Masterarbeit

DATENBEREITSTELLUNG FÜR DIE VORAUSSCHAUENDE INSTANDHALTUNG AN MOTOREN

ausgeführt am

Fachhochschul-Masterstudiengang
Automatisierungstechnik-Wirtschaft

von
BSc Elke Zöbinger
51901351

betreut und begutachtet von
Ing. Dipl.-Ing. Jutta Isopp

Graz, im November 2023

Elke Zöbinger
.....
Unterschrift

EHRENWÖRTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benützt und die benutzten Quellen wörtlich zitiert sowie inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Unterschrift

DANKSAGUNG

An dieser Stelle möchte ich mich bei meinem Mann, meiner Familie, meinen Freunden, meinen Kollegen und bei meiner Betreuerin für ihre Unterstützung bedanken.

KURZFASSUNG

Neue akademische Richtungen wie Data Science treiben den Wandel in vielen Bereichen voran und eröffnen neue Möglichkeiten in verschiedenen technologischen Bereichen, wie z.B. der industriellen Instandhaltung. Daher ist die Analyse von Daten zur Vorhersage von kritischen Zuständen technischer Anlagen zu einem zentralen Bestandteil für die Aufrechterhaltung von Qualität und Quantität in der Produktion geworden.

Elektromotoren sind das Kernelement vieler Industrieanlagen und ihr Versagen kann enorme Schäden verursachen. Deshalb ist es wichtig, dass Fehler im Voraus mithilfe eines Datenmodells entdeckt werden. Das Ziel dieser Arbeit ist es, für die Etablierung dieses Modells die notwendigen Daten in geeigneter Qualität zu liefern.

Zunächst wurden die kritischen Bauteile von Frequenzumrichter gespeisten Motoren untersucht, wobei sich die Lager als die kritischen Teile erwiesen, da ihr Zustand als aussagekräftig für den Zustand des Motors angesehen wird. Schwingungs- und Temperaturmessungen, welche die Lagerzustände am besten abbilden, sind die am besten geeigneten Sensoren für deren Überwachung. Darüber hinaus sind Maschinensteckbriefe, die spezifische Informationen über die Anlage selbst, ihre Prozesse und ihre Umgebung enthalten, für die Analyse ihrer Messungen unerlässlich.

Basierend auf diesen Erkenntnissen wurden verschiedene Schwingungssensoren für unterschiedliche Anwendungsszenarien ausgewählt und in die Datenbank integriert. Die Konfiguration dieser Sensoren wurde validiert und justiert und die essenziellen Informationen für das Modell zusammengefasst. Als Ergebnis werden die korrekten Messwerte in der Datenbank gespeichert und zusätzliche Informationen bereitgestellt. Darüber hinaus wurden die Informationen für die Umsetzung von Predictive-Maintenance Modellen festgehalten.

Diese Arbeit dient als Leitfaden für die Realisierung von Predictive Maintenance für Motoren sowie zur Sicherstellung der Datenqualität in der Feldebene.

ABSTRACT

New academic fields like Data Science drive transitions in many areas and establish new opportunities in various technological fields, such as industrial maintenance. Thus, analyzing data to predict critical conditions of technical equipment preventing failures in advance has become an integral part in sustaining the quality and quantity of production.

Motors are at the core of many industrial plants and its malfunction can induce huge damages. Therefore, it is vital that failures are discovered proactively by using a data model. The aim of this thesis is to deliver the necessary data for this model in appropriate quality required to establish such.

Firstly, the critical parts of inverter fed motors were investigated and bearings proved to be the most critical part, since their condition is seen as meaningful for the motor’s state. Vibration- and temperature measurements, which best represent bearing conditions, are the most appropriate sensors for their monitoring. Additionally, data profiles containing specific information about the plant itself, its processes and surroundings are essential for analyzing their measurements.

Based on these findings, different vibration sensors were selected for several application scenarios and integrated into the database. The configuration of these sensors was validated and adjusted and the available information for the model was collected. As a result, the correct measurements are stored in the database and additional information is provided. Additionally, information required for establishing predictive maintenance models is explored.

This thesis serves as a guideline for predictive maintenance strategy for motors as well as for ensuring data quality in the field level.

INHALTSVERZEICHNIS

1 Einleitung ... 1
2 Predictive Maintenance und Condition Monitoring ... 2
3 Überwachung von Asynchronmotoren ... 4
3.1 Schäden bei Asynchronmotoren ... 4
3.1.1 Lagerschäden ... 4
3.1.1.1 Erfassung von Lagerschäden ... 11
3.1.1.2 Schmierung ... 13
3.1.1.3 Handhabung und Montage ... 14
3.1.1.4 Verhinderung von Verschmutzungen ... 14
3.1.1.5 Lagerströme ... 14
3.1.1.6 Maßnahmen Lagerströme ... 17
3.1.2 Elektromagnetische Verträglichkeit und Umgebungsbedingungen ... 18
3.1.2.1 Spannungsschwankungen ... 18
3.1.2.2 Spannungseinbrüche ... 19
3.1.2.3 Spannungsunsymmetrien ... 19
3.1.2.4 Oberschwingungen ... 20
3.1.2.5 Spannungstransienten ... 21
3.1.3 Wicklungsschäden ... 21
3.1.4 Wellenschäden ... 22
3.1.5 Getriebeschäden ... 23
3.1.6 Läuferschäden ... 23
3.2 Condition Monitoring Parameter ... 24
3.3 Referenzen ... 25
3.4 Frequenzumrichter ... 26
3.5 Messtechnik ... 27
3.5.1 Schwingungsmessung ... 27
3.5.1.1 Grenzwerte ... 28
3.5.1.2 Frequenzanalyse ... 30
3.5.1.3 Hüllkurvenanalyse ... 30
3.5.1.4 Montage ... 31
3.5.2 Temperaturmessung ... 32
4 Anforderungen an die Datenbasis ... 34
4.1 Datenqualität ... 34
4.2 Zusatzinformationen ... 35
4.3 Basisdaten ... 36
4.4 Abtastrate ... 36
5 Dokumentation ... 38
6 Motoren ... 39
6.1 Abgasgebläse ... 39

6.2 Gebläsemotor ... 41
6.3 Motor Sichterrad ... 44
6.4 Motor Zellradschleuse ... 47
6.5 Alarme ... 50
7 Sensoren ... 51
7.1 Geeignete Sensoren ... 51
7.1.1 IO-Link Sensor ... 51
7.1.2 Analogsensor ... 53
7.2 Auswahl ... 54
7.3 Implementierung ... 55
7.3.1 IO-Link Sensoren in S7 1500 ... 56
7.3.2 IO-Link Sensor in CMTK ... 61
7.3.2.1 Konfiguration CMTK ... 61
7.3.2.2 Konfiguration Datenvisualisierung ... 61
7.3.3 Analogsensor in S7 1200 ... 64
7.3.4 Analogsensor in S7 300 ... 64
7.4 Konfiguration ... 64
7.4.1 IO-Link Sensor ... 64
7.4.2 Analogsensor ... 67
7.5 Montage ... 67
7.6 Validierung ... 70
7.6.1 Bewertung nach Norm-Grenzwerten ... 71
7.6.2 Validierung baugleicher Sensoren ... 71
7.6.3 Validierungsversuch verschiedener Sensoren ... 72
7.7 Justierung ... 74
8 Datenbank ... 76
8.1 Einbindung der Messwerte ... 76
8.2 Abtastintervall ... 78
9 Kommunikation ... 79
10 Dokumentation ... 82
11 Ergebnisse und Ausblick ... 88
12 Literaturverzeichnis ... 90
Abbildungsverzeichnis ... 93
Tabellenverzeichnis ... 95
Abkürzungsverzeichnis ... 96
Anhang 1: Einfluss Parameter auf Lagerströme ... 97

1 EINLEITUNG

Um die Verfügbarkeit und Prozesssicherheit eines Aggregates zu erhöhen, soll bei vier unterschiedlichen Motoren Predictive Maintenance umgesetzt werden. Das Ziel dieser Arbeit ist es, für das dafür benötigte Datenmodell qualitative Daten zu generieren, die ohne allzu große Anlagenkenntnis richtig interpretiert werden können.

Bei den Motoren handelt es sich um Frequenzumrichter gespeiste Drehstrom-Asynchronmotoren mit unterschiedlicher Leistung und Anwendung. Die zwei größeren treiben Gebläse an, die beiden kleineren eine Welle über einen Riemen bzw. eine Schleuse über ein Steckgetriebe. Für diesen Antriebstyp „Asynchronmotor“ wird analysiert, von welchen Bauteilen auf den Allgemeinzustand des Motors rückgeschlossen werden kann und welche am häufigsten zu Ausfällen führen. Zu diesem Zweck werden geeignete Sensoren bestimmt und zur Speicherung der Messwerte an die lokale Datenbank angebunden. Außerdem wird ermittelt, welche zusätzlichen Informationen neben den Messdaten für die Erstellung der Modelle erforderlich sind. Zukünftig soll es möglich sein, dieses Konzept einschließlich Messwerte, Dokumentation und Kommunikation auf andere Anlagen anzuwenden, und es soll als Basis für die Aufzeichnung von qualitativen Daten dienen. Aus diesem Grund werden verschiedene Sensoren und Systeme für diverse Anwendungsszenarien wie z.B. Anlagen ohne speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) oder Netzwerkanbindung getestet.

Zusätzlich soll diese Arbeit einen Leitfaden bieten, wie generell der Datenaufzeichnungsprozess verbessert werden kann, damit Datenqualität vom Messpunkt bis zur Datenbank gegeben ist. Schlechte Datenqualität geht mit erhöhtem Ressourcenbedarf einher und wenn die Daten für z.B. Predictive Maintenance unbrauchbar sind, kann unnötige Zeit vergehen, bis wieder eine aussagekräftige Datenbasis vorhanden ist. Außerdem wird bei unpassender Aufzeichnung unnötiger Speicher verbraucht.

2 PREDICTIVE MAINTENANCE UND CONDITION MONITORING

Die effektive Verarbeitung und Analyse von großen Datenmengen ermöglicht es, das Maschinenverhalten über die Zeit zu analysieren. Dabei können schädigende Muster, Anomalien, die mit dem menschlichen Auge nur schwer erkennbar sind, oder Verschlechterungen der Maschine entdeckt werden. Predictive Maintenance ermöglicht es, kritische Zustände bereits vor ihrem Auftreten zu identifizieren.[1]

Predictive Maintenance basiert auf Condition Monitoring, in dem bereits die kontinuierlich erfassten Daten analysiert und bewertet werden. Auf Basis dieser Auswertung wird mit Hilfe von künstlicher Intelligenz eine Vorhersage über den Eintritt gewisser Ereignisse errechnet. Basis für die Vorhersagen sind Daten, die eine Aussage über den Zustand der zu überwachenden Anlage ermöglichen. Neben den Maschinendaten müssen auch Umgebungsparameter wie z.B. Temperatur, Feuchtigkeit mit betrachtet werden. Der Vorteil von Predictive Maintenance ist die Erhöhung der Maschinenverfügbarkeit, weil Instandhaltungstätigkeiten kosteneffizient und zum richtigen Zeitpunkt durchgeführt werden können, bevor die Maschine wegen eines Defekts ausfällt.[2]

Beide Begriffe sind in der DIN EN 13306:2018-02 der zustandsorientierten Instandhaltung als Prognose über den Abbau des Abnutzungsvorrats bzw. als Tätigkeit untergeordnet.[3] Die zustandsorientierte Instandhaltung wird in der Norm als „präventive Instandhaltung, die die Beurteilung des physischen Zustands, Analysen und die möglichen, daraus resultierenden Instandhaltungsmaßnahmen beinhaltet“[4] definiert.

Die Instandhaltungsart Predictive Maintenace, ist im deutschen Sprachgebrauch auch als vorausschauende Instandhaltung bekannt. Sie wird in der DIN EN 13306:2018-02 als „zustandsorientierte Instandhaltung, die nach einer Vorhersage, abgeleitet von wiederholter Analyse oder bekannten Eigenschaften und Bestimmung von wichtigen Parametern, welche den Abbau des Objekts kennzeichnen, durchgeführt wird“[5], definiert. Werden Maßnahmen ergriffen, um den beobachteten Abbau unmittelbar wieder herzustellen, wird eine aktive Instandhaltung forciert.[6]

Condition Monitoring, was auf Deutsch „Zustandsüberwachung“ bedeutet, wird hingegen laut Norm den Instandhaltungstätigkeiten zugeordnet. Die DIN EN 13306:2018-02 beschreibt in 8.2 Zustands-überwachung als „manuell oder automatisch ausgeführte Tätigkeit zur Messung der Merkmale und Parameter des physischen Ist-Zustands eines Objekts in bestimmten Zeitabständen“[7]. Wobei noch angemerkt ist, dass die Zustandsüberwachung im Betriebszustand zur Bestimmung von Änderungen an

[1] Vgl. Cerquitelli/Nikolakis/O'Mahony/Macii/Ippolito/Makris (2021), S. 4f.

[2] Vgl. Branitzke (2020), Online-Quelle [07.09.2023]

[3] Vgl. DIN EN 13306-2 (2018), S. 62.

[4] DIN EN 13306-2 (2018), S. 35.

[5] DIN EN 13306-2 (2018), S. 35.

[6] Vgl. DIN EN 13306-2 (2018), S. 35f.

[7] DIN EN 13306-2 (2018), S. 41.

Objektparametern über die Zeit dient, kontinuierlich oder in regelmäßigen Zeitabständen erfolgen kann.[8] Als präventive Tätigkeiten, die vor einem Ausfall ausgeführt werden können, werden die Erkennung eines potenziellen Fehlers, die Ermittlung des Abbaus und die Vermeidung von Abbau oder Auswirkungen von Fehlern genannt.[9]

Nachfolgend wird analysiert, welche Schäden bei Asynchronmotoren auftreten und wie diese erfasst werden können.

[8] Vgl. DIN EN 13306-2 (2018), S. 41f.

[9] Vgl. DIN EN 13306-2 (2018), S. 63.

3 ÜBERWACHUNG VON ASYNCHRONMOTOREN

In den folgenden Abschnitten wird auf Schäden, die bei Frequenzumrichter (FU) gespeisten Drehstrom Asynchronmotoren im Betrieb auftreten können, genauer eingegangen. Dabei werden die Abschnitte eher allgemein gehalten, um möglichst viele verschiedene Aggregate abzudecken. Das Ziel dieses Kapitels ist es herauszufinden, welche Komponenten überwacht werden müssen, um mögliche Schäden rechtzeitig vorhersagen zu können. Neben möglichen Ausfallursachen wird auf die Auswirkung dieser Schäden Bezug genommen und wie diese messtechnisch erfasst bzw. verhindert werden können. Zudem wird darauf eingegangen, wie Predictive Maintenance bei ähnlichen Projekten umgesetzt wurde. Abschließend wird beschrieben, mit welchen Sensoren diese Komponenten überwacht werden können. Die damit erfassten Daten werden firmenintern zur Entwicklung und zum Training von Modellen zur Vorhersage von angehenden Motorschäden verwendet und können auch direkt in das Condition Monitoring einfließen.

3.1 Schäden bei Asynchronmotoren

Neben den Wicklungen gelten Wälzlager und mechanische Teile wie Wellen, Zahnräder und Passfedern als typische Maschinenelemente, deren Schäden Ausfällen bei Asynchronmotoren verursachen. Während Wicklungen vor thermischer Überlastung gut geschützt werden können, treten besonders häufig Ausfälle durch Wälzlagerschäden auf, da diese schwer vor Überlast durch z.B. Radial- und Axialkräfte[10] von z.B. Riemen- oder Kettenzug, Gewichtskräften, Kräfte der angebrachten Arbeitsmaschine oder Schwingungen durch z.B. Unwucht, Vibrationen des Fundaments oder Fluchtungsfehler geschützt werden können.[11] In den folgenden Abschnitten werden typische Schäden dieser Antriebskomponenten genauer erörtert.

3.1.1 Lagerschäden

In der Praxis können Lagerschäden das Ergebnis von mehreren gleichzeitig wirkenden Mechanismen sein. Beschädigungen können von unsachgemäßem Transport, unsachgemäßer Handhabung, Montage oder Instandhaltung sowie fehlerhafter Herstellung des Lagers oder dessen Nachbarteile sein. Die komplexe Kombination aus Konstruktion, Herstellung, Montage, Betriebsbedingungen und Instandhaltung erschweren häufig die Ursachenfindung – besonders wenn der Schaden am Lager schon beträchtlich ist. Die Lagerausfallarten sind in der ISO 15243 in die sechs Kategorien: Ermüdungsschäden, Verschleiß, Korrosion, Elektroerosion, plastische Verformung, Rissbildung und Bruch nach ihren sichtbaren Merkmalen unterteilt, weil diese Merkmale Rückschluss auf die Ursache ermöglichen. [12]

[10] Vgl. Greiner (2005), S. 1f.

[11] Vgl. Greiner (2005), S. 2. Teil III

[12] Vgl. ISO 15243 (2017), S. vff.

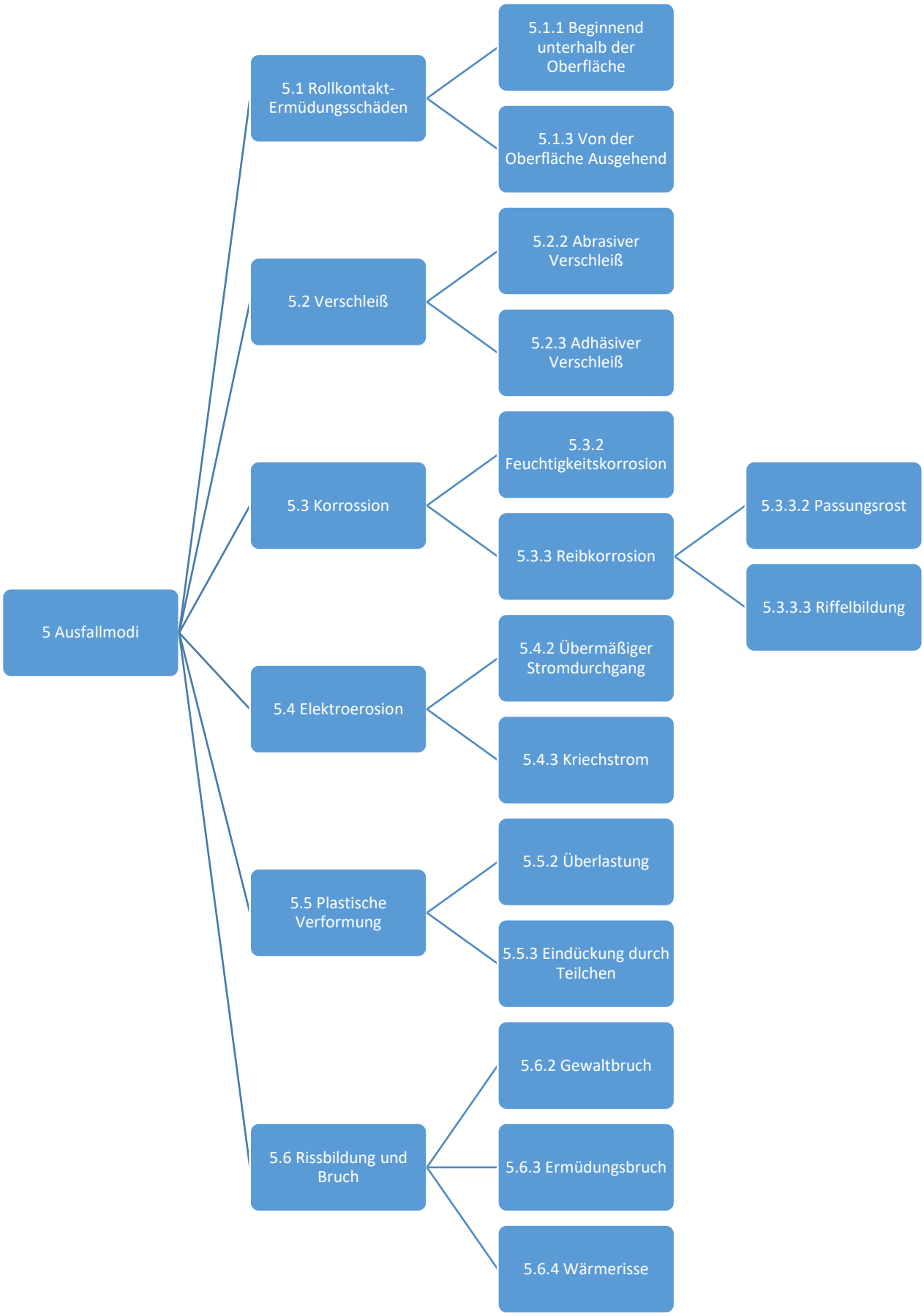


Abb. 1: Einstufung der Fehlermodi, Quelle: ISO 15243 (2017), S. 3.

Besonders häufig kommen Schäden aufgrund von schlechter Schmierung vor, wie in Abb. 2 dargestellt. An zweiter Stelle liegen Schäden durch Verschmutzung, die bei etwa jedem fünften Lager als Ursache gelten. Nahezu ebenfalls ein Fünftel der Lager ist für seine Anwendung ungeeignet. Jeweils 8% der Lager werden nicht richtig montiert oder durch die Handhabung beschädigt. Schäden durch elektrischen Strom oder Ermüdung kommen hingegen mit 5% bzw. 2% weniger häufig vor.

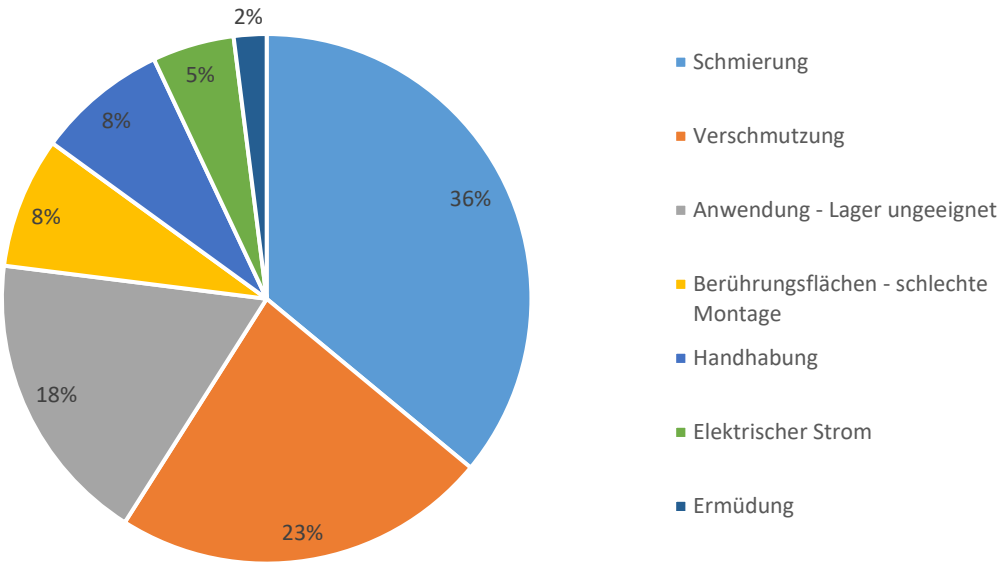


Abb. 2: Häufige Ursachen von Lagerschäden (2022), Quelle: SKF Evolution (2023), Online-Quelle [23.8.2023]

Schäden bei Wälzlagern zeichnen sich im Vorfeld schon durch ein sich allmählich verschlechterndes Betriebsverhalten ab. Abhängig von den Betriebsbedingungen können vom Auftreten des Schadens bis zum Ausfall wenige Minuten bis mehrere Monate vergehen. Spontane Fehler, die zum sofortigen Ausfall führen, kommen selten vor.[13]

Da in dieser Arbeit die frühzeitige Identifizierung der unterschiedlichen Schäden wichtig ist, werden in Tab. 1 die möglichen Ursachen, welche auf Schäden von Wälzlagern hinweisen, den Symptomen Wärmebildung, Lärm, Schwingungen, Wellenbewegung und Reibungsmoment zugeordnet. Eine detaillierte Auflistung samt Lösungscode, der eine genaue Beschreibung der Ursache beinhaltet, können in der Originalquelle (siehe SKF Service-Handbuch[14]) nachgeschlagen werden.

Anschließend werden die Schadensursachen wie die richtige Schmierung, Verhinderung von Verschmutzungen, Lageranwendung, Montage und Handhabung sowie Lagerströme genauer beschrieben.

[13] Vgl. Schaeffler Technologies AG & Co. KG. (Hrsg.) (2013), S. 4.

[14] Vgl. SKF Gruppe (Hrsg.) (2012), S. 229ff.

Symptom	**Mögliche Ursache**	
Zu starke Wärmeentwicklung …	Schmierproblem	… durch zu wenig, zu viel oder falschen Schmierstoff bzw. falschem Schmiersystem
	Abdichtungsbedingungen	… durch • zu dichte, verunreinigte, schiefgestellte, nicht richtig geschmierte oder verkehrte Dichtungen • Mehrfachdichtungen • Zu hohe Betriebsdrehzahl für Dichtung
	Unzureichende Lagerluft im Betrieb	… durch • falsches Lager • materialbedingte, unterschiedlich starke Ausdehnung der Welle und des Lagers • große Temperaturunterschiede zwischen Welle und Gehäuse • zu langer Verschiebeweg auf einem kegeligen Lagersitz • Lagereinbau auf Wellen oder in Gehäusen mit zu starker Unrundheit durch z.B. Kippfuß [a] • zu feste Passungen
	Ungeeignete Lagerbelastung	… durch • andere Anwendungsparameter als für das Lager bei der Konstruktion ursprünglich vorgesehen [b] • Linear- oder Winkelversatz von Antrieb und Arbeitsmaschine [c] • verkehrt oder mit zu hoher Vorspannung verbautes Lager • falsches Lager bzw. zu hohe Axiallasten • Unwucht oder asymmetrische Belastung [d]
Zu hoher Geräuschpegel …	Direktkontakt von Metallflächen	…durch • zu wenig oder falschen Schmierstoff • Gleiten von Wälzkörpern wegen unzureichender Belastung
	Verunreinigungen	… durch Feststoffe oder Flüssigkeiten im Lager
	Zu lose Passung	… durch • „wandernde“ Lagerringe

		• lose Wellenmutter oder nicht verspannte Lager • zu große Lagerluft
	Oberflächenschäden	… durch • Verschleiß infolge von schlechter Schmierung • Anschmierschäden verursacht von gleitenden Wälzkörpern • Dellen vom Überrollen fester Verunreinigungen oder Schläge und Stoßbelastungen e • Abschälungen aufgrund von Materialermüdung, Oberflächenschäden, Feuchtigkeit oder Stromschäden • statische Verätzung durch chemische oder flüssige Verunreinigungen • Riffelbildung wegen Stromdurchgang
	Schleifen	… durch • falsch montierte Gehäusedichtung • lose Wellenmutter oder Lager nicht verspannt • verbogene Sicherungsscheiben
Zu starke Schwingungen …	Direktkontakt von Metall-flächen	… durch Gleiten von Wälzkörpern
	Verunreinigungen	… durch • Feststoffpartikel im Lager • Dellen aufgrund von überrollten Ver-unreinigungen
	Zu lose Passung	… durch „wandernde“ Lagerringe
	Oberflächenschäden	… durch • Verschleiß infolge von schlechter Schmierung • Anschmierschäden verursacht von gleitenden Wälzkörpern • Dellen vom Überrollen fester Ver-unreinigungen oder Schläge und Stoßbelastungen

		• Abschälungen aufgrund von Materialermüdung, Oberflächenschäden, Feuchtigkeit oder Stromschäden • statische Verätzung durch chemische oder flüssige Verunreinigungen • Riffelbildung wegen Stromdurchgang
Zu starke Wellenbewegung …	Spiel	… durch • „wandernde“ Lagerringe • nicht verspannte Lager
	Oberflächenschäden	… durch • Verschleiß infolge von schlechter Schmierung • Abschälungen aufgrund von Materialermüdung oder Oberflächenschäden
	Falsche Lagerluft	… durch • falsches Lager • nicht verspannte Lager
Zu hohes Reibungsmoment bei der Wellenrotation …	Vorgespanntes Lager	… durch • falsches Lager • materialbedingte, unterschiedlich starke Ausdehnung der Welle und des Lagers • große Temperaturunterschiede zwischen Welle und Gehäuse • zu langer Verschiebeweg auf einem kegeligen Lagersitz • Lagereinbau auf Wellen oder in Gehäusen mit zu starker Unrundheit durch z.B. Kippfuß • zu feste Passungen • mit zu hoher Vorspannung verbautes Lager
	Widerstand durch Dichtung	… durch • zu dichte, verunreinigte, schiefgestellte oder nicht richtig geschmierte Dichtungen • Mehrfachdichtungen • zu hohe Betriebsdrehzahl für Dichtung
	Oberflächenschäden	… durch • Abschälungen aufgrund von Materialermüdung, oder Oberflächenschäden

		• Riffelbildung wegen Stromdurchgang
	Konstruktion	… durch • Komponenten die nicht mit dem Lagersitz fluchtend sind • Verunreinigungen bedingt durch zu hohe Wellenschulter

Tab. 1: Symptome von Wälzlagerschäden und deren Ursachen, in Anlehnung an Quelle: SKF (Hrsg.) (2012), S. 233ff.

Wie bereits zu Beginn dieses Kapitels erwähnt, lassen sich Lager kaum vor unkontrollierten Belastungen schützen. In den folgenden Absätzen werden ein paar äußere Einflüsse ergänzend zur Tab. 1 angeführt.

[a] Ein Kippfuß entsteht, wenn entweder die Montagefüße oder Montagefläche uneben sind. Bei Kippfüßen werden Fluchtungs- und Schiefstellungsprobleme unterschieden, welche mit Passplatten oder Keilen behoben werden können. Wird die Maschine lediglich fester angezogen, um den Kippfuß auszugleichen, kann das zur Verformung des Maschinengehäuses und einer falschen Ausrichtung führen.[15]

[b] Größere äußere Belastungen als bei der Konstruktion vorgesehen, führen zu erhöhter Wärmebildung im Lager und verkürzen deren Lebensdauer. Typische Beispiele dafür sind der Übergang von einer Kupplung zu einem Riemenantrieb oder einer Seilscheibe oder die nachträgliche Erhöhung der Drehzahl, auf nicht vorgesehene Bereiche.[16]

[c] Der Wellenversatz wird in Parallel- und Winkelversatz unterschieden: Beim Parallelversatz sind die Wellenrotationszentren an der Kraftübertragungsebene versetzt, ein Winkelversatz bedeutet eine unterschiedliche Neigung der Wellen. Eine genaue Wellenausrichtung vermindert neben der Lagerbelastung auch den Verschleiß an anderen Antriebskomponenten wie z.B. an Riemen und Kupplungen, verringert Reibungsverluste und Wellendurchbiegung. Dadurch wird der Geräusch- und Schwingungspegel verringert und die Energieeffizienz der Maschine gesteigert.[17] Zusätzlich ist zu erwähnen, dass sich die richtige Riemenausrichtung gleich wie eine genaue Wellenausrichtung auswirkt.[18]

[d] Unwucht oder asymmetrische Belastung können eine Umfanglast am Außenring des Lagers erzeugen. Dadurch erwärmt sich das Lager stärker. Ursachen können z.B. Verunreinigungen oder ein zu großer Gehäusesitz sein.[19]

[e] Stillstandsmarken können auch aufgrund von Schwingungen benachbarter Maschinen entstehen.[20]

[15] Vgl. SKF Gruppe (Hrsg.) (2012), S. 162.

[16] Vgl. SKF Gruppe (Hrsg.) (2012), S. 242.

[17] Vgl. SKF Gruppe (Hrsg.) (2012), S. 167.

[18] Vgl. SKF Gruppe (Hrsg.) (2012), S. 176.

[19] Vgl. SKF Gruppe (Hrsg.) (2012), S. 243.

[20] Vgl. SKF Gruppe (Hrsg.) (2012), S. 319.

3.1.1.1 Erfassung von Lagerschäden

Zur Erfassung von Lagerproblemen während des Betriebs werden in der ISO 15243:2017 die Überwachung von Schwingungen, Geräuschen, steigender Temperatur oder Schmiermittelverlust empfohlen. Weitere Erkenntnisse zu Lagerproblemen können aus der Anwendungsbeschreibung bzw. den dokumentierten Informationen zum Antriebssystem, zur Lagerstelle, zur Montage, zur Leistung, zur Stromversorgung, zu Wartungsbedingungen, zu erwarteten Belastungen und Drehzahlen und zu Umgebungsbedingungen wie z.B. Temperatur, Schmiermittel, Schmiersystemen und deren Abdichtung entnommen werden.[21]

Besonders bei Lagerschäden kann neben einer kontinuierlichen Überwachung durch Sensoren das Bedienpersonal durch veränderte Geräusche auf einen Defekt aufmerksam werden. Betriebsverhalten wie z.B. unruhiger Lauf, verminderte Arbeitsgenauigkeit oder außergewöhnliche Geräusche wie z.B. Heulen, Pfeifen und Rumpeln oder Geräusche, die sich über die Zeit allmählich verändern oder ungleichmäßig sind, sind ein Hinweis.[22]

Zur Überwachung mit Sensoren wird generell eine Kombination aus mehreren Verfahren empfohlen. Vor allem mit Schwingungsmessungen können Schäden im Frühstadium erkannt werden.[23] In Tab. 2 wird aufgelistet, welche der oben genannten Messtechnik zum Überwachen welcher Schäden geeignet ist.

Geeignete Verfahren zur Früherkennung von Schäden / Lagerschäden	Temperaturmessung	Schmiermittelüberwachung	Schwingungsmessung
Heißlauf, verfärbte Borde	X		
Erhöhter Käfigverschleiß, Ermüdung infolge von Verschleiß, Erhöhter Verschleiß, Materialüberlastung		X	
Wärmerisse, Härterisse, Schleifrisse, Ermüdungsrisse, Wälzkörperrisse, Pittings, Abblätterungen, Rissbildung, Rollkörpereindrücke - Stillstandsmarken, Elastische-plastische Verformung, Laufspuren an den Ringen, Rattermarken, Anfressen und Fresser, Schürfmarken, raue, verfärbte Laufflächen, Fress- und Gleiterscheinungen, Stromriffeln, Schmelzkrater			X
Aufschmelzungen	X		X

[21] Vgl. ISO 15243 (2017), S. 23.

[22] Vgl. Schaeffler Technologies AG & Co. KG. (Hrsg.) (2013), S. 4.

[23] Vgl. Schaeffler Technologies AG & Co. KG. (Hrsg.) (2013), S. 7.

Spaltkorrosion, Reibkorrosion, Tribokorrosion - Passungsrost, Elektrokorrosion, Kontaktkorrosion – chemische Korrosion, Schwingungskorrosion an den Planlageflächen, Schwingungskorrosion, Anschmelzungen, Abblättungen, Rollspuren über den gesamten Ringumfang, Anschmierungen, Schälungen		X	X
Käfigbruch, Wälzkörperbruch, klassische Ermüdung, Gewaltbruch, Bruch eines Ringes	Nicht möglich		

Tab. 2: Geeignete Verfahren zur Früherkennung von Lagerschäden, Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Isopp (2022), S. 227.

Ändert sich der Temperaturverlauf unter gleichbleibenden Umgebungsbedingungen, ist das ein Indiz für einen möglichen Schaden.[24] Besonders Schmierstoffprobleme können mit Temperaturmessungen gut erkannt werden. Im Normalfall erreicht das System im Betrieb eine Beharrungstemperatur. Sind plötzliche Temperaturanstiege zu erkennen, kann das auf Schmierstoffmangel oder Lagerverspannungen hinweisen. Ebenso weist ein unruhiger Temperaturverlauf mit steigender Tendenz auf eine Verschlechterung der Schmiereigenschaften hin.[25] Nach jeder Lagerschmierung kann die Temperatur wegen zu viel Schmiermittel ebenfalls für ein bis zwei Tage erhöht bleiben![26]

Die Schmiermittelüberwachung wird angewendet, um den Zustand des Schmierstoffes zu überwachen und Verunreinigungen wie Flüssigkeiten oder Feststoffe zu entdecken.[27]

Durch Schwingungsmessung können nicht nur erste Anzeichen für mechanische Schäden erkannt werden, sondern das Problem durch die gemessene Schwingfrequenz zugeordnet werden.[28] Schäden wie z.B. Vertiefungen verursachen beim Überrollen der Wälzkörper Stoßwellen, die durch Weg-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsmessung erfasst werden können. Häufig angewendet werden die Effektivwertmessung, Stoßimpulsmessung und Hüllkurvenanalyse, bei der das Frequenzsignal von den normalen Schwingungen und der Maschinendrehzahl getrennt wird. Jedes einzelne Lagerbestandteil besitzt eine eigene Fehlerfrequenz, die mathematisch bestimmt werden kann.[29]

Abhängig von der Lagergeometrie erzeugt jedes Lager eine Frequenz im niedrigen Bereich. Wird eine Schadstelle überrollt, wird ein hochfrequenter Impuls erzeugt. Die Maschinenfrequenzen lassen sich bestimmten Schäden zuordnen und werden in folgende drei Frequenzbereiche unterteilt:[30]

- 0 bis 2 kHz -> niedrige Frequenzen
- 2 bis 50 kHz -> hohe Frequenzen

[24] Vgl. SKF Gruppe (Hrsg.) (2012), S. 221.

[25] Vgl. Schaeffler Technologies AG & Co. KG. (Hrsg.) (2013), S. 5.

[26] Vgl. SKF Gruppe (Hrsg.) (2012), S. 221.

[27] Vgl. SKF Gruppe (Hrsg.) (2012), S. 222.

[28] Vgl. Schaeffler Technologies AG & Co. KG. (Hrsg.) (2013), S. 6.

[29] Vgl. SKF Gruppe (Hrsg.) (2012), S. 224.

[30] Vgl. SKF Gruppe (Hrsg.) (2012), S. 222f.

- Ab 50 kHz -> sehr hohe Frequenzen

Schwingungen verursacht durch Resonanzen, Schiefstellungen und lockere Verbindungen befinden sich im niedrigen Frequenzbereich, während sich Wälzlagerschäden durch hohe bis sehr hohe Frequenzen äußern.

Prinzipiell sind die Schwingungspegel bei waagrechten Messungen höher als bei senkrechten, da die meisten Maschinen in dieser Richtung mehr Flexibilität aufweisen. Unwucht verursacht starke Horizontalschwingungen, hingegen treten in axialer Richtung eher schwache Schwingungen auf. Diese weisen auf Schiefstellungen oder gebogene Wellen hin.[31]

3.1.1.2 Schmierung

Unzureichende Schmierung ist der Hauptgrund für Lagerausfälle. Häufige Ausfallursachen sind ungeeignetes Schmiermittel, zu wenig oder zu viel Schmiermittel, unangemessene Schmierfristen oder das Schmiermittel gelangt nicht an die vorgesehene Stelle. Zudem altert Schmiermittel mit der Zeit und verliert die Schmiereigenschaften, wodurch nachgeschmiert werden muss. Temperatur, mechanische Arbeit und Eindringen von Verunreinigungen beschleunigen diesen Vorgang. Wie häufig nachgeschmiert werden muss, basiert auf Faktoren wie Anwendung, Ausführung, Belastung, Betriebs- und Umgebungsbedingungen, Drehzahl, Wellenausrichtung, Verunreinigungen und äußeren Einflüssen wie Schwingungen. Bei beispielsweise hohen Drehzahlen oder um Verunreinigungen aus dem Lager fernzuhalten, wird häufig eine kontinuierliche Nachschmierung, welche auch automatisch erfolgen kann, angewendet. Dadurch lässt sich der Nachschmierpunkt und die Menge gut steuern und es besteht eine geringere Gefahr von Verunreinigung. Alternativ gibt es auch Schmiermittel, z.B. in Öl getränkter Polymerwerkstoff oder Schmiermittel auf Graphitbasis, die nicht nachgeschmiert werden müssen.[32]

Der Füllgrad der Lager ist stark von der Anwendung und der Lagerart abhängig und wird deshalb in dieser Arbeit nicht näher behandelt. Bleibt beim Nachfüllen kein Leerraum vorhanden, kann infolgedessen die Betriebstemperatur um bis zu 50 °C wegen Walkarbeit im Lager steigen. Zudem kann dabei Schmiermittel verkoken.[33]

Bevor ein neues Schmiermittel eingesetzt wird, muss kontrolliert werden, ob es in Ordnung ist und z.B. keine Anzeichen von Verfärbungen, Schimmelbildung, Wassergehalt oder unnormale Ölabscheidungen aufweist. Handelt es sich um ein anderes Schmiermittel als bereits im Lager verwendet, muss die Kompatibilität der Schmiermittel beachtet werden. Wird das Schmiermittel erneuert, muss das verbrauchte Schmiermittel komplett entfernt werden.[34]

[31] Vgl. SKF Gruppe (Hrsg.) (2012), S. 222f.

[32] Vgl. SKF Gruppe (Hrsg.) (2012), S. 180ff.

[33] Vgl. SKF Gruppe (Hrsg.) (2012), S. 180ff.

[34] Vgl. SKF Gruppe (Hrsg.) (2012), S. 180ff.

3.1.1.3 Handhabung und Montage

Damit Wälzlager möglichst lange laufen, sind die richtige Handhabung und Montage essenziell. Neben dem sorgfältigen Einbau muss auf Sauberkeit, Genauigkeit und die Anwendung des richtigen Einbauverfahrens mit geeigneten Werkzeugen geachtet werden. Schon bei der Aufbewahrung der Lager ist es wichtig, dass sie in einem kühlen, trockenen Raum in Verpackung auf z.B. Regalen gelagert werden, wo sie keinen Schwingungen ausgesetzt sind. Die Montage soll ebenfalls in einem möglichst sauberen, trockenen Raum und ohne mechanische Beschädigung etwa durch Schläge mit einem Hammer erfolgen. Muss das Lager in ungeschützter Umgebung verbaut werden, sind Maßnahmen gegen Verschmutzung, wie z.B. Einwickeln mit Kunststofffolie, zu treffen. Metallstaub und Späne von angrenzenden Maschinen sowie andere Verunreinigungen können sich negativ auf die Lagerlebensdauer auswirken. Der Schmierstoff muss nicht nur in der richtigen Menge eingebracht werden, sondern auch zum Lager und Korrosionsschutzmittel passen. Handelt es sich um neue Lager, ist ggf. der Korrosionsschutz an der Lageraußenseite zu entfernen. Außerdem spielt Genauigkeit genauso bei den zugehörigen Lagerungskomponenten eine Rolle. Grate und Rost sind zu entfernen und die Komponenten auf Maß- und Formgenauigkeit zu überprüfen. Besonders bei großen Lagern ist das Ergebnis akkurater, wenn das Messgerät und die Komponenten dieselbe Temperatur haben.[35]

3.1.1.4 Verhinderung von Verschmutzungen

Dichtungen verhindern das Eindringen von Schmutz ins Lager. Deren Lebensdauer ist jedoch stark von den Betriebs- und Umgebungsbedingungen, der Wellenausrichtung, Einbautechniken und der Instandhaltung abhängig. Da einige Lagerarten im Nachhinein nicht getrennt werden können und sich daher kaum reinigen lassen, ist besonders bei den letzten beiden Bereichen ein Höchstmaß an Sauberkeit einzuhalten. Ergänzend (zu 3.1.1.3) wird empfohlen, Fett- und Ölspritzer sofort wegzuwischen und vor der Nachschmierung die Schmiernippel zu reinigen. Für den Transport des Schmiermittels wird ein dafür vorgesehener sauberer Behälter empfohlen. Nach dem Schmiervorgang verhindern geeignete Kappen das Eindringen von Schmutz. Bei Reinigungsarbeiten ist besonders darauf zu achten, dass kein Schmutz durch die Dichtungen ins Lager gelangt.[36]

3.1.1.5 Lagerströme

Lagerströme können die Lebensdauer von Lagern deutlich verkürzen und verursachen neben Oberflächenschäden schlechtere Schmiereigenschaften, denn die vorzeitige Alterung vom Schmierstoff wird durch die strombedingte Oxidation und Anreicherung von Eisenpartikeln beschleunigt. „Im Mischreibungsbereich (metallischer Kontakt) kommt es zu einer Verschmelzung der beteiligten Oberflächen, die aufgrund der Lagerrotation sofort wieder aufbricht. In beiden Fällen wird darüber hinaus Material aus den Oberflächen herausgelöst, das sofort zu Schmelzperlen erstarrt. Zum Teil gehen diese ins Schmiermittel über, zum Teil lagern sie sich auf den Metalloberflächen ab. Durch fortdauernde Überwälzung können Krater und Schmelzperlen abgeflacht und geglättet werden. Bei andauerndem

[35] Vgl. SKF Gruppe (Hrsg.) (2012), S. 46ff.

[36] Vgl. SKF Gruppe (Hrsg.) (2012), S. 26f.

Stromfluss werden die beteiligten (dünnen) Oberflächenschichten im Lauf der Zeit so vielfach umgeschmolzen.“[37] Diese Schmelzkrater regen den Wälzkörper bei Überrollung zur radialen Bewegung an, bei der die Schmierfilmdicke beim Zurückschwingen verringert wird. Daraus folgend finden in diesem Bereich erneut Stromübergänge statt. Prinzipiell besteht bei effektiven Stromstärken kleiner 0,1 A/mm² keine Gefahr. Hingegen ist ab 1 A/mm² mit Stromdurchgangsschäden zu rechnen. Eine Lagerüberhitzung kann die Folge sein. Mit der Zeit bedecken die „Riffel“ den gesamten Umfang des Lagers.[38]

Die „klassischen“ parasitären Lagerströme, welche induktiver Natur sind, treten aufgrund von magnetischen Asymmetrien auf. Die dadurch induzierte Spannung verursacht einen Strom, der über die Welle, das Lager und dem Gehäuse fließt, wenn die Spannung hoch genug ist, um den isolierenden Schmierfilm im Lager zu überbrücken. Mit zunehmender Achshöhe treten diese Ströme vermehrt auf, können aber gut durch Isolierung der Nichtantriebsseite, auch Non Drive End (NDE) genannt, unterdrückt werden. Werden Motoren über FU betrieben, können noch weitere unterschiedliche Lagerstromarten auftreten.[39] Bei Motoren, die häufig mit Drehzahlen unter 800-1000 U/min oder sehr schnellen Drehzahländerungen betrieben werden, bildet sich kein gleichmäßiger stabiler Schmierfilm aus. Das begünstigt Lagerströme.[40]

Es werden vier Arten von Lagerströmen, die bei schnellschaltenden IGBT-Umrichtern vorkommen, unterschieden: der kapazitive Lagerstrom und der „Electrostatic Discharging Machining“-Strom (EDM), die vom Einfluss der Gleichtaktspannung auf die Lager abhängen sowie der Zirkularstrom und der Rotorerdstrom. Letztere entstehen durch Erdströme, die aus der Gleichtaktspannung und der Kapazität zwischen Statorwicklung und Gehäuse fließen. Auf den kapazitiven Lagerstrom wird nicht genauer eingegangen, da er für die Lager nicht gefährlich ist und im Vergleich zu den anderen Strömen eine deutlich kleinere Amplitude aufweist.[41]

[37] Schaeffler Technologies AG & Co. KG (Hrsg.) (2020), S. 7.

[38] Vgl. Schaeffler Technologies AG & Co. KG (Hrsg.) (2020), S. 7f.

[39] Vgl. Mütze (2003), S. 3f.

[40] Siemens AG (Hrsg.) (2017), S. 142ff.

[41] Vgl. Mütze (2003), S. 10.

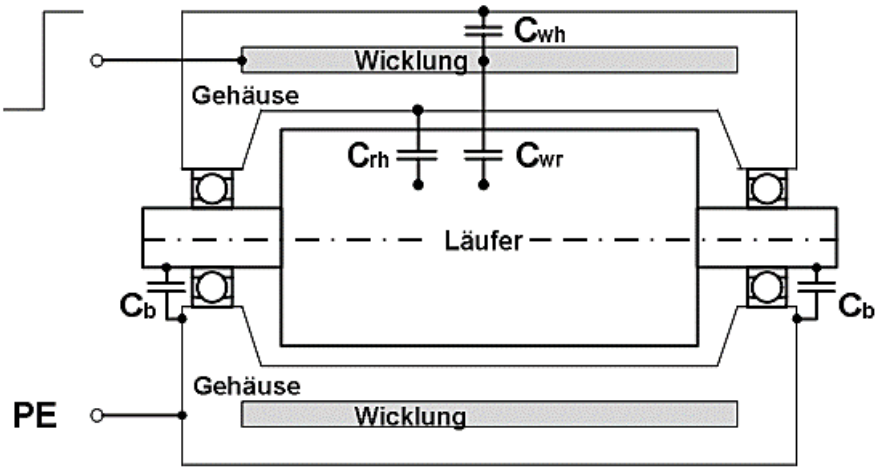


Abb. 3: Darstellung interne Kapazitäten Motor, Quelle: Siemens AG (Hrsg.) (2017), S. 141.

Kapazitäten bilden sich innerhalb des Antriebs, wie in Abb. 3, dargestellt, zwischen Ständerwicklung und Motorgehäuse, Ständerwicklung und Läufer, sowie Gehäuse und Läufer und über die Lager. Ist der Schmierfilm der Lager intakt, sind die Komponenten gegeneinander isoliert. Zu hohe Spannung führt zu einem Durchschlag am Lager, dadurch kann Strom fließen.[42] In Abb. 4 werden die drei relevantesten Lagerstromarten Zirkularstrom, EDM-Strom und Rotorerdstrom dargestellt und anschließend erklärt.

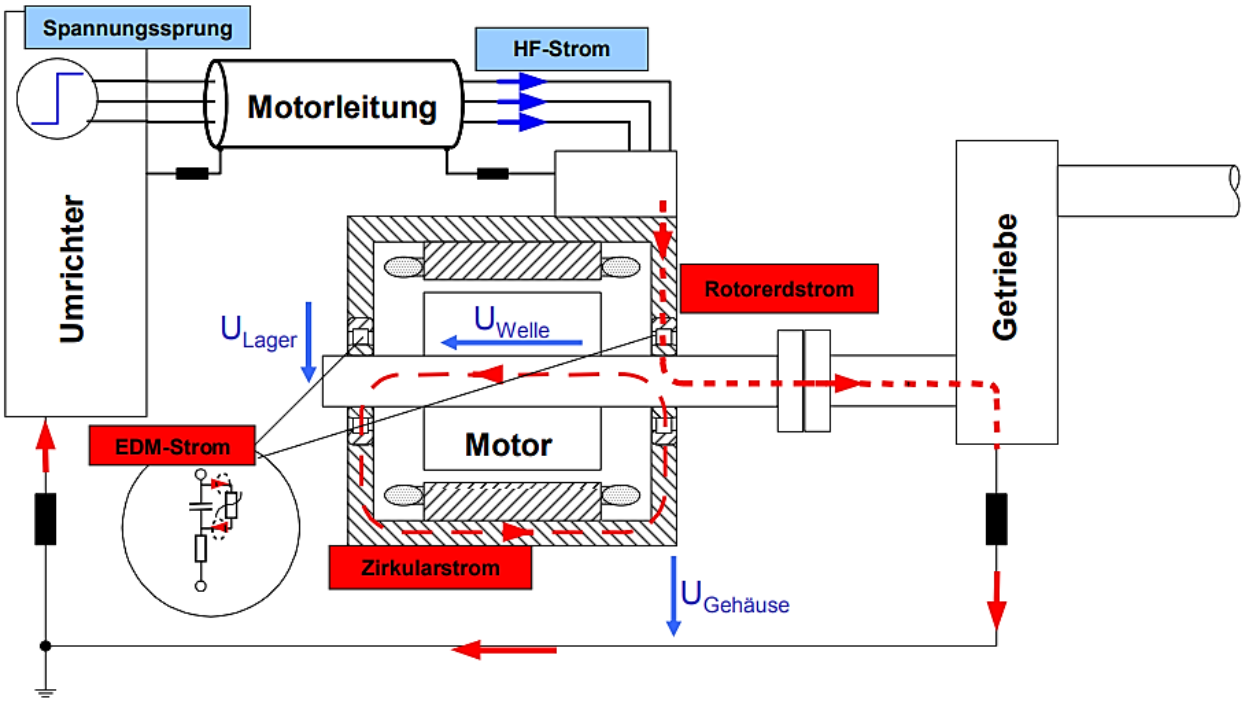


Abb. 4 Darstellung der verschiedenen Lagerstromarten, Quelle: Siemens AG (Hrsg.) (2017), S. 141.

Beim Versagen des isolierenden Schmierfilms fließt ein Zirkularstrom zwischen der Welle, den beiden Lagern und dem Gehäuse im Kreis. Durch die Umladung der Wicklung-Gehäuse-Kapazität bei jeder

[42] Vgl. Siemens AG (Hrsg.) (2017), S. 141.

Schaltflanke des Wechselrichters entsteht ein hochfrequenter, kapazitiver „Leckstrom“ zwischen Wicklung und Motorgehäuse. Die dadurch hervorgerufene magnetische Asymmetrie im Motor induziert eine hochfrequente Wellenspannung.[43]

EDM bezeichnet die Umladung der Lagerkapazität bei jeder Spannungsflanke an der Wicklung. Bei zu hoher Spannung am Lager, kann der Schmierfilm des Lagers durchschlagen werden, wodurch sich die Lagerkapazitäten und die Kapazität zwischen Läufer und Gehäuse mit einem Stromimpuls kurzzeitig entladen.[44]

Der Rotorerdstrom ist ein hochfrequenter, kapazitiver „Leckstrom“ zwischen Wicklung und Gehäuse, der zum Wechselrichter zurückfließt. Besitzt die Motorgehäuseerdung einen zu großen Widerstand für hochfrequente Ströme, dann fällt der Strom zwischen Gehäuse und Erdung ab. Gibt es eine besser leitende Verbindung, kann der Strom auch über andere Wege zurück zum Wechselrichter, wie z.B. über die Welle, geerdete Kupplungen, Getriebe oder Arbeitsmaschinen, fließen. Dadurch können auch Lager an Getrieben und Arbeitsmaschinen innerhalb kurzer Zeit beschädigt werden.[45]

3.1.1.6 Maßnahmen Lagerströme

Parameter, die Auswirkungen auf diese Lagerstromarten haben, sind der Lagertyp, das Motordesign, die Drehzahl und Lagertemperatur, die Erdung, Kabeltyp und -länge, FU-Typ und Filter. Speziell die Motorgröße hat einen Einfluss auf die Art und Höhe der Lagerströme sowie die Höhe der Erdströme. Bei kleinen Motoren treten deshalb nur EDM-Ströme auf, wogegen bei großen Motoren die Zirkularströme überwiegen. Die Drehzahl und Lagertemperatur beeinflussen die Höhe der Ströme. Hingegen wirkt sich das verwendete Kabel nur beim Zirkularstrom und Rotorerdstrom aus. Isolierte Wälzlager und Filter haben ebenfalls positive Auswirkungen auf die Lagerströme, allerdings muss der Filter, für die die Reduzierung von EDM-Strömen, die Gleichtaktspannung eliminieren können.[46] Die detaillierte Auflistung der Parameter, die die jeweiligen Ströme beeinflussen können, kann im Anhang 1 nachgelesen werden.

Maßnahmen, die Lagerströme verringern, werden entweder FU-seitig oder am Motor selbst umgesetzt. Ausgangsfilter, spezielle Spannungsmodulationstechniken, Gleichtaktfilter und geschirmte Kabel können FU-seitig Abhilfe verschaffen. Zu den Maßnahmen, welche am Motor umgesetzt werden können, zählen neben den isolierten Lagern, die Keramik- oder Hybridlager, isolierte Kupplungen, Schmiermittel mit niedriger Impedanz, Rotorbürsten und ein elektrostatisch geschirmter Rotor.[47]

Eine Elektromagnetische-Verträglichkeits-gerechte (EMV) Installation sieht bei Antrieben die Schutzerde (PE) und die Funktionserde (FE) vor, damit sämtliche Komponenten wie z.B. Transformator, FU, Motor, Getriebe und Maschine dasselbe Potential haben, denn ohne Spannung kann kein Strom fließen. Die Schutzerde bietet durch viele Verbindungsstellen zur Fundamenterde einen guten Potentialausgleich, vor

[43] Siemens AG (Hrsg.) (2017), S. 142.

[44] Siemens AG (Hrsg.) (2017), S. 142.

[45] Siemens AG (Hrsg.) (2017), S. 142.

[46] Vgl. Mütze (2003), S. 169ff.

[47] Mütze (2003), S. 71.

allem für den niederfrequenten Bereich. Für Hochfrequenzströme muss eine zusätzliche Funktionserde, welche über einen weiten Frequenzbereich eine niedrige Impedanz besitzt, zwischen den Antriebskomponenten installiert werden. Außerdem ist für die Verbindung zwischen Motor und FU eine geschirmte Leitung zu verwenden.[48]

Die Verwendung isolierter Lager auf der NDE erhöhen durch die schlechte Leitfähigkeit die Impedanz innerhalb des Zirkularstromkreises.[49] Neben isolierten Lagern mit Keramikbeschichtung werden auch Hybridlager angeboten. Bei diesen bestehen die Ringe aus blankem Wälzlagerstahl und die Wälzkörper aus Keramik. Dadurch bieten sie eine noch bessere Isolation.[50]

Filter reduzieren Spannungssteilheiten und verringern damit die Zirkularströme und Rotorerdströme erheblich. Filter, welche die Hochfrequenzkomponenten der Gleichtaktspannung aufheben, unterdrücken alle Arten von Lagerströmen.[51]

3.1.2 Elektromagnetische Verträglichkeit und Umgebungsbedingungen

„Die Elektromagnetische Verträglichkeit befasst sich mit der möglichen Beeinträchtigung der Funktion von elektrischen und elektronischen Betriebsmitteln (Geräten, Einrichtungen) auf Grund von in der elektromagnetischen Umgebung, in der die Betriebsmittel (Geräte, Einrichtungen) betrieben werden, vorhandenen Störgrößen.“[52] In diesem Kapitel werden die elektromagnetischen Störgrößen Spannungsschwankungen, Spannungseinbrüche, Spannungsunsymmetrien und Oberschwingungen genauer betrachtet. Vor manchen dieser Störgrößen kann der Motor durch den vorgeschalteten FU (siehe Kapitel 3.4) geschützt werden.

3.1.2.1 Spannungsschwankungen

Die Spannung des Energieversorgungsnetzes ist aufgrund von Lastschwankungen, betrieblichen Einstellungen des Elektrizitätsversorgungsnetzes, an das Versorgungsnetz angeschlossene Betriebsmittel, Schalthandlungen, Spannungsabweichungan außerhalb der üblichen Abweichungen nicht konstant.[53] Gemäß OVE EN 61000-2-4 wird in europäischen Versorgungsnetzen bei Störgrößen der Klasse 3 eine Spannungsabweichung von

- $0{,}90 * U_N \leq U_{Netz} \leq 1{,}1 * U_N$ (dauernd) (3.1)
- $0{,}85 * U_N \leq U_{Netz} \leq 0{,}9 * U_N$ (<= 60 *s*)

U_N/V Nennspannung
U_{Netz}/V Netzspannung

erwartet.[54]

[48] Siemens AG (Hrsg.) (2017), S. 142ff.

[49] Siemens AG (Hrsg.) (2017), S. 142ff.

[50] Vgl. Schaeffler Technologies AG & Co. KG (Hrsg.) (2020), S. 8ff.

[51] Vgl. Mütze (2003), S. 80.

[52] OVE EN 61000-2-2 (2020), S. 26.

[53] Vgl. OVE EN 61000-2-2 (2020), S. 16.

[54] Vgl. OVE EN 61000-2-2 (2020), S. 12.

Die Auswirkungen von Spannungsabweichungen auf Antriebe sind abhängig von der Höhe, Dauer, sowie dem Betriebs- bzw. Lastzustand des Antriebs. Im besten Fall haben sie keinen Einfluss, im schlechtesten Fall führen sie zur Abschaltung des Antriebs. [55]

3.1.2.2 Spannungseinbrüche

Im Gegensatz zu den Spannungsschwankungen sind plötzliche Spannungseinbrüche unvorhersagbare Kurzzeitunterbrechungen, die überwiegend auf Grund von Fehlern im Energieversorgungsnetz, großen Anlagen oder meteorologischen Bedingungen entstehen. Sie variieren stark in Amplitude und Dauer, und ihr Wert hängt von der Nähe des Beobachtungspunktes zum Punkt, an dem der Kurzschluss auftritt, ab. Direkt beim Kurzschluss beträgt der Spannungseinbruch nahezu 100 %. Die Einbruchtiefe ist bei anderen Effekten, die einen Spannungseinbruch verursachen, wie z.B. das Schwanken von großen Lasten, geringer. Wird der Fehler durch Schutzsysteme erkannt, kann ein Spannungseinbruch, abhängig von der Spannungsebene des Netzes, in Bruchteilen einer Sekunde bis zu wenigen Sekunden beseitigt werden.[56]

3.1.2.3 Spannungsunsymmetrien

Unter Spannungsunsymmetrien „fasst man alle Erscheinungen zusammen, die sich infolge einer Störung der Spannungsversorgung oder einer Abweichung vom gleichwertigen Aufbau der Wicklungsstränge in Ständer oder Läufer ergeben.“[57] Als Ursache für Spannungsunsymmetrien gelten neben dem Energieversorgungssystem (Ansprechen einer Schutzeinrichtung) die Motorverkabelung, Anschlussklemmen am Motor oder Wicklungen (Unterbrechung oder schlechter Kontakt).[58] Im Extremfall fällt eine der idealerweise symmetrischen Strangspannungen komplett aus wodurch beim Asynchronmotor nur noch zwei der Wicklungsstränge mit Spannung versorgt werden. In diesem Betriebszustand kann der Antrieb als Einphasenmaschine gesehen werden. Fällt eine Phase während des Betriebs aus, kann der Motor mit nur zwei Phasen bei gleichem Schlupf, jedoch mit verringertem Drehmoment und erhöhter Stromaufnahme, weiterlaufen.[59] Eine erhöhte Stromaufnahme geht einher mit erhöhten Betriebstemperaturen - wodurch die Isolation beschädigt werden kann - sowie stärkeren Verlusten. Zudem kann ein zu geringes Drehmoment eine höhere mechanische Belastung verursachen.[60] Ein erneuter Anlauf ist bei Ausfall einer Strangspannung allerdings nicht mehr möglich, da dem Motor das Anlaufmoment fehlt. Akustisch äußert sich dieser fehlerhafte Betrieb durch einen Brummton, der durch eine vom Wechselfeld erzeugte 100-Hz Schwingung im Stator hervorgerufen wird.[61]

---

[55] Vgl. Siemens AG (Hrsg.) (2017), S. 52.

[56] Vgl. OVE EN 61000-2-2 (2020), S. 35f.

[57] Fischer (2004), S. 228.

[58] Vgl. Fluke Austria GmbH (2023), Online-Quelle [03.08.2023]

[59] Vgl. Fischer (2004), S. 228ff.

[60] Vgl. Fluke Austria GmbH (2023), Online-Quelle [03.08.2023]

[61] Vgl. Fischer (2004), S. 228ff.

3.1.2.4 Oberschwingungen

Unter Oberschwingungen werden unerwünschte, sinusförmige Oberschwingungsspannungen und -ströme zusammengefasst, die mit einem Vielfachen der Grundfrequenz schwingen. Diese entstehen unter anderem durch nichtlineare Lasten der Netznutzer, überlastete Transformatoren, USV-Anlagen oder elektronische Systeme wie FUs.[62] Letztere verzerren durch Stromoberschwingungen die Netzspannung. Um den Zwischenkreiskondensator zur Energiepufferung zu laden, muss die Netzspannung größer als der Momentanwert der Zwischenkreisspannung sein, was zu einem lückenden, nicht sinusförmigen Stromfluss, in Form von sinusförmigen Stromanteilen mit einem Vielfachen der Netzfrequenz führt. Diese Stromoberschwingungen verursachen einen Spannungsabfall an der Netzimpedanz.[63] Hinzu kommt, dass der Anteil an Zwischenharmonischen, die kein ganzzahliges Vielfaches von der Netzfrequenz sind, in Netzen unter anderem wegen FUs ansteigt.[64] Abhilfe verschaffen neben FUs mit höheren Pulszahlen, Transformatoren mit unterschiedlichen Schaltgruppen, Filter oder Drosseln, die den Strom glätten, indem sie die Spannungs- und Stromspitzen dämpfen.[65]

Am häufigsten kommen die Oberschwingungen 3., 5. und 7. Ordnung im Netz vor. Die Oberschwingungen 3. Ordnung und deren Vielfache, welche von einphasigen Verbrauchern verursacht werden, beeinflussen jedoch nicht das Drehfeld, sondern summieren sich lediglich im Neutralleiter auf. Die anderen ungeradzahligen Oberschwingungen werden von dreiphasigen Verbrauchern erzeugt und wirken abwechselnd mit oder entgegengesetzt der Grundfrequenz.[66] Außerdem können die Oberschwingungen beim Betrieb von Asynchronmotoren mit FU zusätzliche Verluste, Pendelmomente und Geräusche hervorrufen.

Wie stark sich die zusätzlichen Verluste auswirken, ist abhängig vom Frequenzbereich, dem FU und der Gestaltung des Motors bezüglich Wicklungen, Nutformen und Schrägung. Abhängig von der Frequenz verursachen Oberschwingungen in den Strangspannungen geringe Änderungen der Flussdichte im magnetischen Kreis. Bei niedrigen Frequenzen von einigen 100 Hz machen die dadurch verursachten zusätzlichen Eisenverluste den Großteil der zusätzlichen Verluste aus. Im Kilohertz-Bereich bilden dagegen Wärmeverluste den Hauptanteil.[67]

„Von größerer Bedeutung ist das Zusammenwirken von Oberfelder gleicher Polzahl, die aber mit unterschiedlicher Winkelgeschwindigkeit zueinander umlaufen. Sie erzeugen ständig wechselnde Drehmomente, die in ihrer zeitlichen Summe null sind und als Pendelmomente bezeichnet werden.“[68] Diese regen den Motor zur mechanischen Torsionsschwingung an. Deshalb ist bei torsionskritischen Drehzahlen

[62] Vgl. TÜV SÜD AG (2023), Online-Quelle [02.09.2023]

[63] Vgl. SEW-EURODRIVE GmbH & Co KG (Hrsg.) (2013), S. 17.

[64] Vgl. OVE EN 50160 (2020), S. 18.

[65] Vgl. TÜV SÜD AG (2023), Online-Quelle [02.09.2023]

[66] Vgl. ABB Schalt- und Steuerungstechnik GmbH (Hrsg.) (1999), S. 4f.

[67] Vgl. Fischer (2004), S. 249.

[68] Fischer (2004), S. 250.

darauf zu achten, dass sie außerhalb der Pendelfrequenzen liegen. Außerdem verursachen diese Oberfelder Zugkräfte im Blechschnitt, die Schwingungen im hörbaren Frequenzbereich erzeugen. Diese Geräusche sind besonders stark bei Taktfrequenzen im unteren Kilohertz-Bereich. Treten innerhalb des Drehzahlbereichs des Antriebs bei bestimmten Stellen mechanische Resonanzen auf, kann sich die Lautstärke um bis zu 15 dB im Vergleich zum Betrieb mit Sinusspannung erhöhen.[69]

3.1.2.5 Spannungstransienten

Zu schnelle Spannungsanstiege der gepulsten Zwischenkreisspannung kleiner als eine Mikrosekunde können Durchschläge in der Statorwicklung verursachen und die Isolation beschädigen. Abhängig von der Länge der Kabelverbindung zum Motor entstehen beim Schalten der Zwischenkreisspannung Wanderwellen. Diese werden an den Motoranschlüssen reflektiert, wodurch sie sich in ihrer Höhe verdoppeln können. Bei sehr kleinen Impulsbreiten können sich die transienten Spannungsimpulse sogar bis zum dreifachen der Zwischenkreisspannung überlagern. Zusätzliche Verschiebungsströme, hervorgerufen durch Querkapazitäten zwischen Wicklungen und Blechpaket, können außerdem zur ungleichmäßigen Spannungsverteilung entlang der Wicklung führen. Daraus resultierend übernehmen die Eingangsspulen den Großteil der Spannungsbelastung. Die Isolation kann dadurch mit mehr als der zehnfachen Feldstärke im Vergleich zum Netzbetrieb belastet werden. Abhilfe verschaffen eine geordnete Lage der Windungen ohne Kreuzungspunkte plus Phasentrenner, teilentladungsbeständigere Lacke oder eine Anstiegszeitbegrenzung durch einen Filter.[70] Typisch für eine extreme, kurzzeitige Überlastung ist die Blasenbildung oder die Verformung der Isolation.[71]

3.1.3 Wicklungsschäden

Wicklungsschäden treten entweder als primärer oder sekundärer Fehler (Folgefehler) auf. Die Wicklungsfehler werden in Unterbrechungen, Körperschluss, Strangschluss und Windungsschluss unterschieden:[72]

- Unterbrechungen der Leiter werden entweder in der Wicklung selbst oder an der Klemmstelle zur Zuleitung hervorgerufen. Als Fehlerquellen gelten entweder Ausfälle der Netzleiter oder Kontaktprobleme an den Klemmstellen.
- Körperschlüsse oder Strangschlüsse treten bei neuen Wicklungen erst bei überhöhten Spannungen von mehreren tausend Volt auf. Neben mechanischen Schäden oder Feuchtigkeit können auch FUs die Ursache sein.
- Windungsschlüsse treten meist als sekundäre Ursache durch Isolationsschäden in Erscheinung. Die verringerte Windungsanzahl führt zu erhöhten Induktionsströmen in den betroffenen Windungsteilen. Diese zeigen sich durch unsymmetrische Stromaufnahme und häufig mit deutlich

[69] Vgl. Fischer (2004), S. 250.

[70] Vgl. Fischer (2004), S. 250f.

[71] Vgl. Greiner (2005), S. 12 Teil I.

[72] Vgl. Greiner (2005), S. 1ff Teil I.

verbrannten Spulenabschnitten durch die stärkere Erwärmung. Bei gleichmäßiger Überlast können alle Spulen betroffen sein und sich bräunlich verfärben, bis schließlich irgendwo ein Windungsschluss auftritt.

Treten Wicklungsschäden großteils im selben Bereich auf, können Rückschlüsse aus der Schadenstelle gezogen werden. Kommen die meisten Schäden z.B. im unteren Statorsegment vor, so können Wasser oder Feuchtigkeit die Ursache sein. Generell treten die meisten Schadstellen außerhalb der Nut am Wickelkopf auf. Mechanische Beschädigungen von der Demontage, Feuchtigkeit oder Fremdkörper können Gründe für Schäden sein.[73]

3.1.4 Wellenschäden

Grundsätzlich sind Wellen so zu dimensionieren, dass bei normaler Verwendung und Beachtung der üblichen Stoßmomente keine Schäden auftreten, weshalb Schäden somit fast immer auf eine Überbeanspruchung hindeuten. Bei Wellen treten häufig Schäden durch Verbiegung und Torsion auf. Typische Schadstellen an Wellen sind z.B. der Ritzelsitz, die Passfedern und Passnuten. Auch ein schlechter Passsitz zwischen Welle und Nabe kann zu Schäden führen, da er dadurch wenig zur Drehmomentübertragung beiträgt und der Großteil der Kraftübertragung durch die Passfeder geschieht. Wird eine Arbeitsmaschine nur über eine Kupplung und verspannungsfreien Aufbau angetrieben, wirkt nur eine Torsionskraft auf die Welle. Biegebeanspruchungen hingegen sind abhängig vom Übertragungsmittel. Die Ursache für verbogene Wellen oder beschädigte Passfedern können z.B. Blockierung aus vollem Lauf oder falsch gewählte bzw. eingestellte Übertragungselemente sein. Dazu zählen z.B. die zu hohe Vorspannung eines Riemens oder ein zu klein gewählter Teilkreisdurchmesser eines Übertragungselements wie z.B. Kettenrädern oder Riemenscheiben. Zudem kann eine ungünstige Anordnung dieser Elemente an der Wellenstirn hohe Radialkräfte statt am Wellenbund verursachen.[74]

Probleme wie Spiel, Ausrichtungsfehler oder Wellenunwucht äußern sich durch Schwingungen und führen zu vorzeitiger Abnutzung an den mechanischen Komponenten:[75]

- Lockere Teile bzw. ein übermäßiger Abstand zwischen Teilen wie z.B. eine spielbehaftete Kupplung oder wie in einem Lager wirken sich negativ aus.
- Ist die Antriebswelle nicht richtig auf die Lastwelle ausgerichtet, können die Kräfte an die Motorwelle übertragen werden, was zu einer höheren mechanischen Beanspruchung und höherem Verschleiß führt.
- Bei jeder Maschine treten Unwuchten innerhalb gewisser Toleranzen auf. Ist die Unwucht außerhalb des Rahmens, sollen Maßnahmen ergriffen werden. Ursachen für eine Wellenunwucht können neben Verschmutzung, Herstellungsabweichungen und fehlende Ausgleichsgewichte auch eine ungleichmäßige Masseverteilung durch Verschleiß sein.

[73] Vgl. Greiner (2005), S. 12ff Teil I.

[74] Vgl. Greiner (2005), S. 4ff Teil III.

[75] Vgl. Fluke Austria GmbH (2023), Online-Quelle [03.08.2023]

3.1.5 Getriebeschäden

Bei bestimmungsgemäßer Verwendung und Schmierung sind Getriebe nahezu verschleißfrei. Trotzdem treten Probleme wie Geräusche, Gewaltbrüche, Verschleiß und Erwärmung auf. Da die Bruchfestigkeit bei richtig bemessenen Getrieben normalerweise weit höher als das Anzugsmoment des Motors liegt, kann angenommen werden, dass Gewaltbrüche an z.B. Wellen, Passfedern oder Zähnen auf dynamische Stoßmomente jenseits der Motormomente zurückzuführen sind. Wenn trotzdem Blockierungen zu erwarten sind, ist ein Spiel bei Übertragungselementen wie Kupplungen oder Ketten zu vermeiden und die Bauteile entsprechend der Belastungen zu überdimensionieren oder ein mechanischer Überlastschutz wie z.B. Rutschkupplungen einzusetzen. Zudem wird dem Schmiermittel beim Verschleiß ein großer Einfluss zugeschrieben. Neben der Druckaufnahmefähigkeit des Schmierfetts können auch hohe Schmierstofftemperaturen zu höherem Verschleiß bzw. frühzeitiger Alterung führen. Verschleiß kann aber genauso durch Überlast, eingebrachte Fremdkörper, Eingriffsstörungen der Zähne oder ungeeignetem oder fehlerhaftem Werkstoff verursacht werden.[76] Im Gegensatz zu Lagern führt bei Getrieben ein Versagen eher zu abrupten Ausfällen, weil die größten Spannungen am Zahnansatz auftreten und dort die Ermüdungserscheinungen über die Zeit zum Bruch führen können. Die bei Getrieben auftretende Zahneingriffsschwingung ist keine sinusförmige Schwingung, sondern besteht im Spektrum aus impulsartigen harmonischen Oberschwingungen der Zahneingrifffrequenz. Abgenutzte Zahnprofile verstärken diese Schwingungen.[77]

3.1.6 Läuferschäden

Schäden an Käfigläufern von Asynchronmotoren kommen durch die robuste Bauart und Wirkungsweise zwar selten vor,[78] können aber gut detektiert werden.

Während Stabbrüche sich mit erhöhter Stromaufnahme jedoch etwas geringerer Bemessungsdrehzahl bei Bemessungsleistung äußern, verschlechtern sich bei Käfigschäden die Hochlaufeigenschaften. Bei Betrachtung der Hochlauf-Drehmomentkennline sind z.B. schleppende Beschleunigung oder Verzögerung im Vergleich zum Originalzustand zu beobachten. Selbst kleine Haarrisse in den Stäben können das Betriebsverhalten des Antriebs beeinträchtigen. Durch einen Kurzschlussversuch bei Bemessungsspannung können Anzugsmoment und Anzugsstrom über den Zustand des Läufers Aufschluss geben. Abweichungen zum Neuzustand von minus 20 bis 25 % sind als kritisch zu betrachten.[79]

Wicklungsfehler wie Unterbrechungen oder Kurzschlüsse oder Unterbrechungen im Käfig können mit Schwingungsmessungen erkannt werden. Bei elektrischen Ursachen nehmen die Schwingungen bei höherer Belastung zu und hören beim Abschalten des Antriebs auf.[80]

---

[76] Vgl. Greiner (2005), S. 9ff Teil III.

[77] Vgl. Beckhoff Automation GmbH & Co. KG, Online-Quelle [28.09.2023]

[78] Vgl. Greiner (2005), S. 1 Teil II.

[79] Vgl. Greiner (2005), S. 9ff Teil II.

[80] Vgl. Greiner (2005), S. 9 Teil II.

Stabbrüche oder andere Käfigschäden können über den Statorstrom detektiert werden. Probleme äußern sich als oberes und unteres Seitenband von Harmonischen der Läuferdrehzahl. Außerdem weisen Stabbrüche Schwankungen bei den Amplituden der Seitenbänder auf.[81]

3.2 Condition Monitoring Parameter

Zusammenfassend zeigen Tab. 3 und Tab. 4 (ergänzend zu den vorherigen Anschnitten) über welche Symptome oder Parameteränderungen die in ISO 17359:2018 genannten Fehler der Maschinentypen Elektromotoren und Gebläse erkannt werden können. Diese Tabellen sollen die Auswahl der zu überwachenden Parameter und notwendigen Sensoren unterstützen.

Symptom oder Parameteränderung / Beispiel für Fehler	Strom	Spannung	Widerstand	Leistung	Moment	Drehzahl	Schwingung	Temperatur	Auslaufzeit	Axialer Fluss	Öl Partikel
Rotor Wicklung	X			X	X	X	X	X		X	
Stator Wicklung	X						X	X		X	
Exzentrischer Rotor	X						X			X	
Lagerschaden	X				X		X	X	X		X
Verschlechterung der Isolation	X	X	X								
Verlust von Einspeisephasen	X	X					X			X	
Unwucht							X				
Ausrichtungsfehler							X				

Tab. 3: Beispiele für Elektromotorfehler verbunden mit Messparameter und –techniken, Quelle: ISO 17359 (2018), S. 13.

[81] Vgl. Greiner (2005), S. 9 Teil II.

Symptom oder Parameteränderung / Beispiele für Fehler	Luftverlust	Längenmessung	Leistung	Druck oder Vacuum	Drehzahl	Schwingung	Temperatur	Auslaufzeit	Öl Partikel	Ölverlust
Beschädigtes Laufrad		X	X	X	X	X	X	X	X	
Beschädigte Öldichtungen		X		X	X				X	X
Beschädigte Beläge	X									
Exzentrisches Laufrad			X	X	X	X	X	X		
Lagerschaden		X	X		X	X	X	X	X	X
Lagerverschleiß		X				X	X	X	X	
Montagefehler						X				
Rotordefekt						X				
Unwucht						X				
Ausrichtungsfehler		X				X				

Tab. 4: Beispiele für Gebläse Fehler verbunden mit Messparametern und -techniken, Quelle: ISO 17359 (2018), S. 21.

3.3 Referenzen

Nachfolgend werden auszugsweise einige am Markt angebotene Condition Monitoring-Systeme und bereits umgesetzte Condition Monitoring- bzw. Predictive Maintenance-Projekte zur Überwachung von Motoren betrachtet. Die daraus abgeleiteten Ergebnisse fließen in weiterer Folge in die Sensorauswahl und die praktische Umsetzung mit ein:

- Von Schaeffler gibt es verschiedene Produkte, die auf Schwingungs- und Temperaturmessungen basieren, um Motoren kontinuierlich zu überwachen. Die erfassten Schwingungs- und Temperaturdaten werden automatisch auf Basis von Wälzlager- und Condition Monitoring-Wissen sowie maschinellem Lernen analysiert.[82]
- Turck bietet ein Nachrüst Kit für Condition Monitoring bei Motoren an, bestehend aus einem Schwingungs- und Temperatursensor. Aus Geschwindigkeits- und Beschleunigungsdaten von zwei Dimensionen und der Temperatur werden Rückschlüsse auf Schäden gezogen.[83]

[82] Vgl. Schaeffler Austria GmbH (2023), Online-Quelle [27.09.2023]

[83] Vgl. Hans Turck GmbH & Co. KG (2023), Online-Quelle [27.09.2023]

- Von ABB wird ein System zur Motorüberwachung, das einen Beschleunigungssensor, Temperatursensor, ein Magnetometer und ein Ultraschallmikrofon beinhaltet, angeboten. Damit ist er in der Lage die Betriebsparameter Drehzahl, Versorgungsfrequenz, Ausgangsleistung, Oberflächentemperatur und Schwingungen in drei Achsen zu überwachen.[84]
- KONE AG sammelt Schwingungsdaten, um den Zustand von Förderband-Lagern festzustellen und deren Verschleiß vorherzusagen. Speziell entwickelte Algorithmen ermitteln die verbleibende Nutzungsdauer dieser Lager. Die Vibrationsdaten werden über die Ferne erfasst und in einer Cloud gespeichert. Das angewendete Messsystem besteht aus einem analogen Beschleunigungssensor und einem Raspberry Pi.[85]
- Bei einem Projekt von COMAU S.p.A. über automatische, vorausschauende Analysen in der Roboterindustrie werden verschiedene Einzelmessungen wie Motortemperatur und Schwingungsmessungen dazu verwendet, um anbahnende Lager- oder Riemenausfälle Tage oder Wochen vorherzusagen sowie Aussagen über Nichtkonformität der Prozessqualität zu treffen.[86]
- TRIMEK wendet in einem Projekt die Artificial Intelligence (AI) basierte Erkennung von Anomalien aus Wiederholungen von Ereignissen auf Basis von Messungen bei einem Luftlagersystem an. Für die Auswertung der Daten wurden zu den Rohdaten verschiedene Datensätze mit einer Beschreibung der Grenzwerte, typischer Betriebswerte, zusammen mit dem Verständnis der Gründe für mögliche Ausfälle bereitgestellt.[87]

3.4 Frequenzumrichter

FUs können Schutz vor Überstrom bieten, die Spannung begrenzen, die Motortemperatur und die angetriebene Last überwachen. Nachfolgend werden diese Funktionen anhand vom Beispiel „G120“ beschrieben:[88]

- Den Motorstrom können FUs über die Ausgangsfrequenz und Motorspannung begrenzen.
- Im Bremsbetrieb speist der Motor die elektrische Energie in den FU zurück. Da dieser nur begrenzt die Energie abbauen bzw. speichern kann, wird die Rücklaufzeit beim Bremsen verlängert, sodass die FU-Verluste die rückgespeiste Energie abdecken können. Zusätzlich wird auch die Zwischenkreisspannung überwacht, um den FU und Motor vor zu hohen Werten zu schützen.
- Für die thermische Überwachung von Motoren können an den FU verschiedene Temperatursensoren oder Temperaturschalter angebunden werden. Wird dazu z.B. ein PTC-Sensor verwendet, bedeutet ein zu hoher Widerstand „Übertemperatur“ und wenige Ohm „Kurzschluss“. Außerdem können manche FUs anhand eines thermischen Motormodells, welches bei der Inbetriebnahme parametriert wird, die Motortemperatur berechnen. Der Vorteil eines

[84] Vgl. ABB AG (2023), Online-Quelle [27.09.2023]

[85] Vgl. Cerquitelli/Nikolakis/O'Mahony/Macii/Ippolito/Makris (2021), S. 165f.

[86] Vgl. Cerquitelli/Nikolakis/O'Mahony/Macii/Ippolito/Makris (2021), S. 100.

[87] Vgl. Cerquitelli/Nikolakis/O'Mahony/Macii/Ippolito/Makris (2021), S. 129ff.

[88] Vgl. Siemens AG (Hrsg.) (2023), S. 392ff.

Modelles ist die kürzere Reaktionszeit auf Temperaturanstiege. Wird zusätzlich ein Temperatursensor verwendet, kann damit das Modell berichtigt werden.

- Zur Überwachung der Last gibt es abhängig vom Anwendungsfall mehrere Funktionen: den Kippschutz, die Leerlaufüberwachung, den Blockierschutz, die Drehmomentüberwachung und die Drehüberwachung über ein periodisches Binärsignal. Während das Kippmoment über ein Motormodell ausgewertet wird, ist der Motorstrom für die Leerlaufüberwachung und den Blockierschutz ausschlaggebend. Ein zu geringer Strom kann auf eine unterbrochene Motorleitung hinweisen, hingegen deuten die Erreichung der Stromgrenze und zugleich Nichterreichung des Drehzahlsollwerts auf zu große mechanische Belastung hin. Die Drehmomentüberwachung wird speziell in z.B. Pumpen- oder Lüfteranwendungen eingesetzt. Zu geringes Drehmoment für einen bestimmten Betriebspunkt lässt sich aus der Abhängigkeit von Drehmoment und Drehzahl feststellen.

Außerdem können mit FUs z.B. Fehler in der Netzversorgung (wie z.B. Phasenausfall oder Spannungspegel), Kurz- und Erdschlüsse oder Drehzahlabweichungen erkannt werden.[89]

3.5 Messtechnik

Aus den vorangegangenen Kapiteln geht hervor, dass zur Überwachung von Motoren vor allem Schwingungs- und Temperaturmessungen an den Lagern benötigt, bzw. eingesetzt werden.

Bestimmte Symptome können zusätzlich auch durch Bedienpersonal registriert werden. Dazu zählen z.B. Geräusche, Geruch oder optische Auffälligkeiten, die teilweise von der Messtechnik nicht erfasst werden.[90]

3.5.1 Schwingungsmessung

Schwingungssignale bestehen aus mehreren sich überlagernden Frequenzen. Prinzipiell kann die Beschreibung von Schwingungsamplituden auf verschiedene Weisen dargestellt werden. Unter anderem durch das Peak-to-Peak Level, welches die maximale Auslenkung darstellt, dem Scheitelwert, der die Stärke von kurzzeitigen Stößen beschreibt, und dem Effektivwert. Letzterem wird zur Beurteilung von Schwingungen eine besondere Bedeutung zugeschrieben, weil er den zeitlichen Verlauf sowie den Energiegehalt der Schwingungen berücksichtigt. Gemessen werden können Schwingungen in Weg, Geschwindigkeit und Beschleunigung, die in mathematischem Zusammenhang stehen. Während bei Wegmessungen die niederfrequenten Anteile hervorgehoben werden, sind bei Beschleunigungs-messungen die hochfrequenten Anteile dominanter. Generell wird der Parameter gewählt, welcher das flachste Frequenzspektrum liefert, um den Dynamikbereich des Geräts bestmöglich auszunutzen. Daher werden meist Geschwindigkeit oder Beschleunigung gemessen. [91]

[89] Vgl. Siemens AG (Hrsg.) (2020), S. 818f.

[90] Vgl. ISO 17359 (2018), S. 8.

[91] Vgl. Brüel & Kjaer Austria GmbH (2023), Online-Quelle [08.10.2023]

In der Praxis werden unterschiedlichste Technologien zur Erfassung der Schwingungen angeboten wie z.B. piezoelektrische, piezoresistive, kapazitive oder Dehnungsmessstreifen-Beschleunigungssensoren (DMS). Großteils werden sogenannte Mikroelektromechanische Systeme (MEMS) angeboten, bei denen die notwendige Signalaufbereitung bereits in den Sensor integriert wird.[92]

3.5.1.1 Grenzwerte

Speziell für den 10 Hz bis 1 kHz Bereich hat sich der Gesamt-Effektivwert der Schwinggeschwindigkeit als beste Darstellungsvariante erwiesen. Bei niedrigen Betriebsdrehzahlen können jedoch unzulässig hohe Schwingwege und bei hohen Betriebsdrehzahlen unzulässig hohe Beschleunigungswerte auftreten. Für Diagnosezwecke eignen sich besonders Beschleunigungsmessungen, da sie den hohen Frequenzbereich besser abbilden können. Aktuell werden nur radiale Schwingungsgrenzwerte für den Schwingweg und die Schwinggeschwindigkeit angegeben[93], wie in Tab. 5 abgebildet. Wichtig ist, dass die verwendete Messeinrichtung Schwingungen breitbandig in diesem Frequenzbereich messen kann. Der Frequenzbereich soll in der Lage sein, das 0,2-Fache der niedrigsten Drehfrequenz und das 2,5-Fache der höchsten relevanten Anregungsfrequenz abzudecken.[94]

Zustand	**Zonengrenze**	**Effektivwert des Schwingwegs µm**	**Effektivwert der Schwinggeschwindigkeit mm/s**
starr	A/B	22	1,4
	B/C	45	2,8
	C/D	71	4,5
flexibel	A/B	37	2,3
	C/D	71	4,5
	C/D	113	7,1

Tab. 5: Unterteilung der Schwingzonen für Maschinen der Gruppe: Mittelgroße Maschinen mit einer Nennleistung über 15 kW und bis 300 kW; elektrische Maschinen mit einer Achshöhe 160 mm <= H <= 315 mm, Quelle: DIN ISO 20816-3 (2022), S. 27.

Für Gebläse und Lüfter bis 300 kW gelten die in Tab. 6 angegebenen Werte.

[92] Vgl. Kuttner (2015), S. 128ff.

[93] Vgl. DIN ISO 20816-3 (2022), S. 26.

[94] Vgl. DIN ISO 20816-3 (2022), S. 17.

Zustand	Kathegorie	starr		flexibel	
		Spitzenwert mm/s	Effektivwert mm/s	Spitzenwert mm/s	Effektivwert mm/s
Inbetriebnahme	BV-3	6,4	4,5	8,8	6,3
Alarm-Grenze	BV-3	10,2	7,1	16,5	11,8
Abschalt-Grenze	BV-3	12,7	9,0	17,8	12,5

Tab. 6 Schwingungsgrenzwerte für Versuche im Betrieb, Quelle: ISO 14694 (2003), S. 18.

Wird die Messung bei Maschinen mit variabler Drehzahl oder ändernder Belastung durchgeführt, ist der gemessene Maximalwert bei all den Betriebsbedingungen, die für längere Zeit auftreten können, maßgebend für die Schwingstärke. Sind die gemessenen Werte höher als die Zulässigen und werden Störschwingungen vermutet, kann im Stillstand die Höhe der Störschwingungen ermittelt werden. Diese sollten nicht höher als 25% der Schwingungen der Maschine im Betrieb sein. Zusätzlich wird darauf hingewiesen, Betriebsbedingungen, wie z.B. Leistung der Maschine, Lastverhältnisse, Temperaturen usw., die Einfluss auf die Schwingungen haben können, für eine bessere Einordnung bei Veränderungen mit aufzuzeichnen.[95]

Die Schwingstärke wird nach den Parametern Maschinentyp, Nennleistung oder Achshöhe und Elastizität des Maschinenunterbaus bewertet. So gehören mittelgroße Maschinen mit 15 kW bis 300 kW Nennleistung sowie einer Achshöhe zwischen 160 und 315 mm der „Gruppe 2“ an. Die Zuordnung der Stützkonstruktion wird in starr und flexibel unterteilt, wie in Tab. 5 und Tab. 6 ersichtlich, es kommen auch Mischvarianten vor. Die Bewertungskriterien für die Schwingstärke sind die Schwingungsamplitude und die Änderung der Schwingungsamplitude. Das Kriterium I „Schwingungsamplitude“ gibt Grenzwerte bezüglich der zulässigen dynamischen Lagerbelastung und die Übertragung über die Stützkonstruktion an die Umgebung vor. Die an den Lagern gemessenen Maximalwerte werden den Zonen A bis D zugeordnet, die eine qualitative Beurteilung der Maschinenschwingungen erlauben. Ab Zone C sollen Abhilfemaßnahmen ergriffen werden, da die Maschine für den Dauerbetrieb nicht mehr geeignet ist. Das Kriterium II „Änderung der Schwingungsamplitude“ beurteilt die Änderung gegenüber eines Referenzwertes unter stationären Bedingungen (abgesehen von kleinen Änderungen der Maschinen- oder Betriebsbelastungen). Tritt ein wesentlicher Anstieg oder Abfall der Schwingung auf, ohne Zone C erreicht zu haben, kann das trotzdem ein Hinweis auf einen anbahnenden Schaden sein. In der Praxis werden für den Betrieb die beiden Grenzwerte „Alarm“ und „Abschaltung“, die auf eine deutliche Änderung der Schwingungen hinweisen, festgelegt. Wird einer der Grenzwerte erreicht, müssen die Ursache ermittelt werden, sowie ggf. Maßnahmen eingeleitet, die bei „Abschaltung“ sofort umgesetzt werden müssen. Üblicherweise wird als Alarm-Grenze 25 % des stationären Basiswertes der Maschine festgelegt und maximal das 1,25-Fache des oberen Grenzwertes der Zone B. Abhängig von Konstruktionsmerkmalen kann sich die Abschaltgrenze zwischen verschiedenen Bauarten von Maschinen unterscheiden. Es wird empfohlen die Abschaltgrenze

[95] Vgl. DIN ISO 20816-3 (2022), S. 17f.

nicht höher als das 1,25-Fache der Zone C anzusetzen. Für Zustandsüberwachungen und Diagnosezwecke können zusätzliche Informationen über Frequenzanteile und Phasenwinkel wichtig sein, da sie Auskunft über den dynamischen Zustand der Maschine geben.[96] Die Alarmgrenzen sollen stets so gewählt werden, dass sie ehestmöglich Fehler erkennen.[97]

Schwingungsursachen bzw. bestimmte Fehler im Bereich der Maschinen oder Lager können mit Diagnoseverfahren wie z.B. Frequenz- oder Hüllkurvenanalysen im Frühstadium erkannt und den schadhaften Bauteilen zugeordnet werden. Über die Kennwerte lassen sich leicht erhöhte Vibrationen schwer erkennen, da sie sich nur gering auf die Kennwerte auswirken.[98]

3.5.1.2 Frequenzanalyse

Im Amplituden-Zeit-Diagramm lassen sich die Frequenzanteile aus dem Gesamtsignal, welches sich aus den gleichzeitig auftretenden Frequenzen zusammensetzt, nicht unmittelbar ablesen. Für eine Analyse der einzelnen Frequenzanteile ist die Übertragung des Zeitsignals mit Hilfe der Fourier-Transformation in den Frequenzbereich als Frequenzspektrogramm nötig. Über die Amplitudenhöhe lassen sich daraus die dominierenden periodischen Frequenzanteile feststellen.[99] Anhand des mechanischen Aufbaus einzelner Komponenten (Übersetzung, Zahnzahlen usw.) und der Drehzahl können die Peaks bestimmten Maschinenteilen über die Frequenzen zugeordnet werden. Im Frequenzbereich bis 1000 Hz werden beispielsweise Unwuchten durch die überhöhte Drehzahlkomponente oder breitbandige Störungen von Kupplungen sichtbar. Für die Analyse von Wälzlagerschäden ist der Frequenzbereich über 1000 Hz aufwärts relevant. Die Beschleunigungsmessung kommt vor allem bei höheren Frequenzen zum Einsatz, da diese im Schwinggeschwindigkeitssignal unterbewertet werden. FU Pulsfrequenzen befinden sich im sehr hohen Frequenzbereich.[100]

3.5.1.3 Hüllkurvenanalyse

Im Gegensatz zu z.B. Unwuchten werden die meisten Fehler nicht durch eine einzige Frequenz repräsentiert, sondern durch ein Frequenzmuster mit verschiedenen Frequenzanteilen. Durch Schäden verursachte Stoßimpulse beginnen Bauteile und ihre Umbauteile mit ihrer Eigenfrequenz zu schwingen. Die Modulation aus der normalen Schwingung und den periodischen Stößen spiegelt sich im Gesamtsignal wider. Die dabei auftretende Stoßimpulsfolgefrequenz ist charakteristisch für die jeweiligen Bauteile bzw. den Schaden. Bei den auftretenden Frequenzen handelt es sich immer um vielfache dieser Frequenz. Die höchsten Amplituden befinden sich im Bereich der Resonanzfrequenz, welche sich bei Wälzlagern im Bereich von 2 bis 4 kHz liegen. Da die sich die eigentlichen Stoßimpulsfrequenzen eher im niedrigen Frequenzbereich befinden, sind diese oft schwer zu detektieren weil sie von den normalen

[96] Vgl. DIN ISO 20816-3 (2022), S. 20ff.

[97] Vgl. ISO 17359 (2018), S. 7.

[98] Vgl. Isopp (2022), S. 79.

[99] Vgl. Brüel & Kjaer Austria GmbH (2023), Online-Quelle [08.10.2023]

[100] Vgl. IDS Innomic Schwingungsmesstechnik GmbH, Online-Quelle [08.10.2023]

Maschinengeräusche überdeckt werden können. Durch die Hüllkurvenanalyse können diese besser dargestellt werden.[101]

„Das Verfahren der Hüllkurvenanalyse bewirkt eine Demodulation, welche die Stoßwiederholfolge (Schadensfrequenzen) extrahiert.“[102] Die Durchführung unterscheidet sich etwas in verschiedenen Quellen und kann z.B. durch die Hilbert Transformation, welche die Phase und Frequenz demoduliert[103], oder verschiedene Arten von Filterung und Gleichrichtung erfolgen. Bei einer der Varianten wird das Rohsignal Hochpass gefiltert, gleichgerichtet, daraus die Hüllkurve gebildet und damit die Fast-Fourier-Transformation (FFT) durchgeführt. Dadurch werden Störeinflüsse, die neben den Bauteilfrequenzen auftreten, im Spektrum verringert und schwächer ausgebildete Schäden hervorgehoben. Die Amplituden dieser Stoßimpulswiederholfrequenzen sind ein Maß für die Schadensausprägung.[104] Anstelle des Hochpassfilters wird manchmal auch ein Bandpassfilter eingesetzt. Dadurch werden tieffrequente Signale bereits vor der Gleichrichtung unterdrückt.[105]

Filter werden eingesetzt, um unerwünschte Signalanteile vom Nutzsignal zu trennen. Die Hochpassfilterung sperrt tiefe Frequenzen einschließlich deren Gleichanteile. Im Gegensatz dazu werden bei der Tiefpassfilterung hohe Frequenzen gesperrt und Tiefe durchgelassen. Bandpass lässt nur ein bestimmtes Frequenzband durch.[106]

Mit der Gleichrichtung werden die negativen Anteile an der Abszisse gespiegelt. Durch Verbindung der Maxima des Signals entsteht die Einhüllende. Das ist insofern notwendig, weil bei einer FFT des Rohsignals nur die Trägerfrequenz mit ihren Seitenbändern im Abstand der Modulationsfrequenz dargestellt wird. Durch die Hüllkurve kann die Modulationsfrequenz ohne die Trägerfrequenz direkt angezeigt werden.[107]

3.5.1.4 Montage

Die Montageart der Sensoren wirkt sich auf die Genauigkeit der Ergebnisse aus, indem sie den nutzbaren Frequenzbereich ggf. verkleinert. Die besten Messergebnisse werden durch Montage mit Gewindebolzen und einer dünnen Fettschicht erzielt. Soll die Montage ohne mechanische Eingriffe erfolgen, sind Hartkleber wie z.B. Epoxid- und Zyanoacrylat-Kleber zu empfehlen. Bei Montage mit Permanentmagneten kann die Messung zwar versetzt werden, die Magneten wirken sich jedoch stark auf den messbaren Frequenzbereich aus. Abhängig davon, ob Silikonfett verwendet wird, wird der Bereich auf etwa 7 bis 13 kHz herabgesetzt.[108] Die magnetische Ankoppelung ist deshalb nicht für hochfrequente Schwingungen

[101] Vgl. Isopp (2022), S. 81.

[102] IDS Innomic Schwingungsmesstechnik GmbH, Online-Quelle [08.10.2023]

[103] Vgl. Brüel & Kjaer Austria GmbH (2023), Online-Quelle [08.10.2023]

[104] Vgl. IDS Innomic Schwingungsmesstechnik GmbH, Online-Quelle [08.10.2023]

[105] Vgl. Isopp (2022), S. 82f.

[106] Vgl. Kuttner (2015), S. 231f.

[107] Vgl. tecema GmbH, Online-Quelle [08.10.2023]

[108] Vgl. Brüel & Kjaer Austria GmbH (2023), Online-Quelle [08.10.2023]

über 5000 Hz geeignet, weil sie verfälscht wiedergegeben wird.[109] Bei dieser Montageart ist zu beachten, dass die Magnete an einer Kante aufgesetzt und langsam in einer kippenden Bewegung abgesetzt werden, da es sonst bei der Montage durch „Schnalznasen“ zu starken Beschleunigungen kommen kann.[110]

Die Montageposition soll so gewählt sein, dass sie die Messgröße bestmöglich wiedergibt.[111] Als Montagefläche eignen sich Lagerkappe oder -ständer, dünne oder flexible Oberflächen sind ungeeignet. Bei der Montage der Sensoren ist darauf zu achten, dass das Messsystem die dynamischen Kräfte der Maschine angemessen widerspiegelt und nicht zusätzliche Messabweichungen verursacht. Die bestmögliche Wiedergabe der Kräfte gelingt mit zwei rechtwinklig angeordneten Messpunkten. Meist wird deshalb bei horizontal angeordneten Maschinen in vertikaler und horizontaler Richtung gemessen. Bei vertikalen oder geneigten Maschinen wird der Messpunkt anhand der Stärke der Schwingungsmessung gewählt. In manchen Fällen wird auch in axialer Richtung gemessen, da bestimmte Fehler damit einfacher erkannt werden können. Anstelle des rechtwinkelig angeordneten Schwingungsaufnehmer-Paares kann genauso ein einzelner Schwingungsaufnehmer verwendet werden, wenn er in der Lage ist genügend Informationen über die Größe der Schwingung zu liefern. Für die Interpretation der Messdaten kann das aber bedeuten, dass die in nur einer Messebene erfasste Schwingung den Maximalwert nicht ausreichend wiedergibt.[112]

Außerdem wird empfohlen den Sensor so zu wählen, dass er eine hohe Empfindlichkeit gegenüber Fehlern und gleichzeitig geringe Empfindlichkeit gegenüber anderen Einflüssen aufweist. Weitere entscheidende Faktoren für die Sensorwahl sind die Zugänglichkeit und Umgebungsbedingungen der Messstelle.[113]

Jegliche Tätigkeiten und Änderungen, inklusive für die Behebung benötigte Fähigkeiten, Details zu Ersatzteilen und weitere, während der Instandhaltungstätigkeiten entdeckte Fehler sind aufzuzeichnen. Diese können nämlich für zukünftige Diagnosen hilfreich sein bzw. kann die Inspektion der kaputten Komponenten die Diagnose bestätigen. Wird die Ursache für den Fehler gefunden, können Maßnahmen getroffen werden, um ein erneutes Auftreten zu verhindern.[114]

3.5.2 Temperaturmessung

Einige Möglichkeiten zur Temperaturüberwachung wurden bereits im Zusammenhang mit FU (siehe 3.4) beschrieben. Nachfolgend werden geeignete Verfahren zur Temperaturmessung bei Motoren beschrieben.

Auf Lagertemperaturen kann entweder durch Messung der Oberflächentemperatur rückgeschlossen werden oder es kann die Temperatur direkt im Lager durch eine Sonde gemessen werden. Nach Inbetriebnahme des Motors dauert es, bis die Beharrungstemperatur erreicht wird. Diese hängt von einigen

[109] Vgl. IDS Innomic Schwingungsmesstechnik GmbH, Online-Quelle [08.10.2023]

[110] Vgl. Kuttner (2015), S. 129.

[111] Vgl. ISO 17359 (2018), S. 6f.

[112] Vgl. DIN ISO 20816-3 (2022), S. 12ff.

[113] Vgl. ISO 17359 (2018), S. 6f.

[114] Vgl. ISO 17359 (2018), S. 10.

Faktoren wie Last, Drehzahl sowie Wärmeleiteigenschaften des Motors ab.[115] Idealerweise soll die Motorüberwachung unter normalen Betriebsbedingungen erfolgen. Da bei geringer Belastung Probleme kaum aufscheinen, wird dafür ein Betrieb mit mindestens 40% der Nennlast empfohlen. Je höher die Last, desto größer werden die Temperaturunterschiede am Motor bei Problemen. Ist die höhere Belastung nicht möglich, ist besonders auf Temperaturunterschiede zu achten. Üblicherweise ist die Betriebstemperatur dem Typenschild zu entnehmen.[116]

Eine Wärmebildkamera bietet den Vorteil, sämtliche Komponenten wie Kupplung, beide Lager und Getriebe gleichzeitig zu erfassen. Schäden wie z.B. Kontaktflächen mit hohem Widerstand oder unsymmetrische Stromverteilung lassen sich damit gut detektieren. Es ist damit nur die Oberflächentemperatur messbar, daraus können aber Rückschlüsse auf die Innentemperatur gemacht werden. Selbst Temperaturerhöhungen von wenigen Graden, verglichen mit der Nenntemperatur, reduzieren die Lebensdauer von beispielsweise Wicklungen erheblich, weshalb auf solche Veränderungen aufmerksam geachtet werden muss. Für ein zuverlässiges Ergebnis muss allerdings der richtige Emissionsgrad eingestellt sein. Besonders glänzende Oberflächen können durch Reflexion Fehlinterpretationen veranlassen.[117]

Bei Ermittlung der Oberflächentemperatur mit einer Kontaktmessung muss der Sensor für eine optimale thermische Kopplung plan auf der Montagefläche aufliegen. Ein wärmeleitendes Medium kann kleine Luftspalte zwischen den Oberflächen verhindern.[118]

[115] Vgl. NSK Deutschland GmbH (2009), Online-Quelle [07.10.2023], S. 10.

[116] Vgl. Fluke Austria GmbH (2023), Online-Quelle [03.08.2023]

[117] Vgl. Fluke Austria GmbH (2023), Online-Quelle [03.08.2023]

[118] Vgl. Balluff GmbH (2023), Online-Quelle [30.07.2023], S. 13.

4 ANFORDERUNGEN AN DIE DATENBASIS

Neben der Sensorwahl und richtigen Messposition spielen die Datenqualität, Basisdaten, Zusatzinformationen und Abtastrate für die Analyse der Daten eine entscheidende Rolle.

4.1 Datenqualität

Datenqualität ist ein sehr wichtiges Thema und muss von Anfang an in den Prozess integriert werden, da sie sonst die Vorhersage erheblich verschlechtert. Dabei ist die sorgsame Auswahl von z.B. Sensoren, dem Datenformat, der Datenkennzeichnung und zugehörigen Informationen, welche für die Auswertung der Daten benötigt werden, inbegriffen. Ein paar Beispiele für schlechte Datenqualität sind fehlende Daten, schlechte Datenbeschreibung oder Mangel an relevanten Metadaten, Daten, die für den spezifischen Bedarf nicht oder kaum relevant sind oder schlechte Datenzuverlässigkeit. Außerdem ist es sinnvoll, die Datenerfassung auch schon Monate und Jahre vor der Verwendung sorgfältig auszuführen. Das kann mit Hilfe der folgenden Punkte erreicht werden:[119]

- Der beste Zeitpunkt für die Installation von Sensoren und Aufzeichnung von Daten ist bei der Erstinbetriebnahme oder Retrofit einer Anlage
- Mehr Daten als benötigt zu sammeln, bedeutet mehr Flexibilität für zukünftige Anwendungsfälle
- Auch wenn die derzeit verfügbaren Datensätze nicht sofort benötigt werden, sollen diese erhalten und verbessert werden. z.B. sollen einzelne Tabellen in einer globalen Datenbank verwaltet werden, um sicherzustellen, dass die Daten bereinigt werden.

Besonders wichtig ist es deshalb bereits von der Feldebene weg eine qualitative Messung zu erreichen. Diese wird von schlechter Montage oder einem Fehler des Messgrößenaufnehmers, Kabelfehlern, falschem Messbereich oder ungenügender Aufzeichnungsrate, die nicht in der Lage ist, die tatsächliche Wertänderung darzustellen, beeinflusst. Absolute Genauigkeit ist hingegen in den meisten Condition Monitoring-Fällen nicht so relevant wie die Wiederholbarkeit.[120]

Die ISO 17359 (2018) empfiehlt für ein effektives und nachhaltiges Datenmanagement regelmäßig Beratungsberichte zu verteilen, Back-Ups zu erstellen, die Datenbasis zu überprüfen, aktualisieren und verfeinern und Alarmeinstellungen zu überprüfen und anzupassen.[121]

[119] Vgl. Cerquitelli/Nikolakis/O'Mahony/Macii/Ippolito/Makris (2021), S. 161f.

[120] Vgl. ISO 17359 (2018), S. 5ff.

[121] Vgl. ISO 17359 (2018), S. 10.

4.2 Zusatzinformationen

Für die Umsetzung bzw. den Aufbau von Predictive Maintenance sind neben den Messdaten in der Datenbank auch weitere Informationen über die Anlage, Funktionsgruppen und Betriebsumgebung relevant:[122]

- Regelmäßig vorkommende Betriebsereignisse wie z.B. die Betriebszeiten, Leerlaufzeiten, Reinigungs- und Wartungsintervalle
- Auswirkungen, welche ein Anlagenausfall mit sich bringt
  (Die Auswirkungen beziehen sich sowohl auf die verursachten Kosten als auch auf die Qualität der Produkte, in der sich der Zustand der Anlage widerspiegeln kann.)
- Komponenten mit Verschleiß und wovon dieser abhängig ist bzw. wie häufig die Anlage deshalb gewartet wird
- Zu überwachende Funktionsgruppen und mit welcher Messtechnik deren Betriebszustand sensorisch erfasst wird
- Daten zum verwendeten Sensor, wie z.B. die Abtastrate oder ob dieser das Rohsignal bearbeitet
- Informationen über Dynamiken im Betrieb, welche an unterschiedlichen Betriebspunkten auftreten, wie z.B. die zu erwartenden Geschwindigkeiten und Beschleunigungen
- Beschreibung des Gutzustandes, um Anomalien unterscheiden zu können (wie dieser Zustand aussieht und welche Betriebspunkte dabei erreicht werden)
- Betriebsarten wie z.B. „Manuell“ oder „Automatik“ können in der Auswertung einen Unterschied ausmachen, sofern mehrere vorhanden sind

In der ISO 17359 (2018) wird den folgenden Systemfaktoren ein Einfluss auf Condition Monitoring zugeschrieben:[123]

- Maschine (Antrieb, Montage, Aufbau/Fundament)
- Kupplung oder Getriebe
- Angetriebene Komponenten (Montage, Aufbau/Fundament)
- Schutzeinrichtungen (Spannung, Strom, etc.)
- Steuerungssystem
- Schmiermittel
- Eingangsgrößen (Elektrische Energie, Versorgungsfrequenz etc.)
- Ausgangsgrößen (Leistung, Bewegung, Druck, etc.)
- Verrohrung/Hilfseinrichtungen (Kühlung, Ventile, etc.)
- Gebäude (Resonanzen, Materialien etc.)
- Leistung/Einstellungen/Bereiche (Drehzahl, Druck, etc. mit Einheit!)
- Condition Monitoring (bereits Existierendes und Zukünftiges: Visuelle Inspektion, Schwingungsmessung, Thermographie, etc.)

[122] Vgl. Fraunhofer Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik (ITWM), Online-Quelle [14.09.2023]

[123] Vgl. ISO 17359 (2018), S. 3.

- Position und Erreichbarkeit (Sicherheit, Hitze, Lärm, etc.)
- Personal (Bedienpersonal, Instandhaltung, Schulungen, etc.)
- Umgebung (Temperatur, Luftfeuchtigkeit, etc.)
- Benachbarte Maschinen

4.3 Basisdaten

Die Basisdaten werden aufgenommen, wenn sich die Maschinen in einem stabilen Zustand befinden, vorzugsweise unter normalen Betriebsbedingungen. Gibt es mehrere Betriebspunkte, müssen für jeden Basisdaten erfasst werden, im besten Fall unter denselben Betriebsbedingungen. Bei Maschinen mit variabler Drehzahl können teilweise ähnliche Betriebsbedingungen durch Änderung von Parameter wie z.B. Drehzahl oder Last erreicht werden. Es soll jedoch klar sein, ob Änderungen aufgrund von Parametern oder Betriebsbedingungen hervorgerufen werden. Bei neuen oder überholten Maschinen ist zu beachten, dass sie innerhalb der ersten Tage bis Wochen im Betrieb eine Einlaufphase benötigen, weshalb die Basisdaten erst danach aufgenommen werden sollen.[124]

Für einige Parameter sind Gesamtmessungen oder Mittelwertmessungen ausreichend, für Strom, Spannung oder Schwingungsmessungen sind diese Messtechniken nicht hinreichend, um auftretende Fehler zu detektieren. Für diese Messungen können Aufzeichnungsarten wie Zeit-, Spektral- und Phasenmessung erforderlich sein, um fehlerbedingte Veränderungen zu erkennen.[125]

4.4 Abtastrate

„Mit dem Nyquist-Abtasttheorem wird das Verhältnis zwischen der Sample-Rate und der Frequenz des gemessenen Signals erklärt. Das Theorem gibt an, dass die Sample-Rate f_s […] [mehr als] zweimal größer als die höchste zu untersuchende Frequenzkomponente im gemessenen Signal sein muss. Diese Frequenz wird als "Nyquist-Frequenz" bezeichnet, f_N.“[126]

$$f_s > 2 * f_N \qquad (4.1)$$

f_s/Hz Sample Rate

f_N/Hz Nyquist-Frequenz

Ist die Sample-Rate zu niedrig, wird der Signalverlauf falsch dargestellt. Zusätzlich können Tiefpassfilter vor dem Analog-Digital-Wandler, welcher die Frequenzen oberhalb der Nyquist Frequenz im Eingangssignal sperrt, eingesetzt werden.[127]

Für stabile Zustände muss die Aufzeichnungsrate hoch genug sein, um einen kompletten Datensatz zu erfassen, ohne dass sich die Bedingungen ändern. Für transiente Signale kann eine sehr hohe Aufzeichnungsrate notwendig sein. Ob die Messung kontinuierlich oder periodisch aufgezeichnet werden

[124] Vgl. ISO 17359 (2018), S. 6ff.

[125] Vgl. ISO 17359 (2018), S. 5.

[126] National Instruments CORP. (2023), Online-Quelle [05.10.2023]

[127] Vgl. National Instruments CORP. (2023), Online-Quelle [05.10.2023]

muss, hängt hauptsächlich von der Fehlerart und deren Änderungsrate ab. Außerdem sind die Zeitspanne zwischen der Fehlererkennung und dem tatsächlichen Ausfall oder Faktoren wie Betriebsbedingungen, Kosten und Kritikalität maßgebend für das Messintervall.[128]

Manche Datenbanken bieten die Möglichkeit, Messdaten erst bei Änderung des Wertes aufzuzeichnen. Besonders bei Signalen, die ihren Wert selten oder langsam ändern wie z.B. manche Temperaturmessungen kann dadurch die Anzahl an Datensätzen verringert werden.

[128] Vgl. ISO 17359 (2018), S. 6.

5 DOKUMENTATION

Die richtige Dokumentation ist für einen Informationsaustausch von der Feldebene bis zur Prozessleitebene wichtig. (Dieses Kapitel bezieht sich auf nicht Qualitätsmanagement (QM) -relevante Messungen.)

Grundsätzlich ist die Organisation verantwortlich für die Durchführung von notwendigen Prozessen wie die Bestimmung, Bereitstellung und Instandhaltung der Infrastruktur. In diesem Anwendungsfall betrifft das z.B. die Hardware, Software und Informations- und Kommunikationstechnik. Es muss z.B. für interne Kommunikation festgelegt werden, worüber, wann, mit wem und auf welchem Weg kommuniziert wird. Für die Erstellung und Aktualisierung von dokumentierter Information muss ein angemessenes Format (z.B. Sprache oder Softwareversion) und Medium sowie Kennzeichnung und Beschreibung bestimmt werden. Außerdem ist sicherzustellen, dass diese Information, wenn sie benötigt wird, zur Verfügung steht und vor z.B. Verlust der Integrität, Vertraulichkeit und unsachgemäßen Gebrauch geschützt wird. Dafür sind Verteilung, Zugriff, Auffindung, Verwendung, Ablage und Erhaltung, Überwachung von Änderungen (z.B. Versionskontrolle) zu berücksichtigen. Außerdem müssen die Messmittel vor Änderung der Einstellungen, Beschädigung und Verschlechterung geschützt sein.[129] Bei der Messprozessgestaltung ist darauf zu achten, dass fehlerhafte Messergebnisse vermieden werden und Fehler sofort erkannt und Korrekturmaßnahmen eingeleitet werden.[130] Die folgenden metrologischen Merkmale, welche zur Messunsicherheit beitragen, enthalten wichtige Informationen, die für die Analyse der Messergebnisse durch z.B. Predictive Maintenance-Modelle relevant sind:[131]

- Beschreibung und eindeutige Kennzeichnung des Herstellers, Typ, Serie usw.
- Relevante Umweltbedingungen und ggf. eine Aussage über erforderliche Korrekturen
- Einzelheiten zu vorgenommenen Wartungen z.B. Justierung oder Reparatur
- Messbereich
- Abweichung samt Grenzwerten
- Stabilität
- Hysterese
- Drift
- Auswirkung von Einflussgrößen
- Auflösung
- Ansprechschwelle
- Totzeit

Firmenintern werden zusätzlich die Softwareversion, falls anwendbar, und die organisatorische Einheit bzw. der Einsatzort und Inhaber aufgezeichnet.

[129] Vgl. ÖNORM EN ISO 9001 (2015), S. 17ff.

[130] Vgl. ÖNORM EN ISO 10012 (2003), S. 10ff.

[131] Vgl. ÖNORM EN ISO 10012 (2003), S. 11ff.

6 MOTOREN

In der praktischen Umsetzung werden von vier unterschiedlichen Asynchronmotoren eines Aggregates die notwendigen Daten für Predictive Maintenance in einer lokalen Datenbank zur Verfügung gestellt. Nachfolgend werden diese Motoren, welche alle über FUs angetrieben werden, genauer beschrieben.

6.1 Abgasgebläse

Antriebsart Gebläse mit Direktantrieb

Schema

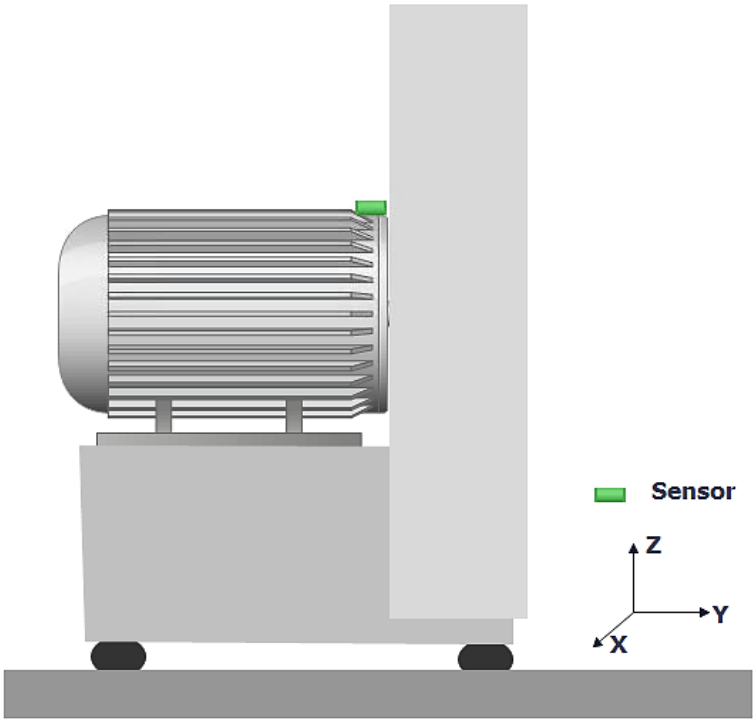


Abb. 5: Schema Abgasgebläse, Quelle: Eigene Darstellung

Typenschild Motor

SIEMENS					
3 ~ Mot.	IEC 60034	200L	IP55	IE3	
	220 kg	Iso.-Kl. 155(F)		-20 °C<=TAMB<=40 °C	
	Lager				
DE	6212-ZC3				
NE	6212-ZC3				
Δ 415 V	50Hz	51 A	30 kW	cosφ 0,87	2955 U/min

Tab. 7: Typenschild Abgasgebläse, Quelle: Eigene Darstellung

Typenschild Ventilator

Reitz Ventilatoren					
Typ		Direktantrieb			
		Berechnungsdaten	**Betriebspunkte**		
Kennlinientyp		NP			
Ansaugtemperatur	t	20 °C	100 °C	100 °C	100 °C
Dichte im Saugstutzen	P_1	1,205 kg/m³	1,305 kg/m³	1,305 kg/m³	1,305 kg/m³
Volumenstrom	V_1	50 m³/min	58,3 m³/min	16,7 m³/min	16,7 m³/min
Totaldruckerhöhung	Δpt	1600 daPa	1317 daPa	310 daPa	210 daPa
Wellenleistung	PW	20,72 kW	19,32 kW	1,51 kW	0,85 kW
Drehzahl	n	2950 min^{-1}	2836 min^{-1}	1359 min^{-1}	1042 min^{-1}
Max. Drehzahl	n_{max}	3127 min^{-1}	3127 min^{-1}		
Max. Temperatur	t_{max}	180 °C	180 °C		

Tab. 8: Typenschild Radialventilator Abgasgebläse, Quelle: Eigene Darstellung

Montage Das Gebläse ist auf einer Stahlblechkonstruktion mit Gummidämpfern, welche auf Beton verschraubt ist, montiert, wie in Abb. 5 dargestellt.

Zweck Gasabsaugung

Besonderheiten Die Drehzahl während des Prozesses ist abhängig vom Zustand des im Rohrsystem nachfolgenden Filters.

Lager Wie Tab. 7 zu entnehmen, wird die Welle an beiden Enden des Antriebs über ein einreihiges Rillenkugellager vom Typ 6212-ZC3 gelagert. Dabei handelt es sich um ein nichtisoliertes Lager aus Stahl, mit leicht erhöhter Radialluft, einseitiger Abdeckung und Fettschmierung.

Überwachungsgrund Es gibt keine Redundanz, ein Ausfall bedeutet den Stillstand des Aggregats.

Steuerung S7 300 (ist bereits an die Datenbank angebunden)

Frequenzumrichter Lenze L-force Drives 8400 StateLine C (Zwischen SPS und FU besteht keine Profinet- oder Profibus-Kommunikation. Die Drehzahl Soll- und Istwerte werden über Analogwerte ausgetauscht.)

Infrastruktur Die Messstelle und der Schaltschrank, in dem sich SPS, FU und ein „IO-Link Master“ befinden, sind über eine rund 50 m lange Kabeltrasse verbunden.

Betriebsart Automatikbetrieb, Wartungsschalter bei Reparaturen

Überwachung Motortemperatur über Thermistor (PTC), Überstrom und FU-Störung

Wartung monatlich

- Filter reinigen
- Lager schmieren

vierteljährlich

- Motor reinigen
- Filter tauschen
- Sichtkontrolle Elektroinstallation

6.2 Gebläsemotor

Antriebsart Antrieb Gebläse über Kupplung

Schema

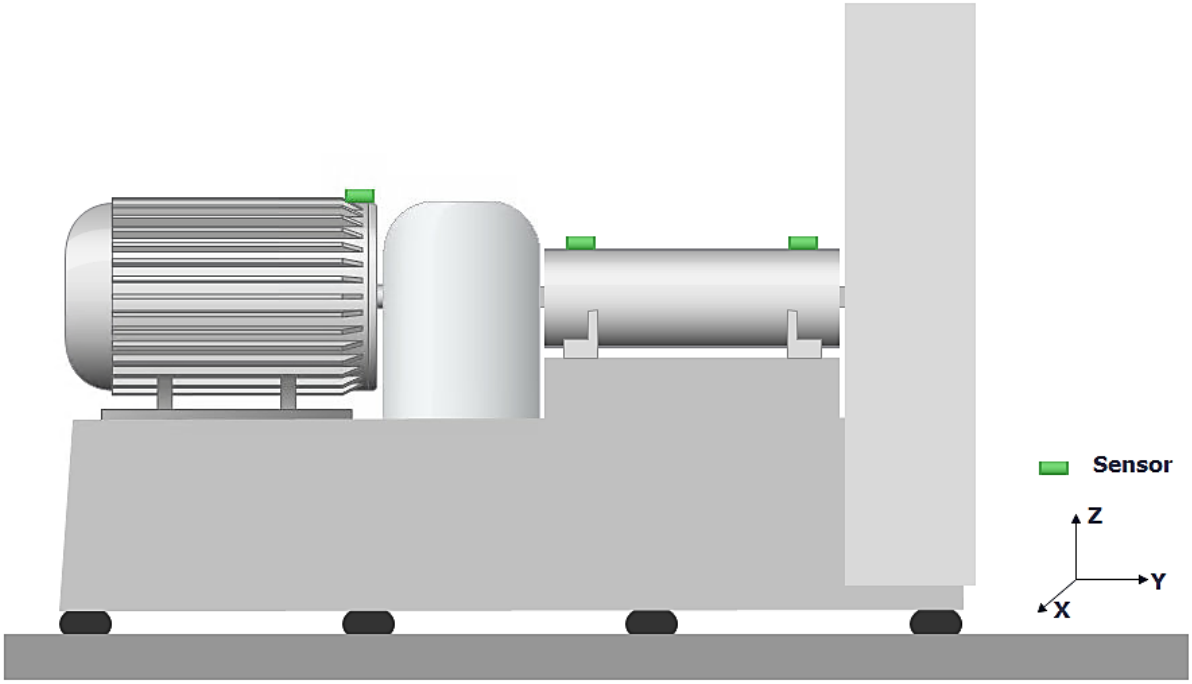


Abb. 6: Schema Gebläsemotor mit Zwischenwelle, Quelle: Eigene Darstellung

Typenschild Motor

SIEMENS					
3 ~ Mot.	IEC 60034	225M	IP55	IE3	
	315 kg	Iso.-Kl. 155(F)		-20 °C<=TAMB<=40 °C	
	Lager				
DE	6213-ZC3				
NE	6213-ZC3				
ΔY 400/690 V	50Hz	74/45 A	45 kW	cosφ 0,87	2960 U/min

Tab. 9: Typenschild Gebläsemotor, Quelle: Eigene Darstellung

Typenschild Ventilator

Reitz Ventilatoren					
Typ		Antrieb über Kupplung			
Betriebsart		drückend			
Medium		Luft			
		Berechnungsdaten	**Betriebspunkte**		
Kennlinientyp		NP			
Ansaugtemperatur	t	20 °C			
Dichte im Saugstutzen	P_1	1,205 kg/m³			
Volumenstrom	V_1	25 m³/min			
Totaldruckerhöhung	Δpt	3150 daPa			
Wellenleistung	PW	36,63 kW			
Drehzahl	n	2960 min^{-1}			

Tab. 10: Typenschild Ventilator Gebläsemotor, Quelle: Eigene Darstellung

Montage Das Gebläse ist auf einer Stahlblechkonstruktion mit Gummidämpfern, welche auf Beton verschraubt ist, montiert, wie in Abb. 6 dargestellt.

Meldehistorie Seit der Inbetriebnahme sind die Warnung „Antrieb: Zwischenkreis Spannungs-Maximum-Regler aktiv“ und die Störungen „Leistungsteil: Zwischenkreisspannung

Unterspannung“ und „Antrieb: Motor blockiert“ für weniger als eine Sekunde angestanden. Bisher gab es bei diesem Antrieb noch keine Ausfälle.

Zweck Gaszirkulation im Prozess

Besonderheiten Aufgrund der starken Lärmentwicklung befindet sich dieser Motor unter einer schalldämmenden Abdeckhaube. Der Nachteil davon ist, dass sich darunter die Hitze staut.

Grenzwerte Schwingungen

Vom Hersteller werden die in Tab. 11 abgebildeten Grenzwerte für den Effektivwert der Schwinggeschwindigkeit angegeben.

Vibrationsgeschwindigkeit Effektivwert flexible Aufstellung	Zustand
> 4,5 mm/s	Voralarm
> 7,1 mm/s	Abschaltung

Tab. 11: Einstufung Schwingungen Gebläsemotor, Quelle: Eigene Darstellung

Lager Motor Bei diesem Antrieb sind, wie Tab. 9 zu entnehmen, an beiden Enden einreihige Rillenkugellager vom Typ 6213-ZC3 verbaut. Dabei handelt es sich um nichtisolierte Lager aus Stahl, mit leicht erhöhter Radialluft, einseitiger Abdeckung und Lebensdauerschmierung. Wie im Kapitel „Lagerströme“ (siehe 3.1.1.5) beschrieben, werden ab einer Achshöhe von 225 mm normalerweise einseitig auf der NDE isolierte Lager verwendet. Die Isolierung wird in diesem Fall über eine Beschichtung an der Welle umgesetzt.

Lager Zwischenwelle Zwei fettgeschmierte Rillenkugellager Typ 6316

Überwachungsgrund Es gibt keine Redundanz, ein Ausfall bedeutet den Stillstand des Aggregats.

Steuerung S7 1500 (ist bereits an die Datenbank angebunden, Drehzahl- und Stromistwert werden bereits aufgezeichnet)

Frequenzumrichter Siemens G120 CU240 E-2 PN (zwischen SPS und FU besteht eine Profinet-Kommunikation)

Infrastruktur Die Messstelle und der Schaltschrank, in dem sich SPS und FU befinden, sind über eine rund 15 m lange Kabeltrasse verbunden.

Betriebsart Automatikbetrieb, Wartungsschalter bei Reparaturen

Überwachung Motortemperatur über PTC (ohne Abschaltung), Überstrom, FU-Störungen, Überdrehzahl, sowie der Differenzdruck Sicherheitsfilter vom Gebläse.

Wartung wöchentlich

- Dichtheit vom System

- Lagertemperatur und Lageschwingungen mit einem mobilen Messgerät

monatlich

- Lager schmieren
- Schwingmetallpuffer auf Risse oder sonstige Beschädigungen überprüfen
- Fester Sitz von Schraubverbindungen kontrollieren
- Dichtungen kontrollieren

6.3 Motor Sichterrad

Antriebsart Der Sichterradmotor treibt über einen Riemen, wie in Abb. 7 in der Draufsicht abgebildet, eine Welle mit Sichterrad an.

Schema

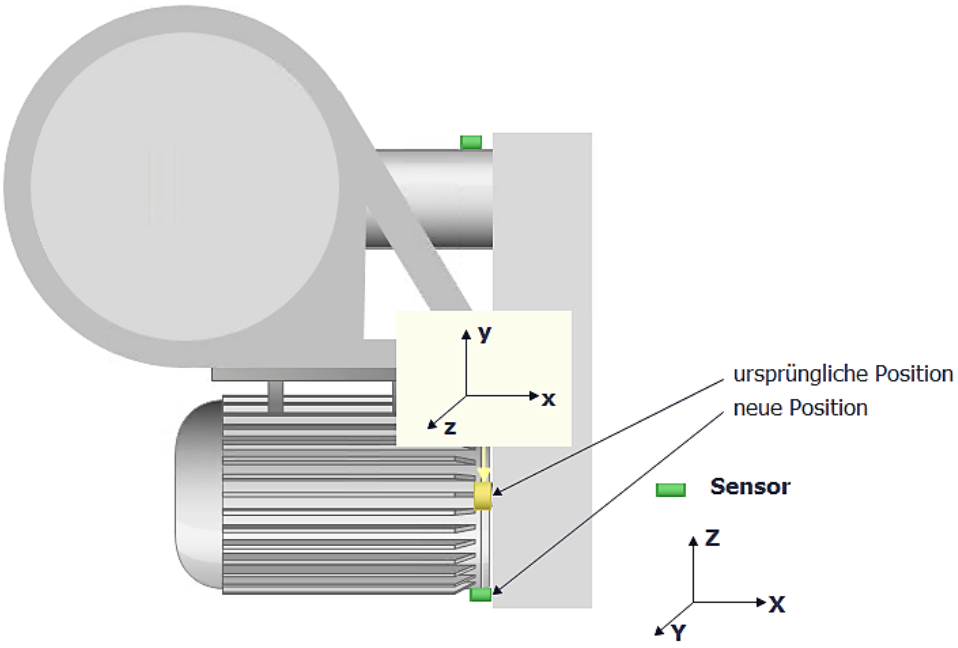


Abb. 7: Schema Motor und Welle Sichterrad, Quelle: Eigene Darstellung

Typenschild Motor

SIEMENS					
3 ~ Mot.	IEC 60034	132S	IP55	IE2	
	61 kg	Iso.-Kl. 155(F)		-20 °C<=TAMB<=40 °C	
	Lager				
DE	6208-2ZC3				
NE	6208-2ZC3				
ΔY 400/690 V	50Hz	14,1/8,2 A	7,5 kW	cosφ 0,87	2950 U/min

Tab. 12: Typenschild Motor Sichterrad, Quelle: Eigene Darstellung

Montage

Montiert ist der Motor auf einer Stahlplatte, die mit einem Bolzen am Sichterradgehäuse befestigt ist, wie in Abb. 8 dargestellt.

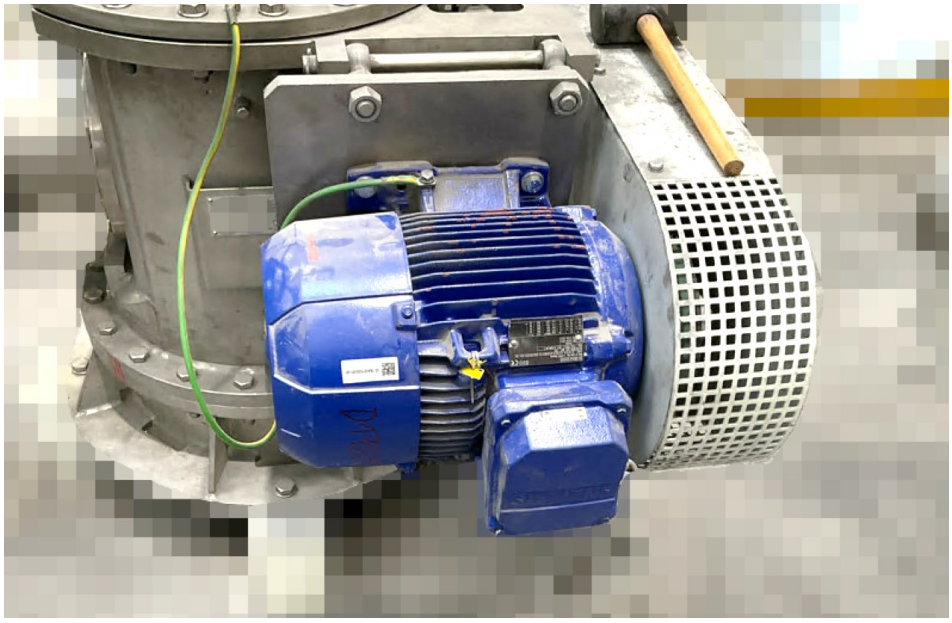


Abb. 8: Montage Motor Sichterrad, Quelle: Eigene Darstellung

Meldehistorie

Bisher sind keine relevanten Warnungen und Störungen aufgetreten und der Motor ist noch nie ausgefallen.

Zweck

Klassierung von Feststoffen

Grenzwerte Schwingungen

In Tab. 13 werden die vom Hersteller angegebenen Grenzwerte für Maschinenschwingungen dargestellt.

Vibrationsgeschwindigkeit Effektivwert flexible Aufstellung	Zustand	Maßnahme
< 4,5 mm/s	Normal	-
4,5 mm/s bis 7,1 mm/s	Voralarm	Ursache ermitteln und beseitigen
> 7,1 mm/s	Alarm	Sofortiger Stopp, Maschine stilllegen.

Tab. 13: Einstufung Schwingungen Motor Sichterrad, Quelle: Eigene Darstellung

Lager Motor An beiden Antriebsseiten sind, wie in Tab. 12 ersichtlich, einreihige Rillenkugellager aus Wälzlagerstahl verbaut. Diese fettgeschmierten Lager mit leicht erhöhter Lagerluft sind beidseitig mit Deckscheiben abgedichtet.

Spätestens alle drei Jahre sind die Lager der Sichterradwelle auszutauschen.

Lager Sichterradwelle Bei der Welle sind Spezialrillenkugellager verbaut, dessen Bezeichnung vom Hersteller nicht angegeben wird. Alle 1500 Betriebsstunden müssen diese Lager nachgeschmiert werden. Am Lagergehäuse sind bereits Montagestellen für Schwingungsmessungen vorgesehen. Vom Hersteller wird darauf hingewiesen, dass ein unruhiger Maschinenlauf auf eine ungleichmäßige Abnutzung der umlaufenden Teile hindeutet.

Überwachungsgrund Die Motorüberwachung soll Aufschluss über den Zustand des Sichterrades geben.

Steuerung S7 1500 (ist bereits an die Datenbank angebunden, Drehzahl- und Stromistwert und die Lagertemperaturen vom Sichterrad an Riemen- und Gehäuseseite werden bereits aufgezeichnet)

Frequenzumrichter Siemens G120 CU240 E-2 PN (zwischen SPS und FU besteht eine Profinet-Kommunikation)

Infrastruktur Die Messtelle und der Schaltschrank, in dem sich SPS und FU befinden, sind über eine rund 10 m lange Kabeltrasse verbunden.

Betriebsart Automatikbetrieb, Wartungsschalter bei Reparaturen

Überwachung Motortemperatur über PTC (ohne Abschaltung), Überstrom, FU-Störungen, Überdrehzahl, sowie die sichterradseitigen Lagertemperaturen

Wartung monatlich

- Schmierungen kontrollieren
- Schwingmetallpuffer auf Risse oder sonstige Beschädigungen überprüfen
- Fester Sitz von Schraubverbindungen kontrollieren
- Dichtungen kontrollieren

Vierteljährlich

- Lager schmieren
- Maschinenteile auf Funktion und sichtbare Beschädigungen überprüfen, dabei wird besonders auf die Dichtungen, Anbackungen und Ablagerungen im Maschineninnenraum, Schäden und Spannung des Riemens sowie die Wälzlagertemperatur bei Dauerbetrieb und deren Geräuschentwicklung geachtet

6.4 Motor Zellradschleuse

Antriebsart Stirnrad-Getriebemotor (Asynchronmotor mit Steckgetriebe)

Schema

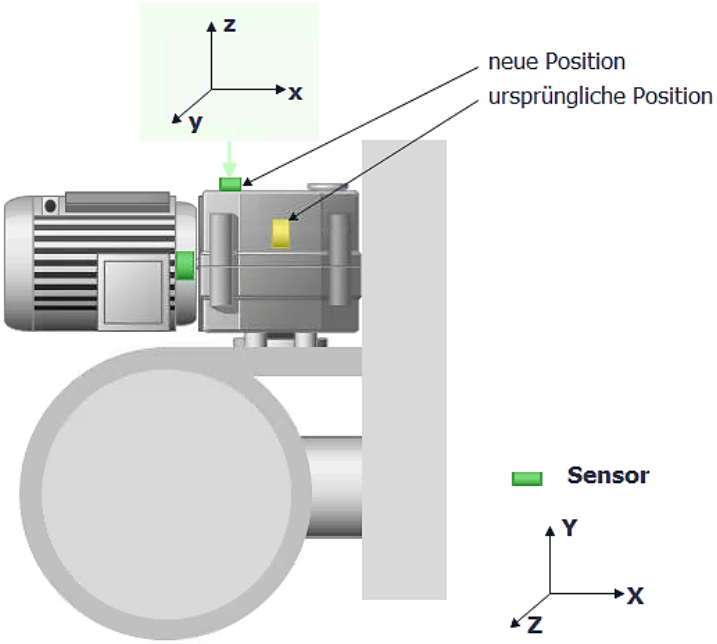


Abb. 9: Schema Ersatzmotor und Getriebe Zellradschleuse, Quelle: Eigene Darstellung

Momentan wird die Schleuse über einen Maschinensatz mit Kette, wie in Abb. 9 in der Draufsicht abgebildet, angetrieben. Zukünftig ist geplant, die Schleuse mit einer geraden Welle, wie in Abb. 10 abgebildet, zu betreiben und den anderen Antrieb als Ersatzteil zu verwenden.

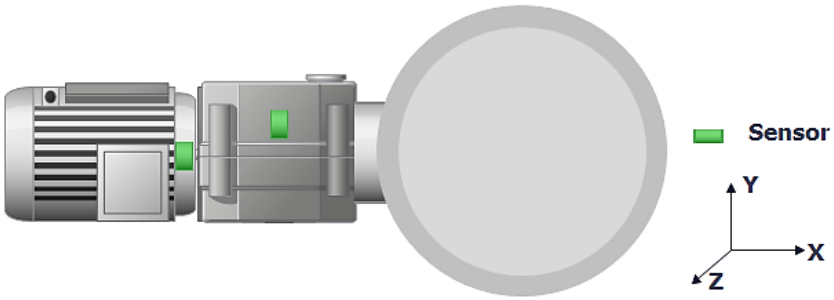


Abb. 10: Schema Motor und Getriebe Zellradschleuse, Quelle: Eigene Darstellung

Typenschild Stirnrad-Getriebemotor

SEW-EURODRIVE					
3 ~ Mot.	IEC 60034	132S	IP65	IE2	
	16,367 kg	Iso.-Kl. 155(F)		-20 °C<=TAMB<=40 °C	
ΔY 230/400 V	50Hz	2,15/1,23 A	0,37 kW	cosφ 0,7	1380/20 U/min
i 69,33	178/144 Nm	0,75 l CLP 220 Miner Oil			

Tab. 14: Typenschild Ersatzmotor Zellradschleuse, Quelle: Eigene Darstellung

Montage

Montiert ist der Ersatzmotor direkt am Getriebe, welches selbst an einer Stahlplatte am Rohrsystem befestigt ist, wie in Abb. 11 ersichtlich. Das Getriebe des neuen Motors wird direkt an der Schleuse montiert, wie in Abb. 10 dargestellt.

Abb. 11: Montage Ersatzmotor Zellradschleuse, Quelle: Eigene Darstellung

Meldehistorie	Bisher sind die Störungen „Antrieb: Motor blockiert“ und „Antrieb: Motor Übertemperatur“ aufgetreten.
Zweck	Produktzufuhr in das System
Besonderheiten	Vom Hersteller wird darauf hingewiesen, dass hörbare Geräuschentwicklungen auf mechanische Fehler und Produktablagerungen hindeutet.
Lager	Zu den Lagern gibt es keine Angaben.
Überwachungsgrund	Wegen eines Defekts an der Zellradwelle ist der Motor bereits einmal wegen Überspannung ausgefallen. Die Motorüberwachung soll Aufschluss über den Zustand des Motors und der Schleuse, wie z.B. Verschleiß und Blockieren eines Lagers, geben.
Steuerung	S7 1500 (ist bereits an die Datenbank angebunden, der Drehzahlistwert wird bereits aufgezeichnet)
Frequenzumrichter	Siemens G120 CU240 E-2 PN (zwischen SPS und FU besteht eine Profinet-Kommunikation)
Infrastruktur	Der Schaltschrank, in dem sich SPS und FU befinden, ist rund 10 m über Kabelweg von der Messstelle entfernt.
Betriebsart	Automatikbetrieb, Wartungsschalter bei Reparaturen
Überwachung	Motortemperatur über PTC (ohne Abschaltung), Überstrom und FU-Störungen
Wartung	monatlich • Schmierungen kontrollieren

- Sämtliche Teile auf Verschleiß überprüfen

Jährlich

- Demontage um den Maschineninnenraum sowie sämtliche Maschinenteile wie Dichtungen auf Schäden und Verschleiß kontrollieren.

6.5 Alarme

Beim Gebläsemotor und Motor Sichterrad (siehe 6.2 und 6.3) werden bereits vom Hersteller Grenzwerte für die Zustände „Voralarm“ und „Alarm“ sowie beim Motor Sichterrad einzuleitende Maßnahmen angegeben. Die von den Herstellern definierten Grenzwerte 4,5 mm/s bzw. 7,1 mm/s stimmen mit den in der DIN ISO 20816-3 (2022) festgelegten Zonengrenzen für flexible Montage überein. Interessanterweise orientieren sich die Alarmgrenzen des Herstellers beim Gebläsemotor an der DIN ISO 20816-3 (2022) und nicht an der ISO 14694 (2003), in deren Geltungsbereich das Gebläse fällt (siehe 3.5.1.1).

Zu den Zonengrenzen der anderen Motoren Abgasgebläse und Motor Zellradschleuse werden von den Herstellern keine Alarmgrenzen angegeben, obwohl die in DIN ISO 20816-3 (2022) angegebenen Grenzwerte nur für die Betriebsüberwachung von Maschinensätzen mit Leistungen über 15 kW und Drehzahlen zwischen 120 und 30.000 1/min gelten und in der Norm explizit angemerkt wird, dass die Schwingungskriterien nicht für flexibel gelagerte Lüfter gelten[132], werden die Alarmgrenzen dieser Motoren in Anlehnung an diese Norm bewertet.

Prinzipiell sind das Condition Monitoring Toolkit (CMTK) und Konfigurationsoberfläche „XRangeEye“ in der Lage, E-Mailbenachrichtigungen bei bestimmten Ereignissen zu senden. Damit es keine Doppel-Benachrichtigungen und Überschneidungen gibt, sollen Benachrichtigungen von der höchsten Instanz, dem Analysemodell, erfolgen. Einzig die Drahtbruchalarme zur Erkennung von defekten Sensoren sind in der SPS umgesetzt.

[132] Vgl. DIN ISO 20816-3 (2022), S. 10.

7 SENSOREN

Die Ausarbeitung der typischen Schäden bei Asynchronmotoren ergibt, dass wie in den Kapiteln „Condition Monitoring Parameter“ und „Lagerschäden“ (siehe 3.2 und 3.1.1) zusammengefasst, sich die meisten Fehler, sowohl bei den Maschinentypen Asynchronmotor, als auch bei Gebläsen, durch Schwingungs- und Temperaturmessungen erfassen lassen. Werden Schwinggeschwindigkeit und Schwingbeschleunigung erfasst, können somit bei Asynchronmotoren einige Schäden an den Wicklungen, Lagern, der Verlust von Einspeisungsphasen oder mechanische Probleme erkannt werden. Bei Gebläsen kann Schwingungsmesstechnik zudem Laufrad-Probleme feststellen. Allerdings sind nicht alle Fehler, die diesen Gruppen zugeordnet werden, erfassbar. Lagerschäden wie z.B. Brüche können mit keiner Messtechnik frühzeitig erkannt werden. Einige elektrische und thermische Probleme (siehe 3.4) können durch den FU abgefangen werden.

Auch die im Kapitel „Referenzen“ (siehe 3.3) erwähnten Beispiele verwenden zur Überwachung von Motoren hauptsächlich Schwingungs- und Temperaturmessungen, aus welchen bei einem der Projekte Aussagen über die Nichtkonformität der Prozessqualität getroffen wird.

In den kommenden Abschnitten werden daher geeignete Sensoren für die Lagerüberwachung der vier Motoren ausgewählt, die Montageposition, welche den Zustand der Lager am besten erfasst, bestimmt sowie die Sensoren konfiguriert, validiert, justiert und an die SPSen angebunden.

7.1 Geeignete Sensoren

Für die Auswahl der Sensoren spielen die lokalen Gegebenheiten sowie die Einbindbarkeit in SPSen und die lokale Datenbank eine große Rolle. Beim Aggregat ist mit erhöhter Staub- und Lärmbelastung und Umgebungsschwingungen zu rechnen, weshalb die Hardware für diese Umgebungsbedingungen geeignet sein muss. Die Umgebungstemperatur und Luftfeuchtigkeit stellen kein Problem dar.

Am Markt werden sehr viele Sensoren angeboten, für diese Anwendung kommen jedoch nur wenige in Frage. Viele dieser Sensoren können nur in Verbindung mit einer externen Cloud genutzt werden und es nicht möglich ist, diese Sensoren nur in die firmeninterne Datenbank einzubinden. Die Erstellung eigener Modelle hat den Nachteil, dass für die Motoranalyse keine fertigen Analysetools genutzt werden können, dafür aber bleiben die Daten in der Firma und die Motorüberwachung ist nicht an Produktlebenszyklen der Hersteller gebunden. Für die praktische Umsetzung werden zum Vergleich verschiedene Systeme, welche die vorher genannten Kriterien erfüllen, ausgewählt. Wie in den weiteren Abschnitten genauer beschrieben, werden neben IO-Link Sensoren auch Analogsensoren mit Diagnoseelektronik verwendet.

7.1.1 IO-Link Sensor

Der Vorteil von IO-Link Sensoren ist, dass über eine Schnittstelle mehrere Werte aus dem Sensor ausgelesen werden können. Damit können vom selben Sensor Schwingungsmessungen in mehreren Achsen ausgelesen werden. Beim ausgewählten IO-Link Sensor „BCM0001“ von Balluff können bis zu 20 Byte übertragen werden. Damit können vier Messwerte, die als „Auswertegrößen“ bezeichnet werden, und ein Status mit einer Länge von 4 Byte übertragen werden.

Nachfolgend werden die wichtigsten Daten zum Sensor BCM0001 angegeben:[133]

Allgemeine Informationen BCM0001

Der Sensor ist für eine Bemessungsbetriebsspannung von 24 V DC ausgelegt und der Anschluss des Edelstahlsensors erfolgt über einen A-codierten 3-poligen M12 Stecker. Als Schutzart ist IP67 angegeben.

Funktion

Als Sensorfunktionen werden am Datenblatt die Schwinggeschwindigkeit, Schwingbeschleunigung, Schweregradzonen, Kontakttemperatur und Sensorselbstüberwachung angegeben. Schwingungen können in Form von statischen Auswertegrößen ausgegeben werden. Auswählbare Auswertegrößen sind Effektivwert und Peak to Peak bzw. von der Schwinggeschwindigkeit zusätzlich Mittelwert, Standardabweichung, Crest Faktor, Skewness oder Kurtosis. Welche Auswertegrößen übertragen wird, kann in den Parametern des Sensors definiert werden. In Kombination mit der Diagnoseelektronik kann der MEMS-Sensor inklusive der Messzelle mit einem Selbsttest überwacht werden.

Schwingungsmessung

Der messbare Frequenzbereich des MEMS-Sensors liegt bei 2 bis 3200 Hz und die Abtastrate liegt mit 6400 Hz, wie laut dem Nyquist Theorem gefordert (siehe 3.5.1), doppelt so hoch. Schwingungen können in allen drei um 90° versetzten Messachsen, erfasst werden. Es wird eine Linearitätsabweichung von +/- 2 % und eine Messunsicherheit von +/-5 % sowie die Auflösung mit 0,006 g bei der Beschleunigungsmessung bzw. 0,42 mm/s bei der Schwinggeschwindigkeits-messung bei je 79 Hz angegeben.

Temperaturmessung

Der Sensor ist für einen Messbereich von 0 bis 70 °C ausgelegt und stellt die Kontakttemperatur mit einer Auflösung von 0,1 °C zur Verfügung.

Die Kabellänge zwischen Sensor und IO-Link-Master ist auf maximal 20 m begrenzt.[134]

Dieser Sensor kann in diesem Anwendungsfall entweder an eine SPS angebunden oder mit dem CMTK genutzt werden. Letzteres bietet die Möglichkeit Messwerte ohne SPS in die Datenbank zu übertragen oder bei fehlender Netzwerkanbindung die Maschine über das CMTK zu überwachen. Außerdem können auch Daten zur weiteren Verwendung vom CMTK exportiert werden. Die folgenden Angaben sind dem Datenblatt entnommen:[135]

[133] Vgl. Balluff GmbH (2023), Online-Quelle [30.07.2023], S. 1ff.

[134] Vgl. Balluff GmbH (2023), Online-Quelle [30.07.2023], S. 17.

[135] Vgl. Balluff GmbH (2023), Online-Quelle [27.11.2023], S. 1f.

Allgemeine Informationen CMTK

Das CMTK benötigt eine Versorgungsspannung von 24 V DC. Über vier M8 Anschlüsse können IO-Link Sensoren eingebunden werden, deren Daten in einem 8 GB großen internen Speicher gesichert werden können, welcher mit einer SD-Karte erweiterbar ist. Über die Ethernet-Schnittstellen können Daten an externe Systeme übertragen werden. Als Schutzart ist IP 20 angegeben.

Funktion

Das Modul kann für die Zustandsüberwachung von bis zu vier beliebigen IO-Link Sensoren verwendet werden. Über eine Webapplikation, welche mit den gängigen Browsern aufrufbar ist, können Prozessüberwachungen konfiguriert und in einem Dashboard dargestellt werden.

Für die Einbindung der IO-Link Sensoren wird ein IO-Link Master, der „AL1402“ von IFM, verwendet. [136]

Allgemeine Informationen AL1402

Mit Schutzart IP 65 ist der IO-Link Master für den Einbau direkt im Feld geeignet. Er benötigt eine Versorgungsspannung von 20 bis 30 V DC, verfügt über eine Profinet Schnittstelle und je vier Ports Class A und Class B, wobei sich die Class B-Ports durch eine zusätzliche Stromversorgung für die angeschlossenen Devices von den A-Ports unterscheiden. Diese M12 Buchsen sind A-codiert und als IO-Link Revision wird 1.1 angegeben.

Auch wenn die Ports Class B nur zum Auslesen der Sensoren verwendet werden und die Zusatzspannung nicht benötigt wird, ist es bei diesem IO-Link Master empfehlenswert auch die zusätzliche Versorgungsspannung auszuführen, da sonst die rote Meldeleuchte aufscheint.

7.1.2 Analogsensor

Speziell bei Anlagen, bei denen nur ein bis zwei Lager überwacht werden sollen und keine IO-Link Master Anbindung möglich ist, stellt ein analoger Beschleunigungssensor eine günstigere Alternative dar. Nachfolgend werden die wichtigsten Daten zum Sensor VSA201 angegeben:[137]

Allgemeine Informationen VSA201

Der kapazitive Sensor zählt zu den MEMS-Sensoren und muss mit einer Bemessungsbetriebsspannung von 7,2 bis 10,8 V DC versorgt werden. Der Anschluss des Edelstahlsensors erfolgt über einen A-codierten 4-poligen M12 Stecker. Eine maximale Leitungslänge von 250 m ist bei diesem Sensor möglich. Als Schutzart ist IP67 angegeben. Die Umgebungstemperatur soll innerhalb von -30 und +125 °C liegen. Die Linearitätsabweichung ist mit 5 % angegeben.

[136] Vgl. ifm electronic GmbH (2023), Online-Quelle [27.11.2023]

[137] Vgl. ifm electronic GmbH (2023), Online-Quelle [27.11.2023]

Schwingungsmessung

Gemessen wird die Beschleunigung, welche der Senor als ungefiltertes Rohsignal ausgibt, in nur einer Achse im Bereich von -250 bis +250 g. Der messbare Frequenzbereich beträgt 1 bis 6000 Hz.

Zu beachten ist, dass dieser Sensor nur mit Diagnoseelektronik wie z.B. „VSE002“ funktioniert:[138] Andere Analogsensoren können direkt an SPSen angebunden werden.

Allgemeine Informationen VSE002

Die Diagnoseelektronik VSE002, mit der Schutzart IP 20, wird mit 24 V DC versorgt. Sie verfügt über insgesamt acht konfigurierbare Ein- und Ausgänge, wobei nur einer davon als Analogausgang genutzt werden kann. Zusätzlich gibt es eine Schnittstelle zur Ethernet-Anbindung. Mit der 16 Bit Auflösung am Analogeingang kann bei einer Skalierung von 0 bis 250 g eine Auflösung von rund 0,004 g erreicht werden. Über sogenannte Objekte können für den gewählten Analogsensor jeweils der Effektivwert von Geschwindigkeit und Beschleunigung im Frequenz- und Zeitbereich sowie der Effektivwert des Schwingweges im Frequenzbereich und der Peak-Wert der Beschleunigung im Zeitbereich ermittelt werden.

Funktion

Die Diagnoseelektronik ist dafür geeignet, Signale wie Schwingungen im Zeit- oder Frequenzbereich unter Berücksichtigung von bis zu zwei Prozessgrößen wie z.B. Drehzahl und Last zu überwachen. Über die Ethernet Schnittstelle können diese Daten (Messwerte und Alarmzustände, usw.) in weitere Systeme integriert werden. Die Parametrierung des Moduls erfolgt über eine PC-Software.

Wie das CMTK bietet die Diagnoseelektronik zusätzlich die Möglichkeit, Maschinen in einer Art Insellösung lokal zu überwachen oder ohne SPS direkt an das Netzwerk anzubinden.

7.2 Auswahl

Wie in Abb. 12 dargestellt, werden diese Condition Monitoring Sensoren an der Antriebsseite von Motoren, über Lager von Wellen und an Getrieben angebracht. Einen Messung auf der NDE des Motors ist nicht notwendig, weil bei kleinen Motoren ein Defekt auf der NDE an beiden Lagern sichtbar ist. Wird eines der Lager defekt werden bei der Reparatur immer beide ersetzt. Durch Verwendung nur eines Sensors können Messstellen reduziert werden.

[138] Vgl. ifm electronic GmbH (2023), Online-Quelle [27.11.2023]

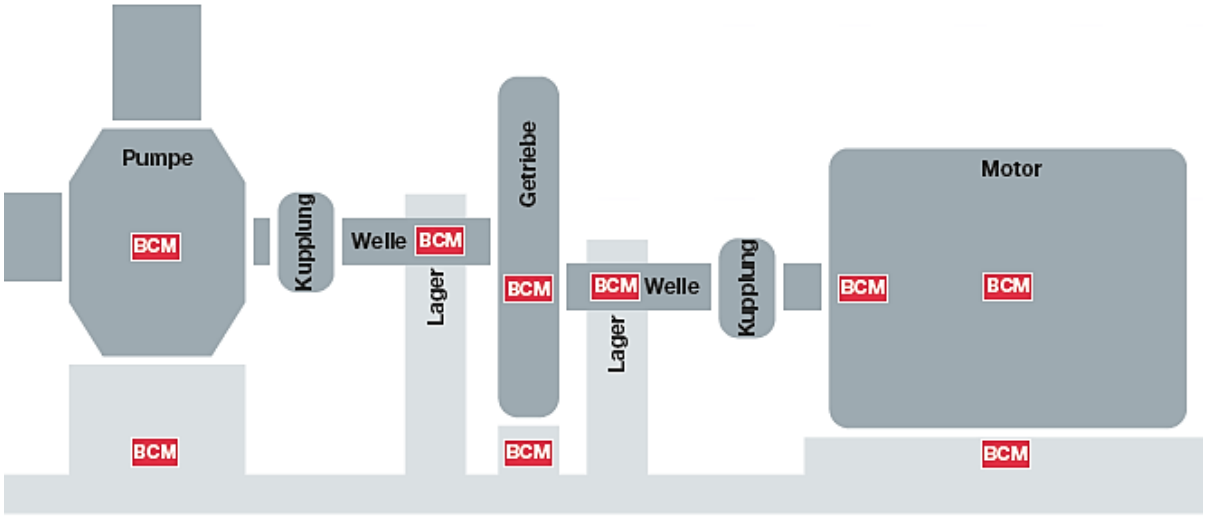


Abb. 12: Beispielhafte Montageorte zur Schwingungsmessung, Quelle: Balluff GmbH (2023), Online-Quelle [30.07.2023], S. 14.

Anhand dieser Montageorte werden für die Motoren die folgenden Sensoren ausgewählt:

- Für den Gebläsemotor sind somit drei Sensoren am Motor selbst und zwei Messungen an den Lagern der Welle notwendig. Die Montagepositionen und Ausrichtung der Sensoren werden in Abb. 6 dargestellt. Da die Überwachung der Motoren auch als Konzept für zukünftige, ähnliche Predictive Maintenance Projekte dienen soll, werden am Motorlager drei verschiedene Messungen bzw. Systeme nebeneinander aufgebaut. Dadurch können diese direkt miteinander verglichen werden. Bei diesem Antrieb sind deshalb zum IO-Link Sensor, der direkt an die SPS angebunden ist, ein weiterer IO-Link Sensor, der an das CMTK angebunden ist, und ein Beschleunigungssensor mit Diagnoseelektronik verbaut.
- Beim Motor Sichterrad werden, wie in Abb. 7 eingezeichnet, zwei Sensoren benötigt. Einer auf der Antriebsseite des Motors und der zweite am Lagergehäuse des Sichterrades.
- Die Zellradschleuse benötigt ebenfalls zwei Sensoren zur Überwachung des Motorlagers und Getriebes, wie in Abb. 9 dargestellt.
- Beim Abgasgebläse wird für die praktische Umsetzung nur ein Sensor über dem antriebsseitigen Lager benötigt. Aufgrund der Entfernung vom Motor zu den bestehenden IO-Link Mastern wird der Analogsensor am Motor mit einer Klebehalterung verbaut.

Bei den drei Motoren Gebläsemotor, Motor Sichterrad und Motor Zellradschleuse, die alle an die S7 1500 angebunden sind, werden die Condition Monitoring IO-Link Sensoren gewählt. Durch die geringe Entfernung der Motoren zueinander können die Sensoren zusammen über einem IO-Link Master mit der SPS verbunden werden.

7.3 Implementierung

Im kommenden Abschnitt wird die Implementierung der Sensoren in die unterschiedlichen Systeme SPS, CMTK und Diagnoseelektronik beschrieben.

7.3.1 IO-Link Sensoren in S7 1500

Um die Sensoren an die SPS anzubinden ist ein IO-Link Master erforderlich. Die Einbindung des IO-Link Masters erfolgt über die Hardwarekonfiguration der bestehenden SPS S7 1500, welche physisch über Profinet mit diesem verbunden ist. Damit der IO-Link Master in der Projektierungssoftware TIA-Portal aus dem Hardware-Katalog eingefügt werden kann, muss die vom Hersteller bereitgestellte Gerätebeschreibungsdatei in der Software installiert werden. Anschließend kann der IO-Link Master in die Hardwarekonfiguration eingefügt werden. Über das ausgewählte Profil in der Geräteansicht, wie in Abb. 13 dargestellt, werden die Eigenschaften des IO-Link Masters eingestellt. Dieses Profil hat Einfluss auf die verfügbaren Submodule der Ports und die übertragbaren Prozessdaten. „IO-Link Master Proxy 8P“ ist die Standardeinstellung. Welche Submodule verwendet werden müssen, ist aus der Device-Spezifikation des Sensors abzuleiten, welche in Abb. 14 dargestellt wird. Da 20 Bytes Daten ausgelesen werden sollen, werden die Submodule „IO-Link 32 I Byte + PQI“ verwendet. Bei „Validation / Data Storage“ wird die IO-Link Protokollversion eingestellt. Über die Hersteller- und Gerätekennung „Vendor ID“ und „Device ID“ wird der Sensor selbst beim IO-Link Master eingestellt. Die in der Sensor-Spezifikation angegebenen Werte, welche als Hexadezimalzahlen angegeben sind, müssen für die Eingabe im TIA-Portal in das dezimale Zahlensystem umgerechnet werden.

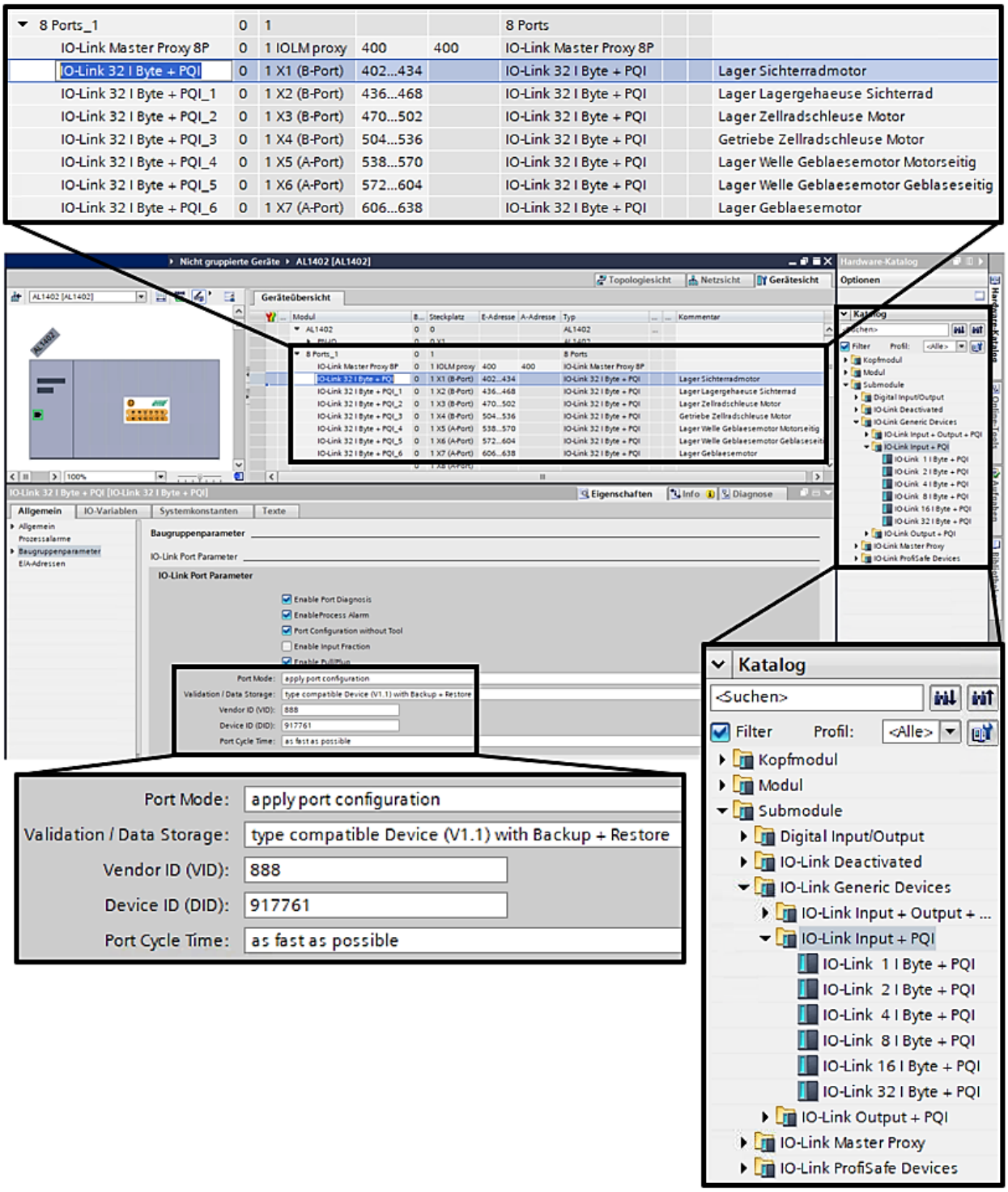


Abb. 13: Hardwarekonfiguration IO-Link Sensor, Quelle: Eigene Darstellung

Spezifikation	IO-Link-Bezeichnung	Wert
Übertragungs-rate	COM3	230,4 kBaud
Minimale Zyklus-zeit Device	MinCycleTime	10 ms
IO-Link-Proto-kollversion	Revision ID	0x11 (Version 1.1)
Anzahl Prozess-daten vom Device zum Master	Process Data IN	20 Bytes
Anzahl Prozess-daten vom Master zum Device	Process Data OUT	0 Bytes
Herstellerken-nung	Vendor ID	0x0378
Gerätekennung	Device ID	0x0E0101 (BCM R15E-**001**-…) oder 0x0E0102 (BCM R15E-**002**-…)

Abb. 14: Device-Spezifikation BCM0001, Quelle: Balluff GmbH (2023), Online-Quelle [30.07.2023], S. 19.

Abschließend wird dem IO-Link Master in der Hardwarekonfiguration ein Name und eine IP-Adresse zur Identifikation vergeben. Im Programm ist damit die „offline“ Einbindung des IO-Link Master fertiggestellt. Damit eine Kommunikation zwischen SPS und IO-Link Master stattfinden kann, muss dem unkonfigurierten IO-Link Master im TIA-Portal unter „Online-Zugänge“ diese IP-Adresse und dieser Namen zugewiesen werden. Danach kann der IO-Link Master von der SPS über seinen Namen erreicht werden. Die übrige Konfiguration des IO-Link Masters, wird durch Übertragung der Hardwarekonfiguration eingestellt.

Das Auslesen der Sensoren erfolgt über die physische Adresse, die in der Hardwarekonfiguration vergeben wurde, wie in Abb. 13 in der Spalte „E-Adresse“ ersichtlich. Die ersten 20 der 32 Bytes werden, wie in Abb. 15 dargestellt, in fünf Slots mit je vier Bytes aufgeteilt. Die übertragenen Daten hängen von der Konfiguration des Sensors ab.

	Slot 1 (Byte 0…3)	Slot 2 (Byte 4…7)	Slot 3 (Byte 8…11)	Slot 4 (Byte 12…15)	Slot 5 (Byte 16…19)
Profilname (Profilnummer)	Wertbezeichner	Wertbezeichner	Wertbezeichner	Wertbezeichner	Wertbezeichner
	Index, Subindex als Servicedaten	Index, Subindex als Servicedaten	Index, Subindex als Servicedaten	Index, Subindex als Servicedaten	
Benutzerdefi-niertes Prozess-datenprofil (8)	Die Bedeutung der Daten kann über den Index 0x2001 (8193) Subindex 0x01 (1) bis 0x04 (4) eingestellt werden. Eine Anleitung ist in Kapitel *Benutzerdefiniertes Prozessdatenprofil (CUSTOM PROCESS DATA PROFILE CONFIGURATION)* auf Seite 21 gegeben.				Statusbits

Abb. 15: Prozessdaten BCM0001, Quelle: Balluff GmbH (2023), Online-Quelle [30.07.2023], S. 38.

Beim Sensor „Lager Sichterradmotor“ wird z.B. mit der Hardwareadresse 402 der Wert von Slot 1 vom Datentyp Double Word übertragen. Der nächste Wert, welcher auf Slot 2 übertragen wird, hat beispielsweise die Adresse 406 usw.

Diese Werte werden in einer Funktion, wie in Abb. 17 dargestellt, in Gleitkommazahlen umgewandelt und auf einen Datenbaustein mit absoluter Adressierung geschrieben, wie in Abb. 16 dargestellt. Der Aufruf der Funktion erfolgt zyklisch alle 20 ms, was dem kleinstmöglich einstellbaren Zeitfenster des Sensors entspricht, wie in Abb. 24 dargestellt. Dadurch muss in der SPS nichts angepasst werden, falls das Zeitfenster in der Sensorkonfiguration abgeändert wird.

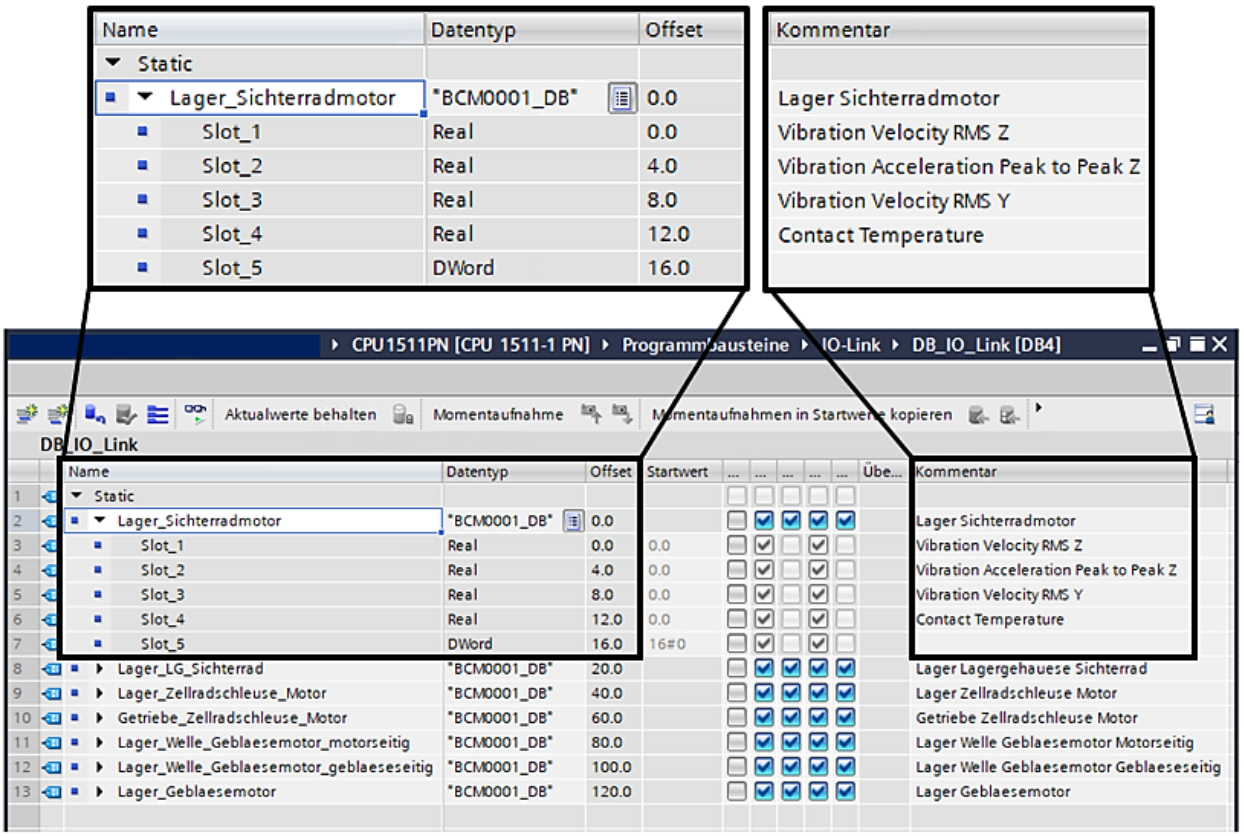


Abb. 16: Datenbaustein IO-Link Sensoren, Quelle: Eigene Darstellung

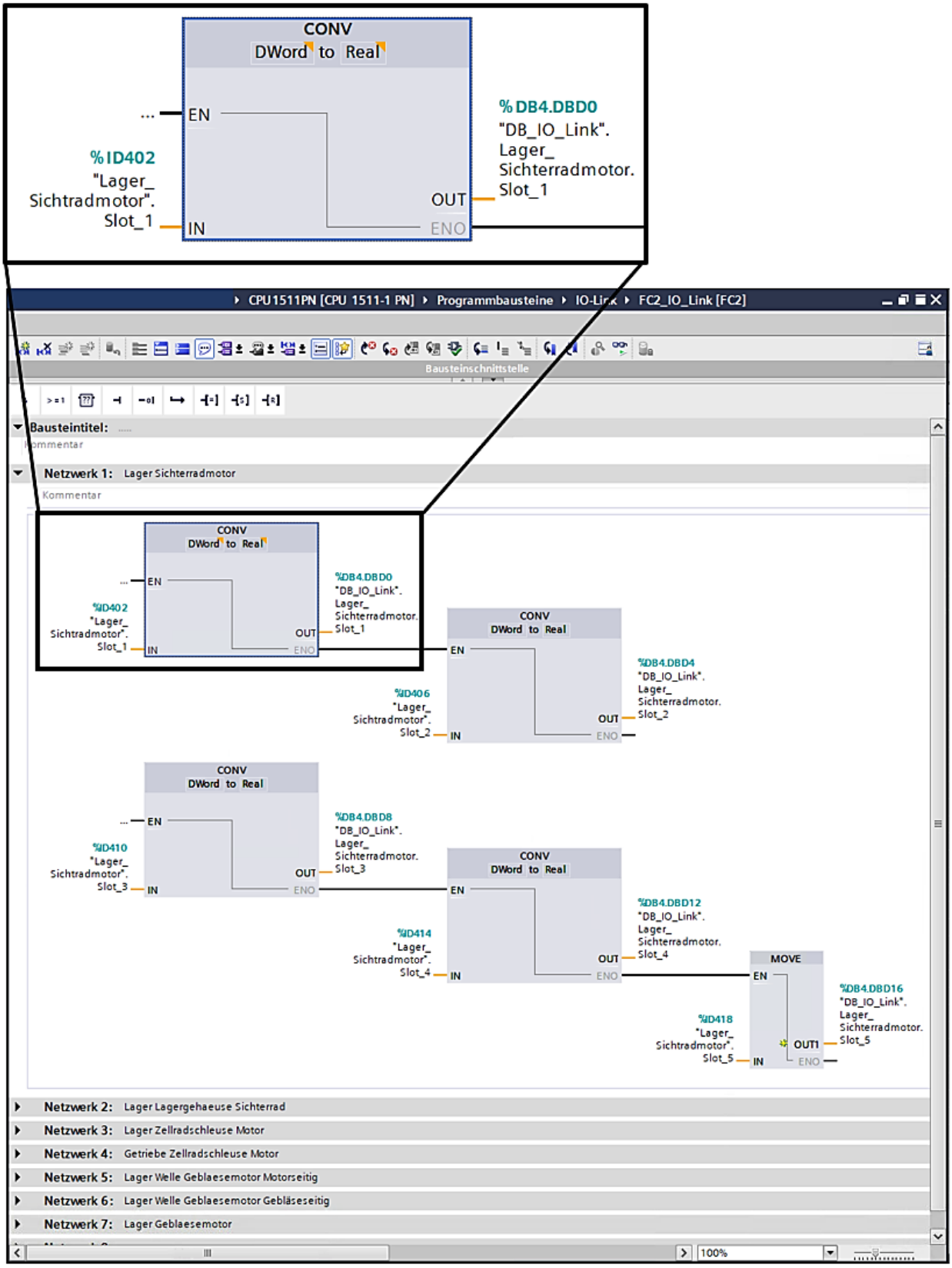


Abb. 17: Funktion IO-Link Sensoren auslesen, Quelle: Eigene Darstellung

7.3.2 IO-Link Sensor in CMTK

Vor der Implementierung des Sensors im CMTK, muss es über seine Weboberfläche, auf die über eine der Ethernet Schnittstellen zugegriffen wird, konfiguriert werden. Dort können diverse Einstellungen zu IP-Adressen, zur Datenerfassung, Zeit- und Open Platform Communication Unified Architecture-Servern (OPC UA), sowie den angeschlossenen Geräten usw. vorgenommen werden.

7.3.2.1 Konfiguration CMTK

Für die spätere Anbindung an das Firmennetzwerk wird der Netzwerkschnittstelle „Port 2“ eine IP-Adresse vergeben. Der Gerätename und das Gerätebild können individuell auf die Anlage, an der das Modul eingesetzt wird, angepasst werden.

Die Verbindung zur Datenbank erfolgt über einen OPC-UA Server. Zusätzlich wird der Zeitserver eingerichtet, damit die am Gerät gespeicherten Messwerte denselben Zeitstempel wie die Messwerte in der Datenbank haben.

Im Gerät kann ein Datenerfassungsintervall von 50 ms bis 60 s festgelegt werden. Für die gegenständliche Anwendung wird ein Datenerfassungsintervall von 100 ms gewählt. Die Aufbewahrungsdauer wird von der Anzahl der erfassten Daten und der Datenbankgröße bestimmt. Da nur ein Sensor angeschlossen ist, können mit diesen Einstellungen Daten von über zwei Jahren auf dem Gerät gespeichert werden.

Außerdem ist eine E-Mail Benachrichtigungen z.B. bei Verletzung der Alarmgrenzen, möglich. Diese ist für temporäre Condition Monitoring Anwendungen, bei denen das Gerät ohne SPS verwendet wird, sinnvoll.

Die Konfiguration des IO-Link Sensors wird im Kapitel „IO-Link Sensor“ (siehe 7.4.1) beschrieben. Für Geräte von fremden Herstellern muss eine IO Device Description (IODD), welche Informationen zum Gerät enthält, hochgeladen werden.

7.3.2.2 Konfiguration Datenvisualisierung

Die Datenvisualisierung basiert auf der Open Source Software Grafana und ermöglicht eine individuelle Gestaltung der Oberfläche. Für den Gebläsemotor werden, wie in Abb. 18 dargestellt, alle vier Werte vom IO-Link Sensor in einem Trend über die Zeit aufgetragen. Die Lagertemperatur wird zur Übersichtlichkeit in der Visualisierung zusätzlich als Messgerät angezeigt. Im Feld links oben werden die konfigurierten Alarme ausgegeben.

Abb. 18: Datenvisualisierung CMTK Lager Gebläsemotor Übersicht, Quelle: Eigene Darstellung

Prinzipiell ist die Alarmauswertung der Messwerte nur im Analysemodell angedacht, für reine Condition Monitoring Anwendungsfälle wird die Benachrichtigungsfunktion des CMTK trotzdem getestet. Im CMTK werden dafür in der Datenvisualisierung in der Bearbeitungsansicht, wie in Abb. 20 dargestellt, Alarme konfiguriert. Im angeführten Beispiel wird in der Z-Achse der Effektivwert der Schwinggeschwindigkeit überwacht. Um die Variable im Register „Alert“ auswählen zu können, muss sie, wie in Abb. 19 dargestellt, im Register „Query“ angelegt werden. Bleibt der Effektivwert für mehr als fünf Minuten über dem Grenzwert 7,1 mm/s (siehe Tab. 11), wird ein Alarm ausgegeben. Zusätzlich ist eine Benachrichtigung per E-Mail eingestellt, die an die bei „email-notification“ hinterlegten Adressen geht.

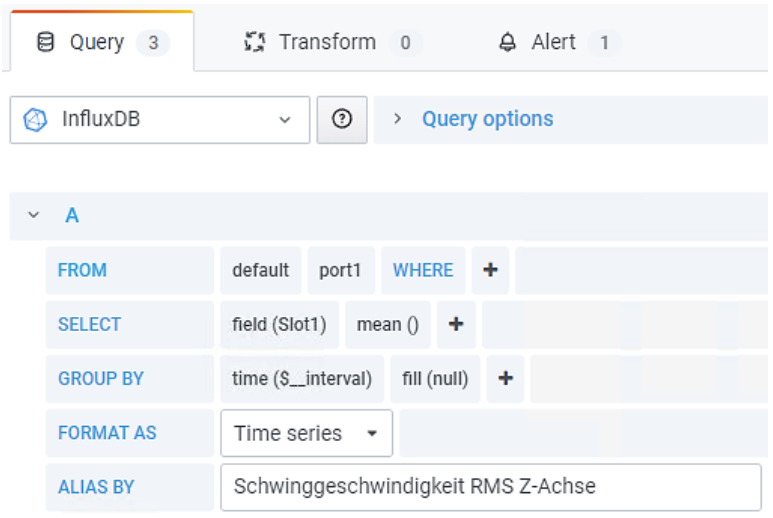


Abb. 19: Datenvisualisierung CMTK Lager Gebläsemotor Alarm Query, Quelle: Eigene Darstellung

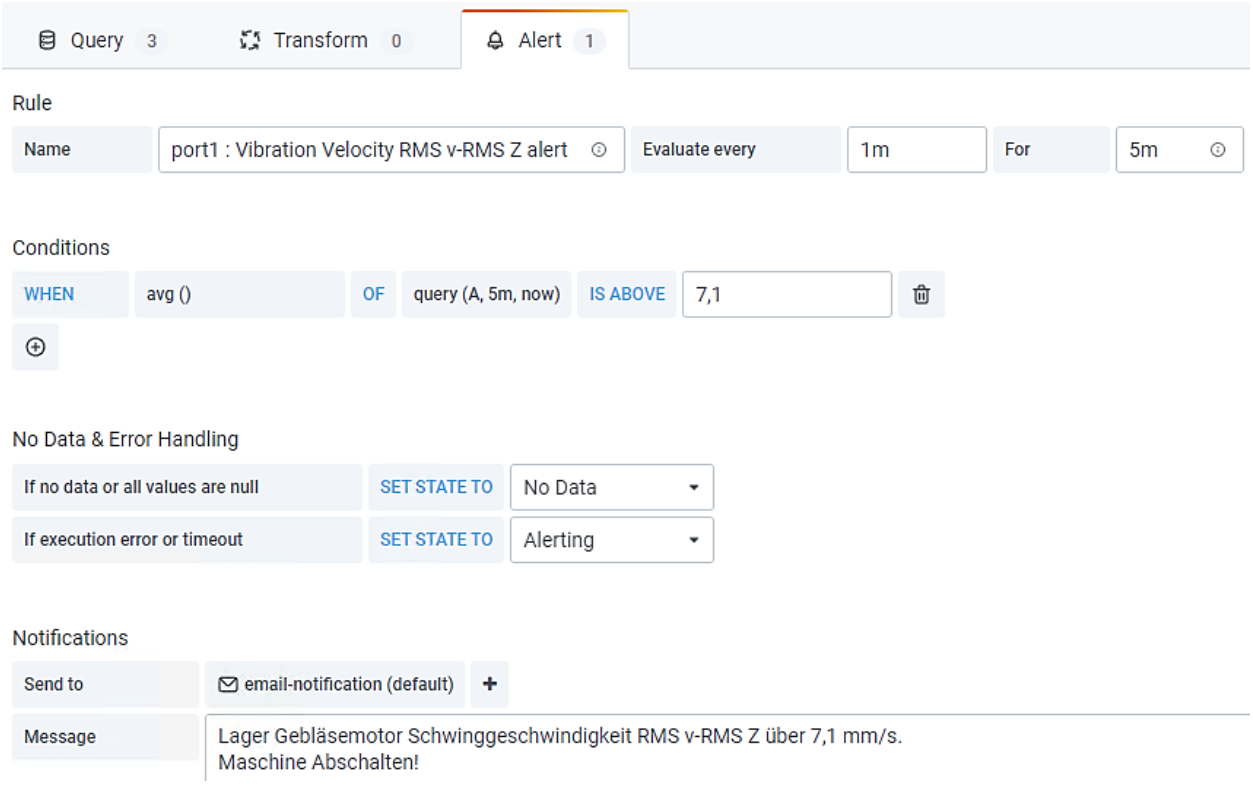


Abb. 20: Datenvisualisierung CMTK Lager Gebläsemotor Alarm Alert, Quelle: Eigene Darstellung

Der Schutz vor Änderungen in der Sensorkonfiguration ist durch Zugangsbeschränkung für SPS und CMTK gegeben.

7.3.3 Analogsensor in S7 1200

Der Analogsensor am Lager des Gebläsemotors wird über eine S7 1200 SPS an die Datenbank angebunden. Da bei der S7 1500 kein Analogeingang mehr frei ist und diese Messung nur temporär aufgebaut ist, wird sie an eine neue SPS angeschlossen. Wie bei der S7 1500 (siehe 7.3.1) besteht das Programm aus einem Datenbaustein und einer Funktion, die zyklisch aufgerufen wird und den Analogeingang auf den Datenbaustein schreibt. Der einzige Unterschied ist die Anbindung über ein 4 bis 20 mA Signal anstelle von IO-Link. Die direkte Anbindung der Diagnoseelektronik an das Netzwerk ist auch möglich, wird aber aus zeitlichen Gründen nicht ausgeführt.

7.3.4 Analogsensor in S7 300

Wie bei der S7 1500 wird in die S7 300 die Messung über die Diagnoseelektronik als 4 bis 20 mA Stromeingang eingebunden. Die im Programm verwendeten Bausteine sind ebenfalls ähnlich.

7.4 Konfiguration

7.4.1 IO-Link Sensor

Für die Konfiguration der IO-Link Sensoren, welche über den IO-Link Master an die SPS angebunden sind, gibt es mehrere Möglichkeiten. Diese können über einen IO-Link Baustein über das TIA-Portal, durch die Software von IFM „LR-Device“ oder das CMTK konfiguriert werden. Da der IO-Link Master und die IO-Link Sensoren von unterschiedlichen Herstellern stammen, ist für die Konfiguration der Sensoren über das LR-Device eine Lizenz erforderlich, weshalb die Konfiguration über das CMTK erfolgt.

Im CMTK können für IO-Link Sensoren unterschiedlichste Einstellungen z.B. zum Datenprofil, zu Grenzwerten und Alarmen getroffen sowie unterschiedlichste Status- und Diagnosewerte ausgelesen werden. Zur Konfiguration gibt es vom Hersteller vorgefertigte Profile oder eine benutzerdefinierte Option. Bei Auswahl des benutzerdefinierten Datenprofiles können die einzelnen Slots individuell belegt werden, wie in Abb. 21 ersichtlich. Nachfolgend wird die Konfiguration der IO-Link Sensoren anhand vom Sensor am Lager des Gebläsemotors beschrieben.

Process Data Profile

Index (Subindex)	Name	Wert
8192 (0)	Process Data Profile (rw)	Custom Process Data Profile - 8

Custom Process Data Profile

Index (Subindex)	Name	Wert
8193 (1)	Custom Process Data Profile Configuration.Slot 1 (rw)	Vibration Velocity RMS v-RMS Z - 0x21140300
8193 (2)	Custom Process Data Profile Configuration.Slot 2 (rw)	Vibration Acceleration Peak to Peak a-Peak-to-Peak Z - 0x211e0300
8193 (3)	Custom Process Data Profile Configuration.Slot 3 (rw)	Vibration Velocity RMS v-RMS X - 0x21140100
8193 (4)	Custom Process Data Profile Configuration.Slot 4 (rw)	Contact Temperature Contact Temperature - 0x20310100

Abb. 21: Konfiguration BCM0001 Lager Gebläsemotor, Quelle: Eigene Darstellung

Beim Lager des Gebläsemotors repräsentiert z.B. die Z-Achse die vertikale Messachse und die X-Achse die Horizontale, wie den Abb. 22 und Abb. 23 zu entnehmen ist. Aus diesem Grund wird bei den ersten beiden Slots die Z-Achse, in der bei horizontaler Maschinenausrichtung die stärksten Schwingungen zu erwarten sind (siehe 3.5.1), gewählt. Auf Slot 1 wird die laut Normen wichtigste Kenngröße Schwinggeschwindigkeit Effektivwert übertragen. Die Beschleunigung Peak-to-Peak, welche die hochfrequenten Signalanteile besser wiedergeben kann, wird auf dem zweiten Slot übertragen. Slot 3 wird mit dem Schwinggeschwindigkeit Effektivwert X-Achse und Slot 4 mit der Kontakttemperatur belegt.

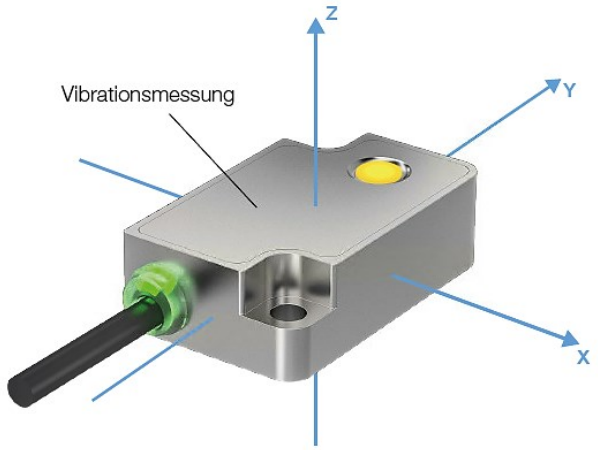


Abb. 22: Achsausrichtung BCM0001, Quelle: Balluff GmbH (2023), Online-Quelle [30.07.2023], S. 14.

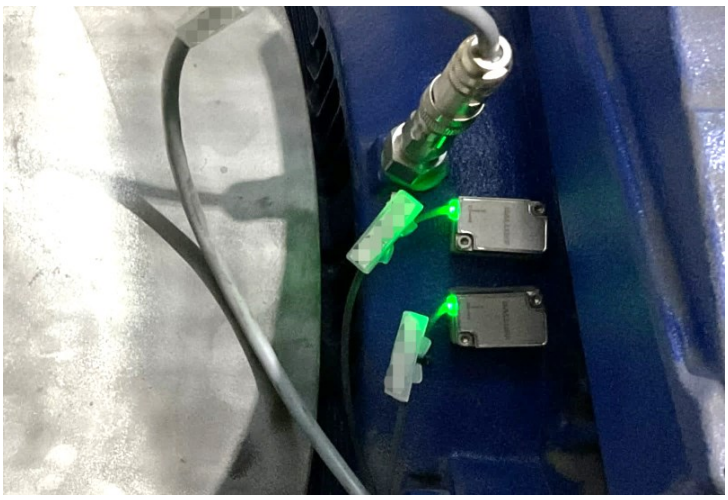


Abb. 23: Sensoren Lager Gebläsemotor, Quelle: Eigene Darstellung

Der Sensor selbst gibt statische Kenngrößen aus. Diese Kenngrößen werden abhängig vom eingestellten Zeitfenster aktualisiert. Das gewählte Zeitfenster, wie in Abb. 24 dargestellt, beeinflusst die zulässige Mindestfrequenz des Bandpassfilters. Über die Bandpassbegrenzung können Frequenzen, die außerhalb des relevanten Bereichs liegen, gefiltert werden.

Zeitfenster	Mindestfrequenz
20 ms	100 Hz
100 ms	20 Hz
250 ms	8 Hz
500 ms	4 Hz
1000 ms	2 Hz

Abb. 24: Kleinste zulässige Frequenz im Signal bei gegebenem Zeitfenster BCM0001, Quelle: Balluff GmbH (2023), Online-Quelle [30.07.2023], S. 11.

Da diese Motoren mit Drehzahlen jenseits der 600 U/min betrieben werden, wird ein Frequenzbereich von mindestens 10 Hz bis 1000 Hz empfohlen. (Unter 600 U/min wird für den Effektivwert der Schwinggeschwindigkeit ein Frequenzbereich von 2 Hz bis 1000 Hz empfohlen)[139] Das Einstellen eines kleineren Zeitfensters als 250 ms wird z.B. beim Lager vom Gebläsemotor vom CMTK nicht zugelassen. Für Unwuchten oder Komponenten wie Riemen ist der untere Frequenzbereich ausreichend, für die Lager und Getriebe ist ein höherer Frequenzbereich von 2 bis 3 kHz relevanter. Da die Bandgrenzen nur für den gesamten Sensor und nicht für einzelne Werte eingestellt werden können, wird als obere Grenze das Maximum 3199 Hz eingestellt, um einen möglichst großen Frequenzbereich darzustellen. Beim Frequenzbereich bis 1 kHz kommen hingegen die einzelnen Frequenzen deutlicher hervor. Allerdings können mit der Erfassung der statischen Kenngröße nicht mehr die einzelnen Bauteilfrequenzen über die Hüllkurvenanalyse identifiziert werden. Es ist zwar erkennbar, dass Änderungen stattfinden, aber diese können keinem Bauteil mehr zugeordnet werden.

[139] Vgl. ifm electronic GmbH (2023), Online-Quelle [23.10.2023]

7.4.2 Analogsensor

Die Konfiguration der Diagnoseelektronik und des Analogsensors, welcher Rohwerte ausgibt, erfolgt über die Software des Herstellers „VES004“. Dafür wird in einem neuen Projekt die Diagnoseelektronik als „Gerät“ angelegt. Für beide Analogsensoren (Abgasgebläse und Gebläsemotor) wird ein 10 Hz Hochpassfilter eingestellt. Als Filteroptionen gibt es keinen Filter, oder einen Filter mit 2 oder 10 Hz. Die Sensorskalierung ist mit 0 bis 250 g nicht änderbar. Um diesen Messwert am Analogausgang des Moduls ausgeben zu können, muss in der Software ein Objekt erstellt werden. Zur Auswahl stehen Geschwindigkeits- und Beschleunigungsmessungen als Peak- oder Effektivwert über Zeit oder Frequenz. Da nur ein Signal ausgegeben werden kann, wird ein Beschleunigungsobjekt „Peak_Zeit“, erstellt. Die konfigurierbaren Filter für dieses Objekt sind wieder vorgegeben, weshalb ein Tiefpassfilter mit 5975 Hz eingestellt wird, denn der nächstkleinere begrenzt den Frequenzbereich auf 1500 Hz. Als Messzeit wird für das Objekt 163,84 ms festgelegt, da ebenfalls nur wenige Werte zur Auswahl stehen. Zusätzlich bietet das Modul die Möglichkeit Grenzwerte, Trigger und Mitteilungen einzustellen – welche bei dieser Anwendung nicht verwendet werden. Außerdem signalisiert das Modul Grenzwertüberschreitungen mit einer roten Leuchte, welche im Gutzustand grün ist.

Das oben beschriebene Objekt wird als 4 bis 20 mA Stromsignal ausgegeben, welches nur in mg skaliert werden kann. Damit die Auflösung der Messungen ausreichend ist, wird diese wie beim IO-Link Sensor mit 20 mA als 16 g bzw. 16.000 mg festgelegt. Unter normalen Betriebsbedingungen wird dieser Wert nicht überschritten.

Im Konfigurationstool können die in der Diagnoseelektronik gespeicherten Daten in einer Trendansicht und die Messung als Spektrum in Echtzeit dargestellt werden.

7.5 Montage

Für die bestmögliche Wiedergabe der Messgröße, mit hoher Empfindlichkeit gegenüber Fehlern und geringen Empfindlichkeit bei Umgebungseinflüssen, werden die Sensoren, wie in Abb. 25 dargestellt, gut zugänglich direkt auf die Lagergehäuse bzw. Lagerbock montiert. Da alle Maschinen horizontal angeordnet sind, werden, wo es zur Auswahl steht, die Messgrößen in vertikaler und horizontaler Richtung erfasst. Bei den Gebläsemotoren werden die Analogsensoren, welche Schwingungen nur in einer Achse messen können, vertikal verbaut, da durch den Aufbau der Maschinen in dieser Richtung die größte Flexibilität vorherrscht und somit die stärksten Schwingungen zu erwarten sind.

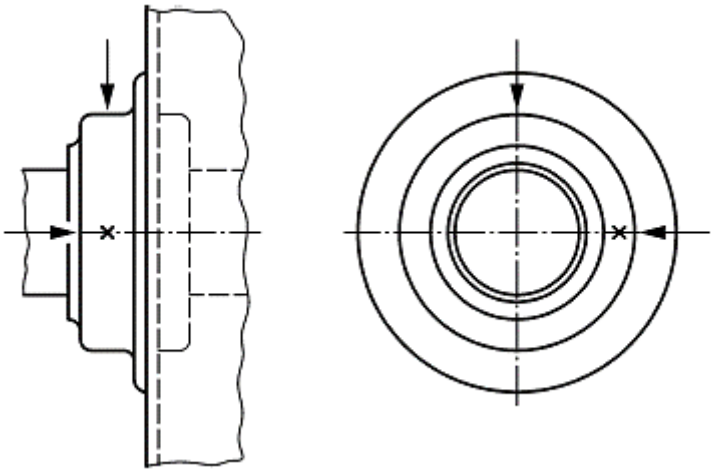


Abb. 25: Messpunkte an Lagergehäuse, Quelle: DIN ISO 20816-3 (2022), S. 14.

Wie im Abschnitt „Montage“ (siehe 3.5.1.4) beschrieben, kommen die drei verschiedenen Montagevarianten Verschrauben, Kleben oder Magnethalterung in Frage. Diese Montagearten haben allerdings Einfluss auf die messbare Frequenz. Damit die Motorgehäuse nicht angebohrt werden müssen und die Sensoren bei schlechter Platzierung nachgesetzt werden können, werden für die Montage hauptsächlich Magnethalterungen verwendet. (Prinzipiell wäre es auch möglich, die Sensoren direkt an das Gehäuse zu kleben.)

Im Zuge der Ausarbeitung offenbarten sich einige Nachteile bzw. Erkenntnisse beim Fixieren der Sensoren mit den gewählten Montagearten:

- Die Verwendung von Silikonfett hat nur geringe Auswirkungen auf das Messergebnis. Im Vergleich dazu wirkt sich eine leicht versetzte Messposition gravierender aus.
- Ein wesentlicher Nachteil an den Magnethalterungen ist, dass sich magnetischer Staub anlegt.
- Bei den versetzbaren Magnethalterungen ist beim Absetzen darauf zu achten, dass die Halterung über die Kante abgerollt und nicht vollflächig abgesetzt wird, damit keine Schnalznasen entstehen.
- Speziell die flache, eher lange Form der IO-Link Sensoren erschwert es, diese auf kleineren Antrieben zu montieren, da an den Stirnseiten der Motoren, wie in Abb. 26 dargestellt, wenig Platz vorhanden ist und die Rundung des Gehäuses eine fachgerechte Montage beeinträchtigt.

Abb. 26: Montage Magnethalterung IO-Link Sensor Motor Sichterrad, Quelle: Eigene Darstellung

Außerdem sind nicht alle Motorgehäuse magnetisch. Beim Zellradschleusenmotor ist das Gehäuse aus Aluminium gefertigt, wodurch der Sensor angeklebt werden muss. An diesem Motor gibt es außerdem keine ebene Fläche, die groß genug für die Montage des Sensors ist. Deshalb wird zur Montage ein spezieller Zweikomponenten-Epoxid-Klebstoff, der aus zwei Massen (Härter und Harz) zusammen geknetet wird, verwendet. Durch diese feste Klebemasse können die Oberflächenunebenheiten ausgeglichen werden. Allerdings verringert diese Montageart den nutzbaren Frequenzbereich des Sensors. Die Messung mit der Wärmebildkamera zeigt, wie in Abb. 27 ersichtlich, dass der Kleber die Temperatur gut überträgt. Auch der Trend, wie in Abb. 28 dargestellt, beweist, dass die Lagertemperatur im Betrieb nahezu zeitgleich mit der Getriebetemperatur auf Änderungen reagiert.

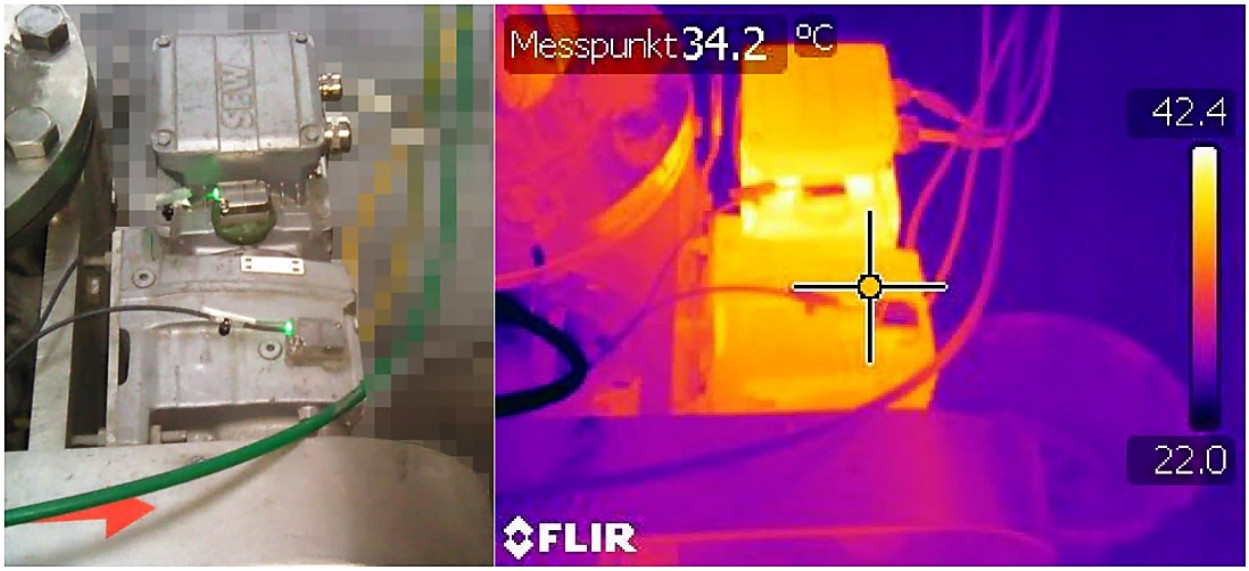


Abb. 27: Montage IO-Link Sensor Motor Zellradschleuse, Quelle: Eigene Darstellung

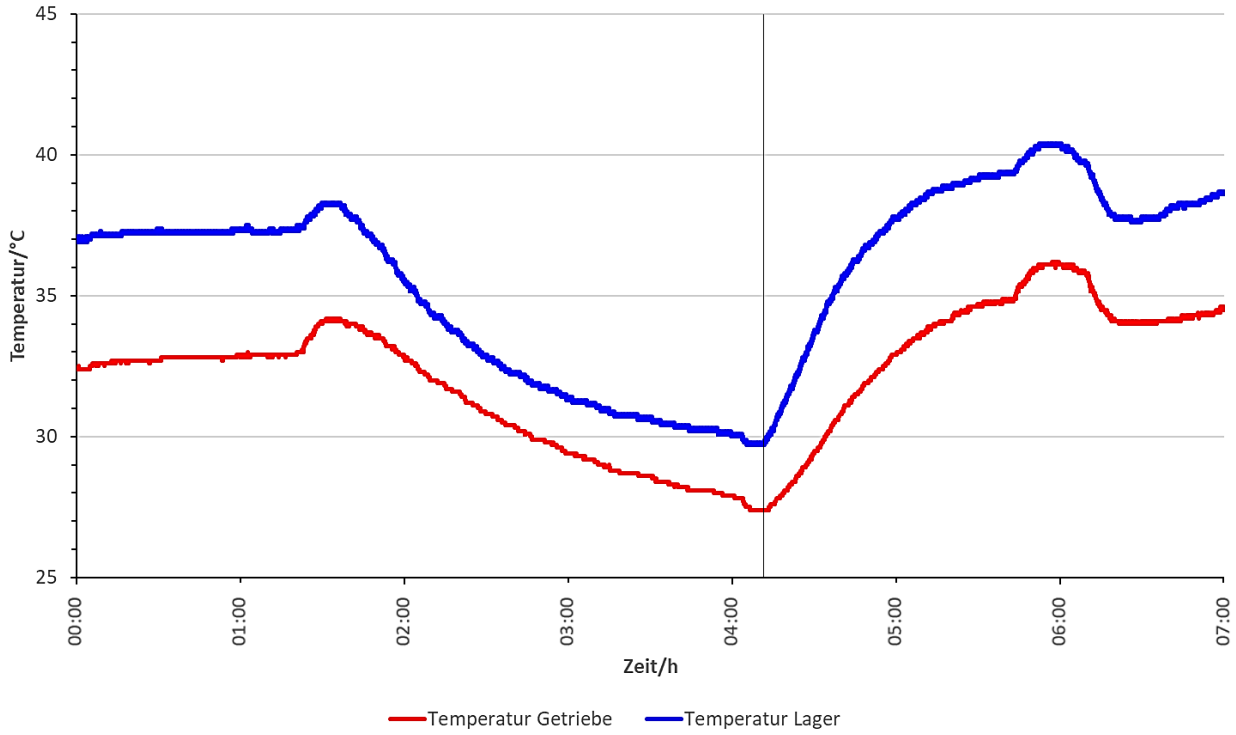


Abb. 28: Trend Lager- und Getriebetemperatur Zellradschleuse, Quelle: Eigene Darstellung

7.6 Validierung

Wie im Kapitel „Basisdaten“ (siehe 4.3) erwähnt, sind in den meisten Condition-Monitoring-Fällen die Absolutwerte nicht so relevant wie die Wertänderung an sich. Trotzdem ist zu überprüfen ob die Messwerte stimmen. Die Validierung der Schwingungsmessung unterscheidet sich deutlich von der Validierung der Temperaturmessung.

Zur Überprüfung der Temperaturmessung kann eine Vergleichsmessung herangezogen werden. Dafür wird eine Infrarotmessung, die direkt an der Gehäuseoberfläche aufgesetzt wird, verwendet. Das Resultat ist, dass alle Temperaturwerte der IO-Link Sensoren in Ordnung sind. Mit 0,6 °C Differenz weicht die Messung vom Gebläsemotor am weitesten von der Referenzmessung ab.

Die Validierung der Schwingungsmessungen ist schwieriger als die der Temperaturmessungen. Vergleichsmessungen werden idealerweise mit baugleichen Sensoren mit identischer Konfiguration durchgeführt, da bei den Sensoren herstellerbedingt unterschiedliche Filter angewendet werden. Ansonsten ist bei unterschiedlichen Sensoren nur der Effektivwert der Schwinggeschwindigkeit nach DIN ISO 20816-3 (2022) mit einem Frequenzbereich von 10 Hz bis 1 kHz und einer Abtastzeit von 100 ms vergleichbar. Trotzdem ist bei unterschiedlichen Herstellern mit einer Abweichung von bis zu 20 % zu rechnen. Bei kleinen Motoren kann auch der Versatz der beiden Messungen am Motorschild bereits eine kleine Abweichung verursachen.

Für die Beschleunigungsmessungen gibt es keine Grenzwerte und Vorgaben. Diese können nur anhand des Signalverlaufs bewertet oder mit ähnlichen Anlagen verglichen werden. Sind die Messwerte

stagnierend und ist keine steigende Tendenz erkennbar, ist bei der Anlage alles in Ordnung. Bei Beschleunigungsmessungen werden deshalb eher das Frequenzspektrum analysiert und Muster bewertet.

Bei Getrieben können die Eingriffsfrequenzen der Zähne und somit die Schadfrequenzen berechnet werden. Bei der Analyse wird auf Muster, Niveau und Schwankungen geachtet. Langsame Änderungen zählen zum normalen Verschleiß, während abrupte Änderungen auf einen Defekt hindeuten.

7.6.1 Bewertung nach Norm-Grenzwerten

Sofern richtig gemessen wird, stellt der Vergleich mit den DIN ISO 20816-3 (2022) Grenzwerten ein zusätzliches Bewertungskriterium dar. Wenn die Schwinggeschwindigkeitsmesswerte unter den Grenzwerten der Norm bzw. unter den von den Herstellern angegebenen Grenzwerten liegen, sind Messungen und folglich die Motoren in Ordnung. Bei allen vier Antrieben ist dieses Kriterium erfüllt.

7.6.2 Validierung baugleicher Sensoren

Baugleiche Sensoren können zur Validierung mit den Messflächen aneinandergeklebt werden. In dieser Konstellation dürfen die Messwerte nur minimal voneinander abweichen. Bei identischer Konfiguration können prinzipiell auch andere Kennwerte wie z.B. Point-to-Point miteinander verglichen werden. In Abb. 29 wird diese Validierungsweise anhand der beiden Zellradschleusesensoren demonstriert. Zwischen den Sensoren ist für eine bessere Schwingungsübertragung eine Fettschicht aufgebracht. Die mechanische Verbindung wird mit einem Isolierband umgesetzt.

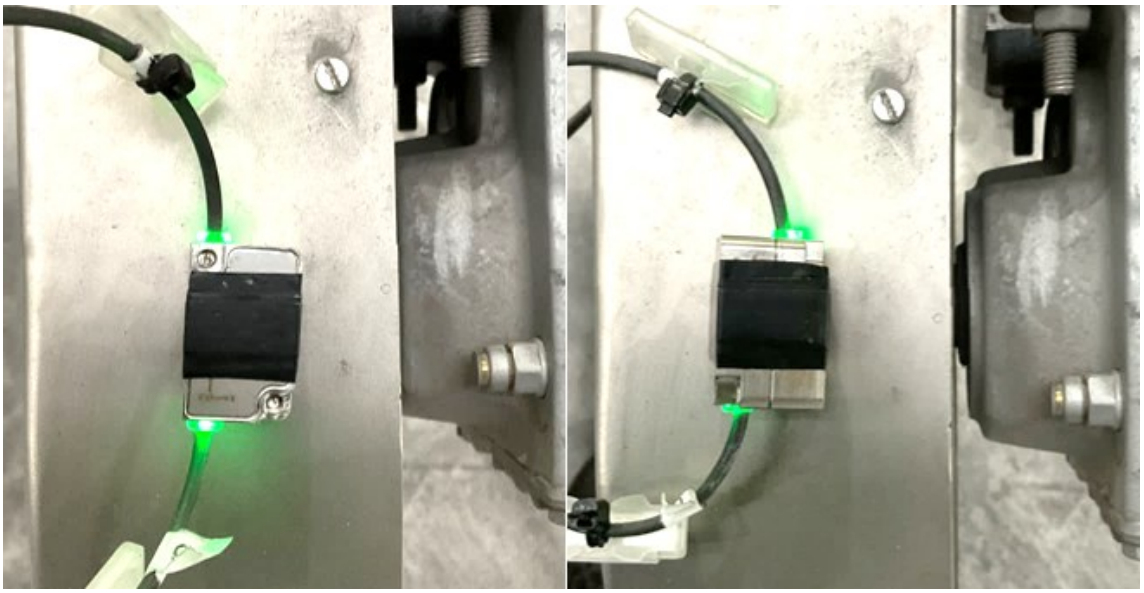


Abb. 29: Validierung Sensoren Zellradschleuse Aufbau, Quelle: Eigene Darstellung.

Bei der Validierungsmessung liegen die Sensoren auf einem benachbartem Blechgehäuse, weil die Messposition beim Zellradschleusenantrieb mit 0,3 mm/s so niedrig ist, dass geringe Messunterschiede prozentuell gesehen weit voneinander abweichen. Auch die Signalauflösung weist im unteren Messbereich ihre Grenzen auf. Beim in Abb. 30 dargestellten Trend liegen die Sensoren aufeinander, weshalb sie nicht die komplett identischen Schwingungen erfahren und es kleine Messunterschiede gibt. Abgesehen vom

zeitlichen Versatz einzelner Messpunkte liegt die Schwinggeschwindigkeit und Schwingbeschleunigung innerhalb unter fünf Prozent Abweichung und sind somit in Ordnung.

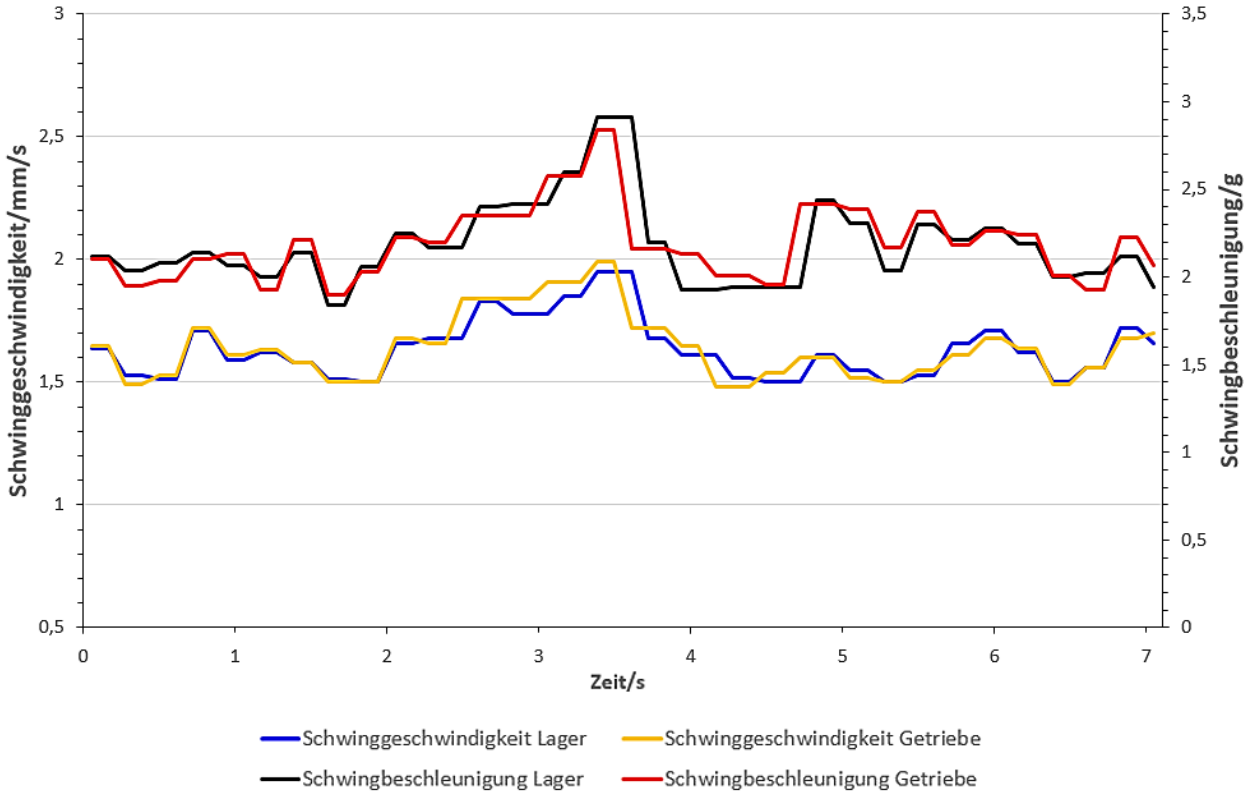


Abb. 30: Validierung Sensoren Motor Zellradschleuse Trend, Quelle: Eigene Darstellung.

7.6.3 Validierungsversuch verschiedener Sensoren

In Abb. 31 wird beim Sichterradmotor die IO-Link Messung im Vergleich mit einem mobilen Schwingungsmessgerät von „SKF“ abgebildet. Da von der Beschleunigungsmessung des IO-Link Sensors der Peak-to-Peak-Wert in g aufgezeichnet wird und der „CMAS100-SL Pen“ die Beschleunigung bereits als Hüllkurvenwert mit der Einheit gEnveloped (gE) ausgibt, kann die Messung mit diesem Gerät nicht überprüft werden. Im dargestellten Fall passen die Messungen zufällig bei diesem Betriebspunkt annähernd zusammen, bei den anderen Antrieben liegen sie teilweise weit auseinander.

Abb. 31: Vergleich IO-Link Sensor mit SKF CMAS100-SL Pen Sichterradmotor, Quelle: Eigene Darstellung.

Beim Gebläsemotor wird versucht die drei Sensoren am Lager, wie in Abb. 32 dargestellt, miteinander mit den Normeinstellungen zu verglichen. Bei der Umkonfiguration des Analogsensors in der Diagnoseelektronik stellte sich heraus, dass Effektivwert Schwinggeschwindigkeit-Objekt weder auf 1000 Hz gefiltert noch ausgegeben werden können. Dadurch sind nur die beiden IO-Link Sensoren miteinander vergleichbar. Diese geben bei einem Bandpassfilter von 10 bis 1000 Hz ähnlich hohe Werte mit rund 4 % Abweichung aus, was innerhalb der Toleranz liegt. Ein gewisser Anteil der Abweichung ist der Position der Sensoren zuzuschreiben, welche um ein paar Grad am Lagerschild versetzt sind, wie in Abb. 23 dargestellt.

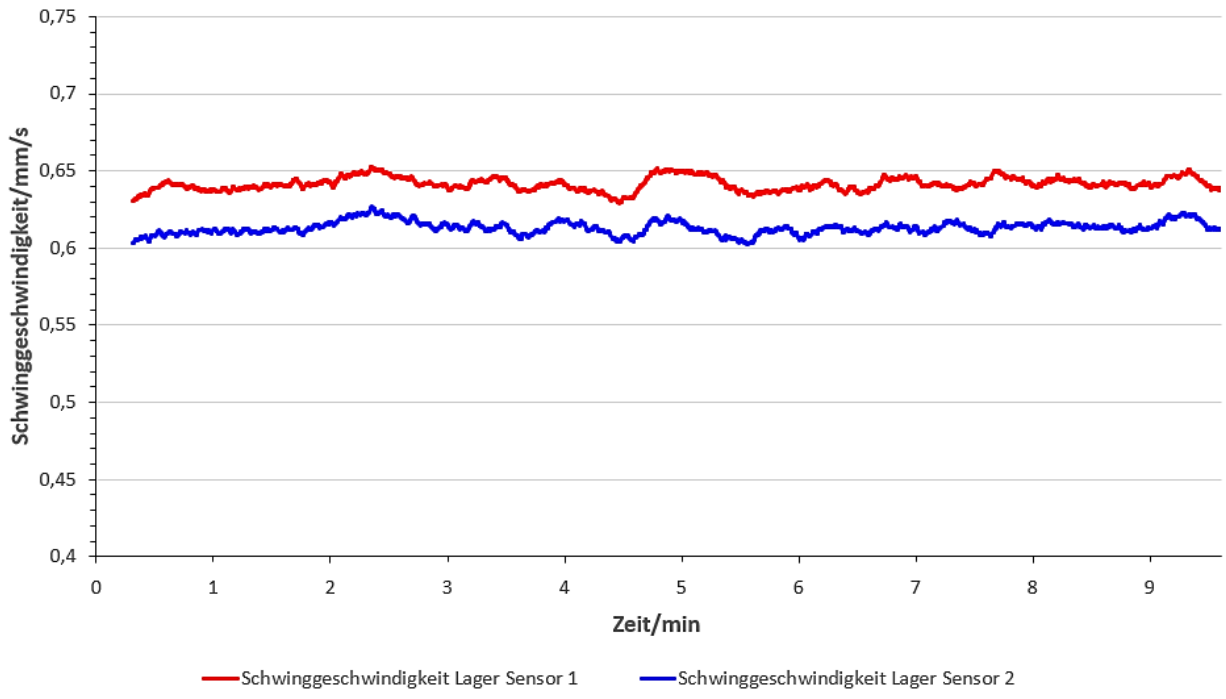


Abb. 32: Validierung Sensoren Gebläsemotor Effektivwert Schwinggeschwindigkeit, 10 bis 1000 Hz Trend, Quelle: Eigene Darstellung.

7.7 Justierung

Stimmen die Messwerte nicht, muss die Montage überprüft werden. Neben der Montageposition kann genauso die Verbindungsleitung an falschen bzw. verfälschten Messwerten schuld sein. Ist die Leitung gespannt oder steht sie bei einer anderen schwingenden Komponenten an, können über die Leitung Schwingungen an den Sensor übertragen werden. Sind die Sensorleitungen mit anderen Leitungen verlegt, können EMV-Probleme auftreten. Diese sind im Messsignal anhand von 50 oder 100 Hz Frequenzen erkennbar. Zur Behebung dieser Probleme sind die Position des Sensors oder die Verlegung der Verbindungsleitung nachzubessern oder die Störsignale durch eine geschirmte Verbindungsleitung zu verhindern.

Bei Motoren beeinflusst die Hauptlastzone die Ausprägung der Schwingungen in bestimmte Richtungen und die Verteilung über den Umfang. Bei horizontal angeordneten Motoren ist die Hauptlastzone meist auf der Unterseite. Abhängig von der Art des Lagers ändert sich innerhalb von 30 bis 35° der Messwert kaum. Bei engen Lastzonen können wenige Grad einen großen Unterschied ausmachen. Außerdem ist der Unterschied bei kleineren Motoren wegen ihrer geringen Masse größer, denn bei großen Motoren wirkt die Masse dämpfend auf das System.

Um sicherzugehen, dass die Hauptlastzone erfasst wird, wird der Sensor vom Sichterradmotor, welcher wegen des Riemens horizontal belastet wird, in 15°-Schritten von der horizontalen Messposition auf die Vertikale versetzt, wie in Abb. 33 dargestellt. Der Motor läuft währenddessen konstant. Dieser Versuch ergibt, dass sich die Messposition bei diesem Motor nur minimal auf die Schwingungen auswirkt. Einzig die Schwinggeschwindigkeit in der Z-Achse erhöht sich um wenige Hundertstel.

Abb. 33: Justierung Sensor Sichterradmotor, Quelle: Eigene Darstellung.

Auch bei den Sensoren der Zellradschleuse wird überprüft, ob eine um 90° versetzte Messposition bessere Messergebnisse liefert. Wie in Abb. 34 dargestellt, kann der Sensor in vertikaler Position am Getriebe nur am Rand platziert werden, da es sonst keine Fläche gibt, auf der der Sensor eben aufsitzt.

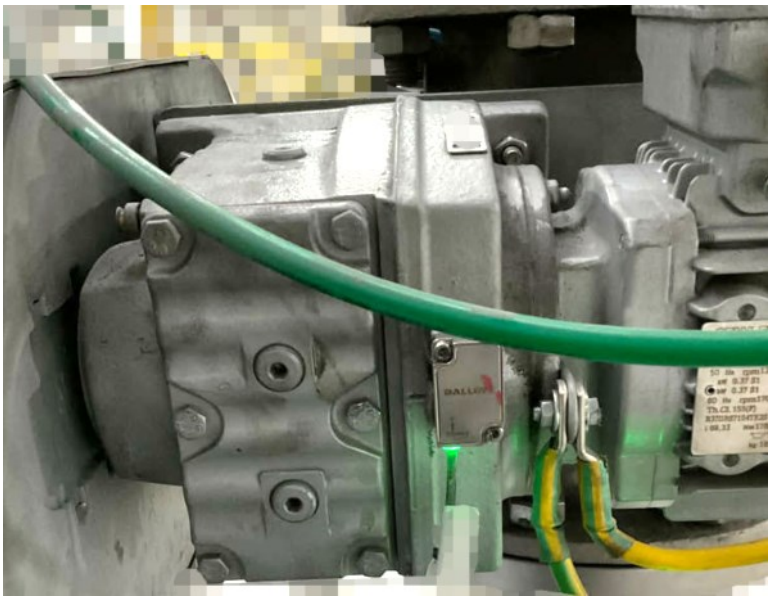


Abb. 34: Justierung Sensor Zellradschleuse Getriebe, Quelle: Eigene Darstellung.

Im Trend ist ersichtlich, wie in Abb. 35 dargestellt, dass die Schwinggeschwindigkeit in der X-Achse, welche auf Grund vom Nachsetzen des Sensors zuerst rot und danach blau dargestellt wird, deutlich stärkere Schwingungen misst. Die Messwerte der Z-Achse, welche zuerst blau und nach dem Versetzten rot bzw. die Schwingbeschleunigung in schwarz dargestellt sind, haben sich leicht verringert. Beim Lager der Zellradschleuse ist zwischen den um 90° versetzten Messpositionen kein merkbarer Unterschied zu erkennen.

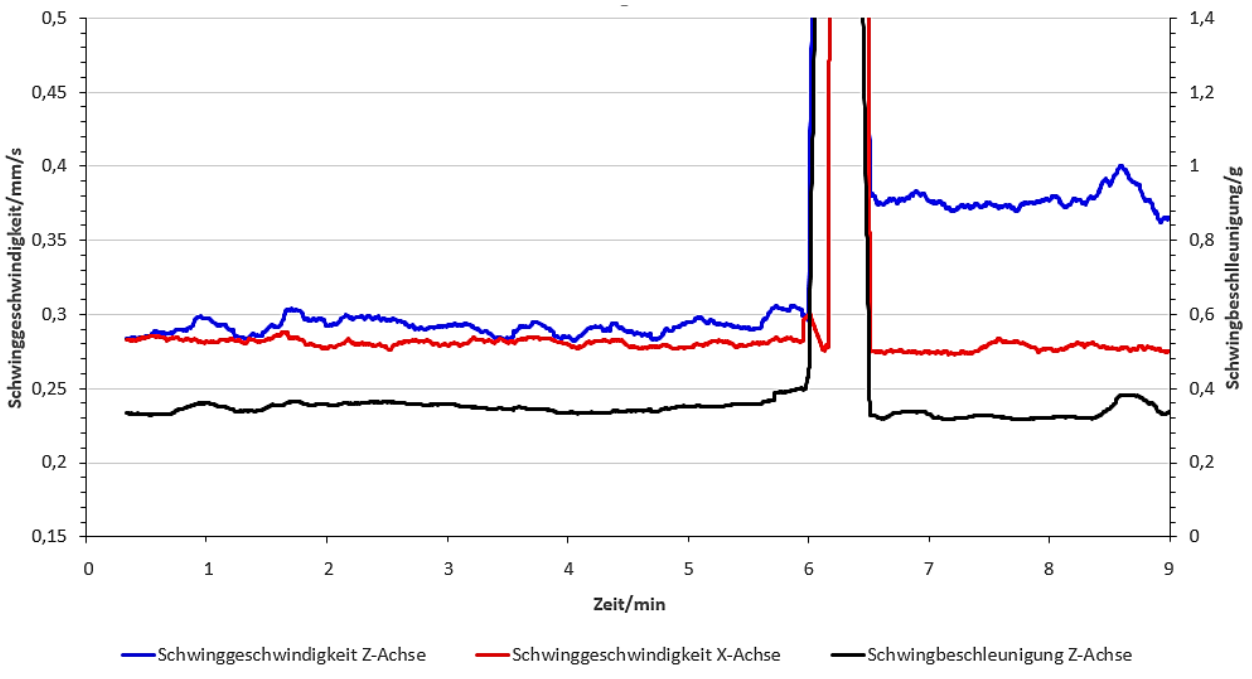


Abb. 35: Justierung Sensor Zellradschleuse Getriebe Trend, Quelle: Eigene Darstellung.

8 DATENBANK

Um Daten in guter Qualität, welche für Analysen essenziell ist, aufzuzeichnen und gleichzeitig die Datenbank zu entlasten, sind die richtigen Einstellungen in der Datenbank von großer Bedeutung. Diese sollen im Idealfall bei der Einbindung der Messwerte schon stimmen oder zumindest innerhalb kürzester Zeit korrigiert werden.

Außerdem ist es empfehlenswert auch Daten, die nicht für Modelle bzw. Analysen verwendet werden, nach einem definierten Intervall auf Plausibilität zu überprüfen. Damit wird verhindert, dass Messwerte gespeichert werden, die nicht mehr existieren oder deren Aufzeichnungsart oder Abtastraten für die Messwerte unpassend sind. Zu wenige bzw. fehlende Daten oder Montage- bzw. Sensorfehler wirken sich negativ auf die Ergebnisse aus. Auch ein falsches Datenformat kann Werte verfälschen, wenn z.B. zu wenige Kommastellen aufgezeichnet werden.

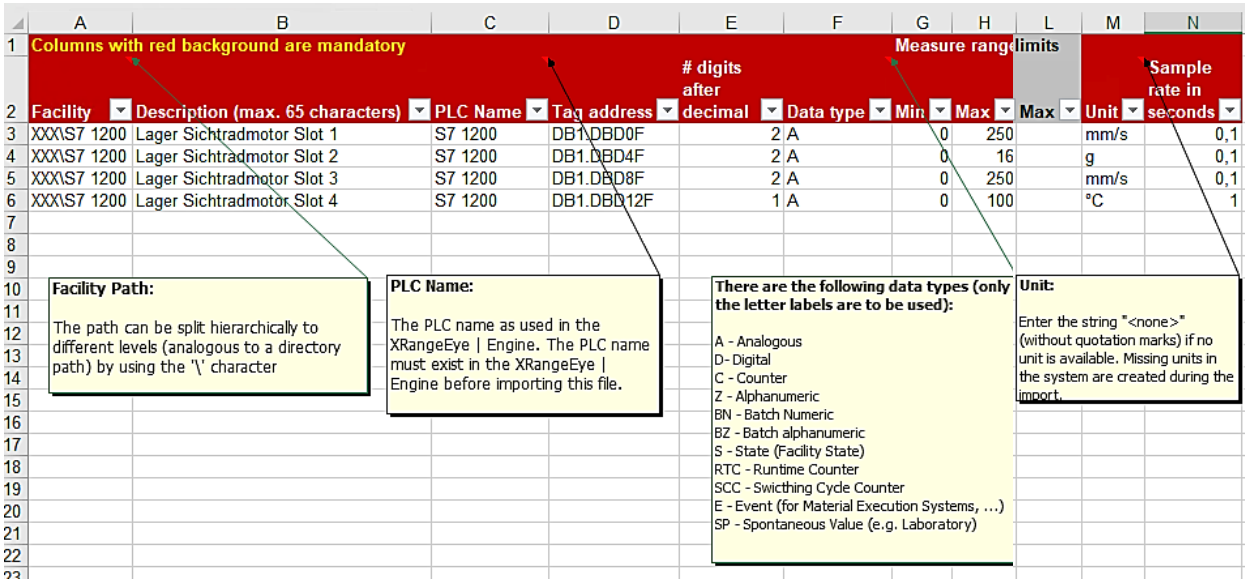
8.1 Einbindung der Messwerte

Die Einbindung der Variablen in die Datenbank erfolgt über das Programm „XRangeEye“. Die Verknüpfung der Variablen mit der Datenbank erfolgt über sogenannte „Treiber“, die für jede SPS bzw. OPC UA Schnittstelle anzulegen sind. Die einzelnen Messwerte können entweder manuell eingegeben werden oder über eine Excel-Datei, wie in Abb. 36, dargestellt, in die Oberfläche importiert werden. Auszufüllen sind die „Facility“, welche namentlich mit dem Treiber der SPS übereinstimmen muss, die SPS-Bezeichnung, eine Beschreibung des Messpunktes, die absolute Adresse inklusive Datentyp, die Anzahl der Kommastellen, der Datentyp, der Messbereich, Alarmwerte, die Einheiten und die Abtastrate der Signale:

- Im angeführten Beispiel wird für die Variablen des Lagers Motor Sichterrad bei der Adressierung ein „F“ für Float angegeben und der Datentyp Analog (A) gewählt.
- Die Schwingungsmessungen werden auf Hundertstel genau eingelesen, bei der Temperatur wird nur eine Kommastelle angegeben.
- Der Messbereich wird wie am Datenblatt angegeben auf 0 bis 250 mm/s, bzw. 0 bis 16 mm/s² und 0 bis 70 °C (siehe 7.1.1) eingestellt.
- Grenzwerte werden keine angegeben, da die Auswertung nicht im XRangeEye erfolgen soll.
- Die Abtastrate der Schwingungsmessungen orientiert sich an dem bei den Sensoren eingestellten Zeitfenster, welches bestimmt wie oft der statische Wert aktualisiert wird und wird mit 0,1 s auf das mögliche Minimum eingestellt. Für den Temperaturwert wird ein Aufzeichnungsintervall von 1 s eingestellt, da bei diesem Messwert langsame Wertänderungen zu erwarten sind. Damit kann bei den Temperaturmessungen weiterer Speicherplatz gespart werden.
- Die Aufbewahrungsdauer der Daten wird bei der manuellen Nachbearbeitung der Variablen in der Konfigurationsoberfläche festgelegt. Da durch die hohe Abtastrate sehr viele Daten gespeichert werden müssen, wird die Aufbewahrungsdauer vorerst mit einem Jahr angesetzt. Da diese Daten ausschließlich firmenintern für die Motoranalyse genutzt werden und nicht dem QM-System unterliegen, kann die Aufbewahrungsdauer selbst bestimmt werden.

Die Datenaufzeichnung erfolgt im verwendeten Aufzeichnungsprogram immer „On Change“, das heißt stagnierende Messwerte werden nicht mit aufgezeichnet, sondern in der Trendansicht interpoliert. So kann

viel Speicher gespart werden. Die Vorteile dieser Aufzeichnungsart sind die Reduktion der Daten im Speicher und automatische Anpassung der Datenbank an die Sensorkonfiguration. Somit muss in der Datenbank nichts verändert werden, wenn sich an der Sensorkonfiguration etwas ändert.



	A	B	C	D	E	F	G	H	L	M	N
1	Columns with red background are mandatory						Measure range limits				
2	Facility	Description (max. 65 characters)	PLC Name	Tag address	# digits after decimal	Data type	Min	Max	Max	Unit	Sample rate in seconds
3	XXX\S7 1200	Lager Sichtradmotor Slot 1	S7 1200	DB1.DBD0F	2	A	0	250		mm/s	0,1
4	XXX\S7 1200	Lager Sichtradmotor Slot 2	S7 1200	DB1.DBD4F	2	A	0	16		g	0,1
5	XXX\S7 1200	Lager Sichtradmotor Slot 3	S7 1200	DB1.DBD8F	2	A	0	250		mm/s	0,1
6	XXX\S7 1200	Lager Sichtradmotor Slot 4	S7 1200	DB1.DBD12F	1	A	0	100		°C	1

Abb. 36: XRangeEye Importdatei, Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (MSG Software GmbH (2023), Online-Quelle [27.11.2023])

Das CMTK wird über die OPC-UA Schnittstelle angebunden. Für dieses muss ebenfalls zuerst ein neuer OPC-UA Treiber im Programm erstellt werden. Der Zugriff auf diese Variablen erfolgt allerdings über die Node Identification (NodeID), welche im CMTK selbst als „Node-Set Info“ angegeben ist, wie in Abb. 37 dargestellt.

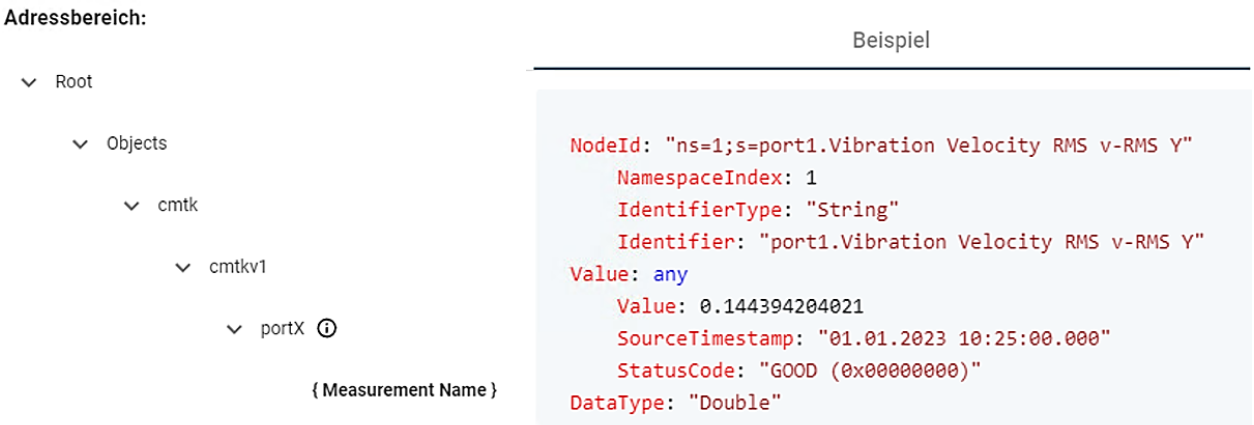


Abb. 37: Node-Set Info, Eigene Darstellung

Neben den Messungen werden Zusatzinformationen (siehe 4.2) wie z.B. alle Störmeldungen des Aggregats, welche in der SPS als einzelne Bits verfügbar sind, in die Datenbank eingebunden. Um Variablen zu sparen, wird nicht jedes Störmeldebit einzeln eingebunden. Die Bits werden in den SPSen zu jeweils 16 Bit langen Variablen vom Datentyp Word zusammengefasst. Diese Sammelvariablen werden in die Datenbank eingebunden. Auf diese Weise ist zwar nicht direkt ersichtlich, um welche Störmeldung es

sich handelt, aber die Anzahl der Störmeldevariablen in der Datenbank wird auf ein Sechzehntel reduziert. Für die Interpretation der Variablen ist in einer Excel-Datei, die im Kapitel „Dokumentation“ (siehe 9) genauer beschrieben wird, eine Liste enthalten. Diese Störmeldungen können zwar nicht für die frühzeitige Erkennung von Fehlern durch das Analysemodell genutzt werden, weil sie erst auf eingetretene Fehler reagieren, aber in zweiter Instanz zur Verbesserung der Analyse dienen.

8.2 Abtastintervall

Abb. 38 stellt die Datenerfassung von einem Frequenzsignal mit Berechnungsbasis von 1 s und 100 ms im direkten Vergleich dar. Im Trend ist ersichtlich, dass die Abtastrate von 1 s, welche auf der linken Seite abgebildet ist, für das Frequenzsignal zu gering gewählt ist. Die Wertänderung wird zwar ersichtlich, aber nicht der Zeitpunkt, wann diese stattgefunden hat. Hingegen kann der Zeitpunkt der Wertänderung mit dem höheren Abtastintervall von 100 ms gut erfasst werden, was im rechten Abschnitt der Kurve abgebildet wird. Das ist anhand der für wenige hundert Millisekunden stagnierenden Kurve zu erkennen.

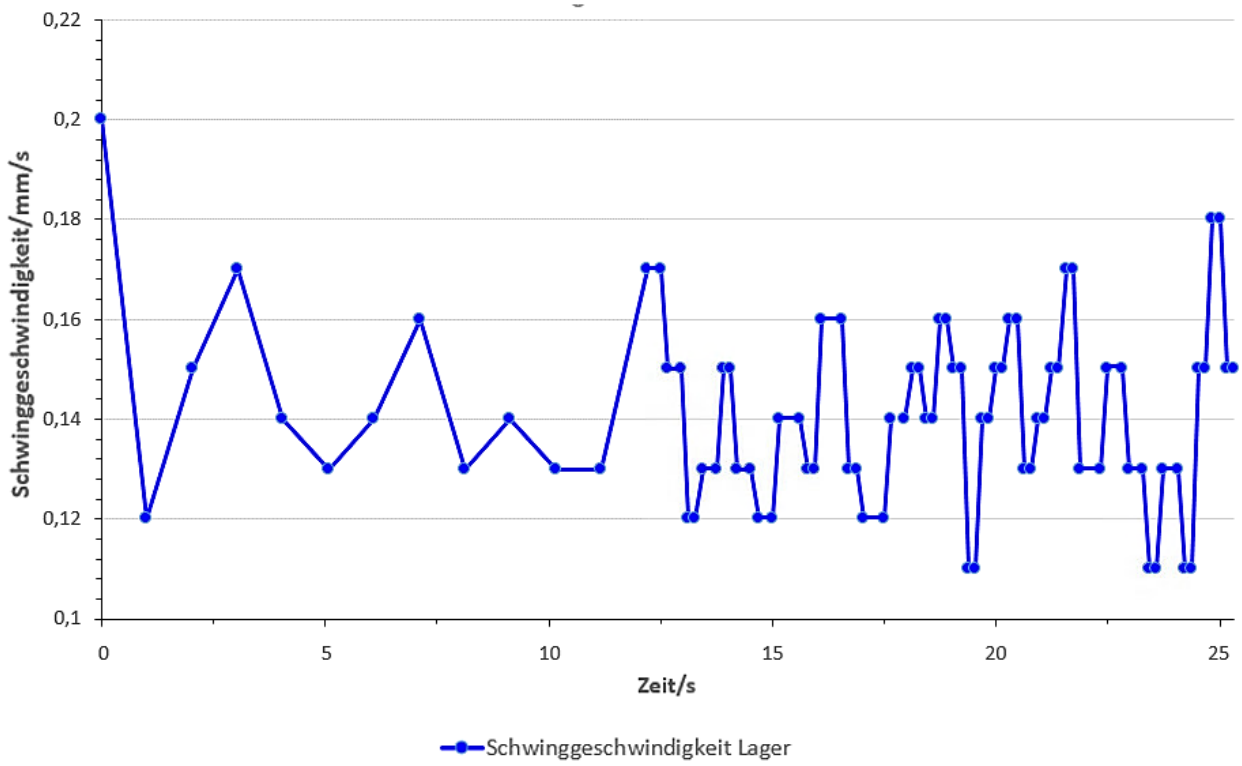


Abb. 38: Abtastrate Lager Gebläsemotor 1 s VS 100 ms, Quelle: Eigene Darstellung.

9 KOMMUNIKATION

Die Kommunikation von der Feldebene bis zum Analysemodell spielt bei Predictive Maintenance eine wichtige Rolle. In diesem Kapitel wird deshalb die Kommunikation im Fall von Defekten und Störungen oder anderen Änderungen an der Anlage genauer behandelt. Diese Informationen sind für das Datenmodell essenziell, da diese unmittelbar auf die Genauigkeit dieses Modells Auswirkungen haben. Außerdem können manche Informationen auch für die Aktualisierung der Datenbank und des SPS-Programms relevant sein. Durch Informationsaustausch wird bei Sensoränderungen sichergestellt, dass z.B. der SPS-Programmstand bereinigt wird und in der Datenbank keine Werte in einem unpassenden Format aufgezeichnet werden oder Werte, die es nicht mehr gibt.

In Abb. 39 und Abb. 40 werden der Pfad der Datenerfassung und die Kommunikation beim Auftreten von Störungen und Defekten grafisch dargestellt. Zur Vereinfachung werden nur die wichtigsten Kommunikationspfade, die im Zuge eines Anlagendefekts oder einer Wartung auftreten, erwähnt. Außerdem ist anzumerken, dass in der Praxis für das Datenmodell neben Anlagendaten und Störungs- bzw. Wartungsdaten noch einige weitere Datenquellen, die nicht abgebildet sind, verwendet werden. Die Abteilungen stellen die Zuständigkeitsbereiche der Schnittstellen „Sensoren“, „SPS“, „Datenbank“ und „Datenmodell“, von der Feldebene bis zur Betriebsleiterebene dar.

Der Idealfall für die werksinterne Kommunikation wird in Abb. 39 folgendermaßen dargestellt:

Tritt ein Defekt oder Problem an der Anlage auf, welche in der Abbildung mit einem roten Stern markiert sind, wird das dem Produktionspersonal von der SPS über eine Störmeldung mitgeteilt. Ein Defekt kann genauso dem Produktionspersonal selbst oder dem Instandhaltungspersonal (im Zuge einer Wartung) auffallen. Zukünftig werden Defekte auch vom Datenmodell erkannt. Die Analysesoftware, welche die Daten aus dem Modell interpretiert, meldet die Störungen der Betriebsleitung, was mit einem roten Pfeil gekennzeichnet ist. Diese entscheidet über weitere Schritte. Von der Betriebsleitung wird abhängig von der Störung die Instandhaltung (in manchen Fällen auch die Automatisierung) zur Störungsbehebung beauftragt, was mit einem gelben Pfeil gekennzeichnet ist. Sind die Arbeiten erledigt, wird die Dokumentation im Enterprise-Resource-Planning-System (ERP) eingetragen, was mit einem hellgrünen Pfeil dargestellt ist. Vom ERP-System ausgehend werden die entsprechenden Abteilungen mit den für sie relevanten Informationen versorgt, was mit blauen Pfeilen dargestellt ist.

Muss eine Wartung durchgeführt werden, wird die Instandhaltung direkt über das Wartungssystem beauftragt, an welches auch die Rückmeldung bzw. das Hochladen des Wartungsberichts nach Erledigung der Arbeiten ergeht.

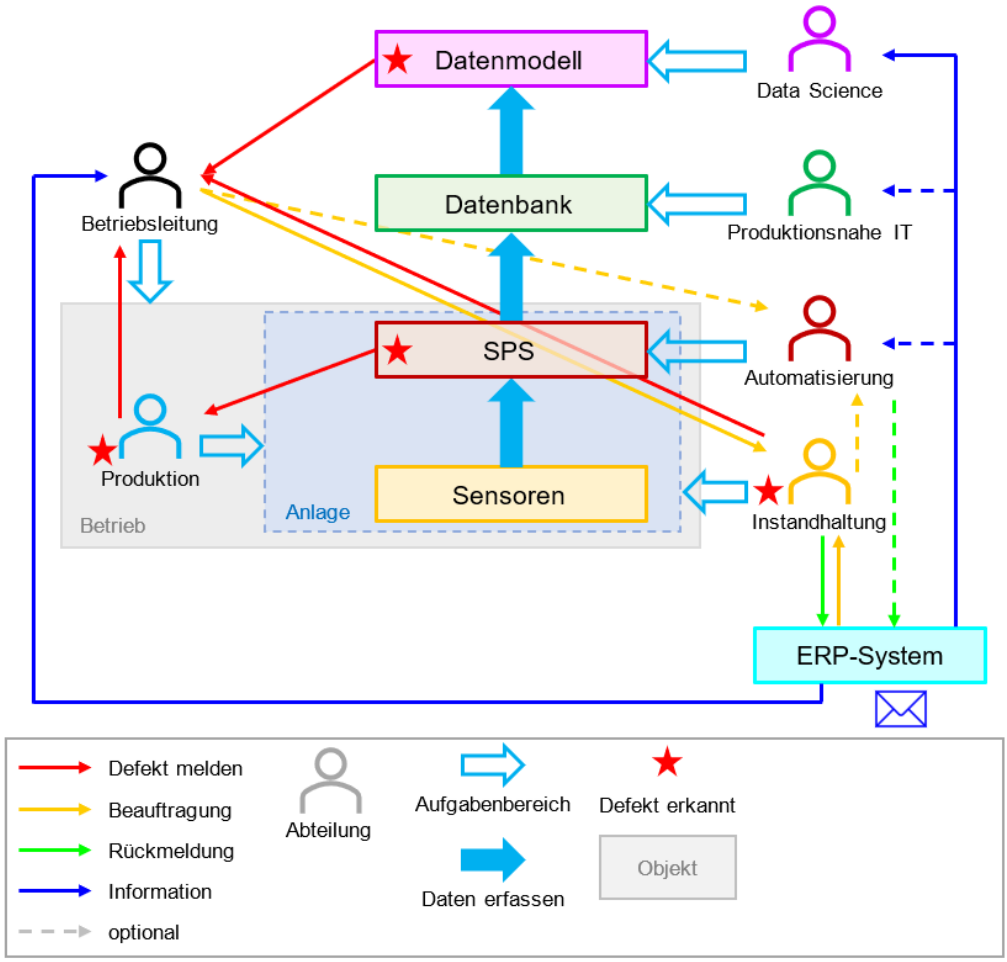


Abb. 39: Kommunikationsschema Musterbeispiel, Quelle: Eigene Darstellung.

In der Praxis kann das in Abb. 39 dargestellte Schema noch nicht in dieser Form umgesetzt werden, weil es firmenintern noch keinen Standard für die Informationsweitergabe für Analysemodelle im Fall von Störungen gibt, da bisher die Analyse von Daten nur bei einzelnen Anlagen eine Rolle spielt. Das ERP-System wird zwar einheitlich verwendet, aber nicht für diese Zwecke. Wie in Abb. 40 dargestellt, soll als Übergangslösung bei diesem Projekt die Informationsweitergabe über die Betriebsleitung erfolgen, die ohnehin über Störungsbehebungen informiert wird. Von dieser werden die Informationen in einem geteilten Ordner, welcher eine einfache Möglichkeit darstellt die zusammengetragenen Informationen über sämtliche Komponenten mit allen beteiligten Personen zu teilen, abgelegt. Die Betriebsleitung sendet zusätzlich eine E-Mail mit dem Hinweis, dass neue Informationen am Austauschordner vorhanden sind, an die Abteilungen, für die diese Informationen über die Störungsbehebung relevant sind. Die einfachste Realisierung von Hinweis-E-Mails sind E-Mail-Verteiler – für jede Abteilung ein eigner - die bereits die relevanten Personen enthalten.

Eine Benachrichtigung über Änderungen direkt über die Instandhaltung an die Abteilungen „Data Science“, „Produktionsnahe IT“ und „Automatisierung“ ist vom aktuellen Standpunkt aus schwieriger umzusetzen als diese Variante. Die Instandhaltung gehört einem anderen Betrieb an und deshalb werden Störungsbehebungen und Wartungen von verschiedene Personen durchgeführt. All diese Personen wären auf diesen Informationsaustausch zu unterweisen und als Ausnahmeregelung birgt diese Handhabung das

Potential vergessen zu werden. In Zukunft wird sich die Informationsweitergabe vermutlich in Richtung Musterbeispiel aus Abb. 39 entwickeln. Die Vorteile der Abteilung „Betriebsleitung“ als Schlüsselrolle in der Informationskette sind, dass der betroffene Personenkreis gering ist, sie die Rückmeldung über Störungsbehebungen und Wartungen bekommt und jede Person einen PC besitzt. Außerdem ist das Wissen über Auswirkungen von Sensoränderungen auf die Analyse vorhanden und der Fall, dass Informationen weitergegeben werden müssen, tritt für jede Person öfter ein. Auch die Dokumentation im Austauschordner soll vorerst von der Betriebsleitung auf dem aktuellen Stand gehalten werden, weil diese den besten Überblick über Änderungen und Störungen hat.

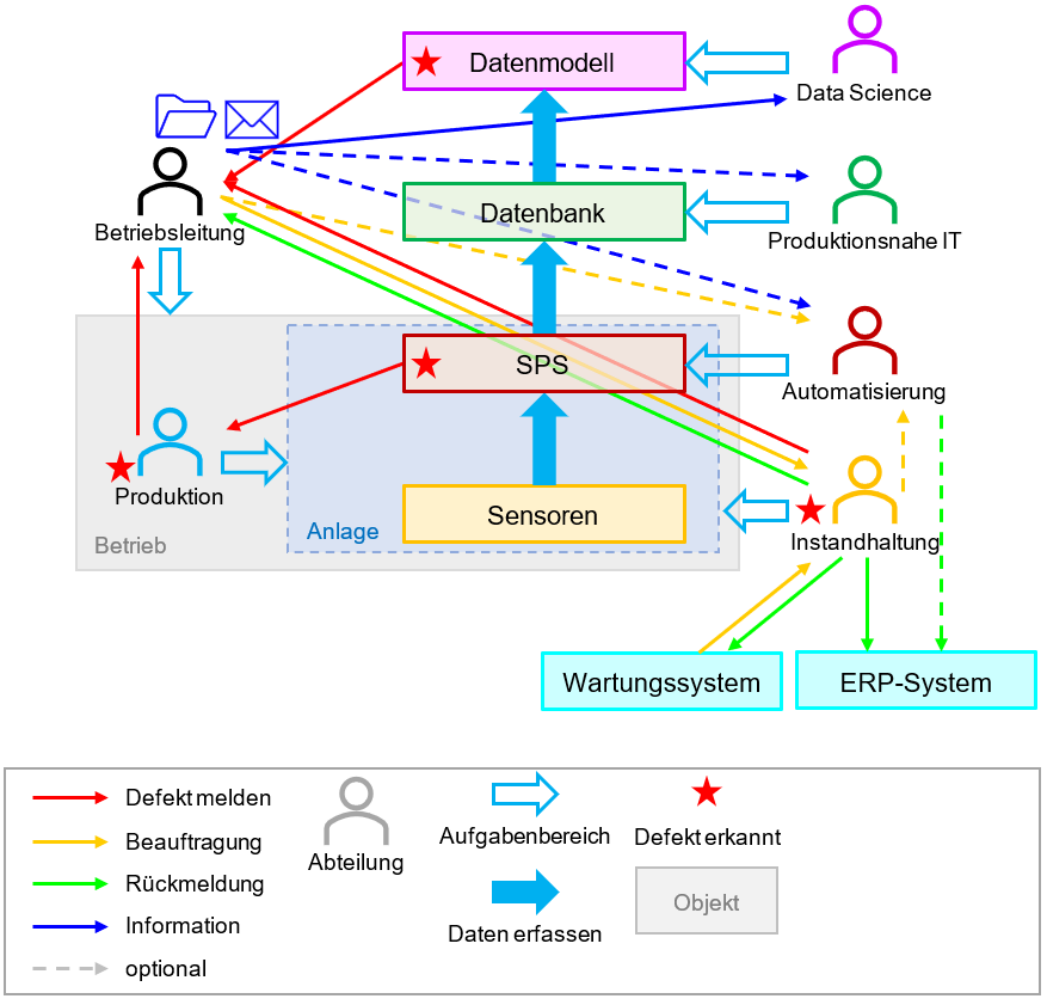


Abb. 40: Kommunikationsschema technische Umsetzung, Quelle: Eigene Darstellung.

Damit keine Daten verloren gehen und ein Überblick über Änderungen in den Dokumenten geschaffen wird, ist die Sicherung der Dateien besonders wichtig. Für den Austauschordner wird deshalb ein automatisches Backup für den gesamten Ordner eingerichtet. In der Excel-Datei ist automatisch eine Versionierung eingestellt, über die angezeigt wird, wer welche Änderungen durchgeführt hat.

10 DOKUMENTATION

Für die richtige Analyse sind neben den Messwerten in der Datenbank weitere Informationen relevant. Vor allem wenn die Analyse von betriebsfremden Personen durchgeführt wird, können manche Anomalien zu Fehlinterpretationen führen. Wie in Anforderungen an die Datenbasis (siehe 4) erwähnt, spielt bei der Interpretation der Daten die bereitgestellte Zusatzinformation eine entscheidende Rolle.

Werden zur Auswahl sehr viele unterschiedliche Quellen bzw. Systemen verwendet, ist es hilfreich, diese so zu kennzeichnen, dass die Verbindung der Daten untereinander leicht hergestellt werden kann. Die Messdaten befinden sich z.B. nicht in der gleichen Datenbank wie die Prozess- und Wartungsdaten. Über den selben Zeitstempel, durch Verwendung der gleichen Zeitserver oder eine durchgängig gleiche Bezeichnung Zeitstempel werden der Datenpunkte zusammengeführt.

In Anlehnung an die Systemfaktoren, welche Einfluss auf Condition Monitoring haben, wie im Kapitel „Anforderungen an die Datenbasis“ (siehe 4) erwähnt, ist die folgende Liste, welche in Tab. 15 bis Tab. 20 dargestellt wird, entstanden. Die dort erwähnten Punkte sind in der Liste teilweise zusammengefasst und auf die für das Projekt relevanten Themenbereiche verkürzt. Der Zweck dieser Liste ist, betriebsfremden Personen, welche die Daten für Modelle verwenden, ein möglichst akkurates Bild von der Anlage selbst, deren Umgebung, den Betriebsbedingungen usw. zu vermitteln. Diese Informationen werden den folgenden sechs Kategorien: „Umgebung“, „Maschine“, „Komponenten mit Verschleiß“, „Condition Monitoring“, „Parameter/Ereignisse/Einstellungen“ und „Personal“ zugeteilt.

Diese Art „Maschinensteckbrief“ ist in einer Excel-Datei für jeden Motor einzeln angelegt. Zusätzlich sind noch die Typenschilder, Schemata, Wartungs- und Verschleißteillisten und Grenzwertangaben laut Hersteller sowie Trends mit Kommentaren zu speziellen Ereignissen angegeben.

Am Listenanfang werden generelle Informationen wie die Bezeichnung der Maschine und deren Verwendungszweck erwähnt, wie in Tab. 15 dargestellt. Im Abschnitt „Umgebung“ wird das Gebäude, in dem sich die Anlage befindet, die Position der Anlage und die Maschinenumgebung beschrieben. Daten, die vom Gebäude für die Analyse relevant sind, sind z.B. die Bausubstanz oder das Raumklima. Die Anlage befindet sich in einem Betrieb mit hoher Staub- und Lärmbelastung. Von benachbarten Maschinen, Infrastrukturkomponenten und vom Außenbereich des Gebäudes können Störeinflüsse ausgehen, die sich auf die Messungen auswirken können.

Allgemein		**Bezeichnung**	Gebläsemotor
		Funktion	Gaszirkulation
Umgebung	**Gebäude**	**Nummer**	123
		Material	Stahlbeton
		Temperatur	Ø X °C
		relative Luftfeuchtigkeit	Ø X %
	Position und Erreichbarkeit	**Standort**	X

	Einflüsse benachbarter Maschinen	**Erreichbarkeit**	Zugang über …
		Umgebungsbedingungen	Hitze
			Staub
			Lärm
		Anlage 1	-
		In der Halle	Rohrleitungen, Kran, Ameise, Stapler
		Außerhalb der Halle	Transport

Tab. 15: Dokumentation Excel-Datei Allgemeines und Umgebung, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Eckdaten zur Maschine selbst werden, wie in Tab. 16 dargestellt, in Antrieb, Kupplung, Getriebe, angetriebene Komponente, Steuerungssystem und Hilfseinrichtungen unterteilt. In diesem Abschnitt werden Informationen über beispielsweise die Antriebsart, die Montage der Maschine oder dem Fundament des Unterbaus geliefert. Weitere relevante Daten sind die verwendeten Schutzeinrichtungen, wie z.B. der Motorschutzschalter und Thermistor in der Motorwicklung. Beim im Beispiel beschriebenen Gebläsemotor sind der Asynchronmotor und Radialventilator durch eine Kupplung verbunden. Außerdem wird beschrieben, welche Steuerungskomponenten bei der Anlage eingesetzt sind und wie deren Kommunikation untereinander umgesetzt ist. Die Detailinformationen zu den Komponenten sind im Austauschordner abgelegt und aus Umfanggründen nicht in der Excel-Datei.

Maschine	**Maschine**	**Doku im Austauschordner!**	*Link*
		Antrieb	Asynchronmotor
		Montage	Stahlkonstruktion mit Dämpfer
		Aufbau/Fundament	Stahlgerüst
		Schmiermittel	Lebensdauerschmierung
		Eingangsgrößen	Elektrische Energie
		Schutzeinrichtungen	Motorschutzschalter (Überstrom)
			Thermistor (FU)
	Kupplung oder Getriebe		Antrieb über Kupplung
		Lager	6316 (ZGL, Festlager)
	Angetriebene Komponenten		Radialventilator
		Montage	Stahlkonstruktion mit Dämpfer
		Aufbau/Fundament	Stahlgerüst
		Ausgangsgrößen	Gaszirkulation
	Steuerungssystem	**SPS**	S7 15XX
		CP	CP 15XX
		Frequenzumrichter	G120 CU240 E-2 PN
		Kommunikation SPS	Profinet
	Verrohrung und Hilfseinrichtungen		

Tab. 16: Dokumentation Excel-Datei Maschine, Quelle: Eigene Darstellung.

Komponenten, die einem Verschleiß unterliegen sind für die Analyse der Motoren besonders interessant, weil sie einen großen Einfluss auf den Zustand der Maschine haben. In diesem Abschnitt werden die Einflussfaktoren für Verschleiß, die Umsetzung einer Überwachung und die Auswirkungen von Verschleiß aufgelistet. Einflussfaktoren sind am Beispiel „Lager“ z.B. Temperatur, Schmierverhältnisse, Alterung oder mechanische Schäden. Bei einem Defekt kann die ganze Anlage ausfallen, weshalb die Lager mit Schwingungsmessungen ausgestattet sind, um diese Entwicklung rechtzeitig zu erkennen. Von den meisten, der in dieser Arbeit behandelten Motoren, existieren vom Hersteller Listen über die Komponenten mit Verschleiß und deren Wartungsvorschriften. Aus diesem Grund sind bei diesem Abschnitt, wie in Tab. 17 dargestellt, nur wenige Informationen enthalten. Weiterführende Informationen sind am Excel-Blatt hinzugefügt und die vollständigen Dokumente sind im Austauschordner abgelegt.

Komponenten mit Verschleiß	**Lager**	**Einflussfaktoren**	Temperatur, Schmierung, Alterung, Mechanische Schäden
		Überwachung (j/n)	ja, Schwingungsmessung
		Auswirkung	Anlagenstillstand
	Schwingungsdämpfer	**Einflussfaktoren**	Temperatur, Alter
		Überwachung (j/n)	nein
		Auswirkung	fehlende Dämpfung, stärkere Schwingungen, höhere mechanische Beanspruchung
		Doku im Austauschordner!	*Link*

Tab. 17: Dokumentation Excel-Datei Komponenten mit Verschleiß, Quelle: Eigene Darstellung.

Bei „Condition Monitoring“, wie in Tab. 18 dargestellt, werden alle Maßnahmen erwähnt, die zur Überwachung der Anlage ausgeführt werden, egal ob in Intervallen oder kontinuierlich. Zur besseren Übersicht werden diese Maßnahmen in der Liste nach Häufigkeit eingeteilt.

Die relevanten Daten der kontinuierlichen Messungen sind in Anlehnung an die metrologischen Merkmale (siehe 5) für jeden Sensor zusammengestellt. Im abgebildeten Beispiel werden diese Daten jeweils für einen IO-Link Sensor und einen Analogsensor angeführt. Die eindeutige Kennzeichnung des Sensors ist idealerweise von der Feldebene bis in die Datenbank durchgängig. Die Erwähnung der Schnittstellen vom Messpunkt bis zum Datenmodell ist deshalb wichtig, weil sie eventuell Einfluss auf die erfassten Daten haben, z.B. können Filter oder Zykluszeiten die Interpretation beeinflussen.

Die Position der Sensoren und deren Ausrichtung ist im beigefügten Schema der Maschine, welche auch im Kapitel „Motoren“ (siehe 6) dargestellt ist, eingezeichnet. Diese sind insofern wichtig, um die Sensorachsen den Achsrichtungen der Maschine horizontal, axial und vertikal zuordnen zu können. Je nachdem in welcher Achse gemessen wird, sind die Messungen anders zu interpretieren. Außerdem beeinflusst die Montageart den erfassbaren Frequenzbereich (siehe 3.5.1.4).

Neben der Genauigkeit, Signalart, Abtastrate und möglichen Messbereichen des Sensors selbst, werden auch die konfigurierten Messwerte, Filter und Messintervalle angegeben. Denn im Fall der Schwingungsmessungen stellt der an die SPS übertragene Wert nicht den Rohwert, sondern nur eine statische Kenngröße dar. Diese wird Tiefpass bzw. Bandpass gefiltert und im eingestellten Messintervall

aktualisiert. Die Angaben zum Sensortyp und der Sensorart sind rein informativ. Falls weitere Daten zum Sensor selbst benötigt werden, sind die vollständigen Datenblätter im Austauschordner abgelegt

Damit die Werte in der Datenbank gefunden werden, wird der Datenpfad der Messwerte angegeben. Zusätzlich werden die eingestellte Abtastrate und die Aufzeichnungsdauer zur Verfügung gestellt. Die zugehörigen Einheiten können aus der Datenbank direkt entnommen werden.

Condition Monitoring	**Monatlich**	**Visuelle Inspektion**	Sichtkontrolle X
	Vierteljährlich	**Visuelle Inspektion**	Sichtkontrolle X
	Kontinuierlich	**Schwingungsmessung**	
		Sensorinformationen	**Doku im Austauschordner!**
		Kennzeichnung/ Beschreibung	**Lager Gebläsemotor 1200**
		Schnittstellen	Sensor – Diagnoseel. - SPS – Datenb.
		Typ	VSA 201 (VSE002 Diagnoseel.)
		Sensorart	MEMS, kapazitiv
		Position	**Siehe Schema**
		Montageart	Klebehalterung
		Messbereich	-250 bis +250g
		Frequenzbereich	1 bis 6000 Hz
		Messachsen	Beschleunigung-Peak in Z
		Filter	Hochpass 10 Hz
		VSE 201 Selbstüberwachung	Ja
		Response Delay	5 s
		Genauigkeit/ Empfindlichkeit	14,2 µA/g
		Abtastrate	-
		Messart SPS	4-20 mA, aktiv
		Facility	X
		Abtastrate	0,1 s
		Warnung Min	-
		Warnung Max	-
		Alarm Min	-
		Alarm Max	-
		Aufzeichnungsdauer	1 Jahr
		Sensorinformationen	**Doku im Austauschordner!**
		Kennzeichnung/ Beschreibung	**Lager Gebläsemotor**
		Schnittstellen	Sensor - IO-Link Master - SPS – Datenb.
		Typ	BCM0001
		Sensorart	MEMS
		Position	**Siehe Schema**
		Montageart	Magnethalterung
		Messbereich Geschwindigkeit	0 bis 220 mm/s
		Messbereich Beschleunigung	0 bis 16 g
		Messbereich Temperatur	0 bis 70 °C

Frequenzbereich	2 bis 3200 Hz
Messachsen	Vibration Velocity RMS Z Vibration Acceleration Peak to Peak Z Vibration Velocity RMS X Contact Temperature
Filter	-
Genauigkeit/ Empfindlichkeit Geschwindigkeit	0,42 mm/s @ 79,4 Hz
Genauigkeit/ Empfindlichkeit Beschleunigung	0,006 g @ 79,4 Hz
Genauigkeit/ Empfindlichkeit Temperatur	0,1 °C
Abtastrate	6400 Hz
Messart SPS	IO-Link
Facility	X
Abtastrate	0,1 s
Abtastrate Temperatur	1 s
Warnung Min	-
Warnung Max	-
Alarm Min	-
Alarm Max	-
Aufzeichnungsdauer	1 Jahr

Tab. 18: Dokumentation Excel-Datei Condition Monitoring, Quelle: Eigene Darstellung.

Unter „Parameter/Ereignisse/Einstellungen“ werden Daten wie Betriebs- und Leerlaufzeiten, Wartungs- und Reinigungsintervalle sowie Einstellungen und Grenzwerte erwähnt, wie in Tab. 19 dargestellt. Angegeben sind neben der generellen Produktionszeiten des Betriebs auch die Betriebs- und Stillstandszeiten. Ebenfalls wichtig sind die Wartungs- und Reinigungszeiten, zu denen auch Schwingungen verursacht werden können, die nicht relevant sind, oder in denen der Abnutzungsvorrat wieder vergrößert wird. Diese Informationen unterstützen nicht nur bei der Interpretation der Daten, sondern die Daten dieser Zeiten können eventuell gelöscht werden, wodurch sich der Datensatz verringert.

Außerdem ist die Betriebsart, in der die Maschine gefahren werden kann, relevant. Der Automatikbetrieb kann sich beispielsweise durch etwas andere Messergebnisse äußern wie Handbetrieb. Die angegebenen Grenzwerte und Betriebsbereiche helfen zusätzlich die Messungen einem Gut- oder Schlechtzustand zuzuordnen und ob Handlungen ergriffen werden müssen.

Hilfreich sind z.B. Auszüge aus Datenbausteinen oder Prozesssystemen mit diesen Informationen, die beigefügt werden.

Parameter/Ereignisse/Einstellungen	**Produktion**	Von .. bis, Uhrzeit	
	Betriebszeiten	X	
	Leerlaufzeiten	X	
	Wartungsintervall/ Reinigungsintervall	**Doku im Wartungsprogramm**	*Link*
		Wochentag/Zeitpunkt	
		Monatlich	Gebläse Lagerstellen schmieren
		Vierteljährlich	-
		Jährlich	-
	Betriebsarten		Automatik, Wartungsschalter
	Einstellungen		
	Bereiche/Grenzwerte	**Drehzahl**	X-X 1/min
		Grenzwert 2	X

Tab. 19: Dokumentation Excel-Datei Parameter/Ereignisse/Einstellungen, Quelle: Eigene Darstellung.

Der Abschnitt „Personal“ enthält generelle Informationen über das Produktionspersonal und das Instandhaltungspersonal, wie z.B. Ansprechperson, wie in Tab. 20 dargestellt.

Personal	**Bedienpersonal**	Betriebsintern	
		Ansprechpersonen Betrieb	X
	Instandaltungspersonal	Extern	
		Ansprechpersonen	X

Tab. 20: Dokumentation Excel-Datei Personal, Quelle: Eigene Darstellung.

Pro Anlage werden zusätzlich alle Störungen in einem weiteren Blatt in der Excel-Datei aufgelistet. Diese Liste, in der die Störmeldebezeichnungen den einzelnen Bits zugeordnet sind, dient zur Interpretation der Störmeldevariablen aus der Datenbank, wie im Kapitel „Einbindung der Messwerte“ (siehe 8.1) erwähnt.

11 ERGEBNISSE UND AUSBLICK

Die Auswertung der Schäden, welche bei Frequenzumrichter gespeisten Drehstrom Asynchronmotoren am häufigsten auftreten, ergibt, dass Lager die kritischsten Bauteile sind. Häufige Ursachen für deren Defekt sind die Schmierung, Verschmutzung, elektrischer Strom oder Ermüdung. Die Überwachung der Lager ist somit ein Indiz für den generellen Zustand des Motors. Verwendet werden dafür meist Schwingungs- und Temperaturmessungen. Um Probleme frühzeitig zu erkennen, werden die Sensoren am Lagerschild auf der Antriebsseite montiert, da Schäden auf der NDE bei kleinen Motoren an beiden Lagern sichtbar sind. Die für die Lagerüberwachung geeigneten Größen sind der Effektivwert der Schwinggeschwindigkeit und der Peak-to-Peak-Wert der Schwingbeschleunigung in einem möglichst breiten Frequenzbereich. Getriebe und Lager von Wellen können genauso mit Schwingungsmessungen überwacht werden. Während Riemen eher im niedrigen Frequenzbereich Schwingungen erzeugen, werden von Lagern und Getrieben eher hochfrequente Schwingungen erzeugt.

Für die praktische Umsetzung wurden daher verschiedene Sensoren und Systeme für unterschiedliche Anwendungsszenarios ausgewählt und miteinander verglichen:

- Die Vorteile von IO-Link Sensoren sind, dass mehrere Werte vom Sensor ausgelesen werden können. Beim gewählten Sensor können Messwerte in drei Achsen erfasst werden. Für die Anbindung wird allerdings ein IO-Link Master benötigt, weshalb dessen Anwendung nur bei Verwendung mehrerer Sensoren oder bereits vorhandenem Master sinnvoll ist. Es werden zwar nur statische Kenngrößen ausgegeben und keine Rohwerte; das ist aber für die Speicherung in einer externen Datenbank, welche das Abtastintervall limitiert, ausreichend.
- Das CMTK in Kombination mit dem IO-Link Sensor bietet sich vor allem für Versuchsaufbauten oder Anlagen ohne SPS an, da es über OPC UA einfach an die Datenbank angebunden werden kann. Von Anlagen ohne Netzwerkanbindung können im Gerät selbst Daten aufgezeichnet und für Condition Monitoring ausgewertet werden. Für Analysezwecke können diese auch vom Gerät exportiert werden.
- Der Analogsensor mit Auswerteelektronik eignet sich ebenfalls eher für Anwendungen, bei denen keine SPS-Anbindung möglich ist. Da über den Analogausgang der Diagnoseelektronik nur ein Wert ausgegeben werden kann, ist die direkte Netzwerkanbindung des Moduls sinnvoller. Allerdings kann der gewählte Sensor nur in einer Achse Schwingungen erfassen. Dafür können Rohwerte als Spektrum im Diagnosemodul ausgewertet werden.

Interessante Erkenntnisse der Arbeit sind, dass die Validierung von Schwingungsmessungen nur eingeschränkt möglich ist. Die Schwinggeschwindigkeit-Messwerte der Lager können nur anhand vorgegebener Grenzwerte, dem Vergleich mit anderen, vergleichbaren Maschinen oder identischer Sensoren mit gleicher Konfiguration überprüft werden – bei letzterem sind alle Kenngrößen miteinander vergleichbar. Der Vergleich verschiedener Sensoren untereinander ist wegen unterschiedlicher Filtereinstellungen kaum möglich und kann nur über den genormten Effektivwert der Schwinggeschwindigkeit erfolgen. Für Beschleunigungsmessungen gibt es keine genormten Grenzwerte und Vorgaben. Wie bei Getrieben wird bei ihnen eher auf die Wertänderung, das Frequenzspektrum und Muster geachtet.

Außerdem hat die Lastzone des Motors Einfluss auf die Ausprägung der Schwingungen in den einzelnen Achsen, weshalb die Montageposition für das Ergebnis wichtig ist. Für langfristige Lösungen ist die Klebemontage oder Verschraubung sinnvoller, bei temporären Anwendungen oder für die Justierung ist die Verwendung von Magnethalterungen geeigneter.

Entscheidend für qualitative Daten sind der richtige Messpunkt, die richtige Montage, Sensorkonfiguration und Aufzeichnung in der Datenbank. Zusätzliche Informationen zur Anlage selbst, deren Umgebung usw. unterstützen deren Interpretation.

Ausblick

Mit der Schaffung einer geeigneten Datenbasis kann das für die Analyse der Motoren benötigte Modell erstellt werden. Der beste Zeitpunkt für die Sammlung von Basisdaten ist nach der Einlaufphase einer Neuanlage oder einem Retrofit. Da keine vergleichbaren Maschinen existieren, können nur die Daten nach Validierung und Justierung der Sensoren und Anpassung des Aufzeichnungsintervalls in der Datenbank verwendet werden.

Die Informationen in der Excel-Datei werden anfangs als Basis für die Interpretation der Daten verwendet. In Zusammenarbeit mit dem Betrieb muss die Interpretation der Daten trotzdem abgestimmt werden, damit Ereignisse der richtigen Ursache zugeordnet werden. Im Laufe der Modellentwicklung wird somit die Excel-Datei adaptiert werden. Eventuell werden weitere Informationen benötigt oder unnötige Informationen entfernt.

Wenn die Motorüberwachung durch das Modell aktiv ist, erfolgt die Information der unterschiedlichen Abteilungen über besondere Ereignisse vorerst nach dem erarbeiteten Kommunikationsschema. Das bedeutet, dass bei Änderungen oder Vorfällen von der Betriebsleitung eine Hinweis-E-Mail an die betreffende Abteilung gesendet wird. Dadurch werden alle für die Datenerfassung relevanten Schnittstellen sowie das Modell selbst auf dem aktuellen Stand gehalten. In Zukunft, wenn Predictive Maintenance häufiger Anwendung findet, wird diese provisorische Lösung zum Informationsaustausch vermutlich durch eine vereinheitlichte Lösung ersetzt werden, die mehr in Richtung Musterbeispiel gehen könnte.

Schlussendlich soll die fertige Motorüberwachung über ein Analysemodell von der Inbetriebnahme der Sensoren bis zur Einbindung in die Datenbank die fortlaufende Schnittstellenpflege, die Excel-Datei, sowie die Sicherstellung von Datenqualität vom Messpunkt bis zur Datenbank als Grundlage für zukünftige Predictive Maintenance Projekte dienen.

12 LITERATURVERZEICHNIS

Gedruckte Werke (14)

Schaeffler Technologies AG & Co. KG. (Hrsg.) (2013): *Wälzlagerschäden - Schadenserkennung und Begutachtung gelaufener Wälzlager*, Schweinfurt

Schaeffler Technologies AG & Co. KG (Hrsg.) (2020): *Stromisolierende Lager*, Schweinfurt

Siemens AG (Hrsg.) (2017): *SINAMICS - Low Voltage Projektierungshandbuch*, 6.5 Auflage, Nürnberg

SEW-EURODRIVE GmbH & Co KG (Hrsg.) (2013): *Praxis der Antriebstechnik - EMV in der Antriebstechnik*, Bruchsal

ABB Schalt- und Steuerungstechnik GmbH (Hrsg.) (1999): *Handbuch der dritten Oberwelle*, Heidelberg

Siemens AG (Hrsg.) (2020): *SINAMICS G120 - Control Units CU240B-2/CU240E-2*, Erlangen

Siemens AG (Hrsg.) (2023): *SINAMICS G120 - Niederspannungsumrichter - Einbaugeräte mit Control Units CU250S-2 und Geberauswerung*, Erlangen

SKF Gruppe (Hrsg.) (2012): *SKF Service-Handbuch*

Cerquitelli, Tania; Nikolakis, Nikolaos; O'Mahony, Niamh; Macii, Enrico; Ippolito, Massimo; Makris, Sotirios (2021): *Predictive Maintenance in Smart Factories*, Springer Nature, Singapore

Fischer, Rolf (2004): *Elektrische Maschinen*, 12. Auflage Auflage, Carl Hanser Verlag, München, Wien

Greiner, H. (2005): *Beurteilung von Schadensbildern bei Getriebemotoren*, Esslingen

Isopp, Jutta (2022): *Condition Monitorin Im Kontext der Digitalisierung*, Klagenfurt

Kuttner, Thomas (2015): *Praxiswissen Schwingungsmesstechnik*, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden

Mütze, Anette (2003): *Bearing Currents in Inverter-Fed AC-Motors*, Darmstadt

Online-Quellen (22)

ABB AG (2023): *ABB* https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107799&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch [Stand: 27.09.2023]

Fraunhofer Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik (ITWM)*Aufbau einer prädiktiven Instandhaltung durch zustandsbasierte Überwachung - Fragekatalog zum Kick-off* https://www.itwm.fraunhofer.de/content/dam/itwm/de/documents/SYS_Infomaterial/SYS_Predictive-Mainenance_FAQ_DE.pdf [Stand: 14.09.2023]

Beckhoff Automation GmbH & Co. KG*Beckhoff Information System* https://infosys.beckhoff.com/index.php?content=../content/1031/html/bkinfosys_intro.htm&id= [Stand: 28.09.2023]

SKF Evolution (2023): *EVOLUTION Technologie-Magazin von SKF* https://evolution.skf.com/de [Stand: 23.08.2023]

Fluke Austria GmbH (2023): *fluke.com/de-at*
https://www.fluke.com/de-at/mehr-erfahren/blog/motoren-antriebssteuerungen-pumpen-kompressoren/13-haufige-grunde-fur-motorausfalle [Stand: 03.08.2023]

Schaeffler Austria GmbH (2023): *Schaeffler*
https://www.at.schaeffler.com/de/produkte-und-loesungen/industrie/industrie-4.0/digitale-services/ [Stand: 27.09.2023]

Hans Turck GmbH & Co. KG (2023): *TURCK*
https://www.turck.de/de/condition-monitoring-von-motoren-als-nachruestung-35149.php [Stand: 27.09.2023]

TÜV SÜD AG (2023): *TÜV SÜD*
https://www.tuvsud.com/de-de/indust-re/elektrotechnik-info/oberschwingungen2 [Stand: 02.09.2023]

National Instruments CORP. (2023): *NI*
https://www.ni.com/de/shop/data-acquisition/measurement-fundamentals-main-page/analog-fundamentals/acquiring-an-analog-signal--bandwidth--nyquist-sampling-theorem-.html [Stand: 05.10.2023]

NSK Deutschland GmbH (2009): *Wälzlager-Doktor - Wartung von Wälzlagern*
https://www.nskeurope.de/de/news-media/downloads/bearings.html [Stand: 07.10.2023]

Brüel & Kjaer Austria GmbH (2023): *Brüel & Kjaer*
https://www.bksv.com/de [Stand: 08.10.2023]

IDS Innomic Schwingungsmesstechnik GmbH*ids Innomic*
https://www.innomic.com/ [Stand: 08.10.2023]

Balluff GmbH (2023): *Balluff*
https://www.balluff.com/de-de/products/BCM0001 [Stand: 30.07.2023]

ifm electronic GmbH (2023): *ifm*
https://www.ifm.com/de/de [Stand: 23.10.2023]

Balluff GmbH (2023): *Condition Monitoring Sensoren - BCM R15E-001-DI00-01,5-S4 Bestellcode: BCM0001*
https://www.balluff.com/de-de/products/BCM0001 [Stand: 30.07.2023]

Balluff GmbH (2023): *Balluff*
https://assets.balluff.com/WebBinary1/LIT_FLY_CMTK_DE_B22_DRW_951833_AA_000.pdf [Stand: 27.11.2023]

ifm electronic GmbH (2023): *ifm*
https://www.ifm.com/de/de/product/AL1402 [Stand: 27.11.2023]

ifm elecronic GmbH (2023): *ifm*
https://www.ifm.com/de/de/product/VSA201 [Stand: 27.11.2023]

ifm electronic GmbH (2023): *ifm*
https://www.ifm.com/at/de/product/VSE002 [Stand: 27.11.2023]

MSG Software GmbH (2023): *Idustrial Software MSG*
https://www.mgs.co.at/cms/index.php/products/xrangeeye [Stand: 27.11.2023]

tecema GmbH*2kai to know about it*
https://2kai.eu/wiki/huellkurve/ [Stand: 08.10.2023]

Branitzke, Armin (2020): *Automations praxis*
https://automationspraxis.industrie.de/industrie-4-0/vom-condition-monitoring-zur-predictive-maintenance/ [Stand: 07.09.2023]

Normen (9)

Deutsches Institut für Normung (Hrsg.) (2018): *DIN EN 13306-2: DIN EN 13306-2 - Instandhaltung - Begriffe der Instandhaltung*

Deutsches Institut für Normung (Hrsg.) (2022): *DIN ISO 20816-3: DIN ISO 20816-3 - Mechanische Schwingungen - Messung und Bewertung der Schwingungen von Maschinen - Teil 3: Industriemaschinen mit einer Leistung über 15 kW und Betriebsdrehzahlen zwischen 120 min-1 und 30000 min-1*

Internationale Organisation für Normung (Hrsg.) (2003): *ISO 14694: ISO 14694 - Industrieventilatoren - Technische Vorschriften für die Wuchtgüte und Vibrationspegel*

Internationale Organisation für Normung (Hrsg.) (2017): *ISO 15243: ISO 15243 - Rolling bearings - Damage and failures - Terms, characteristics and causes*

Internationale Organisation für Normung (Hrsg.) (2018): *ISO 17359 : ISO 17359 - Condition monitoring and diagnostics of machines - General guidelines*

Österreichisches Normungsinstitut (Hrsg.) (2003): *ÖNORM EN ISO 10012: ÖNORM EN ISO 10012 - Messlenungssysteme - Anforderungen an Messprozesse und Messmittel*

Österreichisches Normungsinstitut (Hrsg.) (2015): *ÖNORM EN ISO 9001: ÖNORM EN ISO 9001 - Qualitätsmanagementsysteme - Anforderungen*

Österreichischer Verband für Elektrotechnik (Hrsg.) (2020): *OVE EN 50160: OVE EN 50160 - Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen (deutsche Fassung)*

Österreichischer Verband für Elektrotechnik (Hrsg.) (2020): *OVE EN 61000-2-2: OVE EN 61000-2-2 - Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) - Teil 2-2: Umgebungsbedingungen - Verträglichkeitspegel für niederfrequente leitungsgeführte Störgrößen und Signalübertragung in öffentlichen Niederspannungsnetzen*

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1: Einstufung der Fehlermodi, Quelle: ISO 15243 (2017), S. 3. 5

Abb. 2: Häufige Ursachen von Lagerschäden (2022), Quelle: SKF Evolution (2023), Online-Quelle [23.8.2023] 6

Abb. 3: Darstellung interne Kapazitäten Motor, Quelle: Siemens AG (Hrsg.) (2017), S. 141. 16

Abb. 4 Darstellung der verschiedenen Lagerstromarten, Quelle: Siemens AG (Hrsg.) (2017), S. 141. 16

Abb. 5: Schema Abgasgebläse, Quelle: Eigene Darstellung 39

Abb. 6: Schema Gebläsemotor mit Zwischenwelle, Quelle: Eigene Darstellung 41

Abb. 7: Schema Motor und Welle Sichterrad, Quelle: Eigene Darstellung 44

Abb. 8: Montage Motor Sichterrad, Quelle: Eigene Darstellung 45

Abb. 9: Schema Ersatzmotor und Getriebe Zellradschleuse, Quelle: Eigene Darstellung 47

Abb. 10: Schema Motor und Getriebe Zellradschleuse, Quelle: Eigene Darstellung 48

Abb. 11: Montage Ersatzmotor Zellradschleuse, Quelle: Eigene Darstellung 49

Abb. 12: Beispielhafte Montageorte zur Schwingungsmessung, Quelle: Balluff GmbH (2023), Online-Quelle [30.07.2023], S. 14. 55

Abb. 13: Hardwarekonfiguration IO-Link Sensor, Quelle: Eigene Darstellung 57

Abb. 14: Device-Spezifikation BCM0001, Quelle: Balluff GmbH (2023), Online-Quelle [30.07.2023], S. 19. 58

Abb. 15: Prozessdaten BCM0001, Quelle: Balluff GmbH (2023), Online-Quelle [30.07.2023], S. 38. 58

Abb. 16: Datenbaustein IO-Link Sensoren, Quelle: Eigene Darstellung 59

Abb. 17: Funktion IO-Link Sensoren auslesen, Quelle: Eigene Darstellung 60

Abb. 18: Datenvisualisierung CMTK Lager Gebläsemotor Übersicht, Quelle: Eigene Darstellung 62

Abb. 19: Datenvisualisierung CMTK Lager Gebläsemotor Alarm Query, Quelle: Eigene Darstellung 63

Abb. 20: Datenvisualisierung CMTK Lager Gebläsemotor Alarm Alert, Quelle: Eigene Darstellung 63

Abb. 21: Konfiguration BCM0001 Lager Gebläsemotor, Quelle: Eigene Darstellung 65

Abb. 22: Achsausrichtung BCM0001, Quelle: Balluff GmbH (2023), Online-Quelle [30.07.2023], S. 14. 65

Abb. 23: Sensoren Lager Gebläsemotor, Quelle: Eigene Darstellung 66

Abb. 24: Kleinste zulässige Frequenz im Signal bei gegebenem Zeitfenster BCM0001, Quelle: Balluff GmbH (2023), Online-Quelle [30.07.2023], S. 11. 66

Abb. 25: Messpunkte an Lagergehäuse, Quelle: DIN ISO 20816-3 (2022), S. 14. 68

Abb. 26: Montage Magnethalterung IO-Link Sensor Motor Sichterrad, Quelle: Eigene Darstellung 69

Abb. 27: Montage IO-Link Sensor Motor Zellradschleuse, Quelle: Eigene Darstellung 69

Abb. 28: Trend Lager- und Getriebetemperatur Zellradschleuse, Quelle: Eigene Darstellung 70

Abb. 29: Validierung Sensoren Zellradschleuse Aufbau, Quelle: Eigene Darstellung. 71

Abb. 30: Validierung Sensoren Motor Zellradschleuse Trend, Quelle: Eigene Darstellung. 72

Abb. 31: Vergleich IO-Link Sensor mit SKF CMAS100-SL Pen Sichterradmotor, Quelle: Eigene Darstellung. 73

Abb. 32: Validierung Sensoren Gebläsemotor Effektivwert Schwinggeschwindigkeit, 10 bis 1000 Hz Trend, Quelle: Eigene Darstellung. 73

Abb. 33: Justierung Sensor Sichterradmotor, Quelle: Eigene Darstellung. 74

Abb. 34: Justierung Sensor Zellradschleuse Getriebe, Quelle: Eigene Darstellung. 75

Abb. 35: Justierung Sensor Zellradschleuse Getriebe Trend, Quelle: Eigene Darstellung. 75

Abb. 36: XRangeEye Importdatei, Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (MSG Software GmbH (2023), Online-Quelle [27.11.2023]) 77

Abb. 37: Node-Set Info, Eigene Darstellung 77

Abb. 38: Abtastrate Lager Gebläsemotor 1 s VS 100 ms, Quelle: Eigene Darstellung. 78

Abb. 39: Kommunikationsschema Musterbeispiel, Quelle: Eigene Darstellung. 80

Abb. 40: Kommunikationsschema technische Umsetzung, Quelle: Eigene Darstellung. 81

Abb. 41: Einfluss bestimmter Systemparameter auf die unterschiedlichen Lagerstromarten, Quelle: Mütze (2003), S. 177. 97

TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 1: Symptome von Wälzlagerschäden und deren Ursachen, in Anlehnung an Quelle: SKF (Hrsg.) (2012), S. 233ff. 10

Tab. 2: Geeignete Verfahren zur Früherkennung von Lagerschäden, Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Isopp (2022), S. 227. 12

Tab. 3: Beispiele für Elektromotorfehler verbunden mit Messparameter und –techniken, Quelle: ISO 17359 (2018), S. 13. 24

Tab. 4: Beispiele für Gebläse Fehler verbunden mit Messparametern und -techniken, Quelle: ISO 17359 (2018), S. 21. 25

Tab. 5: Unterteilung der Schwingzonen für Maschinen der Gruppe: Mittelgroße Maschinen mit einer Nennleistung über 15 kW und bis 300 kW; elektrische Maschinen mit einer Achshöhe 160 mm <= H <= 315 mm, Quelle: DIN ISO 20816-3 (2022), S. 27. 28

Tab. 6 Schwingungsgrenzwerte für Versuche im Betrieb, Quelle: ISO 14694 (2003), S. 18. 29

Tab. 7: Typenschild Abgasgebläse, Quelle: Eigene Darstellung 39

Tab. 8: Typenschild Radialventilator Abgasgebläse, Quelle: Eigene Darstellung 40

Tab. 9: Typenschild Gebläsemotor, Quelle: Eigene Darstellung 42

Tab. 10: Typenschild Ventilator Gebläsemotor, Quelle: Eigene Darstellung 42

Tab. 11: Einstufung Schwingungen Gebläsemotor, Quelle: Eigene Darstellung 43

Tab. 12: Typenschild Motor Sichterrad, Quelle: Eigene Darstellung 45

Tab. 13: Einstufung Schwingungen Motor Sichterrad, Quelle: Eigene Darstellung 46

Tab. 14: Typenschild Ersatzmotor Zellradschleuse, Quelle: Eigene Darstellung 48

Tab. 15: Dokumentation Excel-Datei Allgemeines und Umgebung, Quelle: Eigene Darstellung. 83

Tab. 16: Dokumentation Excel-Datei Maschine, Quelle: Eigene Darstellung. 83

Tab. 17: Dokumentation Excel-Datei Komponenten mit Verschleiß, Quelle: Eigene Darstellung. 84

Tab. 18: Dokumentation Excel-Datei Condition Monitoring, Quelle: Eigene Darstellung. 86

Tab. 19: Dokumentation Excel-Datei Parameter/Ereignisse/Einstellungen, Quelle: Eigene Darstellung. . 87

Tab. 20: Dokumentation Excel-Datei Personal, Quelle: Eigene Darstellung. 87

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AI	Artificial Intelligence
CMTK	Condition Monitoring Tool
DMS	Dehnungsmessstreifen
EDM	Electrostatic Discharging Machining
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
ERP	Enterprise-Resource-Planning-System
FE	Funktionserde
FFT	Fast-Fourier-Transformation
FU	Frequenzumrichter
gE	gEnveloped
IODD	Input Output Device Description
MEMS	Mikroelektromechanische Systeme
NDE	Non Drive End
NodeID	Node Identification
OPC UA	Open Platform Communication Unified Architecture
PE	Schutzerde
QM	Qualitätsmanagement
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung

ANHANG 1: EINFLUSS PARAMETER AUF LAGERSTRÖME

Influencing parameter	Type of bearing current occurring		
	EDM bearing current	Circulating bearing current	Rotor ground current
1. Inverter			
Switching frequency	little influence on amplitude, but on the frequency of occurrence		
Control method (v_{com} not eliminated)	little influence on amplitude, but on the frequency of occurrence		
2. Motor-Inverter-Connection			
Motor cable length	no influence	little influence	little influence
Use of shielded instead of unshielded motor cable	no influence	influence	significant influence
Grounded motor shaft	no influence	no influence	significant influence, if unshielded motor cable is used
Filters that reduce the dv_{Lg}/dt but that do *not* eliminate the common mode voltage	no influence	significant influence	significant influence
Filters that *do* eliminate the common mode voltage	significant influence	significant influence	significant influence
3. Motor Operating Parameters			
Motor speed	influence		
Bearing temperature	influence		
4. Motor Design			
Motor size	little influence	significant influence	significant influence
Bearing Voltage Ratio (BVR)	little influence	no influence	no influence
Number of parallel winding branches	no influence	influence for motors of same size (shaft height)	
Type of ball bearing insulation (conventional bearing/ insulated bearing/ hybrid bearing)	significant influence	significant influence	significant influence
5. Motor-Inverter-Combination			
	little influence		

Abb. 41: Einfluss bestimmter Systemparameter auf die unterschiedlichen Lagerstromarten, Quelle: Mütze (2003), S. 177.