7
2.2.2 Wärmeentwicklungsanalyse	11
2.2.3 Betriebsstoffanalyse	12
2.2.4 Inspektion durch Fachkraft	12
2.2.5 Ultraschallanalyse	13
2.2.6 Strom- und Leistungsanalyse	13
2.3 Wieso ist Instandhaltung nötig	14
<b>3 Gepäckförderanlage am Flughafen München</b>	<b>15</b>
3.1 Genereller Aufbau der Gepäckförderanlage	15
3.2 Aufbau der IT-Infrastruktur der GFA	17
3.3 Datenquellen in der Anlage	18
3.4 Aktueller Wartungsprozess	18
<b>4 Sensoren für Predictive Maintenance</b>	<b>19</b>
4.1 Anforderungen der Gepäckförderanlage	19
4.2 Mobile batteriebetriebene Komplettlösung	20
4.3 Lösung mit IO-Link-Master	21
4.4 Vibrationssensoren über WLAN mit M8-Versorgungsstecker	22
4.5 Sensoren in den Sortierrundläufen	22
4.6 Sensoren mit einer extra Auswerteelektronik	24
<b>5 Methodik</b>	<b>25</b>
5.1 Generelles Vorgehen	25
5.1.1 Vorverarbeitung der Daten	25
5.1.2 Kategorisierung der Daten für den Machine-Learning-Algorithmus	27
5.2 Daten der Sortierrundläufe	29
5.3 Daten der Kurven und Anbindung der Sensoren	29
5.3.1 Anbringung der extra Sensoren	29
5.3.2 Einbindung der Daten in Elasticdatenbank	31
5.3.3 Auswertung der Daten der IFM-Sensoren	31
5.4 Parameter der Entscheidungsbäume	32

<b>6</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>33</b>
6.1	Auswertung der Sensordaten . . . . .	33
6.1.1	Analyse der Sensoren in den Sortierrundläufen . . . . .	33
6.1.2	Auswertung der Daten der Sensoren an den Kurven . . . . .	36
6.1.3	Ergebnisse der Analyse . . . . .	39
6.2	Decision Trees . . . . .	39
6.2.1	Sortierrundläufe . . . . .	39
6.2.2	Kurven . . . . .	40
6.3	Gesamtergebnis . . . . .	41
<b>7</b>	<b>Fazit / Ausblick</b>	<b>42</b>
7.1	Belastbarkeit der Ergebnisse . . . . .	42
7.2	Mögliche Folgen dieser Arbeit . . . . .	43
7.3	Wie kann in Zukunft weiter an diesem Thema gearbeitet werden? . .	43
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>45</b>
	<b>Anhang</b>	<b>46</b>
	Übersicht Normenreihen . . . . .	46
	DIN ISO 10816/DIN ISO 20816 - Mechanische Schwingungen	
	– Messung und Bewertung der Schwingungen von Maschinen	46
	DIN ISO 13373 - Zustandsüberwachung und -diagnostik von	
	Maschinen . . . . .	46
	Abbildungsverzeichnis . . . . .	47
	Tabellenverzeichnis . . . . .	47
	Literaturverzeichnis . . . . .	47

## Glossar

- AVPZ** Servicebereich Aviation Zentrale Infrastruktur [GFA](#) - diese Abteilung ist für den organisatorischen Betrieb der [GFA](#) im Terminal 1 zuständig. Mitarbeiter von AVPZ besetzen auch die Gepäckleitwarte der [GFA](#). [1](#)
- Box** Förderband, an dem ein Mitarbeiter Koffer in Flugzeugcontainer oder Kofferanhänger verlädt, mit denen das Gepäckstück dann zum Flugzeug auf dem Vorfeld gebracht wird. [15](#)
- Elastic** Elastic oder auch die [Elasticdatenbank](#) ist das zentrale Datenbanksystem in der Gepäckförderanlage. [17](#), [31](#)
- Elasticdatenbank** Vektordatenbanksystem, welches als zentrale Datenbank in der Gepäckförderanlage im Terminal 1 verwendet wird. [18](#), [23](#), [29](#), [31](#), [45](#), [III](#), [V](#)
- GFA** Gepäckförderanlage im Terminal 1 am Flughafen München. [1](#), [10](#), [15](#), [17](#), [19](#), [43](#), [III](#), [V](#), [VI](#)
- Index** Ein Index ist laut eigener Definition von Elastik “ein logischer Namespace, der eine Ansammlung an Dokumenten beinhaltet, wobei jedes Dokument eine Ansammlung an Feldern ist – die wiederum Schlüssel-Wert-Paare sind, die Ihre Daten enthalten“.[2]. [17](#)
- IO-Link** Verbindungsprotokoll, um Sensordaten von Sensoren zu erhalten. [18](#), [21](#), [29](#), [31](#), [45](#), [III](#)
- Main-Tool** Auftrags- und Lagerhaltungssoftware der Firma Microsoft, welche vom Instandhalter der [GFA](#) verwendet wird. [17](#)
- Matplotlib** Matplotlib ist ein Python-Modul, welches zur Visualisierung von Datensätzen genutzt werden kann. Die Syntax ähnelt hierbei der Syntax von MATLAB. Weitere Informationen können auf der Website des Projekts gefunden werden [20]. [25](#)
- Modul** Die [GFA](#) im Terminal 1 ist aufgeteilt in 6 Module (4 mit Schalensortier und 2 ohne). Für jedes dieser Module gibt es Alarm-, Voll- und Wartungsmeldungen im [SCADA](#)-System. Der beispielhafte Aufbau eines Moduls befindet sich in Abbildung 4. [15–18](#), [22](#), [23](#), [31](#), [35](#), [47](#)
- Pandas** Pandas ist ein Python-Modul, welches zum Einlesen und Speichern verschiedener Datentypen, wie CSV- oder Excel-Dateien und zur Verarbeitung von großen Datenmengen verwendet werden kann. Weitere Informationen zu Pandas finden sich auf der Website des Projekts [15]. [25](#)
- PdM** Predictive Maintenance. [2](#), [3](#), [6](#), [11](#), [43](#), [44](#)
- PM** Preventive Maintenance. [5](#), [19](#)
- SCADA** Supervisory Control and Data Acquisition - System zur Überwachung und Steuerung einer Anlage. Im Fall der [GFA](#) ist das SCADA-System WinCC von Siemens. [V](#)

**SK-Learn** SK-Learn ist ein Python-Modul, welches sich auf die einfache Implementierung verschiedenster Machine-Learning-Algorithmen spezialisiert hat. Weitere Informationen zu diesem Modul können auf folgender Website gefunden werden [\[18\]](#). [25](#), [32](#)

**TELS** Abteilung Technik - genauer: Flughafenspezifische technische Anlagen - technischer Betreiber der [GFA](#). [1](#)

**VM** Virtuelle Maschine. [17](#)

# 1 Gepäckverarbeitung am Flughafen München

7.05 Millionen Koffer wurden im Jahr 2023 im Terminal 1 am Flughafen München verarbeitet. Bei einer Betriebszeit der Gepäckförderanlage von  $\approx 21.5$  h pro Tag und einem Betrieb der Anlage an jedem Tag des Jahres, kommt man bei dieser Menge auf eine durchschnittliche Verarbeitungsgeschwindigkeit von  $898 \frac{\text{Koffer}}{\text{h}}$ . Zu Peak-Zeiten werden sogar  $2700 \frac{\text{Koffer}}{\text{h}}$  von der Anlage, welche bereits seit 1992 teil des Flughafens ist, verarbeitet. Und noch immer ist das System, welches zum großen Teil immer noch aus den originalen Chassis besteht und ständig erweitert wurde, dazu in der Lage, diese Gepäckmassen zu verarbeiten.

Um eine solche Anzahl an Koffern in das jeweils richtige Flugzeug sicher verladen zu können, wird eine Anlage benötigt, die nicht nur diese Menge an Gepäckstücken verarbeiten kann, sondern auch alle Sicherheitsanforderungen des internationalen Flugverkehrs erfüllt und hochverfügbar ist. Bei einem theoretischen Ausfall des Systems für eine halbe Stunde würden zwischen 450 und 1350 Koffer nicht oder nur verzögert verarbeitet werden können. Dies führt dazu, dass Flugzeuge ihr Startlots verlieren würden, wenn sie auf das fehlende Gepäck warten, was zu Kosten und Verzögerungen führt. Zudem wäre es ein Imageschaden für den Flughafen München. Das höchste Ziel der Abteilung [TELS](#), als technischer Betreiber der Gepäckförderanlage ([GFA](#)) und der Abteilung [AVPZ](#), als organisatorischer Betreiber der [GFA](#), ist es, einen Stillstand der Anlage zu verhindern. Sollte dies nicht möglich sein, wird versucht geplante Stillstandszeiten in die Nachtstunden, wenn die Anlage ohnehin steht oder in betriebsschwache Zeiten zu legen. Um Wartungsarbeiten an der Anlage möglichst schnell durchführen zu können, ist ein Dienstleister, in diesem Zusammenhang auch als Instandhalter bezeichnet, beauftragt, sämtliche Defekte in der Anlage zu erkennen und vor einem Stillstand der Anlage zu beheben.

Allerdings ist es kaum möglich, jeden Schaden der Anlage sofort zu erkennen. Mit einer Fläche von 22 Tausend  $m^2$  und einer Gebäudelänge von 792 m muss man zu jeder Bearbeitungszeit auch immer erst eine Anfahrtszeit mit berücksichtigen. Auf dieser Fläche sind mehr als 3000 Gurtförderer, vier Schalensorter und zahlreiche Scannertore im Einsatz, um das Gepäck der Passagiere zu verarbeiten. Und bei jedem Förderer, jedem Scannertor und jedem Sorter kann jederzeit ein Defekt auftreten.

Um dem Instandhalter einen besseren Überblick über den aktuellen Zustand der Anlage zu ermöglichen, wurde von [AVPZ](#) und von Seiten des Instandhalters der Wunsch geäußert, ein System in der Anlage zu integrieren, welches den mechanischen Zustand überwacht und Alarm schlägt, falls der Zustand eines Förderers sich verschlechtert. Solche Systeme werden, je nach Ausbaustufe und Detaillierungsgrad des Überwachungssystems, als Condition Monitoring oder Predictive Maintenance



(PdM) Systeme bezeichnet.

Einige Hersteller, wie Siemens Logistics, IQunet oder IFM bieten bereits Software- und Hardware-Komplettpakete an, um Condition Monitoring Systeme zu integrieren. Nachteil dieser Systeme ist allerdings, dass diese meist in Kraftwerken oder kleineren Industrieanlagen zum Einsatz kommen. Dort befindet sich an jedem Antrieb ein Sensor und überwacht den Zustand. Im Rahmen dieser Arbeit soll ermittelt werden, ob ein Condition Monitoring beziehungsweise ein Predictive Maintenance System in der Gepäckförderanlage grundsätzlich funktionieren würde und ob es mit mobilen Sensoren umgesetzt werden kann, da eine Beschaffung von Sensoren für 3000 Förderer einen erheblichen Kostenaufwand darstellt. Die zentrale Frage dieser Arbeit lautet also wie folgt: “Wie kann eine mögliche Implementierung von Predictive Maintenance in der bestehenden Gepäckförderanlage im Terminal 1 am Flughafen München am Beispiel der Sortierrundläufe und der 90° Kurven aussehen?”

Zu Beantwortung dieser Frage werden zu Beginn der Arbeit zuerst die Grundlagen erläutert. Zu diesen zählt neben den Definitionen der verschiedenen Wartungsarten und den verschiedenen, möglichen Analysearten, welche in [Kapitel 2](#) vorgestellt werden, auch der grundsätzliche Aufbau der Gepäckförderanlage im Terminal 1 am Flughafen München. Dieser wird in [Kapitel 3](#) gezeigt. Nach diesen Grundlagen wird in [Kapitel 4](#) eine kleine Auswahl von Sensorlösungen beschrieben, welche in die engere Wahl für eine Lösung am Flughafen gekommen sind. Anschließend wird in [Kapitel 5](#) das Vorgehen bei der Auswertung der Daten der Sortierrundlaufsensoren und der in [Abschnitt 4.3](#) vorgestellten Sensorlösung von IFM beschrieben. In [Kapitel 6](#) werden die erhaltenen Daten gezeigt und analysiert. Im letzten [Kapitel 7](#) wird ein Ausblick gegeben, wie die erhaltenen Ergebnisse am Flughafen angewendet werden können und welche Themen in Zukunft noch näher beleuchtet werden müssen. Eine Zusammenfassung der gesamten Arbeit befindet sich in [Kapitel 8](#).

## 2 Aktueller Stand der Wissenschaft

Zum Thema Predictive Maintenance (PdM) gibt es, verglichen mit anderen Themengebieten, wenige Veröffentlichungen. Im Folgenden werden die wichtigsten Punkte aus den Quellen zusammengefasst und wiedergegeben, um ein Bild zu erzeugen, wie Predictive Maintenance aktuell verwendet und welche Lösungsansätze eingesetzt werden können. Bevor die Lösungsansätze für PdM erläutert werden, wird zuerst eine Definition beziehungsweise eine Abgrenzung der verschiedenen Wartungsmodi vorgenommen, um Missverständnisse zu verhindern.

### 2.1 Abgrenzung verschiedener Wartungsmodi

Die Wartung einer Anlage kann auf verschiedene Weisen erfolgen. In der Literatur werden dabei unterschiedliche Wartungsmodi verwendet. Moleda et al. [14] und Mobley [13] unterscheiden beispielsweise zwischen den drei Arten: “Corrective Maintenance“ (Moleda et al.) beziehungsweise “Run-To-Failure Management“ (Mobley), “Preventive Maintenance“ und “Predictive Maintenance“. Geisberg [12] hingegen unterscheidet sogar vier Wartungsmodi in seiner Arbeit: “Reaktive Wartung“, “Präventive Wartung“, “Zustandsorientierte Wartung“ und “Vorausschauende Instandhaltung“. Die DIN EN 13306 [3] unterteilt in 13 Instandhaltungsarten, wobei auch noch einige weitere Begriffe in Kapitel 7 der Norm definiert werden. Schubert [17] hat als Grundlage ihrer Arbeit die DIN EN 13306 verwendet. Somit enthält dieses Werk eine feinere Unterteilung der einzelnen Wartungsarten als die Werke von Moleda et al., Mobley oder Geisberg. Auch König et al. [11] treffen eine andere Unterteilung der Wartungsmodi. Ähnlich wie Mobley und Moleda et al. setzen auch König et al. “Condition Based Maintenance“ und “Predictive Maintenance“ gleich. König et al. führen zudem den Wartungsmodus “Corrective Maintenance“ beziehungsweise “Run-To-Failure Management“ nicht explizit mit auf.

Für die vorliegende Arbeit wird die Definition verwendet, wie sie Moleda et al., Mobley und König et al. in ihren Arbeiten verwenden. Auch der Modus der “Vorausschauenden Instandhaltung“, welcher nur bei Geisberg vorkommt, wird in den folgenden Kapiteln beschrieben. Die Einteilung nach Schubert beziehungsweise die Einteilung nach DIN EN 13306 wird in dieser Arbeit nicht verwendet.

Schubert hat in ihrer “Bewertung der Übertragbarkeit von Predictive Maintenance Lösungen aus anderen Branchen“ eine wichtige Erkenntnis dargelegt, die sich so auch hier wieder spiegelt. So eindeutig wie es in [Tabelle 1](#) dargestellt wird, werden die verschiedenen Begriffe in Realität nicht verwendet. Schubert beispielsweise nutzt den Begriff “Vorausschauende Instandhaltung“ synonym zum Begriff “Predictive Maintenance“, wo hingegen Geisberg noch einmal zwischen “Zustandsorientierter Wartung“ und “Vorausschauender Instandhaltung“ unterscheidet. In [Tabelle 1](#) sind

Tabelle 1: Übersicht Wartungsmodi

Moleda et al.	Mobley	Geisberg/Lackner	Erklärung
Corrective Maintenance	Run-To-Failure Management	Reaktive Wartung	Wartungen werden erst durchgeführt, wenn das Bauteil ausfällt → Stillstand der Anlage wird in Kauf genommen
Preventive Maintenance	Preventive Maintenance	Präventive Wartung	Wartung wird nach einem festgelegten Zeitintervall durchgeführt. Zeitintervall ist so gewählt, dass im Schnitt nur wenige Maschinen davor ausfallen → Großteil der Ausfälle werden durch vorzeitigen Komponentenaustausch verhindert
Predictive Maintenance	Predictive Maintenance	Zustandsorientierte Wartung	Gesamtzustand der Anlage wird überwacht → Komponenten werden individuell getauscht, bevor sie ausfallen
-	-	Vorausschauende Instandhaltung	Gezielte Suche nach Fehlern und Verhinderung der Fehler bei Neubau der Anlage oder gewisser Anlagenteile

die drei beziehungsweise vier Wartungsmodi von Moleda et al., Mobley und Geisberg gegenübergestellt. Die sehr feine Unterteilung von Schubert und der DIN EN 13306 wird nicht berücksichtigt. Eine kurze Erklärung des jeweiligen Modus in der Tabelle ist ebenfalls enthalten. Eine Visualisierung der verschiedenen Wartungsmodi ist zudem in [Abbildung 1](#) zu sehen. Erklärungen zu den einzelnen Modi befinden sich in den folgenden Unterkapiteln.

### 2.1.1 Corrective Maintenance

Corrective Maintenance, Run-To-Failure Management oder auch Reaktive Wartung genannt, beschreibt den einfachsten Wartungsprozess. Hierbei wird ein Bauteil oder eine Komponente erst getauscht, wenn sie ausfällt. Davor werden, in der extremsten Form von reaktiver Wartung, keine Instandhaltungs- oder Wartungsarbeiten an der Anlage durchgeführt. Aufgrund der Tatsache, dass man bei Corrective Maintenance auf den Fehler wartet und keine Maßnahmen trifft, um zu bestimmen, wann der Fehler ungefähr eintritt oder diesen zu verhindern, muss ein sehr hoher Aufwand

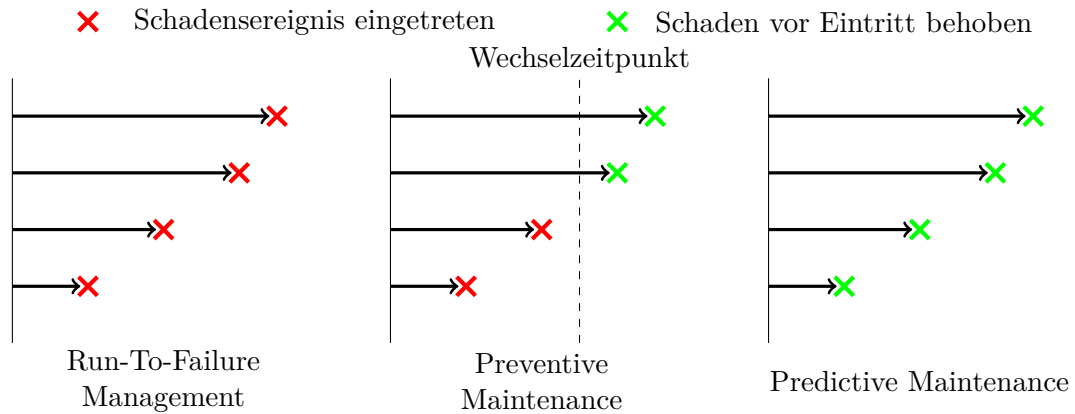


Abbildung 1: Übersicht Wartungsmodi

betrieben werden, um für alle Komponenten genug Ersatzteile vorrätig zu haben. Kommt es zu einem Ausfall einer Komponente und damit zu einem Stillstand der Anlage, ist die Zeit meist knapp und man kann nicht auf externe Lieferungen warten. Auch die Arbeitslast der Mitarbeiter ist sehr ungleich verteilt. In Zeiten, in denen die Anlage läuft, können die Mitarbeiter anderen geregelten Tätigkeiten nachgehen. Kommt es allerdings zum Ausfall einer Komponente, so müssen die Mitarbeiter häufig Extraschichten durchführen, um die Anlage möglichst schnell wieder in Betrieb nehmen zu können. Diese Form der Wartung wird laut Moleda et al. [14] vorwiegend für nicht kritische Systeme eingesetzt. Mobley [13] zeigen zudem auf, dass auch Preventive Maintenance Run-To-Failure-Techniken verwenden muss, wenn eine Komponente vor dem Tauschzeitpunkt ausfällt.

### 2.1.2 Preventive Maintenance

Bei Preventive Maintenance (PM), welche auch den Namen Präventive Wartung trägt, wird das Wartungspersonal aktiver als bei der Corrective Maintenance eingesetzt. Hierbei wird nicht auf einen Fehler einer Komponente gewartet, sondern es werden Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen an der Anlage durchgeführt und Komponenten in regelmäßigen Zyklen gewechselt. Hierbei spielt laut Mobley [13] nur die Zeit zwischen den Tauschzeitpunkten der Komponenten eine Rolle. Moleda et al. [14] hingegen sehen auch die Inspektion als eine Aufgabe in einer PM-Anlage. Beispiele für Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen, die in beiden Arbeiten zu PM gezählt werden, sind unter anderem, der Wechsel von Schmiermitteln, wie Ölen oder Fetten, wenn diese verunreinigt sind oder eine gewisse Zeit in Verwendung waren. Auch das Überprüfen von geschraubten Verbindungen fällt unter vorbeugende Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten, die im Rahmen von Preventive Maintenance angewandt werden. Der Komponentenaustausch bei PM erfolgt meist, ohne den Zustand der Baugruppe genauer zu analysieren. Somit kann

es sein, dass eine Komponente, welche noch einwandfrei funktioniert, aufgrund der erhöhten Laufzeit neu beschafft und getauscht wird. Genauso kann es passieren, dass eine Komponente vor ihrem Wechselintervall ausfällt und das Wartungsteam dann mit Run-To-Failure-Techniken die defekte Komponente möglichst schnell tauschen muss, um die Stillstandszeit der Anlage gering zu halten. Sollte dieser Fall allerdings zu häufig vorkommen, so empfiehlt es sich, den Wechselzyklus der Komponenten zu verkürzt. Die Instandhaltungsmitarbeiter einer Anlage, die auf Preventive Maintenance setzt, haben einen viel geregelteren Arbeitsablauf als Arbeiter in einer Run-To-Failure Anlage. Dies liegt daran, dass weniger unvorhergesehene Zwischenfälle auftreten und das Instandhaltungsteam dafür mehr planbare Aufgaben, wie Komponentenaustausch oder vorbeugende Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten durchführen muss. Durch die bessere Planbarkeit der Aufgaben, kann man sich für einige Komponenten bereits auf externe Lieferketten verlassen. Allerdings müssen gewisse Ersatzteile dennoch vorgehalten werden, da es vorkommen kann, dass eine kritische Komponente vor ihrem eigentlichen Wechselintervall ausfällt.

### **2.1.3 Predictive Maintenance**

Predictive Maintenance (**PdM**) oder auch Vorbeugende Wartung genannt, bezeichnet die Wartung auf Grundlage eines genauen Zustandsberichts der Anlage. Durch Betriebs- und Sensordaten wird der Zustand der einzelnen Komponenten ermittelt. Steht bei einem Bauteile ein Ausfall bevor, so wird der Instandhalter verständigt und kann das entsprechende Teil tauschen, bevor es zu einem Stillstand der Anlage kommt. Durch den Tausch der Komponente zum letztmöglichen Zeitpunkt wird sichergestellt, dass die Komponenten effizient genutzt werden und nicht wie bei der präventiven Wartung einfach auf Verdacht getauscht werden. Auch Bauteile, die nach der Präventiven Wartung noch länger laufen müssten, die aber bereits das Ende ihrer Lebenszeit erreicht haben, können mit vorbeugender Wartung erkannt und ausgetauscht werden. Da der Zustand der einzelnen Anlagenkomponenten bekannt ist, können die Instandhaltungsmitarbeiter ihre Aufgaben bereits im Voraus planen. Ungeplante Anlagen-Stillstände kommen in einem funktionierenden **PdM**-System nicht vor. Durch die Planbarkeit der Aufgaben kann die Anzahl der gelagerten Ersatzteile auf ein Minimum beschränkt werden oder theoretisch sogar ganz entfallen, wenn man sich bei allen Komponenten auf die externen Lieferketten verlassen kann.

### **2.1.4 Vorausschauende Instandhaltung**

Die vorausschauende Instandhaltung ist eine Variante der vorbeugenden Wartung. Allerdings wird bei der vorausschauenden Instandhaltung neben der eigentlichen Instandhaltung der Bestandsanlage auch Wert darauf gelegt, dass aktuelle Probleme

mit der Anlage bei einem Neubau oder einer Erweiterung der Anlage berücksichtigt werden, sodass die Fehler in den neuen Anlagenteilen nicht mehr auftreten. Diese Ansicht führt allerdings zum Teil zu erheblichem Mehraufwand, da man nicht nur eine Lösung für das aktuelle Problem finden, sondern auch eine Verbesserung der Anlage erarbeiten muss. Diese Lösung sollte dann verhindern, dass das Problem in einem neuen Anlagenteil erneut auftritt. Das Konzept der vorausschauenden Instandhaltung wurde nur bei Geisberg et al. [12] erwähnt. Im eigentlichen Sinne ist dieses Konzept kein Wartungskonzept, da Wartung darauf abzielt, eine bestehende Anlage instand zu halten und nicht eine neue zu planen.

## 2.2 Mögliche Analysearten für Predictive Maintenance

Nachdem Predictive Maintenance auf Daten aus der Anlage angewiesen ist, werden im Folgenden verschiedene Analysearten vorgestellt, die jeweils unterschiedliche Eigenschaften der Anlage erfassen können. Neben solchen, die man mithilfe von Software behandeln kann, zum Beispiel Vibrations-, Strom- und Leistungsanalyse, benötigt man für andere Verfahren, zum Beispiel die Inspektion der Anlage durch eine Fachkraft, Mitarbeiter, die über Fachwissen zum Gesamtsystem verfügen. Die im folgenden erwähnten Analysearten werden auch von Moleda et al. [14] und Moblely [13] in deren Werken aufgeführt. Genauere Informationen zur Vibrationsanalyse befinden sich zudem in der Norm DIN ISO 10816 [4] bzw. deren Folgenorm DIN ISO 20816 [5][6]

### 2.2.1 Vibrationsanalyse

Um den Zustand eines mechanischen Systems erfassen zu können, ist es eine Möglichkeit, die mechanischen Schwingungen, die das System während des Betriebs erzeugt, zu erfassen. Hierbei ist allerdings darauf zu achten, dass die einzelnen Messungen zu Zeitpunkten erfolgen, an denen die Situation der Anlage vergleichbar ist. Dies ist unter anderem der Fall, wenn ein Förderer bereits keine Koffer mehr enthält, allerdings noch nicht in die Abschaltung gegangen ist. In diesem Zeitraum sind die Messwerte dieses Förderers mit gleichartigen Typen vergleichbar. Stellt man die Vibrationswerte während einer Fahrt mit Koffern gegenüber, so können sich alleine aufgrund der verschiedenen Koffereigenschaften erhebliche Unterschiede in der Analyse ergeben.

**Arten der Vibrationserfassung** Im Allgemeinen unterscheidet man, welche Art von Sensor man wie positioniert, um ein bestmögliches Ergebnis zu erzielen. Im Folgenden werden die unterschiedlichen Messarten der Sensoren vorgestellt, welche in der DIN ISO 20816-1 [5] definiert sind.

Tabelle 2: Übersicht über Normen zur Schwingungsanalyse  
n.V. - nicht Vorhanden

Doknr.	Beschreibung der Norm	Sprache	Nachfolger-Nr.	DIN-Norm	EN-Norm	ISO-Norm
10816	Vibrationsmessung an nicht rotierenden Teilen der Maschinen	Deutsch/ Englisch	20816	X		X
7919	Vibrationsmessung an rotierenden Teilen der Maschinen	Deutsch/ Englisch	20816	X		X
20816	Vibrationsmessung an rotierenden und nicht rotierenden Maschinenteilen	Deutsch/ Englisch	n.V.	X		X
13373	Analyse von Vibrationsdaten	Deutsch/ Englisch	n.V.	X		X

**Schwingungsmessung an nicht rotierenden Bauteilen** An nicht rotierenden Bauteilen wird meist die Schwinggeschwindigkeit und die Schwingbeschleunigung gemessen. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass nur die Schwingung des Gehäuses über diese Methode ermittelt werden kann und nicht die Schwingung der Welle.

**Messung der relativen Wellenschwingung** Die relative Wellenschwingung wird über einen berührungslosen Abstandssensor ermittelt. Dieser Sensor erfasst die Streckenänderung je Zeit zwischen seiner Befestigungsposition und der Welle, auf die er ausgerichtet ist. Die Strecke zwischen Gehäuse und Welle wird also relativ zueinander bestimmt. Somit wird die Schwingung des Gehäuses ebenfalls in der Messung mit berücksichtigt.

**Messung der absoluten Wellenschwingung** Die absolute Wellenschwingung ist, im Gegensatz zur relativen, unabhängig von der Schwingung des Gehäuses. Sie kann entweder mithilfe eines Fühlers, welcher direkt auf der Welle mitläuft, oder durch eine Kombination der beiden vorher genannten Varianten erfolgen. Befestigt man einen Sensor für die relative Wellenschwingung direkt neben einem Sensor für die Schwingung des Gehäuses, also einer Schwingung an einem nicht rotierenden Bauteil, so kann man die Schwingung des Gehäuses aus der relativen Wellenschwingung herausrechnen und bekommt somit eine absolute Wellenschwingung als Ergebnis.

**Übersicht über die verschiedenen Normen zur Vibrationsanalyse** Es gibt einige internationale und harmonisierte nationale Normen zum Thema Maschinen-

schwingungen und Schwingungsanalyse. Einen Überblick über die in dieser Arbeit verwendeten Normen wird in [Tabelle 2](#) gegeben. Zudem findet sich eine Auflistung verschiedener zum Thema relevanter Normen auch in der DIN ISO 10816-0 [\[4\]](#). Eine genauere Übersicht über die einzelnen Normen der Normenreihen DIN ISO 10816 bzw. DIN ISO 20816 (siehe [Tabelle 7](#)) und DIN ISO 13373 (siehe [Tabelle 8](#)) ist im Anhang enthalten.

**Vibrationswerte** Die DIN ISO 20816-1 [\[5\]](#) benennt drei Größen, die im Zusammenhang mit Vibrationsmessungen interessant sind. Einerseits kann man den Schwingweg in Mikrometer [ $\mu m$ ] messen. Alternativ kann auch die Schwinggeschwindigkeit in Millimeter pro Sekunde [ $\frac{mm}{s}$ ] erfasst werden. Soll ein Beschleunigungssensor zur Erfassung der Schwingungen verwendet werden, so wird die Schwingbeschleunigung in Meter pro Sekunde zum Quadrat [ $\frac{m}{s^2}$ ] gemessen. Typischerweise wird laut DIN ISO 20816-1 der Effektivwert der Schwinggeschwindigkeit verwendet, um Schwingungen vieler Maschinenklassen zu beschreiben. Im Anhang A zu DIN ISO 20816-1 [\[5\]](#) sind die mathematischen Formeln zur Berechnung der verschiedenen Größen angegeben.

**Zoneneinteilung nach DIN ISO 10816** Um die gemessenen Maschinenschwingungen bewerten und einordnen zu können, teilen die DIN ISO 10816-0 [\[4\]](#) beziehungsweise die DIN ISO 20816-1 [\[5\]](#) den Betrieb von Maschinen hinsichtlich der zu erwartenden Vibrationen in vier Zonen ein. In den Normen der Normenreihe 10816/20816 werden für verschiedene Maschinen auch Empfehlungen abgegeben, welche Grenzwerte die einzelnen Zonen haben sollten. Mithilfe dieser Grenzwerte soll der Betrieb von Anlagen analysierbar gemacht werden. Die Zonen werden nachfolgend genauer vorgestellt und erläutert.

**Zone A** Die Zone A stellt die erste Phase im Lebenszyklus einer Maschine dar. Direkt nach der Inbetriebnahme einer neuen Maschine oder Anlage befinden sich die Vibrationen der Anlage in Zone A.

**Zone B** Maschinen, deren Schwingungen sich in Zone B befinden, können dauerhaft und ohne weitere Einschränkungen in diesem Betriebszustand laufen.

**Zone C** Weist eine Maschine Schwingungen im Bereich der Zone C auf, so sollte diese Maschine nicht dauerhaft in diesem Betriebszustand laufen. Kurzzeitig darf die Maschine diesen Betriebszustand allerdings fahren.

**Zone D** Liegen die Schwingungswerte einer Maschine in Zone D, so sollte von einem, egal ob kurzzeitigen oder dauerhaften, Betrieb der Maschine in diesem Be-



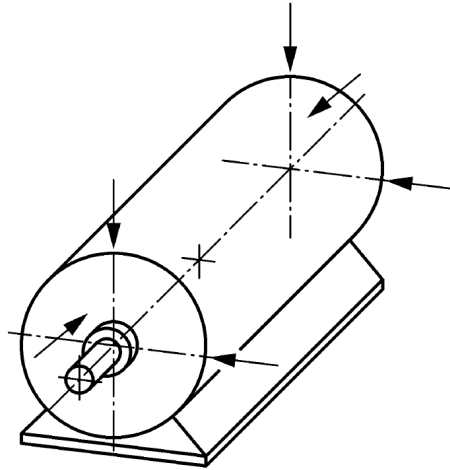


Abbildung 2: Positionierung von Vibrationssensoren an kleinen Maschinen

triebszustand abgesehen werden, da sonst durch Vibrationen oder andere Einflüsse Schäden an der Anlage beziehungsweise der Maschine verursacht werden können.

**Befestigungsorte für Schwingsensoren** Laut DIN ISO 20816-3 [6] muss eine Messung an nicht rotierenden Bauteilen immer auf einer Achse zu den Lagern der rotierenden Bauteile erfolgen. Am besten sind Messungen direkt am Lagergehäuse, da dies allerdings nicht immer möglich ist, wird in der Norm auch die Möglichkeit genannt, nicht direkt am Gehäuse des Lagers die Schwingungen abzugreifen, sondern einen anderen Punkt dafür zu verwenden, der ebenfalls die Schwingungen aufweist, die auch das Lager aufweist. So kann zum Beispiel das Gehäuse der Maschine auf Höhe des Lagers verwendet werden, wenn das Lager direkt, ohne mechanische Energiespeicher, mit dem Gehäuse der Maschine verbunden ist. Bei Messpunkten, die nicht direkt am Lagergehäuse sind, empfiehlt die Norm, Vergleichsmessungen mehrerer Punkte durchzuführen, um den besten Punkt zu finden. [Abbildung 2](#) wurde aus der DIN ISO 20816-3 [6] entnommen. Es zeigt die empfohlenen Befestigungspositionen eines Vibrationssensors an einer Maschine, wie sie in der [GFA](#) im Terminal 1 am Flughafen München eingesetzt wird.

**Analysearten** Aus der Signaltheorie ist bekannt, dass ein Signal im Zeitbereich oder im Frequenzbereich dargestellt und analysiert werden kann.

**Analysen im Zeitbereich** Für eine Analyse im Zeitbereich kann man ohne weitere Berechnungen die erhobenen Sensordaten verwenden. Allerdings zeigen sich Störungen häufig zuerst in einer Veränderung des Frequenzspektrums und erst später in einer erfassbaren Veränderung des Signalverlaufs im Zeitbereich. Um ein Signal im Zeitbereich zu untersuchen, wird häufig der Signalverlauf als gesamtes analysiert.

Die DIN ISO 13373-2 [7] sieht allerdings neben der Untersuchung des Signalverlaufs unter anderem auch noch die Analyse des Signals hinsichtlich der Schwebung, der Modulation oder der Hüllkurve des Signals vor. Zudem werden in Kapitel 4.2 von DIN ISO 13373-2 [7] noch weitere Analyseverfahren im Zeitbereich beschrieben.

**Analyse im Frequenzbereich** Die Vorarbeit, um eine Analyse im Frequenzbereich durchführen zu können, ist deutlich höher als bei der Analyse im Zeitbereich. Für die Berechnung eines Frequenz- oder Fourier Spektrums benötigt man entweder eine Software, die den entsprechenden Algorithmus unterstützt oder ein Gerät, welches eine Fourieranalyse unterstützt. Solch ein Gerät liegt meist in Form eines separaten Fourier-Analysators oder eines Hardware-Chips vor [7]. Um ein Signal im Frequenzbereich richtig zu analysieren, gibt es einige Regeln zu beachten. So gilt es, geeignete Abtastfrequenzen zu wählen und eventuell einen Anti-Aliasing-Filter mit in die Schaltung zu integrieren. Auch auf die Wahl des Bereichs oder Fensters, das festlegt, welche Werte eingelesen werden, muss Augenmerk gelegt werden. Ein falsch gewähltes Fenster kann unter anderem dazu führen, dass bei hohen Pegeln schmalere Spitzen auftreten. Einen Überblick über verschiedene Arten von Fenstern, die eingesetzt werden können, wird in der DIN ISO 13373-2 [7] gegeben.

### 2.2.2 Wärmeentwicklungsanalyse

Neben der Möglichkeit, die Vibrationen, die eine Maschine erzeugt, zu messen, gibt es auch die Möglichkeit, die Emission von Infrarotstrahlung zu erfassen. Eine einfache Möglichkeit hierfür stellt ein Infrarotthermometer dar. Es lässt sich vergleichsweise einfach einrichten und ist günstig in der Anschaffung. Allerdings bietet es nur einen Messpunkt an und kann nicht alleine als PdM-Methode genutzt werden. Es bietet sich laut Mobley [13] an, ein Infrarotthermometer als Ergänzung zu einer Vibrationsmessung zu nutzen, um die Betriebstemperatur zu überwachen und somit eine weitere Möglichkeit zu schaffen, einen Fehler zu erkennen oder einzugrenzen. Will man anstelle von einem einzelnen Messpunkt mehrere, nebeneinanderliegende Messpunkte gleichzeitig erfassen, so bieten sich Wärmebildkameras an. Mit diesen Systemen ist es möglich, die Wärmeverteilung in ganzen Anlagenteilen zu visualisieren und Temperaturänderungen genauer eingrenzen zu können. Durch die Eingrenzung der Fehlerursache, ist es möglich, Fehler schneller zu finden und zu beheben. Zudem können nicht nur elektrische Fehler mit Wärmebildkameras erkannt werden, sondern auch mechanische Fehler können zum Teil diagnostiziert werden. So würde man beispielsweise ein defektes Lager, welches sich bei gleicher Drehzahl mehr erwärmt als ein intaktes Lager, mithilfe eines Wärmebildkamerabilds, erkennen können. Aber auch bei Kurzschlüssen auf elektrischen Baugruppen ist eine Wärmebildkamera eine große Hilfe, so kann man beispielsweise defekte Bauteile oder Kontakte auf Platinen

mit einer Wärmebildkamera deutlich schneller identifizieren.

### 2.2.3 Betriebsstoffanalyse

Im Gegensatz zur Wärmeentwicklungsanalyse ist die Zeit zwischen zwei Messungen bei der Betriebsstoffanalyse deutlich höher. Bei dieser Analyseform, wird eine Probe des Betriebsstoffs, zum Beispiel Schmiermittel oder Kühlmittel, in einem Labor analysiert. Für die meisten Anlagen ist es allerdings nicht rentabel ein eigenes Labor für die Analyse einzurichten, was dazu führt, dass die Analysen von externen Dienstleistern durchgeführt werden. Je nach Detaillierungsgrad der Analyse unterscheidet sich deren Preis. Eine einfache Analyse der Viskosität des Schmiermittels ist zwar am günstigsten, bringt allerdings auch der Instandhaltung nur dahingehend einen Mehrwert, als dass man mit diesem Messwert den Wechselzeitpunkt des Schmiermittels besser abstimmen kann. Will man allerdings ein genaueres Bild der Maschine erhalten, so müssen auch die Bestandteile, welche im Betriebsstoff enthalten sind, analysiert werden, was wiederum zu höheren Analysekosten führt. Auf das Ergebnis der Analyse ist allerdings auch nur dann verlass, wenn die Probe, welche für die Analyse verwendet wurde, auch repräsentativ war. Was sich banal anhört, ist in Realität durchaus komplex. So sollte eine Probe beispielsweise nur aus einer laufenden Maschine vor sämtlichen Filtern entnommen werden. Auch der Ausgleichsbehälter ist kein optimaler Messpunkt, da sich sämtliche Schwebstoffe mit der Zeit am Boden des Behälters absetzen und somit das Betriebsmedium im Behälter nicht mehr repräsentativ ist. Man erkennt somit, dass die Betriebsstoffanalyse doch einige Hürden mit sich bringt. Nähere Informationen zur Betriebsstoffanalyse finden sich bei Mobley in Kapitel 9 [13] oder bei Moleda et al. in Kapitel 2.3.3 [14].

### 2.2.4 Inspektion durch Fachkraft

Seit es große Industrieanlagen gibt, führen Fachkräfte in Anlagen Inspektionen durch, um eventuelle Fehler frühzeitig erkennen und beheben zu können. Obwohl diese Methode schon lange verwendet wird, wird sie immer noch von Mobley [13] und Moleda et al. [14] als wichtig und unersetzbar angesehen. Beide Autorenteamer erwähnen diese Art der vorausschauenden Wartung in Ihren Werken und empfehlen diese auch weiterhin zu verwenden, um Fehler, die nicht von Sensoren erfasst werden, zu detektieren. Mobley führt zudem einige Punkte für eine erfolgreiche Inspektion auf. Zu diesen Punkten zählen neben der Notwendigkeit von Schulungen des Wartungspersonals auch die klare Definition eines vergleichbaren Prüf- und Bewertungsverfahrens bei der Inspektion. So soll beispielsweise in der Inspektionsanweisung nicht einfach geschrieben werden: "Testen der Gurtspannung". Besser sollte die Anweisung lauten: "Prüfe mithilfe von Messgerät xy, welches an Position z be-

festigt wird, die Spannung des Gurtes. Liegt dieser Wert unterhalb von Grenze 1, so muss der Gurt durch Ändern der Einstellung 1 so gespannt werden, dass der Messwert wieder im Bereich a liegt.“ Dieses Beispiel einer Arbeitsanweisung ermöglicht einen Vergleich mehrerer Inspektionsberichte von verschiedenen Wartungsmitarbeitern. Ohne diese genaue Definition könnte es sein, dass ein Mitarbeiter nur grob die Spannung des Gurtes ermittelt und somit den Fehler übersieht oder eine Prognose durch zu ungenaue Daten nicht möglich ist. Mobley führt allerdings auch aus, dass man für eine gute Bewertung der Anlage neben Inspektionen auch Sensoren benötigt, da einige Messwerte nicht von einem Menschen in gleichen Detailgrad erhoben werden können, wie es Sensoren mit Auswertelektronik können. Ein Beispiel hierfür ist die Änderung des Verhaltens einer defekten Rolle im Frequenzspektrum. Lange bevor ein Schaden ersichtlich oder für Menschen hörbar ist, kann bereits im Frequenzspektrum eine Veränderung festgestellt werden.

### **2.2.5 Ultraschallanalyse**

Die Ultraschallanalyse ist ähnlich wie die Vibrationsanalyse auch dazu gedacht, Schwingungen zu detektieren und zu analysieren. Allerdings sind die untersuchten Frequenzen bei dieser Analyseart deutlich höher als bei der Vibrationsanalyse. Die Ultraschallanalyse kann verwendet werden, um die Intensität von Umgebungsgereäuschen zu ermitteln, eine Leckage zu finden oder die Eigenschaften eines Materials zu untersuchen.

Eine Leckage kann hierbei identifiziert werden, da Flüssigkeiten und Gase, wenn Sie durch eine Öffnung gedrückt werden, ein hochfrequentes Signal erzeugen, welches von Ultraschallsensoren detektiert werden kann.[14]

### **2.2.6 Strom- und Leistungsanalyse**

Bei der Stromanalyse wird der von dem Motor aufgenommene Strom gemessen und bei manchen Messungen zusätzlich der Wirkanteil des Stroms bestimmt. Die aufgenommene Leistung des Anlagenteils ergibt sich aus dem gemessenen Strom und der gemessenen oder als konstant angenommene Spannung. Die Spannung kann in den meisten Anlagen als Konstant angenommen werden, da die Versorgung über ein Verteilernetz erfolgt. Bricht die Spannung oder die Netzfrequenz in einem solchen Netz zusammen, sind die Messungen an einzelnen Teilen der Anlage nicht aussagekräftig, da das komplette System nicht ausreichend mit Energie versorgt werden kann und somit ein Fehlverhalten der Anlage sehr wahrscheinlich ist. Neben der Strommessung, um eine unterschiedliche Leerlaufgrundlast des Motors zu erkennen, gibt es zudem Ansätze, über eine hochfrequente Strommessung Rückschlüsse auf verschiedenste Anlagenfehler zu ziehen. Hierfür werden allerdings meist gesonderte

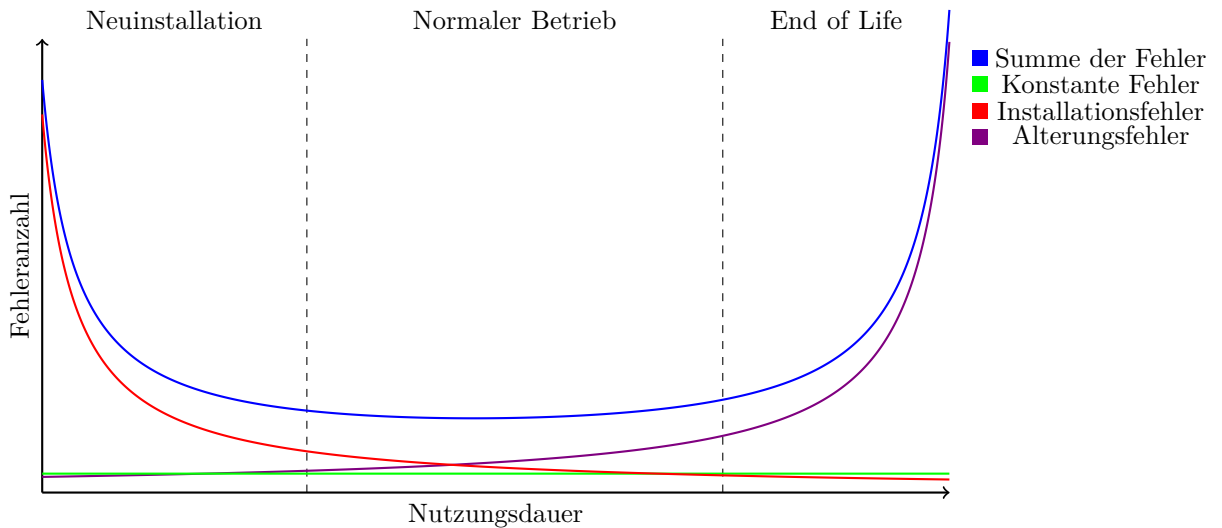


Abbildung 3: Verteilung der Fehler im Verlauf einer Maschinenlebenszeit

Sensoren benötigt, da die eingebaute Sensorik für eine hochfrequente Messung eine zu geringe Bandbreite aufweist.

### 2.3 Wieso ist Instandhaltung nötig

“Menschen machen Fehler.“ Diese Aussage ist allgemein gültig. Auch beim Anlagenbau können Fehler auftreten. Doch nicht nur menschliche Fehler beim Aufbau der Anlage führen zu Ausfallzeiten. In [Abbildung 3](#) ist die Häufung der verschiedenen Fehlerarten zu erkennen. Eine ähnliche Abbildung findet sich bei Mobley [13]. In diesen Abbildungen zeigt sich, dass Fehler meist zu Beginn der Nutzung einer neuen Maschine auftreten (Installationsfehler) oder erst nach einer gewissen Nutzungsdauer (Alterungsfehler). Die Fehler zu Beginn der Nutzung lassen sich auf Mängel bei der Installation oder der Implementierung der neuen Anlage zurückführen. Im Bereich des normalen Betriebs treten nur sehr wenige Fehler auf. Diese Fehler sind auf Umwelteinflüsse und nicht vorhersehbare Einflüsse von außen zurückzuführen. So ist es beispielsweise möglich, dass eine Laufrolle durch einen Produktionsfehler bereits früher ausfällt als gedacht. Solche Fehler können immer auftreten und sind nicht direkt durch Alterung oder Fehler bei der Installation der Anlage zu erklären. Solche Mängel sind in der [Abbildung 3](#) als “Konstante Fehler“ aufgeführt und bilden den Großteil der Fehler im normalen Betrieb der Anlage. Kommt die Anlage an ihr Lebensende, so häufen sich die Fehler wieder. In diesem Fall treten die Mängel allerdings aufgrund der Alterung einzelner Komponenten auf. Diese Fehler sind in [Abbildung 3](#) als “Alterungsfehler“ aufgeführt. Anhand von [Abbildung 3](#) ist zudem ersichtlich, dass es immer zu Fehlern in einer Anlage kommen kann. Die meisten Fehler treten allerdings direkt zu Beginn des Betriebs einer neuen Anlage auf oder kommen dann gegen Lebensende der Anlage, wenn Bauteile aufgrund ihres Alters

Fehler erzeugen. Um nun dafür zu sorgen, dass Fehler möglichst nicht zum Stillstand der Anlage führen, benötigt man Wartungsteams, welche den Zustand der Anlage immer überwachen und bereits wenn kleine Fehler auftreten, aktiv werden, um einen Anlagenausfall zu verhindern.

### 3 Gepäckförderanlage am Flughafen München

Die Gepäckförderanlage im Terminal 1 am Flughafen München, auch [GFA](#) genannt, stellt die zentrale Verarbeitungsinstanz für Gepäckstücke im Terminal 1 dar. Im folgenden wird der mechanisch/elektrische und der Aufbau der IT-Infrastruktur dieser Anlage beschrieben.

#### 3.1 Genereller Aufbau der Gepäckförderanlage

Die Gepäckstücke werden entweder vom Passagier am Check-In an die Anlage übergeben oder vom Vorfeld kommend an die [GFA](#) überreicht, um in das nächste Flugzeug eines weiterreisenden Passagiers verladen zu werden. Endet die Reise eines Passagiers am Flughafen München, wird das Gepäck auf einem getrennten Förderband zu den Ausgaberundläufen transportiert. Während dem Sortierprozess wird das Gepäckstück auf seinen Sicherheitsstatus geprüft, falls nötig gelagert und dann in die richtige [Box](#) sortiert, um dann in einen Flugzeugcontainer oder in einen Anhänger geladen und zum Flugzeug auf das Rollfeld transportiert zu werden.

Im Terminal 1 ist die Anlage in sechs Teilbereiche aufgeteilt, sogenannte [Module](#). In vier der [Module](#) ist ein Schalensorter der Firma Beumer verbaut. Solche Anlagen finden sich auch in großen Logistikzentren. Förderbänder transportieren die Gepäckstücke in der Anlage. Über den Sorter werden die Gepäckstücke sortiert. Um ein Gepäckstück in der Anlage eindeutig identifizieren und nachverfolgen zu können, werden die Gepäcklabels, welche am Check-In angebracht werden, mittels Barcodescannern oder seit neustem auch mittels KI-gestützter OCR-Texterkennung erfasst. Jedes der [Module](#) ist über Förderbänder mit allen anderen [Modulen](#) verbunden, um einen Austausch von Gepäckstücken zwischen den einzelnen [Modulen](#) und ins Terminal 2 zu ermöglichen. Die Verbindungen zwischen Terminal 1 und Terminal 2 befinden sich in den [Modulen](#) B und C.

Die Gepäckförderanlage im Terminal 1 besteht aus über 3000 Förderern, mit vielen verschiedenen Fördererlängen und einer Vielzahl an unterschiedlichen Motortypen. Eine Übersicht über ein exemplarisches [Modul](#) findet sich in [Abbildung 4](#). Die Farben der Abbildung repräsentieren hierbei die Notaus-Schaltbereiche in der Anlage. Wie zu sehen ist, sind die Ankunftskeisels, benannt mit "Ankunft Nord", nicht mit der eigentlichen Anlage verbunden. Der Sorter ist dargestellt durch die aneinandergereihten braunen Ovale in der Mitte der Abbildung. Die einzelnen Abwürfe vom



Sorter sind jeweils mit einer ein- oder zweistelligen Nummer markiert. Vierstellige Nummern auf den einzelnen Rechtecken repräsentieren die Förderer- beziehungsweise Antriebsnummer. Die Rechtecke stellen die einzelnen Förderer dar. Sämtliche Sicherheitseinrichtungen sind in der Abbildung entfernt worden. Man erkennt an dieser Abbildung auch sehr deutlich, nicht jeder Anlagenteil ist einfach zu erreichen. So gestaltet sich der Wechsel eines Antriebs im Bereich rechts des Sorters äußerst aufwendig, da die einzelnen Förderer dort sehr nahe beieinander liegen. Auch der Zugang, um dort vollständige Inspektionen durchführen zu können, ist nur eingeschränkt möglich.

Für die Inspektionen ist an jedem Förderer beziehungsweise an jedem Antrieb ein Steuerungskasten angebracht, sodass ein Instandhaltungsmitarbeiter den Antrieb mittels eines Schlüsselschalters anschalten kann. Normalerweise wird ein Antrieb nur eingeschaltet, wenn ein Gepäckstück über diese Strecke laufen soll oder wenn eine der Lichtschranken des Antriebs getriggert wird. Nachdem das letzte Gepäckstück den Förderer verlassen hat, läuft dieser noch eine individuelle Zeit nach, bevor er abgeschaltet wird.

### 3.2 Aufbau der IT-Infrastruktur der GFA

Der Aufbau der IT-Infrastruktur orientiert sich ebenfalls bei den meisten Komponenten an dem [Modulkonzept](#) des mechanischen Aufbaus. In jedem [Modul](#) ist ein eigenes kleines Rechenzentrum vorhanden, welches entweder als Redundanz-System dient oder direkt für den Betrieb der Anlage verantwortlich ist.

Es gibt allerdings auch einige IT-Systeme, die nur einmal in der gesamten Anlage vorhanden sind. So gibt es beispielsweise nur eine hoch verfügbare virtuelle Maschine, auf der die zentrale Instandhaltungssoftware, [Main-Tool](#), ausgeführt wird. Auch von dem zentralen Datenbanksystem, [Elastic](#), gibt es nur eine Instanz im gesamten Netzwerk.

[Elastic](#) generell ist allerdings so konzipiert, dass es nicht einen zentralen Server gibt, auf dem die Verarbeitung von Datenabfragen aus der Non-SQL Datenbank abgearbeitet wird, sondern das System ist in mehrere sogenannte Nodes unterteilt. Jede dieser Nodes läuft in einer eigenen virtuellen Maschine ([VM](#)) und hat somit eigene Systemressourcen zur Verfügung. Das sorgt dafür, dass die Rechenlast je [VM](#) relativ gering gehalten wird und die Abfragezeit trotz der großen Datenmengen, welche in der Datenbank gespeichert sind, relativ schnell vonstattengeht. So dauert eine Abfrage von 300.000 Werten aus einem [Index](#) bei [Elastic](#) meist unter zwei Minuten. Ein [Index](#) ist hierbei eine Unterteilung der Datenbank. Daten von unterschiedlichen Datenpunkten werden in verschiedenen Indices gespeichert. Jeder [Index](#) hat allerdings eigene Verarbeitungsregeln, wie er seine Daten aus der Anlage beziehen soll und wie er diese Daten aufbereiten und abspeichern soll.



### 3.3 Datenquellen in der Anlage

Aktuell sind in den Sortierrundläufen bereits Vibrations-, Strom-, Leistungs-, Frequenz- und Spannungsmesssensoren verbaut. Nachdem die Sortierrundläufe 2021 beziehungsweise 2022 in Betrieb genommen wurden, wurden die Sensoren allerdings nicht an die [Elasticdatenbank](#) angebunden. Dies geschah erst am 26. Mai 2023. Seit diesem Zeitpunkt werden die Daten aller Sensoren in der [Elasticdatenbank](#) gespeichert. Eine Übersicht, wie die Sensoren in den jeweiligen [Modulen](#) angeordnet sind, findet sich in [Abbildung 9](#).

Zusätzlich zu den fest verbauten Sensoren in den Sortierrundläufen wurden im Rahmen dieser Arbeit auch mobile Sensoren beschafft. Hier wurde das, "Lösung mit [IO-Link-Master](#)" genannte, System, welches in [Abschnitt 4.3](#) vorgestellt wurde, verwendet. Befestigt wurden die IO-Link-Sensoren im ersten Testaufbau mittels Nutensteinen in einem Aluminiumprofil am Förderer. Diese Befestigung lässt sich leicht installieren und es sind keine weiteren Arbeiten an dem Antrieb oder dem Förderer durchzuführen. Weitere Arbeiten wären beispielsweise nötig, wenn der Sensor mittels einer aufgeschweißten Schraube mit dem Motor verbunden werden soll. Diese Lösung hätte zwar den Vorteil, dass der Sensor näher am Motor und am Lager sitzt, allerdings müssten dann an alle zu testenden Komponenten Schrauben geschweißt werden.

Zusätzlich zu den verwendeten Sensoren werden in der Anlage auch die Schaltzyklen und die Betriebsstunden der Antriebe erfasst. Die Erfassung erfolgt hierbei über die SPS. Diese schickt eine Nachricht, an einen Server, wenn der Motorausgang angeschaltet wird und eine weitere Nachricht, wenn der Motorausgang ausgeschaltet wird. Beide Nachrichten erhalten die gleiche ID und sind damit als zusammengehörig erkennbar. In den Nachrichten ist jeweils der Zeitstempel der SPS hinterlegt. Aus den Zeitstempeln der beiden Nachrichten lässt sich somit ein Zeitdelta ermitteln, was der Laufzeit des Motors entspricht. Dieser Wert wird dann an die [Elasticdatenbank](#) übertragen und zusätzlich noch mit den vorherigen Werten des jeweiligen Antriebs aufsummiert, um eine gesamte Motorlaufzeit zu erhalten. Für die Erfassung der Anzahl der Schaltspiele wird eine Zählvariable bei jeder Einschaltnachricht einfach um eins erhöht.

### 3.4 Aktueller Wartungsprozess

Zurzeit werden die Förderer regelmäßig inspiziert, um festzustellen, ob der Förderer noch in Ordnung ist oder ob er einen Defekt aufweist. Fällt bei einer Inspektion ein Schaden an einem Förderer auf, so wird dieser Defekt, innerhalb einer angemessenen Zeit bearbeitet. Dies geschieht entweder durch die Reparatur einer defekten Komponente des Förderers oder durch eine Generalinstandsetzung. Bei einer Generalüber-

holung werden alle Komponenten des Förderers, bis auf das Gehäuse, getauscht. Bei einer Reparatur wird nur das defekte Teil am Förderer getauscht. Alle anderen Teile werden nicht gewechselt.

Um einen Defekt möglichst schnell bearbeiten zu können, werden alle Bauteile, die einem Verschleißprozess unterliegen oder die, bei einem Ausfall, zu einem Stillstand der Anlage führen könnten, in einem Lager vorgehalten. Diese gelagerten Bauteile dienen dazu, keine Lieferzeiten in der Bearbeitungszeit eines Fehlers mit berücksichtigen zu müssen.

Insgesamt wird aktuell also ein Preventive Maintenance Konzept mit Run-To-Failure Techniken eingesetzt. Der Förderer wird in regelmäßigen Intervallen geprüft, wie für **PM** üblich, und kommt es zu einem Fehler außerhalb des Prüfungsintervalls, so wird dieser, je nach Schwere des Fehlers, mit Run-To-Failure Techniken abgearbeitet.

## 4 Sensoren für Predictive Maintenance

Um eine Aussage über den Zustand und damit eine Voraussage zur Entwicklung der Anlage treffen zu können, müssen in den meisten Fällen Sensoren integriert werden. Dazu bieten verschiedene Hersteller unterschiedliche Lösungen an. Im ersten Schritt werden die Anforderungen der **GFA** an die Vibrationssensoren definiert. Im Anschluss werden die Lösungen der verschiedenen Hersteller vorgestellt und hinsichtlich ihrer Vor- und Nachteile analysiert.

### 4.1 Anforderungen der Gepäckförderanlage

Die Anforderungen an die Sensoren sind relativ überschaubar. Für "mobile" Lösungen werden nur einige wenige Sensoren benötigt. Aufgrund der geringen Stückzahl kann der Preis jedes einzelnen Sensors auch höher als bei einer fest installierten Lösung sein. Fest installierte Lösungen müssen an jedem Förderer angebracht werden. Hier ist ein geringer Stückpreis für einen einzelnen Sensor sehr wichtig, da sonst die Gesamtkosten sehr hoch werden. Unabhängig davon, ob die Sensoren mobil oder fest installierte sind, sollten sie so gebaut sein, dass sie nur in einer Weise an die Motoren angeschlossen werden können. Diese Vorgabe stellt sicher, dass die Sensoren an allen Maschinen gleich angebracht werden und die Daten der einzelnen Motoren vergleichbar sind. Weiterhin ist es von Vorteil, wenn fest verbaute Sensoren nicht über Batterie betrieben werden, da diese sonst in regelmäßigen Abständen getauscht werden muss. Dies würde zusätzlichen Aufwand für die Instandhalter bedeuten und in letzter Konsequenz in Phasen, in denen mehrere Probleme gleichzeitig in der Anlage auftreten, vergessen oder hinten angestellt werden. Nach diesen Kriterien kommen die folgenden Lösungen der verschiedenen Hersteller in Betracht.

## 4.2 Mobile batteriebetriebene Komplettlösung

Eine batteriebetriebene, mobile Komplettlösung ist nicht fest an der Anlage verbaut. Jeder Mitarbeiter der Instandhaltung nimmt auf eine Inspektion oder Wartung einen mobilen Sensor mit und bringt diesen an dem zu untersuchenden Anlagenteil an.

Eine Möglichkeit, die Daten des Sensors auszuwerten, besteht darin, den Sensor mittels WLAN oder einer ähnlichen drahtlosen Schnittstelle mit einem Netzwerk zu verbinden und die Sensordaten an eine zentrale Instanz, z.B. eine Datenbank oder einen anderweitigen Server zu übertragen. Diese Rohdaten werden dann auf dem Server verarbeitet und stehen danach jedem Teilnehmer zur Verfügung, der über die Berechtigung verfügt, auf die Inhalte des Servers zuzugreifen. Der Nachteil dieser Lösung liegt in der Notwendigkeit einer drahtlosen Verbindung zum Kernnetzwerk. Diese kann durch bauliche Einschränkungen unter Umständen nicht verfügbar sein, wodurch die Verwendung des Sensors nicht möglich wäre. Vorteil an dieser Lösung ist allerdings, dass jeder mit Zugriff auf den zentralen Server oder die zentrale Datenbank die Daten auswerten kann. Somit ist nicht nur der Mitarbeiter vor Ort in der Lage, den Zustand der Anlage einzusehen, sondern auch der Anlagenbetreiber und externe Dienstleister, die sich ebenfalls um die Anlage kümmern oder die Auswertung der Anlagendaten überwachen.

Eine Alternative zu der Kommunikation des Sensors mit einem Server stellt die Auswertung der Sensordaten auf einem mobilen Endgerät dar. Hierbei verbindet sich der Sensor direkt mittels drahtloser Kommunikationsschnittstelle mit einem Smartphone oder einem anderen mobilen Endgerät, welches die Daten empfängt und diese dann mittels eines Algorithmus analysiert, visualisiert und klassifiziert. Vorteil einer solchen Lösung ist, dass der Instandhalter direkt vor Ort die Auswertung erhält und somit schnell reagieren kann. Zudem kann der Instandhalter auch an Anlagenteilen arbeiten, an denen es nicht möglich ist, eine drahtlose Netzwerkverbindung zum Kernnetz aufzubauen. Nachteil an einer solchen Variante ist, dass die Daten immer nur lokal auf dem mobilen Endgerät gespeichert sind. Ändert sich das mobile Endgerät, weil beispielsweise ein neuer Kollege die Inspektion übernimmt, so kann dieser sich keine Historie des jeweiligen Motors anzeigen lassen, da die Daten auf dem Endgerät des Kollegen gespeichert sind. Zudem ist es bei lokaler Speicherung der Daten auch nicht möglich, dass externe Experten Zugriff auf die Daten erhalten, um den Anlagenzustand zu ermitteln. Dies kann allerdings vor allem in der Anfangsphase eines solchen Systems sehr hilfreich sein, wenn die Analysesoftware, welche in den meisten Fällen auf Machine-Learning basiert, noch nicht alle Fälle richtig zuordnen kann und somit ein Defekt auch fälschlicherweise als in Ordnung eingestuft werden kann.

Zudem müssen entweder die Akkus der Sensorik in gewissen Abständen aufgeladen

oder die Batterien gewechselt werden. Sollte ein Instandhaltungsmitarbeiter vergessen, den Ladezustand der Batterie zu überprüfen, ist es wahrscheinlich, dass er den Sensor nicht bei der Inspektion verwendet, um sich den Weg in das Instandhaltungsbüro zu sparen. Dies kann dazu führen, dass der Zustand der Anlage falsch oder verzerrt dargestellt wird.

Ein Beispiel für eine solche Lösung stellt der “Quick Collect Sensor“ von SKF dar. Dieser Sensor bietet die beiden oben genannten Möglichkeiten an, Daten zu erfassen. Von SKF wird zwar nur die Lösung mit einem mobilen Endgerät beworben, allerdings bietet der Sensor zusätzlich zu den App-Features auch noch eine API an, um die Sensordaten auszulesen und weiterzuverarbeiten. Über diese API soll es laut SKF Support die Möglichkeit geben, Daten mittels MQTT an einen MQTT Broker zu schicken. Ein Test hierzu wurde allerdings nicht durchgeführt.

### 4.3 Lösung mit **IO-Link**-Master

Eine andere Variante der mobilen Sensorik ist ein **IO-Link** fähiger Vibrationssensor in Kombination mit einem **IO-Link**-Master. Dieser Master sendet die Sensordaten mittels MQTT an einen Broker, welcher die Daten dann in die zentrale Datenbank oder auf einen zentralen Server lädt. Versorgt wird der Sensor über den **IO-Link**-Master. Dieser wiederum wird über ein Standard 24V Netzteil versorgt. Der Nachteil dieses Systems besteht darin, dass an jeder Position, an der der Sensor verwendet werden soll, eine Netzwerkschnittstelle und ein 230V-Stromanschluss beziehungsweise ein 24V-Stromanschluss mit entsprechendem Adapter verfügbar sein muss. Ist dies nicht der Fall, so kann der Sensor nicht eingesetzt werden, außer man nutzt eine Batterie für den **IO-Link**-Master. Allerdings wird solch eine Batterie nicht von SKF angeboten und müsste somit selbst adaptiert werden, um an dem **IO-Link**-Master angeschlossen werden zu können. Ein Vorteil dieser Lösung ist, wie bei der batteriebetriebenen Lösung, mit direktem Versand der Daten an einen Server, dass die Daten zentral gespeichert werden und somit ein bereichsübergreifender Zugriff möglich ist. Diese Lösung muss zudem nicht aufgeladen werden und kann betrieben werden, solange die externe Versorgung funktioniert.

Dieses Konzept wurde von dem Hersteller IFM aufgegriffen. IFM bietet für ihre **IO-Link** fähigen Sensoren einen **IO-Link**-Master (AL1350) an, der über ein 24V Netzteil (E80121) versorgt werden kann. Mittels eines M12 zu Ethernet Kabels (z.B. EVC927) kann der Master mit einem Netzwerk verbunden werden. Der Vibrationssensor (VVB001) wird mithilfe eines M12 auf M12 Verbindungskabels (z.B. EVC102) mit dem Master verbunden. Zusätzlich zu dem Vibrationssensor wird auch noch ein Temperaturfühler (TA2105) über den **IO-Link**-Master verwaltet. Alle diese Produkte werden von dem Hersteller IFM vertrieben.



(a) SKF Quick Collect [19] (b) IFM IO Link Package [22] (c) IQUNET Wireless [10]

Abbildung 5: Übersicht über die verschiedenen Lösungen

#### 4.4 Vibrationssensoren über WLAN mit M8-Versorgungsstecker

Ein System, welches sich leicht in die Anlage integrieren lässt, stellt ein Vibrationssensor dar, welcher über WLAN an ein Netzwerk angebunden wird. Der Sensor wird über einen M8-Rundsteckverbinder, wie er bereits bei Lichtschranken in den meisten Anlagen Verwendung findet, versorgt. Die Versorgung des Sensors kann also ganz einfach mittels eines Y-Adapterkabels, welches vor die Lichtschranke geschaltet wird, erfolgen. Diese Art der Versorgung, zusammen mit der WLAN-Netzwerkschnittstelle, ermöglichen es, dass die Sensoren schnell und ohne hohe Einrichtungskosten installiert werden können. Der Grund hierfür liegt einerseits darin, dass keine extra Leitungen in der Anlage gezogen werden müssen, weil jeder Förderer bereits über eine oder mehrere Lichtschranken und damit über die benötigte Stromversorgung verfügt. Der Vorteil dieser Lösung besteht in der vergleichsweise schnellen und kostengünstigen Installation der Hardware und in der zentralen Speicherung der Daten in einer Datenbank, in die die Sensoren die Daten laden. Zudem belastet diese Lösung nicht zwangsläufig die vorhandene Netzinfrastruktur, wenn man alle Sensoren in ein eigenes Subnetz einfügt. Der Nachteil dieser Lösung ist der relativ hohe Gesamtpreis, da für jeden Förderer ein Sensor benötigt wird. Zudem müsste vor einer Installation dieser Lösung die WLAN-Abdeckung in allen Anlagenteilen gegeben sein und auch auf lange Sicht garantiert werden können.

Der Hersteller IQUNET verwendet dieses Konzept für seine "IQUNET Wireless 24V Powered Vibration Sensor[s]". Diese Sensoren können mittels integrierter WLAN-Schnittstelle Daten an einen zentralen "IQUNET Data Server", welcher lokal im Netzwerk vorhanden ist, senden.

#### 4.5 Sensoren in den Sortierrundläufen

Aktuell sind bereits einige, wenige Anlagenteile mit Vibrations-, Strom-, Spannungs- und weiteren Sensoren ausgestattet. Die Sortierrundläufe in jedem [Modul](#) wurden

● Vibrationssensor

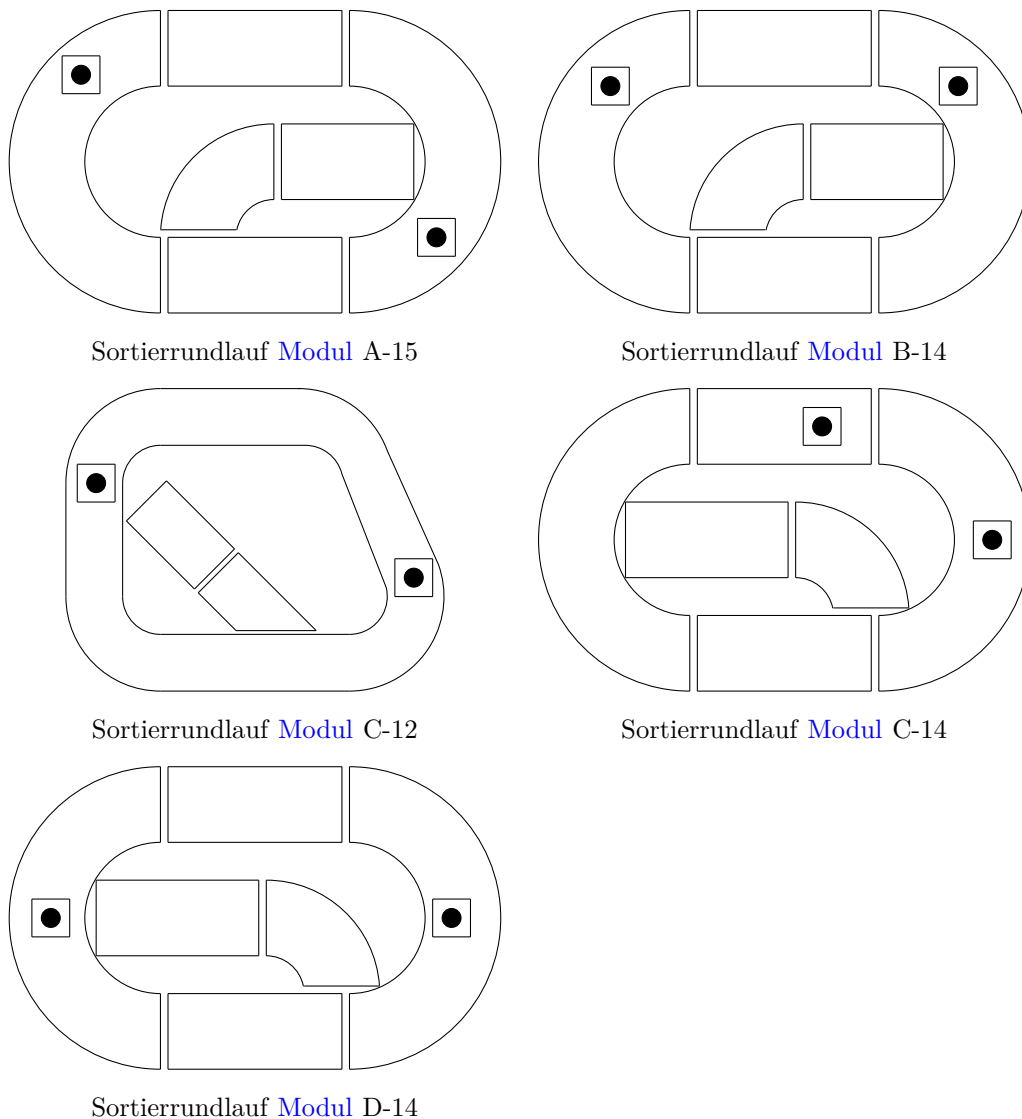


Abbildung 6: Übersicht Positionierung Schwingungssensoren Sortierrundläufe

bei ihrer Neuinstallation in den Jahren 2021 bis 2022 bereits mit den genannten Sensoren ausgestattet. Die Daten dieser Sensoren werden seit 26.05.2023 in die zentrale [Elasticdatenbank](#) übertragen. Davor wurden die Daten nicht abgegriffen. Als Schwingungssensoren kommen zwei “VNB211“ des Herstellers IFM zum Einsatz. Diese sind direkt auf jeweils einen Analogeingang eines Feldbuskopplers geschaltet, welcher via Profibus an die SPS angeschlossen ist. Die SPS verarbeitet die Daten und schickt diese dann über ProfiNet an die [Elasticdatenbank](#). Zur Strommessung wird ein extra Modul am Feldbuskoppler verwendet. Die Position der Schwingungssensoren kann aus [Abbildung 6](#) entnommen werden.

## 4.6 Sensoren mit einer extra Auswerteelektronik

Alle bisher vorgestellten Sensoren und deren Zubehör dienen lediglich zur Aufnahme und Vorverarbeitung der Daten. Für eine komplette Verarbeitung sind die, in den vorherigen Kapiteln vorgestellten, Lösungen nicht vorgesehen. Anders ist es bei dieser Lösung. Hierbei wird der Sensor direkt mit einer Auswerteelektronik verbunden. Somit erfolgt die Datenverarbeitung dezentral auf den einzelnen Auswerteeinheiten und nicht zentral auf einem Server. Die Verarbeiteten Daten können dennoch zentral auf einem Server gesammelt werden. Der Vorteil dieser Lösung ist, dass durch den kurzen Weg zwischen Datenerfassungspunkt und der Auswerteeinheit, die Netzwerklast vermindert werden kann, auch wenn Daten in sehr kleinen Zeitintervallen erfasst werden. Durch diese Tatsache ist es mit einer extra Auswerteeinheit auch möglich, eine diskrete Fouriertransformation durchzuführen, ohne das Netzwerk an dessen Grenzen zu bringen. Im Fourier Bereich lassen sich einige Fehler klarer einer Problemstelle zuweisen, als im Zeitbereich. Zudem ist es auch bei dieser Lösung möglich, die Daten zentral und somit auch für verschiedene Personengruppen zugänglich zu speichern. Der Nachteil dieser Lösung ist der Preis, da die Auswerteelektronik im Verhältnis zu den anderen Lösungen sehr teuer ist. Zudem benötigt jede Auswerteelektronik einen Strom- und einen Netzwerkanschluss. Ein Beispiel für eine solche Lösung bietet der Hersteller IFM mit seiner VSE9XX Produktfamilie. Diese Auswertegeräte sind nicht auf eine HUT-Schienenmontage angewiesen und somit "mobil" einsetzbar.

## 5 Methodik

Nachdem nun alle Grundlagen zur Predictive Maintenance vorgestellt wurden, wird nun der im Rahmen dieser Bachelorarbeit verwendete Lösungsansatz erläutert.

### 5.1 Generelles Vorgehen

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit werden die Sortierrundläufe und einige  $90^\circ$  Kurven analysiert. Die Sortierrundläufe enthalten, wie in [Abschnitt 3.3](#) und [Abschnitt 4.5](#) erwähnt, bereits Sensoren zur Analyse verschiedener physikalischer Größen. Nach Gesprächen mit dem Instandhalter wurde zudem ermittelt, dass die  $90^\circ$  Kurven besonders anfällig für Lagerschäden und andere Defekte sind. Um Vibrationsdaten von den Kurven zu erhalten, wurde die in [Abschnitt 4.3](#) beschriebene Lösung des Herstellers IFM verwendet. Mit der Lösung von IFM und den bereits installierten Sensoren in den Sortierrundläufen wurden Daten für diese beiden Förderertypen gesammelt. Zur automatisierten Auswertung der Daten wurde ein Decision Tree-Algorithmus verwendet, da zur Auswertung ein Machine-Learning-Algorithmus am besten geeignet ist, wie bei Bampoula et al. [1] oder Dinu et al. [8] zu sehen ist. Genaueres zu diesem Typ von Algorithmus hat Wilmott in seinem Buch beschrieben. [21]

Die Auswertung der Daten wird mithilfe der Programmiersprache Python durchgeführt. Zur Verarbeitung der Daten wird das Python-Modul “[Pandas](#)“ verwendet. Zur Visualisierung dient das Python-Modul “[Matplotlib](#)“. Um die Implementierung des Machine-Learning-Algorithmus einfacher zu gestalten, wurde das Python-Modul “[SK-Learn](#)“ genutzt.

In den folgenden Unterkapiteln wird nun das generelle Vorgehen bei der Analyse und der Vorverarbeitung der Daten beschrieben. Die Auswertung der Daten erfolgt dann in [Kapitel 6](#).

#### 5.1.1 Vorverarbeitung der Daten

Zur Vorverarbeitung der Daten wurden die, aus der Datenbank exportierten, CSV-Dateien in Python eingelesen, doppelte Zeitstempel entfernt, die Daten entsprechend der Zeitstempel geordnet und die Rohdaten mithilfe von [Matplotlib](#) geplottet. Diese Plots sind in den einzelnen Unterkapiteln von [Abschnitt 6.1](#) entsprechend enthalten. Die sortierten Daten wurden dann in eine separate Datei gespeichert, um bei einer erneuten Ausführung des Programms nicht noch einmal die Vorverarbeitung durchlaufen zu müssen. Im Anschluss an den Abspeicherprozess werden zusätzlich zu den Sensordaten noch einige Werte für jeden Zeitpunkt berechnet. Einerseits wird die Gaußverteilung auf Grundlage der Berechnungsvorschrift, die Post in seinem Buch aufführt, ermittelt. [16] Dieser Schritt soll Messungenauigkeiten einzelner Sensoren



ausgleichen. Die Idee zu diesem Verarbeitungsschritt stammt von König im Zusammenhang mit dem Siemens Sorter360-System. [9] Dafür wurde jeweils der aktuelle Wert und Mittelwerte aus zehn Bereichen des Normalbetriebs verwendet. Nachdem die Berechnung der Gaußverteilung initial zu sehr langen Ausführungszeiten geführt hat, wurde die Berechnung optimiert. Um nicht für jeden Zeitpunkt erneut den Mittelwert und die Varianz berechnen zu müssen, wurde einmalig die Varianz und der Mittelwert der zehn Mittelwerte berechnet und für jeden neuen Zeitpunkt wurde dann nur noch der veränderte Wert hinzugefügt. Leichter kann man das Vorgehen an [Formel 1](#) sehen. Hierbei werden die Formeln mit tiefgestelltem “Schritt“ in jeder Iteration erneut ausgeführt. Die Formeln mit tiefgestelltem “Init“ werden jeweils nur einmal am Anfang der gesamten Berechnung ausgeführt. Formeln mit einem tiefgestellten “Allg“ sind die Allgemeinen Formeln, die Post in seinem Buch aufführt. [16] Für die Berechnung von  $\sigma_{Init}^2$  wird genähert, dass  $x_{Mittel-Init} \approx x_{Mittel-Schritt}$  gilt.

$$\begin{aligned}
x_{Mittel-Allg} &= \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \\
\sigma_{Allg}^2 &= \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - x_{Mittel})^2 \\
f_{Norm-Allg}(x_{akt}) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \cdot e^{-\frac{(x_{akt}-x_{Mittel})^2}{2\sigma^2}} \\
x_{Mittel-Init} &= \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^{n-1} x_i \\
\sigma_{Init}^2 &= \frac{1}{n-2} \cdot \sum_{i=1}^{n-1} (x_i - x_{Mittel-Init})^2 \\
x_{Mittel-Schritt} &= \frac{x_{Mittel-Init} * (n-1) + x_{Schritt}}{n} \\
\sigma_{Schritt}^2 &= \frac{\sigma_{Init}^2 * (n-2) + (x_{Schritt} - x_{Mittel-Schritt})^2}{n-1} \\
f_{Norm-Schritt}(x_{akt}) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{Schritt}^2}} \cdot e^{-\frac{(x_{akt}-x_{Mittel-Schritt})^2}{2\sigma_{Schritt}^2}}
\end{aligned} \tag{1}$$

$n$  = Gesamtanzahl der Werte, hier 11  
 $x_{Mittel}$  = arithmetischer Mittelwert von  $x$   
 $\sigma^2$  = Varianz von  $x$   
 $f_{Norm}$  = Funktion zur Berechnung der Normalverteilung für den Wert  $x_{akt}$   
Allg = Allgemeine Formeln von Post [16]  
Init = Berechnungen werden nur einmal zu Beginn ausgeführt  
Schritt = Berechnungen werden für jeden neuen Zeitschritt durchgeführt

Zusätzlich zur Gaußverteilung wurde auch noch eine Größe  $W_{Abw}$  eingeführt, mit der die Welligkeit des Signals mit in die Betrachtung des Machine-Learning-Algorithmus einbezogen werden kann. Diese Größe berechnet sich wie in [Formel 2](#) gezeigt.

$$W_{Abw} = |x_0 - x_1| + |x_0 - x_2| + |x_0 - x_3| + |x_0 - x_4| + |x_0 - x_5| \quad (2)$$

$x_0$  = Aktueller Wert zum Zeitpunkt  $t$   
 $x_n \forall n \in [1; 5]$  = Wert zum Zeitpunkt  $t-n$

Nach dieser Vorverarbeitung wurden die Daten aufgeteilt.  $\frac{1}{4}$  der Daten wurden als Validierungsdaten verwendet, die restlichen 75% der Daten wurden als Trainingsdaten für den Machine-Learning-Algorithmus verwendet.

### 5.1.2 Kategorisierung der Daten für den Machine-Learning-Algorithmus

Zur Klassifizierung der Daten sollte, wie bereits erwähnt, ein Decision Tree-Algorithmus verwendet werden. Diese Art von Machine-Learning wird überwacht angelernt. Dies hat zur Folge, dass der Algorithmus zum Lernen kategorisierte Daten benötigt, um dann später eine richtige Entscheidung treffen zu können. Der Vorteil eines Decision Tree-Algorithmus gegenüber anderen Machine-Learning-Verfahren ist, dass die Ausführungszeit zur Kategorisierung sehr kurz ist. Der Entscheidungsbaum kann so schnell ein Ergebnis liefern, da es sich nur um Bedingungen handelt, welche der Prozessor sehr schnell prüfen kann. Für die beiden zu untersuchenden Fördererarten wurden aufgrund der verschiedenen Ausgangsdaten unterschiedliche Kategorien eingeführt, welche im folgenden erläutert werden.

Die Daten der Sortierrundläufe wurden zum Anlernen des Machine-Learning-Algorithmus in drei Kategorien eingeteilt. Eine Übersicht über die einzelnen Kategorien befindet sich in [Tabelle 3](#).

Im Gegensatz dazu wurden die Daten der Kurven in fünf Kategorien eingeteilt. Eine Übersicht über diese Kategorien ist in [Tabelle 4](#) aufgeführt. Die Kategorien 3 und 4 könnten auch zusammengelegt werden. Ein Beispiel für Daten der Kategorie

Tabelle 3: Kategorien Sortierrundläufe

Kategorie Nummer	Kategorie Name	Erklärung
0	keine Daten vorhanden	Datenpunkte, bei denen der betrachtete Teil keine Daten geliefert hat, weil er in Abschaltung war
1	normaler Betrieb	Datenpunkte, bei denen der Förderer ohne Schaden läuft
2	defekter Betrieb	Datenpunkte, bei denen der Förderer einen Schaden aufweist

Tabelle 4: Kategorien Kurven

Kategorie Nummer	Kategorie Name	Erklärung
0	Fehlerzustand	Datenpunkte, bei denen eine Wartung oder andere Arbeiten durchgeführt werden, die die Messung verfälschen
1	normaler Betrieb	Datenpunkte, bei denen kein Schaden am Förderer vorliegt und dieser in Betrieb ist
2	defekter Betrieb	Datenpunkte, bei denen ein Schaden am Förderer vorliegt und dieser in Betrieb ist
3	teil- ausgeschalteter Betrieb	Datenpunkte, bei denen der Förderer selbst steht, allerdings ein anderer Förderer Vibrationen erzeugt
4	ausgeschalteter Betrieb	Datenpunkte, bei denen keine Schwingung vorliegt und somit der betrachtete als auch die umliegenden Förderer stillstehen

0 ist in [Abbildung 10](#) im Bereich um 255000 zu sehen. Hier führt der Instandhalter Wartungsarbeiten an dem Förderer durch.

Vergleicht man nun die Kategorien der Sortierrundläufe mit den Kategorien der Kurven, so fällt auf, dass es bei den Sortierrundläufen keine Kategorien für Daten von Wartungen gibt. Dies ist darin begründet, dass in dem untersuchten Zeitraum keine Wartungen an den Sortierrundläufen durchgeführt wurden, da die Wartungsarbeiten an diesen Anlagen meist Nachts durchgeführt werden und dabei die Sensorwerte nicht an die Datenbank übertragen werden. Außerdem gibt es bei den Daten der Sortierrundläufe keine extra Unterscheidung, ob nur der Rundlauf oder der Rundlauf und die angrenzenden Förderer ausgeschaltet sind. Dies liegt daran, dass die Sensoren in den Rundläufen so positioniert und die Rundläufe so angebunden sind, dass die angrenzenden Förderer keinen Einfluss auf die Messung haben. Somit muss diese Unterscheidung nicht gemacht werden.

## 5.2 Daten der Sortierrundläufe

Seit Ende Mai 2023 wurden die Daten, welche von den Sensoren der Sortierrundläufe erzeugt wurden, in der zentralen Datenbank abgespeichert. In diesem Zeitraum kam es laut dem Instandhalter allerdings zu keinem Schaden an den Rundläufen. Somit zeigen diese Werte nur den normalen Arbeitsbetrieb. Um dennoch Messwerte von defekten Anlagen zu erhalten, wurde am Sortierrundlauf C12 eine Laufrolle angeschliffen, um einen Defekt der Rolle zu simulieren. In [Abbildung 7](#) werden die Messwerte des normalen Betriebs und die Messwerte im Betrieb mit einer defekten Laufrolle gegenübergestellt. Der Einbau der kaputten Rolle erfolgte hier bei Index 581897. Neben den Verläufen mit einer defekten Laufrolle über einen Tag sind in [Abbildung 11](#) und [Abbildung 12](#) jeweils zwei Tage mit guten Werten abgebildet. In [Abbildung 13](#) ist zudem ein gemischter Verlauf über zwei Tage abgebildet. Bei diesem Verlauf stellt der erste und der letzte Teil den normalen Betrieb dar. Der mittlere Teil des Verlaufs stellt den defekten Betrieb dar.

## 5.3 Daten der Kurven und Anbindung der Sensoren

Die Sensoren in den Sortierrundläufen sind bereits integriert. Um auch an den Kurven Vibrationswerte zu erhalten, wurde die Lösung des Herstellers IFM, welche in [Abschnitt 4.3](#) bereits vorgestellt wurde, verwendet. Es wurde sich für diese Lösung entschieden, da diese eine einfache Anbindung an die [Elasticdatenbank](#) ermöglicht und dennoch mobil eingesetzt werden kann. Durch die Möglichkeit, die Sensoren mobil einzusetzen, mussten zudem für den Test nur vier Kits beschafft werden. Die IFM-Sensoren müssen allerdings erst noch mechanisch mit dem Förderer verbunden und dann ausgewertet werden. In den folgenden Unterkapiteln wird die Befestigung der Sensoren und die Verarbeitung der Sensordaten beschrieben.

### 5.3.1 Anbringung der extra Sensoren

In Absprache mit dem Instandhalter wurden die Sensoren für einen ersten Test mit Nutsteinen an einem nicht tragenden Konstruktionsprofil befestigt. Zudem wurde nicht nur ein Sensor verwendet, sondern es wurde jeweils ein Sensor in x- und ein Sensor in y-Richtung verbaut. Die Sensoren wurden mit dem [IO-Link](#)-Master über 6 m Kabel verbunden, sodass die beiden [IO-Link](#)-Master von den Sensoren getrennt auf einer Arbeitsbühne in der Anlage platziert werden konnten. In [Abbildung 8](#) ist die Position der Kurve, sowie deren Umgebung abgebildet. [Abbildung 9](#) zeigt die Befestigung der Sensoren. Der Motor an diesem Förderer sitzt gegenüber der Sensoren, an der Außenseite der Kurve. Die [IO-Link](#)-Master sind dann direkt mit einem Netzkabel an einen Switch angeschlossen, der ihnen eine Verbindung zur

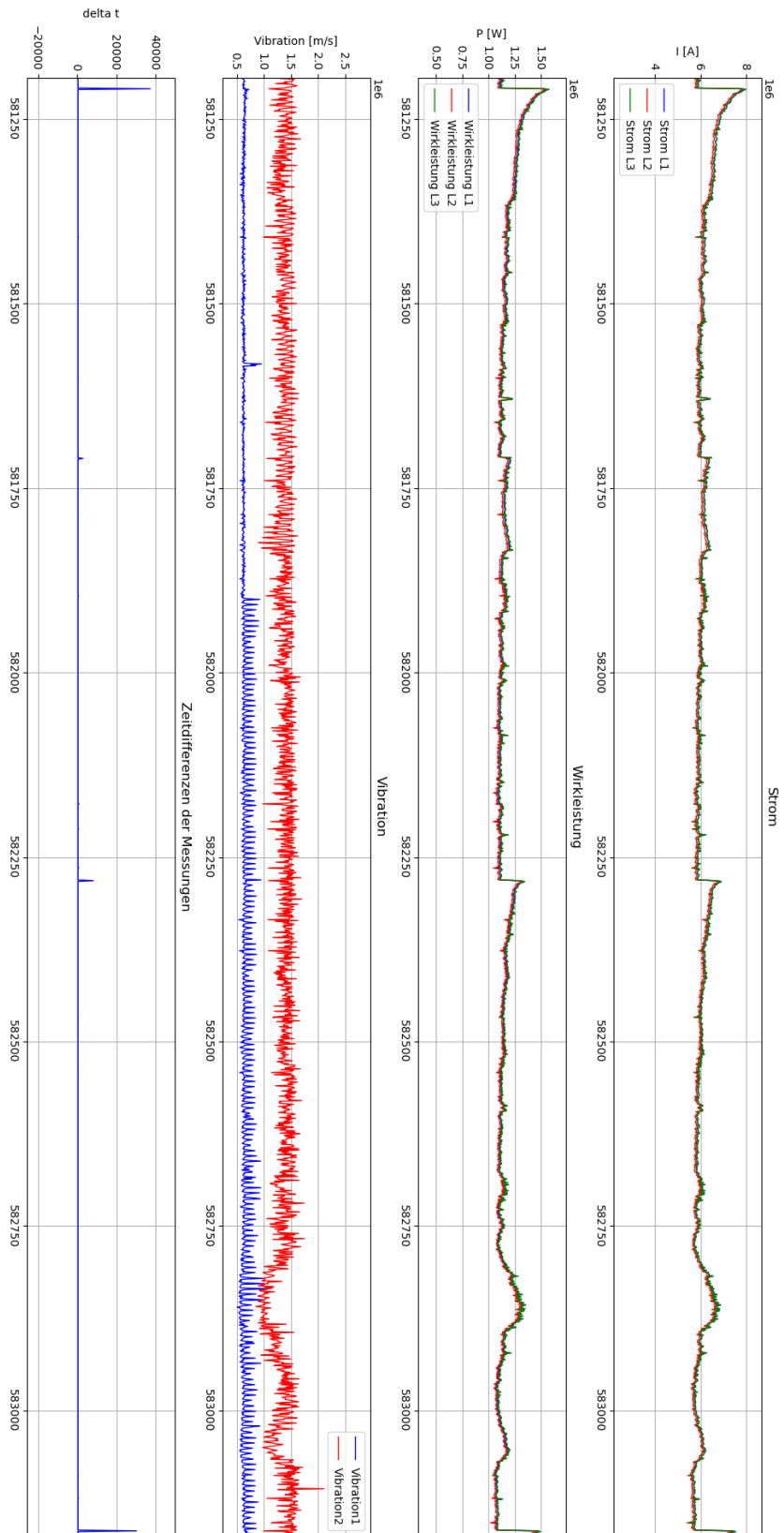


Abbildung 7: Sortierrundlauf C12 - Werte für guten und defekten Betrieb - 1 Tag - Grenze bei 581897

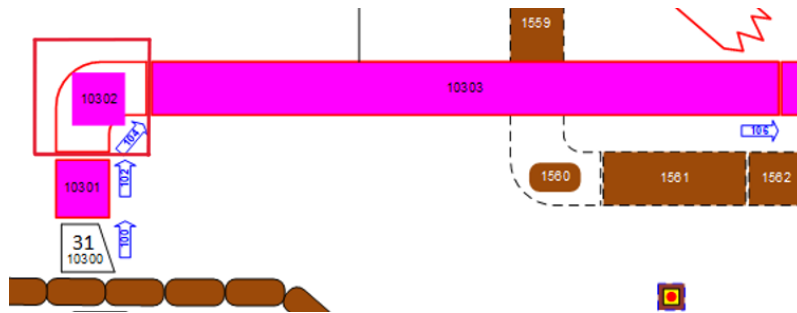


Abbildung 8: Position 90° Kurven

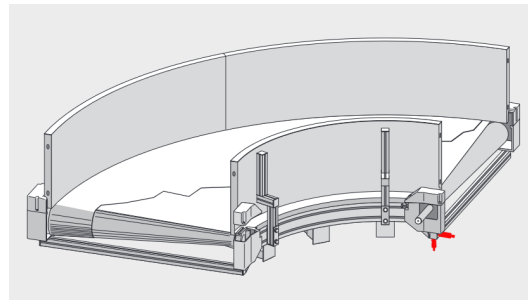


Abbildung 9: Positionierung Vibrationssensoren an 90° Kurven

zentralen Datenbank bereitstellt.

### 5.3.2 Einbindung der Daten in Elasticdatenbank

Um die Daten auch auswerten zu können, werden die Daten der Sensoren mittels http an eine Schnittstelle zur [Elasticdatenbank](#) geschickt. Diese Schnittstelle übernimmt zudem die Auflösung des übertragenen Zeichensatzes in die unterschiedlichen Werte, welche dann in [Elastic](#) angezeigt werden. Um diese Umwandlung durchführen zu können, müssen an einem [IO-Link](#)-Master immer ein Temperatursensor und ein Vibrationssensor VVB001 angeschlossen sein. Sind nicht beide Sensoren angeschlossen oder ist einer der beiden Sensoren defekt und schickt keine Werte mehr, so werden die Daten nicht in [Elastic](#) importiert. Es können auch nicht mehr Sensoren an einen Master angeschlossen werden, da die zusätzlichen Daten auch nicht verarbeitet werden würden.

### 5.3.3 Auswertung der Daten der IFM-Sensoren

Die Sensoren wurden in [Modul A](#) an einer Kurve mit defekten Lagern angebracht. Somit konnten direkt zu Beginn Daten für eine defekte Kurve gesammelt werden. Der Instandhalter ließ die defekte Kurve nach Installation der Sensoren noch drei Tage laufen und führte dann eine komplette Instandhaltung der Kurve durch. Die Sensoren blieben an der Kurve montiert und konnten nach der Instandhaltung direkt Daten für den optimalen Betrieb einer Kurve aufnehmen. In [Abbildung 10](#) kann

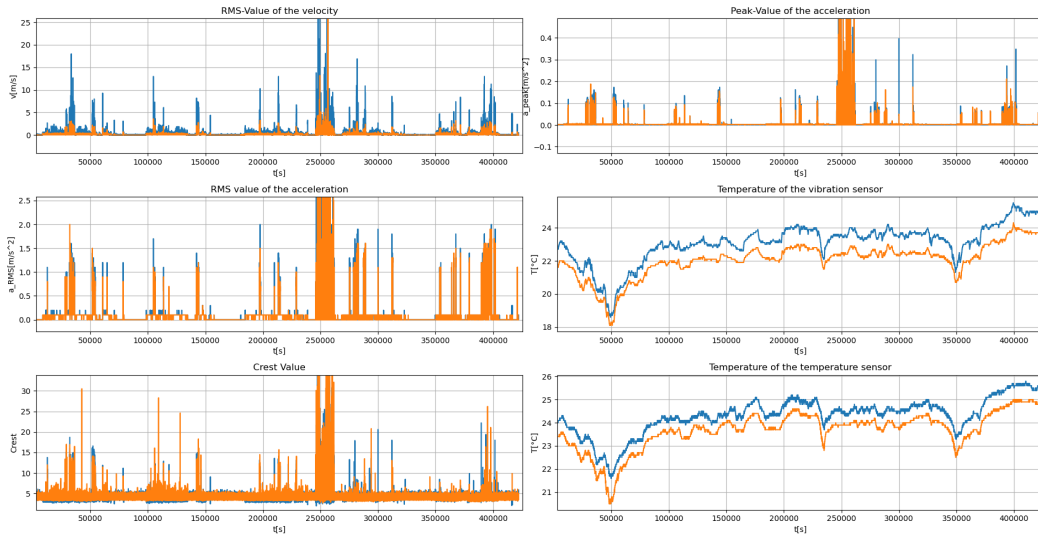


Abbildung 10: Daten Kurve - Zeitraum 5 Tage

man sehr gut den Zeitpunkt erkennen, an dem der Instandhalter an dem Förderer gearbeitet hat. Im Bereich von 245785 bis 261800 wurde an der Kurve gearbeitet, was sich in einem immensen Anstieg aller Vibrationsparameter bemerkbar machte.

#### 5.4 Parameter der Entscheidungsbäume

Zur Kategorisierung der Daten wurde ein Decision Tree-Algorithmus verwendet, welcher einen Entscheidungsbaum aufbaut und ihn hinsichtlich der Anzahl seiner Ebenen optimiert. Durch diese Optimierung wird der Entscheidungsbaum kleiner und kann damit noch schneller ausgeführt werden.

Die Implementierung des Decision Tree-Algorithmus ist bereits in [SK-Learn](#) enthalten und wurde einfach verwendet. Alle Datensätze wurden zu mehreren Tabellen zusammengefügt. Jeweils eine Tabelle mit den Trainings- und Validierungsdaten. Zudem noch jeweils eine Tabelle mit den entsprechenden Ergebnissen.

Zuerst erhielt der Algorithmus nur die Gauß- und Welligkeitswerte als Eingabeparameter. Mit diesen Werten erreichte der Algorithmus allerdings keine zufriedenstellenden Ergebnisse, beim Vergleich mit den Validierungsdaten. Deshalb wurden neben den Gauß- und Welligkeitswerten auch die Sensorwerte als Eingabeparameter an den Entscheidungsbaum übergeben. Somit erhält sowohl der Entscheidungsbaum für die Sortierumläufe, als auch der für die Kurven diese drei Typen.

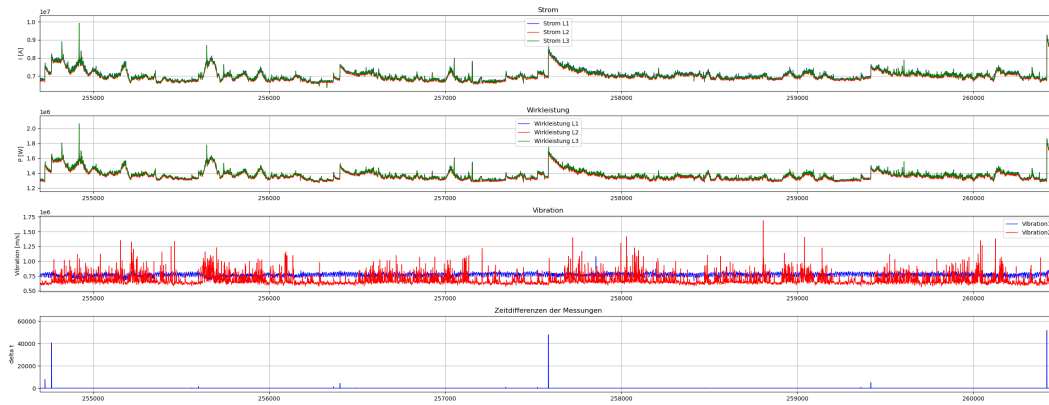


Abbildung 11: Sortierrundlauf A15 - Werte für guten Betrieb - 2 Tage

## 6 Ergebnisse

Nachdem nun die Methoden zur Auswertung der Ergebnisse vorgestellt wurden, werden in den folgenden Unterkapiteln die Daten ausgewertet. Im Anschluss an die Auswertung wird dann noch auf das Training des Machine-Learning-Algorithmus und die Qualität des daraus hervorgehenden Entscheidungsbaums eingegangen.

### 6.1 Auswertung der Sensordaten

Im Folgenden werden die aufgenommenen Daten der Sensoren im Sortierrundlauf und der IFM Sensoren analysiert und bewertet, welche Größen eine Aussage über den Zustand der Anlage zulassen. In den jeweiligen Unterkapiteln finden sich jeweils einige Plots über die Daten.

#### 6.1.1 Analyse der Sensoren in den Sortierrundläufen

[Abbildung 11](#) und [Abbildung 12](#) zeigen den Verlauf der Schwingungsamplituden der Sortierrundläufe A15 und B14 im Normalbetrieb. Die Verläufe zeigen jeweils zwei Tage. Die Verläufe für C14 und D14 wurden nicht abgebildet, da sich diese nicht wesentlich von den beiden gezeigten Verläufen unterscheiden. In [Abbildung 13](#) sind die Daten von Rundlauf C12 über die beiden Tage zu sehen, an denen die defekte Rolle, wie in [Abschnitt 5.2](#) beschrieben, eingebaut war. Am Verlauf von Vibrations-sensor 1 ist gut zu erkennen, wann sich die Rolle in der Anlage befunden hat. In den folgenden Unterkapiteln wird analysiert, wie sich die einzelnen Messgrößen im Normalbetrieb und im defekten Betrieb verhalten.

**Strom- und Leistungswerte** Der aufgenommene Strom einer elektrischen Maschine ist bei konstanter Last proportional zur aufgenommenen Leistung des Antriebs. Dies spiegelt sich auch in den Messwerten wider. Die Verläufe für die Ströme sind in allen Beispielen ([Abbildung 11](#), [Abbildung 12](#), [Abbildung 13](#)) ähnlich zu den





Abbildung 12: Sortierlauf B14 - Werte für guten Betrieb - 2 Tage

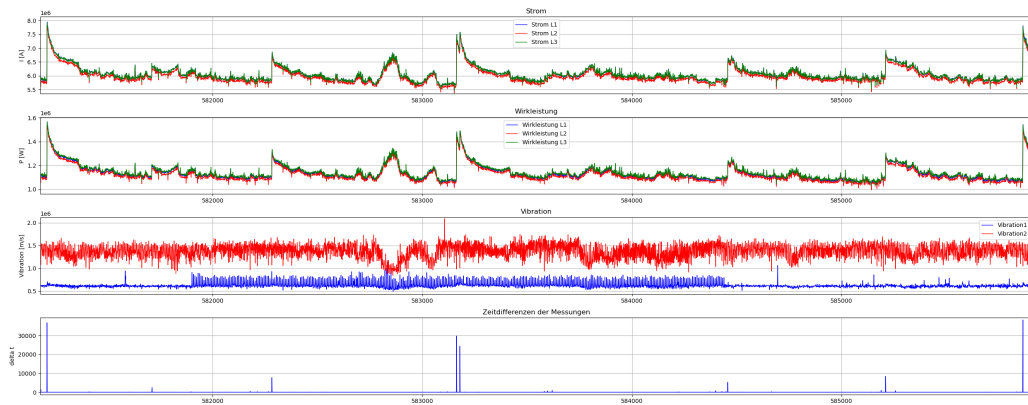


Abbildung 13: Sortierlauf C12 - Werte für guten und defekten Betrieb - 2 Tage

Verläufen der Wirkleistung. Neben der proportionalen Abhängigkeit vom Strom ist die Wirkleistung noch vom  $\cos(\phi)$  und von der Eingangsspannung abhängig. Der  $\cos(\phi)$  ist in dem betrachteten Betriebspunkt konstant, da die Drehzahl und die Last am Motor in erster Näherung als konstant angenommen werden können. Die Motoren werden über eine Leitung mit ausreichend großem Querschnitt direkt von einem Verteilernetz versorgt. Damit kann auch die Eingangsspannung an den Maschinen als konstant angenommen werden. Somit sind die Verläufe von Strom und Wirkleistung im betrachteten Fall identisch.

An den Messwerten von Strom und Wirkleistung ist zudem erkennbar, dass die Motoren beim Einschalten mehr Leistung benötigen als nach einer gewissen Laufzeit. Die Einschaltzeitpunkte zu Tagesbeginn sind hierbei erkennbar, wenn man die Zeitdifferenzen der Messungen betrachtet. Liegt bei der Zeitdifferenz ein Peak vor, wie bei circa 581100 in [Abbildung 13](#), so handelt es sich um einen Übergang des Antriebs vom Ruhezustand in den Fahrbetrieb am Tagesbeginn. Sind die Peaks der Zeitdifferenz größer als 30000, so handelt es sich meist um einen Tageswechsel. Der erste, starke Anstieg, der in den Strom und Wirkleistungswerten erkennbar ist, lässt sich mit dem hohen Anfahrmoment erklären, welches benötigt wird, um den Förderer vom stehenden Zustand, dem Haftreibungszustand, in einen bewegten Zustand, den Gleitreibungszustand, zu überführen. Das langsame Abklingen des Strombedarfs und damit der Wirkleistung lässt sich durch die Erwärmung des Systems erklären. Direkt nach Start des Förderers sind alle Lager und bewegten Komponenten kalt. In diesem Zustand ist die Gleitreibung noch höher, als bei warmen, eingelaufenen Baugruppen. Je länger die Strecke läuft, desto wärmer wird das Gesamtsystem und dementsprechend nehmen auch die Verluste durch Gleitreibung ab.

Beim Vergleich der Strom- und Wirkleistungswerte in [Abbildung 13](#) erkennt man keinen Unterschied zwischen den Werten im Bereich von 581897 bis 584440 und Werten außerhalb dieses Bereichs. Auch im Vergleich zu den Strom- und Wirkleistungswerten aus anderen [Modulen](#) ([Abbildung 11](#) und [Abbildung 12](#)) lässt sich kein Unterschied feststellen. In diesem Bereich war in Sortierrundlauf C12 eine defekte Rolle eingebaut, um einen Fehler zu simulieren. Wie allerdings im Vergleich der Werte ersichtlich wird, sorgt eine defekte Rolle nicht für eine erkennbare Änderung im Verlauf der Strom- und Wirkleistungswerte.

**Schwingungswerte** Die Schwingungen einer Strecke setzen sich aus verschiedenen Eigenschwingungen zusammen. Die verbauten Sensoren messen die Intensität der gesamten Schwingung der Strecke.

Aus den Werten ist erkennbar, dass die Sensoren zum Teil erhebliche Unterschiede in der Güte der Daten haben. Während einige Sensoren nur eine sehr geringe Welligkeit aufweisen, ist die Welligkeit bei anderen Sensoren auch im normalen Betrieb

deutlich sichtbar. Beispielsweise an Sortierrundlauf A15 misst der Vibrationssensor 2 eine extrem wellige Schwingung, während Sensor 1 eine vergleichsweise geringe Welligkeit aufweist. Die Welligkeit von Vibrationssensor 2 ist allerdings nicht konstant, sondern es treten immer zufällige Zeitintervalle zwischen den Peaks auf. Im Gegensatz dazu ist die Schwingung von Vibrationssensor 1 an Sortierrundlauf C12, die entstanden ist, als die defekte Rolle eingebaut war, sehr gleichmäßig. Hier entsteht immer nach einem Zeitintervall von circa 7 Sekunden ein Peak. Generell war an Sortierrundlauf C12 nur bei Vibrationssensor 1 ein Unterschied erkennbar, als die defekte Rolle eingebaut war. Die Werte von Sensor 2 hatten den gleichen Pegel und waren genauso wellig wie vor dem Einbau der kaputten Rolle. Wieso dieser Unterschied zwischen den beiden Sensoren auftritt, konnte nicht geklärt werden. Auch ein defekt an Sensor 2 stellt eine Mögliche Ursache für die Unterschiede dar und konnte nicht ausgeschlossen werden.

**Ergebnisse der Auswertung der Sortierrundlaufdaten** Anhand der Daten lässt sich erkennen, dass man den Strom- und Wirkleistungsverlauf im betrachteten Betriebspunkt gleichsetzen kann. Zudem kann man mithilfe dieser Werte den Anlauf der Förderstrecke erkennen. Eine defekte Laufrolle ist in den Stromwerten allerdings nicht erkennbar. Anders sieht es bei den Schwingungswerten aus. Die Daten von Vibrationssensor 2 weisen bei einer defekten Rolle eine deutlich höhere Welligkeit auf und lassen somit einen Rückschluss auf die defekte Rolle zu. Der Verlauf von Vibrationssensor 1 unterscheidet sich allerdings nach dem Einbau der defekten Rolle nicht von dem Verlauf mit normalen Rollen. Somit kann man nur mithilfe der Werte von Sensor 2 einen Rückschluss auf den Zustand der Rollen ziehen.

### 6.1.2 Auswertung der Daten der Sensoren an den Kurven

Um die Daten verarbeiten und Plots erstellen zu können, wurden die Daten, wie bereits in [Abschnitt 5.1](#) beschrieben vorverarbeitet und geplottet. In [Abbildung 10](#) ist der Verlauf der einzelnen Werte über einen Zeitraum von 5 Tagen aufgezeichnet. Dabei entspricht der Bereich von 0 bis 245785 einem Betrieb der Kurve mit defekten Laufrollen. Alle Werte, die nach 261800 aufgenommen wurden, entsprechen einem normalen Betrieb. Die Werte, welche zwischen 245785 und 261800 aufgenommen wurden, zeigen Werte, die bei der Instandhaltung des Förderers auftreten und haben somit eine eigene Kategorie erhalten. Mehr zu den Kategorien findet sich in [Abschnitt 5.1.2](#).

Aus [Abbildung 10](#) lässt sich bereits erkennen, dass sowohl die Temperaturwerte als auch die Werte des Crest-Faktors nicht hilfreich sind, um eine Aussage über den Zustand des Förderers zu geben. Die Temperatur im normalen als auch im defekten Betrieb ist relativ ähnlich und weist hin und wieder Peaks nach oben oder unten auf.

Der Crest-Faktor weist ebenfalls im normalen, wie auch im defekten Betrieb relativ ähnliches Verhalten auf. Somit wurden die Temperaturen und der Crest-Faktor aus den weiteren Plots entfernt. Auch in der Auswertung mithilfe des Decision Tree Algorithmus wurden diese Parameter nicht weiter mit berücksichtigt.

[Abbildung 14](#) und [Abbildung 15](#) zeigen jeweils den normalen ([Abbildung 14](#)) beziehungsweise den defekten ([Abbildung 15](#)) Betrieb der Kurve in einem Zeitintervall von 11 Minuten und 40 Sekunden.

**Analyse der v-RMS Werte** Die Root-Mean-Square-Werte der Geschwindigkeit (v-RMS) der Schwingung sind im defekten Betrieb ähnlich zu den Werten im Normalbetrieb. Kurz nach dem Einschalten springt die Schwinggeschwindigkeit erst einmal nach oben, um dann einen Wert zu halten. Dieser Wert unterscheidet sich je nach Sensor. Die Intensität der Schwingung unterscheidet sich zwischen den beiden Sensoren um  $0.4 \frac{m}{s}$  oder  $0.5 \frac{m}{s}$ . Der Verlauf der beiden Sensorverläufe ist allerdings, bis auf ein gewisses rauschen, sehr ähnlich.

**Analyse der a-RMS Werte** Betrachtet man nun die Root-Mean-Square-Werte der Beschleunigung (a-RMS), so sind die Wertebereiche im defekten und im normalen Betrieb unterschiedlich zueinander. Im defekten Betrieb gibt es eine Ebene bei  $0.03 \frac{m}{s^2}$ , auf die der Verlauf immer wieder zurückspringt. Diese Ebene befindet sich im normalen Betrieb bei  $0.04 \frac{m}{s^2}$ . Im normalen Betrieb bildet der Verlauf auch nur Peaks nach unten, wo hingegen im defekten Betrieb Peaks nach oben und unten ausgebildet werden. Die Peaks in den Verläufen unterscheiden sich zwischen den beiden Sensoren.

**Analyse der a-Peak Werte** Die Peak-Werte der Beschleunigung im defekten Betrieb liegen im Mittel bei  $\approx 0.65 \frac{m}{s^2}$  für den einen und  $\approx 0.75 \frac{m}{s^2}$  für den anderen Sensor. Im normalen Betrieb liegen die Mittelwerte der beiden Sensoren bei  $\approx 1.05 \frac{m}{s^2}$ . Im normalen Betrieb ist die Welligkeit des Verlaufs auch geringer, als im defekten Betrieb. In beiden Betriebszuständen ist allerdings eine gewisse Welligkeit vorhanden.

**Ergebnisse der Auswertung der Kurvendaten** Von den drei Werten des Sensors lässt sich also mithilfe des a-Peak und des a-RMS Werts ein Rückschluss auf den Zustand der Kurve ziehen, da diese beiden Werte sich im normalen und defekten Betrieb unterscheiden. Der v-RMS Wert ist für eine Aussage zum Zustand der Laufrollen allerdings nicht hilfreich.

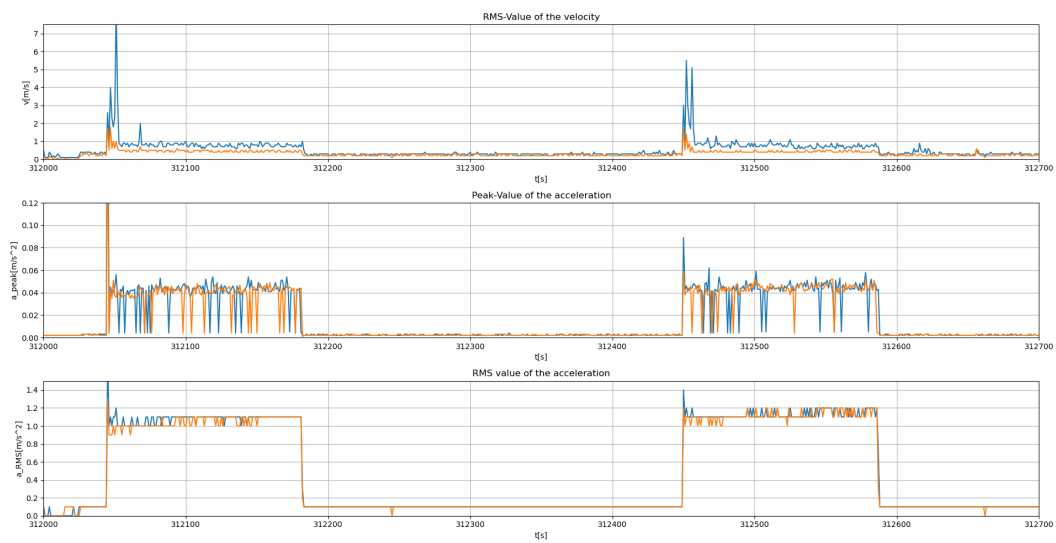


Abbildung 14: Daten Kurve - normaler Betrieb - Zeitraum  $\approx 12$  Minuten

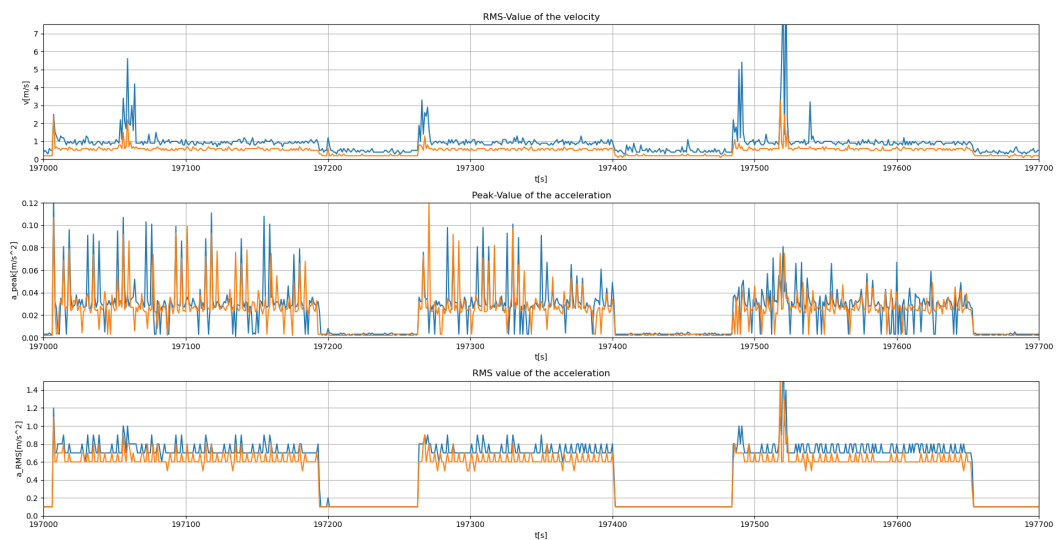


Abbildung 15: Daten Kurve - defekter Betrieb - Zeitraum  $\approx 12$  Minuten

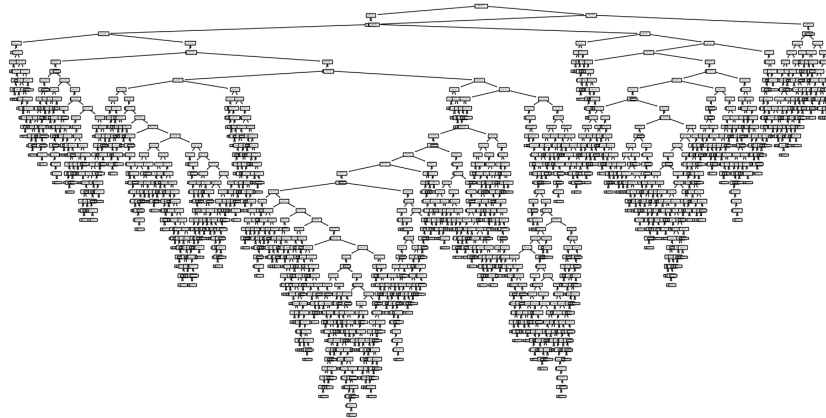


Abbildung 16: Decision Tree Sortierrundlauf

### 6.1.3 Ergebnisse der Analyse

Für die beiden analysierten Anlagenteile ergibt sich somit, dass man für die betrachteten Fehler immer einen Unterschied der Vibrationswerte im Falle der Sortierrundläufe beziehungsweise der Beschleunigungswerte der Schwingung (sowohl a-RMS als auch a-Peak) im Falle der Kurven erkennen kann. Andere Fehler können zu anderen Fehlerbildern führen, wurden allerdings im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet.

## 6.2 Decision Trees

Das generelle Vorgehen in Bezug auf den Aufbau der Entscheidungsbäume wurde bereits in [Abschnitt 5.4](#) vorgestellt. Die folgenden Unterkapitel zeigen jeweils kurz den resultierenden Entscheidungsbaum und bewerten diesen.

### 6.2.1 Sortierrundläufe

Der Decision Tree bei den Sortierrundläufen liefert bei 99.90 % der Validierungsdaten die richtige Kategorie zurück. Dem Entscheidungsbaum wird als Input ein Vektor mit den Sensor-, Gauß- und Welligkeitswerten der Ströme L1, L2 und L3, der Wirkleistungen der Leiter L1, L2 und L3, sowie der Vibrationswerte der Sensoren 1 und 2 übergeben. Damit hat er 24 Eingabeparameter, anhand derer er einer Entscheidung treffen kann. Damit erstellt der Algorithmus einen Entscheidungsbaum mit 45 Ebenen, welcher in [Abbildung 16](#) dargestellt ist.

Wie im [Abschnitt 5.4](#) bereits erwähnt, wurden dem Entscheidungsbaum zuerst nur die Gauß- und Welligkeitswerte der acht Parameter übergeben. Mit dieser geringeren Zahl an Eingabeparametern wurde ein Entscheidungsbaum mit nur 4 Ebenen aufgebaut, welcher nur 74.30 % der Validierungsdaten richtig kategorisieren konnte.

Tabelle 5: Aufteilung der Kategorien bei den Sortierrundläufen

Nr	Name Kategorie	A15	B14	C12	C14	D14	Gesamt	Anteil
0	keine Daten vorhanden	3	0	0	0	1	4	< 0.00 %
1	normaler Betrieb	483659	121298	604013	347610	748222	2304802	99.88 %
2	defekter Betrieb	0	0	2686	0	0	2686	0.12 %

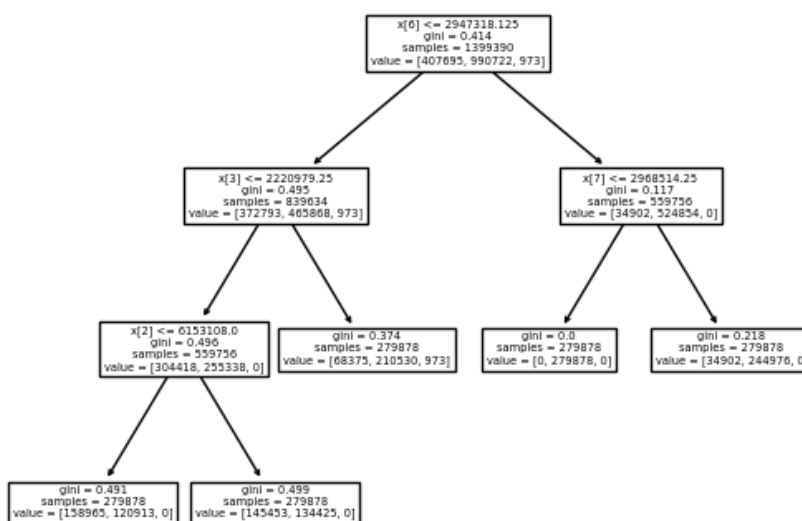


Abbildung 17: Decision Tree Sortierrundlauf - erster Versuch

Dieser erste Entscheidungsbaum ist in [Abbildung 17](#) dargestellt.

Zum Anlernen des Entscheidungsbaums wurden über  $2.3 \cdot 10^6$  Datenpunkte analysiert, welche sich, wie in [Tabelle 5](#) gezeigt, aufgeteilt haben.

### 6.2.2 Kurven

Beim Entscheidungsbaum der Kurvendaten gibt es bei den Validierungsdaten bei 97.67% der Daten eine richtige Kategorisierung. Der Entscheidungsbaum erhält als Eingabeparameter die gemessenen Sensorwerte, sowie die berechneten Gauß- und Welligkeitswerte der v-RMS, a-RMS und a-Peak Parameter. Aus diesen neun Eingabeparametern baut der Optimierungsalgorithmus dann einen Entscheidungsbaum mit 29 Ebenen auf. Dieser Entscheidungsbaum ist in [Abbildung 18](#) dargestellt.

Zum Anlernen des Entscheidungsbaums wurden insgesamt 844216 Datenpunkte von den zwei installierten Sensoren verwendet. Die Aufteilung der Datenpunkte in die

Tabelle 6: Aufteilung der Kategorien bei den Sortierrundläufen

Kat-Nr	Name Kategorie	Sensor 1	Sensor 2	Gesamt	Anteil
0	Wartung o.ä.	16016	16016	32032	3.79 %
1	normaler Betrieb	9464	9454	18918	2.24 %
2	defekter Betrieb	9258	9257	18515	2.19 %
3	teil-ausgeschalteter Betrieb	208222	208135	416357	49.32 %
4	ausgeschalteter Betrieb	179148	179246	358394	42.45 %

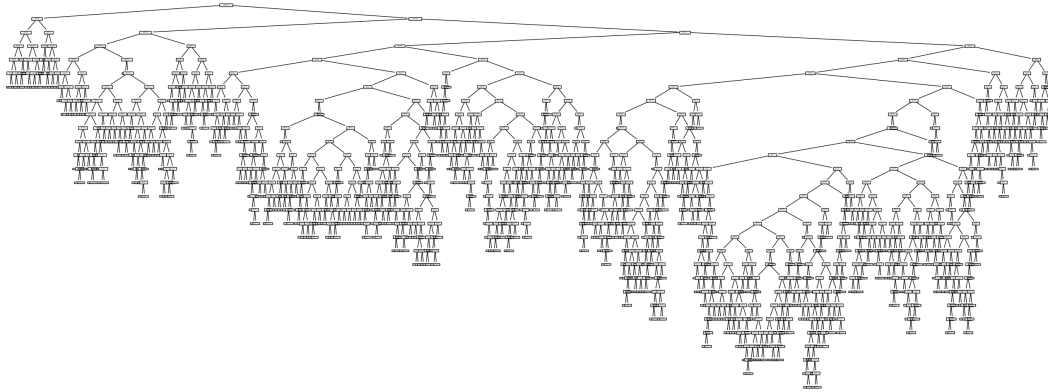


Abbildung 18: Decision Tree Kurve

einzelnen Kategorien ist in [Tabelle 6](#) zu sehen.

### 6.3 Gesamtergebnis

Anhand der Daten sieht man, dass eine Kategorisierung der gegebenen Daten möglich ist und man mithilfe der aufgebauten Netze gute Ergebnisse für defekte Laufrollen in den Anlagenteilen erhält. Mit einer richtigen Kategorisierung von 99.90 % bzw. 97.67 % sind beide Netze in der Lage eine zuverlässige Aussage darüber zu treffen, dass eine defekte Rolle im System vorhanden ist.



## 7 Fazit / Ausblick

Wie belastbar sind die in [Kapitel 6](#) erhaltenen Ergebnisse und wie könnte eine zukünftige Anwendung für Predictive Maintenance in der Gepäckförderanlage T1 am Flughafen München aussehen? Diese und weitere Fragen werden in den folgenden Unterkapiteln genauer erläutert.

### 7.1 Belastbarkeit der Ergebnisse

Im Rahmen dieser Arbeit konnte an einer Kurve und an einem Sortierrundlauf eine Messung mit defekten Rollen durchgeführt werden. Somit ergeben sich für alle fünf Sortierrundläufe 2686 Datenpunkte von 2307492 Datenpunkten (0.12%), welche wirkliche Fehler der Anlage darstellen. Zu allen anderen Messzeitpunkten befindet sich das betrachtete System im normalen Betrieb oder in Abschaltung. Auch bei den Kurven ist der Anteil der Datensätze, welche den defekten Betrieb beschreiben, gering. Dieser beträgt 2.19% und liegt damit trotzdem deutlich über dem Anteil bei den Sortierrundläufen. Im Vergleich zu diesen ist bei den Kurven auch der Anteil der Datensätze für den defekten Betrieb in einem ähnlichen Rahmen wie der Anteil der Datensätze für den normalen Betrieb. Beide liegen im Bereich von  $\approx 2.2\%$ . Bei den Sortierrundläufen ist der Unterschied zwischen dem Anteil der Werte für den normalen Betrieb, welcher bei 99.88% liegt, und dem Anteil der Werte für den schlechten Betrieb, welcher bei 0.12% liegt, deutlich höher. Dieser Umstand zusammen mit dem sehr geringen Anteil der Datensätze für den defekten Betrieb sorgt dafür, dass die Entscheidungen des Entscheidungsbaums den defekten Betrieb nicht komplett berücksichtigen. In einer Stichprobe von 10 Werten, die aus den Validierungsdaten der Kategorie für den defekten Betrieb entnommen wurden, wurden zwar alle Werte richtig zugeordnet, dennoch kann nicht ausgeschlossen werden, dass es zu falschen Zuordnungen kommt.

Ein weiterer Grund für falsche Zuordnungen kann sein, dass beide Entscheidungsbäume nur einen Fehlerzustand in ihren Daten haben. Tritt in der Anlage nun eine defekte Rolle auf, die ein anderes Verhalten in den Sensordaten auslöst, so sind die beiden Entscheidungsbäume vermutlich nicht in der Lage diesen Defekt sicher als Fehler zu erkennen. Auch andere Mängel, wie ein Defekt an einem Motor oder am Fördergurt können von dem System aktuell nicht erkannt werden, da dafür die Daten fehlen. Nachdem alle Daten, die im Rahmen dieser Arbeit verwendet wurden, aus der Gepäckförderanlage des Flughafens stammen und diese Anlage ein produktives System ist, war es leider nicht möglich, mehr Fehlerfälle im zeitlichen Rahmen dieser Arbeit in der Anlage einzubauen.

## 7.2 Mögliche Folgen dieser Arbeit

Die Ergebnisse aus [Kapitel 6](#) zeigen, dass es prinzipiell möglich ist, Fehler der Anlage mithilfe von Sensoren und einem trainierten Auswertesystem zu erkennen. Auch die Aufnahme von Werten mithilfe einer “mobilen“ Sensorlösung hat durchaus belastbare Ergebnisse geliefert und könnte somit auch in der Anlage verwendet werden. Das Problem an der aktuellen Implementierung ist allerdings, dass zu wenig Daten für ein umfassendes Training des Decision Trees zur Verfügung standen. Aus diesem Grund kann das System aktuell nur einen verschwindend kleinen Teil der möglichen Defekte detektieren. Um dennoch ein Predictive Maintenance System in der Gepäckförderanlage zu implementieren, müsste also noch einiges getan werden. Dies könnte ebenfalls wieder im Rahmen von Bachelorarbeiten erfolgen. Mögliche Themen oder Richtungen für zukünftige Arbeiten werden in [Abschnitt 7.3](#) vorgestellt. Sollte in Zukunft an diesen Themen am Flughafen gearbeitet werden, so besteht durchaus die Möglichkeit ein eigenes PdM-System für die Gepäckförderanlage zu entwickeln. Alternativ kann, nachdem nun geklärt wurde, dass ein Predictive Maintenance System in der Gepäckförderanlage generell funktioniert und auch mobile Sensoren einsetzbar sind, ein solches System in der [GFA](#) am Flughafen implementiert werden, indem ein Hersteller wie Siemens Logistics oder IFM damit beauftragt wird, ein PdM-System für die kritischsten Förderer aufzubauen. Diese beiden Hersteller haben bereits viel Zeit und Ressourcen in die Planung und Umsetzung von Predictive Maintenance Systemen investiert und haben dementsprechend einiges an Erfahrung. Zudem besitzt Siemens Logistics an ihrem Standort in Nürnberg eine Testanlage, in der sie PdM-Systeme testen können. Dort besteht dann zudem die Möglichkeit Daten vom defekten Betrieb und vom normalen Betrieb eines Förderers zu sammeln, da es keine negativen Folgen, wie sie in der Einleitung kurz beschrieben wurden, hat, wenn die Anlage ausfällt. Somit könnte Siemens Logistics ein System aufbauen und verschiedene Tests durchführen, ohne dass ein produktives System dafür verwendet werden muss.

## 7.3 Wie kann in Zukunft weiter an diesem Thema gearbeitet werden?

Zum Ende der Bearbeitungszeit dieser Arbeit wurde die Empfehlung von Seiten des Herstellers IFM vorgetragen, dass ein System, wie es in [Abschnitt 4.6](#) beschrieben wurde, besser für die Umsetzung eines Predictive Maintenance Systems geeignet ist. Ein solches System mit gesonderter Auswertelektronik und Fourieranalyse soll laut IFM eine bessere Fehlerursachen-Erkennung ermöglichen, als ein System, welches die Daten nur im Zeitbereich analysiert. Dieser Ansatz wurde allerdings zu spät von IFM vorgestellt, sodass er im Rahmen dieser Bachelorarbeit nur noch erklärt

werden kann und nicht mehr getestet wurde, da die Lieferzeit der Komponenten den Rahmen dieser Arbeit überstieg. Im Anschluss an diese Arbeit wird jedoch in Zusammenarbeit mit dem Hersteller IFM die Möglichkeit untersucht, ein System mit dezentraler Auswertelektronik in der Anlage testweise zu implementieren und zu bewerten, ob ein solches System eine einfachere Möglichkeit darstellt, Mängel in der Anlage zu detektieren. Sollte diese Untersuchung zu dem Ergebnis kommen, dass das System mit einer Auswertelektronik und darin integrierter Fourieranalyse, einfachere und genauere Ergebnisse liefert, so könnte in einer weiteren Arbeit die konkrete Implementierung dieses Systems und die Anbindung an die bestehenden Systeme am Flughafen beschrieben werden.

Alternativ kann sich eine zukünftige Arbeit damit beschäftigen, das in dieser Arbeit beschriebene System zu verbessern, indem mehr Fehlerfälle getestet und ausgewertet werden. Dazu müsste die Möglichkeit geschaffen werden, Messwerte von defekten Motoren zu erhalten. Eine andere Möglichkeit weitere Messwerte zu bekommen besteht darin, defekte Rollen auch an verschiedenen Positionen einzubauen, defekte Motoren zu sammeln und diese dann zusammen mit Sensoren in die Anlage einzubauen, um dadurch Daten zu erhalten.

Eine weitere Möglichkeit für eine zukünftige Arbeit besteht darin, nicht nur die technische Umsetzung eines PdM-Systems zu untersuchen, sondern vor allem auf die Kosten-Nutzen-Rechnung eines solchen Systems einzugehen und zu analysieren, ob sich ein solches System aus betriebswirtschaftlicher Sicht für die Anlage lohnt oder nicht.

## 8 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird eine mögliche Implementierung eines Predictive Maintenance Systems für die Gepäckförderanlage im Terminal 1 vorgestellt. Die Lösung basiert auf zwei unterschiedlichen Sensorkonzepten. Einerseits werden die Sensoren der sogenannten Sortierrundläufe verwendet, die bereits in der Anlage integrierte sind. Andererseits wird eine "mobile" Sensorlösung des Herstellers IFM, bestehend aus einem IO-Link-Master (AL1350) und einem Vibrationssensor VVB001, verwendet. Für die mobile Sensorlösung wird die mechanische Montage des Sensors und die Anbindung an die zentrale Elasticdatenbank vorgestellt. Zudem werden in den ersten Kapiteln die allgemeinen Grundlagen der Wartung dargestellt.

Um ein möglichst gutes Ergebnis bei der Auswertung der verwendeten Sensoren zu erhalten, werden die Daten vorverarbeitet. Zu diesem Zweck wird eine Normalverteilung erstellt und jeweils der aktuelle Sensorwert eingesetzt. Diese Berechnung wurde integriert, mit dem Hintergedanken, dass dadurch kleine Messdifferenzen zwischen den Sensoren nicht zu Fehlern führen. Zusätzlich zu den Werten der Normalverteilung wurde eine Größe eingeführt, welche die Änderung der letzten fünf Werte zum aktuellen Wert betrachtet. Diese Größe soll die Welligkeit des Signals abbilden und somit dazu beitragen, ein Signal im normalen Betrieb und ein Signal im defekten Betrieb zu unterscheiden.

Anhand der Sensordaten konnte gezeigt werden, dass sowohl bei den Sortierrundläufen, als auch bei den Kurven, nur die Vibrationswerte eine Aussage über eine oder mehrere defekte Laufrollen zulassen. Defekte Laufrollen waren das Fehlerbild, welches im Rahmen dieser Bachelorarbeit betrachtete werden konnte. Die Strom- und Wirkleistungswerte, welche bei den Sortierrundläufen ebenfalls erhoben werden, zeigen bei den betrachteten Fehlern keine signifikante Änderung und sind somit nicht geeignet eine defekte Rolle zu detektieren.

Zur automatisierten Auswertung beziehungsweise zur automatisierten Kategorisierung der Sensordaten wurden zwei Decision Trees trainiert. Jeweils ein Entscheidungsbaum wird dabei für einen Förderertyp (Sortierrundlauf oder 90°-Kurve) verwendet. Beide Entscheidungsbäume haben mehr als 25 Ebenen und liefern für über 97% der betrachteten Validierungsdaten die richtige Kategorie zurück. Dennoch ist nicht sicher, wie gut die im Rahmen dieser Arbeit trainierten Systeme wirklich sind, da für beide Förderertypen nur ein Fehlerfall zum Training verwendet werden konnte und somit auch die Anzahl der Werte für einen normalen oder defekten Betrieb zum Teil sehr gering war.

## Anhang

### Übersicht Normenreihen

#### DIN ISO 10816/DIN ISO 20816 - Mechanische Schwingungen – Messung und Bewertung der Schwingungen von Maschinen

Tabelle 7: Übersicht - DIN ISO 10816/DIN ISO 20816

DIN	EN	ISO	Doknr.	Bezeichnung	Sprache	Jahr
X		X	10816	Beiblatt 1	DEU/ENG	2013
X		X	20816-1	Allgemeine Anleitungen	DEU/ENG	2017
X		X	20816-2	Stationäre Gasturbinen, Dampfturbinen und Generatoren	DEU/ENG	2017
X		X	20816-3	Industriemaschinen mit einer Leistung über 15kW und Betriebsdrehzahlen zwischen 120 min <sup>-1</sup> und 30000 min <sup>-1</sup>	DEU/ENG	2022
X		X	20816-4	Gasturbinen über 3MW mit Gleitlagern	DEU/ENG	2018
X		X	20816-5	Maschinensätze in Wasserkraft- und Pumpspeicheranlagen	DEU/ENG	2018
X		X	20816-6 + Amd.1	Hubkolbenmaschinen mit einer Leistung über 100kW	DEU/ENG	2015
X		X	20816-7	Kreiselpumpen für den industriellen Einsatz	DEU/ENG	2009
X		X	20816-8	Hubkolbenkompressoren	DEU/ENG	2018
X		X	20816-9	Getriebe	DEU/ENG	2020
X		X	10816-21	Windenergieanlagen mit horizontaler Drehachse und Getriebe	DEU/ENG	2015

#### DIN ISO 13373 - Zustandsüberwachung und -diagnostik von Maschinen

Tabelle 8: Übersicht - DIN ISO 13373

DIN	EN	ISO	Doknr.	Bezeichnung	Sprache	Jahr
X		X	13373-1	Allgemeine Anleitung	DEU/ENG	2002
X		X	13373-2	Verarbeitung, Analyse und Darstellung von Schwingungsmesswerten	DEU/ENG	2016
X		X	13373-3	Anleitungen zur Schwingungsdiagnose	DEU/ENG	2015
X		X	13373-4	Verfahren zur Diagnostik an Gas- und Dampfturbinen mit Gleitlagern	DEU/ENG	2021
X		X	13373-5	Verfahren zur Diagnostik an Ventilatoren und Gebläsen	DEU/ENG	2020
X		X	13373-7	Diagnostic techniques for machine sets in hydraulic power generating and pump-storage plants	ENG	2017
X		X	13373-9	Verfahren zur Diagnostik an Elektromotoren	DEU/ENG	2017

## Abbildungsverzeichnis

1	Übersicht Wartungsmodi . . . . .	5
2	Positionierung von Vibrationssensoren an kleinen Maschinen . . . . .	10
3	Verteilung der Fehler im Verlauf einer Maschinenlebenszeit . . . . .	14
4	Beispielhafte Darstellung des Aufbaus eines Moduls . . . . .	16
5	Übersicht über die verschiedenen Lösungen . . . . .	22
6	Übersicht Positionierung Schwingungssensoren Sortierrundläufe . . . . .	23
7	Sortierrundlauf C12 - Werte für guten und defekten Betrieb - 1 Tag - Grenze bei 581897 . . . . .	30
8	Position 90° Kurven . . . . .	31
9	Positionierung Vibrationssensoren an 90° Kurven . . . . .	31
10	Daten Kurve - Zeitraum 5 Tage . . . . .	32
11	Sortierrundlauf A15 - Werte für guten Betrieb - 2 Tage . . . . .	33
12	Sortierrundlauf B14 - Werte für guten Betrieb - 2 Tage . . . . .	34
13	Sortierrundlauf C12 - Werte für guten und defekten Betrieb - 2 Tage . . . . .	34
14	Daten Kurve - normaler Betrieb - Zeitraum ≈12 Minuten . . . . .	38
15	Daten Kurve - defekter Betrieb - Zeitraum ≈12 Minuten . . . . .	38
16	Decision Tree Sortierrundlauf . . . . .	39
17	Decision Tree Sortierrundlauf - erster Versuch . . . . .	40
18	Decision Tree Kurve . . . . .	41

## Tabellenverzeichnis

1	Übersicht Wartungsmodi . . . . .	4
2	Übersicht über Normen zur Schwingungsanalyse n.V. - nicht Vorhanden . . . . .	8
3	Kategorien Sortierrundläufe . . . . .	28
4	Kategorien Kurven . . . . .	28
5	Aufteilung der Kategorien bei den Sortierrundläufen . . . . .	40
6	Aufteilung der Kategorien bei den Sortierrundläufen . . . . .	41
7	Übersicht - DIN ISO 10816/DIN ISO 20816 . . . . .	46
8	Übersicht - DIN ISO 13373 . . . . .	46

## Literaturverzeichnis

- [1] Xanthi Bampoula u. a. „A Deep Learning Model for Predictive Maintenance in Cyber-Physical Production Systems Using LSTM Autoencoders“. In: *Sensors* 2021.Vol. 21 (2021), S. 972. URL: <https://www.proquest.com/docview/2486676569?pq-origsite=primo> (besucht am 06.10.2023).
- [2] David Brimley. *Was ist ein Elasticsearch Index?* Hrsg. von elastic.co. 2023. URL: <https://www.elastic.co/de/blog/what-is-an-elasticsearch-index> (besucht am 16.11.2023).
- [3] Deutsches Institut für Normung. *Instandhaltung: Begriffe der Instandhaltung; Dreisprachige Fassung EN 13306:2017*. Berlin, 2018-02-00. URL: <https://www-nautos-de.thi.idm.oclc.org/VFZ/search/item-detail/DE30071738> (besucht am 19.09.2023).

- [4] Deutsches Institut für Normung. *Mechanische Schwingungen: Bewertung der Schwingungen von Maschinen durch Messung an nicht-rotierenden Teilen - Beiblatt 1: Methodisches Vorgehen bei der Auswahl von Normen zu Maschinenschwingungen einschließlich der Wellenschwingungen (ISO/TR 19201:2013)*. Berlin, 2013-12-00. URL: <https://www-nautos-de.thi.idm.oclc.org/VFZ/search/item-detail/DE30054964> (besucht am 25. 09. 2023).
- [5] Deutsches Institut für Normung. *Mechanische Schwingungen: Messung und Bewertung der Schwingungen von Maschinen - Teil 1: Allgemeine Anleitungen (ISO 20816-1:2016)*. Berlin, 2017-03-00. URL: <https://www-nautos-de.thi.idm.oclc.org/VFZ/search/item-detail/DE30071093> (besucht am 25. 09. 2023).
- [6] Deutsches Institut für Normung. *Mechanische Schwingungen: Messung und Bewertung der Schwingungen von Maschinen - Teil 3: Industriemaschinen mit einer Leistung über 15kW und Betriebsdrehzahlen zwischen 120 min<sup>-1</sup> und 30000 min<sup>-1</sup> (ISO 20816-3:2022)*. Berlin, 2023-04-00. URL: <https://www-nautos-de.thi.idm.oclc.org/VFZ/search/item-detail/DE30097254> (besucht am 25. 09. 2023).
- [7] Deutsches Institut für Normung. *Zustandsüberwachung und -diagnostik von Maschinen: Schwingungs-Zustandsüberwachung - Teil 2: Verarbeitung, Analyse und Darstellung von Schwingungsmesswerten (ISO 13373-2:2016)*. Berlin, 2016-11-00. URL: <https://www-nautos-de.thi.idm.oclc.org/VFZ/search/item-detail/DE30068674> (besucht am 25. 09. 2023).
- [8] George Dinu. „ONLINE VIBRATION MONITORING PROCEDURE FOR MACHINE TOOLS“. In: *ONLINE VIBRATION MONITORING PROCEDURE FOR MACHINE TOOLS* 16.4 (2021), S. 137–142. ISSN: 2067-9238. URL: <https://www.proquest.com/docview/2697724550?pq-origsite=primo> (besucht am 09. 01. 2024).
- [9] Frank Koenig. *Siemens Sorter 360*. Lupolei, Flughafen München, 2023-10-04. URL: [nicht%20verf%C3%BCgbar](#).
- [10] iQunet. *Wireless 24V Powered Vibration Sensor | iQunet.com*. 2.06.2022. URL: <https://iqunet.com/products/wireless-sensors/wireless-24v-powered-vibration-sensor/> (besucht am 30. 10. 2023).
- [11] Frank Koenig. „Condition monitoring for airport baggage handling in the era of industry 4.0“. In: *Condition monitoring for airport baggage handling in the era of industry 4.0* 25.3 (2019), S. 435–451. ISSN: 1355-2511. URL: <https://www.proquest.com/docview/2272148248?parentSessionId=1XYmFSIPDc0cYSHQQH0h7J2UuqYhszWdJW%2FexrmAyCQ%3D&pq-origsite=primo&accountid=135362> (besucht am 09. 01. 2024).
- [12] Maximilian Lackner, Judith Klamert-Schmid und Sabine Zangl, Hrsg. *Berufsfeld Wirtschaftsingenieure: Die Vielfalt der Schnittstellenkompetenz*. Wiesbaden und Heidelberg: Springer Gabler, 2021. ISBN: 3658326204. URL: <https://link-springer-com.thi.idm.oclc.org/book/10.1007/978-3-658-32621-0> (besucht am 09. 01. 2024).
- [13] R. Keith Mobley. *An introduction to predictive maintenance*. 2. ed. Amsterdam: Butterworth-Heinemann, 2002. ISBN: 0-7506-7531-4. URL: <https://www.sciencedirect.com/book/9780750675314/an-introduction-to-predictive-maintenance?via=ihub=> (besucht am 09. 01. 2024).

- [14] Marek Mołęda. „From Corrective to Predictive Maintenance - A Review of Maintenance: Approaches for the Power Industry“. In: *Sensors* 23.13 (2023), S. 5970. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37447820/> (besucht am 09.01.2024).
- [15] pandas. *pandas - Python Data Analysis Library*. 29.11.2023. URL: <https://pandas.pydata.org/> (besucht am 29.11.2023).
- [16] Uwe Post. *Fit fürs Studium Mathematik*. 1. Auflage. Rheinwerk Computing. Bonn: Rheinwerk Verlag, 2020. ISBN: 978-3-8362-7060-1. URL: <https://opac.ku.de/s/thi/de/2/10/BV046346974> (besucht am 09.01.2024).
- [17] Lara Schuberth. *Untersuchung der Potenziale von Predictive Maintenance für Regalbediengeräte*. München, 2020. URL: <https://mediatum.ub.tum.de/node?id=1601160> (besucht am 09.01.2024).
- [18] *scikit-learn: machine learning in Python — scikit-learn 1.3.2 documentation*. 27.12.2023. URL: <https://scikit-learn.org/stable/> (besucht am 28.12.2023).
- [19] *SKF QuickCollect sensor | SKF*. 26.10.2023. URL: <https://www.skf.com/my/products/condition-monitoring-systems/basic-condition-monitoring-products/vibration-measurement/quickcollect-sensor> (besucht am 30.10.2023).
- [20] The Matplotlib development team. *Matplotlib — Visualization with Python*. 7.11.2023. URL: <https://matplotlib.org/> (besucht am 29.11.2023).
- [21] Paul Wilmott. *Grundkurs Machine Learning*. 1. Auflage. Informatik verstehen. Bonn: Rheinwerk Computing, 2020. ISBN: 978-3-8362-7598-9. URL: <https://opac.ku.de/s/thi/de/2/10/BV046831869>.
- [22] *ZZ0809 - IO-Link VVB Starterkit - ifm*. 30.10.2023. URL: <https://www.ifm.com/de/de/product/ZZ0809> (besucht am 30.10.2023).