

Masterarbeit

CONDITION MONITORING ALS ZUKÜNFTIGE AUSSTATTUNG VON ANLAGEN IN DER AUTOMATISIERUNG

ausgeführt am



FACHHOCHSCHULE DER WIRTSCHAFT

Fachhochschul-Masterstudiengang
Automatisierungstechnik-Wirtschaft

von

Ing. Michael Ludwig Lessiak, BSc.

1910322005

betreut und begutachtet von

FH-Prof. DI Dr. techn. Manfred Pauritsch

Graz, November 2020



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.

A handwritten signature in black ink, reading "Michael Dennis", written over a horizontal dotted line.

Unterschrift

DANKSAGUNG

Meiner Familie, meiner Cousine, meinem Chef, meinen Kollegen, meinem Betreuer FH-Prof. DI Dr. techn. Manfred Pauritsch möchte ich für die moralische Unterstützung und für Rat und Tat danken. Zusätzlich möchte ich meinem Arbeitgeber der Firma PMS Elektro- und Automationstechnik GmbH für die Unterstützung bei dieser Arbeit, aber auch für die Unterstützung beim gesamten Studium danken.

KURZFASSUNG

Da die Produktionsanlagen in vielen Industriezweigen effizienter geworden sind, wurde die Automatisierung zu einem wesentlichen Bestandteil. Der permanente Betrieb und der Verschleiß der Anlagen und Maschinen führen zu stetig steigenden Instandhaltungskosten, welche unter anderem auf erhöhten Verschleiß und Materialermüdungen zurück zu führen sind.

Um diesen Problemen entgegen zu wirken, kommt das Prinzip des Condition Monitoring immer öfter zur Anwendung. Die Firma PMS Elektro- und Automationstechnik GmbH möchte die Zustandsüberwachung in zukünftigen Projekten implementieren. Aufgrund dessen ist es Ziel dieser Arbeit einen Überblick über die unterschiedlichen Condition Monitoring Methoden und Systeme zu schaffen, um einen Einblick in die optimale Nutzung der einzelnen Varianten zu bekommen und entsprechende Empfehlungen auszusprechen. Die einzelnen Anwendungen und Hardware-Module werden beschrieben, durchleuchtet und auf definierte Kriterien analysiert.

Das Ergebnis dieser Arbeit ist die Beschreibung und Analyse der Condition Monitoring Systeme und Module. Die gewonnenen Erkenntnisse ermöglichen es, die optimalen Varianten für den jeweiligen Anwendungsfall auszuwählen und in Verwendung zu bringen. Ein weiteres Ergebnis ist die Simulation, welche die gemessenen Daten in ein automatisiertes Steuerungssystem integriert. Sie veranschaulicht auch die automatische Reaktion auf Systemveränderungen.

Die geeignete Ausführung der Condition Monitoring Systeme und Methoden kann die Lebensdauer von Anlagen und Maschinen erhöhen und zusätzlich werden dadurch auch die Instandhaltungskosten gesenkt. Die Systeme sollen in Zukunft nicht nur Aufschluss über den Status der Anlage oder Maschine geben, sondern auch Daten für die Automatisierung bereitstellen, um auf Systemveränderungen automatisch reagieren zu können, damit Schäden vermindert und verhindert werden können.

ABSTRACT

As production plants in many industries have become more efficient subsequently automation has become an essential component. The permanent operation and the wearing of plants and machines leads to constantly increasing maintenance costs, which can be attributed to increased abrasion and fatigue of material.

The principle of condition monitoring to counteract these problems is increasingly utilised. The company PMS Elektro- und Automationstechnik GmbH would like to implement condition monitoring for future projects. Therefore, the aim of this thesis is to give an overview of the different condition monitoring methods and systems to gain an insight into the optimal usage of the individual variants and make adequate recommendations. The individual applications and hardware modules are described, examined and analysed with defined criteria.

The results of this master's thesis are the description and analysis of the condition monitoring systems and modules. The gained knowledge allows to select the optimal variants for the respective application and to put them into practice. Another outcome is the simulation which integrated the measured data into an automated control system. It also illustrates the automatic reaction to system changes.

The appropriate designs of the condition monitoring systems and methods increases the lifecycle of plants and machines and additionally reduces maintenance costs. In the future, the systems should not only provide information about the status of the plant or machine, but also provide data for the automation system in order to be able to react to system changes automatically to reduce and prevent damage.

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung.....	1
2	PMS Elektro- und Automationstechnik GmbH.....	2
2.1	Aufgabengebiet.....	3
2.2	Geschichte.....	4
2.3	Kompetenzen.....	4
3	Condition Monitoring.....	5
3.1	Definition / Beschreibung.....	5
3.1.1	Vorteile von Condition Monitoring.....	7
3.1.2	Ausfallzyklus.....	7
3.1.3	Schadensentwicklung und Schadenskette.....	9
3.1.4	Betriebsweise der Instandhaltung.....	10
3.2	Condition Monitoring Systeme bzw. Methoden.....	11
3.2.1	Schwingungsanalyse.....	12
3.2.1.1	Schwingungssensoren.....	12
3.2.1.2	Schwingungen.....	14
3.2.1.3	Ursache und Wirkung.....	15
3.2.1.3.1	Unwucht.....	15
3.2.1.3.2	Ausrichtefehler.....	16
3.2.1.3.3	Stöße (Stoßimpuls).....	17
3.2.1.3.4	Wälzlagerschäden.....	17
3.2.1.3.5	Magnetische Induktion.....	18
3.2.1.3.6	Auswirkungen.....	18
3.2.2	Schmiermittel- / Ölanalyse.....	19
3.2.2.1	Verschleißmechanismen.....	19
3.2.2.2	Verschleißmessung.....	20
3.2.2.2.1	Atomemissionsspektroskopie (AES).....	21
3.2.2.2.2	Particle Quantifier Index (PQ-Index).....	24
3.2.2.2.3	Optische Partikelanalyse (OPA).....	25
3.2.2.2.4	Analytische Ferrographie (AFG).....	28
3.2.2.2.5	Mehrkanal-IR (infrarot)-Messsystem.....	31
3.2.3	Temperaturmessung.....	33
3.2.3.1	Berührende Temperaturmessung.....	34
3.2.3.1.1	Thermometer (allgemein).....	34
3.2.3.1.2	Metall-Widerstandsthermometer.....	35
3.2.3.1.3	Halbleiter-Widerstandsthermometer.....	37
3.2.3.1.4	Thermoelemente.....	38
3.2.3.2	Berührungslose Temperaturmessung (IR-Messung).....	39
3.2.3.2.1	Messprinzip.....	40
3.2.3.2.2	Grundbegriffe IR-Messtechnik.....	40

3.2.3.2.3	Technische Einsatzgebiete der IR-Messung	41
3.2.3.2.4	Vor- und Nachteile der IR-Thermographie.....	42
3.2.4	Ultraschall-/Akustische Überwachung	42
3.2.4.1	Modalanalyse	43
3.2.4.2	Körperschallanalyse	43
3.2.4.3	Schallemissionsanalyse	44
3.2.4.4	Prüfung mit geführten Wellen	44
3.2.4.5	Vor- und Nachteile der Analysen.....	45
3.2.5	Strom- und Spannungsüberwachung	45
4	Condition Monitoring – Siemens SIPLUS CMS	46
4.1	SIPLUS CMS1200	47
4.1.1	Eigenschaften	48
4.2	SIPLUS CMS2000	48
4.2.1	Eigenschaften	49
4.3	SIPLUS CMS4000	50
4.3.1	Eigenschaften	50
4.4	CMS X-Tools.....	51
5	Analyse und Auswertung DER CM-Methoden.....	52
5.1	Betrachtung: Schwingungsanalyse.....	52
5.2	Betrachtung: Schmiermittel- / Ölanalyse	54
5.3	Betrachtung: Temperaturmessung	55
5.4	Betrachtung: Ultraschall-/Akustische Überwachung.....	57
5.5	Betrachtung: Strom- und Spannungsüberwachung	58
6	Analyse und Auswertung SIPLUS CMS.....	60
6.1	SIPLUS CMS1200	60
6.2	SIPLUS CMS2000	61
6.3	SIPLUS CMS4000	62
7	Simulation – Verhalten der Steuerung bei Systemänderung	63
8	Zusammenfassung und Ausblick	66
	Literaturverzeichnis	68
	Abbildungsverzeichnis.....	73
	Tabellenverzeichnis.....	75
	Abkürzungsverzeichnis.....	76
	Anhang 1: Spektraltafel	77
	Anhang 2: SIPLUS CMS1200	78
	Anhang 3: SIPLUS CMS2000	82
	Anhang 4: SIPLUS CMS4000	87

1 EINLEITUNG

Im Laufe der Zeit hat die Automatisierung an sich immer mehr Bedeutung und immer mehr Verwendung in den unterschiedlichsten Branchen gefunden. Automatisierung ermöglicht es die Produktionsleistung diverser Artikel / Erzeugnisse enorm zu steigern. Die Qualität und Leistung im Vergleich zur manuellen Produktion konnten signifikant angehoben werden. Aus diesem Grund wird dieser Ansatz weiterverfolgt, um einerseits den Produktionsprozess zu erleichtern und andererseits die menschliche Arbeit teilweise durch Maschinen zu ersetzen.

Obwohl durch Automatisierung menschliche Arbeit teilweise ersetzt werden kann, ist es jedoch nicht möglich die Wartung und Reparatur der Anlagen maschinell durchzuführen und bleibt somit eine Arbeit die manuell geleistet werden muss. Daraus folgend hat auch der Arbeitsbereich Instandhaltung immer mehr an Wert gewonnen und ist in einem automatisierten Betrieb nicht mehr weg zu denken.

„Automation = Wenn die Reparaturkosten die Personaleinsparung wettmachen.“¹

Ältere Anlagen werden meist jedoch nur repariert und im Notfall werden Komponenten / Bauteile erneuert. Diese Art der Instandhaltung wird vermehrt aus kostentechnischen Gründen durchgeführt. Diese Strategie funktioniert leider nicht auf Dauer, da hier auf Grund von Materialermüdungen die Grenzen der Betriebsfähigkeit mit der Zeit erreicht werden. Somit fallen immer häufiger Reparaturen an und die Kosten der Instandhaltung steigen. Das plötzliche Gebrechen eines Bauteiles kann somit auch zu ungeplanten Stillständen führen, was wiederum Kosten verursacht.

„Condition Monitoring“ (CM) ist ein Konzept, welches genau diesen plötzlichen Ereignissen entgegenwirken soll, indem die Schwachstellen bzw. Fehler/ Probleme aufgrund der Datenerfassungen ermittelt werden können. Diese Vorgehensweise kann die Instandhaltungskosten reduzieren, da früh genug auf bevorstehende Probleme reagiert werden kann. Somit wird Condition Monitoring auch in verschiedenste Betriebe immer mehr zu einem Thema. Aufgrund dieser Entwicklung hat sich auch die Firma PMS Elektro- und Automationstechnik GmbH immer mehr Gedanken zu diesem Thema gemacht. Das Auswerten von Daten, welche auf verschiedenen Stationen einer Anlage aufgenommen werden, kann zur Reduktion von ungeplanten Stillständen beitragen.

Basierend auf dem zuvor erläuterten Hintergrund befasst sich diese Arbeit mit folgenden Punkten:

- Condition Monitoring
- Wirkungsweise von Condition Monitoring Methoden und Systemen
- Einbindungsmöglichkeit in die aktive Steuerung

Aufbauend auf den Erkenntnissen/ Ergebnissen dieser Arbeit, soll zukünftig die Einbindung von Condition Monitoring Systemen in bestehende und auch in neue Anlagen erfolgen.

¹ Weidner (1925), Online-Quelle [13.07.2020]

2 PMS ELEKTRO- UND AUTOMATIONSTECHNIK GMBH



Abb. 2-1: PMS Elektro- und Automationstechnik GmbH – Werksanlage²

„PMS Elektro- und Automationstechnik ist der kompetente Partner für ausgereifte Teil- und Gesamtlösungen im Bereich Elektro- und Automationstechnik und betreut Industriekunden bei spezifischen Anforderungen und Projekten sowohl in Österreich als auch am internationalen Markt.

Als eigentümergeführtes Unternehmen fühlen wir uns in erster Linie – getreu unserem Motto „successful solutions“ – dem Erfolg unserer Kunden verpflichtet. Neben höchster technischer Kompetenz und Qualität im Anlagenbau zählen Integrität, Fairness, Flexibilität, Schnelligkeit und Präzision zu unseren ausgewiesenen Stärken. Wir agieren als verantwortungsvoller und verlässlicher Partner für unsere Kunden, Geschäftskollegen, Lieferanten und Stakeholder.

Ob Weltmarktführer oder heimischer Spezialist, viele namhafte Kunden aus unterschiedlichen Industrien wie Chemie, Petrochemie, Pharma, Eisen & Stahl, Energie & Umwelttechnik, Papier & Zellstoff, Holz & Baustoff, Lebensmittel, Textil & Kunststoff sowie Medizintechnik vertrauen auf diese Kompetenz, Qualität und Lösungsorientierung und wählen PMS als bevorzugten Projektpartner.“²

² PMS Elektro- und Automationstechnik GmbH (Karriere) (2020), Online-Quelle [13.September.2020]

2.1 Aufgabengebiet

„Als eines der führenden Unternehmen der Branche bietet PMS Planung, Projektierung, Hard- und Software-Engineering, Montage, Inbetriebnahme, Supervising sowie Service und Instandhaltung auf höchstem technischem Niveau und aus einer Hand. Leistungen im Bereich Elektro-, Mess- und Regeltechnik werden nach den jeweiligen Bedürfnissen maßgeschneidert. Dabei profitieren Kunden von langjähriger Erfahrung, branchenübergreifendem Know-how und effizientem Projektmanagement. Als besonders zukunftsorientiertes und innovationsfreudiges Unternehmen ist man bestrebt, die Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine stets durch neuste Erkenntnisse zu vereinfachen und auch anspruchsvolle Steuerungsprozesse transparent und anwenderfreundlich zu gestalten. Kooperationen mit Universitäten und Partnerschaften mit namhaften Unternehmen wie Siemens, Eaton, Rittal, Metso oder Modl stärken die Themenführerschaft in diesem Bereich, die eigene Wettbewerbsfähigkeit und die Vorteile des Kunden.

Bei der globalen Markterweiterung steht PMS ihren Kunden unterstützend zur Seite und begleitet sie dorthin, wo neue Herausforderungen warten. Leistungsfähigkeit, kurze Entscheidungswege, Flexibilität, technische und soziale Kompetenz, Liefertreue und Termintreue garantieren Auftraggebern Planungssicherheit und Sorgenfreiheit. Damit gewährleistet PMS auch bei internationalen Projekten gegenseitiges Verständnis im Leistungsanspruch und gewohnt hohe Standards.

PMS Elektro- und Automationstechnik agiert als führender Komplettlösungsanbieter, stärkt die Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit ihrer Kunden nachhaltig und ist attraktiver Projektpartner für ausländische und inländische Auftraggeber. Oberstes Ziel dabei ist für alle PMS Mitarbeiter, Anforderungen als erfolgreiche Lösungen umzusetzen.“³

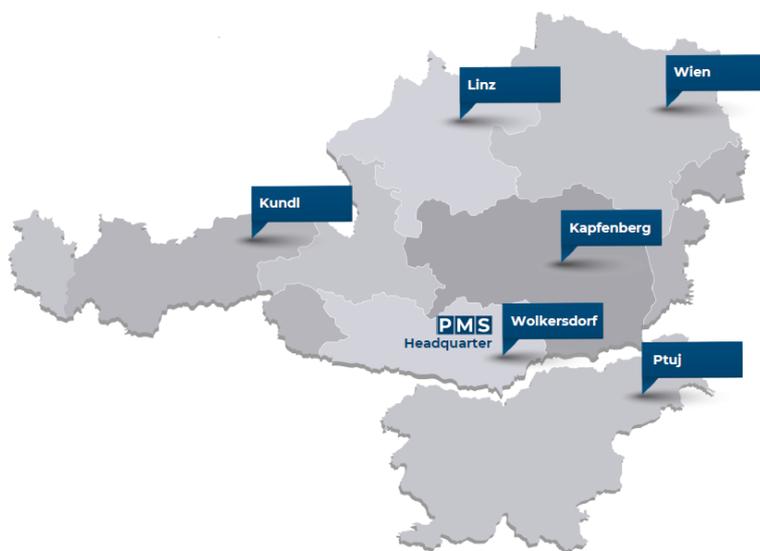


Abb. 2-2: PMS – Fertigung⁴

³ PMS Elektro- und Automationstechnik GmbH (Karriere) (2020), Online-Quelle [13.September.2020]

⁴ PMS Elektro- und Automationstechnik GmbH (2020), Online-Quelle [13.September.2020]

2.2 Geschichte



- 2005** Gründung PMS durch Franz Grünwald und Alfred Krobath gemeinsam mit der Christof Holding AG
- 2006** Kauf der Liegenschaft in Wolkersdorf
Gründung Niederlassung Linz
- 2007** Neubau Bürogebäude
- 2008** Gründung Niederlassung Kapfenberg
- 2013** Gründung Niederlassung Wien
- 2015** Ausbau Fertigung & Lager
- 2017** Gründung Niederlassung Kundl
- 2017** Erwerb des 51% PMS-Gesellschaftsanteils der Christof Holding AG durch Franz Grünwald und Alfred Krobath
- 2019** Neubau „Schaltschrankfertigung der Zukunft“
Gründung PMS valveTec
Start des ersten Studiengangs im PMS Technikum
- 2020** Gründung der PMS Elektrotechnik d.o.o. in Ptuj

Abb. 2-3: PMS – Geschichte⁵

2.3 Kompetenzen

- Engineering / Automation / Projektierung
- Schaltschrankfertigung
- Energietechnik
- Service / Instandhaltung
- Engineering Maschinen- und Anlagenbau
- Industriemontage
- Thermische Validierung / Reinraummessung⁵

⁵ PMS Elektro- und Automationstechnik GmbH (2020), Online-Quelle [13.September.2020]

3 CONDITION MONITORING

Durch den ständigen und fortlaufenden Anstieg der Maschinenauslastung wird die Verfügbarkeit der Anlagen für den Betreiber immer wichtiger. Aufgrund der steigenden Herausforderungen, wie z.B. dem Produktionsdurchsatz und den steigenden Maschinenbeanspruchungen, wird die Erhöhung und längerfristige Sicherstellung der Maschinenverfügbarkeit zu einem immer wichtigeren Ziel.

Um ungeplante Anlagenstillstände, welche enorme Kosten verursachen können, zu vermeiden bzw. zu minimieren, wird die Einführung einer zuverlässigen Zustandsüberwachung in der industriellen Produktion immer wichtiger. Condition Monitoring (Abb. 3-1, S. 5) ist eine sehr gute Methode, um eine proaktive Instandhaltungsstrategie zu unterstützen. Dies ermöglicht sowohl eine Reduktion der Kosten von Produktionsanlagen als auch eine Optimierung von und Fertigungsprozessen.^{6, 7}

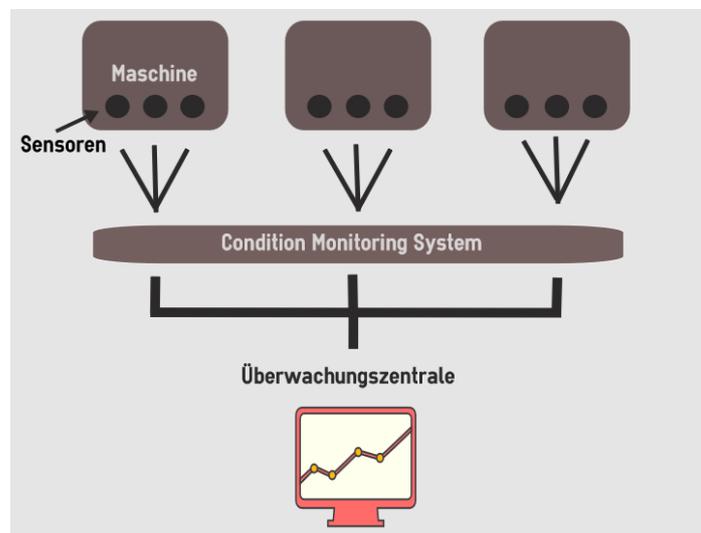


Abb. 3-1: Grafik Prozess Condition Monitoring⁸

3.1 Definition / Beschreibung

Mit Condition Monitoring (Zustandsüberwachung, Abb. 3-2, S. 6) ist die kontinuierliche Überwachung eines Maschinen- oder Anlagenzustandes gemeint. Die Erfassung der Zustände erfolgt mittels Sensoren, welche aussagekräftige Größen (wie z.B. Temperatur, Schwingung, etc.), der zu beobachtenden Komponenten, messen.

Durch das Analysieren dieser Messwerte können bevorstehende Probleme in einer Anlage erkannt werden. Ziel ist es in weiterer Folge mögliche Schäden frühzeitig zu erkennen, um die fehlerhafte Komponente rechtzeitig zu reparieren bzw. austauschen zu können. Somit können Folgeschäden vermindert bzw. auch vermieden werden, welche zu Teil- oder auch Gesamtausfällen einer Maschine / Anlage führen könnten.^{6, 7}

⁶ Vgl. RS Components Handelsgesellschaft m.b.H (2020), Online-Quelle [01.August.2020]

⁷ Vgl. B&R Industrial Automation GmbH (2020), Online-Quelle [01.August.2020]

⁸ Vgl. Frick (2019), Online-Quelle [02.August.2020]

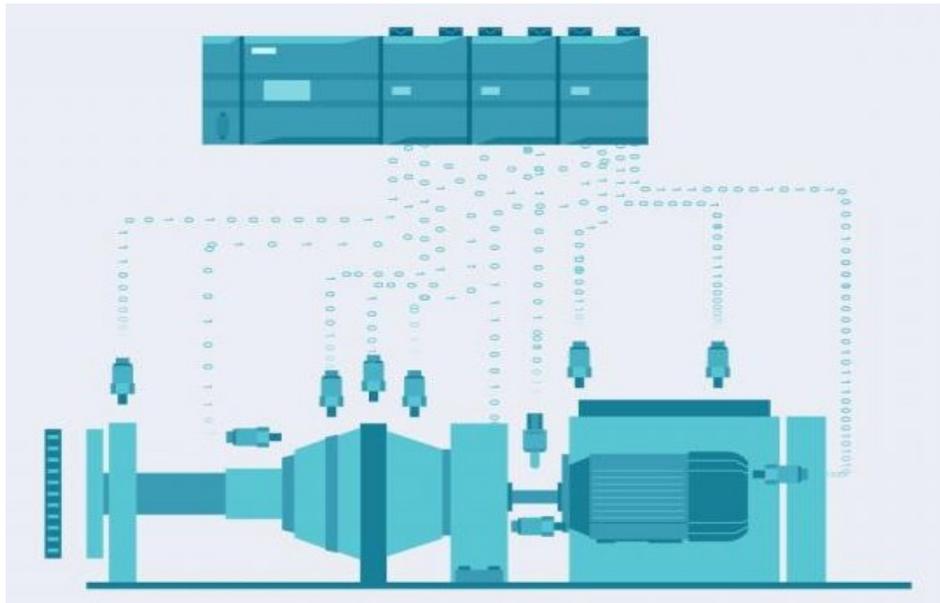


Abb. 3-2: Schema Zustandsüberwachung⁹

Die Hauptaufgabe des Condition Monitoring besteht darin Sensordaten zu erfassen und auszuwerten. Hierbei werden physikalische Größen, wie z.B. Temperatur, Geschwindigkeit, Druck, Füllstände, Schmiermittelzustände, Durchflüsse oder Schwingungen, gemessen und mit den Maschinenparametern korreliert, um den Gesamtzustand der Anlage wiederzugeben. Condition Monitoring hilft im Grunde genommen, den Zustand der Maschine oder Anlage besser zu verstehen und Veränderungen im System oder Abnutzungserscheinungen von Bauteilen schneller und besser zu erkennen. Durch diese Herangehensweise können Maschinenwartungen besser koordiniert bzw. die Maschineneffizienz und Sicherheit erhöht werden.

Zustandsänderungen eines Prozesses oder einer Anlage bzw. Maschine werden von Fehlern verursacht, wobei die Ursachenvielfalt sehr groß sein kann. Sollten diese Fehler nicht behoben oder Gegenmaßnahmen eingeleitet werden, so kann es in kurzer Zeit zu Funktionsproblemen oder zum Defekt der Anlage kommen. Potenzielle Fehlerquellen können durch das Überwachen und Auswerten der Maschinenparameter frühzeitig erkannt werden. Dies bietet die Möglichkeit präventive Gegenmaßnahmen rechtzeitig zu ergreifen. Mögliche Erstmaßnahmen können z.B. das Benachrichtigen des Bedienpersonals über Warnungen oder Fehlermeldungen sein. Des Weiteren sind auch automatische Aktionen zur Schadensbehebung bzw. -vermeidung oder sogar die Abschaltung der Maschine möglich.^{10, 11, 12}

⁹ Vgl. Industry, Real Estate & Construction (2020), Online-Quelle [01.August.2020]

¹⁰ Vgl. B&R Industrial Automation GmbH (2020), Online-Quelle [01.August.2020]

¹¹ Vgl. RS Components Handelsgesellschaft m.b.H (2020), Online-Quelle [01.August.2020]

¹² Vgl. Frick (2019), Online-Quelle [02.August.2020]

3.1.1 Vorteile von Condition Monitoring

Werden die Condition Monitoring Systeme systematisch in gezielten Bereich integriert, so kann dies viele Vorteile mit sich bringen:

- Bauteile und Anlagenkomponenten werden nur dann ausgetauscht bzw. repariert, wenn es wirklich notwendig ist
- Frühzeitige Erkennung potenzieller Fehler während des Betriebes
- Erhöhung der Aussagensicherheit → durch Integrierung von Condition Monitoring Systemen in den Prozess bzw. in die Anlage
- Bessere Koordination von Inspektions- und Serviceintervallen
- Verringerung von ungeplanten Anlagenstillständen → Kostensenkung
- Genaue Fehleridentifikation → Auswertung der Sensordaten (Position des Sensors, Position des fehlerhaften Bereiches)
- Minimierung der Stillstandszeiten → schnelle Identifikation des Fehlers sowie des betroffenen Bereiches, Verringerung der Fehlersuche und Fehleranalyse
- Erhöhung der Sicherheit von Maschinen und Anlagen → aufgrund idealer Wartung, Verringerung von unerwarteten gebrechen der Maschinenteile
- Echtzeiterfassung und Dokumentation des Anlagenzustandes^{13, 14, 15}

3.1.2 Ausfallzyklus

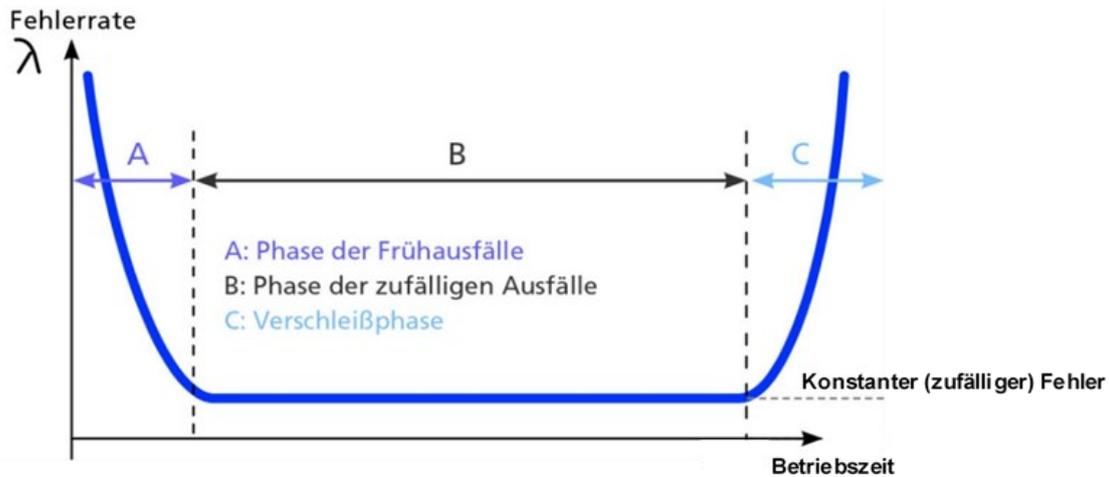
Durch die andauernde Nutzung und Beanspruchung von Anlagenkomponenten ändert sich ihr Betriebsverhalten im Laufe ihrer Einsatzzeit. Diese Änderung führt, abhängig von dem Bauteil, zu einem früheren oder späteren Ausfall des gesamten Systems. Durch frühzeitiges Erkennen der Verhaltensänderung kann proaktiv reagiert werden, bevor die Komponente ihre Funktionalität verliert.

Der Ausfallzyklus von Bauteilen kann grafisch mithilfe der Badewannenkurve (Abb. 3-3, S. 8) dargestellt und beschrieben werden. Sie gibt das Verhalten, in Abhängigkeit von der Zeit, der Bauteile wieder.¹³

¹³ Vgl. B&R Industrial Automation GmbH (2020), Online-Quelle [01.August.2020]

¹⁴ Vgl. Frick (2019), Online-Quelle [02.August.2020]

¹⁵ Vgl. Elektronik Kompendium (2020), Online-Quelle [02.August.2020]

Abb. 3-3: Badewannenkurve¹⁶

Jedes Bauteil macht einen Ausfallszyklus durch, der wie in Abb. 3-3 dargestellt, in 3 Phasen unterteilt werden kann:

a) Phase A → Frühausfälle

Die Phase der Frühausfälle tritt zu Beginn mit einer hohen Ausfallrate auf, welche jedoch bei längerer Betriebszeit wieder abnimmt. Diese Art von Ausfällen tritt kurz nach einer Inbetriebnahme von Anlagen oder Maschinen auf und ist auf z.B. Montage- oder Konstruktionsfehler zurückzuführen. Dem kann durch präzises Arbeiten und dem Einsatz hoch qualitativer Materialien entgegengewirkt werden. Während der Einlaufphase einer Anlage werden die unterschiedlichen Probleme, die auftreten können, behoben und fixiert, was in weiterer Konsequenz zu einem Sinken der Ausfallrate führt.

b) Phase B → zufällige Ausfälle

Die Ausfallrate ist in dieser Phase der Betriebszeit nahezu konstant. Nach den ersten Fehlerbehebungen und Lösen der Anlaufprobleme, treten in dieser Phase nur noch zufällige Ausfälle während des laufenden Betriebes auf. Diese zufälligen Ausfälle sind schwer zu analysieren und zu erfassen, da ihr Auftreten nicht vorhersehbar ist bzw. sie aus unerwarteten Ereignissen entstehen können. Diese Ausfälle können allerdings auch durch Bedienungs- oder Wartungsfehler auftreten.

c) Phase C → Verschleißphase

Die Ausfälle in der Verschleißphase sind das Resultat einer langen Betriebszeit, Verschleiß und / oder Materialermüdung. In dieser Phase der Betriebszeit treten auch Schäden auf, die langsam vorangeschritten sind und nicht bemerkt wurden. Dies führt zu einem erneuten Anstieg der Ausfallrate und kann durch Reparaturen und Erneuerungen der Komponenten reduziert werden.¹⁷

¹⁶ Vgl. PULS GmbH (2016), Online-Quelle [02.August.2020]

¹⁷ Vgl. B&R Industrial Automation GmbH (2020), Online-Quelle [01.August.2020]

Zustandsaufzeichnungen durch Condition Monitoring Systeme geben wertvolle Informationen über die Wahrscheinlichkeit von Ausfällen wieder. Aufzeichnungen der überwachten Parameter weisen ähnliches Verhalten wie die Badewannenkurve auf, da ein Anstieg bzw. Abfall der Messwerte Veränderungen an der Anlage bzw. in der Maschine andeuten.

In Kombination mit der Automatisierung können die so gewonnenen Daten mit den Betriebsparametern abgeglichen werden. Durch das Auswerten beider Datensätze können optimale Zeitpunkte für einen Austausch oder eine Reparatur einer Komponente gefunden werden. Sollte sich z.B. das Schwingungsverhalten eines Bauteiles verändern, d.h. ein Anstieg der Schwingung (Amplitude), so zeigt diese Veränderung eine Erhöhung des Verschleißes oder das Vorhandensein eines Schadens an. Durch die Datenauswertung kann somit frühzeitig in das System eingegriffen und größerer Schaden verhindert werden.¹⁸

3.1.3 Schadensentwicklung und Schadenskette

Ein Schaden entsteht oft nicht schlagartig, sondern kann sich über einen längeren Zeitraum entwickeln. Durch das langsame Voranschreiten eines Schadens, bleibt dieser oft bis zum Schluss unbemerkt. Wird dieser jedoch bereits ohne Messgeräte wahrgenommen, kann es bereits oft zu spontanen Ausfällen kommen.

Die Schadenskette zeigt die einzelnen Stationen auf, die eine Maschinenkomponente während der Schadensentwicklung durchläuft. Durch Condition Monitoring können diese einzelnen Zustände erfasst und ausgewertet werden. Somit wird das CM zu einem wichtigen System für die Instandhaltung.

Die Schadenskette wird in der Abb. 3-4 (S. 9) anhand eines Lager-Beispiels illustriert:

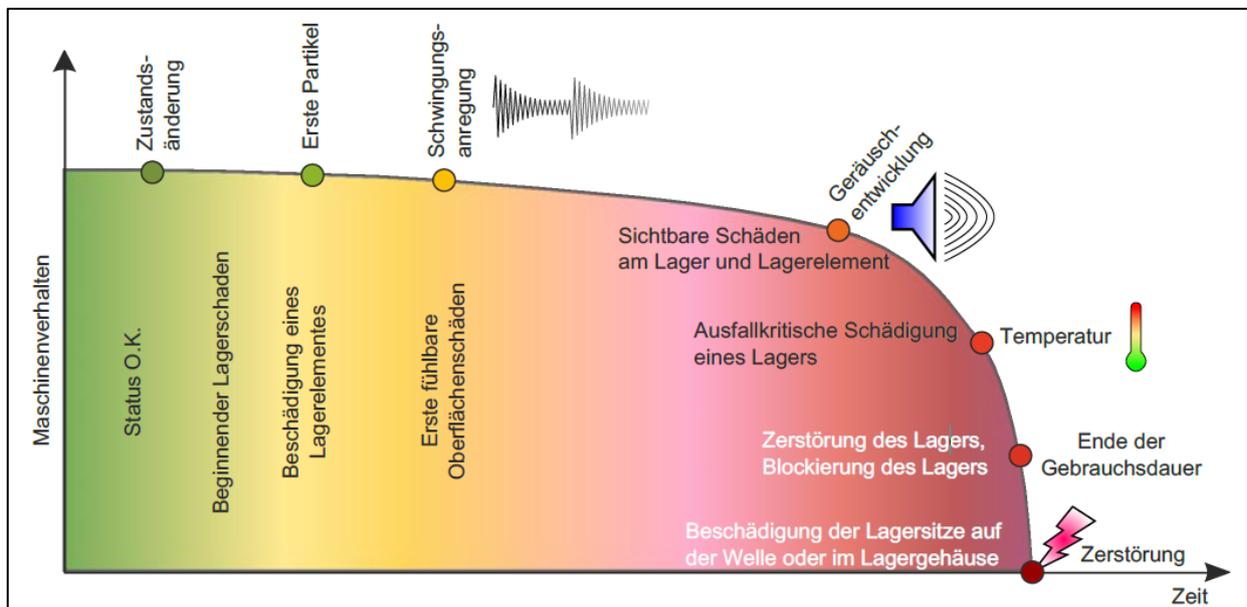


Abb. 3-4: Schadenskette Lagerschaden¹⁸

¹⁸ Vgl. B&R Industrial Automation GmbH (2020), Online-Quelle [01.August.2020]

Die Schadenskette zeigt die einzelnen Stationen, die eine Maschinenkomponente während der Schadensentwicklung durchläuft, auf. Durch Condition Monitoring können diese einzelnen Zustände erfasst und ausgewertet werden. Somit wird das CM zu einem wichtigen System für die Instandhaltung.

Die beim CM erfassten Parameter spiegeln den Zustand der Anlage oder der Bauteile wider. Durch das kontinuierliche Beobachten und Auswerten der Messergebnisse können Trends über das Bauteilverhalten erstellt werden. Aufgrund dieser Trendaufzeichnungen können im Zuge der Instandhaltung wichtige und gezielte Maßnahmen gesetzt werden.

Unter folgenden Bedingungen ist Condition Monitoring eine angemessene Option:

- Die messbaren Parameter, die mit einem Fehler korrelieren, sind identifiziert und selektiert.
- Der Fehler kann nicht durch eine Neugestaltung oder eine geänderte Gebrauchsweise verhindert werden.
- Die Ereignisse zeigen das Auftreten von Fehlern auf.
- Eine ausreichende Vorwarnzeit muss vor einem Funktionsversagen vorhanden sein.¹⁹

3.1.4 Betriebsweise der Instandhaltung

Folgende Varianten für die Betriebsweise der Instandhaltung können unterschieden werden (Tab. 3-1, S. 10):

- Reaktive Instandhaltung (Ausfall orientierte Instandhaltung) → Komponenten werden erst dann getauscht, wenn sie ihre Funktionalität verlieren
- Präventive Instandhaltung (geplante Betriebsweise) → Komponenten werden zu einem bestimmten Zeitpunkt getauscht (unabhängig vom Zustand)
- Zustandsorientierte Instandhaltung → Eingrenzung der geplanten Instandhaltung und Reduzierung des Ausfallrisikos (abhängig vom Zustand)¹⁹

Betriebsweise	Vorteile	Nachteile
reaktive Instandhaltung	<ul style="list-style-type: none"> • Ausnutzung der Abnutzungsreserve • Während der Gebrauchsdauer keine Kosten 	<ul style="list-style-type: none"> • Unerwarteter Ausfall • Folgeschäden • hohe Stillstandskosten • Geringe Betriebssicherheit
Präventive Instandhaltung	<ul style="list-style-type: none"> • Gut planbar 	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Ausnutzung der Abnutzungsreserve • Erhöhtes Ausfallrisiko nach der Wartung • Fixkosten
Zustandsorientierte Instandhaltung	<ul style="list-style-type: none"> • Früherkennung von Problemen • Planbarer Stillstand • Ausnutzung der Abnutzungsreserve • Hohe Betriebssicherheit • Vermeidung von Folgeschäden 	<ul style="list-style-type: none"> • Beschäftigung mit der Thematik • Investitionskosten • Zusätzliche Kosten für Ausrüstungsmaterial zur Zustandserfassung

Tab. 3-1: Betriebsweisen Instandhaltung - Vorteile und Nachteile¹⁹

¹⁹ Vgl. B&R Industrial Automation GmbH (2020), Online-Quelle [01.August.2020]

3.2 Condition Monitoring Systeme bzw. Methoden

Üblicherweise werden die Mess- und Prozessdaten, die klassisch für eine Anlage oder eine Maschine vorhanden sind, nicht für das Condition Monitoring herangezogen, da die Einbindung dieser Prozessgrößen oft nur mit großem Aufwand möglich.

Die Ausführung von CM-Systemen erfolgt als sogenannte „Insellösung“. D.h., dass die Sensorik- und Messsysteme als eigenständiger Teil mit eigener Hard- und Software realisiert werden.

Condition Monitoring kann sehr vielseitig eingesetzt werden. Für die unterschiedlichsten Anwendungsfälle gibt es separate Methoden (Tab. 3-2, S. 11), die für einen konkreten Betrieb verwendet werden können.

Die Auswahl der Methode ist anwendungs- und situationsabhängig, denn nicht jedes System ist geeignet, um für die Beobachtung einer Komponente sinnvolle Daten zu liefern.²⁰

Methode	Kurzbeschreibung der Funktionsweise	Verfügbare Signale/Schnittstellen
Zustandsermittlung von Kühl- und Schmiermitteln, optische Beurteilung, Filterung, Ferrographie, Magnetdetektion, Spektroskopie, radioaktive Spurenanalyse	Quantitative Untersuchung der Verschleißprodukte (Filterung, Magnetfänge, Ferrografie, Ölspektralanalyse, Teilchenzählung), die aus Schmieröl oder Kühlflüssigkeit gewonnen werden Regelmäßige Entnahme von Proben nach definiertem Zeitplan oder betriebsstundenabhängig Quantitativer Vergleich der Proben	Durch geeignete Messsysteme können diese Condition Monitoring Methoden durch AI-, DI-Eingänge oder Bus Controllermodule im System verarbeitet werden.
Thermische Diagnostik Temperatursensorik, Thermometrie, Infrarotmesstechnik	Erfassung von Temperaturen durch Sensoren mit unterschiedlichen physikalischen Wirkungsweisen Erfassung der Temperaturverteilung durch Erfassung der Infrarotstrahlung	
Schallemissionsanalyse Luftschallmessung, Impulsanalyse, Impulsdichteschwankungsanalyse, Schalldruckmessung, Schallemissionsortung	Luftschallmessung von Infraschall bis Ultraschall mittels Mikrofon Mehrdimensionaler Mikrofonaufbau zur Emissionsquellenortung Erkennung von Mikroschädigungen (Risse) etc. durch die Messung akustischer Emissionen von transienten Wellen mit hohen Frequenzen	
Vibrationsmessung Körperschallmessung, FFT Analysen, Ordnungsanalysen, Modalanalysen	Vibroakustische Diagnostik Messung des Körperschalls an Lagerstellen oder Struktur mit Beschleunigungsaufnehmern, Analyse und Auswertung	
Elektrische Parameter, Motorstromanalyse, Isolations-Widerstandsmessung	Erfassung elektrotechnischer Parameter und Auswertung in Hinsicht Condition Monitoring	
		Diese Condition Monitoring Methoden können durch AI-, DI- Eingänge, Bus Controllermodule oder durch Antriebssysteme (unterschiedliche Funktionen von System zu System) im System verarbeitet werden.

Tab. 3-2: Übersicht Condition Monitoring Methoden²⁰

²⁰ Vgl. B&R Industrial Automation GmbH (2020), Online-Quelle [01.August.2020]

Die Grundlage der Zustandsüberwachung bilden Messungen, welche nicht in das Gerät eingreifen oder die Funktion beeinträchtigen. Diese Messungen erfolgen zerstörungsfrei und kontinuierlich oder in Intervallen durch Sensoren mit Hilfe von Wandlern und verschiedenen Zustandsüberwachungswerkzeugen.²¹

Folgende Parameter (Abb. 3-5, S. 12) werden am häufigsten gemessen:

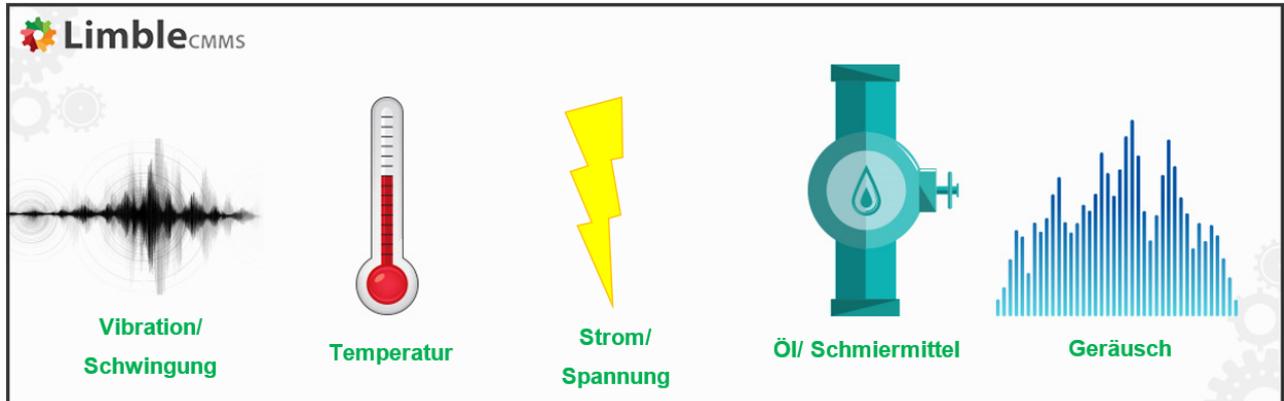


Abb. 3-5: Häufig beim CM gemessene Parameter²¹

3.2.1 Schwingungsanalyse

Maschinen und Anlagen erzeugen neben ihrer produktiven Leistung auch unerwünschte Schwingungen. Durch das Einbinden eines CM-Systems können diese unerwünschten Schwingungen überwacht werden. Die dabei zum Einsatz kommende Schwingungsmesstechnik bietet die Möglichkeit Daten bezüglich mechanischer Schwingungen zu erfassen, diese aufzuzeichnen und anschließend auszuwerten. Für das Erfassen dieser Vibrationen bzw. Bewegungsänderungen (Beschleunigung) werden Schwingungssensoren (Beschleunigungssensoren) eingesetzt.²²

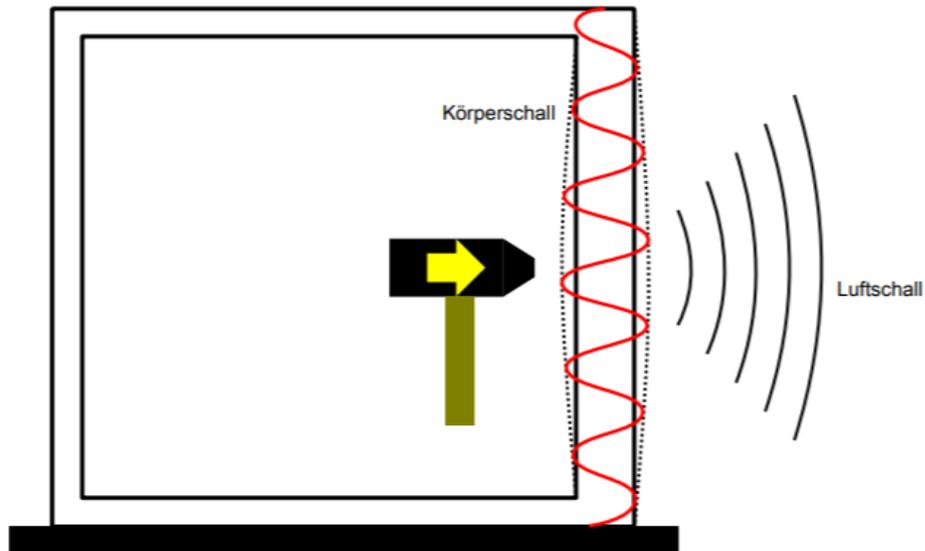
3.2.1.1 Schwingungssensoren

Das Funktionsprinzip von Schwingungssensoren besteht darin, mechanische Schwingungen in ein elektrisches Signal umzuwandeln. Diese Sensoren werden an der zu überwachenden Maschine oder Komponente angebracht, um dort die gewünschte Messung durchzuführen.

Meist wird hierbei der Körperschall, jener Schall, der sich in einem Festkörper ausbreitet (Abb. 3-6 , S. 13), gemessen. Aus dieser Bewegungsänderung kann durch Integration die Schwinggeschwindigkeit berechnet werden. Durch weitere Integration dieser Geschwindigkeit wird der Schwingweg ermittelt.

²¹ Vgl. Christiansen (2020), Online-Quelle [12.August.2020]

²² Vgl. B&R Industrial Automation GmbH (2017), Online-Quelle [12.August.2020]

Abb. 3-6: Prinzip Körperschall²³

Der Körperschall wird dadurch erzeugt, dass durch einen Aufprall auf ein feststehendes Medium, dieses zum Schwingen gebracht wird. Dies geschieht in Abhängigkeit von Form und Struktur, wovon auch die Schwingungsfrequenz beeinflusst wird. Die dabei zum Teil frei werdende Körperschallenergie regt die umgebende Atmosphäre ebenfalls zu einer Schwingung an, die sich dann in Form von Luftschall ausbreitet.

Das Condition Monitoring misst den sich ausbreitenden Körperschall mittels piezoelektrischer Sensoren. Hierbei wird der piezoelektrische Effekt von Quarzen oder bestimmten Keramiken genutzt. Diese Messung basiert auf dem zweiten Newtonschen Gesetz der klassischen Mechanik, welches besagt, dass eine Kraft proportional zur Beschleunigung der Masse ist.

Das Funktionsprinzip eines piezoelektrischen Sensors ist, dass durch Einwirken von Druck oder Kraft es zu einer Polarisierung (Abb. 3-7, S. 14) des Materials kommt. Durch die Verschiebung der Ladungsschwerpunkte entsteht eine messbare Spannung, welche entsprechend proportional zur einwirkenden Kraft ist. Wie zuvor bereits erwähnt, ist die Kraft proportional zur Beschleunigung. Die erzeugte Ladung kann über einen sogenannten Ladungsverstärker in ein einfach zu messendes Signal (z.B. 0-10 V) gewandelt werden. Dieses Signal ist wiederum proportional zur einwirkenden Kraft.^{23, 24}

²³ Vgl. B&R Industrial Automation GmbH (2017), Online-Quelle [12.August.2020]

²⁴ Vgl. B&R Industrial Automation GmbH (2020), Online-Quelle [01.August.2020]

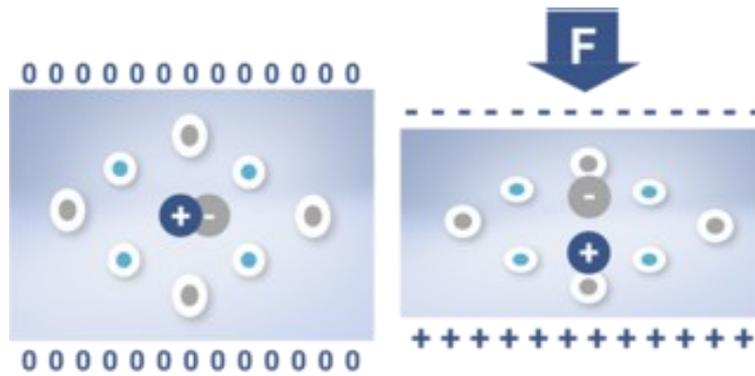


Abb. 3-7: Piezoelektrisches Prinzip²⁵

Beim Einbau eines Beschleunigungssensors wird der piezoelektrische Kristall zwischen einer seismischen Masse und der Basis eingeklemmt. Bei der Veränderung der auftretenden Beschleunigung ändert sich auch die Kraft, die auf den Kristall wirkt. Eine Verringerung bzw. Erhöhung der Kraft bewirkt eine Signaländerung des Sensors.²⁶

3.2.1.2 Schwingungen

Eine häufige in der Natur auftretende Bewegungsform ist die Schwingung. Die Bewegungsform unterteilt sich in mehrere Grundtypen, wobei die harmonische Schwingung, neben der gleichförmigen und gleichmäßig beschleunigten Bewegung, der dritte Typ ist. (Der Verlauf einer harmonischen Schwingung kann durch die Sinusfunktion beschrieben werden.²⁷) Eine zyklische bzw. periodische Bewegung eines Körpers um seine Gleichgewichts- oder Ruhelage wird als Schwingung bzw. Vibration bezeichnet (Abb. 3-8, S. 14).²⁶

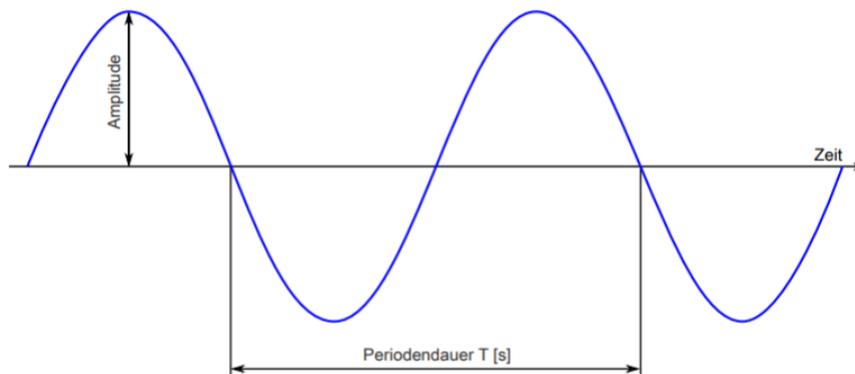


Abb. 3-8: Grundlegende Schwingung²⁶

Schwingungsparameter, insbesondere die Amplitude, Periodendauer und die Frequenz, sind für das Condition Monitoring für die Auswertung von Relevanz.²⁸

²⁵ Vgl. Kleckers (2020), Online-Quelle [08.August.2020]

²⁶ Vgl. B&R Industrial Automation GmbH (2020), Online-Quelle [01.August.2020]

²⁷ Vgl. Joachim Herz Stiftung (2020), Online-Quelle [12.August.2020]

²⁸ Vgl. B&R Industrial Automation GmbH (2017), Online-Quelle [12.August.2020]

3.2.1.3 Ursache und Wirkung

Zahlreiche Ursachen, welche sich teilweise auch überschneiden, können zu Schwingungen in einer Maschine bzw. Anlage führen. Die Amplitudengröße der Schwingung wird durch mehrere Aspekte beeinflusst, wie z.B. durch die Dämpfung der Gelenke oder des Schmierfettes, die Steifigkeit des Bauteiles, des Gehäuses, und des Fundamentes, etc.

3.2.1.3.1 Unwucht

Die Unwucht entsteht in einem rotierenden System und resultiert aus nicht ausgeglichenen Fliehkräften. Die dadurch entstehenden Kräfte und Schwingungsbewegungen wirken sich ebenfalls direkt auf z.B. die Lagerung des Systems aus.

Durch die Unwucht eines rotierenden Körpers werden nicht nur Kräfte auf das Lager übertragen, sondern auch auf das Fundament. Die dabei entstehenden Vibrationen erzeugen harmonische Schwingungen in der Maschine. Daher entspricht die Erregerfrequenz des Motors der Drehfrequenz des unwuchten Rotors.²⁹

Zwischen zwei Typen von Unwucht wird unterschieden:

Statische Unwucht (Abb. 3-9, S. 16)

Verläuft die Drehachse nicht durch den Schwerpunkt des Rotationskörpers, dann bildet sich eine statische Unwucht, welche auch als ein Sonderfall der dynamischen Unwucht bezeichnet wird. Sie entsteht unter der Bedingung, dass die Unwucht in der Ebene, welche mit der Radialebene des Schwerpunktes übereinstimmt, liegt. Die statische Unwucht erzeugt bei der Drehung kreisförmige mechanische Schwingungen rechtwinklig zur Drehachse.

Dynamische Unwucht (Abb. 3-9, S. 16)

Sobald die Rotationsachse und die Hauptträgheitsachse des Bauteils nicht übereinstimmen, entsteht dadurch die dynamische Unwucht (Momenten Unwucht). Somit kippt die Rotationsachse im Schwerpunkt.

Die Entstehung dieser Unwucht geschieht allerdings erst im Betrieb. Sie macht sich über ein Biegemoment (Unwucht Moment) auf der Rotationsachse bemerkbar. Die dynamische Unwucht erzeugt an den Enden der Achse um 180 Grad verschobene kreisförmige Schwingungen. Die Ruhelage des Schwerpunktes im rotierenden Körper bleibt unverändert, wobei hingegen die Achse, aufgrund der entgegengesetzten Kreisbewegung, zu taumeln beginnt.³⁰

²⁹ Vgl. B&R Industrial Automation GmbH (2017), Online-Quelle [12.August.2020]

³⁰ Vgl. Dorfmeister GmbH & Co.KG (2017), Online-Quelle [13.August.2020]

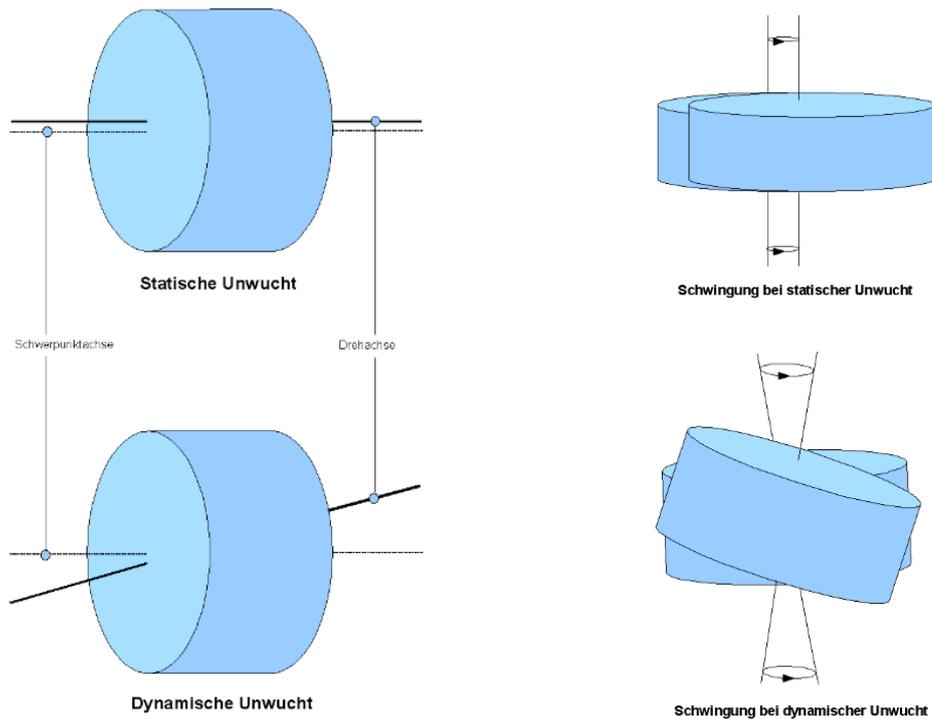


Abb. 3-9: Statische und dynamische Unwucht³¹

3.2.1.3.2 Ausrichtefehler

Der Ausrichtefehler entsteht durch den Versatz (axial, Winkel) zwischen Maschinenwellen. Diese fehlerhafte Ausrichtung kann zu einem gewissen Teil über die Bauform der Kupplung kompensiert werden. Wird diese Kompensationsfähigkeit jedoch überschritten, entstehen weitere Belastungen für die verwendeten Komponenten.

Folgende Belastungen können somit auftreten:

- Erhöhung der statischen und dynamischen Lagerkräfte
- Erhöhung der Wellenbiege- und Torsionsmomente
- Erhöhung der Axialkräfte

Durch diese Belastungen kommt es zu erhöhten Temperaturen an den Lagern und Kupplungselementen. Zusätzlich werden durch die Wellenverformung und durch die Ausgleichsbewegungen in der Kupplung Schwingungen erzeugt. Diese harmonischen Schwingungen sind wiederum an die Drehfrequenz der fehlausgerichteten Welle und vom Vielfachen dieser Frequenz gebunden.

³¹ Vgl. Dorfmeister GmbH & Co.KG (2017), Online-Quelle [13.August.2020]

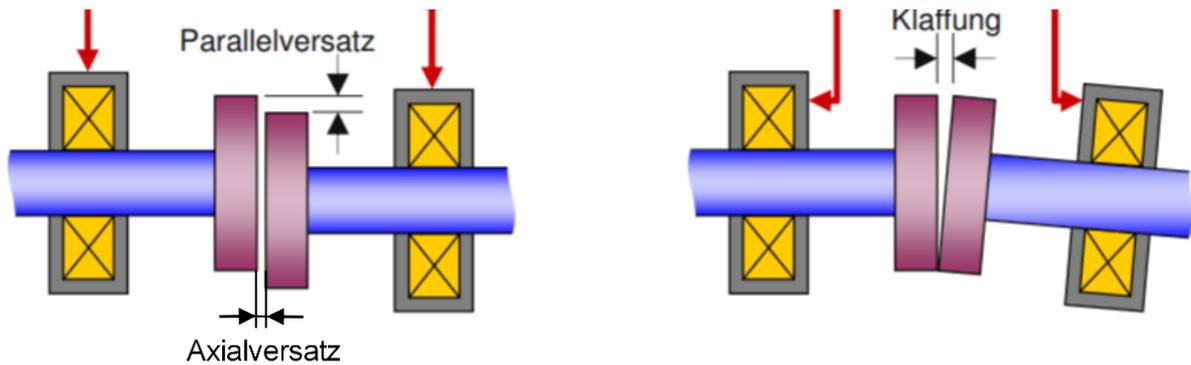


Abb. 3-10: Ausrichtfehler (Welle)³²

Der Ausrichtfehler kann durch folgende drei Versätze beschrieben werden (Abb. 3-10, S. 17):

- Axialversatz
- Radial- bzw. Parallelversatz
- Winkelversatz (Klaffung)

Ein gewisser Versatz, welcher vom Kupplungshersteller angegeben wird, ist zulässig. Größere Abweichungen können durch das „Ausrichten“ korrigiert werden.

Ausrichtfehler können an Hand von sinusförmigen Schwingungen, die von der Drehfrequenz abhängig sind, in der Schwingungsdiagnose erkannt werden.³³

3.2.1.3.3 Stöße (Stoßimpuls)

Stöße, welche durch Fremdkörper, bestimmte Verzahnungsfehler oder lose und anschlagende Teile verursacht werden, wirken zwischen sich bewegenden (drehenden) und ruhenden Maschinenkomponenten. Stöße treten nicht nur einmal auf, sondern wiederholen sich periodisch, je nach Ursache, einmal oder mehrmals z.B. pro Umdrehung einer Welle oder eines Hubvorganges. Die Wiederholfrequenz ist hierbei von der Häufigkeit der Hubvorgänge oder der Drehfrequenz der Welle abhängig. Das Auftreten von Stößen im System führt auch zu Schwingungen bzw. Vibrationen an der Maschine und Anlage.^{33, 34}

3.2.1.3.4 Wälzlagerschäden

Durch Veränderungen an den Oberflächen durch sog. Pittings (Abb. 3-11, S. 18) entstehen die meisten Lagerschäden. Pitting ist eine Ermüdungserscheinung des Materials welche über wechselnde Beanspruchungen über eine lange Zeit entsteht.

³² Vgl. Geibel (2010), Online-Quelle [19.August.2020]

³³ Vgl. GfM Gesellschaft für Maschinendiagnose mbH, Online-Quelle [24.August.2020]

³⁴ Vgl. B&R Industrial Automation GmbH (2020), Online-Quelle [01.August.2020]



Abb. 3-11: Wälzlagerschäden (Pitting)³⁵

Die Schadstellen am Innenring, Außenring, Käfig oder Wälzkörper verursachen beim Überrollen Impulsstöße. Durch diese Stöße werden wiederum die Lagerteile und die Komponenten, die mit dem Lager verbunden sind, zum Schwingen gebracht.

Durch das Aufzeichnen dieser Schwingungen kann der Verlauf der Stoßfolge ermittelt werden. Die Auswertung dieser Messwerte gibt Informationen zum Lagerzustand wieder. Die zulässigen Frequenzen, die durch einen Schaden auftreten können, werden pro Lagerkomponente vom Hersteller angegeben.³⁶

3.2.1.3.5 Magnetische Induktion

Durch das rotierende Magnetfeld im Motor werden Wechselkräfte im Stator erzeugt. Diese Wechselkräfte können zu schwer feststellbaren Vibrationen im Motor führen. Aufgrund von elektrischen und magnetischen Eigenschaften können auch Umrichter zu einer Einstreuung von Schwingungen führen.³⁶

3.2.1.3.6 Auswirkungen

Mechanische Schwingungen werden durch bewegende Komponenten einer Maschine und Anlage erzeugt. Diese Schwingungen bzw. Vibrationen haben unter anderem Auswirkungen auf die Maschine selbst aber auch auf die nähere Umgebung. Sie wirkt sich über alle Verbindungen zu weiteren Gerätschaften aus, da diese meist mechanisch miteinander verbunden sind. Aufgrund der Wirkung des Körperschalls und der Stärke der Vibrationen können sich diese auch auf den Aufstellort und auf die Maschinen in der näheren Umgebung übertragen. Zusätzlich entsteht dadurch auch eine erhöhte Geräuschentwicklung.

Die Vibrationen führen somit auch zu Fehlfunktionen an der Maschine und den Mess- und Regelsystemen. Diese können aufgrund der Erschütterungen Fehlmessungen liefern und dadurch zu einer Verschlechterung der Produktqualität führen.

Mechanische Schwingungen führen in weiterer Folge auch zu Belastungen der Maschine und ihrer Bauteile. Diese Belastungen erhöhen den Verschleiß und können bis zu einer plastischen Verformung führen. Durch diese Beanspruchungen kann es somit zu Rissbildungen bis hin zu Brüchen kommen.³⁶

³⁵ Vgl. NSK Motion & Control (2009), Online-Quelle [24.August.2020]

³⁶ Vgl. B&R Industrial Automation GmbH (2020), Online-Quelle [01.August.2020]

3.2.2 Schmiermittel- / Ölanalyse

Durch die Schmiermittel- bzw. Ölanalyse können Maschinenschäden wirkungsvoll erkannt werden. Der Schmierstoff fungiert hierbei nicht nur als Substanz zur Verringerung der Reibung zwischen den beweglichen Komponenten, sondern dient auch als Informationsträger. Analysen zur Evaluierung der Zusammensetzung des Schmiermittels liefern detaillierte Daten, die Rückschlüsse auf den Zustand der Anlagenkomponenten liefern. Durch das Abnützen, Überhitzen oder Versagen einer Maschine lagern sich Verunreinigungen im Schmieröl ab. Diese Kontaminationen im Schmierstoff können durch unterschiedliche Verfahren erkannt, analysiert und schlussendlich ausgewertet werden.^{37, 38, 39}

3.2.2.1 Verschleißmechanismen

Verschleißvorgänge zwischen zwei Oberflächen, welche mit einem Schmiermittel bedeckt sind, führen zur Kontamination des Schmierstoffes. Diese Verunreinigungen stellen nicht nur ein Gefahrenpotential für die Maschinenkomponenten dar, sondern verkürzen auch die Lebensdauer des Schmiermittels. Das Mitführen von Partikeln kann zu Problemen und Beschädigungen in den Anlagen führen, da die geschmierten Oberflächen einen sehr geringen Abstand zu einander haben.³⁷

Die unterschiedlichen Verschleißmechanismen (Abb. 3-12, S. 19) haben unter anderem Auswirkungen auf das Schmiermittel (partikuläre Verschmutzung) bzw. können auch durch den Schmierstoff (flüssige Verschmutzung), aufgrund von Kontamination, herbeigerufen werden.

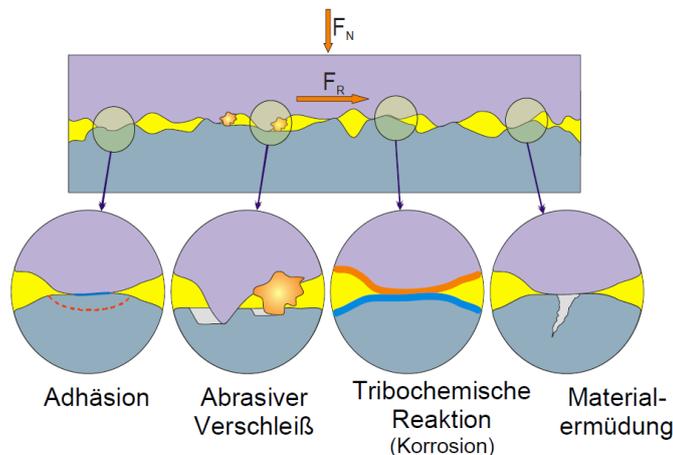


Abb. 3-12: Verschleißmechanismen³⁷

- **Adhäsion**

Ein lokales Durchdringen des Schmierfilms verursacht eine punktuelle Berührung der Oberflächen (Kaltverschweißung). Durch den Kontakt beider Flächen werden mikroskopische Partikel aus der Oberfläche gerissen. Dieses Ereignis verursacht die sog. Pitting- und Grübchenbildung.

³⁷ Vgl. TBE Anlagendiagnostik GmbH (2017), Online-Quelle [25.August.2020]

³⁸ Vgl. Christiansen (2019), Online-Quelle [25.August.2020]

³⁹ Vgl. Philips (2020), Online-Quelle [25.August.2020]

- **Abrasiver Verschleiß (Abrieb)**

Ein abrasiver Verschleiß entsteht durch eine harte und raue Oberfläche oder durch harte Partikel zwischen den Oberflächen der bewegenden Komponenten. Der Abrieb erzeugt somit Kratzer und Furchen auf der Gegenlaufläche und beschädigt somit die Oberfläche.

- **Tribochemische Reaktion (Korrosion)**

Die Korrosion entsteht auf den Oberflächen durch eine chemische Reaktion mit dem Schmiermittel. Diese Reaktion verändert somit die Flächen der Komponenten durch Materialersetzung und durch die damit verbundene Veränderung der Materialeigenschaften. Durch z.B. einen zu hohen Wassergehalt im Schmierstoff kann eine derartige chemische Reaktion zustande kommen.

- **Materialermüdung**

Die lokale Materialermüdung ergibt sich aus einer dynamischen Langzeitbelastung in einem gewissen Bereich der Fläche. Auf Dauer bewirkt diese wechselnde Belastung eine Änderung der Gitterstruktur im Material. Resultierend aus dieser Veränderung kommt es somit zu Ermüdungsrissen bis hin zu Brüchen.⁴⁰

3.2.2.2 Verschleißmessung

Die Verschleißmessung analysiert den Schmierstoff im System und kann die darin enthaltenen Verunreinigungen, die durch Verschleiß- und Korrosionsprozesse entstanden sind, beurteilen. Die Ergebnisse erlauben Rückschlüsse auf die Beschaffenheit bestimmter Reibstellen. Ein plötzlicher Anstieg der Verunreinigungen bzw. eine plötzliche Änderung der Messdaten deutet auf einen bevorstehenden Schaden hin. Je nach Anlage und Maschine variieren die Grenzwerte (Abb. 3-13, S. 20) der analysierten Daten für einen möglichen Schadensfall.⁴¹

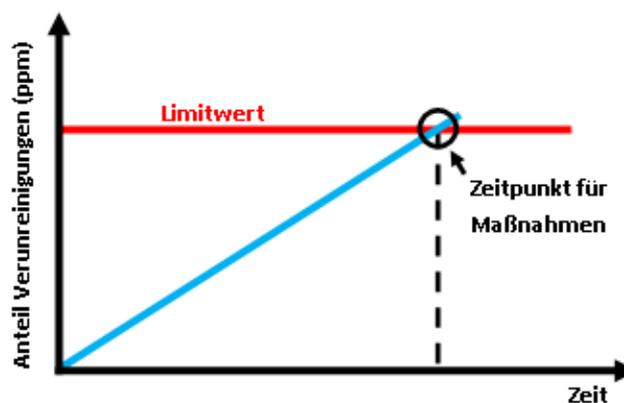


Abb. 3-13: Änderung von Zustand und Eigenschaft des Öls⁴¹

⁴⁰ Vgl. TBE Anlagendiagnostik GmbH (2017), Online-Quelle [25.August.2020]

⁴¹ Vgl. Bartz (2006), Online-Quelle [26.August.2020]

Die Analyse des Schmierstoffes kann durch mehrere Verfahren (Tab. 3-3, S. 21) erfolgen.

Verfahren	Aussage
Elementanalyse (AES)	Verschleißelemente <5µm chemischer und mechanischer Verschleiß
PQ-Index (PQ)	Magnetisierbare Partikel Mechanischer Verschleiß
Optische Partikelanalyse (OPA)	Partikelzahl und -form, Reinheitsklasse NAS/ISO Verschleißmechanismus
Analytische Ferrographie (AFG)	Partikelzahl, -form, farbe Verunreinigungen, Verschleißmechanismus

Tab. 3-3: Verfahren zur Schmierstoffanalyse⁴²

3.2.2.2.1 Atomemissionsspektroskopie (AES)

Die Atomemissionsspektroskopie (= optische Emissionsspektroskopie, OES) bietet die Möglichkeit zur Bestimmung verschiedener Elemente in festen, flüssigen und gasförmigen Proben. Die Proben werden mittels einer Anregungsquelle (z.B. Flammen, Bogen, Funken, Laser, Röntgen oder induktiv gekoppeltem Plasma (ICP)) in den Plasmazustand überführt und atomisiert. Die so thermisch angeregten Atome der verschiedenen Elemente geben bei der Relaxation Energie in Form von Strahlung mit einem charakteristischen Wellenlängenspektrum ab. Das so emittierte Licht wird in weiterer Folge mittels Monochromators (Prisma und einer Blende) spektral zerlegt und auf einer Photoplatte bzw. photoelektrisch registriert.

Auf Grund der charakteristischen Emissionsspektren (Lage der Linien) ist es möglich eine selektive Probenanalyse durchzuführen. Die Konzentration der unterschiedlichen Elemente in der Probe lassen sich somit über die Lichtintensität ermitteln.⁴³

Messprinzip

Zwei Varianten der AES werden zurzeit am häufigsten durchgeführt:

- Rotrode-Verfahren (RDE, Rotating Disc Electrode)
Ein „Funkenrädchen“ wird bei 40.000 Volt gezündet und erzeugt einen Lichtbogen. Dieser Lichtbogen erhitzt die am Funkenrädchen anhaftenden Bestandteile einer 3 ml Ölprobe bis auf 8.000°C.
- ICP-Verfahren
In diesem Verfahren werden die Bestandteile der Probe mit einem Lösungsmittel versetzt. Anschließend wird diese Mischung zerstäubt und als Nebel einer Argon-Plasma-Flamme zugeführt. Die Flamme verbrennt diese Probe bei einer Temperatur von ca. 10.000°C.

⁴² Bartz (2006), Online-Quelle [26.August.2020]

⁴³ Vgl. Joosten (2018), Online-Quelle [27.August.2020]

Beide Verfahren verwenden zwar unterschiedliche Anregungsquellen (z.B. die Plasma-Fackel), beruhen jedoch auf dem gleichen Messprinzip bzw. nutzen die gleiche Optik. Durch die extrem hohen Temperaturen werden die Atome der Elemente bzw. Metalle angeregt, wodurch diese in weiterer Folge Licht mit einem charakteristischen Wellenlängenspektrum emittieren, wie in Abb. 3-15 (S. 23) dargestellt ist. Ein Prisma oder Kristallgitter zerlegt das hierbei erzeugte Licht in seine jeweiligen Spektralfarben. Durch die kreisförmige Anordnung von Photozellen (Abb. 3-14, S. 22) wird ermöglicht, dass durch einen Austrittsschlitz nur die Spektralfarbe des zugehörigen Elementes erfasst wird.

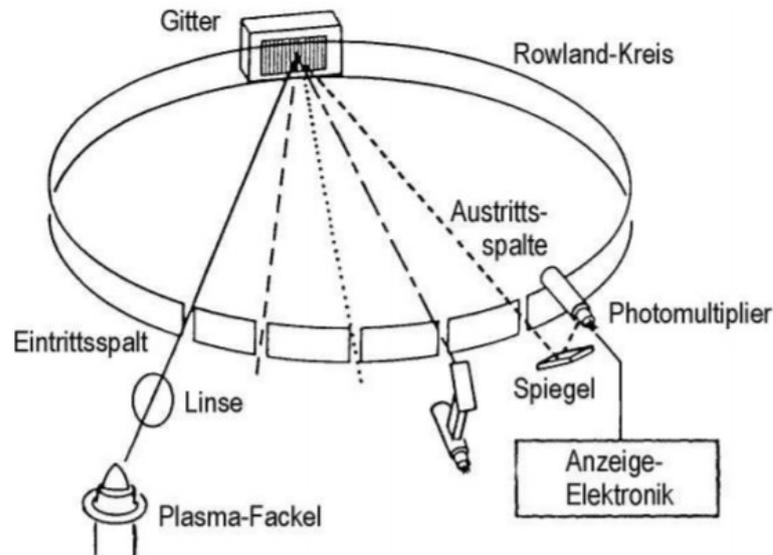


Abb. 3-14: Messprinzip AES⁴⁴

Die Menge eines Elementes wird über die Intensität des emittierten Lichtes ermittelt. Die Photozellen (Photomultiplier Röhren) wandeln das einfallende Licht in einen Strom um, der proportional zur Intensität ist. Der Strom wird erfasst und kann als Signal zur Ermittlung der Menge des zu messenden Elements verwendet werden. Das quantitative Ergebnis wird in mg/kg Öl bzw. in „ppm“ angegeben.

Mit dieser analytischen Methode können in weniger als 2 Minuten in ca. 3 ml Öl bis zu 25 Abriebs- und Verunreinigungsmetalle sowie Additive ermittelt werden. Unabhängig von der Viskosität und der Ölfarbe (hell, dunkel) erfolgt diese Messung bzw. Auswertung mit der gleichen Genauigkeit.

Jedoch können mit diesem Verfahren keine Eisenpartikel $> 5 \mu\text{m}$ erfasst werden. Des Weiteren kann auch keine Unterscheidung gemacht werden, in welchem Aggregatzustand das Metall oder in welcher chemischen Verbindung es im Schmierstoff vorkommt.⁴⁵

⁴⁴ Vgl. FH-München Maier (2012), Online-Quelle [28.August.2020]

⁴⁵ Vgl. Dipl. Ing. Peter Weismann (2003), Online-Quelle [30.August.2020]

Linienpektren der Alkali- und Erdalkalimetalle

Auswahl beobachtbarer Linien der Emissionsspektren

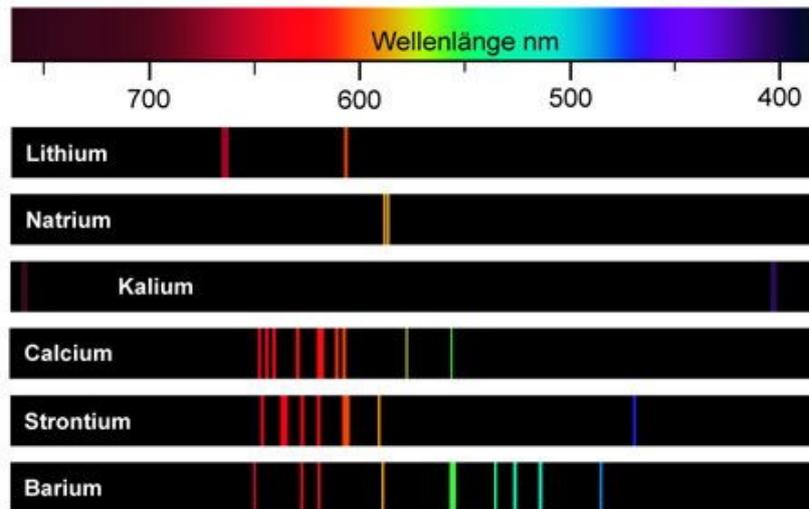


Abb. 3-15: Auszug Spektraltafel⁴⁶

Schmiermittel-Probe

Die korrekte Entnahme der Schmierstoffe stellt die Grundlage für eine genaue Analyse dar. Die Proben sollten während des Betriebes bzw. kurz nach dem Stillstand entnommen werden. Zu diesem Zeitpunkt haben sich die Schmutz-, Verschleißpartikel und eventuelles Wasser noch nicht abgesetzt. Die Entnahme erfolgt bei normaler Betriebstemperatur, immer nach der gleichen Methode und an der gleichen Stelle, nämlich vor einem Filter, um eine aussagekräftige Analyse ohne Verfälschungen gewährleisten zu können.

Schlussendlich spiegelt die Schmiermittelprobe den Zustand des gesamten Systems, dem sie entnommen wurde, wider. Eine falsche Entnahme der Probe kann schließlich zu Fehlanalysen und nicht korrekter Interpretation des Ergebnisses führen.

Die richtige Entnahme der Probe (Abb. 3-16, S. 23) während des Betriebes erfolgt an einer Umlenkung, da das Schmiermittel in Bewegung ist und somit die Partikel erfasst werden können. Bei einer falschen Entnahme hingegen fließen die Partikel vorbei und verringern somit die Aussagekraft der Probe.⁴⁷

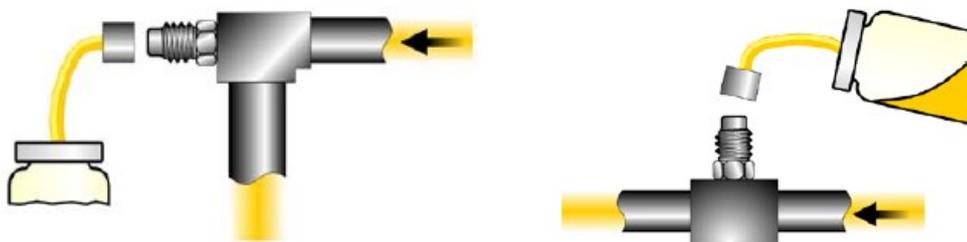


Abb. 3-16: Entnahme der Probe - richtige Entnahme (links), falsche Entnahme (rechts)⁴⁷

⁴⁶ Vgl. Seilnacht (2013), Online-Quelle [28.August.2020]

⁴⁷ Vgl. TBE Anlagendiagnostik GmbH (2017), Online-Quelle [25.August.2020]

3.2.2.2 Particle Quantifier Index (PQ-Index)

Mit dem Verfahren des PQ-Indexes können die Eisenpartikel $> 5 \mu\text{m}$ auch bestimmt werden und gleicht somit den Nachteil der AES aus.

Dieses Verfahren ermittelt die magnetische Eigenschaft des Öles und wertet diese aus. Das Schmiermittel kommt mit allen Maschinenkomponenten des Systems in Kontakt und nimmt dadurch auch den Eisenabrieb mit. Der mitgeführte magnetische Eisenabrieb kann durch die Entnahme einer Probe und mit Hilfe eines Sensors bzw. mit einem Messgerät analysiert werden.⁴⁸

Das Testprinzip macht sich die Tatsache zu Nutze, dass die Eisenpartikel, welche als Eisenkern in eine Spule gebracht werden, durch die Magnetisierung das Magnetfeld der Spule verstärken. Das PQ-Messgerät besteht aus zwei separaten Spulen. Eine Spule dient zur Messung und eine als Referenz. Im Normalzustand befinden sich beide Spulen im magnetischen Gleichgewicht. Beinhaltet eine Probe magnetische Eisenpartikel, so wird das Magnetfeld der Messspule verstärkt und beeinträchtigt somit das magnetische Gleichgewicht beider Spulen. Durch diesen Prozess kommt es zwischen der Referenz- und der Messspule zu einer Spannungsinduktion. Die Veränderung bzw. die Störung des Gleichgewichtes definiert den sog. PQ-Index. Die Kalibrierung des Messgerätes geschieht durch die Proben $\text{PQ}=0$ und $\text{PQ}=750$. Aufgrund dieser Referenzpunkte werden die weiteren Messergebnisse berechnet. Erst ab einem PQ-Index von 25 kann auf einen möglichen Verschleiß rückgeschlossen werden.

Direkt nach der Entnahme der Probe, bewegen sich die Eisenpartikel noch im Schmiermittel. Daher muss die Probe eine gewisse Zeit ruhen, damit sich die Verunreinigungen absetzen können. Dies bewirkt wiederum, dass sich alle Eisenpartikel konzentriert am Boden des Behälters sammeln und somit die Messung genauer machen, da wirklich alle Eisenpartikel das Magnetfeld beeinflussen.

Auf Grund der abgelagerten Eisenpartikel verändert sich somit das Magnetfeld der Messspule (Abb. 3-17, S. 25), wodurch gleichzeitig das Gleichgewicht mit der Referenzspule gestört wird. Die Menge der Eisenpartikel ist wiederum direkt proportional zum Störsignal, somit ist es möglich den Eisengehalt im Schmiermittel zu bestimmen.⁴⁹

⁴⁸ Vgl. Dipl. Ing. Peter Weismann (2003), Online-Quelle [30.August.2020]

⁴⁹ Vgl. ÖlCheck (2019), Online-Quelle [30.August.2020]

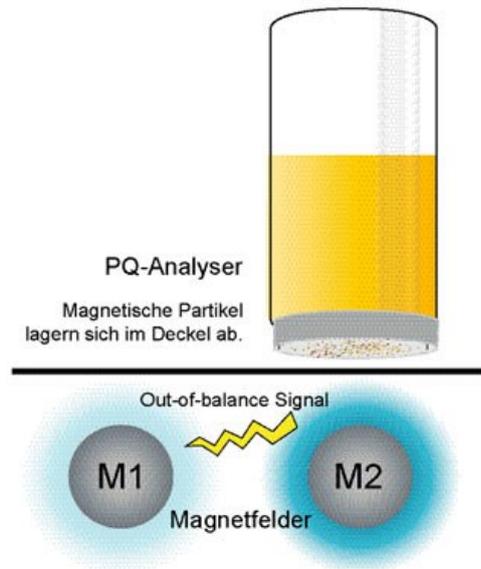


Abb. 3-17: Prinzip PQ-Analyser⁵⁰

Arten der Verschleißdeutung:

- Hoher PQ-Index + wenig Eisen: Akuter Verschleiß, Materialausbrüche (Pittings), Fresser
- Niedriger PQ-Index + viel Eisen: Korrosionsverschleiß (Rost), nicht-magnetisches Eisen
- Hoher PQ-Index + viel Eisen: Normaler Verschleiß, Materialermüdung⁵¹

3.2.2.2.3 Optische Partikelanalyse (OPA)

Die Verfahren der AES und des PQ-Indexes bieten keine Möglichkeit zur Erkennung der Partikelgröße im Schmiermittel. Um dieses Ziel zu erreichen wird die optische Partikelanalyse angewendet. Bei dieser Technik werden die Partikel im Schmierstoff fotografiert und mit Hilfe einer Softwareapplikation die Form, der Umriss, die Anzahl sowie die Größe dieser Verunreinigungen analysiert. Diese Bestimmung ermöglicht es an Hand der Partikel die Verschleißmechanismen (Pittings, Ermüdung) oder auch andere Verunreinigungen (Wasser) zu erkennen. Die Auswertung liefert Informationen über den Verschleißgrad und dessen Ursachen.

Mittels Laserlicht wird eine homogenisierte Probe, die mit konstanter Geschwindigkeit durch ein Sichtfenster (Durchflussszelle) befördert wird, bestrahlt. In dem sehr hellen Laserlicht erzeugen die Verunreinigungen im Schmierstoff einen Schatten. Die erzeugten Umriss werden mit einer Linse vergrößert, damit eine Hochgeschwindigkeits-CCD (Charge Coupled Device) -Kamera die Schatten erfassen (Abb. 3-18, S. 26) und ein Schwarz-Weiß-Foto davon erstellen kann.

⁵⁰ Vgl. ÖlCheck (2019), Online-Quelle [30.August.2020]

⁵¹ Vgl. Bartz (2006), Online-Quelle [26.August.2020]

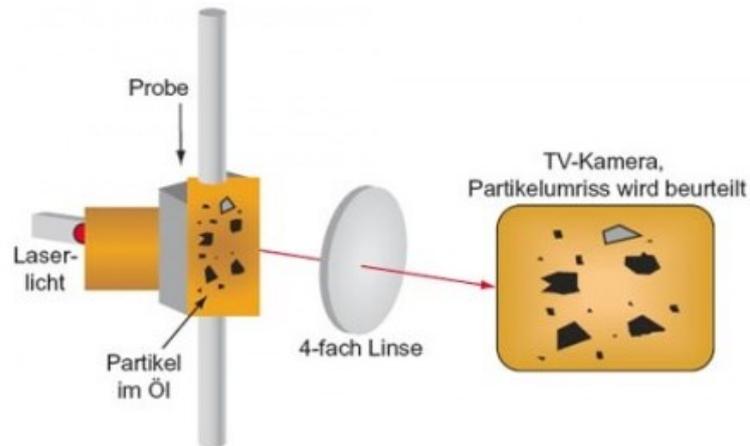


Abb. 3-18: Prinzip optische Partikelanalyse⁵²

Die Kameraaufnahmen durchlaufen anschließend eine Softwareanalyse, die die Form, Größe und Anzahl der Verschmutzungen der Partikel analysiert und kategorisiert, wie z.B. Ermüdungsverschleiß, spanender Verschleiß, nichtmetallischer Verschleiß (Tribopolymer), Wassertröpfchen, usw.⁵³

Die Erkennung der Partikel kann wie folgt aussehen:

(Nähere Beschreibung zu den einzelnen Verschleißarten → siehe Kap. 3.2.2.1, S. 19)

Gleitverschleiß



Abb. 3-19: OPA – Gleitverschleiß⁵²

Die meisten Verschleißpartikel können der Gruppe des Gleitverschleißes zugeordnet werden.

Das Berühren der Rauheitsspitzen der Oberflächen verursacht den sog. Gleitverschleiß und die Graufleckigkeit. Dieser Verschleißvorgang fällt auch in den Mechanismus der Adhäsion. Dabei kommt es zu metallischem Kontakt, der durch zu hohe Öltemperaturen, zu niedrige Betriebsviskosität und zu hohe spezifische Belastungen durch Überlastung und Vibrationen verursacht wird.⁵²

⁵² Vgl. ÖlCheck (2003), Online-Quelle [01.September.2020]

⁵³ Vgl. Dipl. Ing. Peter Weismann (2003), Online-Quelle [30.August.2020]

Ermüdungverschleiß



Abb. 3-20: OPA – Ermüdungverschleiß⁵⁴

Ein Anzeichen für den Ermüdungverschleiß sind die relativ runden und plättchenförmigen Verschleißpartikel. Die Materialermüdung wird durch eine langjährige Dauerbeanspruchung der Kontaktflächen (z.B. Zahnräder) verursacht.⁵⁴

Reaktionsprodukte



Abb. 3-21: OPA – Reaktionsprodukte⁵⁴

Die Reaktionsprodukte entstehen unter Belastung aus den Reaktionen der Ölzusätze untereinander bzw. mit der Metalloberfläche. Die erzeugten chemischen Verbindungen werden als sog. „Tribopolymere“ bezeichnet. In den Aufnahmen werden diese als längliche und teilweise als durchscheinende Partikel erkenntlich. Diese Reaktionsprodukte können auch chemische Eigenschaften aufweisen, die sich positiv auf das Schmierverhalten auswirken und für einen optimalen Schmierfilm zwischen den Oberflächen sorgen. Jedoch können diese tribochemischen Reaktionen auch zu Korrosion und zum Verschleiß der Gegenflächen führen.⁵⁴

⁵⁴ Vgl. ÖlCheck (2003), Online-Quelle [01.September.2020]

Reibverschleiß



Abb. 3-22: OPA – Reibverschleiß⁵⁵

Die optische Erfassung von spänchenförmigen Partikeln ist ein eindeutiges Indiz für Reibverschleiß, da diese Form von Partikel charakteristisch für diese Art von Abnutzung ist. Bei einer Ölprobe mit einem hohen Eisengehalt kann daraus geschlossen werden, dass der Abrieb nur durch harte metallische Eisenpartikel entstanden ist (Abrasier Verschleiß).⁵⁵

3.2.2.4 Analytische Ferrographie (AFG)

Die Funktion der analytischen Ferrographie besteht hauptsächlich darin, metallische Partikel auf ferromagnetischem Wege vom Schmiermittel zu separieren und diese dann zu analysieren. Die Kriterien für die Analyse der abgetrennten Partikel basieren auf der äußeren Gestalt, der Farbe und der Größe. Aufgrund dieser Eigenschaften findet die Bewertung qualitativ und semi-quantitativ in einem Ratingverfahren statt.

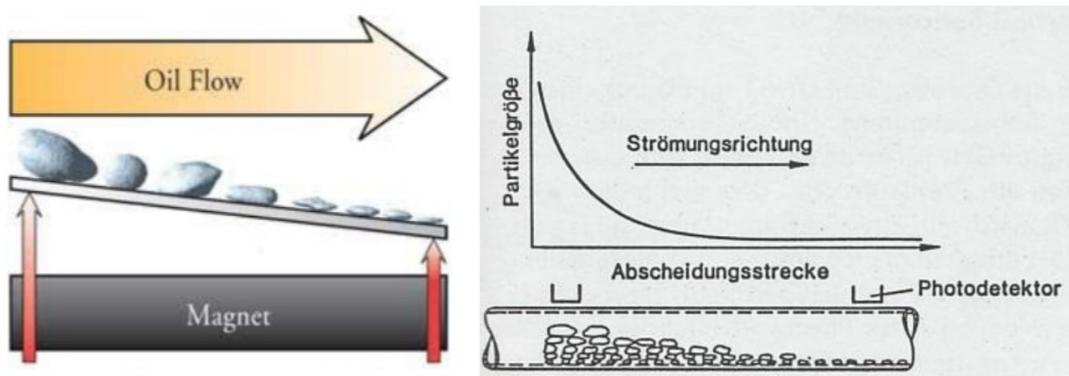


Abb. 3-23: Prinzip Analytische Ferrographie⁵⁶

Auf die geneigt angebrachte Ebene eines gläsernen Objektträgers wird die homogenisierte Schmierstoffprobe tropfenweise aufgebracht. Zusätzlich ist unterhalb des Objektträgers waagrecht ein

⁵⁵ Vgl. ÖIcheck (2003), Online-Quelle [01.September.2020]

⁵⁶ Vgl. Wilmsen (2010), Online-Quelle [05.September.2020]

starker Permanentmagnet fixiert (Abb. 3-23, S. 28). Zu Beginn rinnt die Probe, aufgrund der Schwerkraft, dem Objektträger entlang herunter. Hierbei ist der Abstand am Anfang zum Magneten größer und verringert sich über die Länge des Trägers. Auf Grund dieser Anordnung erfährt die Probe beim Durchlaufen der Strecke ein unterschiedlich starkes Magnetfeld. Zu Beginn der Trennstrecke bei größerem Abstand werden zunächst nur die größeren ferromagnetischen Partikel zurückgehalten. Mit kleiner werdendem Abstand nimmt die Magnetkraftwirkung zu und auch kleinere Partikel werden verstärkt am Objektträger festgehalten. Nach dem Durchlaufen der Probe wird der Objektträger mit den metallischen Rückständen getrocknet und unter einem Bi-chromat-Mikroskop ausgewertet. Die Auswertekriterien (Tab. 3-4, S. 29) sind hierbei die Form (Verschleißmechanismus), Färbung (Material) und die Anzahl der Partikel.

Partikelklasse	Beschreibung	Ursache bzw. Verschleißmechanismus
Spanender Verschleiß	Reflektierende Partikel mit sehr hohem Länge-Breiten-Verhältnis Gebogene oder spiralförmige Gestalt	Abrasiv-Verschleiß ("Mikro-Zerspanung", Sandpapier-Effekt)
Schwerer Gleitverschleiß	Reflektierende Partikel mit sichtbarem Länge-Breiten-Verhältnis	Adhäsiv-Verschleiß (Fressverschleiß)
Ermüdungverschleiß	Reflektierende, flächige Partikel, scharfkantiger Umriss ("Cornflanke")	Materialermüdung (Fatigue) (Pittings, Delamination, Micropittings)
Nichtmetallische Verunreinigungen	Lichtdurchlässige Partikel verschiedener Gestalt	Verunreinigungen, z.B. Staub, Wasser-Tropfen u.a.

Tab. 3-4: Partikelklassen und Verschleißmechanismus⁵⁷

Zusätzlich zu den AES und den PQ-Index Analysen kann mithilfe der AFG eine Aussage, über die Entstehung der Verschleißpartikel und daraus folgend zu den Verschleißmechanismen, gemacht werden.

Anhand dieser detaillierten Analyse des Schmiermittels kann eine Zuordnung zu einzelnen Maschinenelementen gemacht werden, für die bestimmte Partikel charakteristisch sind (z.B. Gleitverschleiß, Wälzlagerermüdung, Getriebe-Fressverschleiß, etc.).

Im Anschluss an die Erstausswertung der Rückstände, wird der Objektträger kurzzeitig auf ca. 350°C erhitzt. Dieser Vorgang erlaubt, aufgrund der Anlassfarben, Rückschlüsse auf das Material der einzelnen Partikel, wie z.B. niedrig- oder hochlegierte Stähle, Gusseisen usw. zu machen.

Mit entsprechenden Lösungsmitteln ist es auch möglich stark verunreinigte Schmierstoffe mit dieser Methode zu untersuchen.⁵⁷

⁵⁷ Vgl. Krethe (2020), S. 104 ff.

Online-Ferrograph

Die Schmiermittelanalyse kann mittels Online-Ferrograph auch während des Betriebes von statten gehen. Hierbei wird ein direkt anzeigende Ferrograph in das Schmier- oder Hydrauliksystem integriert. Das Funktionsprinzip der Partikelabscheidung ist beim Online-Ferrograph gleich wie beim analytischen Ferrograph, jedoch wird hierbei der flache Glas-Schichtträger durch ein Glasröhrchen ersetzt (Abb. 3-24, S. 30). Die einzelnen Partikeln setzten sich somit, aufgrund des Permanentmagneten, in einem Glasröhrchen ab. An den Ablagerungsstellen leiten Faseroptiken Licht durch das Glasröhrchen. Die Anzahl der abgesetzten Partikel im gläsernen Kanal wird hierbei über die Veränderung der Lichtintensität, im Vergleich zu einem sauberen Schmiermittel, ermittelt und elektronisch ausgewertet.

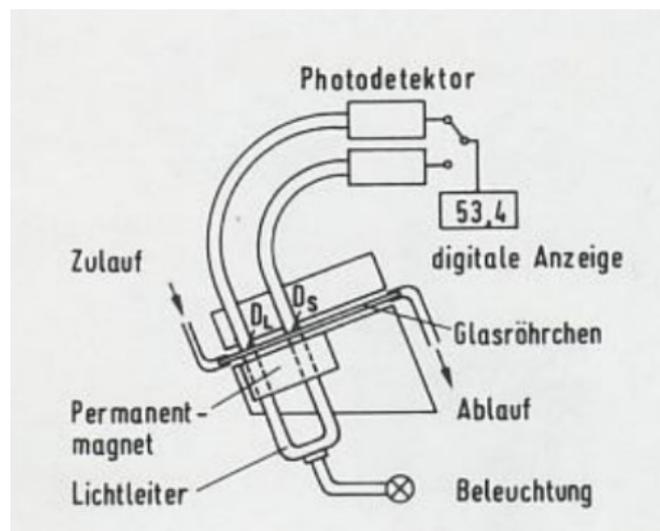


Abb. 3-24: Online Ferrograph⁵⁸

Ein kapazitiver Oberflächenmessfühler erstellt eine quantitative Auswertung der Abnutzungspartikel. Da dieses Verfahren auch die Untersuchung der Partikelgrößenverteilung ermöglicht, werden zwei quantitative Messergebnisse, die Gesamtkonzentration an Partikel und dem Anteil großer Teilchen ($> 5 \mu\text{m}$), ausgegeben. Die Abnutzungspartikel können anschließend aus der abgeschiedenen Menge bestimmt und analysiert werden. Nach jedem Messvorgang bzw. -zyklus wird das Glasröhrchen ausgiebig gespült, um weitere Untersuchungen nicht zu verfälschen.⁵⁹

⁵⁸ Vgl. Wilmsen (2010), Online-Quelle [05.September.2020]

⁵⁹ Vgl. Förster (2013), S. 301 ff.

3.2.2.2.5 Mehrkanal-IR (infrarot)-Messsystem

Das Mehrkanal-IR-Messsystem ist eine Kombination aus einem Ölqualitäts- und einem Partikelsensor. Dieses System kann gleichzeitig die Ölqualität und die Partikelbelastung im Fluid erfassen. Durch das zusätzliche Verwenden eines Pt-1000 Temperatursensors zur Bestimmung der Fluidtemperatur und der Auswertung des Druckabfalls im System bei einem konstanten Fluss kann zusätzlich auch die kinematische Viskosität bestimmt werden.⁶⁰

Qualitätssensor

Im Zuge des Condition Monitorings wurde auch ein Ölqualitätssensor zur spektralen Charakterisierung von Fluiden entwickelt. Das miniaturisierte Messsystem hat im Kern eine IR-transparente Siliziummesszelle. Dieses System ermöglicht es an Schmiermitteln, wie z.B. Kühl-, Schmier- und Hydraulikölen, eine optische Analyse durchzuführen.

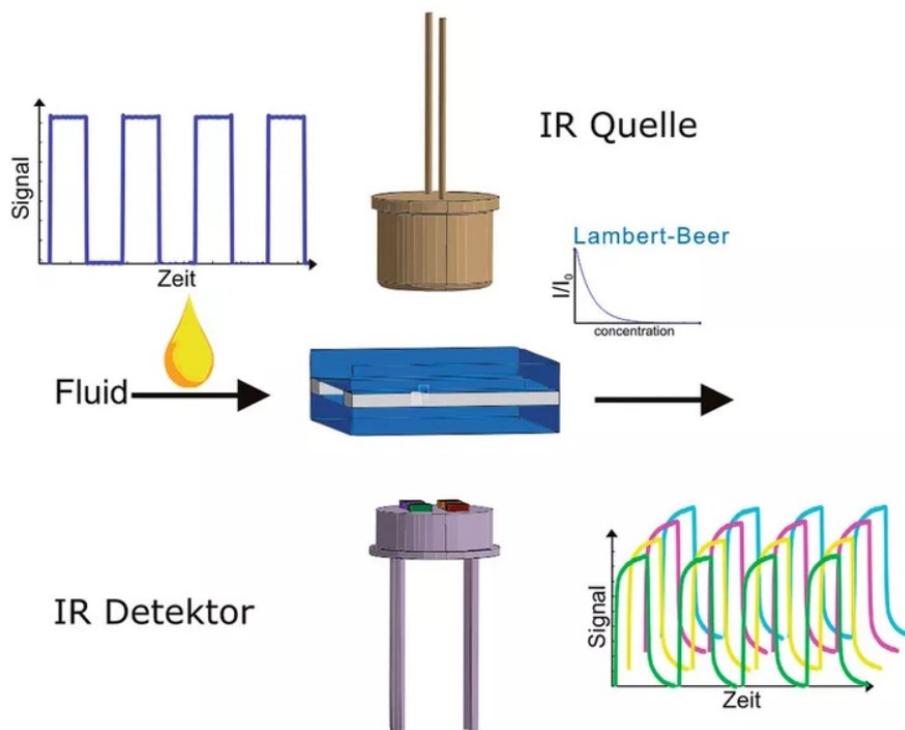


Abb. 3-25: Funktionsprinzip Mehrkanal-IR-Messsystem⁶⁰

Das Funktionsprinzip dieses Messsystems basiert auf der Ansteuerung einer breitbandigen IR-Quelle mit einem Rechtecksignal. Dadurch emittiert die IR-Quelle eine thermische Schwarzkörperstrahlung, welche wiederum eine IR-transparente Siliziumzelle passiert. Der Aufbau dieser Siliziumzelle besteht aus 2mm starken Siliziumfenstern und einer „Low Temperature Cofired Ceramic“ (LTCC)-Schicht, welche die Fenster voneinander trennt und zugleich einen Fluidkanal bildet. Mit diesem Abstandhalter kann somit ein 0,2 mm dicker Fluidkanal realisiert werden. Dieser Abstand ist passend zur IR-Absorption im Medium und wird für die Auswertung benötigt.

⁶⁰ Vgl. E. Pignanelli (2013), Online-Quelle [09.September.2020]

Dieses Messsystem basiert auf dem Lambert-Beersche Gesetz und diese Gesetzmäßigkeit ermöglicht die Funktionalität dieser Auswertung. Das Lambert-Beersche Gesetz beschreibt die Stärke der Strahlungsabsorption beim Durchgang eines Mediums. Jedes Medium absorbiert die Strahlung unterschiedlich und ist abhängig von folgenden Faktoren:

- Schichtdicke (Abstand zwischen den Fenstern)
- Stoffkonzentration des Mediums
- Wellenlängenabhängiger Absorptionskoeffizient des Mediums

Das Lambert-Beersche Gesetz:
$$E_{\lambda} = -\lg\left(\frac{I}{I_0}\right) = \varepsilon_{\lambda} * c * d$$

E_{λ} ... Extinktion (Absorbanz des Materials für Licht der Wellenlänge λ)

I ... Intensität des transmittierten Lichtes (Einheit: $W * m^{-2}$)

I_0 ... Intensität des einfallenden (eingestrahnten) Lichtes (Einheit: $W * m^{-2}$)

c ... Stoffmengenkonzentration der absorbierenden Substanz in der Flüssigkeit (Einheit: $mol * l^{-1}$)

ε_{λ} ... molarer (dekadischer) Absorptionskoeffizient (Einheit: $m^2 * mol^{-1}$)

d ... Schichtdicke des durchstrahlten Körpers (Einheit: m)⁶¹

Der Strahlungsanteil, welcher nicht absorbiert wurde, wird von einem vierkanaligen IR-Thermopile-Detektor erfasst. Jeder einzelne Kanal des Detektors hat einen separaten spektral schmalbandigen Bandpassfilter. Diese Filter werden zu Beginn auf die charakteristischen Absorptionsbanden des zu überprüfenden Mediums angepasst. Einer der Bandpassfilter dient dabei als Referenzkanal um mögliche breitbandige Signaländerungen, aufgrund von IR-Intensitätsänderungen bedingt durch Alterung der IR-Quelle, aufzuzeichnen und auszugleichen.

Die anderen Wellenlängen der Messkanäle werden, unter Betrachtung der chemischen Zustandsänderung des Fluids, auf dessen spektrale Teile abgestimmt. In weiterer Folge werden die erfassten Signale verstärkt und durch den FFT (Fast Fourier Transformation) -Algorithmus ausgewertet.⁶²

Partikelsensor

Der Partikelsensor ermöglicht es, die erfassten Verunreinigungen im Schmiermittel zu unterscheiden. Diese Kontaminationen können aus Luftblasen, Staub- oder Metallpartikeln bestehen.

Der Aufbau des Partikelmonitors (Abb. 3-26, S. 33) beinhaltet ebenfalls eine impulsangesteuerte IR-Laserdiode und zusätzlich sind drei Fotodioden in unterschiedlichen Winkeln angeordnet. Diese Anordnung dient zur Bestimmung des Streulichts in Vorwärts- und Rückwärtsrichtung sowie des Transmissionssignals.

⁶¹ Vgl. LUMITOS AG, Online-Quelle [12.Januar.2021]

⁶² Vgl. E. Pignanelli (2013), Online-Quelle [09.September.2020]

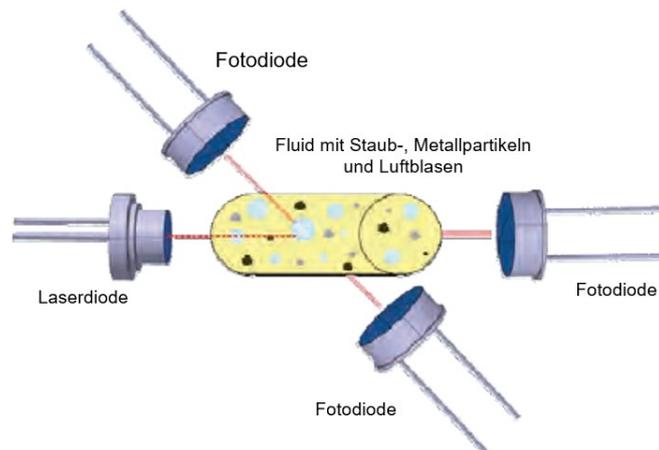


Abb. 3-26: Funktionsprinzip Partikelanalyse-System⁶³

Abhängig von der Verunreinigung, die den Betrachtungsbereich des Sensors mit dem Schmierstoff durchfließt, erkennen die Fotodioden die unterschiedlichen Streuanteile des einfallenden Lichtes und eine Transmissionsänderung.

Die Streuung des Laserlichtes an Partikeln oder Luftblasen wird mit der sogenannten Streutheorie beschrieben. Das Ergebnis ist eine veränderte Strahlungsintensität in den unterschiedlichen Richtungen. Aufgrund der Anordnung der Fotodioden kann diese Änderung registriert werden. Die Streuung von Verunreinigungen, die in der Größenordnung der Laserwellenlänge liegen, kann durch die Mie-Theorie beschrieben werden. (Die Mie-Theorie beschreibt die Größenbestimmung von sehr kleinen Partikeln, deren Durchmesser nicht deutlich über der Wellenlänge des verwendeten Lichtes liegt.⁶⁴) Die Fotodioden werten das empfangene Streulicht über den Fotostrom aus, welcher zusätzlich verstärkt und mittels Transimpedanzverstärker in eine Spannung umgewandelt wird.

Durch die Auswertung der Vorwärts- und Rückwärtsstreuung sowie der Signalamplitude kann zwischen Staub-, Metallpartikeln und Luftblasen unterschieden werden.⁶³

3.2.3 Temperaturmessung

Die Temperaturmessung gliedert sich allgemein in zwei Ausführungsvarianten:

- Berührende Temperaturmessung
- Berührungslose Temperaturmessung

Die berührende Temperaturmessung wird über den direkten Kontakt mit dem Messobjekt und dem Messsensor durchgeführt. Im Gegensatz dazu erfolgt bei der berührungslosen Variante die Temperaturmessung über einen infrarotempfindlichen Sensor, der die Strahlung des Messobjekts erfasst.⁶⁵

⁶³ Vgl. E. Pignanelli (2013), Online-Quelle [09.September.2020]

⁶⁴ Vgl. Paluga (2020), Online-Quelle [13.November.2020]

⁶⁵ Vgl. nbn Elektronik Handelsgesellschaft m.b.H. (2015), Online-Quelle [14.September.2020]

3.2.3.1 Berührende Temperaturmessung

Für die berührende Temperaturmessung wird ein Berührungsthermometer verwendet. Diese Thermometer stehen in direktem Kontakt mit dem Messobjekt. Die Temperaturmessung erfolgt nach Erreichen eines thermischen Gleichgewichts zwischen Thermometer und Messobjekt, was durch eine gute Wärmeanbindung erreicht wird.

Die Wärmeübertragung kann auf verschiedenen Wegen erfolgen, nämlich über Wärmeleitung, Konvektion oder Wärmestrahlung geschehen.

Je nach Auswahl des Thermometers, erfolgt die Temperaturmessung durch die Umrechnung einer physikalischen Größe in die Temperatur.

Die Berührende Temperaturmessung weist folgende Eigenschaften auf:

- Hohe Genauigkeit
- Schnelle Ansprechzeit
- Großer Temperaturbereich⁶⁶

3.2.3.1.1 Thermometer (allgemein)

Das Thermometer ist ein Messgerät, welches zur Bestimmung der Temperatur verwendet wird. Hierbei gibt es variierende Thermometerarten und Bauformen, die basierend auf unterschiedlichen physikalischen Prinzipien die Temperaturmessung durchführen.

- **Flüssigkeitsthermometer**

Die Wirkungsweise dieses Thermometers basiert auf der Ausdehnung von Flüssigkeiten, insbesondere von Quecksilber oder von gefärbtem Alkohol. Die Änderung des Volumens kann somit z.B. über eine Skala abgelesen werden. Der Messbereich liegt hierbei zwischen -20°C und $+50^{\circ}\text{C}$.⁶⁷

- **Gasthermometer**

Die Funktionsweise dieser Thermometervariante ist ähnlich der des Flüssigkeitsthermometers. Hierbei wird ein Volumen von einem Quecksilbertropfen abgeschlossen. Innerhalb dieses Bereiches befindet sich ein Gas, dessen Volumen sich über die Temperatur verändert und den Quecksilbertropfen bewegt. Die Höhe des Tropfens zeigt die Temperatur an.⁶⁷

- **Bimetallthermometer**

Der Bimetallthermometer besteht aus einem spiralförmigen Bimetallstreifen (Verbindung zweier unterschiedlicher Metalle) und einem Zeiger. Aufgrund der Temperaturänderung ändert sich die Biegung des Streifens und die Änderung kann mittels Zeiger auf einer Skala abgelesen werden.⁶⁷

⁶⁶ Vgl. Universität Kassel (2015), Online-Quelle [14.September.2020]

⁶⁷ Vgl. Duden Learnattack GmbH (Therm) (2020), Online-Quelle [14.September.2020]

- **Elektronisches Thermometer**

Das elektronische Thermometer bedient sich der starken Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes gewisser Halbleitermaterialien. Die Temperaturermittlung erfolgt hierbei durch das Messen der Stromstärke bei konstanter Spannung (Ohm'sches Gesetz: $I[A] = \frac{U[V]}{R[\Omega]}$) und kann von dieser abgeleitet werden.⁶⁸

- **Thermofarben**

Thermofarben können bei einer bestimmten Temperatur ihre Farbe wechseln oder auch Licht abgeben. Diese dienen als einfache optische Kontrolle für eine Temperaturänderung.⁶⁸

- **Stabausdehnungsthermometer**

Stabausdehnungsthermometer nutzen den Ausdehnungsunterschied zweier fester Körper mit unterschiedlichem Temperatúrausdehnungskoeffizienten.

Die Längendifferenz beider freier Enden kann somit für die Temperaturmessung herangezogen werden.⁶⁹

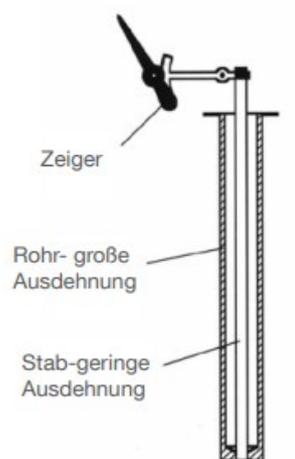


Abb. 3-27: Stabausdehnungsthermometer⁶⁹

3.2.3.1.2 Metall-Widerstandsthermometer

(Abb. 3-28, S. 36)

Valenzelektronen, die äußersten Elektronen im Atom, sind bei Metallbindungen frei beweglich und befinden sich im sogenannten Leitungsband. Die freibeweglichen Elektronen werden hierbei auch als Elektronengaswolke bezeichnet. Durch das Anlegen einer Spannung, bewegen sich die Elektronen zum Pluspol. Hierbei treffen diese Elektronen jedoch immer wieder auf die festen Teilchen im Metallgitter und

⁶⁸ Vgl. Duden Learnattack GmbH (Therm) (2020), Online-Quelle [14.September.2020]

⁶⁹ Vgl. Testo Industrial Services GmbH (2019), Online-Quelle [14.September.2020]

werden somit abgelenkt und abgebremst. Aus diesem Grund können die Elektronen nicht unendlich schnell beschleunigt werden und resultiert im spezifischen Widerstand eines Leiters.

Dieser konstante Widerstand ist jedoch temperaturabhängig. Durch die Erwärmung des Metalls, beginnen auch die festen Teilchen in der Gitterstruktur zu schwingen und behindern wiederum die Bewegung der fließenden Elektronen. Dieses Verhalten erhöht somit den Widerstand des Leiters, welcher sich linear mit der Temperaturänderung verändert.

Durch das Anlegen einer konstanten Spannung und der Widerstandsveränderung kann die Stromstärke ausgewertet und somit die Temperatur abgeleitet werden.⁷⁰



Abb. 3-28: Metall-Widerstandsthermometer^{71, 72}

Um eine konstante Messgenauigkeit zu gewährleisten, sollte das eingesetzte Metall folgende Eigenschaften aufweisen:

- Stabile Kennlinie auch bei hohen Temperaturen
- Reproduzierbare und stetige Kennlinie ohne Hysterese
- Hoher Temperaturkoeffizient → große Änderung des Widerstandes mit der Temperatur
- Stabiler Widerstandswert → keine Beeinflussung von Korrosion, Verformung oder chemischen Substanzen
- Druckabhängiger Widerstand

Die Metallauswahl fällt im Industriebereich sehr oft auf Platin, Nickel oder Kupfer. Diese Metalle besitzen die oben erwähnten Eigenschaften und liefern somit ein verlässliches Messergebnis.

Messungen bei tieferen Temperaturen werden häufig aber auch mit Germanium durchgeführt.⁷³

⁷⁰ Vgl. Studyflix (2020), Online-Quelle [14.September.2020]

⁷¹ Vgl. Temperatur Messelemente Hettstedt GmbH (2020), Online-Quelle [14.September.2020]

⁷² Vgl. MTS Messtechnik Schaffhausen GmbH (2020), Online-Quelle [14.September.2020]

⁷³ Vgl. Universität Kassel (2015), Online-Quelle [14.September.2020]

3.2.3.1.3 Halbleiter-Widerstandsthermometer

Das sogenannte Bändermodell beschreibt die möglichen Energiezustände von Elektronen in einem Festkörper. Die möglichen Zustände der Elektronen teilen sich in mehrere Energiebereiche eines Festkörpers auf und liegen energetisch so dicht beieinander, so dass sie als Kontinuum (Energieband) betrachtet werden können. Zusätzlich gibt es in Festkörpern auch Bereiche, in denen es keine erlaubten Zustände der Elektronen gibt.

Das Valenz- und das Leitungsband sind vor allem für die Leitfähigkeit eines Festkörpers von Bedeutung. Das Valenzband ist jenes Energieband, welches am absoluten Nullpunkt am höchstgelegenen und voll besetzt ist. Das Leitungsband ist wiederum energetisch höher liegend. Die Unterscheidung eines Festkörpers als Leiter, Halbleiter oder Isolator (Nichtleiter) (Abb. 3-29, S. 37) lässt sich anhand des Besetzungsgrades des Leitungsbandes und der Größe der Bandlücke machen. Die Bandlücke ist jene Zone, in der keine Zustände der Elektronen erlaubt sind. Bei einem Halbleiter und einem Isolator ist im absoluten Nullpunkt das Leitungsband unbesetzt und diese besitzen somit keine freien Ladungsträger.

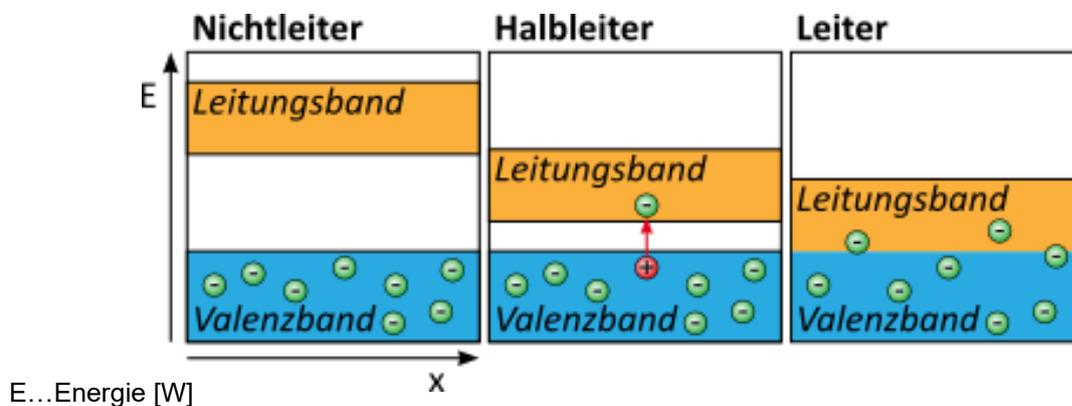


Abb. 3-29: Bändermodell⁷⁴

Im Gegensatz zu einem Nichtleiter reicht bei einem Halbleiter, aufgrund des Bandabstandes, z.B. die thermische Energie bei Zimmertemperatur schon aus, um Elektronen aus dem Valenzband in das Leitungsband anzuregen. Bei einem Isolator ist dies auch bei sehr hohen Temperaturen nicht möglich. Nach diesem Vorgang sind die Elektronen im Leitungsband beweglich und können somit den Ladungstransport durchführen. Durch den Wechsel eines Elektrons in das Leitungsband entsteht ein Loch im Valenzband. Daraus folgt, dass das Band nicht mehr vollständig besetzt ist und somit auch leitend wird.

Der Halbleiter-Widerstandsthermometer (Thermistor) hat im Vergleich zum Metall (Platin)-Widerstandsthermometer einen höheren Temperaturkoeffizienten. Er wird auch in zwischen Heißleiter – NTC (negative temperature coefficient) - Thermistor und Kaltleiter – PTC (positive temperature coefficient) - Thermistor unterschieden.⁷⁵

⁷⁴ Vgl. Echternkamp (2011), Online-Quelle [15.September.2020]

⁷⁵ Vgl. Universität Kassel (2015), Online-Quelle [14.September.2020]

Heißeiter (NTC-Thermistor)

Bei einem Heißeiter, welcher aus Metalloxiden besteht, verringert sich der Widerstand mit zunehmender Temperatur. Jedoch ändert sich der Widerstand nicht proportional zur Temperatur, sondern exponentiell und muss auch dementsprechend ausgewertet werden.⁷⁶

Kaltleiter (PTC-Thermistor)

Der Kaltleiter ändert nahezu sprunghaft seinen Widerstandswert beim Erreichen einer bestimmten Bezugstemperatur. Diese PTC-Thermistoren eignen sich aufgrund ihrer Besonderheit zur Grenztemperaturüberwachung (-schalter) in Maschinen und Anlagen.⁷⁶

3.2.3.1.4 Thermoelemente

Das Thermoelement basiert auf dem sog. Seebeck-Effekt, der die Entstehung einer Spannungsdifferenz beschreibt, wenn zwei metallische Leiter unterschiedlicher Werkstoffe (Abb. 3-30, S. 38) verbunden sind und zwischen beiden Enden ein Temperaturunterschied vorherrscht.

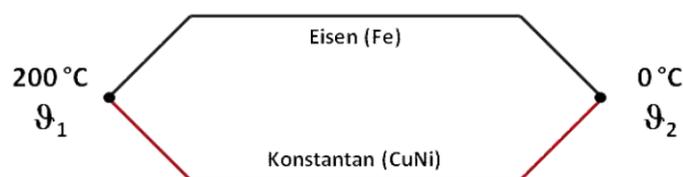


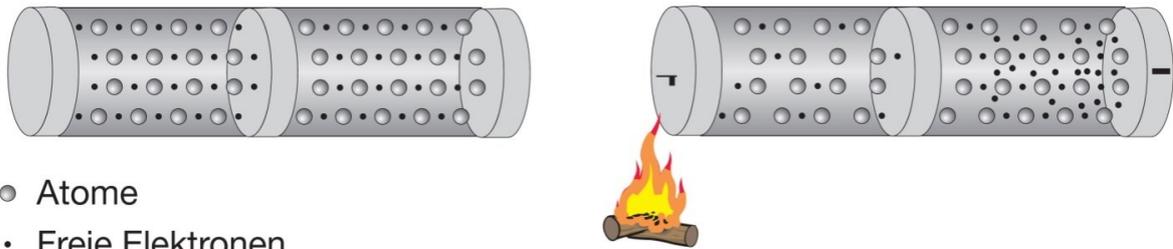
Abb. 3-30: Thermokreis⁷⁷

Die resultierende Thermospannung ist von dem Temperaturunterschied und den beiden Materialien abhängig und kann entsprechend gemessen werden.

Eine Eigenschaft eines metallischen Leiters sind die freien Leitungselektronen, welche den Stromfluss ermöglichen. Wird ein metallischer Leiter konstant auf der gleichen Temperatur gehalten, dann bewegen sich die Elektronen des Leiters entsprechend ihrer thermischen Energie innerhalb des Kristallgitters. In diesem Fall wird der Leiter als neutral bezeichnet, da sich sein Ladungsschwerpunkt nicht nach außen zeigt (Abb. 3-31, S. 39). Wird jedoch an einer Seite Wärme zugeführt, so erfahren die Elektronen einen Zuwachs an thermischer Energie. Dadurch erhöht sich ihre mittlere Geschwindigkeit im Vergleich zu den anderen Elektronen, die sich am kälteren Ende befinden. Durch die Diffusion der Elektronen vom wärmeren zum kälteren Ende, geben diese ihre dazugewonnene Energie wieder ab und verlangsamen sich.

⁷⁶ Vgl. Testo Industrial Services GmbH (2019), Online-Quelle [14.September.2020]

⁷⁷ Vgl. Universität Kassel (2015), Online-Quelle [14.September.2020]



- Atome
- Freie Elektronen

Abb. 3-31: Aufbau metallischer Leiter und Ladungsverschiebung bei Wärmezufuhr⁷⁸

Aufgrund der durch die Wärmezufuhr ausgelösten Verlagerung der Elektronen, kommt es am kalten Ende zu einem negativen und am warmen Ende zu einem positiven Ladungsschwerpunkt. Zwischen beiden Ladungsschwerpunkten wird ein elektrisches Feld induziert, was wiederum für ein Gleichgewicht sorgt, da die Elektronen dem Feld folgend zum warmen Ende fließen.

Damit eine Spannungsdifferenz zwischen dem warmen und dem kalten Ende des Leiters gemessen werden kann, muss das warme Ende mit einem anderen elektrischen Leiter verbunden werden. Dieser muss aus einem anderen Werkstoff mit einer anderen elektrischen Leitfähigkeit bestehen (Abb. 3-32, S. 39). Der Grund dafür ist, dass bei diesem Messvorgang unterschiedliche Ladungsschwerpunkte in den kalten Enden herrschen müssen, da ansonsten keine Differenz gemessen werden kann. Diese Differenz kann in weiterer Folge mit einem Spannungsmessgerät gemessen werden.

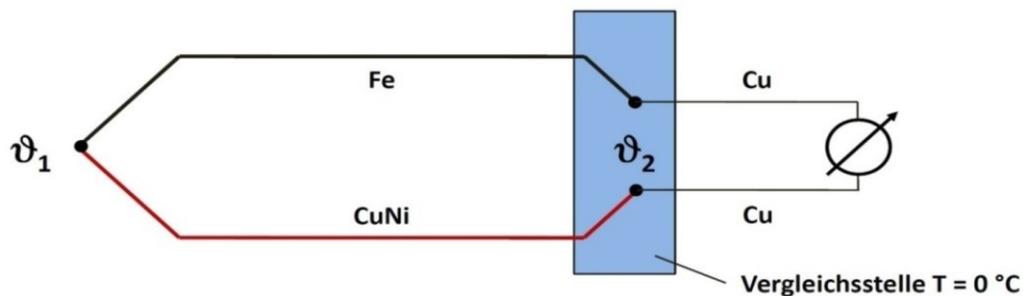


Abb. 3-32: Thermokreis mit Anschlussleitung⁷⁸

Die Vergleichsstellentemperatur wird konstant auf z.B. 0°C gehalten oder über einen zusätzlichen Temperatursensor überwacht, damit die Temperatur der Klemmstelle mit dem Messgerät bekannt ist. Auf Grund dieser Situation kann somit die Differenz zum Temperaturmesspunkt ermittelt und über die Spannungsdifferenz ausgewertet werden.⁷⁸

3.2.3.2 Berührungslose Temperaturmessung (IR-Messung)

Die Temperatur eines jeden Körpers oberhalb des absoluten Nullpunktes (-273,15°C) verursacht eine Strahlungsabgabe (Infrarotstrahlung). Diese Strahlung breitet sich aus und dient auch als Energietransport. Dieser Vorgang erlaubt es, berührungslos die Temperatur eines Körpers, über die Strahlung, zu messen.

⁷⁸ Vgl. Universität Kassel (2015), Online-Quelle [14.September.2020]

Die Messung erfolgt über die Wellenlänge der abgegebenen IR-Strahlung mit Hilfe von Infrarotdetektoren. Die Geräte zur Durchführung dieser Messungen werden als Strahlungsthermometer (Strahlungs-pyrometer, Pyrometer) bezeichnet. Diese können für einen Messbereich von -100°C bis 3500°C (im Sonderfall 5000°C) eingesetzt werden.⁷⁹

3.2.3.2.1 Messprinzip

Die berührungslose Bestimmung einer Oberflächentemperatur wird durch einen Strahlungsempfänger, der den räumlichen und spektralen Anteil des Strahlungsflusses aufnimmt, durchgeführt. Dieser wandelt diese Strahlung in ein elektrisches Signal um. Die Größe des Messbereiches ist von mehreren Faktoren abhängig, nämlich von der Messentfernung, der optischen Auslegung des Gerätes (Objektiv) und der Größe der Empfängerfläche. Die wellenlängenabhängige Durchlässigkeit des Objektivs und Umsetzung der Strahlung im Strahlungsempfänger bestimmen den spektralen Anteil. Die vom Strahlungsempfänger erfasste elektrische Änderung wird anschließend verstärkt, gemessen und ausgewertet. Grundsätzlich ist ein Strahlungsthermometer aus den folgenden Hauptkomponenten aufgebaut: Objektiv, Filter, Strahlungsempfänger und eine elektrische Auswerteeinheit mit Verstärker und Umsetzer (Abb. 3-33, S. 40).

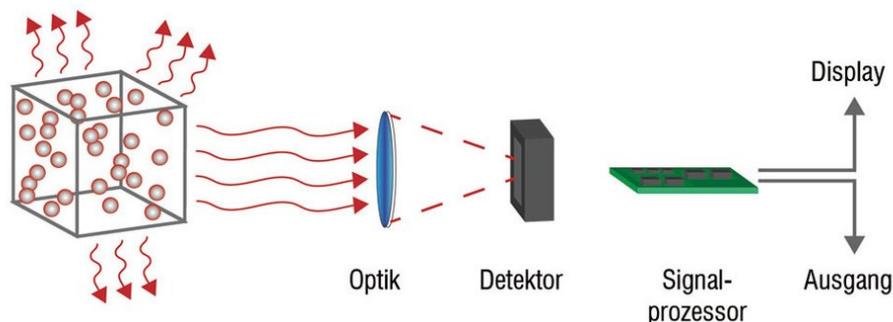


Abb. 3-33: Messprinzip IR-Messung⁸⁰

3.2.3.2.2 Grundbegriffe IR-Messtechnik

Die gemessene Strahlung setzt sich nicht nur aus der abgegebenen Wärmestrahlung des Messobjektes, sondern auch aus der Reflexion und der Transmission von Fremdstrahlungen zusammen (Abb. 3-34, S. 41).

Reflexionsgrad (R)

Der Reflexionsgrad beschreibt die Fähigkeit eines Materials die IR-Strahlung zu reflektieren. Dieser ist abhängig vom Material und dessen Oberflächenbeschaffenheit.

Transmissionsgrad (T)

Der Transmissionsgrad gibt Informationen zur Fähigkeit eines Materials zur Durchlässigkeit von IR-Strahlung an. Dieser ist wiederum von der Stärke und Art des Materials abhängig.

⁷⁹ Vgl. Testo Industrial Services GmbH (2019), Online-Quelle [14.September.2020]

⁸⁰ Vgl. Pfadt (2017), Online-Quelle [18.September.2020]

Emissionsgrad (ϵ)

Der Emissionsgrad beschreibt die Fähigkeit, IR-Strahlung zu emittieren (auszusenden). Ein Objekt mit einem sehr guten Emissionsgrad kann besser IR-Strahlung aussenden, die wiederum besser von einem Pyrometer gemessen werden kann.⁸¹

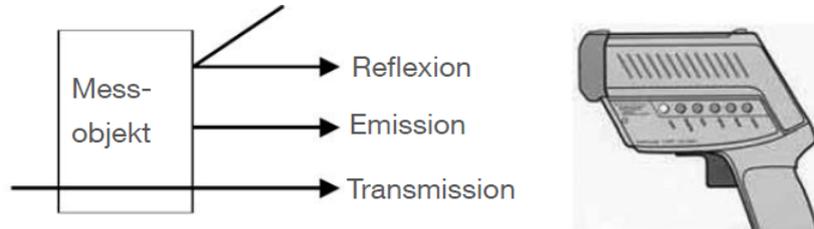


Abb. 3-34: Grundbegriffe IR-Messtechnik⁸¹

3.2.3.2.3 Technische Einsatzgebiete der IR-Messung

Der Einsatzbereich der IR-Messung umfasst viele technische Gebiete (Tab. 3-5, S. 41):

Bereich	Aufgabe	Einsatzbereich
Elektronikindustrie	Funktionsprüfung und thermische Verteilung, Belastbarkeitsprüfung, Früherkennung von erhöhten oder abnormalen Temperaturen in der Forschung, Entwicklung und Qualitätssicherung, sowie in der Fertigung und Produktion	Haushaltsgeräte, Computer, Elektronische Geräte, Halbleitern, Lampen, Maschinen, Trafowicklungen, Generatoren, Motoren, Motorengetriebe, Motorenlager und Gehäuse, Halbleitern, IC's und Kühlkörpern, Netzteile und elektronische, Baugruppen, Kühlgebläse und Klimaanlage, Gefrierschränke, Kühltruhen, Mikrowellenherde, Elektroherde und Backöfen, Schaltanlagen, Starkstromanlagen und Hochspannungsanlagen, Lötbädertemperaturen sowie Siliziumwafer
Automobilindustrie		Autos & Nutzfahrzeuge, Katalysatoren, Abgassysteme, Klimaanlage, Motoren & Antriebe, Bremsanlagen, Bremsen und Verstärker, Kühler, Motoren, Gebläse, Defroster und Heckscheibenheizung, Stossdämpfer, Autoreifen und Felgen, beheizte Sitze, beheizte Sprühdüsen
Chemie		Düsen für Produktionsmaschinen, Plastikfolien, Isolationsmaterialien, Raffinerieöfen
Metallindustrie		Druckmaschinen, Lager und Getriebe, Fräsmaschinen und Fräsköpfe, Schweißautomaten, Guss- und Schmiedetechnik, Schmelzöfen, Material- oder Ermüdungsfehler in Hubschrauberrotoren, Turbinen, Prüfung von Schweißnähten, Walzen und Rotationsmaschinen
Sonstiges		Brenner, Öfen und Heizungen, Pflanzen, Blättern und Bäumen, Verunreinigungen von Gewässern, Strömungen in Seen, Flüssen und Gewässern, Geschwindigkeitsmessung, Justierung von IR-Laser, Gewebeuntersuchung von Textilien

Tab. 3-5: Technisches Einsatzgebiet IR-Messung⁸²

⁸¹ Vgl. Testo Industrial Services GmbH (2019), Online-Quelle [14.September.2020]

⁸² Vgl. nbn Elektronik Handelsgesellschaft m.b.H. (2015), Online-Quelle [14.September.2020]

3.2.3.2.4 Vor- und Nachteile der IR-Thermographie

Vorteile

- Schnelligkeit → Messung im ms-Bereich, Zeitersparnis (mehrere Messungen in derselben Zeit wie andere Temperaturmessungen möglich)
- Messung an sich bewegenden Objekten möglich
- Messungen an gefährlichen oder schwer zugänglichen Stellen möglich (große Entfernung, bei Hochspannung, bei Chemikalien, etc.)
- Messung von hohen Messtemperaturen
- Keine Rückwirkung auf das Messobjekt → dem Messobjekt wird keine Energie entzogen, keine Messverfälschung
- Messung von gesamten Flächen möglich (Schaltschrank, usw.)

Nachteile

- Sichtbarkeit des Messobjektes → Messobjekt muss für das IR-Thermometer sichtbar sein (kein Rauch, Staub, Zwischenwände, etc.)
- Messkopf ist sehr empfindlich
- Nur Messung der Oberflächentemperatur möglich (Materialabhängigkeit, Oberflächenbeschaffenheit, Reflexion, etc.)⁸³

3.2.4 Ultraschall- / Akustische Überwachung

Die akustische Überwachung von Maschinen und Anlagen kann einen Frequenzbereich bis ca. 1 MHz abdecken, im Vergleich dazu werden Schwingungsmessungen bis 20 kHz eingesetzt. Für diese Überwachung werden jedoch spezielle Sensoren benötigt. Bei zu hohen Frequenzen oder bei zu geringen Vibrationen für Schwingungssensoren, kommen Ultraschallsensoren zum Einsatz.

Durch die Unterteilung des Frequenzbereiches in niedrig, mittel und hoch können Schäden lt. Abb. 3-35 (S. 43) zugeordnet werden. Die einzelnen Maschinengeräusche im Hörschallbereich beeinflussen auch die Messung bei einer Systembetrachtung im Ultraschallbereich nicht.⁸⁴

⁸³ Vgl. nbn Elektronik Handelsgesellschaft m.b.H. (2015), Online-Quelle [14.September.2020]

⁸⁴ Vgl. Christian Probst (2015), Online-Quelle [23.September.2020]

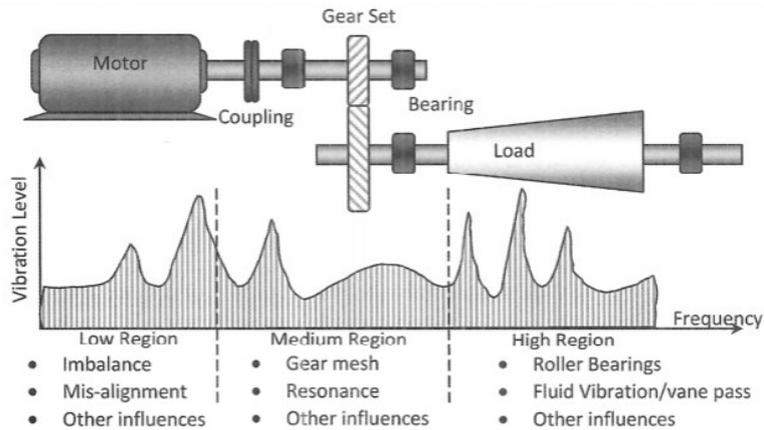


Abb. 3-35: Unterteilung der Schäden in Frequenzbereiche⁸⁵

Je nach Anforderungen wird zwischen unterschiedlichen akustischen Überwachungsmethoden, wie Modalanalyse, Körperschallanalyse, Schallemissionsanalyse und Prüfung mit geführten Wellen, unterschieden.

3.2.4.1 Modalanalyse

Das Prinzip der Modalanalyse basiert auf der Messung der Schwingungen und Vibrationen eines Körpers. Bei einer bestimmten Eigenfrequenz entsteht eine charakteristische Art der Schwingungsform eines Objektes, welche als sogenannte Schwingungsmode bezeichnet wird.

Bewegende Elemente, vor allem rotierende, erzeugen eine Eigenresonanz, eine Eigenmode und eine Modenformkrümmung. Die Auswertung dieser Besonderheiten mit Hilfe von neuronalen Netzen ermöglicht es die Schwingungsmessung durchzuführen.

Veränderungen im System bzw. im Material (Rissbildung, Defekte) beeinflussen die Eigenresonanz der Maschine/ des Objektes, welche wiederum erkannt und ausgewertet werden kann. Durch die Analyse der Eigenmode mittels Vergleiches zweier Schwingungsformen desselben Systems können Rückschlüsse auf die Veränderungen gemacht werden.⁸⁶

3.2.4.2 Körperschallanalyse

Alle Maschinenelemente wie z.B. Kugellager, Wellen, Motoren Pumpen etc. erzeugen kontinuierlich Schall, welcher sich in der Luft (Luftschall) oder in einem System (Körperschall, siehe auch Kap. 3.2.1 S. 12) ausbreitet. Der Frequenzbereich des Schalls liegt hierbei sowohl im hörbaren als auch im Ultraschallbereich.

Durch Ultraschallsensoren kann hierbei auch die Eigenresonanz der gewünschten Maschinen ermittelt und beobachtet werden. Durch Veränderungen der Frequenzen kann auch auf Veränderungen (Verschleiß, Beschädigung, etc.) im System geschlossen werden.⁸⁶

⁸⁵ Christian Probst (2015), Online-Quelle [23.September.2020]

⁸⁶ Vgl. Florian F. Linscheid (2019), Online-Quelle [24.September.2020]

3.2.4.3 Schallemissionsanalyse

Auftretende Defekte in einem System während eines Prozesses erzeugen Signale im Ultraschallbereich, die sich wiederum durch das Bauteil ausbreiten. Diese Signale werden in der Schallemissionsanalyse detektiert, verarbeitet und analysiert. Diese Analyse dient zur Aufzeichnung der Defektentstehung und bezüglich ihrer Intensität und Anzahl auszuwerten. Durch die Verwendung eines Sensornetzwerkes wird die Ortung des Schallsignales ermöglicht.

Merkmale für die Analyse der Schallemissionssignale:

- Länge des Signals
- Maximale Amplitude
- Anstiegszeit
- Mittlere Frequenz
- Spektrale Leistungsdichte
- Vorzugsfrequenzen
- Gewichtete Frequenzen

Durch die Entstehung neuer Schäden treten im System transiente Signale (Schallemissionssignale) auf. Da die Messung auf Grund dieser Veränderungen ausgelöst wird, wird keine durchgehende Aufzeichnung benötigt und die erzeugte Datenmenge somit wesentlich verringert. Viele Schallemissionen weisen nur eine geringe Amplitude auf, die nur mit hoch empfindlichen piezokeramischen Sensoren erfasst werden können.⁸⁷

3.2.4.4 Prüfung mit geführten Wellen

Die Prüfung mit geführten Wellen wird auch als eine aktive Messmethode angesehen, da ein Transducer (Energiewandler) auf einer dünnwandigen Struktur angeregt wird. Durch diesen Vorgang kommt es zu einer parallelen Ausbreitung der Wellen auf der Unter- und Oberseite der Struktur. Im selben Zuge kommt es zu einer Interferenz und es entstehen Lamb- bzw. geführte Wellen.

Mehrere Sensoren, wobei es sich bei diesen sowohl um aktive als auch um passive Sensoren handeln kann, werden optimal verteilt am Objekt angebracht. Bei jedem Prüfvorgang kommt es zur Anregung mittels Signalgeber eines Teiles der Sensoren, während der andere Teil die ausgesendeten Signale empfängt. Sollten Defekte im Material vorhanden sein, so verändert sich der Propagationpfad der Welle. In weiterer Folge wird die Amplitude gedämpft und es kommt gleichzeitig zu einer Veränderung des Frequenzspektrums. Passende Auswertemethoden können Informationen über Ort und Größe der Defekte liefern.⁸⁷

⁸⁷ Vgl. Florian F. Linscheid (2019), Online-Quelle [24.September.2020]

3.2.4.5 Vor- und Nachteile der Analysen

Überwachungsmethode	Vorteile	Nachteile
Modalanalyse	<ul style="list-style-type: none"> • Einfach zu implementieren • Sensibel im Niederfrequenzbereich 	<ul style="list-style-type: none"> • Frequenzänderungen stark von Umweltbedingungen abhängig • Nicht alle Defekte bedingen zwangsläufig Frequenzverschiebung • Keine Mikrorisse detektierbar
Körperschallanalyse	<ul style="list-style-type: none"> • Überwachung von umlaufenden oder sich bewegendenden Prozessen • Für Anomalie- als auch Rissdetektion geeignet • Anwendbar im Hörschall- und Ultraschallbereich 	<ul style="list-style-type: none"> • Kontinuierlicher Datenstream stellt hohe Anforderungen an Rechenleistung und Speicherkapazität
Schallemissionsanalyse	<ul style="list-style-type: none"> • Geeignet für die Detektion von Mikrorissen, Impactschäden und Reibgeräusche • Bei Verwendung eines Sensornetzwerks Ortung der Signalquelle möglich • Vorwiegend im Ultraschallbereich bis 1 MHz 	<ul style="list-style-type: none"> • Nur anwendbar auf Brüche, die während der Aufnahme entstehen • Für zuverlässige Detektion ist eine hohe Sensordichte notwendig
Geführte Wellen	<ul style="list-style-type: none"> • Geeignet für die Ortung von bereits bestehenden Defekten • Weniger anfällig für Hintergrundrauschen, da der aktive Signalpegel angepasst werden kann 	<ul style="list-style-type: none"> • Interpretation der Signale mitunter schwierig • Für zuverlässige Detektion ist eine hohe Sensordichte notwendig

Tab. 3-6: Vor- und Nachteile der Ultraschall/ Akustik Analysen⁸⁸

3.2.5 Strom- und Spannungsüberwachung

Die meisten CM-Systemen, beziehen sich auf mechanische Defekte, allerdings besteht auch die Möglichkeit Probleme über das elektrische Verhalten zu erkennen. Dabei werden die Ströme, die durch eine Maschine fließen, gemessen und auf ungewöhnliche Spannungen überprüft.

Strom- und Spannungsüberwachungsgeräte erkennen Unregelmäßigkeiten in der Stromversorgung von Maschinen, z.B. wenn zu viel oder auch zu wenig Strom fließt, damit das Gerät mit der korrekten Leistung funktioniert. Des Weiteren kann auch eine Störung oder Unterbrechung des Stromflusses/ Stromkreises erkannt werden.

Ein erhöhter Stromanstieg kann z.B. auch durch einen Anstieg der benötigten Motorleistung, aufgrund von zunehmender Reibung (beschädigtes Lager, keine Schmierung, etc.), verursacht werden. Ein weiterer Grund dafür wäre auch ein Kurzschluss in der Motorwicklung.⁸⁹

⁸⁸ Vgl. Florian F. Linscheid (2019), Online-Quelle [24.September.2020]

⁸⁹ Vgl. Philips (2020), Online-Quelle [25.August.2020]

4 CONDITION MONITORING – SIEMENS SIPLUS CMS

Das Condition Monitoring System von Siemens wird als SIPLUS CMS bezeichnet. Dieses System überwacht permanent den Zustand der mechanischen Komponente einer Maschine bzw. Anlage. Je nach Anforderungen an die CM unterteilt sich dieses System in drei Module, welche sich zusätzlich auch in die Automatisierung integrieren lassen. Durch dieses Einbinden wird auch eine Entscheidungshilfe für die Betreiber, Instandhalter und das Management gegeben (Abb. 4-1, S. 46).

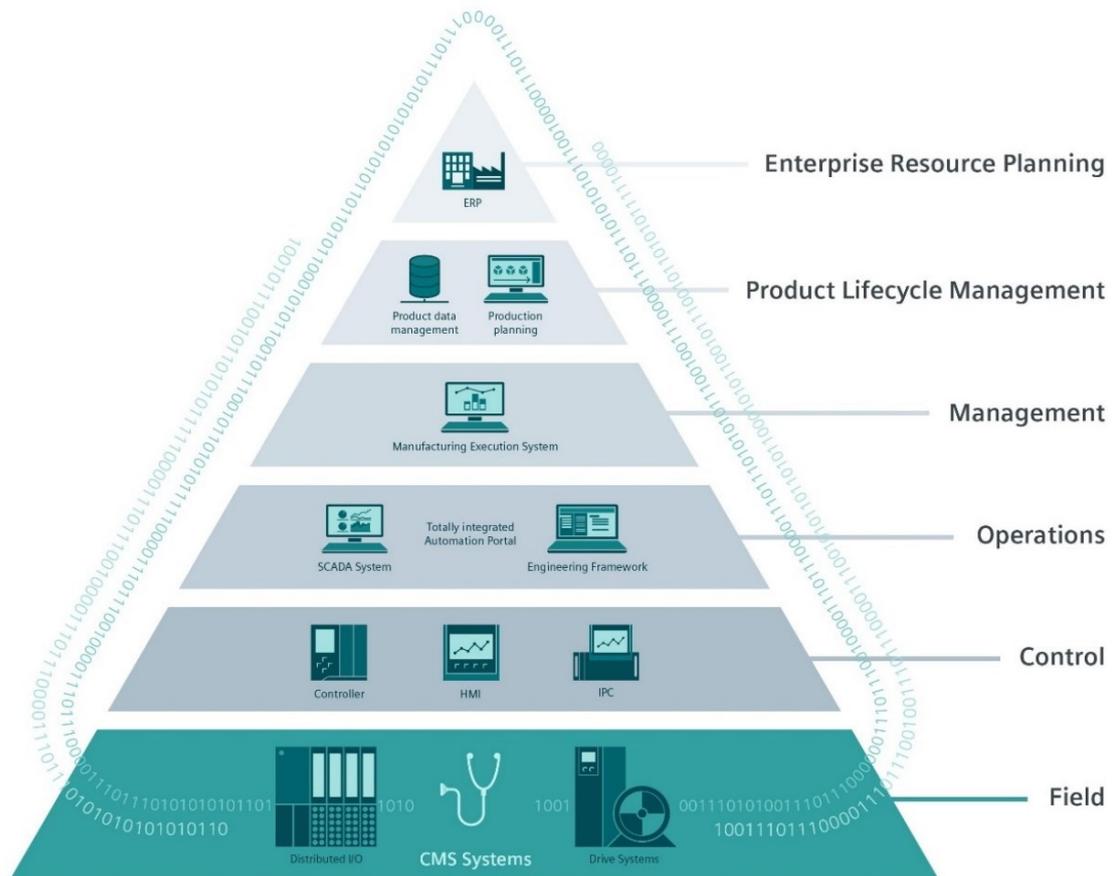


Abb. 4-1: Verwendungspyramide der Daten aus der CMS⁹⁰

Die Einbindung des SIPLUS CMS in die Automatisierung geschieht über das Programmierprogramm TIA (Totally Integrated Automation) – Portal, TIA-Portal ist die Programmiersoftware für eine Siemens SPS (Speicherprogrammierbare Steuerung). Des Weiteren ist auch, aufgrund der offenen Systemarchitektur und des Zusammenspiels der Automatisierungsbereiche, eine anlagenweite Zustandsüberwachung der mechanischen Bereiche möglich. Das zusätzliche Programm SIPLUS CMS X-Tool ermöglicht auch weitere Analysen der beobachteten Komponenten über z.B. die Ausgabe weiterer Grafiken.⁹⁰

⁹⁰ Vgl. Siemens AG (2020), Online-Quelle [10.10.2020]

4.1 SIPLUS CMS1200

Das SIPLUS CMS1200 wird in Kombination mit einem SIMATIC S7-1200 Modul für die kontinuierliche Zustandsüberwachung eingesetzt. Somit können kritische mechanische Bauteile, wie z.B. Pumpen, Motoren oder Lüfter, überwacht und analysiert werden. Ohne eine Zusätzliche Software ist es möglich bis zu 28 Schwingungssensoren pro CPU (Central Processing Unit) anzuschließen. Weitere Prozessgrößen wie unter anderem Temperatur, Drehmoment oder Druck können über das zusätzliche S7-1200 Modul aufgezeichnet werden. Die aufgezeichneten Daten werden anschließend von der, in dem CMS1200 integrierten Software, analysiert und auf das CM-Modul SM 1281 übertragen und gespeichert. In Kombination mit dem TIA-Portal ist es somit möglich diese CM Lösung komplett in die Automatisierung zu integrieren.⁹¹

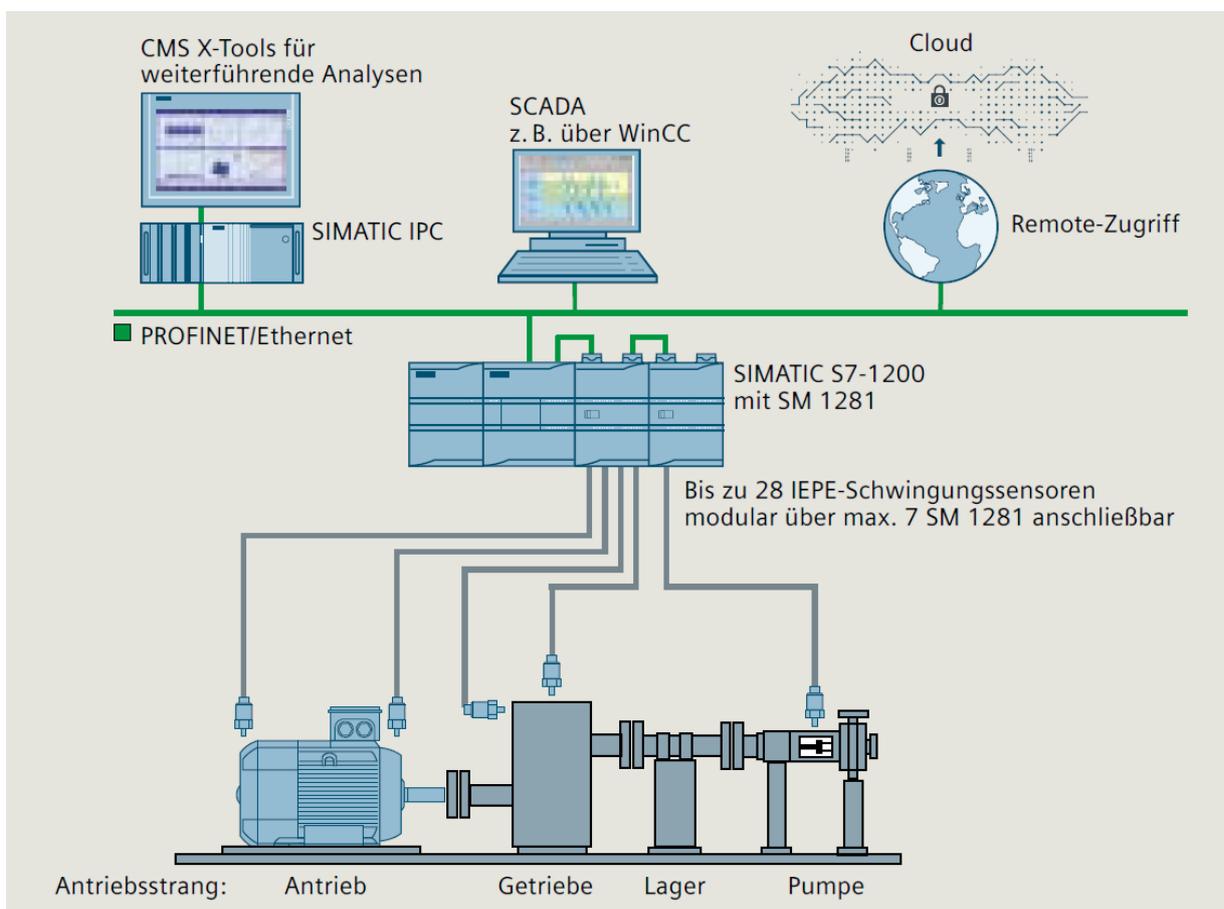


Abb. 4-2: Schema mit SIPLUS CMS1200⁹¹

⁹¹ Siemens AG (2018), Online-Quelle [10.Okttober.2020]

4.1.1 Eigenschaften

- Software für kennwertbasierte und frequenzselektive Analysen on Board (Analysealgorithmen)
- Einfache Archivierung der Daten auf eigenem Speicher
- Weitere Analysemöglichkeiten der Rohdaten
- Anschließbar:
 - 4 IEPE-Schwingbeschleunigungssensoren pro SM 1281
 - 1 Sensor zur Drehzahlerfassung pro SM (Signal/ Sensor Modul)
 - Bis zu 7 SM 1281 pro S7-1200 CPU
- SIMATIC S7-1200 basiertes Condition Monitoring via TIA Portal ab V13 SP1
- Kennwerte (Lager-, Schwingungsüberwachung)
- Frequenzselektive Analyse mittels FFT, H-FFT
- Grenzwertüberwachung von Frequenzbändern, Prozessgrößen, Temperatur
- Aufzeichnung mit Zeitstempel von Trendwerten, Rohdaten, Frequenzspektren, Meldearchiv
- Online-Datenstreaming zur Analyse-Software CMS X-Tools
- Ausgabe von System- und Statusmeldungen
- Export von Rohdaten für weitere Diagnosen
- Rohdaten-/Trend-Langzeitspeicherung im SM 1281
- Visualisierung via Webbrowser⁹²

4.2 SIPLUS CMS2000

Das SIPLUS CMS2000 ist im Gegensatz zur dem SIPLUS CMS1200 eine Stand-alone-Lösung und kann somit eigenständig betrieben werden (Abb. 4-3, S. 49). Diese Ausführung ist daher nicht vom Automatisierungssystem abhängig. Dieses CMS ermöglicht, ohne eine zusätzliche Software, die Aufnahme von Schwingungssensorsignalen welche anschließend auch ausgewertet, diagnostiziert und mittels Webbrowser visualisiert werden können. Um das System für einen Anwendungsbereich anzupassen, kann dieses über den Webbrowser parametrierbar werden. Dadurch wird sowohl die Handhabung für das Servicepersonal als auch die Installation eines Remote-Zugriffes erleichtert. Der modulare Aufbau ermöglicht eine spezifische Anpassung an die Anlage und kann je nach dem für welche Kenngröße das Monitoring etabliert wird, wie. z.B. Schwingungen, Temperatur, Druck oder Drehzahl, ausgeführt werden.

Es besteht zusätzlich auch noch die Möglichkeit, z.B. über Binärsignale bei Erreichen der Grenzwerte, aktiv in die Steuerung einer Anlage einzugreifen.⁹²

⁹² Vgl. Siemens AG (2018), Online-Quelle [10.Oktober.2020]

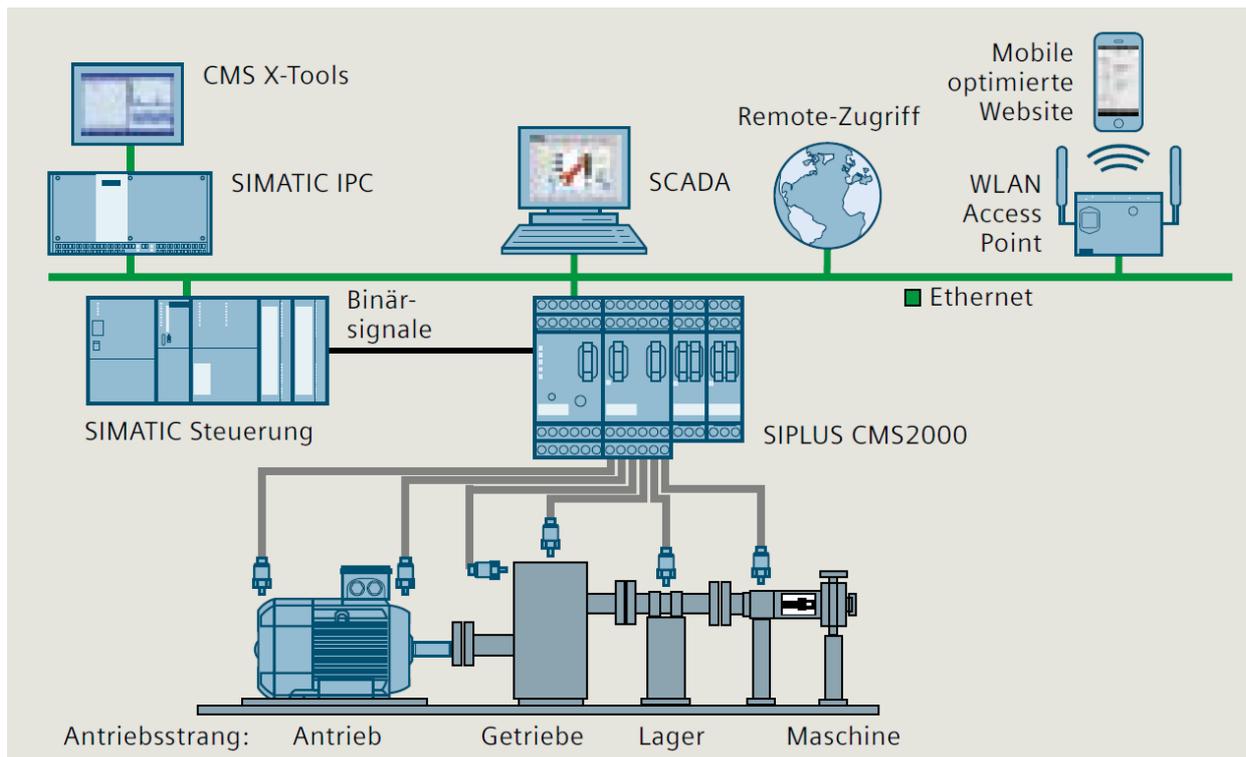


Abb. 4-3: Schema mit SIPLUS CMS2000⁹³

4.2.1 Eigenschaften

- Software für kennwertbasierte und frequenzselektive Analysen on Board (Analysealgorithmen)
- Anschließbar:
 - 2 IEPE-Schnittstellen für Schwingungssensoren
 - 2 analoge Eingänge
 - 1 Drehzahleingang
 - 2 Digitaleingänge, 3 Digitalausgänge
- Erweiterungen:
 - Temperaturmodule (max. 2)
 - SIPLUS CMS2000 VIB-MUX (Vibration Multiplexer): max. 2 für insgesamt 9 oder 16 IEPE-Schwingungssensoren
- Kennwerte (Lager-, Schwingungsüberwachung)
- Frequenzselektive Analyse mittels FFT, H-FFT
- Grenzwertüberwachung von Frequenzbändern, Prozessgrößen, Temperatur
- Aufzeichnung mit Zeitstempel von Trendwerten, Rohdaten, Frequenzspektren, Meldearchiv
- Einfache Schadenslokalisierung durch Fingerprint-Vergleich
- Ausgabe von System- und Statusmeldungen
- Export von Rohdaten für weitere Diagnosen

⁹³ Vgl. Siemens AG (2018), Online-Quelle [10.Okt.2020]

- Web-Server und E-Mail-Benachrichtigung
- Zeitsynchronisation über LAN
- Diagnoseunterdrückung über Inhibit-Eingang⁹⁴

4.3 SIPLUS CMS4000

Das Stand-alone-System SIPLUS CMS4000 bietet die Möglichkeit nicht nur einzelne Maschinenkomponenten, sondern auch komplette Anlagen zu überwachen. Die Analyse geschieht unabhängig der Komplexität oder der Dynamik der Produktionsprozesse, da das System mit den Anforderungen wächst. D.h. über das CMS X-Tools können alle benötigten Funktionen bereitgestellt werden (Abb. 4-4, S. 50). Da das CMS4000 skalierbar und frei projektierbar ist lassen sich auch eigene Analysemodelle erstellen und Prozessdaten der Steuerungen können integriert werden. Das autarke System lässt sich auch in jede Automatisierungsumgebung integrieren.⁹⁴

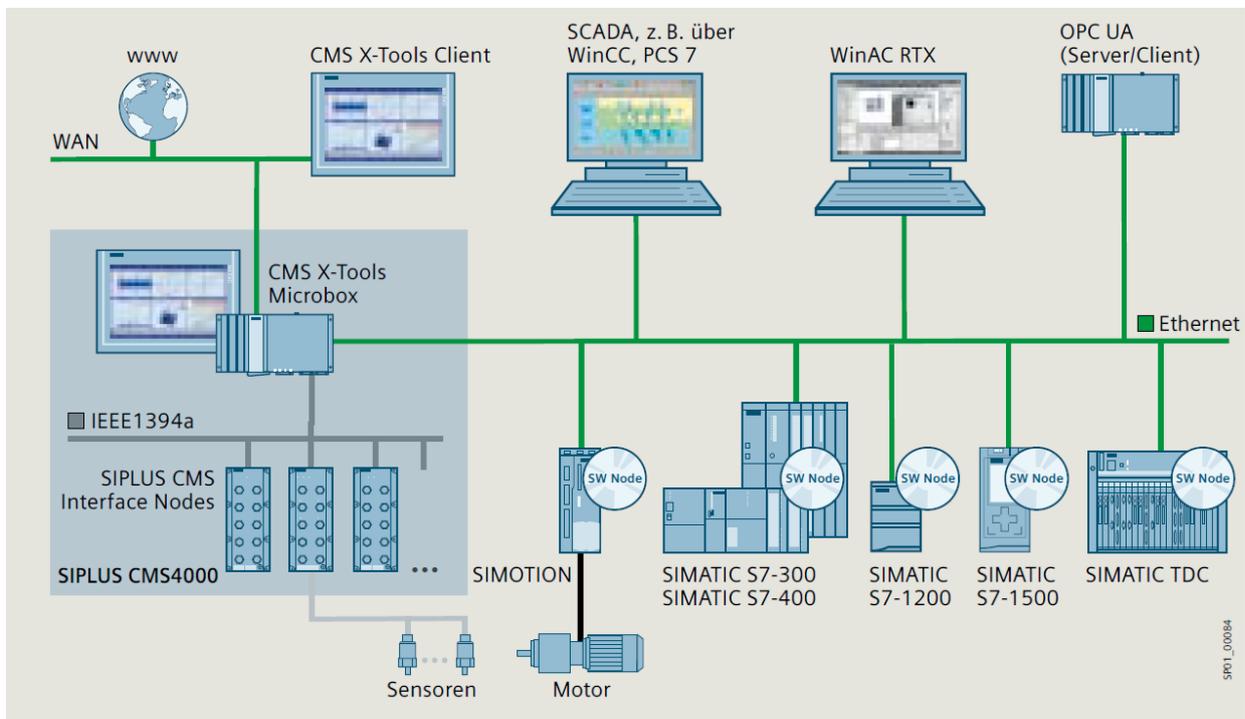


Abb. 4-4: Schema mit SIPLUS CMS4000⁹⁴

4.3.1 Eigenschaften

- Anschluss von bis zu 30 Hardware Interface Nodes (IFN) zur Erfassung von Schwingbeschleunigungs- und Analogsignalen sowie zur Gleitlagerüberwachung über Distanzmessung
- Software-Nodes (Software-IONs) als Funktionsbausteine, deren maximale Anzahl anlagenspezifisch ist

⁹⁴ Vgl. Siemens AG (2018), Online-Quelle [10.Oktober.2020]

- Bus-Technologie: IEEE1394a (Firewire) zum Übertragen der Messwerte auf einen PC (z. B. Microbox), große Reichweite über LWL-Repeater (500 m)
- Analysesoftware CMS X-Tools
- Erfassung „mechanischer“ Signale bis zu 180 Sensoren – zeitsynchron und in Echtzeit mit einer Abtastrate von bis zu 192 kHz
- IFNs direkt an der zu überwachenden Mechanik montierbar – dank hoher Schutzart IP67
- Prozessdatenerfassung über Software-IONs direkt aus SIMATIC S7, SIMATIC TDC und SIMOTION; Datenübergabe an CMS X-Tools mittels TCP/IP-Kommunikation⁹⁵

4.4 CMS X-Tools

CMS X-Tools ist ein PC-basiertes Messsystem (eine Software), welches für eine rückwirkungsfreie Messung von analogen, binären und numerischen Signalen in Industrieanlagen entwickelt wurde. Aufgrund der Abtastrate von 192 kHz können hochdynamische Vorgänge mit einer hohen Auflösung aufgezeichnet werden. Für den Bereich des Condition Monitorings ist auch ein hoher Grad grafischer Konfigurierung und Parametrisierung möglich. Aufgrund des leistungsfähigen Triggers ist es auch möglich umfangreiche Messaufgaben durchzuführen. Je nach Bedarf und Anforderung können die gewünschten Messdaten ausgewertet, analysiert, visualisiert und ausgegeben bzw. weitergegeben werden.⁹⁶

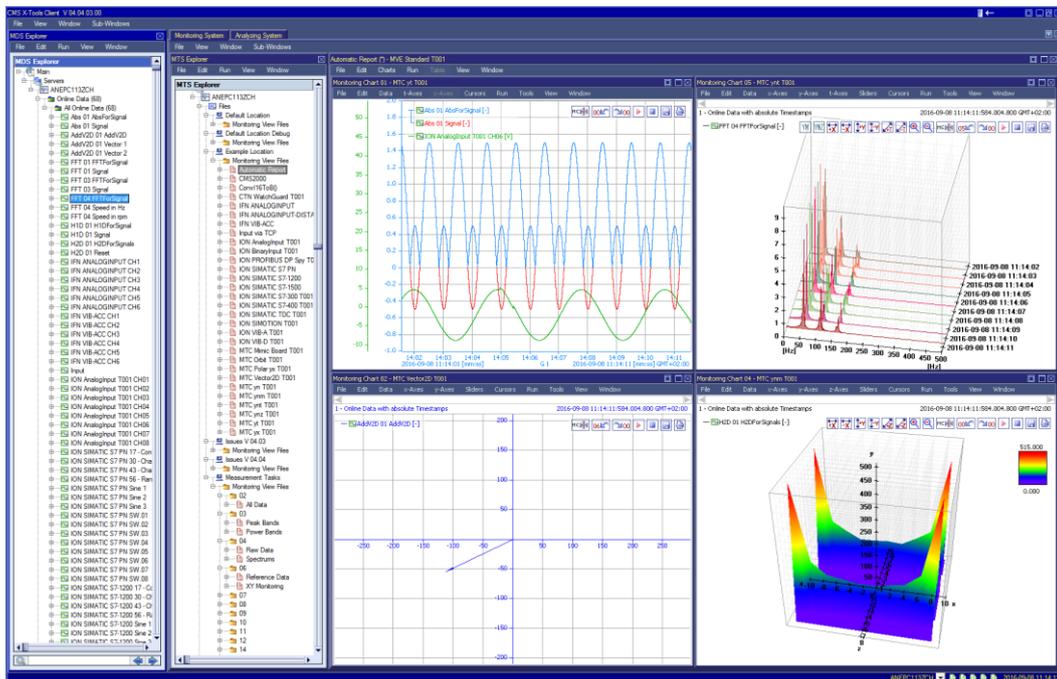


Abb. 4-5: Beispiel CMS X-Tools⁹⁷

⁹⁵ Vgl. Siemens AG (2018), Online-Quelle [10.Oktober.2020]

⁹⁶ Vgl. Siemens AG (2016), Online-Quelle [11.Oktober.2020]

⁹⁷ Vgl. ALFA-NET (2003), Online-Quelle [10.Oktober.2020]

5 ANALYSE UND AUSWERTUNG DER CM-METHODEN

Die unterschiedlichen Condition Monitoring Methoden ermöglichen eine umfangreiche Analyse des Zustandes einer Anlage oder einer Maschine bzw. einer Komponente. Jedoch kann nicht jedes Verfahren für jeden Anwendungsfall herangezogen werden, da die einzelnen Methoden für unterschiedliche Spezifikationen entwickelt wurden.

Für das Arbeits- und Kundenumfeld der Firma PMS Elektro- und Automationstechnik GmbH finden jedoch alle oben erläuterten Methoden (siehe Kap. 3.2, ab S. 11) einen Einsatz, da die Vielfältigkeit des Kundenspektrums dies ermöglicht. Die Entscheidung für das geeignete CM-System ist somit von der jeweiligen Anlage abhängig.

Die Entscheidungskriterien für die passende Wahl setzen sich somit wie folgt zusammen:

- Mechanisches und/oder elektrisches System
- Bestands- und/oder Neuanlagen
- Starre und/oder bewegende Elemente
- Feste und/oder flüssige Komponente
- Geräuscharm oder geräuschvolle Umgebung
- Genau definierte oder allgemeine Problemerkennung
- Kontinuierliche oder periodische Datenerfassung
- Einbindung in die Steuerung/Automatisierung

Die folgenden Betrachtungen und Analysen der Methoden richten sich primär auf jene Verfahren, welche sich auch in die Automatisierung einbinden lassen. Der Eingriff in das Steuerungsverhalten eines Prozesses soll zur Verringerung, im besten Fall sogar zur Vermeidung, von Schäden an der Maschine oder der einzelnen Komponenten beitragen.

5.1 Betrachtung: Schwingungsanalyse

Die Schwingungsanalyse wird zur Erfassung, Aufzeichnung und Auswertung von Schwingungen bzw. Vibrationen in einer Anlage/ an einer Maschine oder zugehörigen Komponente verwendet.

➤ **Mechanisches und/ oder elektrisches System**

Grundsätzlich befinden sich in jeder Produktionsanlage bewegliche mechanische Komponenten und Maschinen. Sobald eine Bewegung durchgeführt wird, kann es zum Auftreten von Vibrationen kommen. Somit ist bereits eine gewisse Grundschiwingung vorhanden, die im Normalfall allerdings keine Probleme bzw. Schäden verursacht.

In mechanischen Systemen kann die Schwingungsanalyse Verhaltensänderungen in Form von Abweichungen zur Grundschiwingung erkennen. Im Fall, dass die Veränderungen außerhalb des Toleranzbereiches bzw. des erlaubten Bereiches liegen, kann der Rückschluss getroffen werden, dass in dem jeweilig betrachteten Bereich ein Problem vorliegt.

➤ **Bestands- und/oder Neuanlagen**

Die Schwingungsanalyse lässt sich sowohl für bestehende Anlagen nachrüsten als auch in Neuanlagen direkt in das System einbinden.

Da die Schwingungssensoren z.B. auch außerhalb eines Motors angebracht werden können, ist das Einpflegen dieser CM-Methode in eine bestehende Anlage möglich. In einer Bestandsanlage wird die Grundschiwingung etwas höher sein, da die einzelnen Elemente, abhängig von der Betriebszeit, schon ein gewisses „Spiel“ zu einander haben.

Grundsätzlich sollten bei einer Neuanlage keine starken Vibrationen, die potenziell Schäden verursachen könnten, auftreten. Jedoch können durch das Einbinden der Schwingungsmessung eventuelle Konstruktions- oder Montagefehler frühzeitig erkannt werden, wie z.B. einen Unwucht- oder einen Ausrichtefehler. Somit kann auch bei Neuanlagen schon dementsprechend proaktiv reagiert werden, um einen bevorstehenden Schaden zu verhindern.

➤ **Starre und/oder bewegende Elemente**

Die Schwingungserfassung kann bei starren, aber auch teilweise auf beweglichen Elementen, wie z.B. einem Schlitten oder Fördersysteme, aber nicht auf rotierenden Teilen, angebracht werden.

Bei feststehenden Komponenten können die Sensorsysteme direkt am Motor, am Lagerbock, an Befestigungen etc. angebracht werden. Hierbei hängt allerdings die Aussagekraft der Messung auch von der Positionierung der Systeme ab, da die Schwingungen über mehrere Bauteile übertragen werden können. Dementsprechend wird die Lokalisierung des Problems erschwert.

Die Vibrationsmessung an beweglichen Teilen kann allerdings nur in einem gewissen Ausmaß erfolgen, da die Verkabelung der Sensoren eine Problematik darstellt. Um dieses Problem zu umgehen, gibt es allerdings bereits die Möglichkeit der kabellosen Messsysteme.

➤ **Feste und/oder flüssige Komponente**

Die Schwingungsausbreitung geschieht hier hauptsächlich über feste Komponenten und kann somit auch nur bei diesen gemessen werden.

➤ **Geräuscharm oder geräuschvolle Umgebung**

Die Geräusentwicklung hat auf die Schwingungsanalyse keinen Einfluss. Eine steigende Vibrationsstärke kann einen Anstieg der Geräusentwicklung verursachen.

➤ **Genau definierte oder allgemeine Problemerkennung**

Die Genauigkeit der Schwingungsanalyse ist auch von der Anordnung der Sensoren abhängig.

Für eine sehr genaue Problemortung müssen die Schwingungssensoren direkt am betrachteten Element (Motor, Lager(bock), Schlitten, etc.) angebracht werden. Dies hat jedoch wiederum die Folge, dass hierfür mehrere Sensoren benötigt werden.

Werden allerdings mehrere Elemente auf dieselbe Befestigung montiert, kann an dieser auch die Vibration gemessen werden. Da die Schwingung über die Befestigung weitergeleitet wird, kann sich hierbei die Problemlokalisierung nur auf einen gewissen Bereich und nicht auf eine fixe Position beziehen.

➤ **Kontinuierliche oder periodische Datenerfassung**

Die Schwingungsanalyse wird als kontinuierliche Erfassung verwendet, da sich das Systemverhalten plötzlich ändern kann. Daher könnten bei einer periodischen Abfrage solche Probleme nicht erkannt werden.

➤ **Einbindung in die Steuerung/Automatisierung**

Viele CM-Systeme besitzen bereits standardmäßig unter anderem die Möglichkeit die Schwingungsmessung auszuwerten. Da das CMS diese Messung bearbeiten und gleichzeitig auswerten kann, können auch die benötigten Signale direkt in die Steuerung integriert werden.

5.2 Betrachtung: Schmiermittel- / Ölanalyse

Die Schmiermittel- bzw. Ölanalyse ermöglicht eine detaillierte Analyse der Anlagenkomponenten. Das Schmiermittel enthält wichtige Informationen über den Zustand der geschmierten Elemente. Die mitgeführten Partikel geben Rückschlüsse auf vorhandene Schäden welche zusätzlich auch den Bauteilen und der Verschleißart zugeordnet werden können.

➤ **Mechanisches und/oder elektrisches System**

Die Schmierung erfolgt grundsätzlich nur in mechanischen Systemen, da hier ein Kontakt zwischen zwei Reibflächen entsteht. Die Bewegungsvorgänge, dynamische Belastungen und das Alter führen auch zum Verschleiß der Komponenten. Der dadurch entstehende Abrieb an den Oberflächen oder die chemischen Reaktionen im Schmiermittel führen zu einer Kontamination des Schmierstoffes. Durch eine genaue Analyse des Schmiermediums ist es somit möglich, den mechanischen Verschleiß zu erkennen und zu identifizieren.

➤ **Bestands- und/oder Neuanlagen**

Die Schmiermittelanalyse kann je nach vorhandener Gegebenheit nachgerüstet werden. Dazu muss lediglich ein Zugang zum Medium geschaffen werden.

Bei Neuanlagen kann dies schon im Vorfeld mit eingeplant werden. In diesem Fall sollten grundsätzlich keine Verunreinigungen im System erkannt werden. Allerdings können so bei der Betriebsphase zu Beginn auch Probleme bzw. Fehler frühzeitig erkannt werden bevor diese in absehbarer Zeit zu Schäden führen können.

➤ **Starre und/oder bewegende Elemente**

Die Schmierung der beweglichen Elemente befindet sich hauptsächlich an den feststehenden Teilen. Es gibt jedoch Ausnahmen wie z.B. bei einem Schlittensystem, bei dem die Schmierung an der beweglichen Komponente geschieht.

Die Schmierstoffanalyse wird grundsätzlich bei einer starren Leitung durchgeführt, da das Schmiermedium einen geschlossenen Kreislauf mit fixen Leitungen aufweist.

➤ **Feste und/oder flüssige Komponente**

Die Analyse bezieht sich nur auf die flüssigen Elemente der Anlagenschmierung wie z.B. den unterschiedlichen Schmierstoffen oder Schmierölen.

➤ **Geräuscharm oder geräuschvolle Umgebung**

Die Geräusentwicklung hat keine Auswirkung auf die Schmierstoffanalyse, da die Akustik das flüssige Medium nicht verändert.

➤ **Genau definierte oder allgemeine Problemerkennung**

Die genaue Analyse des Schmierstoffes erlaubt eine genaue Erkennung des Problems. Der Verschleiß kann entweder der Adhäsion, dem abrasiven Verschleiß, der tribochemischen Reaktion oder der Materialermüdung zugeordnet werden. Zusätzlich kann aus der Analyse eine Verschleißmessung durchgeführt werden, welche auch die Schwere des Verschleißvorganges ermitteln kann.

➤ **Kontinuierliche oder periodische Datenerfassung**

Beim Großteil der Analyseverfahren muss das Schmiermittel dem System entnommen und separat behandelt werden. Demzufolge ist hierbei nur eine periodische Datenerfassung möglich. Im Normalfall ist eine Entnahme in gewissen Abständen auch ausreichend für die Bewertung des Verschleißes, da die Verschleißmechanismen nicht plötzlich, sondern „schleichend“ auftreten.

Alternativ jedoch ermöglicht das Mehrkanal-IR-Messsystem eine kontinuierliche Messung, da die Auswertung direkt im Leitungssystem integriert werden kann.

➤ **Einbindung in die Steuerung/Automatisierung**

Die Einbindung in die Steuerung kann nur bedingt funktionieren, da der Großteil der Schmierstoffanalyseverfahren keine kontinuierlichen Messungen durchführen können. Die Daten der separat durchgeführten Messung können anschließend in die Steuerung übertragen und dort ausgewertet werden.

Mittels der Mehrkanal-IR-Messung wäre es allerdings möglich, die Daten direkt in die Steuerung zu lesen und dort auszuwerten. Somit können die Messergebnisse kontinuierlich betrachtet werden.

5.3 Betrachtung: Temperaturmessung

Die Temperaturmessung wird zur Überprüfung der Wärmeentwicklung und Ausbreitung an einer Maschine oder Anlage verwendet, ermöglicht Problemstellen rechtzeitig zu erkennen und zu identifizieren. Eine erhöhte Wärmeentwicklung kann zur Schwächung der Materialien und zur Beschädigung der Lagerkomponenten führen.

➤ **Mechanisches und/oder elektrisches System**

Ein Temperaturanstieg kann in mechanischen, als auch in elektrischen Systemen vorkommen. Somit kann die Temperaturmessung zur Überwachung beider Arten von Anlagenteilen herangezogen werden.

Eine Wärmeentwicklung in mechanischen Komponenten entsteht meist durch eine erhöhte Reibung. Daraus kann geschlossen werden, dass eine schlechte/ fehlende Schmierung oder Kühlung sowie eine defekte Lagerung vorhanden ist.

Wärmeentwicklungen in elektrischen Systemen weisen oft auf einen Kurzschluss oder Überlast hin. Zu hohe Temperaturen können auch zur Beschädigung und Zerstörung von elektrischen und elektronischen Bauteilen führen.

Aufgrund der Wärmeausbreitung über die metallischen Bauteile, kann es somit auch zum Temperaturanstieg in Bereichen kommen, in denen kein Problem vorhanden ist. Der Ursprung der Wärmeentwicklung liegt somit im heißesten Bereich des Systems.

➤ **Bestands- und/oder Neuanlagen**

Bestandsanlagen können mit Temperaturmessungen nachgerüstet werden, da viele Messsysteme die Oberflächentemperatur eines Bauteiles erfassen. Die berührungslose Variante bietet auch die Möglichkeit schwer zugängliche Bereiche zu analysieren.

Die Messung bei Neuanlagen kann allerdings schon systematisch an möglichen Problemstellen erfolgen, um somit eine optimale Auswertung zu gewährleisten. Zusätzlich kann der Betrieb in der Erstphase überwacht werden, um mögliche Fehler in der Anlage frühzeitig zu erkennen. Somit können Problemstellen noch vor dem Eintreten von Schäden erkannt und analysiert werden.

➤ **Starre und/oder bewegende Elemente**

Starre Elemente können problemlos einer Temperaturüberwachung unterzogen werden. Die berührende Temperaturmessung, welche verkabelt wird, ist allerdings an die Flexibilität der Signalleitungen gebunden und kann somit an z.B. rotierenden Elementen nicht verwendet werden.

Die berührungslose Temperaturmessung kann problemlos sowohl starre als auch bewegliche Elemente erfassen und auswerten.

➤ **Feste und/oder flüssige Komponente**

Die Analyse der Temperatur kann ohne Weiteres an festen Komponenten durchgeführt werden. Hierbei kann der Temperatursensor direkt an der Oberfläche befestigt werden, an der somit die Temperatur erfasst wird.

Zusätzlich gibt es auch Temperatursensoren, die je nach Ausführung, die Temperatur einer Flüssigkeit in einer Leitung oder in einem Behälter messen kann.

Das Abgreifen des Wärmegrades ist somit für alle Komponenten, mit entsprechendem Zugang, in einem System möglich.

➤ **Geräuscharm oder geräuschvolle Umgebung**

Die Geräuschentwicklung hat keinen Einfluss auf die Temperaturmessung.

➤ **Genau definierte oder allgemeine Problemerkennung**

Gut platzierte Sensoren, d.h. in Bereichen von bekannten Problemstellen, liefern eine sehr genaue Standortinformation des Defekts.

Da sich die Wärme über die wärmeleitenden Elemente ausbreitet, kann die Position des Problems bei schlecht platzierten Sensoren nicht genau bestimmt werden. Es kann somit nur ein gewisser Bereich ermittelt bzw. angenommen werden.

➤ **Kontinuierliche oder periodische Datenerfassung**

Die Temperaturmessung liefert eine kontinuierliche Datenerfassung, da diese permanent abgerufen wird.

➤ **Einbindung in die Steuerung/Automatisierung**

CMS bieten, gleich wie für die Schwingungsanalyse, standardmäßig unter anderem auch die Möglichkeit der Temperaturmessung an. Die CMS ermöglichen es, die erfassten Daten auszuwerten um diese anschließend in die Steuerung bzw. in die Automatisierung zu integrieren. Dies ermöglicht eine Reaktion der Steuerung auf die Temperaturänderung.

5.4 Betrachtung: Ultraschall- / Akustische Überwachung

Die Ultraschall-/akustische Überwachung dient zur Erkennung der Geräuschentwicklung. Ein gewisser Geräuschpegel ist im Betrieb in einem gewissen Ausmaß immer vorhanden. Ändert sich dieser jedoch abrupt oder auch über einen gewissen Zeitraum, so ist dies auf ein Problem im System zurück zu führen.

➤ **Mechanisches und/oder elektrisches System**

Die größte Geräuschentwicklung geht von der Bewegung der mechanischen Komponenten aus. Hierbei werden oft Kontaktflächen gelöst und wieder in Berührung gebracht. Durch eine Beschädigung eines mechanischen Teiles, kann es zu einem höheren Lärmpegel kommen, da z.B. Kontaktflächen nicht mehr gleichmäßig in Berührung kommen da etwas abgebrochen (z.B. Zahn eines Zahnrades oder Zahnstange) ist und somit der nächste Kontakt intensiver ausgeführt wird.

Elektrische Systeme können auf Grund von Störungen bzw. defekten Komponenten einen Beitrag zur Geräuschentwicklung liefern wie das z.B. beim „Brummen“ eines Elektromotors der Fall ist. Die Identifizierung eines elektrischen Problems wird allerdings dadurch erschwert, da ein Defekt im elektrischen Bereich meist kein durchgehendes Geräusch verursacht.

➤ **Bestands- und/oder Neuanlagen**

Bestandsanlagen erzeugen je nach Betriebsalter einen höheren Geräuschpegel. Die akustische Überwachung muss daher entsprechend angepasst werden, um eine plausible Auswertung zu bekommen. Schäden, die nur einen geringen Anstieg des Lärmpegels verursachen, können meist erst später erkannt werden, da der allgemeine Pegel schon erhöht ist.

Neuanlagen erzeugen nach dem „Einlaufen“ einen konstanten und geringeren Geräuschpegel als Bestandsanlagen. Der Vorteil dabei ist, dass schon geringe Lärmentwicklungen leichter bzw. schneller erkannt werden können.

Die Ultraschall- bzw. die akustische Überwachung kann jedoch in allen Anlagen eingesetzt werden.

➤ **Starre und/oder bewegende Elemente**

Die akustische Messung bezieht sich sowohl auf der mechanischen als auch auf der elektrischen Seite hauptsächlich auf die beweglichen Elemente. Allerdings können auch Geräusche von starren elektrischen Komponenten wahrgenommen werden. Im Gegensatz dazu kann die Lärmentwicklung im mechanischen Bereich nur durch die Bewegung von Komponenten entstehen.

➤ **Feste und/oder flüssige Komponente**

Während des Betriebs einer Anlage, kann die akustische Analyse nur das Geräusch der festen Komponenten erkennen, da ein konstanter Fluidkreislauf keine auswertbaren Geräusche erzeugt.

➤ **Geräuscharm oder geräuschvolle Umgebung**

Die akustische Überwachung kann in einer geräuschvollen Umgebung sehr schwer eingesetzt werden, da die Stör- und Problemgeräusche in dem erfassten Frequenzspektrum schwer vom Hintergrund unterschieden werden können. Desto leiser die Umgebung ist, umso genauer und präziser kann die Analyse geschehen.

➤ **Genau definierte oder allgemeine Problemerkennung**

Das Geräusch eines Problems kann sich in Form von Schallwellen über die Luft im ganzen Raum verteilen. Somit kann nur durch optimales Platzieren der Sensoren eine genaue Lokalisierung des Problems erzielt werden. Ansonsten ist das Resultat eine unspezifische Problemerkennung, die sich auf einen gewissen Bereich bezieht.

➤ **Kontinuierliche oder periodische Datenerfassung**

Die Datenerfassung erfolgt bei dieser Art der Überwachung kontinuierlich, da die Sensoren permanent ein Signal an die Auswerteeinheit senden.

➤ **Einbindung in die Steuerung/Automatisierung**

Durch das kontinuierliche Erfassen der Sensordaten, ist es über eine geeignete Auswerteeinheit auch möglich die Daten in die Steuerung mit einzubinden.

5.5 Betrachtung: Strom- und Spannungsüberwachung

Die Strom- und Spannungsüberwachung bezieht sich hauptsächlich auf elektrische Defekte im System und auf deren Analyse.

➤ **Mechanisches und/oder elektrisches System**

Eine Änderung des elektrischen Zustandes weist auf Probleme in den elektrischen Komponenten hin. Ein erhöhter Stromanstieg kann allerdings auch indirekt auf ein mechanisches Problem deuten, wie z.B. ein Stromanstieg im Motor, wenn eine mechanische Komponente stecken geblieben ist und dadurch zu einer Überlast erzeugt wird.

➤ **Bestands- und/oder Neuanlagen**

Diese Überwachung kann sowohl bei Bestandsanlagen als auch bei Neuanlagen eingesetzt werden. Die Messung der Ströme und Spannungen kann direkt von einem zentralen Verteilerpunkt erfolgen.

➤ **Starre und/oder bewegende Elemente**

Die elektrische Analyse bezieht sich hierbei auf alle stromdurchflossenen Komponenten, bei denen durch eine Strom- oder Spannungsänderungen Defekte im System erkannt werden können.

➤ **Feste und/oder flüssige Komponente**

Es können nur die festen elektrischen Elemente betrachtet werden.

➤ **Geräuscharm oder geräuschvolle Umgebung**

Die Geräuschentwicklung hat keinen Einfluss auf die Auswertung.

➤ **Genau definierte oder allgemeine Problemerkennung**

Je nach Aufteilung der Stromkreise können und Platzierung der Auswerteeinheiten kann es zu einer sehr präzisen oder aber auch zu einer allgemeinen Problemerkennung kommen.

➤ **Kontinuierliche oder periodische Datenerfassung**

Die Datenerfassung geschieht in dieser Auswertung kontinuierlich, da der Stromkreis durchgehend versorgt wird.

➤ **Einbindung in die Steuerung/Automatisierung**

Je nach Auswerteeinheit, ist es möglich die erfassten Daten direkt auszulesen und in die Steuerung miteinzubinden. Überwachungssysteme ohne die Möglichkeit einer Datenübertragung können nicht miteingebunden werden. Diese müssen direkt vor Ort kontrolliert werden.

6 ANALYSE UND AUSWERTUNG SIPLUS CMS

Das Siemens SIPLUS CMS wird zur permanenten Zustandsüberwachung einer Anlage verwendet. Diese Systeme wurden entsprechend entwickelt, um eine Integration in die Steuerung zu ermöglichen und den Prozess gegeben falls zu beeinflussen.

Bei der Entscheidung zur optimalen Systemvariante werden folgende Betrachtungspunkte berücksichtigt:

- Eigenständig und/oder steuerungsabhängig
- Unterschiedliche Steuerungsvarianten
- Aktiver Prozesseingriff
- Reine Visualisierung zur Überwachung
- Messfunktionen

Der Großteil der Automatisierung wird bzw. ist durch Siemenssteuerungen realisiert. Daher liegt auch der Fokus bei der Analyse von CM-Systemen auf Komponenten der Firma Siemens. Diese Systeme lassen sich somit leichter in die Siemenssteuerungen integrieren und ermöglichen auch eine leichtere Kommunikation unter den einzelnen Systemen.

6.1 SIPLUS CMS1200

Das SIPLUS CMS1200 dient zur Überwachung und zur Früherkennung von Schäden in mechanischen Systemen.

- **Eigenständig und/oder steuerungsabhängig**
Die CMS1200er Variante wird in Kombination mit einer CPU ausgeführt. Die Parametrierung erfolgt hierbei über die Steuerung mit Hilfe des Programmierprogrammes TIA-Portal.
- **Unterschiedliche Steuerungsvarianten**
Das CMS1200er Modul benötigt zum Betrieb zusätzlich eine Siemens Steuereinheit. Die Einbindung in ein bestehendes System von einem anderen Hersteller kann somit nur über eine CPU bzw. geeignete Kommunikationsschnittstellen erfolgen.
- **Aktiver Prozesseingriff**
Falls die Steuerung durch eine Siemens SPS erfolgt, kann das CMS1200 in das System integriert werden. Somit wären die erfassten Daten auch direkt in der Steuereinheit abrufbar. Diese Informationen könnten daher für einen aktiven Prozesseingriff herangezogen werden.
Ist es allerdings erforderlich in einer Anlage eine Siemenssteuerung nachzurüsten, muss zusätzlich auch das Steuerungsprogramm auf der verwendeten SPS angepasst werden, damit über eine Schnittstelle die Daten für einen Prozesseingriff verwendet werden können.
- **Reine Visualisierung zur Überwachung**
Grundsätzlich ist über die Steuerung auch eine reine Visualisierung über eine Anzeigeeinheit möglich und es muss nicht zu einem Prozesseingriff kommen.

➤ **Messfunktionen**

Standardmäßig dient das SIPLUS CMS1200 zur Schwingungsanalyse und einer Drehzahlüberwachung, jedoch können durch weitere Module auch Temperatur und Drehmoment gemessen werden.

Eine CPU kann hierbei maximal 28 Schwingungssensoren über 7 Module auswerten.

6.2 SIPLUS CMS2000

Das SIPLUS CMS2000 dient wie das SIPLUS CMS1200 ebenfalls zur Zustandsüberwachung und ist eine kompakte CM-Variante welche alleinstehend betrieben werden kann.

➤ **Eigenständig und/oder steuerungsabhängig**

Dieses CM-Modul ist eine Stand-alone-Lösung und kann dadurch eigenständig betrieben werden. Diese Ausführung ist daher nicht von einer Steuereinheit abhängig. Die Parametrierung erfolgt hierbei über einen Webbrowser und es wird dazu keine zusätzliche Software benötigt.

➤ **Unterschiedliche Steuerungsvarianten**

Da dieses System autark funktioniert, ist auch die Steuereinheit einer Anlage für die Analyse nicht relevant.

➤ **Aktiver Prozesseingriff**

Damit die Steuerung aktiv auf Veränderungen im System reagieren kann, muss ein Datenaustausch zwischen dem CMS2000 und der Steuerung eingerichtet werden. Die Kommunikation kann wieder über dafür vorgesehene Schnittstellen erfolgen, oder auch über das Auswerten von Binärsignalen die das CM-System ausgibt.

➤ **Reine Visualisierung zur Überwachung**

Durch das Verwenden des Programmes CMS X-Tools kann die Zustandsüberwachung auch rein visuell ausgeführt werden.

➤ **Messfunktionen**

Standardmäßig sind auch bei dieser Ausführung die Module für Schwingungsmessungen integriert. Jedoch können je nach Bedarf weitere Module ergänzt werden, welche z.B. Schwingungen, Temperatur, Druck oder Drehzahl erfassen können.

Dieses System erlaubt eine Nachrüstung zur Erfassung von bis zu 16 Schwingungssensoren.

6.3 SIPLUS CMS4000

Das SIPLUS CMS4000 ist eine noch leistungsfähigere Variante als die SIPLUS CMS2000 und ermöglicht die Überwachung von komplexen Systemen oder einer gesamten Anlage.

➤ **Eigenständig und/oder steuerungsabhängig**

Dieses CM-Modul ist, wie das CMS2000er Modul, eine autarke CM-Lösung und kann somit eigenständig und steuerungsunabhängig betrieben werden. Die Parametrierung erfolgt auch bei dieser Ausführung über einen Webbrowser und es wird keine zusätzliche Software benötigt.

➤ **Unterschiedliche Steuerungsvarianten**

Da diese Ausführung als eine Stand-alone-Lösung betrieben wird, ist auch in diesem Fall die Steuereinheit der Anlage nicht relevant für die Zustandsüberwachung.

➤ **Aktiver Prozesseingriff**

Der aktive Prozesseingriff erfolgt über Kommunikationsschnittstellen mit dem Bussystem FireWire IEEE 1394a/b. Die erfassten Daten werden über das Programm CMS X-Tools ausgewertet und über z.B. eine Ethernet-Verbindung an die Steuerung weitergegeben. Die von der SPS erhaltenen Daten können für den aktiven Prozesseingriff verwendet werden.

➤ **Reine Visualisierung zur Überwachung**

Durch die Software CMS X-Tools ist es möglich, das System visuell durch eine graphische Darstellung der erfassten Daten zu überwachen.

➤ **Messfunktionen**

Dieses Modul erlaubt standardmäßig die Auswertung von Schwingungssensoren aber auch die Erfassung von analogen Signalen.

Da dieses System sehr leistungsfähig ist, können bis zu 180 Sensoren erfasst werden. Natürlich müssen dementsprechend auch die Hardwaremodule des CMS4000 entsprechend nachgerüstet werden.

7 SIMULATION – VERHALTEN DER STEUERUNG BEI SYSTEMÄNDERUNG

Der aktive Prozesseingriff durch Daten der Zustandsüberwachungssysteme wurde durch eine Simulation nachgestellt. Die Simulation (Abb. 7-1, S. 63) stellt eine Motoransteuerung mit Drehzahlvorgabe dar. Der Motor treibt über eine zweifach gelagerte Welle einen Schraubenmischer an. Die Lagerungen werden zum einen im Hinblick auf ihre Temperatur und zum anderen im Hinblick auf die Schwingungen beobachtet. Die Simulation wurde im TIA-Portal V15.1 und mit der Funktion WinCC Runtime erstellt.

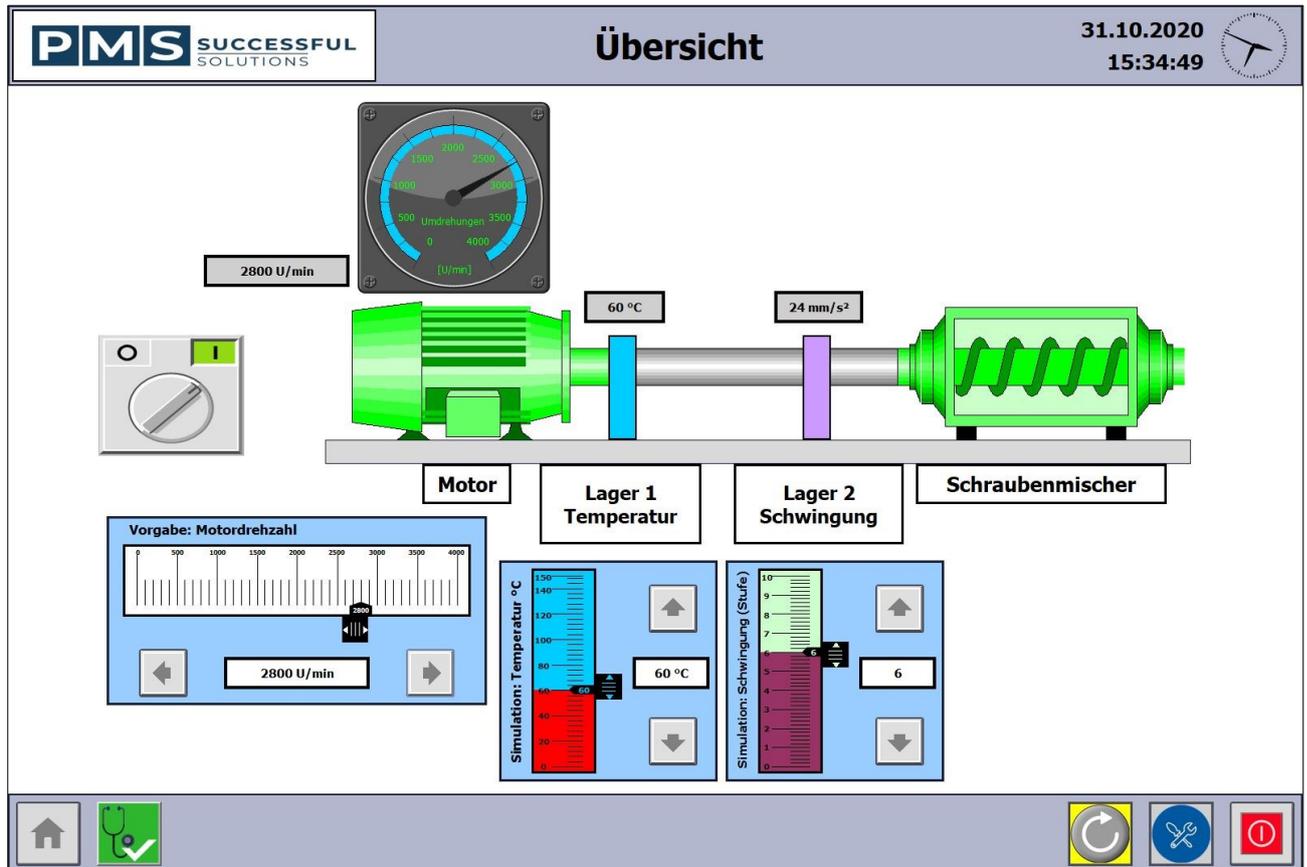


Abb. 7-1: Übersicht Simulation

Ein Temperaturanstieg bzw. die Erhöhung der Schwingung kann durch den Bediener vorgegeben und simuliert werden. Sobald die Messwerte einen vordefinierten Grenzwert erreichen, wird aktiv in die Motorregelung eingegriffen.

Temperaturanstieg

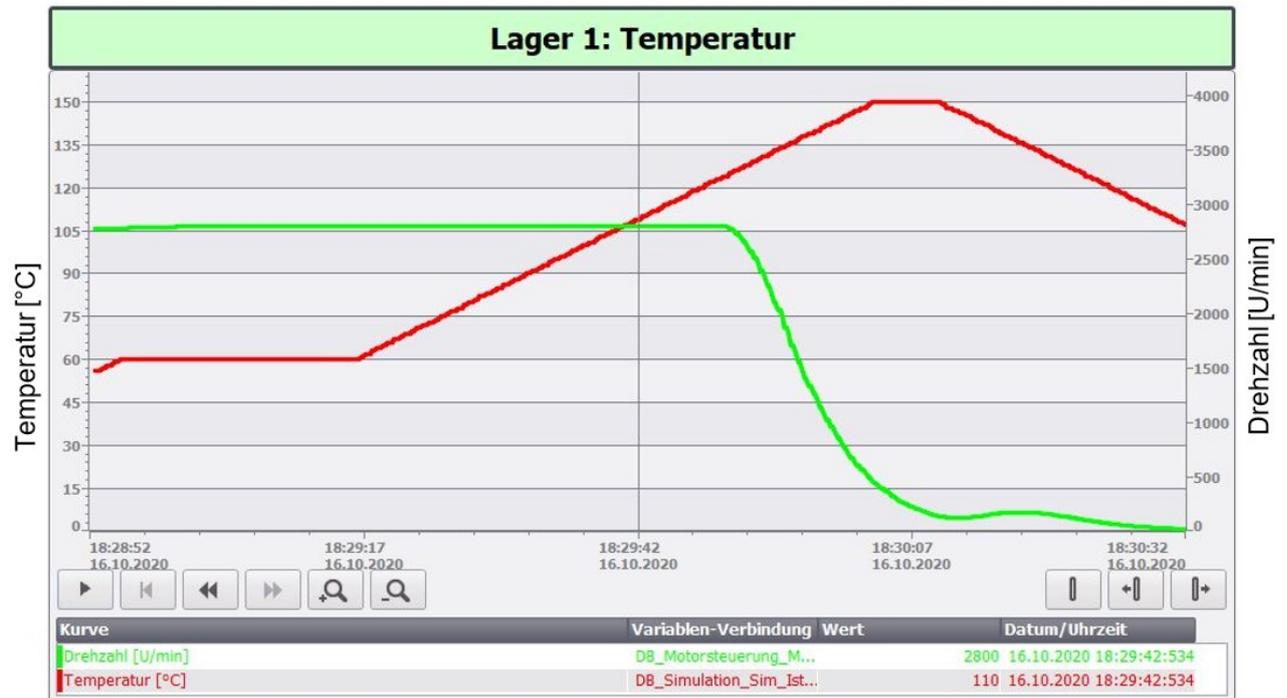


Abb. 7-2: Simulation – Diagramm Temperaturanalyse

In dieser Simulation wurde die Motorregelung mit der Temperaturüberwachung verknüpft. Ein Temperaturanstieg im Lager bei gleichbleibender Drehzahl (Abb. 7-2, S. 64) weist auf ein Problem in diesem Bereich hin. Um Schäden zu minimieren bzw. zu verhindern wird die Motordrehzahl bei Erreichen eines Temperaturgrenzwertes automatisch verringert. Kommt es zu keinem Rückgang der Temperatur, so kann es auch zur Abschaltung des Motors kommen.

Dieser Vorgang würde z.B. bei einem Stecken des Lagers verhindern, dass auch die Welle mit beschädigt wird. Des Weiteren könnte die Welle auch durch die Temperaturentwicklung im Lager beschädigt werden.

Schwingsungsanstieg



Abb. 7-3: Simulation – Diagramm Schwingungsanalyse

In dieser Simulation wurde die Schwingungsanalyse in die Motorregelung integriert. Jedes Objekt in Bewegung verursacht eine gewisse Schwingung im System. Rotierende Komponenten besitzen auch, je nach Drehzahl, eine Eigenfrequenz. Ändert sich jedoch diese Frequenz bei gleichbleibender Drehzahl, so kann hier von einem Problem in dem betrachteten Bereich ausgegangen werden.

Wird ein Grenzwert überschritten, so wird automatisch die Motordrehzahl verringert. In dem Fall, dass die Schwingung den Normalwert nicht wieder erreicht, würde die Steuerung den Motor abschalten.

Würde der Motor bei steigender Vibration die Drehzahl beibehalten, so könnte es zu Schäden in der Lagerung des Motors bzw. beim angetriebenen Gerät kommen. Die erhöhte Schwingung könnte in diesem Fall durch eine Unwucht an der Welle oder durch eine Lockerung von Befestigungen verursacht worden sein.

8 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Diese Arbeit behandelt das Thema Condition Monitoring unter dem Aspekt der Einsetzbarkeit und Integration in automatisierte Anlagen. Damit die Zustandsüberwachung optimal eingesetzt werden kann, muss als erster Schritt ein umfassendes Verständnis zu diesem Thema angeeignet werden.

Ziel dieser Arbeit war es ein detailliertes Verständnis für die Möglichkeiten, die die Zustandsüberwachung liefert zu bekommen und sich mit der Funktionsweise von Condition Monitoring auseinanderzusetzen. Im Zuge dessen wurden auch unterschiedliche Methoden evaluiert, die für den Einsatz im Arbeitsumfeld der Firma PMS Elektro- und Automationstechnik GmbH in Frage kommen könnten. Zusätzlich wurden auch noch drei unterschiedliche CM-Systeme von Siemens näher untersucht, um deren Einsatzfähigkeit aufzuzeigen.

Condition Monitoring dient der kontinuierlichen Zustandsüberwachung von Anlagen oder Maschinen. Durch die durchgehende Auswertung von Sensordaten, welche wichtige und aussagekräftige Kenngrößen erfassen, kann der aktuelle Status des betrachteten Bereiches beobachtet und analysiert werden. Das Ermitteln dieser Werte dient dem frühzeitigen Erkennen von Problemen und Schäden im mechanischen und bedingt im elektrischen System. Zusätzlich können mit Hilfe von Diagnose Applikationen auch die Problemstelle und die Ursache der Werteänderungen festgestellt werden. Weiterführende Schäden bis hin zu Gesamtausfällen von Anlagen und Maschinen können somit maßgeblich vermindert bzw. gänzlich verhindert werden. Kontinuierliche Veränderungen bzw. Verschlechterungen der beobachteten Parameter können zusätzlich ausgewertet werden, um z.B. Verschleißteile geplant zu tauschen bzw. zu reparieren bevor es zu einem plötzlichen Ausfall kommt.

Die Zustandsüberwachung kann mit Hilfe verschiedener Methoden durchgeführt werden. Da je nach Verfahren unterschiedliche Kenngrößen ausgewertet werden, werden dementsprechend unterschiedliche Ergebnisse geliefert, die zur Diagnose verschiedener Probleme verwendet werden können.

Folgende CM-Methoden wurden in dieser Arbeit behandelt:

- Schwingungsanalyse
- Schmiermittel-/Ölanalyse
- Temperaturmessung
- Ultraschall/ Akustische Überwachung
- Strom- und Spannungsüberwachung

Jede Methode betrachtet eine andere Kenngröße zur Problemerkennung und kann somit je nach Anwendungsfall eine aussagekräftigere Auswertung liefern. Die Effizienz dieser Varianten der Systemüberwachung kann allerdings durch eine inadäquat bzw. falsch gewählte Messstelle verringert werden. In diesem Fall können die Sensoren nicht aussagekräftige Daten zu den Veränderungen im System liefern, wie z.B. bei einem Sensor zur Temperaturmessung der außerhalb eines Gehäuses montiert wurde, wobei sich die Problemstelle aber im inneren befindet.

Eine effiziente Condition Monitoring Ausführung hängt einerseits aus der Wahl der idealen CM-Methode und andererseits aus der richtigen Platzierung der Messapplikationen ab. Je nach Anwendungsfall und Umfeld können unterschiedliche Auswertevarianten zum Einsatz kommen.

Folgende Kriterien wurden für die Wahl der optimalen CM-Methode in Betracht gezogen:

- Mechanisches und/oder elektrisches System
- Bestands- und/oder Neuanlagen
- Starre und/oder bewegende Elemente
- Feste und/oder flüssige Komponente
- Geräuscharm oder geräuschvolle Umgebung
- Genau definierte oder allgemeine Problemerkennung
- Kontinuierliche oder periodische Datenerfassung
- Einbindung in die Steuerung/Automatisierung

Jede Methode kann durch die Betrachtung oben genannter Punkte in Kombination zur Evaluierung der Gegebenheiten des zu analysierenden Objektes im Hinblick auf die Eignung zur Überwachung des vorliegenden Systems bewertet werden.

Zusätzlich zur geeigneten Methode, wird auch noch das passende CM-System benötigt. Diese Systeme gliedern sich in drei Varianten mit unterschiedlichen Eigenschaften:

- SIPLUS CMS1200
- SIPLUS CMS2000
- SIPLUS CMS4000

Die SIPLUS Systeme von Siemens dienen zur permanenten Erfassung von Sensordaten. Weiterführend können diese Daten auch analysiert, ausgewertet und visualisiert werden. Diese Systeme ermöglichen es zusätzlich auch die ausgewerteten Daten zur Steuerung zu übermitteln. Die Systemsteuerung kann diese Daten in den laufenden Prozess einbinden und bei Bedarf automatisch auf die Veränderungen im System reagieren. Der aktive Prozesseingriff kann in weiterer Folge zusätzliche Schäden verringern oder auch verhindern. Das rechtzeitige Eingreifen in die Steuerung verhindert eine größere Stillstandszeit der Anlage und Maschinen, was in weiterer Folge zu einer Reduktion der Instandhaltungskosten führt.

Die Entscheidung welches CM-System Variante eingesetzt wird, kann nach Evaluierung folgender Kriterien basieren:

- Eigenständig und/oder Steuerungsabhängig
- Unterschiedliche Steuerungsvarianten
- Aktiver Prozesseingriff
- Reine Visualisierung zur Überwachung
- Messfunktionen

Auch die Entscheidung für das geeignete System ist wieder abhängig von der Anlagen- und Kundensituation. Bei der Entscheidungsfindung müssen auch hier wieder die Gegebenheiten und Anforderung bewertet und gegenübergestellt werden.

Das Einbinden und Wirken von Condition Monitoring in der Automatisierung wurde mit einer Simulation im TIA-Portal zum leichteren Verständnis dargestellt. Hierbei wurden die Auswirkungen eines Temperaturanstiegs und einer Schwingungserhöhung in zwei Lagern auf eine Motorsteuerung betrachtet.

LITERATURVERZEICHNIS

Gedruckte Werke (2)

Förster, Adolf (2013): *Maschinen- und Anlagendiagnostik: Für die zustandsbezogene Instandhaltung*, Springer-Verlag, Stuttgart

Krethe, Rüdiger (2020): *Handbuch Ölanalysen*, expert verlag GmbH, Dischingerweg

Online-Quellen (51)

PMS Elektro-und Automationstechnik GmbH *PMS Firmenpräsentation*

<http://www.pms.at/downloads/> [Stand: 07.Juni.2020]

RS Components Handelsgesellschaft m.b.H (2020): *rs-online*

<https://at.rs-online.com/web/generalDisplay.html?id=ideen-und-tipps/condition-monitoring-leitfaden>
[Stand: 01.August.2020]

B&R Industrial Automation GmbH (2020): *br-automation*

https://download.br-automation.com/BRP44400000000000000639895/X20%20System-GER_V3.60.pdf?px-hash=b10aa1bf94b207ba9616f03695637fb4&px-time=1596270827 [Stand: 01.August.2020]

Industry, Real Estate & Construction (2020): *openPR*

<https://www.openpr.com/news/1901815/wind-turbine-condition-monitoring-system-market-with-top> [Stand: 01.August.2020]

Elektronik Kompendium (2020): *Elektronik Kompendium*

<https://www.elektronik-kompendium.de/sites/kom/1502051.htm> [Stand: 02.August.2020]

PULS GmbH (2016): *Pulspower*

https://www.pulspower.com/fileadmin/global/common/Print/Press_Review/2016/2016_01_PULS_elektronik_informationen.pdf [Stand: 02.August.2020]

Joachim Herz Stiftung (2020): *LEIF/physik*

<https://www.leifphysik.de/mechanik/mechanische-schwingungen/grundwissen/harmonische-schwingungen> [Stand: 12.August.2020]

Dorfmeister GmbH & Co.KG (2017): *Maschinenbau Dorfmeister*

<https://www.maschinenbau-dorfmeister.de/produkte/lohnwuchten.html> [Stand: 13.August.2020]

GfM Gesellschaft für Maschinendiagnose mbH; *SMaschinendiagnose*

<https://maschinendiagnose.de/kompendium.htm#S> [Stand: 24.August.2020]

NSK Motion & Control (2009): *Concar, Wälzlager-Doktor*

<https://www.concar.de/sites/default/files/concarbilder/PDF/DE-Waelzlager-Doktor.pdf> [Stand: 24.August.2020]

TBE Anlagendiagnostik GmbH (2017): *TBE*

<https://www.tbe.cc/download/folder-oelanalyse/> [Stand: 25.August.2020]

OelCheck (2001): *OelCheck, Atom-Emissions-Spektroskopie mit Rotrode-Verfahren*

[https://de.oelcheck.com/wiki/Atom-Emissions-Spektroskopie_mit_Rotrode-](https://de.oelcheck.com/wiki/Atom-Emissions-Spektroskopie_mit_Rotrode-Verfahren#:~:text=Beim%20Rotrode-Verfahren%20wird%20mit,sie%20ihre%20urspruengliche%20Bahn%20verlassen.&text=Das%20Element%20emittiert%20also%20Licht)

[Verfahren#:~:text=Beim%20Rotrode-](https://de.oelcheck.com/wiki/Atom-Emissions-Spektroskopie_mit_Rotrode-Verfahren#:~:text=Beim%20Rotrode-Verfahren%20wird%20mit,sie%20ihre%20urspruengliche%20Bahn%20verlassen.&text=Das%20Element%20emittiert%20also%20Licht)

[Verfahren%20wird%20mit,sie%20ihre%20urspruengliche%20Bahn%20verlassen.&text=Das%20Element%20emittiert%20also%20Licht](https://de.oelcheck.com/wiki/Atom-Emissions-Spektroskopie_mit_Rotrode-Verfahren#:~:text=Beim%20Rotrode-Verfahren%20wird%20mit,sie%20ihre%20urspruengliche%20Bahn%20verlassen.&text=Das%20Element%20emittiert%20also%20Licht). [Stand: 28.August.2020]

FH-München Maier (2012): *FH-München*

http://dodo.fb06.fh-muenchen.de/maier/analytik/Blaetter/N101_Emission_Fluorimetrie1_a_BAneu.pdf

[Stand: 28.August.2020]

ÖICheck (2019): *OelCheck PQ-Index*

<https://de.oelcheck.com/wiki/PQ-Index> [Stand: 30.August.2020]

ÖICheck (2003): *ÖICheck optische Partikelanalyse*

https://de.oelcheck.com/wiki/O.P.A._-_Optische_Partikelanalyse [Stand: 01.September.2020]

PMS Elektro- und Automationstechnik GmbH (2020): *PMS - Firmenpräsentation*

[http://www.pms.at/wp-](http://www.pms.at/wp-content/uploads/2020/09/PMS_Pr%C3%A4sentation_2020_Firmenpr%C3%A4sentation.pdf)

[content/uploads/2020/09/PMS_Pr%C3%A4sentation_2020_Firmenpr%C3%A4sentation.pdf](http://www.pms.at/wp-content/uploads/2020/09/PMS_Pr%C3%A4sentation_2020_Firmenpr%C3%A4sentation.pdf) [Stand:

13.September.2020]

PMS Elektro- und Automationstechnik GmbH (Karriere) (2020): *Karriere - PMS Elektro- und Automationstechnik GmbH*

<https://www.karriere.at/f/pms-elektro-und-automationstechnik> [Stand: 13.September.2020]

nbn Elektronik Handelsgesellschaft m.b.H. (2015): *nbn - Grundlagen Infrarotmessung*

<http://www.nbn.at/service-support/downloads/> [Stand: 14.September.2020]

Universität Kassel (2015): *uni-kassel - Praktikumsskript Thermische Messtechnik*

[https://www.uni-](https://www.uni-kassel.de/maschinenbau/fileadmin/datas/fb15/ITE/SAT/SolarPraktikum/01_Temperaturmessung.pdf)

[kassel.de/maschinenbau/fileadmin/datas/fb15/ITE/SAT/SolarPraktikum/01_Temperaturmessung.pdf](https://www.uni-kassel.de/maschinenbau/fileadmin/datas/fb15/ITE/SAT/SolarPraktikum/01_Temperaturmessung.pdf)

[Stand: 14.September.2020]

Institut für Bildungsanalysen Baden-Württemberg (2020): *Landesbildungsserver baden-Württemberg - Temperaturmessung und ihre Festlegung.*

[https://www.schule-bw.de/faecher-und-schularten/mathematisch-naturwissenschaftliche-](https://www.schule-bw.de/faecher-und-schularten/mathematisch-naturwissenschaftliche-faecher/physik/unterrichtsmaterialien/waermelehre/ausdehnung/temperaturmessung.htm)

[faecher/physik/unterrichtsmaterialien/waermelehre/ausdehnung/temperaturmessung.htm](https://www.schule-bw.de/faecher-und-schularten/mathematisch-naturwissenschaftliche-faecher/physik/unterrichtsmaterialien/waermelehre/ausdehnung/temperaturmessung.htm) [Stand:

14.September.2020]

Testo Industrial Services GmbH (2019): *TestoIS - Temperatur-Fibel*

[https://www.testotis.de/fileadmin/testotis.de/downloads/fibeln/Testo_Industrial_Services_GmbH_Tempera-](https://www.testotis.de/fileadmin/testotis.de/downloads/fibeln/Testo_Industrial_Services_GmbH_Temperatur-Fibel.pdf)

[tur-Fibel.pdf](https://www.testotis.de/fileadmin/testotis.de/downloads/fibeln/Testo_Industrial_Services_GmbH_Temperatur-Fibel.pdf) [Stand: 14.September.2020]

Duden Learnattack GmbH (GGL) (2020): *Lernhelfer - Gesetz von Gay-Lussac*

<https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/physik/artikel/gesetz-von-gay-lussac> [Stand:

14.September.2020]

Duden Learnattack GmbH (Therm) (2020): *Lernhelfer - Thermometer*

<https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/physik/artikel/thermometer#> [Stand: 14.September.2020]

Studyflix (2020): *Studyflix - Elektrische Leitfähigkeit*

<https://studyflix.de/elektrotechnik/elektrische-leitfaehigkeit-1778> [Stand: 14. September.2020]

MTS Messtechnik Schaffhausen GmbH (2020): *MTS - Günther GmbH Temperaturmesstechnik, Technische Informationen zu Widerstandsthermometern*

<https://www.mts.ch/produkte-messtechnik-schaffhausen-gmbh/guenther-gmbh-temperaturmesstechnik-thermoelemente-widerstandsthermometer/technische-informationen/technische-informationen-zu-widerstandsthermometern/1-aufbau-und-funktionsweise-von-widerstandsthe> [Stand: 14. September.2020]

Temperatur Messelemente Hettstedt GmbH (2020): *THM - Starre Widerstandsthermometer (Pt100 / Pt1000)*

<https://www.temperaturmesstechnik.de/de/produkte/pt100-pt1000-sensoren/starre-widerstandsthermometer-pt100-pt1000.html> [Stand: 14. September.2020]

Siemens AG (2020): *Siemens - SIPLUS CMS*

<https://new.siemens.com/global/de/produkte/automatisierung/produkte-fuer-spezifische-anforderungen/siplus-cms.html> [Stand: 10.10.2020]

ALFA-NET (2003): *alfa-net - CMS X-TOOLS*

<https://www.alfa-net.pl/de/projekt/cms-x-tools/> [Stand: 10. Oktober.2020]

Siemens AG (2016): *Siemens - CMS X-Tools User Manual*

https://cache.industry.siemens.com/dl/files/056/109743056/att_902508/v2/CMS_X-Tools_All_Editions_User_Manual_-_01_-_Introduction.EN.pdf [Stand: 11. Oktober.2020]

GfM Gesellschaft für Maschinendiagnose mbH *Maschinendiagnose*

<https://maschinendiagnose.de/kompodium.htm#A> [Stand: 24. August.2020]

B&R Industrial Automation GmbH (2017): *TM280 - Condition monitoring based on vibration measurement*

<https://www.br-automation.com/de/academy/seminare/trainingsmodule/steuerungstechnik/tm280-condition-monitoring-basierend-auf-schwingungsmesstechnik/> [Stand: 12. August.2020]

Siemens AG (2018): *Siemens - Fitmacher für Ihre Produktion*

https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:023c190e-a493-4dd6-96d7-1d38c4d54919/3-66511-dffa-b10248-02brsipluscms-de-72_original.pdf [Stand: 10. Oktober.2020]

LUMITOS AG *Chemie - Lambert-Beersches Gesetz*

https://www.chemie.de/lexikon/Lambert-Beersches_Gesetz.html [Stand: 12. Januar.2021]

Bartz, Wilfried (2006): *Verband der schweizerischen Schmierstoffindustrie– VSS Lubes*

<http://bff1.vss->

[lubes.ch/fileadmin/dokumente/aus_und_weiterbildung/kursunterlagen/Bartz_Schmierstoffeigenschaften_und_Gebrauchtoelanalyse/Bartz_Schmierstoffeigenschaften_und_Gebrauchtoelanalyse_Teil_6_Oelanalyse_gegen_Getriebeschaeden.pdf](http://bff1.vss-lubes.ch/fileadmin/dokumente/aus_und_weiterbildung/kursunterlagen/Bartz_Schmierstoffeigenschaften_und_Gebrauchtoelanalyse/Bartz_Schmierstoffeigenschaften_und_Gebrauchtoelanalyse_Teil_6_Oelanalyse_gegen_Getriebeschaeden.pdf) [Stand: 26. August.2020]

Christian Probst, Peter (2015): *NDT - Schallemission in der Instandhaltung*

<https://www.ndt.net/article/dgzfp-ae-2015/papers/kp3.pdf> [Stand: 23. September.2020]

Christiansen, Bryan (2020): *Limble CMMS*

<https://limblecmms.com/blog/condition-based-maintenance/#> [Stand: 12.August.2020]

Christiansen, Bryan (2019): *MRO Magazine*

<https://www.mromagazine.com/features/complete-list-of-condition-monitoring-techniques/> [Stand: 25.August.2020]

Dipl. Ing. Peter Weismann, Dipl. (2003): *Rotortechnik*

<http://www.rotortechnik.at/Downloads/CM/Schadensfrueerkennung%20durch%20Oelanalyse.pdf> [Stand: 30.August.2020]

E. Pignanelli, T. (2013): *ama-science - E8 - Modulares Condition Monitoring System zur Überwachung von Fluidqualität und Partikelkontamination am Beispiel von Öl*

<https://www.ama-science.org/proceedings/details/1757> [Stand: 09.September.2020]

Echternkamp, Katharina (2011): *LP Georg-August-Universität Göttingen - Halbleiterdioden*

<https://lp.uni-goettingen.de/get/text/6779> [Stand: 15.September.2020]

Florian F. Linscheid, Tobias (2019): *Uni-Augsburg - Evaluierung eines Überwachungsszenarios durch Kombination von akustischen Zustandsüberwachungsmethoden in einem gemeinsamen Sensornetzwerk*

<https://opus.bibliothek.uni-augsburg.de/opus4/frontdoor/deliver/index/docId/60066/file/Mi.3.B.1.pdf> [Stand: 24.September.2020]

Frick, Thomas (2019): *Industrie-Wegweiser*

<https://industrie-wegweiser.de/condition-monitoring/> [Stand: 02.August.2020]

Geibel, Dipl. (2010): *Docplayer*

<https://docplayer.org/10491448-Effizienzsteigerung-durch-condition-monitoring-dipl-ing-wilfried-geibel-vertriebsingenieur-prueftechnik-condition-monitoring-maintain-2010-2.html> [Stand: 19.August.2020]

Joosten, Heinz-Gerd (2018): *Spektrum*

<https://www.spektrum.de/lexikon/chemie/atomemissionsspektrometrie/788> [Stand: 27.August.2020]

Kleckers, Thomas (2020): *HBM*

<https://www.hbm.com/de/7318/wie-funktioniert-eigentlich-ein-piezo-kraftaufnehmer/> [Stand: 08.August.2020]

Paluga, M.Sc. (2020): *Fritsch - MIE-THEORIE*

<https://www.fritsch.de/partikelmessung/fritsch-wissen/mie-theorie/> [Stand: 13.November.2020]

Pfadt, Manfred (2017): *Elektroniknet - Temperaturmessung im Hyperloop – bei 100 m/s*

<https://www.elektroniknet.de/elektronik/messen-testen/temperaturmessung-im-hyperloop-bei-100-m-s-145296-Seite-3.html> [Stand: 18.September.2020]

Philips, Peter (2020): *MRO Magazine*

<https://www.mromagazine.com/features/types-of-condition-based-monitoring/> [Stand: 25.August.2020]

Seilnacht, Thomas (2013): *Seilnacht*

<https://www.seilnacht.com/versuche/expalkal.html> [Stand: 28.August.2020]

Weidner, Wolfram (1925): *zitate.de*

<https://www.zitate.de/kategorie/Automation> [Stand: 13.07.2020]

Wilmsen, Kirill (2010): *TU-Dresden - Sensorische Erfassung von Maschinenverschleiß*

<https://www.inf.tu-dresden.de/content/institutes/iai/tis->

[neu/lehre/archiv/fohlen.ws_2009/Vortrag_Wilmsen.pdf](https://www.inf.tu-dresden.de/content/institutes/iai/tis-neu/lehre/archiv/fohlen.ws_2009/Vortrag_Wilmsen.pdf) [Stand: 05.September.2020]

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 2-1: PMS Elektro- und Automationstechnik GmbH – Werksanlage	2
Abb. 2-2: PMS – Fertigung	3
Abb. 2-3: PMS – Geschichte	4
Abb. 3-1: Grafik Prozess Condition Monitoring	5
Abb. 3-2: Schema Zustandsüberwachung	6
Abb. 3-3: Badewannenkurve	8
Abb. 3-4: Schadenskette Lagerschaden	9
Abb. 3-5: Häufig beim CM gemessene Parameter	12
Abb. 3-6: Prinzip Körperschall	13
Abb. 3-7: Piezoelektrisches Prinzip	14
Abb. 3-8: Grundlegende Schwingung	14
Abb. 3-9: Statische und dynamische Unwucht	16
Abb. 3-10: Ausrichtfehler (Welle)	17
Abb. 3-11: Wälzlagerschäden (Pitting)	18
Abb. 3-12: Verschleißmechanismen	19
Abb. 3-13: Änderung von Zustand und Eigenschaft des Öls	20
Abb. 3-14: Messprinzip AES	22
Abb. 3-15: Auszug Spektraltafel	23
Abb. 3-16: Entnahme der Probe - richtige Entnahme (links), falsche Entnahme (rechts)	23
Abb. 3-17: Prinzip PQ-Analyser	25
Abb. 3-18: Prinzip optische Partikelanalyse	26
Abb. 3-19: OPA – Gleitverschleiß	26
Abb. 3-20: OPA – Ermüdungverschleiß	27
Abb. 3-21: OPA – Reaktionsprodukte	27
Abb. 3-22: OPA – Reibverschleiß	28
Abb. 3-23: Prinzip Analytische Ferrographie	28
Abb. 3-24: Online Ferrograph	30
Abb. 3-25: Funktionsprinzip Mehrkanal-IR-Messsystem	31
Abb. 3-26: Funktionsprinzip Partikelanalysesystem	33
Abb. 3-27: Stabausdehnungsthermometer	35

Abb. 3-28: Metall-Widerstandsthermometer	36
Abb. 3-29: Bändermodell	37
Abb. 3-30: Thermokreis	38
Abb. 3-31: Aufbau metallischer Leiter und Ladungsverschiebung bei Wärmezufuhr	39
Abb. 3-32: Thermokreis mit Anschlussleitung	39
Abb. 3-33: Messprinzip IR-Messung	40
Abb. 3-34: Grundbegriffe IR-Messtechnik	41
Abb. 3-35: Unterteilung der Schäden in Frequenzbereiche	43
Abb. 4-1: Verwendungspyramide der Daten aus der CMS	46
Abb. 4-2: Schema mit SIPLUS CMS1200	47
Abb. 4-3: Schema mit SIPLUS CMS2000	49
Abb. 4-4: Schema mit SIPLUS CMS4000	50
Abb. 4-5: Beispiel CMS X-Tools	51
Abb. 7-1: Übersicht Simulation	63
Abb. 7-2: Simulation – Diagramm Temperaturanalyse	64
Abb. 7-3: Simulation – Diagramm Schwingungsanalyse	65

TABELLENVERZEICHNIS

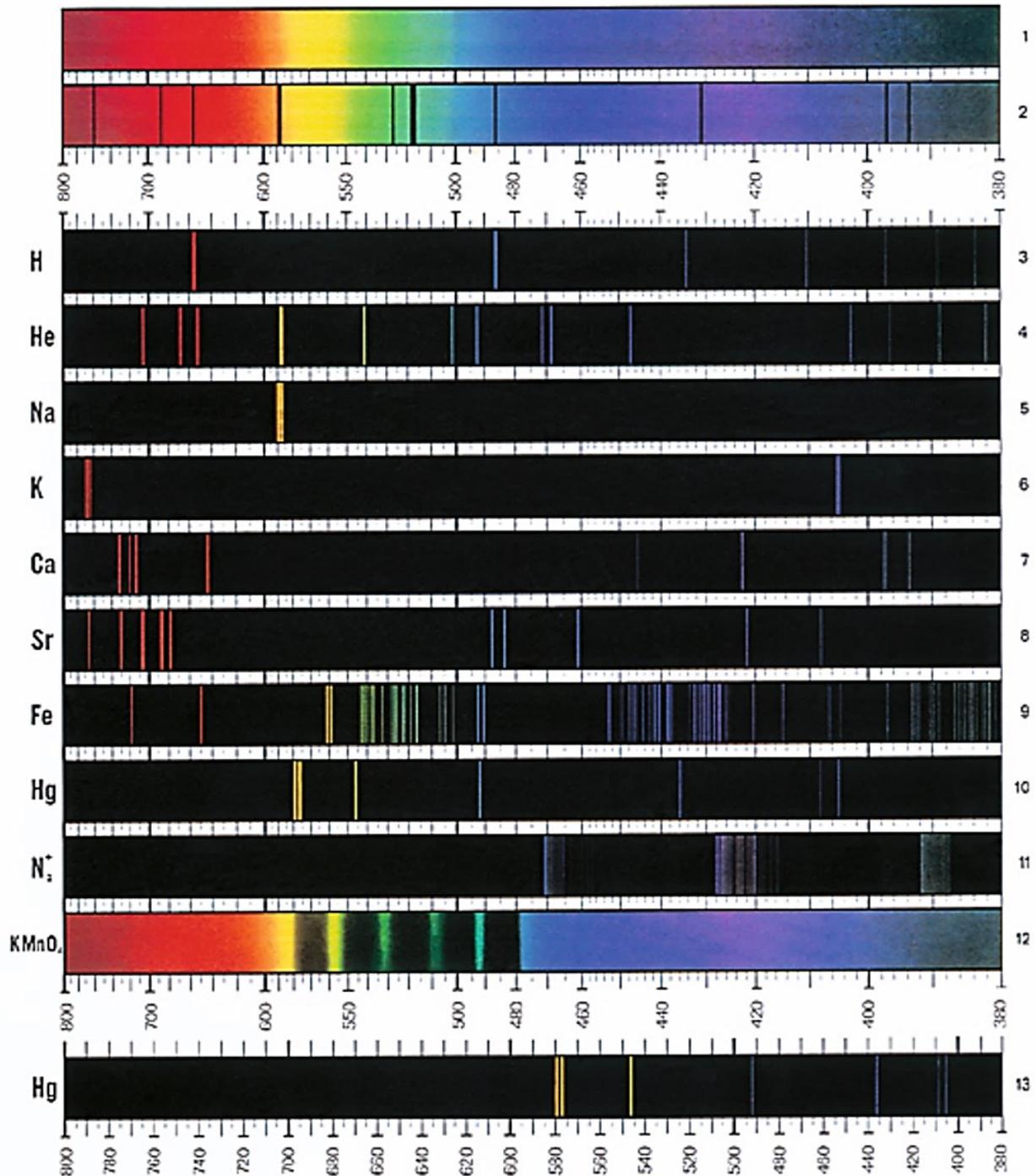
Tab. 3-1: Betriebsweisen Instandhaltung - Vorteile und Nachteile	10
Tab. 3-2: Übersicht Condition Monitoring Methoden.....	11
Tab. 3-3: Verfahren zur Schmierstoffanalyse	21
Tab. 3-4: Partikelklassen und Verschleißmechanismus	29
Tab. 3-5: Technisches Einsatzgebiet IR-Messung.....	41
Tab. 3-6: Vor- und Nachteile der Ultraschall/ Akustik Analysen.....	45

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AES	<u>A</u> tom <u>e</u> missionsspek <u>t</u> roskopie
AFG	<u>A</u> lytische <u>F</u> errographie
CCD	<u>C</u> harge <u>C</u> oupled <u>D</u> evice
CM	<u>C</u> ondition <u>M</u> onitoring
CMS	<u>C</u> ondition <u>M</u> onitoring <u>S</u> ysteme
CPU	<u>C</u> entral <u>P</u> rocessing <u>U</u> nit
FFT	<u>F</u> ast <u>F</u> ourier <u>T</u> ransformation
ICP	<u>I</u> nduktiv gekoppeltes (<u>c</u> oupled) <u>P</u> lasma
IR	<u>I</u> nfrar <u>o</u> t
LTCC	<u>L</u> ow <u>T</u> emperature <u>C</u> ofired <u>C</u> eramic
NTC	<u>N</u> egative <u>t</u> emperature <u>c</u> oefficient
OES	<u>O</u> ptische <u>E</u> missionsspek <u>t</u> roskopie
OPA	<u>O</u> ptische <u>P</u> artikel <u>a</u> nalyse
PQ	<u>P</u> article <u>Q</u> uantifier
PTC	<u>p</u> ositive <u>t</u> emperature <u>c</u> oefficient
RDE	<u>R</u> otating <u>D</u> isc <u>E</u> lectrode
SM	<u>S</u> ignal/ <u>S</u> ensor <u>M</u> odul
SPS	<u>s</u> peicherprogrammierbare <u>S</u> teuerung
TIA	<u>T</u> otally <u>I</u> ntegrated <u>A</u> utomation
VIB-MUX	<u>V</u> ibration <u>M</u> ultiplex <u>e</u> r

ANHANG 1: SPEKTRALTAFEL

SPEKTRALTAFEL



Die Skalen geben die Wellenlängen in Nanometer ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$) an.

1 - 12 Prismenspektren

13 Gitter- oder Normalspektrum

- 1 Kontinuierliches Spektrum des Glühlichts
- 2 Spektrum der Sonne mit Fraunhoferschen Linien
- 3 - 10 Linienspektren einiger Elemente in Emission

- 11 Bandenspektrum des N₂⁺ in Emission
- 12 Bandenspektrum des KMnO₄ in Absorption
- 13 Gitterspektrum des Quecksilberdampfs

ANHANG 2: SIPLUS CMS1200

SIEMENS

Datenblatt

6AT8007-1AA10-0AA0

SIPLUS CMS1200 SM1281 condition Monitoring für SIMATIC S7-1200 "4 IEPE Schwingungskanäle;" 1 Digital Eingang zur Drehzahlerfassung



Allgemeine Informationen

Produkttyp-Bezeichnung	SM1281
Produktbeschreibung	S7-1200 Modul zur Überwachung von Schwingungen an mechanischen Komponenten auf Basis von Kennwerten sowie frequenzselektiven Analysefunktionen

Aufbauart/Montage

Befestigungsart	Hutschiene oder Wandmontage
Einbaulage	waagrecht, senkrecht
Einbaulage empfohlen	waagrecht

Versorgungsspannung

Nennwert (DC)	24 V
zulässiger Bereich, untere Grenze (DC)	20,4 V
zulässiger Bereich, obere Grenze (DC)	28,8 V

Eingangsstrom

Stromaufnahme, typ.	200 mA
Stromaufnahme, max.	250 mA
aus Rückwandbus DC 5 V, typ.	80 mA
aus Rückwandbus DC 5 V, max.	85 mA

Verlustleistung	
Verlustleistung, typ.	4,8 W
Speicher	
Speicherkapazität gesamt	1 Gbyte
Hardware-Ausbau	
Ausführung der Hardware-Konfiguration	Modular, bis zu 7 Module pro CPU
Drehzahleingang	
Anzahl der Drehzahleingänge	1
Eingangsspannung	
• DC 24 V digital	Ja
Sensoreingang	
Anzahl der IEPE-Sensoreingänge	4
Abtastfrequenz, max.	46 875 Hz
Schnittstellen	
Art der Datenübertragung	Rohdatenausleitung als WAV-Datei für weitere Analysen (z. B. über CMS X-Tools) per Download über Browser/FTP; Online-Datenübertragung zu CMS X-Tools
Ethernet-Schnittstelle	Ja
Protokolle	
Bus-Kommunikation	Ja
Webserver	
• HTTP	Ja
Alarmer/ Diagnosen/ Statusinformationen	
Alarmer	
• Diagnosealarm	Ja
Diagnoseanzeige LED	
• für Status der Eingänge	Ja
• für Maintenance	Ja
• Statusanzeige Digitaleingang (grün)	Nein
Integrierte Funktionen	
Überwachungsfunktionen	
• Überwachung der Sensoreingänge	Ja; Kabelbruch und Kurzschluss
• Schwingungskennwertüberwachung via Effektivwert der Schwinggeschwindigkeit (RMS-Wert)	Ja
• Schwingungskennwertüberwachung via Effektivwert der Schwingbeschleunigung (RMS-Wert)	Ja
• Schwingungskennwertüberwachung via Diagnosekennwert (DKW)	Ja

• frequenzselektiven Überwachung via Schwinggeschwindigkeitsspektrum	Ja
• frequenzselektive Überwachung via Schwingbeschleunigungsspektrum	Ja
• frequenzselektive Überwachung via Hüllkurvenanalyse	Ja
Mess-Funktionen	
• physikalisches Messprinzip	Schwingbeschleunigung
Messbereich	
— Messbereich Schwingfrequenz, min.	0,1 Hz
— Messbereich Schwingfrequenz, max.	10 000 Hz
Normen, Zulassungen, Zertifikate	
Eignungsnachweis	CE
CE-Kennzeichen	Ja
EAC (former Gost-R)	Ja
China-RoHS-Konformität	Ja
Umgebungsbedingungen	
Freier Fall	
• Fallhöhe, max.	0,3 m; fünfmal, in Versandverpackung
Umgebungstemperatur im Betrieb	
• waagerechte Einbaulage, min.	-20 °C
• waagerechte Einbaulage, max.	60 °C
• senkrechte Einbaulage, min.	-20 °C
• senkrechte Einbaulage, max.	45 °C
Umgebungstemperatur bei Lagerung/Transport	
• Lagerung, min.	-40 °C
• Lagerung, max.	70 °C
• Transport, min.	-40 °C
• Transport, max.	70 °C
Luftdruck nach IEC 60068-2-13	
• Betrieb, min.	795 hPa
• Betrieb, max.	1 080 hPa
• Lagerung/Transport, min.	660 hPa
• Lagerung/Transport, max.	1 080 hPa
Relative Luftfeuchte	
• Betrieb, min.	5 %
• Betrieb, max.	95 %
• Kondensation zulässig	Nein
Software	
Browser-Software erforderlich	Webbrowser Mozilla Firefox (ESR31) oder Microsoft Internet Explorer (10/11)

Anschluss technik	
erforderlicher Frontstecker	Ja
Ausführung des elektrischen Anschlusses	Schraubanschluss
Mechanik/Material	
Material des Gehäuses	Kunststoff: Polycarbonat, Kurzzeichen: PC- GF 10 FR
Maße	
Breite	70 mm
Höhe	112 mm
Tiefe	75 mm
Gewichte	
Gewicht, ca.	260 g
letzte Änderung:	07.10.2020 

ANHANG 3: SIPLUS CMS2000

SIEMENS

Datenblatt

6AT8002-1AA00

SIPLUS CMS2000-Grundgerät "VIB; 2 IEPE Schwingungskanäle; 2 analog Eingänge für "Prozesswert; 1 Digital Eingang "zur Drehzahlerfassung;" System-und Grenzwertmeldungen über 3 digitale Ausgänge



Allgemeine Informationen	
Produkttyp-Bezeichnung	VIB
Produktbeschreibung	Grundgerät zur Überwachung von Schwingungen an mechanischen Komponenten auf Basis von Kennwerten sowie frequenzselektiven Analysefunktionen für Messkategorie 0 gemäß EN 61010
Aufbauart/Montage	
Befestigungsart	Hutschiene
Einbaulage	senkrecht
Einbaulage empfohlen	senkrecht
Versorgungsspannung	
Spannungsart der Versorgungsspannung	DC
Nennwert (DC)	24 V
zulässiger Bereich, untere Grenze (DC)	19,2 V
zulässiger Bereich, obere Grenze (DC)	28,8 V
Verlustleistung	
Verlustleistung, typ.	2,6 W
Speicher	

Speicherkapazität gesamt	1 Gbyte
Hardware-Ausbau	
Ausführung der Hardware-Konfiguration	Modulare Aufbautechnik, Erweiterung des Grundgerätes über Erweiterungsmodule möglich
Digitaleingaben	
Anzahl der Disableeingänge	1
Anzahl der Triggereingänge	1
Eingangsspannung	
<ul style="list-style-type: none"> Nennwert (DC) 	24 V
<ul style="list-style-type: none"> zulässige Spannung am Eingang, max. 	28,8 V
Digitalausgaben	
Anzahl der Meldeausgänge	3
Ausführung der Meldeausgänge	elektronisch
Ausgangsstrom	
<ul style="list-style-type: none"> für Meldeausgang, max. 	0,1 A
Analogeingaben	
Anzahl Analogeingänge	2
Eingangsbereiche (Nennwerte), Spannungen	
<ul style="list-style-type: none"> -10 V bis +10 V 	Ja
Eingangsbereiche (Nennwerte), Ströme	
<ul style="list-style-type: none"> 0 bis 20 mA 	Nein
<ul style="list-style-type: none"> +/- 4 mA bis +/- 20 mA 	Ja
Drehzahleingang	
Anzahl der Drehzahleingänge	1
Eingangsspannung	
<ul style="list-style-type: none"> DC 24 V digital 	Ja
<ul style="list-style-type: none"> bei DC, max. 	28,8 V
<ul style="list-style-type: none"> -10 V bis +10 V 	Nein
Eingangsstrom	
<ul style="list-style-type: none"> 0 bis 20 mA 	Nein
<ul style="list-style-type: none"> 4 mA bis 20 mA 	Ja
<ul style="list-style-type: none"> zulässiger Bereich, obere Grenze 	0,1 A
<ul style="list-style-type: none"> Kurzschlussstrom 	0,7 A
Sensoreingang	
Anzahl der IEPE-Sensoreingänge	2
Anzahl der MEMS-Sensoreingänge	0
Abtastfrequenz, max.	46 875 Hz
Schnittstellen	

Art der Datenübertragung	Rohdatenausleitung als WAV-Datei für weitere Analysen (z. B. über CMS X-Tools) per Download über Browser/FTP; Online-Datenübertragung zu CMS X-Tools
Ethernet-Schnittstelle	Ja
SIMOCODE-Schnittstelle	Ja
Protokolle	
Bus-Kommunikation	Ja
Offene IE-Kommunikation	
• TCP/IP	Ja
Webserver	
• HTTP	Ja
Alarmer/ Diagnosen/ Statusinformationen	
Diagnose via Email	Ja
Integrierte Funktionen	
Überwachungsfunktionen	
• Überwachung der Sensoreingänge	Ja
• Schwingungskennwertüberwachung via Effektivwert der Schwinggeschwindigkeit (RMS-Wert)	Ja
• Schwingungskennwertüberwachung via Diagnosekennwert (DKW)	Ja
• frequenzselektiven Überwachung via Schwinggeschwindigkeitsspektrum	Ja
• frequenzselektive Überwachung via Schwingbeschleunigungsspektrum	Ja
• frequenzselektive Überwachung via Hüllkurvenanalyse	Ja
Mess-Funktionen	
• physikalisches Messprinzip	Schwingbeschleunigung
Messbereich	
— Messbereich Schwingfrequenz, min.	2 Hz
— Messbereich Schwingfrequenz, max.	10 000 Hz
Isolation	
Überspannungskategorie	II
Verschmutzungsgrad	2
Schutzart und Schutzklasse	
Schutzart IP	IP20
Normen, Zulassungen, Zertifikate	
Eignungsnachweis	CE, UL 508, CSA C22.2 Nr.142, C-TICK (RCM)
CE-Kennzeichen	Ja
RCM (former C-TICK)	Ja

KC-Zulassung	Ja
EAC (former Gost-R)	Ja
China-RoHS-Konformität	Ja
Referenzkennzeichen gemäß DIN EN 61346-2	P
Referenzkennzeichen gemäß DIN 40719 erweitert gemäß IEC 204-2, gemäß IEC 750	P
Umgebungsbedingungen	
Umgebungstemperatur im Betrieb	
• min.	-20 °C
• max.	65 °C
Umgebungstemperatur bei Lagerung/Transport	
• Lagerung, min.	-25 °C
• Lagerung, max.	85 °C
• Transport, min.	-25 °C
• Transport, max.	85 °C
Höhe im Betrieb bezogen auf Meeresspiegel	
• Aufstellungshöhe über NN, max.	1 500 m
Relative Luftfeuchte	
• Betrieb, min.	5 %
• Betrieb, max.	95 %
• Kondensation zulässig	Nein
Software	
Browser-Software erforderlich	Webbrowser Mozilla Firefox, Google Chrome oder Microsoft Internet Explorer
Anschlusstechnik	
Ausführung des elektrischen Anschlusses der Ein- und Ausgänge	Schraubanschluss
Ausführung des elektrischen Anschlusses für Hilfs- und Steuerstromkreis	Schraubanschluss
• anschließbarer Leiterquerschnitt eindrätig oder mehrdrätig, min.	0,5 mm ²
• anschließbarer Leiterquerschnitt eindrätig oder mehrdrätig, max.	4 mm ²
• anschließbarer Leiterquerschnitt feindrätig mit Aderendbearbeitung, min.	0,5 mm ²
• anschließbarer Leiterquerschnitt feindrätig mit Aderendbearbeitung, max.	2,5 mm ²
• anschließbarer Leiterquerschnitt feindrätig ohne Aderendbearbeitung, min.	0,5 mm ²
• anschließbarer Leiterquerschnitt feindrätig ohne Aderendbearbeitung, max.	2,5 mm ²
Klemmen	
• abnehmbare Klemme für Hauptstromkreis	Ja

• abnehmbare Klemme für Hilfs- und Steuerstromkreis

Ja

Mechanik/Material

Material des Gehäuses

Kunststoff

Maße

Breite

45 mm

Höhe

106 mm

Tiefe

124 mm

Gewichte

Gewicht, ca.

300 g

letzte Änderung:

07.10.2020 

ANHANG 4: SIPLUS CMS4000

SIEMENS

Datenblatt

6AT8000-1BB00-4XA0

SIPLUS CMS-Hardware "IFN VIB-A," "Erfassung analoger Signale;"
 "VIBRATIONSERFASSUNG 6*IEPE;" für
 SCHWINGBESCHLEUNIGUNGS- "Messung; UB=DC 24V; IP67"



Allgemeine Informationen

Produkttyp-Bezeichnung	IFN VIB-ACC
Produktbeschreibung	mit dem IFN VIB-A werden sechs IEPE-Sensorsignale oder fünf IEPE-Sensorsignale und ein analoges Eingangssignal (z. B. für Drehzahl) erfasst

Aufbauart/Montage

Befestigungsart	Hutschiene
Montagezubehör	Montagewinkel optional bestellbar
einzuhaltender Abstand	
<ul style="list-style-type: none"> • bei Reihenmontage vorwärts • bei Reihenmontage aufwärts • bei Reihenmontage rückwärts 	80 mm 25 mm 25 mm

Versorgungsspannung

Ausführung der Spannungsversorgung	stabilisiert
Nennwert (DC)	24 V
zulässiger Bereich, untere Grenze (DC)	19,2 V
zulässiger Bereich, obere Grenze (DC)	32 V
Verpolschutz	Ja

Überspannungsschutz	Ja; max. 35 V
Eingangsstrom	
aus externer Versorgung (DC 24 V), max.	0,2 A
Leistung	
aufgenommene Wirkleistung, max.	4,8 W
Analogeingaben	
Anzahl Analogeingänge	1
Bezeichnung des Analogeingangs	CH6
elektrische Eingangsfrequenz, min.	0 Hz
elektrische Eingangsfrequenz, max.	1 kHz
Überspannungsfestigkeit, min.	-60 V
Überspannungsfestigkeit, max.	60 V
Drahtbruchererkennung	Nein
Kurzschlusserkennung	Nein
Eingangsbereiche	
• Spannung	Ja
Eingangsbereiche (Nennwerte), Spannungen	
• bei DC, min.	-30 V
• bei DC, max.	30 V
Eingangsbereiche (Nennwerte), Ströme	
• bei DC	0,012 mA
Sensoreingang	
Anzahl der Sensoreingänge	6
Bezeichnung der Sensoreingänge	CH1 ... CH6
Ausführung des Sensors	IEPE
Abtastfrequenz, max.	192 kHz
parametrierbare Nachabtastfrequenzen	0,014 / 0,33 / 4 / 8 / 16 / 24 / 48 / 64 / 96 kHz
Überspannungsfestigkeit, min.	-60 V
Überspannungsfestigkeit, max.	60 V
Drahtbruchererkennung	Ja
Kurzschlusserkennung	Ja
Analogwertbildung für die Eingänge	
parametrierbare Nachabtastfrequenzen	4 / 8 / 16 / 24 / 48 / 64 / 96 kHz
Abtastfrequenz, max.	192 kHz
Integrations- und Wandlungszeit/Auflösung pro Kanal	
• Auflösung mit Übersteuerungsbereich (Bit inklusive Vorzeichen), max.	16 bit
Geber	
Gebersignale, IEPE	
• elektrische Eingangsfrequenz, min.	0,1 Hz
• elektrische Eingangsfrequenz, max.	40 kHz

Fehler/Genauigkeiten	
relative Messgenauigkeit für analoge Eingangssignale, min.	-1 %
relative Messgenauigkeit für analoge Eingangssignale, max.	1 %
relative Messgenauigkeit für IEPE-Signale, min.	-0,7 %
relative Messgenauigkeit für IEPE-Signale, max.	0,7 %
Übersprechdämpfung zwischen analogen Eingangssignalen bei 1 kHz	-78 dB
Übersprechdämpfung zwischen Sensorkanälen CH 1 und CH 2 bei 1 kHz	-69 dB
Übersprechdämpfung zwischen Sensorkanälen CH 3 ... CH 6 bei 1 kHz	-73 dB
Signal-Rausch-Verhältnis für analoge Eingangssignale	-69 dB
Signal-Rausch-Verhältnis zwischen Sensorkanälen CH 1 und CH 2 für IEPE-Signale	-57 dB
Signal-Rausch-Verhältnis zwischen Sensorkanälen CH 3 ... CH 6 für IEPE-Signale	-70 dB
Schnittstellen	
Anzahl Schnittstellen	3
Übertragungsgeschwindigkeit, max.	400 Mbit/s
Ausführung der Steckverbindung	Buchsenstecker 8-polig (M12)
Protokolle	
Bus-Protokoll/Übertragungsprotokoll	IEEE 1394a/b
Potenzialtrennung	
Potenzialtrennung Analogeingaben	
• Potenzialtrennung Analogeingaben	Nein
Potenzialtrennung Sensoreingang	
• Potenzialtrennung Sensoreingang	Nein
Schutzart und Schutzklasse	
Schutzart IP	IP67
Normen, Zulassungen, Zertifikate	
Eignungsnachweis	CE
CE-Kennzeichen	Ja
RCM (former C-TICK)	Ja
KC-Zulassung	Ja
EAC (former Gost-R)	Ja
China-RoHS-Konformität	Ja
Einsatz im explosionsgefährdeten Bereich	
• ATEX	Ja
• IECEx	Ja

Umgebungsbedingungen	
Umgebungstemperatur im Betrieb	
• min.	-40 °C
• max.	65 °C
Umgebungstemperatur bei Lagerung/Transport	
• Lagerung, min.	-40 °C
• Lagerung, max.	85 °C
• Transport, min.	-40 °C
• Transport, max.	85 °C
Anschlusstechnik	
Ausführung des elektrischen Anschlusses für Versorgungsspannung	Stiftstecker 5-polig (M12)
Ausführung des elektrischen Anschlusses am Eingang	Buchsenstecker 5-polig (M12)
Ausführung des elektrischen Anschlusses für PE-Leiter	Schraube M4 mit Kontaktscheibe
• anschließbarer Leiterquerschnitt für PE-Anschluss	2,5 mm ²
Mechanik/Material	
Material des Gehäuses	Aluminium
Maße	
Breite	86 mm
Höhe	210 mm
Tiefe	87 mm
Tiefe bei HutschieneMontage	96 mm
Gewichte	
Gewicht (ohne Verpackung)	1,24 kg
letzte Änderung:	07.10.2020 