



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna | Austria

Diplomarbeit

Machine specific Sensor Map for Condition Monitoring Systems

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl. Wirt.-Ing. Prof. eh. Dr. h.c. Wilfried Sihn

(E330 Institut für Managementwissenschaften, Bereich: Betriebstechnik und Systemplanung)

Dipl.-Ing. Matthias Karner

(Fraunhofer Austria Research GmbH)

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Ing. Andreas Fiel, BSc.

Matr. Nr. 1026497

Dreistetterstrasse 12

2721 Bad Fischau-Brunn



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna | Austria

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters an Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen Personen danken, die durch ihre fachliche und persönliche Unterstützung zum Erfolg meines Studiums beigetragen haben. Mein besonderer Dank gilt meiner Familie, insbesondere meinen Eltern, die mir mein Studium ermöglicht und mich in all meinen Entscheidungen unterstützt haben. Dipl. Ing. Matthias Karner, der mit seiner Expertise viel Input zur Vorgehensweise gegeben und mich mit Inhaltsvorschlägen unterstützt hat, möchte ich hier auch meinen Dank aussprechen.

Ebenso danke ich Mag. Natascha Cervicek, Ing. Lukas Fiel BSc, Ing. Walter Fiel und Ing. Kurt Römmer für das Korrekturlesen. Ihr unermüdlicher und oft nächtelanger Einsatz ermöglichten erst eine Arbeit in der vorliegenden Qualität abzugeben. Besonders möchte ich mich bei Johanna Minar für die Mithilfe bei Formatierung und Aufbau der Arbeit bedanken.

Fürs die Transkription der Interviews und weiteres Korrekturlesen danke ich Ingrid Fiel sehr herzlich.

Eine sehr große Hilfe war auch Dipl.-Ing. Nora Camilla Sonderegger, die mir beim Konzept zur Darstellung der Tabellen eine unschätzbare Unterstützung war. Ohne ihre Ideen zur Darstellung der Ergebnisse wäre die Auswertung der Daten in dem Umfang nicht möglich gewesen.

Mein persönlicher Antrieb für diese Arbeit war stets der Gedanke daran, einen Grundstein zu legen, auf dem zukünftige Arbeiten aufbauen können. Ich denke, dass diese und ähnliche Arbeiten das Potential haben, in Zukunft das Arbeiten zum Thema Condition Monitoring zu erleichtern.

Allen Experten möchte ich für ihr Engagement und ihre Zeit danken. Ohne sie wäre eine Validierung der Tabelle nicht möglich gewesen.

Teile der dargestellten Erkenntnisse wurden in Zusammenarbeit mit AC2T research GmbH erarbeitet und durch das österreichische COMET-Programm gefördert.

(Projekt: COMET K2 XTribology, Nr. 849109; Projektträger: AC2T research GmbH, Österreichisches Kompetenzzentrum für Tribologie)

Kurzfassung

Das Condition Monitoring (CM) als Überwachung des Maschinenzustandes ist aus den heutigen Produktionen nicht mehr wegzudenken. In der Vergangenheit wurden zahllose Studien zu einzelnen Problemstellungen im Bereich CM veröffentlicht. Jedoch gibt es keine zusammenfassende Aufstellung von Maschinenelementen und ihren Verschleißvorgängen. Wer neu auf dem Gebiet ist, wird durch die Fülle an wissenschaftlichen Artikeln über Verschleißversuche und die fehlende Übersicht an einer schnellen CM-Lösung gehindert. Diese Arbeit schafft einen Überblick über Korrelationen zwischen Maschinenelementen und Sensoren zur Verschleißmessung an denselben. Vor allem verbindet sie tribologisch belastete Baugruppen mit ihren häufigsten Verschleißarten, den aus diesen resultierenden Effekten und zuletzt den Sensoren, welche nach aktuellem Stand zur Verschleißmessung der genannten Maschinenelemente besonders geeignet sind. Anders als bei vorhergehenden Arbeiten, bei denen meist nur ein Maschinenelement analysiert wurde, werden hier eine Auswahl an Maschinenelementen mit den verschleißmessenden Sensoren in Verbindung gesetzt. Dafür wurde die tabellarische Darstellung gewählt um dem Leser einen strukturierten Überblick bieten zu können. Das ermöglicht die aktuell gebräuchliche Methode der Verschleißmessung an einem Maschinenelement und gleichzeitig Alternativen kennenzulernen. Zusätzlich wird durch Angabe der Quellen die Möglichkeit zur tieferen Recherche geboten. Die Literaturrecherche konzentriert sich dabei vor allem auf den Verschleiß, der durch mechanische Belastung hervorgerufen wird. Chemischer Verschleiß sowie Erosion werden hier nicht behandelt.

Die Arbeit wirft die Frage auf, ob man von einem Verschleißeffekt auf den am Besten passenden Sensor zur Messung dieses Effektes schließen kann, oder ob es noch weitere Kriterien zur Differenzierung gibt. Zusätzlich wird die Anwendbarkeit von Resultaten aus Laborversuchen im realen Umfeld diskutiert.

Evaluiert wurden die Ergebnisse mit Experteninterviews, in denen nicht nur offene Fragen beantwortet, sondern auch weitere interessante Sichtpunkte angesprochen und diskutiert wurden.

Schlüsselworte

Industrie 4.0 (I4.0)

Verbleibende nützliche Lebensdauer

Verschleiß

Verschleißarten

Verschleißeffekt

Verschleißmessung

Werkzeugzustandsüberwachung

Zustandsüberwachung

Abstract

Condition monitoring (CM) is a indispensable part of today's productions. Over the years, countless studies have been published on individual issues in the area of CM, but there is no summary of machine elements and their wear processes. Anyone new to the field is hindered by the abundance of scientific articles on wear attempts and the lack of clarity on a fast CM-solution.

This diploma thesis presents an overview on the current („state of the art“) sensors for measuring wear on machine elements. In particular, it combines machine elements with the most common types of wear, with the resulting effects and last but not least the sensors, which are particularly suitable for wear measurement of these machine elements according to the current state. Unlike other works, where often only one machine element has been analyzed, a large number of machine elements in connection with the wear-measuring sensors are reviewed and shown in a table. This allows the reader to understand the currently used methods of wear measurement while learning alternatives. In addition, by providing the sources, the opportunity for deeper research is given. The literature research focuses on wear, which is caused by mechanical stress. Chemical wear and erosion are not dealt with.

The work raises the question of whether one can conclude from a wear effect on the most suitable sensor for measuring this effect, or if there are other criteria for differentiation. In addition, the applicability of results from laboratory experiments in the real environment is discussed.

The results were evaluated by means of expert interviews in which open questions were answered and further interesting points of view were addressed.

Keywords

Condition Monitoring (CM)

Industry 4.0 (I4.0)

Remaining Useful Life (RUL)

Tool Condition Management (TCM)

Wear

Types of wear

wear effect

wear measurement

Abkürzungsverzeichnis

AE	Akustische Emission
ANN	künstliches neuronales Netzwerk
bzw.	beziehungsweise
ca.	zirka
CM	Condition Monitoring
CNC	Computerized Numerical Control
d.h.	das heißt
DMS	Dehnmessstreifen
FE	Finite Elemente
FFT	Fast Fourier Transformation
FMS	Flexible Fertigungssysteme
i.A.	im Allgemeinen
IT	Informationstechnik
I4.0	Industrie 4.0
NC	Numerical Control
NFN	Neuro-Fuzzy Network
NN	Neuronales Netzwerk
REM	Rasterelektronen-Mikroskop
RUL	Remaining Useful Life
TCM	Tool Condition Monitoring
uvm.	und vieles mehr
VR	Virtual Reality
z.B.	zum Beispiel
ZVW	Zellulare Verbundwerkstoffe

Gendererklärung

Es sei darauf hingewiesen, dass sämtliche personenbezogenen Bezeichnungen geschlechtsneutral zu verstehen sind, um den Lesefluss nicht durch genderspezifische Formulierungen zu stören. Die vorliegende Arbeit verwendet dazu das generische Maskulinum.

Inhaltsverzeichnis

1	Zur Diplomarbeit	1
1.1	Allgemeine Einführung in das Themenfeld	1
1.2	Problemstellung und Forschungsfragen	1
1.3	Lösungsansatz und Arbeitspakete	3
1.4	Aufbau und Struktur der Arbeit	4
2	Begriffsabgrenzung	6
2.1	Instandhaltung	7
2.2	CM - Condition Monitoring	8
2.3	TCM - Tool Condition Monitoring	9
2.4	Direkte und indirekte Messmethoden	9
2.5	Dissipation und Dissipationseffekte	10
2.6	Verschleiß	10
2.7	Industrie 4.0 (I4.0) und Digitalisierung in der Produktion	11
3	Vertiefende Grundlagen	13
3.1	Verschleißmechanismen	13
3.2	Verschleißarten	15
3.2.1	Gleitverschleiß	16
3.2.2	Wälzverschleiß	16
3.2.3	Stoßverschleiß	16
3.2.4	Schwingungverschleiß	16
3.2.5	Furchungverschleiß	17
3.2.6	Strahlungsverleiß	17
3.2.7	Erosion	17
3.2.8	Werkzeugverschleiß	17
3.3	Messprinzipien und Sensorik	19
3.3.1	Beschleunigung	20
3.3.2	Bildauswertung	20
3.3.3	Elektrizität	20
3.3.4	Finite Elemente (FE)	20
3.3.5	Gyroskop	21
3.3.6	Härte	21
3.3.7	Kraft	21
3.3.8	Magnetismus	21
3.3.9	Rauheit	22
3.3.10	Temperatur	22
3.3.11	Verschleißvolumen	22
3.3.12	Winkelmesser	22

4	State-of-the-Art	23
4.1	Methodologie der Sammlung	23
4.2	Literaturdiskussion von Condition Monitoring	25
4.2.1	Elastische Teile	25
4.2.2	Gelenke	25
4.2.3	Getriebe	26
4.2.4	Gleitflächen	28
4.2.5	Kugelgewindetriebe	28
4.2.6	Kupplungsflächen/Bremsen	29
4.2.7	Pressverbände	29
4.2.8	Rad/Schiene-Paarung	30
4.2.9	Schneiden	31
4.2.10	Schrauben	32
4.2.11	Stahlseile	33
4.2.12	Turbinenschaufeln	33
4.2.13	Verbundwerkstoffe	34
4.2.14	Walzen	35
4.2.15	Wälzlager	36
4.3	Zusammenfassung der Literaturdiskussion	39
5	Praxisteil	40
5.1	Aufbereitung der Ergebnisse	40
5.1.1	Vom Maschinenelement zum Sensor	40
5.1.2	Zusätzliche tabellarische Darstellung der Ergebnisse	41
5.2	Diskussion der Ergebnisse	54
5.2.1	Vorgehensweise	54
5.2.2	State-of-the-Art - Recherche	55
5.2.3	Schlussfolgerung	57
6	Evaluierung der Ergebnisse	59
6.1	Methodologie	59
6.2	Zusammenfassungen der Interviews	61
6.2.1	Interview 1	61
6.2.2	Interview 2	62
6.2.3	Interview 3	63
6.3	Diskussion der Interviews	65
7	Resümee und Ausblick	68
8	Verzeichnisse	70
9	Anhang	1

1 Zur Diplomarbeit

1.1 Allgemeine Einführung in das Themenfeld

Von der Inbetriebnahme einer Maschine bis zu ihrer Demontage ist sie mit ihren einzelnen Komponenten („Maschinenelementen“) den mechanischen, thermischen und chemischen Gesetzen ausgeliefert. Vor allem Dissipationseffekte sind für die Tribologie¹ von großer Bedeutung. Sie entstehen meist langsam, sind allerdings irreversibel, was sie für Industrie und Wirtschaft oft fundamental macht. Sie schwächen und/oder schädigen ein Maschinenelement und führen im schlimmsten Fall dazu, dass die für diese Komponente vorgesehene Funktion nicht mehr erfüllt werden kann. Dies resultiert in Werkstück- oder Maschinenschäden, Qualitätsverlusten und kann schlussendlich zu kostspieligen, langen und gefährlichen Maschinenausfällen führen². (Zhang et al. 2016; Kurada and Bradley 1997)

1.2 Problemstellung und Forschungsfragen

In dieser Arbeit wird mit einer ausführlichen Begriffserklärung der in Bezug auf die in der Thematik der Diplomarbeit häufig erwähnten Begriffe gestartet (siehe Kapitel 2). Besonders soll die aktuelle Literatur zum Thema Condition Monitoring (siehe Kapitel 2.2) von Maschinenelementen der produzierenden Industrie behandelt werden. Hervorgehoben wird TCM, da sich diese Monitoringmethode schon in der Vorfeldrecherche als unumgänglich in Bezug auf die Problemstellung herausgestellt hat (siehe Kapitel 2.3). So zeigen auch die Autoren Zhang et al. (2016), dass das Thema TCM einen bedeutenden Stellenwert in der Produktion einnimmt und voraussichtlich noch weiter an Bedeutung gewinnen wird.

Anschließend wird eine Übersicht über die Relation zwischen den analysierten Maschinenelementen, ihren Verschleißarten, den resultierenden Verschleißeffekten und den diese messbar machenden Sensoren geschaffen. Dafür wird die vorhandene Literatur diskutiert und zusammengefasst (siehe Kapitel 4.2). Das Ergebnis der wissenschaftlichen Arbeit ist eine Tabelle, die die Relationen zwischen Maschinenelementen und Sensoren klar und strukturiert aufzeigt.

Ähnliche Ansätze vertreten auch schon Sommer et al. (2010) in ihrem Buch „Verschleiß metallischer Werkstoffe“, und bieten so eine solide Grundlage für diese Arbeit. Allerdings existiert nach aktuellem Stand der Recherche noch keine Arbeit, die ähnliche Ziele hat wie die vorliegende. Die meisten Forschungsergebnisse im Tool Condition Monitoring (TCM) werden auf Basis der belasteten Maschinenelemente und nicht auf Grund der verwendeten

¹Die Tribologie ist die Lehre der Reibung und ihrer Effekte. Czichos (2015a) beschreibt Tribologie als: „*Tribologie ist die Wissenschaft und Technik von Wirkflächen in Relativbewegung und zugehöriger Technologien und Verfahren*“.

²In Produktionen mit CNC-Maschinen werden bis zu 20 Prozent der Ausfallzeiten dem Werkzeugausfall zugerechnet. Diese Tatsache führt zu reduzierter Produktivität und wirtschaftlichen Verlusten, die es zu verhindern gilt. (Zhang et al. 2016; Kurada and Bradley 1997)

Sensoren abgegrenzt. Als Ergebnis werden nur einzelne Methoden zur Verwendung als TCM-Strategien für bestimmte Bearbeitungsvorgänge herangezogen. Für andere werden sie oft ignoriert. Dies schränkt den Umfang der TCM-Forschung künstlich ein, insbesondere wenn der Fokus auf eine bestimmte Art der Bearbeitung beibehalten wird. (Rehorn et al. 2005) Diese Arbeit soll die Herangehensweise von beiden Seiten ermöglichen.

Der Fokus wurde auf die Definition des Begriffs „Verschleiß“ gelegt, da dieser in der Fachliteratur verschiedenst interpretiert wird. In diesem Zusammenhang sollen oft gestellte Fragen zu dem Thema beantwortet werden. Wo zieht man die Grenze zwischen einem verschlissenen Teil und einem nicht mehr funktionstüchtigen/gebrochenen Teil? Gibt es auch außerhalb der Technik Verschleiß, und kann man das auf diesen Gebieten erworbene Wissen in Technik und Wirtschaft nutzen?

Czichos (2015a) versteht Verschleiß als periodische und tribologische Beanspruchung eines Körpers, die in Materialverlust an der Oberfläche resultiert. Generell beginnt Verschleiß mit der (Micro-)Bruchinitiierung, gefolgt vom Wachstum des Bruches sowie plastischer Verformung und Strömung des Materials. (Boness and McBride 1991) Wird ein Körper darüber hinaus beansprucht, folgt ein irreversibler Materialverlust an der Stelle des Bruchs. Die Ausmaße dessen sind von den einwirkenden (Umgebungs-) Faktoren abhängig. (Baccar and Söffker 2015)

Diese Definition klärt schon einige der vorher gestellten Fragen. Verschleiß ist demnach die Beeinträchtigung (Veränderung oder Schädigung) eines Körpers an dessen Oberfläche. Der Begriff „Materialverlust“ zeigt, dass der Verschleißvorgang irreversibel ist. Anhand dieser Definition ist aber nicht erkennbar, wo die Grenze zwischen verschlissenen und nicht mehr funktionstüchtigen Teilen liegt. In der vorliegenden Arbeit wird ein defektes Teil und/oder die Nichterfüllung des vorgesehenen Verwendungszwecks als „nicht mehr funktionstüchtig“ beschrieben. So ist hier ein Drehmeißel, der zwar noch schneidet, aber die gewünschte Qualität nicht mehr erbringt, nicht „verschlissen“, sondern ein „Defektteil“. Diese Unterscheidung ist wesentlich, da mit dem vorher beschriebenen Meißel bei einem schlechteren Ergebnis noch weitergearbeitet werden kann.

Um auf die Fragen, ob es außerhalb der Technik auch Verschleiß gibt und ob man das auf diesen Gebieten erworbene Wissen in der industriellen Technik nutzen kann, einzugehen, sei die Medizin als Hauptbeispiel genannt. Hier gibt es Verschleißstudien, die sich auf der einen Seite mit weiterleitenden Gefäßen im menschlichen Körper (Blutgefäße, Verdauungstrakt, uvm. die durch Strahlverschleiß beansprucht werden) und auf der anderen Seite mit künstlichen Gelenken und Implantaten aus verschiedensten Materialien auseinandersetzen.

Rosenberg (2003) stellt in ihrer Arbeit fest, dass jährlich über eine halbe Million Kniegelenkprothesen implantiert werden. Nachfrage und Potential für Forschung und Entwicklung im Bereich von Prothesen sind sichtlich gegeben. Es ist daher durchaus im Interesse der Forschung, auch dieses Wissen in eine technisch basierte Arbeit einfließen zu lassen. In der heutigen Produktion gibt es kein Verschleißszenario das ausgelassen werden darf.

Die heute produzierten Maschinen sind meist universell einsetzbar, einer Vielzahl an Belastungen ausgesetzt und werden im Schichtbetrieb rund um die Uhr betrieben. Dennoch sei hier nochmals erwähnt, dass sich diese Arbeit aus Qualitätsgründen insbesondere mit den mechanischen Verschleißvorgängen, deren Ursachen und der Detektion/Messung der damit einhergehenden Änderungen auseinandersetzt (siehe Kapitel 2).

Der Autor beantwortet in dieser Arbeit die folgenden Fragen:

- Was ist Condition Monitoring (CM)?
- Was ist ein Verschleißvorgang?
- Wie kann ein Verschleißvorgang gemessen werden?
- Welche der messbaren Vorgänge (physikalische und/oder chemische Veränderungen) laufen während der Verschleißvorgänge von Maschinenelementen und Werkzeugen ab?
- Kann mit dem Wissen um das Bearbeitungsverfahren und die bearbeitende Maschine auf die zur Verschleißmessung geeigneten Sensoren geschlossen werden?
- Welche Sensoren eignen sich besonders zur Messung der Vorgänge, die den Verschleiß begleiten?
- Welche Sensoren sind am Markt verfügbar?

1.3 Lösungsansatz und Arbeitspakete

Nach einer Vorfeldrecherche in der Literatur zu den Themen Condition Monitoring (CM), Tool Condition Monitoring (TCM), Industrie 4.0 (I4.0), Verschleiß (siehe Kapitel 2.6) und Sensorik wurde eine Übersicht an wesentlich scheinenden Stichworten in einer Mindmap³ erstellt. In dieser wurden anfangs konkrete Fragestellungen festgehalten und daraus wiederum einzelne Stichworte für die diversen Interessensgebiete abgeleitet. Mit dieser Methode erhielt der Autor ein großes Repertoire an Begriffen, die für die Recherche in den jeweiligen Fachgebieten genutzt wurden. Im Zuge der Arbeit ergaben sich weitere Begriffe, andere erwiesen sich nicht als zielführend. So entstand ein dynamischer Grundstock an Begriffen, der die Bearbeitung aller vorab festgelegten Forschungsfragen erheblich vereinfachte (siehe Kapitel 2).

Am Ende der Vorfeldrecherche wurde Hintergrundwissen zu den Schlagworten erarbeitet und zusätzlich in der Mindmap festgehalten. Zusammengehörige Informationen wurden in passenden Kapiteln gebündelt (siehe Kapitel 3). Mit fortlaufender Recherche konnte der Autor auch die einschlägige Literatur mit einpflegen und diese vergleichen (siehe Kapitel

³„Mindmap“ wird als Begriff einer eigenen Wissensdatenbank verwendet. Es wurden in einem eigenen Dokument tabellarisch und strukturiert das Thema betreffende Daten gesammelt.

4.2). Aus dem Ergebnis konnte eine Tabelle der Maschinenelemente und ihrer Sensoren entwickelt werden. Diese bot am Ende der Diplomarbeit die Basis für die Tabelle: „Vom Maschinenelement zum Sensor“ (siehe Kapitel 5).

Nach Beendigung der Recherche konnte die Tabelle erarbeitet werden.

Zu ihrer Evaluierung und Überprüfung des wirtschaftlichen Nutzens wurden anschließend Experteninterviews durchgeführt (siehe Kapitel 6).

1.4 Aufbau und Struktur der Arbeit

Diese Arbeit gliedert sich in vier große Teile. Zu Beginn wird auf themenspezifische Grundlagen eingegangen (siehe Kapitel 2) und die verwendeten Begriffe werden abgegrenzt (siehe Kapitel 3). Der zweite große Teil der vorliegenden Arbeit fasst wissenschaftliche Publikationen zum Thema CM von Maschinenelementen zusammen (siehe Kapitel 4). Im dritten Teil werden Tabellen angeführt, die die Resultate der Recherchen im zweiten Teil übersichtlich und strukturiert darstellen und so Vergleiche zulassen (siehe Kapitel 5). Der vierte Abschnitt besteht aus den Interviews mit Experten aus der Industrie zur Validierung der Ergebnisse (siehe Kapitel 6).

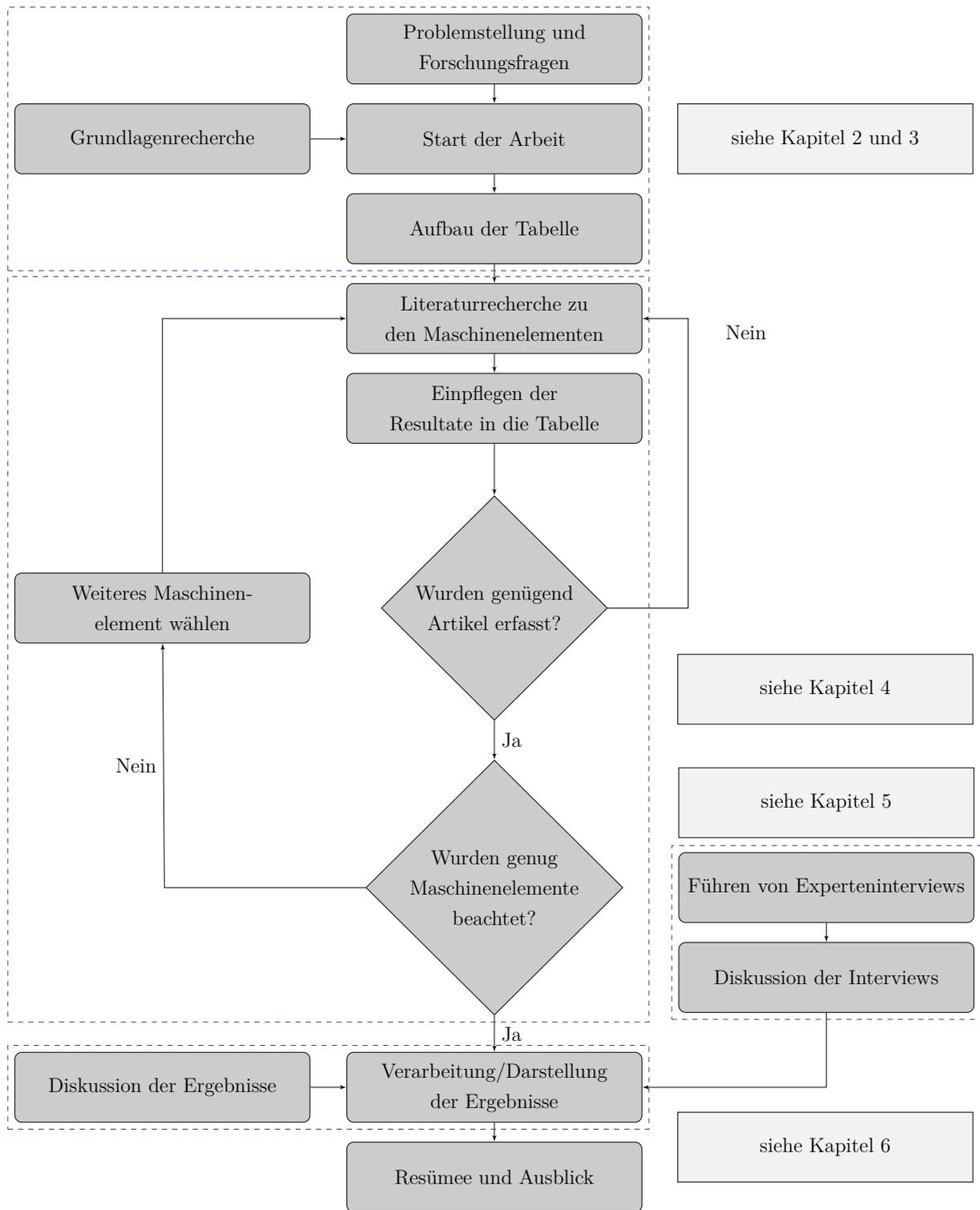


Abbildung 1: Aufbau und Struktur der Arbeit

2 Begriffsabgrenzung

In den Anfängen der spanenden Fertigung war das Maschinenpersonal für Werkzeug und Werkstück verantwortlich. Es war also selbstverständlich, dass jeder Maschinenbetreuer ein eigenes, manuelles Condition Monitoring (CM) für seine Maschine entwickelte. Die Methoden waren dabei das Interpretieren der Geräusche während der Fertigung, das Deuten von Vibrationen der Maschine oder das Beurteilen der Form der abgelösten Späne (siehe Kapitel 6.2.2, 6.2.3). Langjährige Erfahrung ermöglichte es dem Maschinenbediener, dass die Maschine überwacht und bei Bedarf gewartet werden konnte. (Kurada and Bradley 1997) Maschinenübergreifendes CM oder gar Tool Condition Monitoring (TCM) gab es nicht.

Mit der Einführung von NC-Automaten verschwand dieses Wissen zunehmend aus den Werkshallen⁴. Zur Kompensation des Knowhow-Verlustes wurde nach Lösungen gesucht, um eine Überwachung der Maschinen und ihrer Werkzeuge sicherzustellen. Zu Beginn wurden Sensoren aufgrund ihrer hohen Anschaffungskosten nur selten installiert. Man setzte sie nur für die notwendigen Steuer- und Regelprozesse sowie zur Gewährleistung der Sicherheit ein. Oft resultierte dieses Vorgehen darin, dass eine Maschine zuerst mehrmals ausfallen musste, bis man sagen konnte: „x Stunden nach dem Ereignis y (z.B. rapides Erhöhen des Maschinengeräusches, Verkanten einer Führung, uvm.) kommt es mit einer Wahrscheinlichkeit von z zu einem Ausfall.“ Zum Zeitpunkt dieser Aussage waren aber schon Zeit, Energie und Geld für Instandhaltung aufgewendet worden (siehe Kapitel 6.2.3).

Aufgrund der Preisentwicklung der Sensoren und der Signalverarbeitung in den letzten Jahren werden nun auch immer wieder Studien veröffentlicht, bei denen man eine Vielzahl an Sensoren zur Verschleißdetektion installiert, um in der Signalverarbeitung ergänzende und vergleichende Berechnungen anstellen zu können. (Honrubia 2017; Liao and Pavel 2012; Miller 2015) Solche Investitionen waren früher undenkbar. Alle Bestrebungen, die die Darstellung des Maschinenzustandes zum Ziel haben, werden unter den Begriffen CM und TCM zusammengefasst.

Diese Diplomarbeit behandelt insbesondere den mechanischen Verschleißvorgang, dessen Ursachen und die zur Detektion/Messung der damit einhergehenden Änderungen nötigen Sensoren (siehe Kapitel 1.2). Erosionen und thermische Verschleißerscheinungen werden primär nicht behandelt. Für eine aktuelle Recherche („State-of-the-art“-Recherche) im Fachgebiet der Diplomarbeit sind die Begriffe TCM (siehe Kapitel 2.3) und I4.0 (siehe Kapitel 2.7) unumgänglich. Deshalb werden auch diese Themen und ihr Zusammenhang mit dem Thema Verschleiß (siehe Kapitel 2.6) näher erläutert.

⁴Die Erfindung der NC-Maschinen und die Weiterentwicklung zu CNC-Maschinen waren große Schritte für die Industrie des 20. Jahrhunderts. Um die Produktion noch autonomer gestalten und menschliche Fehler ausschließen zu können, tendiert man heute zu „Flexiblen Fertigungssystemen“ (FMS).

2.1 Instandhaltung

Christer Idhammar sagte 2006: „*Good maintenance cost time and money, bad maintenance costs more of both.*“ und betonte damit die Bedeutung von Instandhaltung und Condition Monitoring. (Matyas 2016) Er wies mit dieser Aussage darauf hin, dass die laufenden Kosten einer funktionierenden Instandhaltung in fast allen Fällen die Reparatur- und Ausfallkosten bei weitem unterschreiten. Das ist wesentlich, da die Instandhaltungskosten oft während des laufenden Betriebes anfallen. Ein Unternehmen muss also investieren, ohne einen sichtbaren Mehrwert für das Produkt aus der Investition zu generieren.

Reparaturkosten hingegen belasten das Unternehmensbudget nur im Reparaturfall. In der Hoffnung auf wenige Ausfälle verzichten manche Produktionsbetriebe deswegen auf vorbeugende Instandhaltung und CM. Die kostensenkende Bedeutung von vorbeugenden Maßnahmen wird erst bei einem Bauteildefekt evident.

Nicht überall haben Instandhaltung oder CM eine wirtschaftliche Berechtigung. Manchmal ist es auch kostengünstiger eine ausfallbehebende Instandhaltungsstrategie zu wählen. Ist z.B. ein redundantes System vorhanden, kann unter Umständen bei einem temporären Ausfall eines Systems die Anlage weiter betrieben werden (siehe Kapitel 6.2.2).

Laut DIN31051 (2012) ist Instandhaltung als „*Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen des Managements während des Lebenszyklus einer Betrachtungseinheit zur Erhaltung des funktionsfähigen Zustandes oder der Rückführung in diesen, sodass sie die geforderte Funktion erfüllen kann.*“ definiert.

In den 90er-Jahren herrschte noch eine korrektive Instandhaltungsstrategie vor, heute sind Risikostudien, zuverlässigkeits-/instandhaltungsorientierte Konstruktionen, Informations- und Kommunikationsnetzwerke, Vorbeugungsmaßnahmen, uvm. entscheidende Teile der Instandhaltung. Die Werkzeuge dafür wurden in entsprechendem Maße umfangreicher und teurer wie die Maschinen komplexer. Genauso stiegen auch die Ausfallkosten und -zeiten der Maschinenelemente. In einer Welt der sich immer schneller entwickelnden Technologien ist die Anlagenverfügbarkeit ein sehr eminenter Einflussfaktor in einem Produktionsunternehmen, sowohl in Bezug auf Produktivität als auch in Hinsicht auf die Konkurrenz. Ein Produktionsausfall resultiert in einem Umsatzverlust, den sich heute kaum ein Unternehmen mehr leisten kann (siehe Kapitel 6.2.1).

Instandhaltung gliedert sich in planmäßige oder vorbeugende Instandhaltung und in Ausfallbehebung (siehe Kapitel 2). CM ist Ersterem mit seinen Unterkategorien vorausschauender und zustandsabhängiger Instandhaltung zuzuordnen (siehe Kapitel 2.2). Umgesetzt werden Instandhaltungsmethoden mittels Inspektion, Wartung, Verbesserung und Instandsetzung bzw. Austausch.

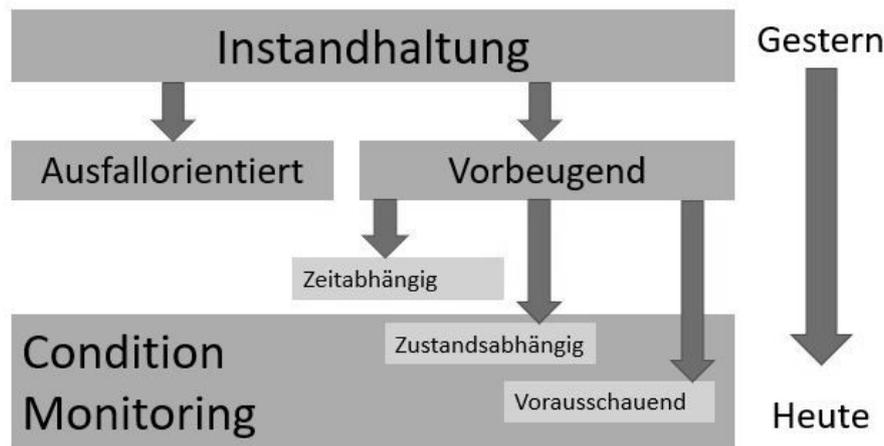


Abbildung 2: Instandhaltung, Gestern und Heute in Anlehnung an Matyas (2016)

Es sollte Ziel jedes Unternehmens sein, CM so gut wie möglich einzusetzen, um die Instandhaltung entsprechend zu unterstützen. Basierend auf den Daten von CM kann ein Bauteilwechsel geplant und in kurzer Zeit durchgeführt werden. Um eine schnelle Reparatur zu gewährleisten, braucht man die richtigen Leute zur richtigen Zeit mit den richtigen Ersatzteilen am richtigen Ort (siehe Kapitel 6.2.1), um so Produktivitätsverluste gering zu halten.

2.2 CM - Condition Monitoring

Condition Monitoring (CM) beschreibt die Zustandsüberwachung einer Maschine/eines Maschinenelements. Dies kann offline (in Intervallen außerhalb des Betriebes) oder online (permanent während des Betriebes) realisiert werden. Durch penibles Analysieren und Messen der physikalischen Größen kann nach Auswertung der Ergebnisse auf den aktuellen und zukünftigen Zustand der zu überwachenden Einheit geschlossen werden. CM ist ein wichtiger Bestandteil der Instandhaltung von heute und umfasst die zustandsabhängige und vorausschauende Instandhaltung. Während die zustandsabhängige Instandhaltung anhand von Messdaten den aktuellen Zustand des Maschinenelements feststellt und so mögliche Instandhaltungsmaßnahmen planbarer macht, hat vorausschauende Instandhaltung den Vorteil, dass sie auch den zukünftigen Zustand (Abnutzungsverlauf) vorhersagen kann und dadurch die Ausfallzeiten auf ein Minimum beschränkt.

CM wird daher vor allem dort eingesetzt wo es zu dramatischen Schäden oder teuren Produktionsausfällen bei Versagen eines Bauteils kommen kann (siehe Kapitel 6.2.1 und 6.2.3). (Matyas 2016; Czichos 2015a)

Zum Beispiel werden in Kraftwerken Daten aus dem CM-System mit den Daten der Betriebsüberwachung zusammengeführt, um ein möglichst aussagekräftiges Bild des Zustandes der Anlage zu bekommen (siehe Kapitel 6.2.2).

2.3 TCM - Tool Condition Monitoring

TCM beschreibt die von einem Unternehmen getätigten Maßnahmen zur Überwachung eines Werkzeuges. Die dafür notwendige Signalverarbeitung und -überwachung sowie Vorhersage des Werkzeugzustandes sind wesentliche Bestandteile des TCM und tragen dazu bei, Verluste durch Werkzeugverschleiß oder Werkzeugschaden zu reduzieren. (Zhang et al. 2016) Aus den Resultaten leitet man dann den Instandhaltungszeitpunkt und die Instandhaltungsmethode ab.

Schon 1997 war klar: *„Die Anforderungen an Werkzeugverschleiß-Sensoren, um in einer Bearbeitungsumgebung erfolgreich zu sein, beinhalten:*

- *gute Korrelation zwischen Sensorsignal und Werkzeugzustand*
- *Signal-Antwort sollte schnell genug sein, um eine Feedbackschleife zu ermöglichen*
- *simpel in Design und robust in der Konstruktion*
- *berührungslos, präzise und zuverlässig*
- *keine Interferenzen mit dem Bearbeitungsprozess“*

(Kurada and Bradley 1997, S. 57)

In diesem Artikel wurden schon damals die bedeutenden Merkmale angeführt, die bis heute das TCM charakterisieren.

2.4 Direkte und indirekte Messmethoden

Verschleiß kann auf verschiedene Arten gemessen werden. Die verwendeten Messmethoden werden in zwei Gruppen unterteilt: indirekt (kontinuierlich, online) und direkt (intermittierend, offline). Nach dem selben Prinzip wird beim Einsatz von Sensoren in der Werkzeugüberwachung zwischen „im Prozess“ („in-process“) und „im Zyklus“ („in-cycle“) unterschieden. Der in-process-Sensor überwacht den Werkzeugzustand einer Maschine während des gesamten Bearbeitungsvorgangs. Der in-cycle-Sensor hingegen untersucht das Werkzeug in periodischen Abständen (z.B. zwischen Bearbeitungsblöcken oder beim Werkstück-/Werkzeug-wechsel). (Kurada and Bradley 1997)

Beispiele für direkte Messmethoden sind Übergangswiderstandsmessung zwischen Werkzeug und Werkstück, Messung der Radioaktivität, Begutachtung durch ein Mikroskop, Messung mittels Laserstrahlen und Sichtkontrolle. Sie werden meist offline, also nicht während des laufenden Betriebes, durchgeführt. Diese Vorgehensweise birgt allerdings das Risiko falscher Messergebnisse in Folge differenzierter und/oder nicht reproduzierbarer Umgebungsbedingungen (z.B. Temperatur). Sie stellt das absolute Maß des Werkzeugverschleißes fest (siehe Kapitel 6.2.3).

Bei der indirekten Messmethode werden Schneidkraft, Drehmoment, Verschiebung, Oberflächenrauigkeit, akustische Emission (AE), Vibration, Temperatur, Spindelleistung uvm.

gemessen. Indirekte Messungen werden meist online, also während des laufenden Betriebes, durchgeführt. Der Vorteil des ununterbrochenen Zugriffs auf aktuell gemessene Verschleißdaten während eines Arbeitsschrittes wiegt in vielen Fällen den Nachteil auf, der sich durch geringere Messgenauigkeit ergibt. Indirekte Messsysteme können leichter installiert und implementiert werden. (Zhang et al. 2016) Es empfiehlt sich also für TCM die indirekten Messmethoden zu verwenden.

2.5 Dissipation und Dissipationseffekte

Unter Dissipation werden in Folge unerwünschte Veränderungen von Systemelementen oder Systemparametern durch irreversible Prozesse verstanden.

Dissipationseffekte werden in Reibung (d.h. Umwandlung der mechanischen Bewegungsenergie in Wärme), Verschleiß (d.h. Stoff- und Formänderungen von Systemelementen) und Signal-Informationsverluste bei Analog-Digital-Umwandlungen unterteilt. Nicht in jedem Fall kann zwischen den drei Dissipationsvarianten eine präzise Unterscheidung getroffen werden. So ist z.B. Verschleiß oft das Resultat von Reibung, und Signalverlust wird teilweise durch Verschleiß begründet. (Czichos 2015a)

2.6 Verschleiß

Verschleiß ist fortschreitender Materialverlust an der Oberfläche eines Körpers, hervorgerufen durch mechanische Ursachen, d.h. Kontakt und Relativbewegung eines festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörpers. (DIN52108 2010)

Hauptursache für den Verschleiß ist die Zeit. Denn keine mechanische Verschleißart und kein Verschleißmechanismus sorgen für merkbare oder gar beeinflussende Veränderungen an der Oberfläche eines Kontaktpartners, wenn die Beanspruchung nur ein einziges Mal auftritt.

Demnach wird Ermüdungsbruch/Schwingungsbruch oder Reibdauerbruch als Verschleißfolge gesehen, hingegen Gewaltbruch nicht. Bei Ermüdungsbruch/Schwingungsbruch bricht das Bauteil an der belasteten Stelle nach Beanspruchung durch wiederholte Lastwechsel. Reibdauerbrüche entstehen durch gleichzeitig mechanische Wechselbeanspruchung und Schwingungsverschleiß in den Kontaktstellen schwingbeanspruchter Bauteilpaarungen. Dabei wird die Dauerfestigkeit gemindert. (Sommer et al. 2010) Beide Brucharten werden unter dem Verschleißeffekt „Bruch“ in dieser Arbeit behandelt. Gewaltbruch hingegen wird hier als Bruch durch einmalige Überbeanspruchung gesehen, die meist aus Fehlkonstruktion oder falscher Verwendung des Maschinenelements resultiert, und nicht behandelt.

Chemischer Verschleiß ist ein Prozess, der genügend Zeit beansprucht. Es ist unmöglich, die Reaktionen (z.B. Erosion) schon nach sehr kurzer Zeit zu beobachten. Verschleiß kann also nach dem Motto “Der stete Tropfen höhlt den Stein.” verstanden werden. Erst fortwährende Beeinflussung beeinträchtigt das Maschinenelement in einem messbaren Aus-

maß. Beispiele hierfür sind z.B. erodierte Schienen, verstumpfende Schneidkanten und zerrüttete Reibflächen. Verschleiß ist also fortschreitender Materialverlust an der Oberfläche eines festen Körpers (Grundkörper), der durch mechanische Ursachen hervorgerufen wird. Hierbei kann der Materialverlust an der Oberfläche durch schleifende, rollende, schlagende, chemische, kratzende oder thermische Beanspruchung hervorgerufen werden. Die temporäre Abfolge dieses Vorganges ist meist durch drei charakteristische Phasen gekennzeichnet: (Czichos and Habig 2015)

- Einlaufverschleiß. i.A. nimmt hier die Verschleißgeschwindigkeit ab.
- Verschleiß im Beharrungszustand. i.A. bleibt hier die Verschleißgeschwindigkeit gleich.
- Progressiver Verschleißverlauf. i.A. nimmt hier die Verschleißgeschwindigkeit zu.

Wesentlich für die Bestimmung des Verschleißes ist die Werkstoffpaarung.

Ist der Werkstoff zu hart, zu spröde oder auch zu weich für das bearbeitende Werkzeug, kommt es zu vorzeitigem Verschleiß. (Metalltechniklexikon 2017) Um hier zwei Extreme zu nennen: Bei einem zu harten Werkstück bricht das Werkzeug oder weist nach der ersten Bearbeitung schon beträchtliche Riefen an den geometriegebenden Flächen auf. Zu weiches Material des Werkstückes kann das Werkzeug verkleben. Bei hoher Temperatur besteht die Gefahr des Verhärtens des Werkzeugs, was es in Folge ebenfalls unbrauchbar macht.

Zu guter Letzt sind Temperatureinflüsse sowie die herrschenden Kräfte auf das Werkzeug als Verschleißursachen zu nennen. Werkstoffpaarung, Temperatur und Krafterfluss lassen sich aber bei fachgerechtem Werkzeugeinsatz gering halten. So gibt es für die meisten Werkzeuge Richtlinien zur Verschleißminimierung.

2.7 Industrie 4.0 (I4.0) und Digitalisierung in der Produktion

Nach der „ersten industriellen Revolution“ ca. 1800 erleichterten Dampfmaschinen die Arbeit in der Produktion und revolutionierten die Welt von damals. Mit der „zweiten industriellen Revolution“ ca. 1900 hielt die Elektrizität Einzug in die Werkshallen und bestimmte von nun an die Produktionen. Als „dritte industrielle Revolution“ wird die Einführung von IT und Elektronik um 1970 gesehen.

Die ersten drei Abschnitte der Entwicklung der Produktion wurden nachträglich benannt und einer bestimmten Zeit zugeordnet. Die „vierte industrielle Revolution“ wurde hingegen schon ausgerufen bevor sie überhaupt begonnen hat. Aus diesem Grund scheiden sich hier die Meinungen, ob es eine „vierte industrielle Revolution“ überhaupt geben, wie sie aussehen und wann sie stattfinden wird. Fest steht, dass in Zukunft die gesamte Wertschöpfungskette über den Lebenszyklus von Produkten (vom individuellen Auftrag über Entwicklung und Fertigung bis zum Recycling) mittels enormer Mengen digitaler Daten neu organisierbar und steuerbar wird (siehe Kapitel 6.2.3).

Wichtige Schlagworte in Bezug auf I4.0 sind „cyber physical systems“ (CPS), „internet of

things“ (IOT), „cloud computing“, Netzwerkneutralität⁵, „production on demand“ und „smart factory“. Es wird klar, dass es hier nicht mehr um die Produktion an sich, sondern viel mehr um die Daten der Produktion geht. Fragen nach der Art der Produktion werden in der I4.0 von Fragen nach der Gestaltung der Produktion in Hinblick auf Fernsteuerbarkeit, Leistung und Flexibilität abgelöst. Riesige Mengen an Daten werden gemessen, generiert, versendet, teilweise verarbeitet und abgespeichert.

Zukünftig wird die Frage immer lauter werden, ob Maschinen dem Menschen den Arbeitsplatz streitig machen. Die Tendenz dazu ist offensichtlich vorhanden und hat in manchen Bereichen schon Einzug gehalten. Auf der anderen Seite gibt es auch Meinungen, dass auch in Zukunft Maschinen noch bedient werden müssen und die Komplexität einiger Vorgänge nur vom Menschen bewältigt werden kann (siehe Kapitel 6.2.1, 6.2.2, 6.2.3). (Ahrens 2012; Spath et al. 2013; Dombrowski et al. 2014; Ten Hompel and Henke 2014; Schwab et al. 2016; Bauernhansl 2017; Kagermann 2017)

⁵Als Erfinder und prägender Geist der Netzwerkneutralität gilt der amerikanische Programmierer und Jurist Tim Wu.

3 Vertiefende Grundlagen

Wesentlich ist, dass Reibung und Verschleiß keine Materialeigenschaften sind, sondern vielmehr durch Wechselwirkungsprozesse kontaktierender Körper oder Stoffe entstehen und stets auf die Materialpaarung, d.h. im Allgemeinen auf das betreffende tribologische System, bezogen werden müssen. (Czichos 2015a)

Dieses Kapitel ist zu einem großen Teil von den Werken von Czichos (2015a), Macherauch and Zoch (2011) und Czichos and Habig (2015) geprägt. Ihre Definitionen entsprechen denen, der vorliegenden Arbeit und wurden als Referenz herangezogen.

Um dieses komplexe Thema bearbeiten zu können wurden die folgenden Einteilungen in Verschleißmechanismen und Verschleißarten getroffen:

3.1 Verschleißmechanismen

Verschleiß hat viele Erscheinungsformen. Um diese besser zu verstehen, unterscheidet man zwischen Verschleißmechanismen und -arten. Verschleißmechanismen sind tribochemische Reaktionen, Oberflächenzerrüttung, Adhäsion und Abrasion. Mit Hilfe dieser werden die Verschleißarten beschrieben. (Baccar and Söffker 2015; Czichos 2015a; Macherauch and Zoch 2011)

Adhäsion ist gekennzeichnet durch (Mikro-)Kaltverschweißungen. Diese entstehen bei der Reibbewegung und werden kurz nach ihrem Entstehen wieder aufgebrochen. Ihre Merkmale sind das Aufrauen der Oberfläche und Schuppenbildung. (Macherauch and Zoch 2011) Zur Vorbeugung können die Möglichkeit der Schmierung, die Vermeidung von Metall-Metall-Paarungen und die Vermeidung von Überbeanspruchung angeführt werden. (Czichos and Habig 2015)

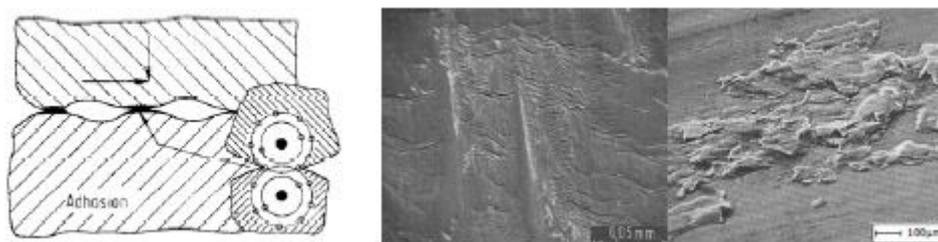


Abbildung 3: Adhäsion (Macherauch and Zoch 2011)

Abrasion bezeichnet den Materialabtrag infolge von Mikrozerspanung. Ihre Merkmale sind Riefenbildung oder eine Mikrospanbildung (Mikropflügen). (Macherauch and Zoch 2011) Um der Abrasion vorzubeugen kann man entscheiden, den beanspruchten Werkstoff härter als seinen Gegenkörper zu gestalten, oder, wenn das nicht möglich ist, einen zähen Werkstoff zu wählen. (Czichos and Habig 2015)



Abbildung 4: Abrasion (Macherauch and Zoch 2011)

Oberflächenzerrüttung beschreibt einen durch Ermüdung ausgelösten Materialverlust. Durch wechselnde mechanische Beanspruchung entstehen über einen längeren Zeitraum Risse. Bei fortwährender Belastung kommt es zur Abtrennung von Partikeln und Bildung von Grübchen (engl. pittings). (Macherauch and Zoch 2011) Hier besteht die Möglichkeit durch harte, zähe, homogene Werkstoffe oder Druckeinsparungen in den Oberflächenzonen dem Verschleiß vorzubeugen. (Czichos and Habig 2015)

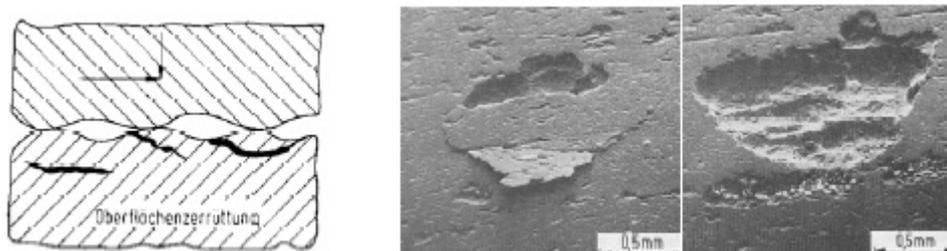


Abbildung 5: Oberflächenzerrüttung (Macherauch and Zoch 2011)

Tribochemischer Verschleiß beschreibt die chemischen Reaktionen, deren Resultat spröde Reaktionsprodukte sind. Diese lösen sich oft in Folge mechanischer Beanspruchung von der Oberfläche ab. (Macherauch and Zoch 2011) Vorbeugend gibt es die Möglichkeit, statt Metallen Kunststoffe oder Keramiken zu wählen, form- anstelle von kraftschlüssigen Verbindungen einzusetzen, und hydrodynamische Schmierung einzubringen. (Czichos and Habig 2015)

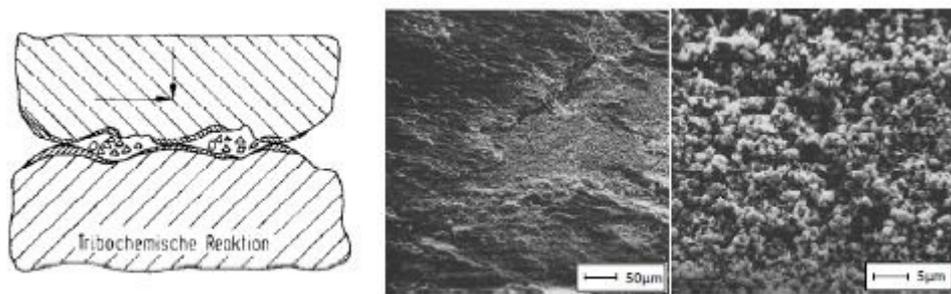


Abbildung 6: tribochemischer Verschleiß (Macherauch and Zoch 2011)

3.2 Verschleißarten

An den Verschleißarten sind die verschiedenen Verschleißmechanismen in unterschiedlichem Maße beteiligt, sodass auch mehrere Merkmale gleichzeitig bei einer Verschleißart auftreten können.

Aus der Literatur sind viele Systeme zur Einteilung der Verschleißarten bekannt. (Czichos and Habig 2015; IFG 2017; Stachowiak and Stachowiak 2005) Dabei führt die Verwendung von verschiedenen Bezeichnungen für dieselben oder ähnliche Verschleißmechanismen zu Unklarheiten in der Einteilung. Um einen möglichst vollständigen Überblick zu schaffen, wurde nach der Art des betrachteten tribologischen Systems und nach der dominierenden Kinematik eingeteilt. Dabei orientiert sich die Kategorisierung an der Arbeit von Czichos and Habig (2015), da sie einen guten Überblick bietet und die gewählten Kategorien der vorliegenden Arbeit gut beschreibt.

Verschleißarten, die primär in Tribosystemen mit geschlossener Systemstruktur auftreten:

- Gleitverschleiß
- Wälzverschleiß
- Stoßverschleiß
- Schwingungverschleiß
- Furchungverschleiß (Gegenkörperfurchung)

Verschleißarten, die primär in Tribosystemen mit offener Systemstruktur auftreten:

- Furchungverschleiß (Teilchenfurchung)
- Strahlverschleiß
- Erosion (Strömungverschleiß).

Czichos and Habig (2015); Czichos (2015a)

In der Folge sollen die verschiedenen Verschleißarten kurz erklärt werden.

3.2.1 Gleitverschleiß

Als Gleitverschleiß wird in dieser Arbeit der Verschleiß bei Gleitbewegung kontaktierender Werkstoffe oder Maschinenelemente bezeichnet. In der Fachliteratur wird, abhängig vom Zwischenstoff z.B. Schmierstoff, noch weiter unterschieden.

Am Gleitverschleiß können alle Verschleißmechanismen beteiligt sein. Auf das Ausmaß der Anteile am Verschleißprozess, die vom jeweiligen tribologischen System abhängen, kann aus Verschleißmarken und den entstandenen Verschleißpartikeln geschlossen werden. (Czichos and Habig 2015)

3.2.2 Wälzverschleiß

Wälzverschleiß steht im Folgenden für den Verschleiß, der bei Roll- oder Wälzbewegungen in tribologischen Systemen entsteht. Im Gegensatz zum Gleitverschleiß ist in diesem Fall Oberflächenzerrüttung als dominierender Verschleißmechanismus zu nennen. Sie resultiert vor allem aus der herrschenden Hertzsch Pressung⁶.

Wechselnde Beanspruchungen auf der Wälzkörperoberfläche führen bei dieser Verschleißart anfangs zu Gefügeänderungen, in Folge zu Riss- und am Ende zu Grübchenbildung. Verschleißminderung durch Schmierung ist nicht vollständig möglich, da sich die Hertzsch Pressung durch den Schmierfilm fortsetzt.

Typisch für den Wälzverschleiß ist die aus der Grübchenbildung resultierende Geräuschabstrahlung. Sie kann mit geeigneten Körperschall- oder Luftschallaufnehmern⁷ gemessen werden. (Czichos and Habig 2015)

3.2.3 Stoßverschleiß

Stoßverschleiß steht im Weiteren für Zusammenstoß oder Aufprall fester Körper und den damit verbundenen typischen Verschleiß. Dieser entsteht durch lokale Formänderungen im Kontaktbereich und Stoffänderungen der Stoßpartner infolge mechanischer Aktivierung und Temperaturerhöhung. Charakteristische Stoßverschleißformen sind die Rissbildung und die plastische Deformation. (Czichos and Habig 2015)

3.2.4 Schwingungsverschleiß

Als Schwingungsverschleiß wird die oszillierende Relativbewegung eines tribologischen Systems mit kleinen Schwingungsamplituden zwischen zwei Kontaktpartnern verstanden. Diese schwer sichtbare Verschleißart wird in die drei Zustände „stick regime“ (Haften mit

⁶Unter Hertzsch Pressung wird die größte Spannung, die in der Mitte der Berührungsfläche zweier elastischer Körper herrscht, verstanden.

⁷siehe Kapitel 3.3.1

elastischer Verformung), „mixed stick-slip“ (Teilreibung) und „gross slip regime“ (vollständiges Abgleiten) unterteilt. Bei dieser Verschleißart können alle Verschleißmechanismen beteiligt sein.

Eines der bekanntesten charakteristischen Merkmale, das durch diese Verschleißart ausgelöst wird, ist der „Passungsrost“ oder „Reibrost“. (Czichos and Habig 2015)

3.2.5 Furchungsverschleiß

Furchungsverschleiß wird die Verschleißart genannt, bei der die Rauheitshügel an dem einen Kontaktpartner oder additional harte Drittkörper (Dreikörper-Abrasion) durch die Abrasionsprozesse an der Oberfläche des zweiten Kontaktpartners Kratzer, Riefen oder Furchen hervorrufen. Die beschriebenen Mechanismen werden unter Mikropflügen, Mikrozerspanen und Mikrobrechen zusammengefasst. In der Fachliteratur wird zusätzlich zwischen Zweikörper- und Dreikörper-Abrasion unterschieden. Der Verschleißwiderstand dieser Verschleißart wird durch Härte und Bruchzähigkeit der beteiligten Materialien beeinflusst. (Czichos and Habig 2015)

3.2.6 Strahlungsverschleiß

Als Strahlungsverschleiß werden in der Literatur die beim Auftreffen körniger Teilchen auf eine Oberfläche entstehenden Merkmale bezeichnet. Diese Verschleißart wird zusätzlich nach ihrem Anstrahlwinkel auf die Oberfläche unterteilt. Auf die genaue Differenzierung wird in der vorliegenden Arbeit allerdings nicht näher eingegangen. Die Verschleißintensität hängt von Stoßenergie, Korngröße und Kornhärte sowie den Materialeigenschaften der Oberfläche ab. (Czichos and Habig 2015)

3.2.7 Erosion

Unter Erosion versteht man die Verschleißart, die auf Grund von Gas- oder Flüssigkeitsströmung ohne bzw. mit darin enthaltenen Teilchen Kraft auf Bauteil- bzw. Werkstoffoberflächen überträgt und dadurch Materialbeeinträchtigungen hervorruft. Sie wird in Gas-, Kavitations-, Tropfenschlag- und Flüssigkeitserosion sowie Erosionskorrosion unterteilt. (Czichos and Habig 2015)

3.2.8 Werkzeugverschleiß

Diese Art des Verschleißes wird in der klassischen Einteilung nicht zu den Verschleißarten gezählt, sondern extra behandelt und in diverse Verschleißmechanismen aufgliedert. Da in den meisten gelesenen Artikeln jedoch nur der Überbegriff „Werkzeugverschleiß“ verwendet wird, führt diese Arbeit den Werkzeugverschleiß als eigene Verschleißart an und versteht darunter in erster Linie den Verschleiß von Schneiden. Allgemein bekannt unter „stumpf werden“ handelt es sich bei Werkzeugverschleiß um eine sehr komplexe Verschleißart, die von vielen verschiedenen Einflussfaktoren abhängig ist.

Die Verschleißform Adhäsion ist unter anderem an Aufbauschneide⁸ und Anlagerungen an der Spanfläche beteiligt. Daraus resultieren Oberflächen- und Maßhaltigkeitsfehler und oft auch Schneidkraftänderungen.

Abrasion entsteht meist durch harte Partikel im oder auf den Werkstücken (siehe Kapitel 4). Nicht zu vergessen sind Verschleißpartikel die aus den Werkzeugen ausbrechen. Auch diese können Grund für Abrasionsverschleiß am Werkzeug sein.

Die Verschleißform Oberflächenzerrüttung wird als Folge mechanischer oder thermischer Wechselbeanspruchung gesehen. Plakatives Beispiel für das Vorkommen dieser Verschleißform sind Wechselbeanspruchungen beim Zerspanen im unterbrochenen Schnitt.

Tribooxidation tritt vor allem bei höheren Temperaturen auf. Diese Temperaturen treten bei Zerspanungswerkzeugen vor allem bei hohen Schnittgeschwindigkeiten auf. (Czichos and Habig 2015)

⁸Eine Aufbauschneide ist eine schichtförmige Ablagerung des bearbeiteten Materials auf dem Werkzeug.

3.3 Messprinzipien und Sensorik

Hier werden die im Praxisteil (siehe Kapitel 5) verwendeten Sensoren aufgezählt. Es ist wichtig, den für den Verwendungszweck richtigen Sensor zu wählen, da man sonst wenig aussagekräftige, falsche oder gar keine Signale auswerten und weiterverarbeiten kann. So ist schon bei der Montage darauf zu achten, dass der Sensor für die Umgebungsbedingungen geeignet ist und den thermischen, chemischen und mechanischen Beanspruchungen entspricht. Weiters ist bei der Sensorauswahl darauf zu achten ob die Signale online oder offline (siehe Kapitel 2.4) verarbeitet werden sollen.

In den Zusammenfassungen der Artikel werden die eingesetzten Sensoren und nicht deren Signale behandelt. Folglich wird auch in der Tabelle nicht näher auf die Signalverarbeitung eingegangen. Ob das erhaltene Signal mittels Spannung, Strom oder Ladung gemessen wird, wird hier nicht näher erläutert. Auch auf das Zusammenspiel mehrerer Sensoren in entsprechenden Schaltungen wird nicht eingegangen. Es sei allerdings darauf hingewiesen, dass es in vielen Fällen zielführender ist, einen Sensorverbund einzusetzen, um einen aussagekräftigen Verschleißwert zu erhalten (siehe Kapitel 6.2.3).

Heutzutage werden vermehrt digitale Sensoren⁹ verbaut, da sie komplexere Eigenschaften messen können und durch standardisierte und individualisierbare Software leichter in der Handhabung sind (z.B. hohe Linearität, hohe Amplitudenauflösung, uvm.). Diese Sensoren eröffnen ein völlig neues Spektrum an Möglichkeiten für die Signalverarbeitung und bieten dem Anwender eine Vielfalt an Anwendungsmöglichkeiten. Allerdings werden bei der immer kleiner werdenden Hardware oft auch Anschlüsse eingespart, was in der Praxis zu Problemen führen kann (siehe Kapitel 6.2.2).

Die Sensorik wird nach folgenden Funktionsgrößen der Technik gegliedert:

- Sensorik zur Messung geometrischer Größen - Bildauswertung
- Sensorik kinematischer Größen - Akustik¹⁰, Beschleunigung, Schwingung, Winkelmessung
- Sensorik dynamischer Größen - Kraft, Drehmoment
- Sensorik von Einflussgrößen - Temperatur, Feuchtigkeit, Magnetismus, Röntgen, Härte

(Czichos 2015a)

Online-Messprinzipien sind in erster Linie Beschleunigung, Elektrizität, Gyroskop, Kraft, Magnetismus, Temperatur und Winkelmesser.

Hingegen werden Bildauswertung, Finite Elemente (FE), Härte, Rauheit und Verschleißvolumen vorwiegend für die Offline-Messung herangezogen.

⁹Digitale Sensoren wandeln das gemessene, analoge Signal direkt im Bauelement mittels eines AD-Wandlers um und geben ein digitales Signal an die Auswerteelemente weiter.

¹⁰Die Messung von akustischen Signalen wird in dieser Arbeit als Beschleunigungsmessung angeführt (siehe Kapitel 3.3.1).

Eine strikte Trennung der Messprinzipien ist nicht möglich da einige Sensorarten sowohl online als auch offline ausgewertet werden können (siehe Kapitel 2.4).

Im Folgenden werden die in der Tabelle angeführten Sensoren kurz erklärt.

3.3.1 Beschleunigung

Unter Beschleunigungssensoren werden hier sowohl die in der Literatur explizit als solche ausgewiesene, als auch Schwingungssensoren und akustische Messmethoden (Mikrofone) verstanden.

Sind die einfachen Beschleunigungssensoren nur zur Messung einachsiger Beschleunigungszustände geeignet, kommen mittlerweile vermehrt Sensoren, die in zwei oder sogar drei Dimensionen messen können, zum Einsatz.

Beschleunigungssensoren sind wohl die am meisten verbreiteten CM-Sensoren. Sie werden zur Analyse von Lagern (siehe Kapitel 6.2.1) und auch zur Analyse ganzer Getriebe (siehe Kapitel 6.2.2, 6.2.3) eingesetzt. Auf dem Gebiet der Beschleunigungssensoren gibt es aber trotz der vielen Erfahrungswerte noch immer Potential, um die Forschungstätigkeit zu intensivieren (siehe Kapitel 4.2.3).

3.3.2 Bildauswertung

Die vorliegende Diplomarbeit versteht unter Bildauswertung sowohl die Analyse mittels diverser Mikroskope, automatisierte Bildverarbeitungszyklen, das Ablesen eines Mikrometers oder einer Schieblehre, als auch das Vergleichen von Bildern. Es wird auch die digitale Bildauswertung dazu gezählt. Sie basiert in den meisten Fällen auf den Daten von halbleiterbasierten Bildsensoren, die das Licht aufnehmen und in ein digitales Signal zur Weiterverarbeitung umwandeln. Aufgrund der ähnlichen Sensorik gehören nicht nur Infrarot- und Wärmebild-, sondern auch Röntgensensoren zur Bildauswertung.

3.3.3 Elektrizität

Unter dem Sensor Elektrizität wird hier sowohl Strommessung (Amperemeter), Widerstandsmessung (Ohmmeter) als auch Spannungsmessung (Voltmeter) verstanden. Dies resultiert daraus, dass für alle drei Einheiten das gleiche Messgerät (Oszilloskop bzw. Multimeter) verwendet werden kann. Der Messaufbau zur Ermittlung der Signale unterscheidet sich deutlich, und die Auswahl des Messgerätes hängt von den gewünschten Messdaten ab. Um die Sensoren auf ein sinnvolles Minimum zu reduzieren, wurde auf eine feinere Unterteilung verzichtet.

3.3.4 Finite Elemente (FE)

Die FE-Methode ist zwar kein Sensor, wird in dieser Arbeit aber aufgrund der oftmaligen Nennung in den gelesenen Artikeln angeführt. Mittels FE können Verschleißberechnun-

gen sehr effizient und schnell durchgeführt werden, ohne durch langwierige Versuche einen Verschleißzustand generieren zu müssen.

Die Methode der finiten Elemente beschreibt ein numerisches Verfahren zur Lösung unterschiedlichster Aufgabenstellungen. Weit verbreitet ist sie in Festigkeits- und Verformungsuntersuchungen, weshalb sie für die Verschleißuntersuchung von Festkörpern sehr wertvoll ist. Die FE-Methode basiert auf dem Lösen eines komplexen Systems aus Differentialgleichungen. Das Problem wird in viele kleine Teile von einfacher Form („finite Elemente“) aufgeteilt. Nach Einstellung der nötigen Bedingungen und Parameter kann man so eine Analyse der Aufgabenstellung starten. Nach Abschluss derselben können die notwendigen Berechnungen ausreichend genau, aber auch rechtfertigbar schnell durchgeführt werden.

3.3.5 Gyroskop

Ein Gyroskop oder auch Kreiselinstrument wird vor allem zur Navigation und Messung der Lageänderung (räumliche Orientierung) verwendet. Das Funktionsprinzip basiert auf der Drehimpulserhaltung eines drehenden Körpers (Kreisel). Dieser Sensor wird oft in Verbindung mit einem Beschleunigungssensor eingesetzt.

3.3.6 Härte

Härte wird allgemein als der mechanische Widerstand bezeichnet, den ein Werkstoff einem anderen Körper entgegensetzt, der in ihn mechanisch einzudringen versucht. Damit stellt sie auch in gewisser Weise ein Maß für das Verschleißverhalten dar, was in den meisten Artikeln unberücksichtigt bleibt (siehe Kapitel 4). Auf die unterschiedlichen Härteskalen/Härteprüfverfahren wird hier aber nicht eingegangen.

3.3.7 Kraft

Bei einem Kraftaufnehmer werden infinitesimale elastische Verformungen in Zug- oder Druckrichtung gemessen. Aus den Messergebnissen wird auf die Belastung des Sensors geschlossen. Biegemomentsensoren (z.B. Dehnmessstreifen (DMS)) liegt dasselbe Prinzip zugrunde. Sie werden deswegen ebenfalls in der Kategorie „Kraft“ angeführt. Kraft kann auf viele verschiedene Arten gemessen werden. Die richtige Wahl des Verfahrens ist vom Einsatzfall abhängig.

3.3.8 Magnetismus

Der Magnetismus wird mittels eines sogenannten Magnetometers festgestellt. Dieses wird eingesetzt, um die magnetische Flussdichte eines Materials (auch die von Flüssigkeiten oder Dispersionen) zu messen. Auf die verschiedenen Verfahren wird an dieser Stelle nicht eingegangen.

3.3.9 Rauheit

Die Messung der Rauheit basiert größtenteils auf optischen Verfahren. Sie wird in der Norm EN ISO 25178 beschrieben. Beispielhaft werden die folgenden Methoden zur Messung angeführt: Weißlichtinterferometrie, Fokusvariation, Konfokaltechnik, chromatisch-konfokale Abstandsmessung, Interferometrie, taktile Profilometer, Photogrammetrie im REM.

3.3.10 Temperatur

Unter Temperaturmessung wird hier nur die Messung der Temperatur eines Körpers durch thermischen Kontakt verstanden. Die Messung anhand von Wärmestrahlung wird im Kapitel Bildauswertung (siehe Kapitel 3.3.2) behandelt. In dieser Arbeit wird nicht auf die verschiedenen Verfahren eingegangen.

3.3.11 Verschleißvolumen

Verschleißvolumen steht in dieser Arbeit für das Bestimmen des Volumens, das durch den Verschleißprozess abgetragen wurde. Ein gebräuchliches und genaues Verfahren hierfür ist das Ausmessen der Verschleißoberfläche vor und nach dem Verschleißvorgang mittels Bildauswertung. Das Differenzvolumen entspricht dem Verschleißvolumen. In der Praxis wird jedoch oft die Abwaage der gesammelten Verschleißteilchen zur Berechnung herangezogen. Physikalisch betrachtet handelt es sich dabei um keine Volumensfeststellung, da die Eigenschaften der Materialteilchen unbekannt sind und/oder variieren.

3.3.12 Winkelmesser

Ein Winkel-, Neigungs- und Gefällemesser oder Inclinometer ist ein Messinstrument zum Messen eines eingenommenen Winkels (oft zur Horizontalen, z.B. mit einer Wasserwaage). Alte Geräte verlangen noch das Ablesen an einer Skala. Moderne Neigungsmesser sind voll automatisiert und geben ein digital auswertbares Signal an die Verarbeitung weiter. Winkelmesser werden bei Kugelgewindetrieben zur Überprüfung des Geradeauslaufs und bei Tests von Schraubverbindungen zu Kontrolle der Verdrehung verwendet (siehe Kapitel 4.2.5 und 4.2.10).

4 State-of-the-Art

4.1 Methodologie der Sammlung

Die Grundlagenrecherche der vorliegenden Arbeit wurde zum Teil in Fachbüchern (Czichos and Habig 2015; Czichos 2015a, b; Sommer et al. 2010) und in Artikeln, die den jeweiligen Stand der Technik zusammenfassen (Ashutosh Verma 2014; Kurada and Bradley 1997; Rehorn et al. 2005), getätigt. Sie wurde aufgrund des Vorwissens aus dem Studium und nach einschlägiger Recherche durchgeführt und soll einen guten Überblick über die Materie verschaffen.

Die zu Beginn im Exposee gestellten Fragen wurden anschließend ein weiteres Mal überarbeitet und konnten somit besser an die Zielsetzung angepasst werden (siehe Kapitel 1.2). Aus ihnen wurde ein vorläufiges Konzept der Arbeit erstellt. Sie wurden des Weiteren als Leitfaden für die vertiefende Recherche herangezogen.

Ergänzend dazu ergaben sich durch die im Vorfeld definierte Problemstellung sowie die Forschungsfragen (siehe Kapitel 1.2) einige weitere Kapitel. Anhand dieser Unterteilung konnte nun das Wissen aus der Vorfeldrecherche strukturiert und niedergeschrieben werden. Die vorab getroffene Einteilung diente dem Autor auch dazu, den Überblick zu bewahren und die Konsistenz der Arbeit zu gewährleisten.

Entsprechend den zuvor definierten Maschinenelementen erfolgte die Literaturrecherche in den gewählten Datenbanken¹¹. Um die Recherche so effektiv wie möglich zu gestalten wurden die verwendeten Suchbegriffe aufgelistet und kategorisiert. So konnte eine wiederholte Suche nach denselben Schlagworten vermieden werden. Anhand der Titel und der Zusammenfassungen wurde die Entscheidung getroffen ob ein Artikel für die Arbeit relevant ist und sich eine nähere Analyse lohnt. Dabei wurde darauf geachtet, ob der Verschleiß indirekt oder direkt festgestellt wurde, wobei der indirekten Messmethode der Vorzug gegeben wurde.

Ziel der Arbeit war es, die Kernaussagen der analysierten Artikel zusammenzufassen und nur auf einzelne, vorher definierte Fragen genauer einzugehen. Dafür wurden die essentiell erscheinenden Stellen im Artikel markiert und anschließend nur die markierten Absätze zusammengefasst. Es wurde darauf geachtet, dass die erfassten Arbeiten nicht älter als fünf Jahre (2013) sind, um die Aktualität des Ergebnisses sicherzustellen.

¹¹<https://scholar.google.at/>
<https://www.sciencedirect.com/>
<http://ieeexplore.ieee.org/>
<http://www.ub.tuwien.ac.at/>

Der Autor versuchte in seinen Zusammenfassungen folgende Fragen zu beantworten:

- Welches Maschinenelement wurde behandelt?
- Welche Verschleißart wurde behandelt?
- Welche Effekte resultieren aus der Verschleißart?
- Welcher Sensor wird zur Verschleißmessung angewandt?
- Wo sitzt der Sensor zur Messung, und wie wird das Signal verarbeitet?
- Was sind Kernaussage und Ausblick des Artikels?

Anhand dieser Kriterien für die Zusammenfassungen wurden die Kategorien für eine zukünftige tabellarische Darstellung festgelegt¹² und die essentiellen Aussagen der ersten Recherchen eingepflegt.

In weiterer Folge wurden erste Daten auf Konsistenz und Brauchbarkeit kontrolliert, auf Vollständigkeit überprüft und die Tabelle weiter ergänzt. Zusätzlich konnte die Darstellung der Resultate in der Tabelle (siehe Kapitel 9) für eine ansprechende Präsentation vorbereitet werden (siehe Kapitel 5.1.2 und 9).

¹²Grundlage für eine erste Version der Tabelle war die Arbeit von Sommer et al. (2010). Diese ursprüngliche Version wurde anschließend von der vorliegenden Tabelle abgelöst.

4.2 Literaturdiskussion von Condition Monitoring

Die Auswahl der Maschinenelemente wurde vom Autor bewusst getroffen. Dabei war klar, dass Maschinenelemente nicht in scharf getrennte Gruppen zerlegt werden können. Das Verschleißverhalten eines Gelenkskopfs in einer Gelenkspfanne entspricht in hohem Maße dem einer Gleitfläche. Auch werden Gelenke im Maschinenbau meist durch Schraubenverbindungen zusammen gehalten.

Weiters war schon zu Beginn der Arbeit bekannt, dass sowohl Wälzlager, ein Verbund von Innen-, Außenring, Wälzkörpern und Käfig, als auch Gleitflächen, also zwei aufeinander gleitende Körper, analysiert werden würden. Das erschien sinnvoll, da man in der Praxis im Reparaturfall nur ganze Lager austauschen wird und nicht einzelne Wälzkörper (siehe Kapitel 6.2.1, 6.2.2 und 6.2.3).

Im Folgenden werden die Ergebnisse der systematischen Literaturrecherche präsentiert.

4.2.1 Elastische Teile

Song et al. (2016) beschreiben einen Test an Stahl unter hoher zyklischer Belastung auf das Ermüdungsverhalten. Die Tests wurden mit und ohne Reibverschleiß durchgeführt und die Ergebnisse verglichen. Dehnungs- und Verdrängungserscheinungen wurden zusätzlich mit FE-Methoden berechnet. Das Ermüdungsrisserverhalten des Werkstoffes in diesen beiden Tests wird basierend auf den Beobachtungen der mikromorphologischen Eigenschaften der Bruchoberfläche unter einem REM analysiert. Der Einfluss des Reibverschleißes auf Very-High-Cycle-Ermüdungseigenschaften wird diskutiert. Am Ende der Arbeit dienen S-N Kurven¹³ dem Vergleich der beiden Tests.

Für die Tests mit Reibverschleiß werden adhesiver Verschleiß, abrasiver Verschleiß, kleine Brüche und Materialverlust als Verschleißmechanismen angeführt.

4.2.2 Gelenke

Rosenberg (2003) beschreibt in ihrer Arbeit den Verschleiß künstlicher Kniegelenke¹⁴. Sie führt dafür keinerlei Versuche selbst durch, verweist aber auf mehrere Artikel, in denen Versuche beschrieben werden.

Sie untersucht dabei die Eigenschaften der Polyäthylenkomponente beim künstlichen Kniegelenkersatz. In der Arbeit werden die Hauptprobleme des Materials bei Verwendung als Gelenkersatz erarbeitet und diskutiert. Als Ursache für dessen Verschleiß führt sie den Mischreibungszustand zwischen Abrasion und Oberflächenzerrüttung an. Verschleißeffekte (begünstigt durch Gewichtsbelastung, Oxidation und Temperatursteigerung) nennt sie mit Abrieb und Rissbildung. Die Autorin führt weiters als verschleißmessende Sensoren röntgenologische Untersuchungen und Lichtmikroskopie an. Durch diese Verfahren werden

¹³Bei S-N Kurven wird die Spannung über der Anzahl der Lastwechsel aufgetragen.

¹⁴Das Einbeziehen von medizinischen Ergebnissen ist für eine qualitative Arbeit unerlässlich (siehe Kapitel 1.2).

vor allem der Abrieb (Verschleißrate in mm/Jahr), aber auch die Gleitflächen beurteilt. Bai et al. (2013) berechnen den Verschleiß von Drehgelenken. Dafür wird ein FE-Modell der Spaltverbindung erstellt und der Reibungseffekt unter Einbeziehung eines Coulomb-Reibungsmodells berücksichtigt. Der Hauptberechnungsprozess der Verschleißanalyse der Spaltverbindung erfasst zusätzlich die Dynamikanalyse. Ein Viergelenk-Mehrkörpersystem mit Drehfreilauf wird verwendet, um die Simulation durchzuführen und dynamische Reaktionen und Verschleißigenschaften zu berechnen. Versuche werden für diesen Artikel nicht gemacht. Die Arbeit zeigt, dass der Kontakt zwischen den Verbindungselementen in einigen spezifischen Bereichen großflächiger und häufiger ist als in anderen. Außerdem sind die beobachteten Verschleißphänomene nicht regelmäßig um die Verbindungsfläche herum verteilt, was zu einer unregelmäßigen Spaltgrößenänderung führt. Zusammenfassend wird eine effektive Methode vorgestellt, um Verschleiß von Drehgelenken mit Spiel in Mehrkörpersystemen vorherzusagen. Auf die Verschleißart wurde nicht näher eingegangen. Es wird Gleitverschleiß angenommen.

4.2.3 Getriebe

Peng and Kessissoglou (2003) ermittelten in ihrer Arbeit den Getriebeverschleiß mit Hilfe einer Vibrationsanalyse und Verschleißteilchenanalyse. Dafür wurde ein Teststand, bestehend aus einem Schneckengetriebe und einem Elektromotor, aufgebaut. An diesem Aufbau wurden drei Tests durchgeführt (Mangel an korrekter Schmierung, korrekte Schmierung, Vorhandensein von Schmutzpartikeln). Um den Verschleiß messen zu können wurden Ölproben entnommen und Dichte, Größenverteilung, Morphologie und Art der Partikel untersucht.

Analysiert wurden die Proben mittels eines konfokalen Laser-Scanning-Mikroskops (CLSM) und eines Elektronenstrahl-Mikroanalysators. Die Verschleißmechanismen wurden aus den erworbenen Daten ermittelt. Ergänzend dazu wurde die chemische Zusammensetzung zur Bewertung von Verschleißquellen herangezogen. Eine weitere Vibrationsanalyse wurde mittels Messungen am Antriebsende des Motors, an den Wellen des Getriebes und am Antriebsende des Schneckengetriebes umgesetzt.

Die Autoren stellen vor allem Gleit- und Reibbewegung als Verschleißmechanismen dar. Abschließend wird darauf hingewiesen, dass mittels der angewandten Technik (Ölproben) kein spezielles Problem diagnostiziert werden konnte. Allerdings machen sie darauf aufmerksam, dass die Frequenzanalyse zusätzliche Informationen geliefert hat.

Ahmaida et al. (2014) beschreiben hier eine Methode, um den Verschleiß eines Getriebes mittels Mikrofon zu messen. Die Autoren heben die simple Handhabung ihres Verfahrens hervor, bei dem der Sensor nicht am Getriebe befestigt werden muss, sondern in gewisser Entfernung positioniert werden kann. Mit der präsentierten Methode können verschiedene Verschleißarten erkannt werden. Allerdings muss vor einer Messung kalibriert werden, um Standorteigenschaften (wie z.B. Umgebungsgeräusche) auszugleichen. Die Autoren haben damit eine Methode gefunden um den Getriebeverschleiß sehr leicht, auch in gewisser Ent-

fernung zum Getriebe, messen zu können. Sie sehen allerdings weiteren Forschungsbedarf um die zweite Harmonik der Schwingungen.

Ein weiteres Jahr später studierten Feng et al. (2015) die Quantifizierung und Vorhersage von Getriebeverschleiß und die Online-Bereitstellung dieser Daten. Dafür wurde ein Teststand aufgebaut und ein full-life-Verschleißmonitoring durchgeführt. Das verwendete Öl wurde mit Hilfe eines visuellen Ferrographen in zwei-Minuten-Intervallen analysiert und die erhaltenen Werte aufgezeichnet. Um das Öl aus dem Getriebe und zum Ferrographen zu leiten wurde es auf halber Höhe des Füllstandes abgeführt und nach dem Test wieder zugeführt.

Die Hauptverschleißursachen eines Getriebes werden mit adhäsivem, abrasivem und Ermüdungverschleiß genannt.

Analog zu Peng and Kessissoglou (2003) beschreiben Hu et al. (2016) einen Indikator, der den Verschleiß von Zahnrädern in einem Getriebe anhand von Schwingungen misst. Dafür wird aus den gemessenen Schwingungssignalen ein Status-Vektor berechnet. Bei zwei Tests wurden die Vibrationen alle zwei Stunden mit Hilfe eines Beschleunigungsmessers gemessen, welcher über eine vertikale Vorrichtung an den Getriebekasten geklebt war und somit die vertikalen Schwingungen detektierte. Zusätzlich wurden Ölproben entnommen und die Geschwindigkeit der Wellen gemessen um Referenzwerte zu erhalten. Sie weisen darauf hin, dass diese Messung nicht direkt den Zahnverschleiß misst, sondern vielmehr den Gesamtverschleiß des Getriebes. Sie behandeln allerdings nur den Zahnverschleiß, welcher hauptsächlich durch Gleit- und Wälzverschleiß zustande kommt.

Singh et al. (2018) testeten drei thermoplastische Werkstoffe auf ihre Eignung als Zahnradwerkstoff eines Getriebes. Dafür wurden die Zahnräder im Spritzgussverfahren hergestellt und anschließend in einem Testaufbau unter unterschiedlicher Belastung (Drehmoment und Geschwindigkeit) auf Verschleiß untersucht. Auf die Verschleißart wird dabei nicht näher eingegangen. Aufgrund der präsentierten Bilder und der Tatsache, dass es sich um Zahnräder handelt, werden aber Wälzverschleiß und Rollverschleiß als wahrscheinlich erachtet. Die Belastung wurde mittels Inline-Drehmomentsensoren auf Antriebs- und Abtriebswelle gemessen, die Temperatur hingegen mittels eines berührungslosen Infrarot-Temperatursensors. Beide Werte wurden kontinuierlich während des Tests aufgezeichnet. Das Gewicht des Zahnrades wurde zusätzlich vor und nach dem Testlauf gemessen um den Gewichtsverlust durch Verschleiß festzustellen. Der Gewichtsverlust wird von den Autoren der hohen Temperatur zwischen den Zahnrädern zugeschrieben, was auf die genannten Verschleißarten schließen lässt. Auch die Rauheit der Zähne wurde anschließend an den Test gemessen. Als offene Punkte nennen die Autoren abschließend weitere Tests mit Additiven in den Polymeren, andere Herstellungsverfahren sowie andere Zahnformen.

4.2.4 Gleitflächen

Baccar and Söffker (2015) konzentrieren sich auf eine online-Methode zur Messung von akustischen Emissionen (AE). Sie interessieren sich vor allem für Korrelationen zwischen Verschleißstatus und akustischer Emission. Ihr tribologisches System bestand aus zwei martensitischen Platten, welche aneinander glitten. Ein hochsensibler piezoelektrischer Messumformer wurde zur Messung der kontinuierlichen AE-Signale auf eine der Platten geklebt. Das gemessene Signal wurde mittels Zeit-Frequenz-Analyse ausgewertet. Zum Einsatz kam auch ein Extraktions-Modul, das eine neuartige Kombination aus Kurzzeit-Fourier-Transformation (STFT) und kontinuierlicher Wavelet-Transformation (CWT) war.

Die Autoren stellen fest, dass sich die Eigenfrequenzen ändern wenn sich auch der Verschleißzustand ändert.

Li et al. (2018) beschreiben in ihrem Artikel Tests an texturierten CuSn6-Scheiben, die trocken gegen ein PTFE-Material gleiten. Dabei wurde das Gleitverhalten polierter und nicht polierter Oberflächen untersucht. Damit haben sie einen komplett anderen Ansatz als Baccar and Söffker (2015). Die Rate des Gleitverschleißes wurde über den Volumsverlust berechnet. Zur Auswertung des Verschleißbildes wurde ein REM verwendet. Die Ergebnisse zeigen, dass die Textur einen starken Einfluss auf die Reibungs- und Verschleißleistung hat. Die Autoren schlagen vor, in Zukunft den Werkstoffen verschiedene Additive beizumengen.

4.2.5 Kugelgewindetriebe

Saknararak et al. (2015) studieren eine Art des Monitoring von Kugelgewindetrieben. Dafür wurden der Verschleiß der Kugeln und die Rauheit der bearbeiteten Fläche herangezogen. Die Kugeln wurden in einem eigens dafür gebauten Teststand verschliffen. Um die Durchmesser der Kugeln zu messen wurde ein Mikrometer verwendet. Die Rauheit des Teststückes wurde mittels eines Rauheitstesters gemessen. Verschliffen wurden sie durch den Tumbling-Prozess. Die Autoren geben als Verschleißart Gleit-, Wälz- und Stoßverschleiß an. Die Ergebnisse zeigen, dass die Rauheit von Teststücken, die mittels Kugelgewindetrieb mit verschliffenen Kugeln gefertigt wurden höher ist als die, die mit neuen Kugeln gefertigt worden waren. Die Autoren zeigen auf, dass mit dieser Monitoringmethode die Kosten signifikant gesenkt werden können, verglichen mit konventionellen Methoden.

Vogl et al. (2015) stellen in ihrem Artikel für das National Institute of Standards and Technology (NIST) eine neue Methode der Verschleißmessung an linearen Achsen vor und verfolgen damit einen globaleren Ansatz der Verschleißmessung. Die Autoren präsentieren dabei ein sensorbasiertes und schnelles System, um die „Leistungsverschlechterung“

(= Verschleiß) von Linearachsen zu messen. Dafür haben sie Inklinometer¹⁵, Gyroskope¹⁶ und Beschleunigungsmesser in eine Art Black-Box verbaut. Diese Box wurde am Ende der Bewegungskette einer Drei-Achs-Bearbeitungsmaschine installiert um den Verschleiß in allen Achsen messen zu können.

Die gesammelten Daten wurden verarbeitet um die Geradheit der Achse und Winkelfehler zwischen Achse und Mutter erkennen und bewerten zu können. Dafür wurden die Signale des Gyroskops einmal integriert um Angaben über Winkeländerungen zu erhalten. Die Fehler in der Translation wurden über zweimal integrierte Beschleunigungswerte gefunden. Inklinometer wurden zusätzlich zur Winkelmessung eingesetzt. Auf Verschleißarten selbst wurde nicht eingegangen, es wurden aber typische Erscheinungen wie Lochfraß, Verschleiß und Korrosion angeführt.

4.2.6 Kupplungsflächen/Bremsen

Zhou et al. (2018) beschreiben in ihrem Artikel eine Studie, in der die Möglichkeit untersucht wird, die Verschleißfestigkeit von Ti_3SiC_2 -Beschichtungen zu verbessern. Dafür wurden im Versuchsaufbau Beschichtungen, die mit unterschiedlichen Plasmaleistungen hergestellt wurden, einem Gleitreibungsversuch unterzogen und anschließend analysiert. Die Verschleißproben wurden dazu gereinigt und mit einem dreidimensionalen optischen Mikroskop betrachtet. Zusätzlich wurden Vickers-Härte und die chemischen Zusammensetzungen der Verschleißnarbe durch ein Röntgen-Photoelektronenspektrometer bestimmt. Die Ergebnisse zeigten, dass die Menge an Ti_3SiC_2 -Phasen bei niedrigerer Plasmaleistung höher war, was zu einem Hauptunterschied bei den Reibverschleißseigenschaften führte. Die Beschichtungen mit höherem Gehalt an Ti_3SiC_2 -Phasen zeigten eine deutliche Abnahme des Reibungskoeffizienten und eine Verbesserung der Verschleißfestigkeit. Die erhöhte Verschleißfestigkeit wurde hauptsächlich den geheilten Rissen durch selektive Oxidation von Ti_3SiC_2 zugeschrieben. Die Autoren fanden heraus, dass der reduzierte Reibungskoeffizient in engem Zusammenhang mit der Bildung triboinduzierter Oxide stand.

4.2.7 Pressverbände

Zhang et al. (2017) schreiben in ihrem Artikel über die Entwicklung von Rissen im Presssitz bei eingepresster Welle aufgrund von Reibungsermüdung. Dafür unterzogen sie die Proben einem Rotations-Biege-Ermüdungsversuch und beobachteten (messtechnisch) die Entwicklung von Oberflächenschäden. Zur Untersuchung der Kontaktflächen wurden eine Kamera, ein konfokales Laserscannmikroskop und REM verwendet. Zusätzlich wurden FE-Modelle zur Untersuchung des Reibverschleißes herangezogen.

¹⁵Inklinometer sind Winkelmesser

¹⁶Das Gyroskop oder auch Kreiselinstrument ist ein Instrument, das die Lageänderung im Raum messbar macht.

4.2.8 Rad/Schiene-Paarung

Kaewunruen (2014) präsentiert in diesem Artikel eine Methodik und deren Anwendung zur Bewertung und Überwachung des Verschleißes von Eisenbahnweichen. Dabei wird neben anderen Parametern vor allem auf den Rad/Schiene-Laufkontakt über der Übergangs-Übertragungszone eingegangen. Er hat eine dip-artige Form, bei der die Radtrajektorie¹⁷ nicht glatt ist. Die Trajektorie hängt von Rad- und Laufschieneprofilen ab. Zur Analyse des Verschleißes eines Weichensystems wurden die Daten des Beschleunigungssensors am Achslager ausgewertet. Zusätzlich wurden Simulationen aus einem anderen Artikel verwendet um die Aufprallkräfte vorherzusagen. Als Effekt wird Stoßvibration angeführt. Verschleißart wird keine genannt, allerdings wird auf Grund des Belastungsfalls auf Stoßverschleiß geschlossen.

Heck (2015) betrachtet in ihrer Doktorarbeit den Kontakt zwischen Gleiskörper und Rad einer Straßenbahn. Damit analysiert sie einen ganz anderen Belastungsfall als Kaewunruen (2014). Die Autorin interessierte sich vor allem für das Verschleißverhalten bei der Kurvenfahrt unter verschiedenen Voraussetzungen. Dafür modellierte sie ihr gewähltes Referenzfahrzeug, simulierte die Rollkontaktanalyse eines Rad-Schiene-Modells in einem FE-Programm, und validierte zusätzlich den Laufflächenkontakt.

Sie kam zu der Erkenntnis dass das äußere Rad signifikant höher belastet ist und dass eine Reduktion des Reibwertes am Gleisbogen, der Achslast und der Fahrtgeschwindigkeit (in dieser Reihenfolge) die wesentlichsten Optionen sind, um den Verschleiß zu mindern. Auf die Verschleißarten selbst wird nicht eingegangen. Es werden immer wieder Mikroschlupf und Einfluss des Fahrzeuggewichts erwähnt. Diese Effekte sprechen für Rollverschleiß und Wälzverschleiß.

Yusof and Ripin (2016) analysieren in Onlinetests den Kontakt von rauen und glatten Zylindern im Zuge einer Einlaufphase. Der angeführte Kontakt zwischen den beiden Körpern ähnelt sehr der Rad/Schiene-Paarung und wird deswegen hier angeführt. Dafür wurde der Verschleiß mittels Messung der sehr kleinen Deformation der Oberflächenunebenheiten der Walze im Wälzkontakt mit dem Infinite-Fokus-Mikroskop gemessen. Der dafür entwickelte Teststand musste unter diesem Mikroskop Platz finden. Eine Bildverarbeitungstechnik zum Messen der Flächen- und Volumendifferenz des Unebenheitsprofils wurde entwickelt. Anschließend konnte das Verschleißvolumen errechnet werden. Auf die Verschleißart wird nicht näher eingegangen. Da es allerdings um den Anfahrvorgang geht, werden Gleitverschleiß und vorrangig Wälzverschleiß angenommen.

¹⁷Trajektorien sind Bahnkurven.

4.2.9 Schneiden

Nouri et al. (2015) beschrieben in ihrem Artikel ein Verfahren um den Werkzeugverschleiß, z.B. auch von aufgesetzten Schneidplättchen, von Meißeln einer Fräsmaschine zu messen. Dafür stellten sie die Kraft in tangentialer und radialer Richtung fest, und zeichneten Vorschub sowie achsiale und tangentiale Schnitttiefe auf. Aus diesen Werten wurde ein Faktor K berechnet, der ausschlaggebend für den Verschleiß ist. Dies geschah online und war damit ideal für das TCM.

Für die Messung der Kräfte wurde ein „Kistler Dynamometer“ eingesetzt. Wo dieser genau platziert wurde wird allerdings nicht offengelegt. Am Ende der Arbeit wird darauf hingewiesen dass noch mehr Tests notwendig sind um den genauen Zusammenhang zwischen dem Faktor K und dem Verschleiß herzustellen. Vor allem Tests verschiedener Materialien seien demnach für einen weiteren Fortschritt interessant.

D’Addona et al. (2015) hingegen bedienten sich einer direkten Methode (siehe Kapitel 2.4), um den Verschleiß von Schneidplättchen in der spanenden Fertigung zu messen. Dazu wurden Fotos unter einem Mikroskop gemacht und anschließend durch Software ausgewertet. Die so entstandenen Daten wurden aufgelistet und dargestellt. Der große Fokus dieser Arbeit liegt vor allem auf den Auswertesystemen und nicht am Verschleiß.

Ahmad et al. (2015) beschäftigen sich mit der Ermittlung des Werkzeugverschleißes einer Drehmaschine mittels Messung der Schwingungen über einen piezoelektrischen Sensor. Damit repräsentieren sie in dieser Arbeit die dritte gängige Variante der Verschleißmessung an Schneiden. Der Sensor wurde an dem Werkzeughalter befestigt und ermittelte während des Arbeitsvorganges Vibrationskennwerte (siehe Kapitel 2.4). Die Messwerte wurden statistisch analysiert. Die Autoren sind sich sicher, mit ihrem Verfahren eine praktikable und günstige Variante des TCM gefunden zu haben.

Zhang et al. (2016) verwenden einen indirekten Ansatz (siehe Kapitel 2.4) zur Vibrationsmessung. Allerdings wurde am Werkstück gemessen. So konnte auf den Werkzeugverschleiß rückgeschlossen werden. Dazu befestigten sie einen dreiachsigen Beschleunigungsmesser (x , y und z) am zu bearbeitenden Teil und führten während des Fräsvorganges Messungen durch. Die Messergebnisse wurden mittels einer Wavelet-Analyse bereinigt und mit dem Resultat ein Neuro-Fuzzy Netzwerk (NFN) gespeist um den Werkzeugverschleiß und das „verbleibende nützliche Leben“ (RUL) zu berechnen.

Ratava et al. (2017) präsentieren in ihrer Studie eine weitere TCM-Variante für Schneiden. Der Schneidenzustand wurde dabei mittels der Werkzeugauslenkung, der Hauptschneidekraft und einem Beschleunigungsmesser (in Hauptschnitttrichtung) beurteilt. Sie verbinden damit die eingangs erwähnten Varianten. Die Experimente wurden mit gebrochenen (oder zum Bruch neigenden - Beurteilung basierend auf Sichtkontrolle) und intakten Sandvik-Schneiden und -Haltern auf einer CNC-Drehmaschine ausgeführt. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass sich die Kalibrierung des Beschleunigungssensors als nicht durchführbar gestaltet wenn nicht noch einige grundlegende Probleme der Analyse gelöst werden.

4.2.10 Schrauben

Liu et al. (2016) untersuchen Schraubverbindungen unter achsialer Belastung (in Schraubrichtung) mit experimentellen und numerischen Methoden. Dafür werden die Ergebnisse aus einem Prüfstand als auch die aus einem FE-Programm analysiert. Zur Feststellung der herrschenden Klemmkraft kam eine Kraftmessdose zum Einsatz. Der am Prüfstand entstandene Verschleiß wurde anschließend unter Röntgenstrahlung (Untersuchung der chemischen Zusammensetzungen der Schadenszone) und einem REM (Untersuchung der Morphologien der Verschleißnarbe) betrachtet. Dabei wird auch die Veränderung der Klemmkraft und des Anzugdrehmoments bewertet. Als Verschleißart wird Reibverschleiß, und als Verschleißmechanismen werden abrasiver, adhäsiver, oxidativer Verschleiß und die Delamination genannt.

Mittels eines FE-Programms wurden Reibspannung, Schlupfamplitude und die Reibungsarbeit pro Flächeneinheit entlang zweier spezifischer Pfade untersucht. Beide Ergebnisse stimmen gut miteinander überein.

Zhang et al. (2018) untersuchen in ihrer Arbeit das Verhalten von Schraubverbindungen in einem anderen Belastungsfall. Sie interessieren sich in ihrer Arbeit für die Rolle von Gewindeverschleiß auf das selbstlösende Verhalten von Schraubenverbindungen. Dafür wurden die getesteten Verbindungen transversaler zyklischer Belastung normal zur Schraubrichtung ausgesetzt. Auf einem Prüfstand wurde die Querverschiebung auf die Schraubverbindung während des Selbstlockerungsprozesses kontrolliert. Um die Klemmkraft kontinuierlich zu messen, wurde eine Kraftmessdose zwischen Mutter und Bodenplatte installiert. Die relative Verschiebung zwischen den zwei Platten wurde durch einen Extensometer¹⁸ gemessen. Weiters konnte ein Drehsensor über eine Halterung an der Schraubenverbindung befestigt werden um die relative Drehung zwischen Mutter und Bolzen zu messen. Nach dem Versuch wurden die Verschleißflächen mittels REM und Stereomikroskop analysiert. Der Rotationssensor erfasste keine relative Drehung zwischen der Mutter und der Schraube, obwohl die Klemmkraft während dieser Tests abgenommen hat. Die Autoren schließen daraus, dass die Drehung der Mutter auf dem Gewinde keine notwendige Bedingung für die Selbstlockerung ist.

Zusätzlich wurde eine FE-Analyse durchgeführt, um die Selbstlockerung zu untersuchen. Die Autoren zeigen, dass die Selbstlockerung durch den am Gewinde auftretenden Reibverschleiß ohne Rotation der Mutter auftreten kann. Sie weisen darauf hin, dass mit höherer Vorspannkraft der Gewindeverschleiß, und mit zunehmendem Verschleiß die Klemmkraft abnimmt. Als Verschleißart wird Reibverschleiß und möglicher Bruch angegeben.

¹⁸Extensometer steht hier für Dehnungsmesser

4.2.11 Stahlseile

Cruzado et al. (2012) stellen hier ein FE-Modell zur Berechnung des Verschleißes von rechtwinklig aufeinander liegenden Stahlseilen vor. Hierbei wurde insbesondere auf die Reduktion der Berechnungszeit unter Berücksichtigung repräsentativer Ergebnisse Wert gelegt. Die Resultate wurden mittels experimenteller Daten validiert. Dafür kam ein Gleit-amplitudentribometer zum Einsatz, welcher die Konfiguration des FE-Modells nachstellte. Beim Versuch wurden realer Hub, Reibungskraft sowie gesamter linearer Verschleiß gemessen. Die Daten wurden online aufgenommen um daraus die gewünschten Werte zu berechnen. Die Validierung der FE-Verschleiß-Simulationsmethodik wurde mittels REM durchgeführt.

Als Verschleißart wird in dem Artikel Gleitverschleiß angegeben.

Chen et al. (2016) präsentieren ein Lösungsmodell zur Analyse des Verschleißes eines Drahtseilstranges unter zyklischer Biegebeanspruchung. Dabei werden der Reibkontakt und das Gleiten zwischen den einzelnen Drähten berücksichtigt. Zusätzlich zum FE-Modell wurde ein Verschleißversuch durchgeführt um Verschleißkoeffizienten und Verschleißvolumen des Stahldrahtes zu erhalten und das Lösungsmodell zu validieren. Durchgeführt wurden die Versuche auf der multifunktionalen Reibungs-Verschleißprüfmaschine, die mit Hilfe eines Online-3D-Profilometer-Moduls (Weißlicht-Interferometer) zur Messung der Rauheit und des Verschleißprofils ausgestattet war.

Die Ergebnisse beider Herangehensweisen werden im Artikel ausgewertet, analysiert und verglichen. Sie zeigen, dass der Verschleiß nur auf der krümmungsäußeren Seite auftritt.

4.2.12 Turbinenschaufeln

Cherepova et al. (2014) testeten neue Legierungen, um die Turbinenschaufeln hitzebeständiger und verschleißfester (Reibverschleiß) gestalten zu können. Insgesamt wurden zwölf Verschleißtests in einem Prüfstand durchgeführt, wobei die Betriebsbedingungen der Turbinenschaufeln von Flugzeuggasturbinen simuliert wurden. Untersucht wurden dabei Erwärmungsrate, Betriebstemperatur, Art der mechanischen Wechselwirkung der Schaufelkantenoberflächen sowie die atmosphärische Zusammensetzung der Umgebung. Die Verschleißfestigkeit wurde durch Abnahme des Volumens einer Probe während eines Oszillationszyklus bestimmt. Als typische Effekte werden Zerkratzen, Setzen des Materials, Bildung einer glasigen Oberfläche und relative Materialverdrängung genannt. Zusätzlich beobachtete man an manchen Stellen Oxidation. Die Proben wurden anschließend unter einem binokularen Mikroskop analysiert. Die untersuchten Legierungen wiesen eine hohe Verschleißfestigkeit auf.

4.2.13 Verbundwerkstoffe

Correa et al. (2015) vergleichen in ihrer Arbeit den Effekt der Variation von Fasergröße, Harztyps und Härtungsmittels auf Reibungs- und Verschleißverhalten von Polymermatrix-Verbundwerkstoffen. Dafür haben die Autoren Pin-on-disc-Tests¹⁹ durchgeführt. Während der Versuche wurde die Reibkraft gemessen. Um Verschleißmechanismen zu identifizieren, verwendete man Bilder aus einem REM, einem Stereomikroskop und einer Kamera. Vor und nach den Versuchen wurden zusätzlich die Rauheit der Proben und das Gewicht bestimmt.

Die Autoren stellen fest, dass die Verschleißfestigkeit von Verbundwerkstoffen besser ist als die von reinem Harz und dass sie sich mit kleiner werdenden Fasern erhöht. Weiters nennen sie Adhäsion, Oberflächenermüdung und Haarrissbildung als Hauptverschleißursachen.

Diel (2015) untersucht in seiner Doktorarbeit Glasschaumgranulat und Epoxidharz (ZVW) auf Materialeigenschaften und vor allem Verschleißfestigkeit. Analysiert wurden die Schubeigenschaften mit einer neuartigen Schubversuchsvorrichtung. Zusätzlich konnten über die Prüfmaschinen und/oder eigens an den Proben angebrachte Sensoren Messdaten generiert werden. Das Ermüdungsverhalten des ZVW wurde anhand einachsiger Zug- und Druckversuche sowie zyklischer Versuche bei unterschiedlichen Spannungsverhältnissen untersucht. Anschließend erfolgte eine Analyse der Schädigungsevolution mit Hilfe von Lichtmikroskopie und REM. Ein FE-Modell und ein spezieller Algorithmus ermöglichten eine sehr schnelle Berechnung der statischen und zyklischen Schädigung für beliebige Belastungsfrequenzen.

Als Verschleißart werden Bruch, Sprödbruch und Ermüdungsbruch sowie Rissbildung angeführt. Der Autor sieht zusätzlichen Untersuchungsbedarf in der Variation von Luftfeuchtigkeit und Temperatur.

Friedrich et al. (2017) behandeln in ihrer Arbeit die mechanischen Eigenschaften, abrasives Verschleißverhalten und strukturelle Details von Schwarzfaserpalmenholz. Da der Aufbau des Holzes ähnlich einem Verbundwerkstoff ist, erfolgten die Untersuchungen nach entsprechenden Kriterien. Es wurden eine thermogravimetrische Analyse und abrasive Verschleißtests durchgeführt. Mittels Computer-Mikrotomographiesystems, REM und Lichtmikroskop wurde die Holzmorphologie bestimmt. Die mechanischen Eigenschaften wurden durch Messungen der Makro- und Mikrohärtigkeit und Druckversuche in unterschiedliche Richtungen charakterisiert. Darüber hinaus konnten an einer Universalprüfmaschine Spannungs- und Deformationscharakterisierungen durchgeführt werden.

Das Abrasionsverhalten wurde mit einer speziell angefertigten Maschine untersucht, auf der sich die Proben gegen ein Abrasiv-Papier bewegten. Die Tests wurden parallel und normal zur Faserrichtung ausgeführt. Während des Versuches wurde der Verschleißkoeffizient berechnet und aufgezeichnet. Anschließend wurde der Masseverlust der Probe

¹⁹Bei Pin-on-disc-Tests wird das Reibverhalten von Werkstoffpaarungen untersucht. Dafür wird auf einem rotierenden Prüfkörper ein Gegenkörper mit definierter Normalkraft aufgebracht. Die resultierenden Kräfte werden gemessen und daraus auf das z.B. Verschleißverhalten geschlossen.

gemessen um daraus die Verschleißrate zu bestimmen. Zusätzlich wurde die verschlissene Oberfläche mit einem REM untersucht.

Correa et al. (2017) analysieren in ihrer Arbeit die Wirkung von Vinylester verstärkt mit Musaceae-Faserbündeln auf das tribologische Verhalten. Damit setzen sie ihre Arbeit von 2015 fort. Sie variierten Fasergehalt des Komposits und Material des Gegenkörpers sowie die Oberflächenrauheit für ihre Tests. Es wurden ebenso Reibtests auf einer Pin-on-disc-Teststation durchgeführt, um die Verbundwerkstoffe zu testen. REM-Bilder wurden verwendet, um die Verschleißmechanismen zu identifizieren. Zusätzlich wurden Rauheit und Gewichtsverlust bestimmt, sowie Bilder eines Stereomikroskops analysiert. Die Ergebnisse zeigen, dass Verbundwerkstoffe eine bessere Verschleißfestigkeit besitzen als reines Harz. Der mit 10 Gewichtsprozent faserverstärkte Verbundstoff lieferte in den Tests die besten Ergebnisse. Die primären Verschleißmechanismen, die identifiziert werden, sind Brüche, Oberflächenermüdung, Haarrissbildung, Faserablösung (Reibverschleiß) und Adhäsion. Die Autoren erwähnen zusätzlich, dass die übertragene Schicht und die Trümmer in direktem Zusammenhang mit der Rauheit der Scheiben und nicht mit ihrem Material stehen. Wei et al. (2018) untersuchen Reibverschleißigenschaften von C_f/SiC -Verbundwerkstoffen mit unterschiedlicher Faserorientierung gegen ZrO_2 -Keramiken (geschliffene und polierte Oberflächen). Die C_f/SiC -Verbundwerkstoffe wurden durch chemische Dampfinfiltration, kombiniert mit flüssiger Schmelzinfiltration, hergestellt. Die Herstellung der ZrO_2 -Teile ist unklar, da es sich um ein kommerzielles Produkt handelte. Nach der Herstellung wurden die Proben unter einem Mikroskop auf ihre Rauheit überprüft. Für die Tests wurde ein Standardprüfstand (Pin-on-disk-Apparatur) verwendet. Anschließend wurden die Proben erneut unter Mikroskopen (REM und EDS - Energy Dispersive Spectroscopy) analysiert. Die Verschleißrate wird anhand der Verschleißmasse berechnet. Als Verschleißmechanismus wird abrasiver Verschleiß angeführt.

Die Autoren stellen in ihrer Arbeit fest, dass geschliffene ZrO_2 -Keramiken besser gegen die Faserorientierung gleiten und bessere tribologische Eigenschaften haben als polierte. Weiters zeigt die 90-Grad-Faserorientierung die besten tribologischen Eigenschaften.

4.2.14 Walzen

Jakab et al. (2018) präsentieren in ihrem Artikel Komposite-Bezüge mit hoher Verschleißbeständigkeit und verbessern Antihafteigenschaften für funktionelle Walzen in der Papierindustrie. Damit beschreiben sie keine CM-Versuche. Die von ihnen gemachten Pin-on-disc-Test sind allerdings typisch für die Vorfelduntersuchungen von CM (siehe Kapitel 4.2.4 und 4.2.13).

In ihrer Arbeit stellen sie funktionelle Harzformulierungen, die vorzugsweise auf Walzen in der Papierindustrie eingesetzt werden sollen, vor. Dabei konzentriert sich die Forschung auf verbesserte Abstoßeigenschaften bei gleichzeitig hoher Verschleißbeständigkeit. Als Basismaterial wurden eine Epoxy-Matrix und mineralische sowie polymere Füllstoffe als Füllstoff verwendet. Die tribologische Charakterisierung erfolgte an einem modifizier-

ten Pin-on-disc-Tribometer. Anschließend wurden Verschleißvolumen und resultierende Oberfläche mittels eines REM detailliert untersucht. Zusätzlich wurde die Verschleißbeständigkeit gegen abrasive Beanspruchung auf einem Reibradttester bestimmt.

Die Autoren kamen zu dem Schluss, dass sich die Abstoßeigenschaften durch die Additive erheblich erhöhen.

Als Verschleiß der Walzen in der Papierindustrie werden Adhäsion, lokale Ablagerungen und Korrosion genannt.

4.2.15 Wälzlager

Prieto et al. (2013) stellen in diesem Artikel ein Überwachungsschema zur Diagnose von Lagerfehlern vor. Es sollen damit nicht nur Einzelpunkt- und Laufbahnfehler erkannt werden können, sondern auch verteilte Defekte, wie z.B. Rauheit. Zur Diagnose wurden statistische Zeitmerkmale herangezogen, die aus dem Vibrationssignal berechnet und anschließend analysiert wurden. Abschließend konnte eine NN-Struktur zur Klassifizierung der Ergebnisse eingesetzt werden. Die Validierung der Ergebnisse erfolgte durch Tests.

Der Testaufbau bestand aus einem Induktionsmotor und einer kontrollierten Bremse. Verbunden waren sie durch eine mit zwei Lagern gelagerten Welle. Die Lager wurden mit den gängigsten Lagerdefekten präpariert, um das Verhalten bei Verschleiß zu simulieren. Die sechs Varianten waren: gesund, innere Lauffehler, äußere Lauffehler, Kugelfehler, Innen-Außen-Ball-Fehler und generalisierte Degradation der inneren und äußeren Laufflächen. Zur Manipulation der Teile setzte man einen Bohrer ein. Gemessen wurde mittels zweier piezoelektrischer Beschleunigungsmesser in x- und y-Achse, die an einem Lager angeschraubt wurden.

Auch Shanmukha Priya et al. (2014) beschreiben wie sie Fehler eines Kugelrollenlagers mittels Schwingungsanalyse (Frequenzbereichsanalyse) gemessen haben. Dafür wurden Diskrete Fouriertransformation, Envelope Analysis und Resampling eingesetzt. Die Daten wurden an einem Prüfstand erhoben und nachträglich in MATLAB zur Berechnung herangezogen (direkte Methode). Ermittelt wurden sie mittels Drehmomentwandler und eines Dynamometers. Die Autoren konnten entsprechend der Position der fehlerhaften Lager entweder Envelope Analysis oder Resampling als geeignete Methode identifizieren. Bei fehlerhaften Kugellagern konnten keine zufriedenstellenden Resultate erzielt werden, da sie durch Fehlfrequenzen der Innen- und Außenringe modifiziert worden waren. Auf die Verschleißart wird nicht näher eingegangen. Es wird hier aus dem Anwendungsfall auf Gleitverschleiß und Rollverschleiß geschlossen.

Ali et al. (2015) stellen eine mathematische Analyse zur Auswahl der wichtigsten intrinsischen Modusfunktionen (IMFs) vor. Es wurde ein künstliches neuronales Netzwerk (ANN) trainiert, um Lagerdefekte zu klassifizieren. Auf Grund der experimentellen Ergebnisse kommen die Autoren zu dem Schluss, dass durch dieses Verfahren Lagerdefekte zuverlässig kategorisiert werden können. Sie beschreiben die Anwendung von ANN als effektives Werkzeug zur Zustandsbewertung der Lagerleistung ohne menschliches Handeln.

Die experimentellen Daten wurden mittels eines Beschleunigungssensors gemessen welcher am Lagergehäuse des Prüfstandes montiert war. Zusätzlich wurden Geschwindigkeit und Belastung aufgezeichnet. Der erste Testlauf dauerte 35 Tage, bis eine signifikante Menge an Metallabrieb auf dem magnetischen Teil des getesteten Lagers gefunden und die Rollen als defekt erklärt wurden. Die folgenden zwei Tests endeten je mit einem Innenring- und einem Außenringversagen. Die erhaltenen Daten wurden anschließend mit vielen unterschiedlichen Methoden aufgearbeitet um das Modell zu trainieren.

Chacon et al. (2015) stellen eine indirekte Analyse zur frühen Erkennung beginnender Defekte bei Rollenlagern vor. Diese Methode kombiniert das Wavelet-Verfahren für AE-Rauschunterdrückung, die Hilbert-Transformation und die Autokorrelationsfunktion, um Muster im AE-Signal zu finden. Dafür wurde ein Teststand aufgebaut, der die typischen Belastungen einer 2 MW-Windkraftanlage simulieren sollte. Eine Welle wurde mittels Zylinderrollenlager und zweier Kugellagern gelagert und dann durch hydraulische Stellglieder belastet. Angetrieben wurde das System von einem 30kW-Motor. Die entstandenen Schwingungen wurden mittels eines AE-Wandlers gemessen, der seitlich an dem Aufbau montiert war. Der Defekt wurde künstlich hervorgerufen, indem man den äußeren Laufring mit einem Bohrer manipulierte.

Die vorgestellte Methode hat laut den Autoren eine bessere Performance als die bisher verwendete Hüllkurven-Analyse, kann Defekte in einem früheren Stadium erkennen und bietet ein höheres Signal-Rausch-Verhältnis, was einen bedeutenden Vorteil bei der Erkennung von Lagerdefekten darstellt. Die Autoren schlagen weitere Untersuchungen zur Erkennung von Defekten des inneren Lagerringes und von Mehrpunktdefekten vor.

Caesarendra et al. (2016) stellen ein akustisch-emissionsbasiertes Verfahren zum CM von Umkehrdrehlagern vor. Zur Verschleißerkennung wurden mehrere AE-Trefferparameter eingesetzt. Das mit 15 Tonnen beaufschlagte Lager wurde mit vier Beschleunigungssensoren, zwei AE-Sensoren und vier Temperatursensoren ausgestattet. Allerdings werden in diesem Artikel nur die Daten der AE-Sensoren ausgewertet, es wird nicht näher auf die Verschleißart eingegangen. Die Sensoren wurden für den Versuch, mittels magnetischer Befestigungen in 180 Grad zueinander versetzt, am äußeren Laufring angebracht. Bei den Experimenten wurde der drohende Ausfall nach 15 Monaten detektiert. Anschließend wurde das Schwenklager ausgebaut und der Grad des Defektes analysiert. Die Verschleißart selbst behandeln die Autoren nicht. Es wird lediglich das Abplatzen des Materials erwähnt, welches auf die niederfrequente, hohe Belastung und die schlechte Fettschmierung zurückgeführt wird. Auch auf den Kugeln wurden ähnliche Verschleißmerkmale entdeckt. Das deutet auf Wälzverschleiß hin. Es wurde weiters festgestellt, dass der Schaden am Außenring größer war als am Innenring.

Dalvand et al. (2016) stellen in ihrer Arbeit ein neuartiges, im Gegensatz zu den Vorgängern kontroverses, Lager-Condition-Monitoring-Verfahren (BCM-Verfahren) vor. Es basiert auf momentaner Frequenz der Motorspannung und unterscheidet sich damit von den anderen hier genannten Lager-Monitoring-Methoden. In der Arbeit wird gezeigt, dass

die globale Kurtosis²⁰ des Signals geeignet ist um Lagerdefekte in einem frühen Stadium zu erkennen.

Für den Testaufbau wurde eine Pumpe mittels Welle von einem Motor angetrieben. Die Welle wurde von einem In-Ordnung-Lager und einem Defekt-Lager getragen. Die Spannungs- und Strom-Signale wurden mittels Modulen bei Motorklemmen und Motorsteuerzentrum einer Ölpumpstation gemessen. Ausgewertet wurden sie mittels MATLAB. Zusätzlich wurde die Vibration mittels Beschleunigungsmesser in vertikaler, horizontaler und achsialer Richtung gemessen. Um definierte Verschleißsignale zu erhalten wurden abwechselnd der Innenring, die Lagerkugeln und der Käfig durch manipulierte Defektteile (Manipulation von Innenring und Lagerkugeln, Bruch des Käfigs) ersetzt.

Verbij and BV (2018) beschreiben in ihrer Veröffentlichung ein Projekt zum CM eines Rotationskalzinierers²¹. In ihrer Arbeit beschreiben sie ein CM-System, welches über Beschleunigungsmesser und Stoßimpulsgeber auch bei langsamdrehenden Maschinen eine sehr gute Fehlererkennung und -voraussage gewährleisten konnten. Die Sensoren waren dafür auf den Stützradlagern, Ritzelwellenlagern, den Lagern der Getriebeausgangswelle, am Motor und am Getriebe montiert. Über die Verschleißart wurde nicht geschrieben. Anhand der Funktion kann man aber auf Reib- und Wälzverschleiß schließen. Die Bilder in der Arbeit zeigen Grübchenbildung und Abrieb an Innen- und Außenring. Die Autoren sind sehr zufrieden mit den Ergebnissen und freuen sich dem Kunden eine so gute Lösung angeboten zu haben.

Auch in Bezug auf Windkraftanlagen ist CM ein zentrales Thema. Vor allem Getriebe und Generatoren, und damit verbunden deren Lager, sind von großer Bedeutung für die Betreiber und müssen stetig überwacht werden. Das CM übernehmen bei diesen Anlagen meist die Hersteller. Sie verkaufen dem Energieversorger meist Blackboxes und Wartungsvertrag für die Anlagen. Tchakoua et al. (2014) bieten einen Überblick über Methoden und Techniken zur Überwachung von Windenergieanlagen an. Sie heben relevante CM-, Diagnose- und Instandhaltungsanalysen hervor und gehen auch auf die ansonsten oft unbeachtete Kostenfrage ein. Ergänzend kategorisieren und diskutieren Riera-Guasp et al. (2015) in ihren Arbeiten nach der Fehleranalyse. Auch hier findet der finanzielle Aspekt Erwähnung. Auf das Maschinenelement Lager speziell gehen de Azevedo et al. (2016) ein. Sie stellen einen Überblick über die Überwachung der Lagerbedingungen von Windkraftanlagen vor. Die recherchierten Werke werden nach Monitoring-Methode kategorisiert und zusammengefasst. Ideen und der Aufbau der Arbeit sind der vorliegenden ähnlich, wenn auch nicht gleich und sollen deswegen hier für interessierte Leser erwähnt werden.

²⁰Die Kurtosis (auch Exzess oder Wölbung) einer (Wahrscheinlichkeits-)funktion ist ein Maß für die relative „Flachheit“ dieser Kurve im Vergleich zur Normalverteilung.

²¹Kalzinierung ist die Entwässerung oder Zersetzung von festen Stoffen durch Erhitzen („brennen“).

4.3 Zusammenfassung der Literaturdiskussion

Die Literaturdiskussion gibt einen guten Überblick über die analysierten Artikel und ihre Aussagen. Die Informationen aller gelesenen Artikel wurden zusammengefasst. Die eingangs erwähnten Fragestellungen wurden dafür zu Hilfe gezogen (siehe Kapitel 5.2).

Es war schwierig in jedem Artikel die Antworten auf alle Fragen zu finden. Das war meist im Fokus der Arbeiten begründet. Dieser war teils auf die z.B. Softwareauswertung gerichtet, wodurch die für die vorliegende Arbeit essentiellen Fragen nicht beantwortet oder nur sehr kurz behandelt wurden.

Es stellte sich heraus, dass die Quellen eines für diese Arbeit gut geeigneten Artikels meist ebenfalls gut als Literatur für die vorliegende Arbeit herangezogen werden konnten. Der Autor nahm jedoch Abstand davon die Quellen der gelesenen Artikel in diese Arbeit einzubinden. So wurde dem Risiko vorgebeugt, nur ähnliche Studien zu einem Maschinenelement zu analysieren²².

Bei den analysierten Arbeiten handelt es sich meist um Laborversuche oder experimentelle Versuchsanordnungen (z.B. Pin-on-disc-Tests). Nur sehr wenige Artikel behandeln Daten die während eines laufenden Betriebes aufgenommen wurden. Eine Anwendbarkeit von Forschungsergebnissen in der Praxis wird nur selten diskutiert.

Zusammenfassend kann man sagen, dass Beschleunigungssensoren und Bildanalyse laut der vorliegenden Recherche die häufigsten Analysemethoden sind. Leider ist von diesen beiden Methoden meist nur die Beschleunigungsmessung für das online-CM brauchbar.

²²Einige Autoren verweisen in ihren Quellen auf frühere Arbeiten von sich selbst und oft fast ausschließlich auf gleichgesinnte Artikel.

5 Praxisteil

5.1 Aufbereitung der Ergebnisse

Die Informationen aus den einzelnen Artikeln wurden in jeweils einer Zeile der Tabelle festgehalten und entsprechend dem behandelten Maschinenelement kategorisiert. Der Autor ordnete jedem Artikel die entsprechenden Verschleißarten, Verschleißeffekte und Sensoren zu. Weiters konnte der Eintrag mit der Messmethode (siehe Kapitel 2.4) und der Quelle, in der der Artikel gefunden wurde, ergänzt werden. Es entstand mit voranschreitender Literaturrecherche eine umfangreiche Tabelle, die alle recherchierten Informationen enthielt. Zu diesem Zeitpunkt war es allerdings noch schwierig die Tabelle zu lesen und vergleichende Aussagen über die erfassten Artikel zu treffen.

Zur Darstellung wurden die Daten in drei aussagekräftigen Darstellungsformen aufbereitet. Ziel war es, dem Leser nur die essentiellen Daten zu präsentieren (siehe Kapitel 5.1.2). In der ersten Tabelle wird der Zusammenhang zwischen Maschinenelementen und Sensoren dargestellt (siehe Kapitel 5.1.2). Die zweite Tabelle illustriert den gegenläufigen Ansatz und listet den Zusammenhang zwischen Sensoren und Maschinenelementen auf (siehe Kapitel 9). Die dritte Tabelle ermöglicht dem Leser, bei Kenntnis der Art des Verschleißes, die entsprechenden Artikel zu finden. Im Anschluss daran wurde noch eine Aufzählung der gelesenen Artikel, bezogen auf die Maschinenelemente, angefügt (siehe Kapitel 9).

5.1.1 Vom Maschinenelement zum Sensor

In der Tabelle „Vom Maschinenelement zum Sensor“ wird das Resultat der Literaturrecherche aufbereitet dargestellt. Hier werden die Zusammenhänge zwischen einzelnen Maschinenelementen, Verschleißarten, Effekten und Sensoren aufgezeigt.

Die Darstellung ordnet jedem Maschinenelement die Verschleißarten zu, mit denen es laut der Literaturrecherche belastet werden kann. Anschließend werden zu jeder Verschleißart die entstandenen Effekte angeführt. In der vorletzten Spalte sind die Sensoren ersichtlich, mit denen die Verschleißeffekte gemessen wurden. Die letzte Spalte zeigt jene Literaturquellen, aus denen der angeführte Zusammenhang hervorgeht.

In der vorliegenden Darstellung lässt sich die Häufigkeit der in den Artikeln analysierten Verschleißarten und Effekte pro Maschinenelement gut erkennen (siehe Kapitel 5.1.2).

5.1.2 Zusätzliche tabellarische Darstellung der Ergebnisse

Um das Resultat der Arbeit leicht lesbar zu machen, wurden zwei weitere tabellarische Darstellungen ausgearbeitet. Diese sind im Anhang einzusehen (siehe Kapitel 9).

Die Tabelle „Vom Sensor zum Maschinenelement“ spiegelt die Daten der Tabelle „Vom Maschinenelement zum Sensor“ und ordnet sie neu an. Literaturquellen, aus denen der Zusammenhang hervorgeht, sind wieder in der letzten Spalte enthalten.

In dieser Darstellung lässt sich auch gut die Häufigkeit der Anwendung der einzelnen Sensoren erkennen.

In der Tabelle „Von der Verschleißart zum Sensor“ wird das Resultat der Literaturrecherche in wieder einer anderen Form dargestellt. Die Tabelle zeigt den Zusammenhang zwischen Verschleißart, Effekt und Sensor. Auf die Kategorie „Maschinenelement“ wurde verzichtet. So wird dem Leser die Möglichkeit geboten einen zur Verschleißart passenden Sensor zu finden, ohne dass sein verschleißendes Maschinenelement in dieser Arbeit behandelt wurde.

Tabelle 1: Vom Maschinenelement zum Sensor

Maschinenelement	Verschleißart	Effekt	Sensor	Quellen	
Elastische Teile	Gleitverschleiß	Bruch	Bildauswertung	Song et al. (2016)	
			Finite Elemente	Song et al. (2016)	
		Grübchen/Bruch	Bildauswertung	Song et al. (2016)	
			Finite Elemente	Song et al. (2016)	
Gelenke	Gleitverschleiß	Abrieb	Bildauswertung	Rosenberg (2003)	
			Finite Elemente	Bai et al. (2013)	
			Bildauswertung	Rosenberg (2003)	
		Geometrieänderungen	Bruch	Finite Elemente	Bai et al. (2013)
				Bildauswertung	Rosenberg (2003)
				Bildauswertung	Rosenberg (2003)
Getriebe	Stoßverschleiß	Abrieb	Bildauswertung	Rosenberg (2003)	
			Bildauswertung	Rosenberg (2003)	
			Bildauswertung	Rosenberg (2003)	
	Wälzverschleiß	Abrieb	Bildauswertung	Rosenberg (2003)	
			Bildauswertung	Rosenberg (2003)	
			Bildauswertung	Rosenberg (2003)	
	Grübchen/Bruch	Abrieb	Bildauswertung	Rosenberg (2003)	
			Bildauswertung	Rosenberg (2003)	
			Bildauswertung	Rosenberg (2003)	
	Gleitverschleiß	Abrieb	Beschleunigung	Hu et al. (2016)	

...

Tabelle 1: Vom Maschinenelement zum Sensor (*Fortsetzung*)

Maschinenelement	Verschleißart	Effekt	Sensor	Quellen
Getriebe	Gleitverschleiß	Abrieb	Beschleunigung	Peng and Kessissoglou (2003)
			Bildauswertung	Feng et al. (2015)
				Peng and Kessissoglou (2003)
				Singh et al. (2018)
			Drehmoment	Singh et al. (2018)
			Magnetismus	Feng et al. (2015)
			Temperatur	Singh et al. (2018)
		Bruch	Bildauswertung	Singh et al. (2018)
			Drehmoment	Singh et al. (2018)
			Temperatur	Singh et al. (2018)
	Grübchen/Bruch		Bildauswertung	Singh et al. (2018)
			Drehmoment	Singh et al. (2018)
			Temperatur	Singh et al. (2018)
	Vibrationen		Beschleunigung	Alhaida et al. (2014)
				Hu et al. (2016)
				Peng and Kessissoglou (2003)

...

Tabelle 1: Vom Maschinenelement zum Sensor (*Fortsetzung*)

Maschinenelement	Verschleißart	Effekt	Sensor	Quellen
Getriebe	Gleitverschleiß	Vibrationen	Bildauswertung	Peng and Kessissoglou (2003)
	Wälzverschleiß	Abrieb	Beschleunigung	Hu et al. (2016)
				Peng and Kessissoglou (2003)
			Bildauswertung	Feng et al. (2015)
				Singh et al. (2018)
				Peng and Kessissoglou (2003)
			Drehmoment	Singh et al. (2018)
			Magnetismus	Feng et al. (2015)
			Temperatur	Singh et al. (2018)
		Bruch	Bildauswertung	Singh et al. (2018)
			Drehmoment	Singh et al. (2018)
			Temperatur	Singh et al. (2018)
		Grübchen/Bruch	Bildauswertung	Singh et al. (2018)
			Drehmoment	Singh et al. (2018)
			Temperatur	Singh et al. (2018)
		Vibrationen	Beschleunigung	Alhaima et al. (2014)

...

Tabelle 1: Vom Maschinenelement zum Sensor (*Fortsetzung*)

Maschinenelement	Verschleißart	Effekt	Sensor	Quellen
Getriebe	Wälzverschleiß	Vibrationen	Beschleunigung	Hu et al. (2016)
			Bildausswertung	Peng and Kessissoglou (2003)
			Bildausswertung	Peng and Kessissoglou (2003)
Gleitflächen	Gleitverschleiß	Abrieb	Bildausswertung	Li et al. (2018)
			Verschleißvolumen	Li et al. (2018)
			Bildausswertung	Li et al. (2018)
			Verschleißvolumen	Li et al. (2018)
			Beschleunigung	Baccar and Söffker (2015)
Kugelgewindetriebe	Gleitverschleiß	Abrieb	Bildausswertung	Saknarak et al. (2015)
			Beschleunigung	Vogl et al. (2015)
			Gyroskop	Vogl et al. (2015)
			Winkelmesser	Vogl et al. (2015)
			Beschleunigung	Vogl et al. (2015)
			Gyroskop	Vogl et al. (2015)
			Winkelmesser	Vogl et al. (2015)
			Bildausswertung	Saknarak et al. (2015)
Stoßverschleiß	Stoßverschleiß	Abrieb	Bildausswertung	Saknarak et al. (2015)
			Bildausswertung	Saknarak et al. (2015)

...

Tabelle 1: Vom Maschinenelement zum Sensor (Fortsetzung)

Maschinenelement	Verschleißart	Effekt	Sensor	Quellen
Kugelhewindetriebe	Stoßverschleiß	Geometrieänderungen	Beschleunigung	Vogl et al. (2015)
			Gyroskop	Vogl et al. (2015)
			Winkelmesser	Vogl et al. (2015)
	Wälzverschleiß	Abrieb	Bilddauswertung	Saknararak et al. (2015)
			Beschleunigung	Vogl et al. (2015)
			Gyroskop	Vogl et al. (2015)
		Geometrieänderungen	Winkelmesser	Vogl et al. (2015)
			Bilddauswertung	Zhou et al. (2018)
			Härte	Zhou et al. (2018)
Kupplungsflächen/ Bremsen	Gleitverschleiß	Bruch	Bilddauswertung	Zhou et al. (2018)
			Härte	Zhou et al. (2018)
			Bilddauswertung	Zhou et al. (2018)
Pressverbände	Gleitverschleiß	Abrieb	Bilddauswertung	Zhang et al. (2017)
			Finite Elemente	Zhang et al. (2017)
			Bilddauswertung	Zhang et al. (2017)
Rad/ Schiene	Gleitverschleiß	Abrieb	Finite Elemente	Zhang et al. (2017)
			Bilddauswertung	Zhang et al. (2017)
			Bilddauswertung	Yusof and Ripin (2016)

...

Tabelle 1: Vom Maschinenelement zum Sensor (*Fortsetzung*)

Maschinenelement	Verschleißart	Effekt	Sensor	Quellen
Rad/ Schiene	Gleitverschleiß	Abrieb	Verschleißvolumen	Yusof and Ripin (2016)
		Grübchen/Bruch	Bilddauswertung	Heck (2015)
			Finite Elemente	Heck (2015)
	Stoßverschleiß	Geometrieänderungen	Beschleunigung	Kaewunruen (2014)
		Vibrationen	Beschleunigung	Kaewunruen (2014)
	Wälzverschleiß	Abrieb	Bilddauswertung	Yusof and Ripin (2016)
Verschleißvolumen			Yusof and Ripin (2016)	
Grübchen/Bruch		Bilddauswertung	Heck (2015)	
		Finite Elemente	Heck (2015)	
Schneide	Werkzeugverschl.	Bruch	Beschleunigung	Ratava et al. (2017)
			Kraft	Ratava et al. (2017)
	Geometrieänderungen	Bilddauswertung	D'Addona et al. (2015)	
		Kraftaufwand steigt	Kraft	Nouri et al. (2015)
	Vibrationen	Beschleunigung	Ahmad et al. (2015)	
			Ratava et al. (2017)	
		Zhang et al. (2016)		

...

Tabelle 1: Vom Maschinenelement zum Sensor (*Fortsetzung*)

Maschinenelement	Verschleißart	Effekt	Sensor	Quellen
Schneide	Werkzeugverschl.		Kraft	Ratava et al. (2017)
Schrauben	Gleitverschleiß	Abrieb	Bildauswertung	Liu et al. (2016)
				Zhang et al. (2018)
			Finite Elemente	Liu et al. (2016)
				Zhang et al. (2018)
			Kraft	Liu et al. (2016)
				Zhang et al. (2018)
			Winkelmesser	Zhang et al. (2018)
		Bruch	Bildauswertung	Zhang et al. (2018)
			Finite Elemente	Zhang et al. (2018)
			Kraft	Zhang et al. (2018)
			Winkelmesser	Zhang et al. (2018)
Stahlseil	Gleitverschleiß	Abrieb	Bildauswertung	Chen et al. (2016)
				Cruzado et al. (2012)
			Finite Elemente	Chen et al. (2016)
				Cruzado et al. (2012)

...

Tabelle 1: Vom Maschinenelement zum Sensor (*Fortsetzung*)

Maschinenelement	Verschleißart	Effekt	Sensor	Quellen
Stahlseil	Gleitverschleiß	Abrieb	Verschleißvolumen	Chen et al. (2016)
				Cruzado et al. (2012)
	Geometrieänderungen		Bildausswertung	Cruzado et al. (2012)
			Finite Elemente	Cruzado et al. (2012)
			Verschleißvolumen	Cruzado et al. (2012)
Turbinenschaukeln	Erosion	Geometrieänderungen	Bildausswertung	Cherepova et al. (2014)
			Riefen	Cherepova et al. (2014)
	Gleitverschleiß	Geometrieänderungen	Bildausswertung	Cherepova et al. (2014)
			Riefen	Cherepova et al. (2014)
Verbundwerkstoffe	Gleitverschleiß	Abrieb	Bildausswertung	Correa et al. (2015)
				Correa et al. (2017)
				Friedrich et al. (2017)
				Wei et al. (2018)
			Kraft	Correa et al. (2015)
				Correa et al. (2017)
			Verschleißvolumen	Correa et al. (2017)

...

Tabelle 1: Vom Maschinenelement zum Sensor (*Fortsetzung*)

Maschinenelement	Verschleißart	Effekt	Sensor	Quellen	
Verbundwerkstoffe	Gleitverschleiß	Abrieb	Verschleißvolumen	Friedrich et al. (2017)	
		Bruch	Bilddauswertung	Correa et al. (2017)	
				Rauheit	Correa et al. (2017)
				Verschleißvolumen	Correa et al. (2017)
				Bilddauswertung	Correa et al. (2015)
				Kraft	Correa et al. (2015)
				Bilddauswertung	Correa et al. (2015)
					Friedrich et al. (2017)
					Wei et al. (2018)
					Correa et al. (2015)
Verschleißvolumen					Friedrich et al. (2017)
Schwingungs- verschleiß		Bruch	Bilddauswertung	Diel (2015)	
			Finite Elemente	Diel (2015)	
			Kraft	Diel (2015)	
		Geometrieänderungen	Bilddauswertung	Diel (2015)	
			Nouri et al. (2015)		

...

Tabelle 1: Vom Maschinenelement zum Sensor (*Fortsetzung*)

Maschinenelement	Verschleißart	Effekt	Sensor	Quellen
Verbundwerkstoffe	Schwingungs-	Geometrieänderungen	Finite Elemente	Diel (2015)
	verschleiß		Kraft	Diel (2015)
Walzen	Erosion	Abrieb	Bildausswertung	Jakab et al. (2018)
			Kraft	Jakab et al. (2018)
		Geometrieänderungen	Bildausswertung	Jakab et al. (2018)
			Kraft	Jakab et al. (2018)
Gleitverschleiß		Abrieb	Bildausswertung	Jakab et al. (2018)
			Kraft	Jakab et al. (2018)
		Geometrieänderungen	Bildausswertung	Jakab et al. (2018)
			Kraft	Jakab et al. (2018)
Wälzlager	Gleitverschleiß	Bruch	Beschleunigung	Ali et al. (2015)
				Dalvand et al. (2016)
			Elektrizität	Dalvand et al. (2016)
		Grübchen/Bruch	Beschleunigung	Verbij and BV (2018)
		Vibrationen	Beschleunigung	Ali et al. (2015)
				Dalvand et al. (2016)

...

Tabelle 1: Vom Maschinenelement zum Sensor (*Fortsetzung*)

Maschinenelement	Verschleißart	Effekt	Sensor	Quellen
Wälzlager	Gleitverschleiß	Vibrationen	Beschleunigung	Prieto et al. (2013)
				Verbij and BV (2018)
			Elektrizität	Dalvand et al. (2016)
			Kraft	Shanmukha Priya et al. (2014)
	Stoßverschleiß	Vibrationen	Beschleunigung	Chacon et al. (2015)
	Wälzverschleiß	Bruch	Beschleunigung	Ali et al. (2015)
				Dalvand et al. (2016)
			Elektrizität	Dalvand et al. (2016)
		Grübchen/Bruch	Beschleunigung	Caesarendra et al. (2016)
				Verbij and BV (2018)
			Bildausswertung	Caesarendra et al. (2016)
		Vibrationen	Beschleunigung	Ali et al. (2015)
				Chacon et al. (2015)
				Dalvand et al. (2016)
				Prieto et al. (2013)
				Verbij and BV (2018)

...

Tabelle 1: Vom Maschinenelement zum Sensor (*Fortsetzung*)

Maschinenelement	Verschleißart	Effekt	Sensor	Quellen
Wälzlager	Wälzverschleiß	Vibrationen	Elektrizität	Dalvand et al. (2016)
			Kraft	Shanmukha Priya et al. (2014)

5.2 Diskussion der Ergebnisse

5.2.1 Vorgehensweise

In dieser Arbeit wurde ein Überblick über die Korrelationen zwischen Maschinenelementen und den Sensoren zur Verschleißmessung an diesen geschaffen. Tribologisch belastete Baugruppen wurden mit den häufigsten Verschleißarten, den aus diesen resultierenden Effekten und zuletzt den Sensoren, die nach aktuellem Stand zur Verschleißmessung dieser Maschinenelemente besonders geeignet sind, in Bezug gesetzt. Anschließend an eine Literaturrecherche wurden die Ergebnisse tabellarisch aufbereitet.

Während der Recherche wurde klar, dass sich zu einigen Maschinenelementen deutlich mehr Literatur in den Datenbanken finden lässt als zu anderen. Auch bei deutlich höherem Rechercheaufwand war z.B. die Anzahl an Resultaten zu „Elastische Teile“ deutlich geringer als jene zu „Getriebe“. Der Autor führte diese Differenz auf die wirtschaftliche Bedeutung der Maschinenelemente zurück. So ist auch aus den Ergebnissen (siehe Kapitel 5.1.2, 7 und 9) ersichtlich, dass zu den Maschinenelementen Getriebe, Schneiden, Verbundwerkstoffe und Wälzlager deutlich mehr Literatur recherchiert werden konnte als zu elastischen Teilen, Kupplungsflächen/Bremsen, Pressverbänden oder Walzen.

Die Resultate zeigen auch, dass vor allem Labortests in den wissenschaftlichen Arbeiten analysiert wurden. Dafür wurden meist eigene Versuchsaufbauten im Labor zusammengestellt und analysiert. Ergebnisse aus realen Betriebsbedingungen wurden selten in den wissenschaftlichen Arbeiten diskutiert, aber häufig für weitere Forschungen empfohlen.

In vielen Fällen wurde der Verschleißzustand auch mittels Verschleißvolumen oder bildverarbeitender Verfahren analysiert. Dabei handelte es sich um offline-Messungen, die selten für CM geeignet sind (siehe Kapitel 2.4 und 3.3). In diese Arbeit wurden die Artikel dennoch aufgenommen, wenn sie Information zur Verschleißmessung des Maschinenelements vermitteln oder zusätzlich auch online-Messungen gemacht wurden. In dieser Arbeit konnten 20 indirekte (online) und 26 direkte (offline) Messverfahren zusammengefasst und analysiert werden.

Im Zuge der Recherche fand sich die Behauptung, dass man Getriebe und Generator von Windkraftanlagen anhand der gemessenen Ausgangsspannung am Generator überwachen könne. Diese CM-Methode wäre aufgrund der unzähligen Erfahrungswerte der Windkraftanlagen-CM-Unternehmen möglich. Im Rahmen dieser Arbeit konnten keine Artikel über ähnliche Projekte gefunden werden. Auch die interviewten Experten konnten keine nähere Auskunft zum Thema geben. Ein Experte wies allerdings auf das weltweite Einsatzgebiet der CM-Unternehmen für Windkraftanlagen und die daraus resultierenden Expertisen dieser Unternehmen hin (siehe Kapitel 6.2).

5.2.2 State-of-the-Art - Recherche

Über elastische Teile, Kupplungsflächen/Bremsen, Pressverbände, Turbinenschaufeln und Walzen können hier keine qualitativen Vergleiche erstellt werden, da jeweils nur ein Artikel zum jeweiligen Maschinenelement analysiert wurde (siehe Tabelle 9 und Abbildung 7). Dies resultierte vor allem daraus, dass es zu manchen Maschinenelementen sehr wenige, zu manchen im Vergleich dazu unverhältnismäßig viele Publikationen gibt.

Gelenke, Gleitflächen, Kugelgewindetriebe, Rad/Schiene, Schrauben und Stahlseile lassen ebenfalls keinen Vergleich zu, da auch zu diesen Maschinenelementen jeweils nur zwei oder drei Artikel analysiert wurden.

Der Verschleiß von Gelenken ist nicht nur aus maschinenbaulicher Sicht interessant, auch die Medizin forscht bezüglich der Minderung des Verschleißes in Gelenken (siehe Kapitel 4.2.2). Durch die steigende Lebenserwartung des Menschen wird es immer öfter notwendig, „verschlossene“ Gelenke zu ersetzen. Die daraus resultierende Problematik (Vollnarkose, Krankenhausaufenthalt, Rehabilitation, uvm.) sowie die Kosten werden in den Medien immer wieder thematisiert. Auch in den Resultaten meiner Literaturrecherche stieß der Autor immer wieder auf medizinische Fachartikel. Hier kann und muss fachübergreifend von einander gelernt und gemeinsam von Forschungsergebnissen profitiert werden.

Kugelgewindetriebe funktionieren ähnlich einem Kugellager. Zusätzlich zu den typischen Verschleißarten eines Kugellagers (Gleit- und Wälzverschleiß) wird hier allerdings noch Stoßverschleiß angeführt. Eine Tendenz, mit welchem Sensor bevorzugt gemessen wird, ist nicht zu erkennen.

Beim Kontakt zwischen Rad und Schiene wurden als vorwiegende Verschleißarten der Reib- und Wälzverschleiß genannt. Der Artikel, in dem Stoßverschleiß als Verschleißart angegeben wurde, bezieht sich auf den Kontakt im Weichenbereich (siehe Kapitel 4.2.8) und die Stöße beim Überfahren eines Spaltes. Laut der vorliegenden Arbeit ist bei diesem Maschinenelement die Bildanalyse vorherrschend.

Bei Schraubverbindungen dominiert der Gleitverschleiß und damit der Abrieb. In den behandelten Artikeln schreiben alle Autoren über eine Messung mittels Kraftaufnehmer, FE und Bildauswertung. Allerdings war die Belastungsrichtung der Schrauben bei den analysierten Versuchen nicht einheitlich, wodurch ein direkter Vergleich nicht möglich ist. Die häufigste Verschleißart bei Stahlseilen ist der Gleitverschleiß. Trotz unterschiedlicher Belastungsfälle waren sich die Autoren einig, dass man den Verschleiß am Besten mittels Verschleißvolumen-Feststellung, FE und Bildauswertung messen kann.

Getriebe gehören zu den wichtigsten Baugruppen im Maschinenbau. Die Literaturrecherche ergab, dass diese Maschinenelemente vor allem mit Beschleunigungssensoren überwacht werden. Dies resultiert unter anderem aus der leichten Bearbeitung, Bereinigung von Störsignalen und Interpretation der Signale. (Hu et al. 2016; Peng and Kessissoglou 2003) Die zweithäufigste Auswertungsmethode ist die Bildanalyse, was der breiten Aufstellung der Sensorart Bildauswertung in dieser Arbeit geschuldet ist (siehe Kapitel 3.3.2). Die Verschleißarten sind fast ausschließlich Gleit- und Wälzverschleiß. Das führt der Autor darauf zurück, dass vor allem Lager und Zahnräder eines Getriebes verschleifen.

Beim Schneiden dominiert die Verschleißart Werkzeugverschleiß. Diese Bezeichnung wurde eigens für schneidende Bearbeitungswerkzeuge eingeführt (siehe Kapitel 3.2). Vibrationen sind die häufigsten Verschleißeffekte. Dazu passend wurde der Beschleunigungssensor bevorzugt eingesetzt. Onlinemessungen sind mit einem rechtfertigbaren Aufwand, allerdings nur direkt, möglich.

Wälzlager sind standardisierte Maschinenelemente, die in sehr vielen Anlagen Anwendung finden. Ihre Lebensdauer sollte so dimensioniert sein, dass sie die der Maschine übersteigt. Sehr oft werden Lager allerdings bereits in funktionsfähigem Zustand im Zuge der vorbeugenden Instandhaltung getauscht. (Sommer et al. 2010)

Verbundwerkstoffe wurden meist mit dem Pin-on-disc-Verfahren auf ihre Reibverschleißfestigkeit geprüft. Zusätzlich zu den Daten des Prüfapparates wurden sie mit REM, Lichtmikroskopie und Stereomikroskopie untersucht. In manchen Arbeiten wurde das Verschleißvolumen ergänzend festgestellt, um den Verschleißfaktor berechnen zu können (siehe Kapitel 6.2.3).

Während der Literaturrecherche ist dem Autor aufgefallen, dass es äußerst schwierig ist die komplexen Erscheinungsformen und Effekte von Verschleiß auf nur ein Maschinenelement zu beziehen, da es sich um Kontakteffekte handelt und nicht um Betriebszustände eines Maschinenelements.

Die Tabelle in ihrer momentanen Form bietet eine solide Grundlage für eine Weiterverwendung in zukünftigen Arbeiten. Der Autor schlägt vor, sich mit den hier verwendeten Verschleißarten, Verschleißeffekten und Sensoren vertraut zu machen und zu entscheiden, ob diese den eigenen Erfahrungen entsprechen. Vor einer Weiterverwendung sollten Ziele und Umsetzung zweckgebunden genau definiert werden. Mit einer Erweiterung „Signalverarbeitung“ könnten zukünftige Arbeiten noch mehr Nutzen aus den analysierten Artikeln generieren.

5.2.3 Schlussfolgerung

Die Idee dieser Diplomarbeit war es, eine Aufstellung verschiedener Maschinenelemente und ihrer CM-Systeme zu erstellen. Ausgehend davon, dass damit die Instandhaltung unterstützt werden kann, erschlossen sich dem Autor während der Literaturrecherche auch weitere Anwendungsgebiete für eine derartige Tabelle. So können damit zum Beispiel neue Lösungsansätze in der Produktion und bei Dienstleistern, die das CM für Kunden übernehmen, gefunden werden. Eine Tabelle, die auf die jeweiligen besonderen Anforderungen ausgerichtet ist, könnte demnach sowohl beim Kunden in der Instandhaltung als auch bei den Produzenten von Maschinen und bei Unternehmen, welche CM als Dienstleistung anbieten, Einsatz finden. Zu diesem Zweck müsste sie allerdings durch möglichst viele spezifische Arbeiten ergänzt, überarbeitet und an den jeweiligen Verwendungszweck angepasst werden.

Qualitative Vergleiche sind in dieser Arbeit nur bei den Maschinenelementen Getriebe, Schneiden, Wälzlager und Verbundwerkstoffe möglich (siehe Tabelle 9 und Abbildung 7). Begründet ist das in der Anzahl der pro Maschinenelement gelesenen Artikel. Die verbleibenden Maschinenelemente, zu denen wissenschaftliche Arbeiten gelesen wurden, vermitteln einen Einblick in ihre Zustandsüberwachung, lassen aber kaum Vergleiche zu.

Die Kategorien der Tabelle wurden zu Beginn von vorhergehenden Arbeiten übernommen (siehe Sommer et al. (2010)) und anschließend modifiziert (siehe Kapitel 4). Die Verschleißarten waren aus den Daten der Vorfeldrecherche gut abgrenzbar und konnten so als unveränderte Konstanten während der gesamten Arbeit angenommen werden. Maschinenelemente, Verschleißeffekte und Sensoren mussten immer wieder angepasst werden, da es nicht möglich war, schon vor der Literaturrecherche alle Varianten der Kategorien anzuführen.

Bei der vorliegenden Aufstellung ist daher es möglich, dass ein Artikel sowohl die direkte als auch die indirekte Messmethode beschreibt (siehe Kapitel 2.4). Die beiden Methoden werden allerdings nicht getrennt voneinander angeführt, was bei der Auswertung berücksichtigt werden muss.

Ebenso sind sowohl Sensor und Effekt, als auch Effekt und Verschleißart nicht getrennt voneinander aufgenommen worden. Diese Methode zur Sammlung der Daten führt dazu, dass mit unterschiedlichen Sensoren gemessene Verschleißeffekte in der Auswertung nicht differenziert werden können (siehe Kapitel 4 und 9).

Bei der Abgrenzung der Maschinenelemente wurde zu Beginn der Diplomarbeit eine Fülle von Teilen aufgelistet, um eine Diversifizierung in einem möglichst frühen Stadium der Recherche zu ermöglichen. Diese Differenzierung erwies sich als zielführend und sinnvoll, da sie die Zuordnung der gelesenen Arbeiten erleichterte. Es ist schwierig Maschinenelemente

auf nur einen Verschleißeffekt zu reduzieren. Das führt bei vielen Maschinenelementen zu Überschneidungen, wie es bei Getriebe (siehe Kapitel 4.2.3) versus Wälzlager (siehe Kapitel 4.2.15) der Fall ist. Eine praktikable Lösung für dieses Problem konnte der Autor bislang nicht finden.

In der vorliegenden Arbeit konnte nicht erhoben werden, wie gut sich die Sensorik für die Versuche in den analysierten Arbeiten eignete, da dies auch von den meisten Autoren nicht bekannt gegeben wird. Interessant wäre aber, welche Auswertelogik und welcher Sensor für die jeweilige Verschleißart am Besten geeignet sind. Der Autor stellte fest, dass eine erneute Analyse der Artikel notwendig wäre um aussagekräftige Vergleiche zu generieren. Dafür müssten voraussichtlich noch die Kategorien Dauer des Versuches, Verschleißgeschwindigkeit, Auswertelogik, weitere eingebundene Sensoren, zusätzliche Einflussfaktoren, Eignung der Sensoren, Eignung der Sensorinstallation, uvm. ergänzt werden, um die analysierten Arbeiten vergleichen zu können. Durch die Aufnahme weiterer Kategorien würde eine viel größere Zahl an Artikeln notwendig werden, um eine Tabelle wie die präsentierte zu erstellen. Ihre Aussagekraft hängt in hohem Maße von der Anzahl der erfassten Arbeiten ab.

6 Evaluierung der Ergebnisse

Zur Evaluierung der Ergebnisse wurde die Methode des Interviews gewählt. Um daraus qualitative Daten erhalten zu können, braucht es eine Festlegung der Vorgehensweise. Die Befragung einer großen Zahl an Personen mittels Single-Choice-Fragen, Experteninterview oder die Befragung mittels offenen Fragenkatalogs sind nur einige der möglichen Ermittlungsmethoden. Wesentlich ist, aus der Vielzahl der Varianten die für die eigenen Zwecke passende auszuwählen.

Für diese Arbeit wurde als geeignetste Variante das Experteninterview erachtet. Dieses beschränkt sich alleine auf Experten und deren Meinungen und Erfahrungen. Es werden also eine geringe Anzahl qualitativ hochwertige Antworten bei den Interviews erwartet. Experteninterviews sind eine Variante zur Erhebung von Daten. Sie zählen, wenn sie im wissenschaftlichen Kontext angewendet werden, zu den qualitativen Methoden der Befragungen. Interviews stellen eine soziale Interaktion zwischen Interviewer und Befragtem dar und sind deswegen von besonderem Wert. Der Befragte hat hier die Möglichkeit zusätzlich Information einzubringen, die unter Umständen gar nicht abgefragt werden kann. Experteninterviews sind Leitfadeninterviews. Diese Befragungstechnik dient der qualitativen Forschung und sieht vor, festgelegte Fragen zu stellen, die frei beantwortet werden können. Der Interviewpartner hat somit das Potential frei zu berichten, zu erklären und zu kommentieren. Damit kann er das Gespräch beeinflussen und neue Gesichtspunkte aufdecken oder erweiternde sowie ergänzende Themen anschnitten (anders als bei Fragenkatalogen mit fixen Antwortmöglichkeiten). Die Aufgabe des Interviewers ist es, das Gespräch mittels des oben erwähnten Leitfadens zu steuern. Dabei ist die Reihenfolge der Fragen nicht von großer Bedeutung. (Mieg and Brunner 2001)

6.1 Methodologie

Nach der einschlägigen Literaturrecherche wurde das Konzept für die Durchführung der Experteninterviews vorbereitet. Ein Leitfaden und mögliche Fragen wurden ausgearbeitet. Resultierend aus der Komplexität der Fragestellungen und der erfassten und miteinbezogenen Arbeiten wurden nicht zu allen einzelnen Themen Experteninterviews durchgeführt. Es wurde eine Einladung zum Experteninterview gestaltet und an ausgewählte Experten aus Industrie und Forschung versandt. Dies geschah unter dem Aspekt, Informationen vorab transparent zu kommunizieren. Hierbei sollten nicht nur die Thematik und der Interviewer vorgestellt, sondern auch Informationen über Umfang und Dauer des Interviews sowie auch Zweck und Verwendung der erlangten Daten vermittelt werden. (Kurzrock 2014; Harvey 2011) Zusätzlich sollte es dem Experten die Möglichkeit geben sich ebenso wie der Interviewer mit den Fragen auseinander zu setzen und gegebenenfalls Zusatzinformationen einzuholen. (Harvey 2011)

Die Fragen waren offen formuliert um den Experten die Möglichkeit einzuräumen, ihre Ansichten frei auszuführen und auch ein Abweichen vom Thema zuzulassen. (Harvey 2011;

Aberbach and Rockman 2002) In der Einladung wurde um einen Terminvorschlag für ein Interview gebeten. Hierbei blieb es den Experten überlassen, den Zeitpunkt zu wählen und sich für ein persönliches oder ein Telefoninterview zu entscheiden. Bezugnehmend auf Harvey (2011) und seine Forschungsergebnisse ist die Telefonrecherche eine gute und zeiteffiziente Methode des Experteninterviews. Zusätzlich erwähnt er aber auch, dass Antworten dadurch tendenziell weniger detailreich sind als bei einem face-to-face Interview. Zu Gesprächsbeginn muss festgelegt werden, ob eine Audioaufzeichnung der Unterhaltung erfolgen darf. Wird diese Methode abgelehnt, muss das Gespräch schriftlich dokumentiert werden. Das lässt den Interviewer unter Umständen unkonzentriert wirken und führt zu störenden Pausen und Unterbrechungen im Gespräch. Daraus resultiert mit einer hohen Wahrscheinlichkeit ein Informations- und Qualitätsverlust. Audioaufzeichnungen sind die sicherere und qualitativ hochwertigere Lösung. (Harvey 2011; Aberbach and Rockman 2002)

Gesprächspunkte

Die Interviews basierten auf Leitfragen, die den Gesprächspartnern gestellt wurden. Dabei war es wesentlich, die Reihenfolge dieser Fragen nicht als Leitfaden zu verwenden, sondern sie zum passenden Zeitpunkt im Gespräch zu stellen. Damit sollten thematische Abweichungen vermieden werden. Gleichzeitig ließ diese Vorgehensweise genug Raum um frei antworten zu können.

Es musste zwischen Experten im Bereich einzelner Maschinenelemente und für z.B. CM unterschieden werden. Da die Experten aus verschiedenen Fachbereichen kamen, bereitete sich der Autor individuell auf jedes einzelne Gespräch eingehend vor. (Harvey 2011; Mieig and Brunner 2001)

Die Fragen blieben jedoch gleich und wurden sehr allgemein formuliert, um den Experten die Möglichkeit zu geben ihre Expertise im jeweiligen Fachbereich zu äußern. Diese Art der Befragung ermöglichte es dem Autor auch, die Antworten miteinander zu vergleichen und Gemeinsamkeiten zu erkennen. Trotzdem bergen allgemeine Fragen das Risiko, nicht als gleichwertiger Gesprächspartner angesehen zu werden und verleiten den Experten dazu Grundlagen zu vermitteln. (Mieig and Brunner 2001)

Im Allgemeinen waren die Gespräche in drei Teile gegliedert. Im ersten wurde die Arbeit vorgestellt, die Teilnehmer stellten sich einander vor und es wurde die Einwilligung zu einer Audioaufzeichnung erbeten.

Anschließend kam der Hauptteil, um Fragen zur Handhabung von CM im Unternehmen und der persönlichen Einschätzung der Entwicklung von CM zu klären. Abgeschlossen wurde dieser Teil mit der Validierung der Ergebnisse der Tabelle. Hier wurde auf der einen Seite das Maschinenelement, mit dem sich der Experte beschäftigt, validiert, und auf der anderen Seite die Meinung zur Tabelle eingeholt.

Im letzten Teil des Interviews wurde noch um Feedback und allgemeine Gedanken gebeten, um aus jedem Interview zu lernen und für die folgenden Interviews besser vorbereitet zu sein (siehe Kapitel 9).

6.2 Zusammenfassungen der Interviews

6.2.1 Interview 1

Manfred Walker ist Geschäftsführer der österreichischen Niederlassung des schwedischen Unternehmens SPM²³. Er wurde aufgrund seiner Erfahrung mit CM-Systemen von großen und langsamdrehenden Maschinen und seiner Position als Vertreter des Handels mit CM-Anlagen gewählt.

Das Unternehmen befasst sich hauptsächlich mit Stoßimpuls- und Schwingungsmessung. Die Produkte von SPM kommen vor allem dort zum Einsatz, wo es zu dramatischen Schäden oder zu teuren Produktionsausfällen bei Versagen des Maschinenelementes kommt. Dafür werden vom Unternehmen vor allem an Lagern Schwingungs- und Stoßimpulsmessungen durchgeführt, da diese Maschinenelemente funktionsgegeben der höchsten Belastung ausgesetzt sind. Die Schwierigkeiten bei großen Anlagen sind vor allem langsamdrehende Bauteile, Pendelbewegungen und unterbrochene Bewegungen. In diesem Anwendungsbereich seien hohe Genauigkeit und Zuverlässigkeit besonders gefragt. Nur so könne man vorausschauende Instandhaltung realisieren.

Die Lager werden von SPM mittels Stoßimpuls- und Schwingungsanalyse überwacht und mit der firmeneigenen FFT-Software verarbeitet. Das bestätigt die Literaturrecherche, die ebenfalls Beschleunigungsmessung als Sensor für Wälzlager feststellt (siehe Kapitel 4.2). Laut Herrn Walker sind im Vergleich zu Lagerschäden die Zahnschäden um ein Vielfaches geringer. Damit unterstreicht er den hohen Wert von Lager-CM.

Er kritisiert an der Tabelle, dass es in der Praxis nicht so einfach ist, Maschinenelemente und Sensoren in Verbindung zu bringen. Seiner Erfahrung nach liefern oft baugleiche Maschinen sehr unterschiedliche Verschleißsignale. Dadurch sieht er für die Tabelle im Moment noch keinen Nutzen in seinem Gebiet.

Zukünftig sieht Herr Walker die menschliche Arbeitskraft nicht durch CM ersetzt. Vielmehr glaubt er, dass die Komplexität der Datenerfassung und die Schwierigkeit des Zusammenspiels von Sensoren und Datenaufbereitung immer vom menschlichen Eingreifen abhängig sein werden. CM hilft also dem Menschen bei der Überwachung der Anlagen und ersetzt ihn nicht. Als Resultat von gutem CM erwartet er allerdings weniger Reparatüreinsätze und Lagerhaltung. In diesen Bereichen sieht der Interviewpartner durchaus Einsparungspotential.

Herr Walker sieht vor allem in der Zuverlässigkeit der Daten den Schlüssel für CM. Ein Entwicklungspotential ist seiner Meinung nach bei der Überwachung langsamer Vorgänge

²³Das Unternehmen SPM Instrument entwickelt fortschrittliche Ausrüstung für die Zustandsüberwachung von rotierenden Maschinen, stellt diese her und vermarktet sie.
<https://www.spminstrument.com/A>

vorhanden. Das Telefoninterview mit Herrn Walker war ein sehr guter Einstieg in die Validierungsphase. Die vergleichsweise allgemeinen Aussagen sind vor allem drei Punkten geschuldet: der neuen Situation, der sich die beiden Gesprächspartner aussetzten (für Experten und Interviewer war es das erste Experteninterview), den allgemein gehaltenen Fragen und dem großen Einsatzgebiet des Unternehmens, was das Eingehen auf einen Spezialfall schwierig gemacht hat. Herr Walker konnte jedoch viel Input zu Wälzlagern und deren CM geben. Dabei machte er auf einen in dieser Arbeit noch wenig behandelten Punkt aufmerksam: die langsam drehenden Lager. So wurden nicht nur die Grundlagenrecherche und ein Hauptteil der Tabelle, die Wälzlager, validiert, sondern auch Input für weitere Studien gegeben.

6.2.2 Interview 2

Der interviewte Experte ist Projektleiter (auf Wunsch anonymisiert) in der Energiebranche und neben dieser Tätigkeit auch Fachbereichsingenieur im Bereich Nebenanlagen im Kraftwerk. Er wurde aufgrund seiner Erfahrung in der Instandhaltung von thermischen Kraftwerken gewählt. In seinem Gebiet werden vor allem Daten von Schwingungssensoren für das CM verwendet.

In unserem Gespräch weist er darauf hin, dass CM nicht überall sinnvoll ist. Als Beispiel führt er redundante Systeme und unwesentliche Prozesse an, bei denen die Anwendung von CM keinen wirtschaftlichen Vorteil bringt. Qualitatives CM kann seiner Meinung nach nur von einem Expertenteam (einer externen Expertenfirma) kosteneffizient betrieben werden. Damit räumt er CM-Unternehmen gute Zukunftsaussichten ein. Sie würden wegen ihrem facheinschlägigen Wissen in der Zukunft an Wichtigkeit für die Industrie hinzugewinnen. Aus dem Grund der Kosteneffizienz entschloss sich sein Unternehmen dazu, das CM auszulagern. Eine eigene CM-Abteilung wäre hier zu kostspielig.

Alle großen Aggregate (Turbinen und Generatoren) in seinem Unternehmen sind mittels Schwingungsanalyse (z.B. Gehäuseschwingungen, Lagergehäuseschwingungen) überwacht. Damit bestätigt er die Literaturrecherche (siehe Kapitel 4.2) und die Aussage von Herrn Walker, dass Lagerschwingungen vor allem mit Beschleunigungssensoren aufgenommen werden. Er geht auch auf die Überwachung der Anlage über Betriebsbedingungen ein. In seinem Unternehmen werden diese aufgezeichnet und können für das CM von Anlagen ergänzend eingesetzt werden. Zusätzlich ist dem CM-System eine Schutzschaltung vorge-schaltet, die den Betrieb unterbricht, wenn Schwellwerte überschritten werden.

Über die aktuellen Entwicklungen kann er leider nicht nur Gutes berichten. Auf den immer kleiner werdenden Komponenten werden auch immer weniger Anschlüsse verbaut, was zu Problemen führt. Ergänzend erwähnt er, dass die alte Sensorik mit den neuen Analysekomponenten nun viel detailliertere Daten liefern kann.

Aus seiner früheren Position als Projektleiter für Windkraftanlagen erzählt er, dass sie von den Betreibern meist als Blackboxes betrachtet werden. Der Hersteller hat einen Wartungsvertrag, überwacht die Anlagen mittels CM und wartet sie im Bedarfsfall. Die

Herstellerfirmen können so auf ein sehr großes Spektrum an Erfahrung zurückgreifen. Er glaubt, dass in einem längerfristigen Zeitraum erneuerbare Energien den Energiemarkt erobern und damit Kraftwerke überflüssig machen werden.

Den Ansatz der Arbeit findet er gut, da man von anderen Anlagen auf die eigene schließen kann. Als Betreiber benötigt man im besten Fall keinen Servicevertrag mit dem Hersteller einer Anlage, da allfällige Instandhaltungs- und Reparaturarbeiten selbst erledigt werden können. Er sieht allerdings das Problem, dass die Mitarbeiter bequem werden, wenn sie die Sicherheit eines Nachschlagewerkes haben. Bei einem nicht dokumentierten Fehlerbild wären die Folgen umso dramatischer und kostspieliger.

Auch stellt der Experte zur Diskussion, ob die Hersteller von z.B. Windkraftanlagen an der Pflege der Tabelle interessiert wären, da sie an Wartungsverträgen verdienen und diese durch solch eine Tabelle teilweise obsolet würden.

6.2.3 Interview 3

Dipl.-Ing. Dr. Norbert Gamsjäger ist seit 2010 Geschäftsführer von AAC²⁴. Er erzählt von seiner Erfahrung aus der Papierindustrie, wo vor allem die Komplexität der Mehrwalzenpakete eine Herausforderung ist. Hier findet die Überwachung meistens mit einer nicht stationären Schall- oder Schwingungsüberwachung statt.

Über die Tabelle sagt er, dass eine Übersicht über die verschiedenen Überwachungsmöglichkeiten durchaus Sinn macht. Trotzdem könne man nicht von fixen Größen ausgehen, sondern müsse sich an jeden einzelnen Fall herantasten, wobei hier sehr viel persönliche Erfahrung gefragt sei. Papierdicke, verschiedene Positionen, Temperaturen, Stoffkonsistenz uvm., also alles was technologisch ist, wird permanent aufgezeichnet und auch als Entscheidungskriterium für irgendwelche Adaptionen herangezogen. Entschieden wird aber noch vom Menschen, der seine Erfahrung einfließen lässt, und nicht von einer Auswertelogik. CM wird nach seinen Informationen in der Papierindustrie nur anlassbezogen, also temporär, eingesetzt. Er glaubt, dass hier Fachkräfte stärker denn je gefragt sein werden. Die Spezialisierung innerhalb der Arbeitsbereiche wird steigen. Seiner Meinung nach wird CM nicht zu einem Arbeitsplatzabbau führen, da man bei den derzeitigen Produktionsabläufen schon beim Personalminimum angelangt ist.

Dipl.-Ing. Balázs Jakab ist seit zehn Jahren bei AC²T²⁵ beschäftigt und befasst sich dort mit den tribologischen Interaktionen zwischen beweglichen Teilen. In seiner Arbeit stellt er den mechanischen Verschleiß großteils mittels Tribometer fest. Auf dem Teststand können Daten während der ganzen Bewegung aufgezeichnet, aber auch online gemonitort werden. Großflächige Volumensänderungen werden meist berechnet und/oder mit mikro-

²⁴Aerospace und Advanced Composites GmbH bietet Forschungs-, Entwicklungs- und Engineeringdienstleistungen in den Fachgebieten Werkstoffe, Verfahrenstechnologie und Prüftechnik an. <https://www.aac-research.at/>

²⁵AC²T research GmbH agiert als zentraler Knoten für nationale und internationale Forschungsaktivitäten in der Tribologie. <http://www.ac2t.at/>

skopischen oder analytischen Methoden erst anschließend an den Test erfasst.

Er steht der Tabelle skeptisch gegenüber. Seiner Meinung nach sind Fachleute, die sozusagen die Seele der Maschine kennen, unersetzbar. Es sollte nicht das Ziel sein, durch Messtechnik die Menschen eins-zu-eins zu ersetzen. Wenn Überwachungssysteme installiert werden, muss überlegt werden, was gemessen werden soll und welche Ergebnisse erwartet werden. Da ist die menschliche Erfahrung noch immer notwendig und wichtig. Herr Jakab ergänzt, dass Ölsensoren ein aktuelles, aber im Interview nicht behandeltes Thema sind.

Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Michael Scheerer ist seit der Gründung im Jahr 2010 bei AAC und leitet die Abteilung „polymere Verbundwerkstoffe“, wo er sich im Besonderen mit dem Through-life-monitoring von Bauteilen beschäftigt. Dabei wird unter anderem mittels Sensoren die Fließfront des Harzes in der Form detektiert, anschließend der Aushärtprozess beobachtet und beeinflusst sowie während des Betriebes die Belastung angezeigt.

Übergeordnetes Ziel ist eine interaktive Sensorsimulation. Zusätzlich simuliert er Struktur-schäden und analysiert diese in Tests durch Bildanalyse und FE-Modelle.

Des Weiteren interessiert er sich für den Bereich der Strukturüberwachung, also die Gebäude- und Infrastrukturüberwachung. Er erzählt im Interview, dass dort vermehrt aktive und passive Ultraschallmessung eingesetzt wird.

Er berichtet, dass in der Luft- und Raumfahrt noch keine Online-Überwachungssysteme der tragenden Bauteile/Strukturen zum Einsatz kommen. Hingegen gibt es in Flugzeugen die Engine-Überwachung schon sehr lange. Als Grund für die zögerliche Einführung einer Strukturüberwachung in diesem Bereich führt er die Investitionshöhe und auch das fehlende Vertrauen in neue Online-Systeme an.

In Bezug auf die Tabelle sieht er in der Frage, wie die erhaltenen Daten zu einer Aussage verknüpft werden können, den wichtigsten Ansatz. Dieses Thema wird allerdings zur Gänze ausgelassen. Zusätzlich erwähnt er, dass man eine Maschine erst einmal bis zu einem Ausfall in der Produktion betreiben muss, um qualitative Aussagen über deren Lebensdauer treffen zu können. Es gibt noch sehr wenige dieser Daten, da sie zu hohen Kosten führen. In diesem Gebiet sieht er noch sehr viel Potential.

Der Spezialist kann seiner Meinung nach nie durch Automatisierung ersetzt werden, im Gegensatz zu den Arbeitsplätzen in der Produktion.

Das dritte Interview wurde im persönlichen Gespräch mit drei Experten gleichzeitig geführt: Dipl.-Ing. Dr. Norbert Gamsjäger, Dipl.-Ing. Balázs Jakab und Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Michael Scheerer. Es war sehr interessant drei Experten aus der Forschung zu interviewen. Die unterschiedlichen CM-Gebiete in einem Gespräch zu behandeln war sehr aufschlussreich. Die Experten hatten dadurch die Möglichkeit nicht nur auf die Fragen einzugehen, sondern auch die Aussagen der anderen Experten zu ergänzen.

Die Interviewpartner sehen in ihren Gebieten zur Zeit keine sinnvolle Verwendung für die Tabelle. Dipl.-Ing. Dr. Gamsjäger, Dipl.-Ing. Jakab und Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Scheerer betonen vor allem die Individualität der Einsatzgebiete von CM, und dass man für die Beherrschung derselben immer den Menschen und seine Erfahrung brauchen werde. Das ist vor allem deswegen bemerkenswert, da Dipl.-Ing. Dr. Gamsjäger diese Aussage mit seiner Erfahrung in der Papierindustrie begründet. Dipl.-Ing. Jakab hingegen argumentiert aus der Sicht eines Forschers, der vor allem mit dem Tribometer arbeitet. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Scheerer bestätigt diese Aussage aus der Sicht der Strukturen aus Faserverbund. Sie unterstreichen damit die Meinung des Experten aus dem Kraftwerk.

Während Dipl.-Ing. Dr. Gamsjäger vor allem über das CM mit Beschleunigungssensoren in der Papierindustrie berichtet, spricht Dipl.-Ing. Jakab über die Verschleißfeststellung mittels Tribometer. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Scheerer bestätigt, dass von der Strukturüberwachung von Faserverbundstoffen bis hin zur Gebäude- und Infrastrukturüberwachung seiner Erfahrung nach mittels Beschleunigungssensoren gemessen wird. Gebäude- und Infrastrukturüberwachung wird zusätzlich mit GPS überwacht, ohne zu wissen ob Bauwerke oder Sensoren die höhere Lebenserwartung haben.

6.3 Diskussion der Interviews

Die Interviews sollten in erster Linie der Validierung der Tabelle dienen. Sie wurden sehr allgemein vorbereitet, um den Experten Raum für Ausschweifungen in den individuellen Fachbereichen zu geben.

Die Aufgabengebiete der Experten erstrecken sich über sehr viele Fachbereiche. Angefangen bei Herrn Walker als Geschäftsführer von SPM, einem Unternehmen, das CM-Lösungen vertreibt, über einen Instandhalter in thermischen Kraftwerken, Dipl.-Ing. Dr. Gamsjäger, dem Geschäftsführer von AAC und Experten bei funktionalen Oberflächen, Dipl.-Ing. Jakab, einem Tribotechniker, bis zu Gebäude- und Infrastrukturüberwachung und Strukturüberwachung von Faserverbundstoffen mit Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Scheerer als Interviewpartner sind viele Berufsfelder eines technischen Unternehmens und zusätzlich viele CM-Felder abgedeckt und ermöglichen eine besonders umfangreiche Validierung der vorliegenden Arbeit.

Für den Autor war es von Vorteil das erste Interview über das Telefon zu führen. So konnte er sich besser auf die Leitfragen konzentrieren. Bei den folgenden, persönlichen Interviews hatte er zusätzlich zum Interview die Möglichkeit sich ein Bild des Arbeitsumfeldes der Interviewpartner zu machen und so leichter ihrer Argumentation zu folgen.

Sowohl SPM Instrument International G.m.b.H.²⁶ als auch Dipl.-Ing. Dr. Gamsjäger thematisieren CM mittels Beschleunigungssensoren, und bestätigen damit deren Einsatz unabhängig von einander. So festigten sie den Eindruck des Autoren, dass Beschleunigungssensoren wohl die gebräuchlichsten Sensoren im CM sind.

Im Gespräch gab Herr Walker an, dass Lager (vor allem Wälzlager) die häufigsten Defektteile in industriellen Anlagen sind (siehe Kapitel 6.2). Dies ist seiner Erfahrung nach den Belastungen, denen sie ausgesetzt, aber auch der hohen Anzahl geschuldet, in der sie verbaut sind. Lagermonitoring hat daher für Unternehmen einen hohen Stellenwert. Die Schwingungsanalyse ist dabei die gebräuchlichste Art, Lager zu überwachen, bestätigten Herr Walker und Dipl.-Ing. Dr. Gamsjäger die Literaturrecherche.

Alle Interviewpartner erwähnen, dass CM nicht überall sinnvoll ist. Dabei unterscheiden sich ihre Herangehensweisen zu dieser Aussage. Während z.B. der zweite Interviewpartner CM teilweise aufgrund redundanter Systeme als überflüssig ausmacht, sieht dagegen Dipl.-Ing. Dr. Gamsjäger vor allem das Problem der Datenaufbereitung bei komplexen Problemstellungen.

Herr Walker geht im Interview besonders auf große, schwere und teure Maschinen ein. Der Autor macht das an seiner Rolle als Geschäftsführer von SPM fest, deren Einsatzgebiet dadurch widergespiegelt wird. Er erwähnt auch als einziger Gesprächspartner die Kosten von CM im Gegensatz zu den Lager-, Liefer- und Instandhaltungskosten. Die anderen Interviewpartner streifen dieses Thema bestenfalls.

Alle Interviewpartner behandeln im Gespräch die Datenverarbeitung und kritisieren, dass sie den aktuellen Anforderungen noch nicht gewachsen ist. Herr Walker berichtet von den Entwicklungen bei langsamdrehenden Maschinen, während der zweite Interviewpartner einen Einblick in die Umstellung von analoger auf digitale Technik vermittelt. Auch die Interviewpartner im dritten Interview behandeln das Thema Datenverarbeitung ausführlich. Die Interviews zusammenfassend ist in der Vernetzung der Daten und in der Datenverarbeitung der Schlüssel zu einem guten CM-System zu finden.

Abschließend erwähnten alle Experten, dass sie die Tabelle zwar gut und interessant, allerdings noch nicht praxisnahe genug finden. So kritisierte Herr Walker, dass es in der Praxis nicht so einfach ist, Maschinenelemente und Sensoren in Verbindung zu bringen. Das betonen auch Dipl.-Ing. Dr. Gamsjäger und Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Scheerer. Letzterer ergänzt noch, dass in der Tabelle die Signalverarbeitung ausgelassen wird, die seiner Meinung nach ein sehr essentieller Punkt bei dem Thema CM ist.

²⁶(siehe www.spminstrument.at)

Der zweite Interviewpartner sieht die Tabelle vom Ausbildungslevel des Teams her kritisch. Er äußert Bedenken, dass die Mitarbeiter mit einer solchen Tabelle bequem werden und bei einem noch nicht dokumentierten Fehlerbild keine Expertise zur Behebung haben würden.

7 Resümee und Ausblick

Resümee

In dieser Diplomarbeit wird ein Überblick der Korrelationen zwischen Maschinenelementen und den Sensoren zur Verschleißmessung an denselben geschaffen. Für die Datenerhebung wurden wissenschaftliche Artikel zusammengefasst, verglichen und tabellarisch angeführt. Dabei konzentrierte sich die Literaturrecherche vor allem auf den Verschleiß, der durch mechanische Belastung hervorgerufen wird. Chemischer Verschleiß und Erosion wurden nicht behandelt.

Durch eine passende Problemstellung (siehe Kapitel 1.2) konnte die Bearbeitung des Themas strukturiert abgearbeitet werden. Der Begriff Condition Monitoring (CM) und die verschiedenen Verschleißvorgänge wurden diskutiert und die Messbarkeit von Verschleißerscheinungen erläutert. Die Resultate der Literaturrecherche wurden aufgearbeitet und zeigen die Häufigkeit der Verwendung der Sensoren. Zusätzlich lässt sich die präferenzierte Sensorwahl bei den einzelnen Maschinenelementen erkennen. Die Verarbeitung der Sensorsignale wurde nicht beachtet.

Nach einer Vorfeldrecherche in der Literatur zu den Themen I4.0, CM, TCM, Verschleiß (siehe Kapitel 2.6) und Sensorik (siehe Kapitel 3.3) wurde eine Übersicht an wesentlichen Stichworten bezüglich des Themas der Arbeit erstellt. So entstand ein Grundstock an Begriffen, der die Bearbeitung aller vorab festgelegten Forschungsfragen erheblich vereinfachte (siehe Kapitel 2).

Die zentrale Aufgabe dieser Arbeit war die Erstellung einer Tabelle, die die Verschleißmessung und das CM diverser Maschinenelemente erfasst (siehe Kapitel 5). Bei der Literaturrecherche wurden rund 40 Artikel ausgewählt. Auswahlkriterien waren die Titel der Tabellenspalten wobei jeweils ein signifikanter Artikel analysiert wurde. Aus dem Ergebnis der Recherche wurde die Tabelle der Maschinenelemente und ihrer Sensoren entwickelt. Diese bot am Ende der Arbeit die Basis für die Tabellen „Vom Maschinenelement zum Sensor“, „Vom Sensor zum Maschinenelement“ und „Von der Verschleißart zum Sensor“ (siehe Kapitel 5).

Nach Beendigung der Recherche wurden, um die Tabelle zu evaluieren und um ihren wirtschaftlichen Nutzen zu überprüfen, Experteninterviews durchgeführt (siehe Kapitel 6). Diese waren nicht nur zur Bestätigung der Ergebnisse wertvoll, sondern zeigten auch neue Ansätze und Sichtweisen auf.

Unter anderem bestätigten die interviewten Experten, dass die Abgrenzung der Maschinenelemente in dieser Arbeit zu grob gewählt wurde um die Verschleißarten einem ablaufenden Verschleißprozess zuordnen zu können. Sie sehen die vorliegende Tabelle im Moment noch nicht praxisnahe, da baugleiche Maschinen oft sehr unterschiedliche Signale liefern können (siehe auch: 6.2.1, 6.2.3). Zudem wurde nicht darauf eingegangen, dass manche Maschinen-

elemente ähnliche Abläufe (z.B. Kugelgewindetriebe und Wälzkugellager) aufzeigen und kombiniert betrachtet werden können. In fortführenden Arbeiten sollte demnach großer Wert auf die anfängliche, scharfe Abgrenzung der Maschinenelemente untereinander gelegt werden, bevor mit der Literaturrecherche gestartet wird.

Eine Einbeziehung automatisierter Überwachung sowohl in Produktionen als auch in den laufenden Betrieb und die damit verbundene Risiko- und Kostenreduktion wird in Zukunft maßgebend zu Entscheidungen beitragen. Die durch Einführung von CM und I4.0 befürchteten Stellenreduktionen werden voraussichtlich ausbleiben, da die Spezialisierung der Arbeitskräfte in diesem Bereich schon jetzt sehr hoch ist und ihr Knowhow nicht einfach durch Sensorik substituierbar ist (siehe Kapitel 6.2).

CM wird weiter an Bedeutung gewinnen. Die technische Entwicklung schreitet immer schneller voran. Sowohl technische als auch natürliche Materialien sind einem Verschleiß unterworfen. Ob Aggregate oder (künstliche) Gelenke, Fortbewegungsmittel oder Produktionsmaschinen, Fahrtrassen oder Windkraftanlagen, sie alle haben eines gemeinsam: jede Kette ist nur so stark wie ihr schwächstes Glied.

Ausblick

Der Autor kam zu dem Schluss dass trotz des Aufwandes eine solche Tabelle für die praktische Anwendung sinnvoll wäre. Das wurde auch zum Großteil durch die Experten bestätigt. Für ein in der Praxis anwendbares Ergebnis müssen allerdings noch sehr viel spezifischere Artikel erfasst werden. Der Arbeitsaufwand wäre durch den Mehrwert für Unternehmen und Anwender wohl gerechtfertigt. Wichtig ist, dass die Kategorien überarbeitet, neu erstellt und teilweise miteinander verknüpft werden, um aussagekräftigere Statistiken generieren zu können (siehe Kapitel 6.2.3). Bei zukünftigen Arbeiten sollte im Vorfeld viel Energie in eine genaue Abgrenzung der Kategorien investiert und eine passende Auswertelogik/-methodik implementiert werden. Es wäre sinnvoll, die Tabelle durch eine Kategorie „Signalverarbeitung“ zu ergänzen um auch diesen äußerst wichtigen und für die Resultate ausschlaggebenden Faktor miteinzubeziehen. Leider geben viele Autoren in ihren Arbeiten nur Teile ihrer Verarbeitungslogik bekannt, was das Pflegen der Tabelle in zukünftigen Arbeiten erschweren wird.

Um den Einsatz einer solchen Tabelle in der Zukunft attraktiv zu machen muss sie immer aktuell und vor allem aussagekräftig sein. Es ist sicher eine interessante, aber auch sehr herausfordernde Aufgabe, sich eines derartig komplexen Projektes anzunehmen.

8 Verzeichnisse

Literatur

Horst Czichos. *Mechatronik*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015a.

Cunji Zhang, Xifan Yao, Jianming Zhang, and Hong Jin. Tool condition monitoring and remaining useful life prognostic based on a wireless sensor in dry milling operations. *Sensors*, 16(6):795, 2016.

S Kurada and C Bradley. A review of machine vision sensors for tool condition monitoring. *Computers in industry*, 34(1):55–72, 1997.

Karl Sommer, Rudolf Heinz, and Jörg Schöfer. *Verschleiß metallischer Werkstoffe; Erscheinungsformen sicher beurteilen*. Vieweg+Teubner: Wiesbaden, Wiesbaden, 2010.

Adam G. Rehorn, Jin Jiang, and Peter E. Orban. State-of-the-art methods and results in tool condition monitoring: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 26(7-8):693–710, 2005.

R.J. Boness and S.L. McBride. Adhesive and abrasive wear studies using acoustic emission techniques. *Wear*, 149(1):41 – 53, 1991.

D. Baccar and D. Söffker. Wear detection by means of wavelet-based acoustic emission analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing, December 07, 2013*, 60:198–207, 2015.

Christiane Hanna Theresia Rosenberg. Verschleißverhalten von polyäthylen beim kuenstlichen kniegelenkersatz. 2003.

Mario Honrubia. Industrial iot is booming thanks to a drop in sensor prices. 2017. URL <https://www.ennomotive.com/industrial-iot-sensor-prices/>.

Linxia Liao and Radu Pavel. Machine tool feed axis health monitoring using plug-and-prognose technology. In *Proceedings of the 2012 conference of the society for machinery failure prevention technology*, 2012.

Ron Miller. Cheaper sensors will fuel the age of smart everything. 2015. URL <https://techcrunch.com/2015/03/10/cheaper-sensors-will-fuel-the-age-of-smart-everything/>.

Matyas. *Instandhaltungslogistik*. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2016.

DIN31051. Din 31051 - grundlagen der instandhaltung, 2012.

DIN52108. Din 52108 - prüfung anorganischer nichtmetallischer werkstoffe, verschleißprüfung mit der schleifscheibe nach böhme - schleifscheiben-verfahren. *DIN 'Deutsches Institut für Normung e. V.*DIN German Institute for Standardization*, 2010.

- Horst Czichos and Karl-Heinz Habig. Tribologie-handbuch; tribometrie, tribomaterialien, tribotechnik, 2015.
- Metalltechniklexikon. *Metalltechnik-Lexikon.de*, 28.08.2017 2017. URL <http://www.metalltechnik-lexikon.de/verschleissursachen/>.
- Volker Ahrens. Inflation industrieller revolutionen. *Productivity Management*, 17(5), 2012.
- Dieter Spath, Oliver Ganschar, Stefan Gerlach, Moritz Hämmerle, Tobias Krause, and Sebastian Schlund. *Produktionsarbeit der Zukunft-Industrie 4.0*. Fraunhofer Verlag Stuttgart, 2013.
- Uwe Dombrowski, Christoph Riechel, and Maren Evers. Industrie 4.0–die rolle des menschen in der vierten industriellen revolution. *Industrie*, 4:129–153, 2014.
- Michael Ten Hompel and Michael Henke. Logistik 4.0. In *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*, pages 615–624. Springer, 2014.
- K. Schwab, P. Pyka, and T. Schmidt. *Die Vierte Industrielle Revolution*. Pantheon Verlag, 2016.
- Thomas Bauernhansl. Die vierte industrielle revolution–der weg in ein wertschaffendes produktionsparadigma. In *Handbuch Industrie 4.0 Bd. 4*, pages 1–31. Springer, 2017.
- Henning Kagermann. Chancen von industrie 4.0 nutzen. In *Handbuch Industrie 4.0 Bd. 4*, pages 237–248. Springer, 2017.
- Eckard Macherauch and Hans-Werner Zoch. *Praktikum in Werkstoffkunde; 91 ausführliche Versuche aus wichtigen Gebieten der Werkstofftechnik*. Vieweg+Teubner: Wiesbaden, Wiesbaden, 2011.
- Schlussbericht zu igf-vorhaben nr. 18155n - schweißen und verwandte verfahren. *Industrielle Gemeinschaftsforschung*, page 135, 2017. [DIN ISO 4378-2].
- Gwidon W. Stachowiak and G. W [Contributor] Stachowiak. *Wear. Tribology in Practice Series*. 2005.
- Horst Czichos. *Verschleiß*, pages 127–180. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2015b.
- Shakun Srivastava Ashutosh Verma. Review on condition monitoring techniques oil analysis, thermography and vibration analysis. *International Journal of Enhanced Research in Science Technology & Engineering*, 2014.
- Ya-nan Song, Hai-dou Wang, Bin-shi Xu, and Zhi-guo Xing. Effect of fretting wear on very high cycle bending fatigue behaviors of fv520b steel. *Tribology International*, 103:132–138, 2016.

- ZhengFeng Bai, Yang Zhao, and XingGui Wang. Wear analysis of revolute joints with clearance in multibody systems. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, 56(8):1581–1590, Aug 2013.
- Z. Peng and N. Kessissoglou. An integrated approach to fault diagnosis of machinery using wear debris and vibration analysis. *Wear*, 2003, Vol.255(7), pp.1221-1232, 2003.
- Anwar Ahmaida, Dong Zhen, Fengshou Gu, and Andrew Ball. Gear wear process monitoring using acoustic signals. 2014.
- Song Feng, Bin Fan, Junhong Mao, and Youbai Xie. Prediction on wear of a spur gearbox by on-line wear debris concentration monitoring. *Wear*, 336:1–8, 2015.
- Chongqing Hu, Wade A Smith, Robert B Randall, and Zhongxiao Peng. Development of a gear vibration indicator and its application in gear wear monitoring. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 76:319–336, 2016.
- Prashant Kumar Singh, Siddhartha, and Akant Kumar Singh. An investigation on the thermal and wear behavior of polymer based spur gears. *Tribology International*, 118 (Supplement C):264 – 272, 2018.
- Jinbang Li, Shuo Liu, Aibing Yu, and Sitong Xiang. Effect of laser surface texture on cusn6 bronze sliding against ptfе material under dry friction. *Tribology International*, 118(Supplement C):37 – 45, 2018.
- Komate Saknararak, Phaireepinas Phimpisan, and Chatchapol Chungchoo. Wear monitoring of steel ball of a cnc machining centre by using surface roughness of finished test pieces. In *Key Engineering Materials*, volume 656, pages 410–415. Trans Tech Publ, 2015.
- Gregory W Vogl, Brian A Weiss, and M Alkan Donmez. A sensor-based method for diagnostics of machine tool linear axes. In *Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society*, volume 2, 2015.
- Mingzhuo Zhou, Wenlong Lu, Xiaojun Liu, Wenzheng Zhai, Po Zhang, and Gengpei Zhang. Fretting wear properties of plasma-sprayed ti3sic2 coatings with oxidative crack-healing feature. *Tribology International*, 118(Supplement C):196 – 207, 2018.
- Yuanbin Zhang, Liantao Lu, Yubin Gong, Jiwang Zhang, and Dongfang Zeng. Fretting wear-induced evolution of surface damage in press-fitted shaft. *Wear*, 384-385 (Supplement C):131 – 141, 2017.
- Sakdirat Kaewunruen. Monitoring structural deterioration of railway turnout systems via dynamic wheel/rail interaction. *Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation*, 1:19–24, 2014.

- Dr. Jennifer Heck. *Zur Simulation des Rad-Schiene-Verschleißes bei Straßenbahnen*. PhD thesis, Fakultät für Maschinenbau Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2015.
- Nurul Farhana Mohd Yusof and Zaidi Mohd Ripin. A technique to measure surface asperities plastic deformation and wear in rolling contact. *Wear*, 368:496–504, 2016.
- Mehdi Nouri, Barry K. Fussell, Beth L. Ziniti, and Ernst Linder. Real-time tool wear monitoring in milling using a cutting condition independent method. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 89:1 – 13, 2015.
- Doriana D’Addona, A Ullah, and D Matarazzo. Tool-wear prediction and pattern-recognition using artificial neural network and dna-based computing. *Journal of Intelligent Manufacturing, Aug 2017, Vol.28(6), pp.1285-1301*, 2015.
- MAF Ahmad, Mohd Zaki Nuawi, Shahrudin Abdullah, Zaliha Wahid, Z Karim, and M Dirhamsyah. Development of tool wear machining monitoring using novel statistical analysis method, i-kazTM. *Procedia Engineering*, 101:355–362, 2015.
- Juho Ratava, Mika Lohtander, and Juha Varis. Tool condition monitoring in interrupted cutting with acceleration sensors. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 47:70–75, 2017.
- Jianhua Liu, Huajiang Ouyang, Jinfang Peng, Chaoqian Zhang, Pingyu Zhou, Lijun Ma, and Minhao Zhu. Experimental and numerical studies of bolted joints subjected to axial excitation. *Wear*, 346:66–77, 2016.
- Mingyuan Zhang, Liantao Lu, Wenjian Wang, and Dongfang Zeng. The roles of thread wear on self-loosening behavior of bolted joints under transverse cyclic loading. *Wear*, 394:30–39, 2018.
- A. Cruzado, M.A. Urchegui, and X. Gómez. Finite element modeling and experimental validation of fretting wear scars in thin steel wires. *Wear, 15 June 2012, Vol.289, pp.26-38*, 289:26–38, 2012.
- Yuanpei Chen, Fanming Meng, and Xiansheng Gong. Interwire wear and its influence on contact behavior of wire rope strand subjected to cyclic bending load. *Wear*, 368: 470–484, 2016.
- TS Cherepova, GP Dmitrieva, AV Nosenko, and AM Semirga. Wear-resistant alloy for protection of contact surfaces of aircraft engine rotor blades from oxidation at high temperatures. *Science*, 10(4):20–28, 2014.
- Carlos Eduardo Correa, Santiago Betancourt, Analía Vázquez, and Piedad Gañan. Wear resistance and friction behavior of thermoset matrix reinforced with musaceae fiber bundles. *Tribology International*, 87:57–64, 2015.

- Sergej Diel. Charakterisierung und modellierung des quasi-statischen verhaltens und der ermüdung eines zellularen verbundwerkstoffes. 2015.
- K Friedrich, EI Akpan, and B Wetzel. Structure and mechanical/abrasive wear behavior of a purely natural composite: black-fiber palm wood. *Journal of Materials Science*, 52(17):10217–10229, 2017.
- Carlos Eduardo Correa, Santiago Betancourt, Analía Vázquez, and Piedad Gañan. Wear performance of vinyl ester reinforced with musaceae fiber bundles sliding against different metallic surfaces. *Tribology International*, 109:447–459, 2017.
- Jinhua Wei, Bin Lin, Haoji Wang, Tianyi Sui, Shuai Yan, Feifei Zhao, Anying Wang, and Sheng Fang. Friction and wear characteristics of carbon fiber reinforced silicon carbide ceramic matrix (cf/sic) composite and zirconia (zro2) ceramic under dry condition. *Tribology International*, 119:45–54, 2018.
- Balázs Jakab, Norbert Gamsjäger, Hannes Steiner, Martin Ruthner, and Josef Krenn. Innovative komposite-bezüge mit hoher verschleißbeständigkeit und verbesserten antihafteigenschaften für funktionelle walzen in der papierindustrie. *BHM Berg-und Hüttenmännische Monatshefte*, pages 1–6, 2018.
- Miguel Delgado Prieto, Giansalvo Cirrincione, Antonio Garcia Espinosa, Juan Antonio Ortega, and Humberto Henao. Bearing fault detection by a novel condition-monitoring scheme based on statistical-time features and neural networks. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(8):3398–3407, 2013.
- V Shanmukha Priya, VR Ramesh, and VPS Naidu. Bearing health condition monitoring: Frequency domain analysis. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, pages 260–268, 2014.
- Jaouher Ben Ali, Nader Fnaiech, Lotfi Saidi, Brigitte Chebel-Morello, and Farhat Fnaiech. Application of empirical mode decomposition and artificial neural network for automatic bearing fault diagnosis based on vibration signals. *Applied Acoustics*, 89: 16–27, 2015.
- Juan Luis Ferrando Chacon, Vassilios Kappatos, Wamadeva Balachandran, and Tat-Hean Gan. A novel approach for incipient defect detection in rolling bearings using acoustic emission technique. *Applied Acoustics*, 89:88–100, 2015.
- Wahyu Caesarendra, Buyung Kosasih, Anh Kiet Tieu, Hongtao Zhu, Craig AS Moodie, and Qiang Zhu. Acoustic emission-based condition monitoring methods: Review and application for low speed slew bearing. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 72:134–159, 2016.

- Fardin Dalvand, Asadollah Kalantar, and Mir Saeed Safizadeh. A novel bearing condition monitoring method in induction motors based on instantaneous frequency of motor voltage. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(1):364–376, 2016.
- Rick Verbij and SPM Instrument BV. Online condition monitoring on a rotary calciner. pages 1–17, 2018.
- Pierre Tchakoua, René Wamkeue, Mohand Ouhrouche, Fouad Slaoui-Hasnaoui, Tommy Andy Tameghe, and Gabriel Ekemb. Wind turbine condition monitoring: State-of-the-art review, new trends, and future challenges. *Energies*, 7(4):2595–2630, 2014.
- Martin Riera-Guasp, Jose A Antonino-Daviu, and Gérard-André Capolino. Advances in electrical machine, power electronic, and drive condition monitoring and fault detection: state of the art. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(3):1746–1759, 2015.
- Henrique Dias Machado de Azevedo, Alex Maurício Araújo, and Nadège Bouchonneau. A review of wind turbine bearing condition monitoring: State of the art and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56:368–379, 2016.
- Harald A. Mieg and Beat Brunner. Experteninterviews - eine einföhrung und anleitung. 2001.
- Prof. Dr. Björn-Martin Kurzrock. Anleitung für experteninterviews im rahmen wissenschaftlicher arbeiten am fachgebiet immobilienökonomie. 2014.
- William S Harvey. Strategies for conducting elite interviews. *Qualitative Research*, 2011.
- Joel D. Aberbach and Bert A. Rockman. Conducting and coding elite interviews. *PS: Political Science and Politics*, 35(4):673–676, 2002.

Abbildungsverzeichnis

1	Aufbau und Struktur der Arbeit	5
2	Instandhaltung, Gestern und Heute in Anlehnung an Matyas (2016)	8
3	Adhäsion (Macherauch and Zoch 2011)	13
4	Abrasion (Macherauch and Zoch 2011)	14
5	Oberflächenzerrüttung (Macherauch and Zoch 2011)	14
6	tribochemischer Verschleiß (Macherauch and Zoch 2011)	15
7	Anteile der gelesenen Artikel	54

Tabellenverzeichnis

1	Vom Maschinenelement zum Sensor	42
2	Tabelle der Quellen	30
3	Tabellarische Darstellung der gesammelten Daten	31
4	Vom Sensor zum Maschinenelement	32
5	Von der Verschleißart zum Sensor	43
6	Aufstellung der Maschinenelemente	55

9 Anhang

Gesprächsleitfragen bei den Interviews

Die folgenden Punkte waren Leitfaden für jedes der geführten Experteninterviews:

- Vorstellung des Interviewers
- Vorstellung der Diplomarbeit
- Erklären, welche Themen und/oder wie viele Fragen man hat, um eine Einschätzung der Gesprächsdauer zu ermöglichen)Harvey (2011)
- Begründung der Expertenauswahl
- Darf eine Audioaufzeichnung gemacht werden?
- Um eine Vorstellung des Experten (Werdegang/jetziger Funktion) ersuchen. (Harvey 2011)
- Haben Sie noch Fragen, bevor wir starten?
- Welche Maschinenelemente fallen in Ihrem Fachbereich am häufigsten auf Grund von Verschleiß aus?
- Wie gehen Sie zur Zeit mit Verschleißausfällen um?
- Wie sehen Sie die aktuelle Entwicklung im Bereich CM?
- Wo sehen Sie in Ihrem Bereich noch Entwicklungspotential in Bezug auf CM?
- Wie werden bei Ihnen CM-Daten verarbeitet und/oder gespeichert?
- Wird Ihrer Meinung nach der Mensch durch CM substituiert, so wie es durch die Weiterentwicklung von CM - also Industrie 4.0 - befürchtet wird?
- Rückblick/Ausblick erfragen
- Was halten Sie von der Idee eine Tabelle aufzustellen, die Verschleißerscheinungen von Maschinenelementen und deren Sensoren in Verbindung bringt?
- Feedback einholen. Was haben die Experten von den Fragen und vom Interviewprozess gehalten?Harvey (2011)
- Für die aufgewendete Zeit und das Gespräch bedanken

Transkripte

Transkription: Ingrid Fiel

Überarbeitung: Ing. Andreas Fiel, BSc

Interview 1

Manfred Walker ist Geschäftsführer SPM Instrument International Gesellschaft m.b.H.²⁷
(W)

Persönliches Interview durch Ing. Andreas Fiel, BSc (F)

Wien, 22.01.2018, 15:30

Transkription bestätigt durch Manfred Walker am 07.03.2018

Anschließend an Begrüßung und Vorstellung wurde, nach Einholung der Einverständnis, das Gespräch zur anschließenden Transkription aufgezeichnet.

F: Ich studiere an der TU Wien Wirtschaftsingenieur-Maschinenbau und werde 2018 mit meinem Studium fertig. Bei SPM sind Sie der Experte im Bereich Condition Monitoring in der österreichischen Niederlassung.

W: Ich bin Geschäftsführer der Firma SPM, und unser Kerngebiet ist CM auf Schwingungs- oder Stossimpulsmessung. Wir machen keine Öl-Analyse, wir machen reine Schwingungs-Analysen. Unsere österreichische Niederlassung ist eine 100%ige Tochter des schwedischen Mutterunternehmens. Wir sind vor allem für den Handel mit Geräten in Österreich und im Osten Europas zuständig.

F: Und das, wie ich auf ihrer Homepage gesehen habe, bei eher größeren Maschinen.

W: Richtig. CM wird hauptsächlich dort angewandt, wo ein Produktionsausfall ins Geld geht oder wo keine Personensicherheit gewährleistet ist, wenn es zu einem Ausfall kommt. Unsere Produkte werden dort eingesetzt wo es zu dramatischen Schäden oder zu sehr teuren Produktionsausfällen kommen kann.

F: Ich habe mir das Gespräch in Vorstellung, Hauptfragen und abschließend noch einmal einen allgemeinen Bereich gegliedert. Es werden fünf Hauptfragen und fünf allgemeine Fragen sein, und ich glaube wir werden sicherlich nicht länger als eine halbe Stunde benötigen.

In meiner Arbeit geht es darum, am Ende eine Tabelle zu haben, die auf Artikeln und

²⁷Das Unternehmen SPM Instrument entwickelt fortschrittliche Ausrüstung für die Zustandsüberwachung von rotierenden Maschinen, stellt diese her und vermarktet sie.
<https://www.spminstrument.com/A>

Veröffentlichungen diverser Forschungen aufbaut. Sie stellt die Maschinenelemente, deren Verschleiß und den Sensor, mit dem der Verschleiß gemessen wird, gegenüber. In ihrem Unternehmen stehen also Getriebe, Wälzlager und Kugellager, die sie monitoren, auf der einen Seite, auf der anderen Seite steht so gut wie ausschließlich die Schwingungsanalyse. Das machen sie mit normalen Beschleunigungssensoren, nehme ich an?

W: Wir wenden spezielle Messtechniken an. Die Stoßimpulstechnik der SPM ist patentiert. Aktuell haben wir eine neue HD-Technologie, die sowohl bei der Schwingungs-, als auch der Stossimpulsmessung angewandt werden kann, wodurch ein großer Drehzahlmessbereich erfassbar ist. Damit reagieren wir auf das Problem im CM, dass es umso schwerer ist einen Fehler festzustellen, je langsamer sich eine Maschine dreht. Die Änderungen in den Betriebsbedingungen, die ein defektes Lager oder ein defekter Bauteil zur Folge haben sind umso geringer, je weniger Energie dieser Bauteil hat. D.h., die messbare Energie hängt von der Umlaufgeschwindigkeit ab. Je schneller sich etwas dreht, umso leichter kann man eine Verschlechterung detektieren. Wenn sich etwas langsam dreht, dann hat das nur eine geringe Energie. Dadurch lässt sich der Fehler sehr schlecht feststellen. Mit der neuen HD-Technologie können wir diese schwachen Signale aus den Frequenzen oder Spektren herausfiltern und Auswertungen über den Zustand der Bauteile bei sehr geringen Drehzahlen machen. Der nächste Vorteil ist: je genauer ich messen kann, umso größer sind die Vorwarnzeiten um eine Reparatur dementsprechend lange im Vorhinein planen zu können. Es ist in der Prozess-Industrie so, dass es auf Grund von Produktänderungen alle paar Monate einen geplanten Produktionsstillstand gibt. Während dieses Stillstandes haben die Techniker vier bis sechs Stunden Zeit umzurüsten und Reparaturen durchzuführen. So wird gewährleistet, dass es durch Instandhaltung zu keinen Produktionsausfällen kommt.

F: Diese Aussage deckt sich mit meinen Vorfeldrecherchen, die ergeben haben, dass schnell bewegte Prozesse gut messbar sind. Dem gegenüber sind langsame Prozesse schwer messbar.

Wie sehen sie die aktuelle Entwicklung im Bereich CM? Auch jetzt, da das Thema durch I4.0 neuen Aufschwung erfährt? Wo sehen Sie die Entwicklung, und wo wird sie hinführen? Hilft es ihnen in ihrem Unternehmen, dass CM und I4.0 mittlerweile in aller Munde ist?

W: In I4.0 müssen die Zustände der einzelnen Maschinen bekannt sein, damit dementsprechend richtig reagiert werden kann. D.h., man braucht zuverlässige Daten und Sensorik um die richtigen Schlüsse zu ziehen. Leider befindet sich die Datenerfassung meiner Meinung nach noch im Anfangsstadium. Wenn man etwas misst, das nicht zuverlässig/nicht aussagekräftig ist, nützt einem eine gute Kommunikation zwischen den einzelnen Anlagen/Messapparaten nichts.

F: In meiner Diplomarbeit wird aufgeführt, dass die Messung an Wälzlagern vorwiegend mit Beschleunigungssensoren stattfindet. Warum hat sich ihre Firma auf die Schwingungsanalyse durch Beschleunigungssensoren/durch Stossimpulssensoren spezialisiert? Wie kam es zu der Entscheidung? Wurde sie getroffen, weil es wenige Vorfeldrecherchen in diese Richtung gab?

Man könnte ja auch die Elektrizität der antreibenden Einheit messen und daraus auf den Verschleiß eines Wälzlagers schließen. Das gibt es vor allem bei Windkraftanlagen auch schon.

W: In dem von ihnen angesprochenen Fall hat man keine Vorwarnzeit. Wenn der Schaden schon so weit fortgeschritten ist, dass er sich in der Stromaufnahme bemerkbar macht, hat man nur mehr sehr kurze Zeit zum Reagieren und die Reparatur zu planen. Ein geplanter Wechsel hilft, eine Instandhaltungsmaßnahme in kürzester Zeit durchzuführen. Dafür braucht man die richtigen Leute zur richtigen Zeit mit den richtigen Ersatzteilen am richtigen Ort.

Wenn man von der erhöhten Stromaufnahme ausgeht, weiß man eigentlich nicht was kaputt ist. Da kann der Motor, eine Dichtung oder ein Lager defekt sein. Man muss den Motor aufmachen, um herauszufinden wo das Problem liegt.

F: Meine Recherchen haben ergeben, dass man das in Frage kommende Maschinenelement aufgrund der Erfahrungswerte bei Generatoren oder Elektromotoren eingrenzen kann. Wenn sich zwei Wälzlager mit derselben Drehzahl drehen, dann kann man die Suche nach dem verschlissenen Teil zumindest auf eine Achse beschränken.

W: Wenn man die Strommessung zur Verschleißfeststellung einsetzt, weiß man nicht ob der Motor oder das Getriebe defekt ist. Bei so einer Anlage hat man viele verschiedene Bauteile die für eine erhöhte Stromabnahme verantwortlich sein können. Es ist aber nicht möglich zu präzisieren, ob der Defekt bei Hauptlager oder Getriebe zu suchen ist. Man weiß dann nur dass ein Problem aufgetreten ist, aber nicht was es ist.

Mit der Schwingungsanalyse kann man genau sagen, wo das Problem liegt. Zusätzlich dazu bietet sie eine lange Vorwarnzeit. So bekommt der Anwender schon Wochen oder Monate vor einer ungewollten Beeinträchtigung eine Warnung. Dadurch weiß man welches Bauteil defekt wird und kann, bevor das Problem zu einem Schaden wird, eingreifen. Man reagiert also nicht wenn etwas defekt ist, sondern schon vorher.

F: Was wird, ihrer Erfahrung nach, im Maschinenbau bei großen Anlagen am häufigsten defekt? Welche Maschinenelemente werden von ihnen noch überwacht?

W: Quantitativ sind Lager die häufigsten Defektteile. In einer Papiermaschine z.B. gibt es ca. 2000 Aggregate, und jedes Aggregat hat mindestens vier Lager. Allein von der Menge

der Lager her sind das die Teile, die am häufigsten defekt werden.

F: Ihrer Meinung nach sind also auch Zahnräder oder Walzen nicht so verschleißanfällig. Es sind hauptsächlich die Lager, die es zu überwachen gilt.

W: Die Lager nehmen die ganze Last einer Achse oder Welle auf. In einem Kugellager wird diese Last von den Kugeln, also von einer relativ kleinen Oberfläche, getragen. Wir sprechen hier vom Punktkontakt. Zum Beispiel dreht sich ein Motor mit 1500 Umdrehungen 25mal in der Sekunde. Genauso oft wird das Lager in der Abrollzone zusammengedrückt, entlastet und wieder zusammengedrückt. Diese dynamische Belastung und der damit verbundene Verschleiß sind um vieles höher als bei einem Teil, der einer gleichbleibenden Belastung ausgesetzt ist.

F: Bei einem Zahnrad auf derselben Welle habe ich also unter Umständen auch die gleichen Umdrehungen, aber eben keine vergleichbar hohe dynamische Belastung?

W: Richtig. Die Belastung teilt sich bei einem Zahnrad auf viele Zähne auf. Im Vergleich zu Lagerschäden sind die Zahnschäden um vieles geringer.

F: Wo sehen sie Verbesserungspotential im CM? Ihre neue Technologie kann auch langsam drehende Lager analysieren und dadurch Ausfälle besser und früher detektieren. Wo sehen Sie auf ihrem Gebiet Entwicklungspotential?

W: Im Moment ist es so, dass viele Anlagen mit geringen Drehzahlen, kleinen pendelnden Bewegungen oder solchen, die nur Sekunden andauern, also nicht kontinuierlich sind, sehr schwer zu messen sind und deswegen noch nicht überwacht werden können. Durch die neue Technologie werden auch diese Anwendungen, wo Lager auch oft sehr kostspielig, groß und mit Lieferzeiten von mehreren Monaten behaftet sind, besser überwacht und die Ersatzteillagerhaltung optimiert.

F: Sie messen die Signale mit Schwingungs- und Stoßanalyse. Die Signalverarbeitung der Daten wird dann auch mit der firmeneigenen Software durchgeführt?

W: Ja, wir haben eine eigene Software mit speziellen Algorithmen entwickelt, damit relevante Signale, die oft auch schwer zu erkennen sind, extrahiert werden können.

F: Sehen sie durch CM den Menschen ersetzt? Ich rede jetzt vor allem von kleineren Maschinen wie z.B. Drehmaschinen. Dort konnte früher der Maschinenbetreuer anhand der Lautstärke der Maschine Aussagen über ihren Zustand treffen. Wenn sich die Lautstärke änderte, konnte er auf einen möglichen Defekt schließen. CM überwacht genau auf dieselbe Weise eine Maschine und ersetzt damit den Menschen. Ist das bei großen Maschinen,

also ihrem Fachgebiet, auch der Fall?

W: Meiner Meinung nach unterstützt CM den Menschen und ersetzt ihn nicht, da man zur Überwachung von CM noch immer den Menschen benötigt. Es verändern sich Drehzahl, Betriebsbedingungen und immer wieder die gesamte Produktion, uvm.. Das CM ist ein Hilfsmittel, das sie in der Instandhaltung unterstützt. Es wird in gewisser Weise sicher Leute ersetzen, weil man weniger Reparaturen hat, geplant reparieren kann und von spontanen Einsätzen weg kommt. Generell wird man aber die Menschen nach wie vor brauchen um das CM-System zu betreiben und die Reparaturen durchzuführen, auch wenn diese weniger werden.

F: Wir sind wieder bei I4.0, wo wir angefangen haben. Meine Frage: Was halten sie von meiner Idee der Tabelle? Handelt es sich um eine gute Idee, oder ist die Herangehensweise viel zu theoretisch?

W: Meiner Meinung nach ist es in der Praxis nicht ganz einfach, Maschinenelemente und Sensoren generell miteinander zu verbinden. Es gibt viele unterschiedliche Faktoren, die das Zusammenspiel der Bauteile beeinflussen können. Wir wissen aus Erfahrung, dass zwei gleiche Maschinen messtechnisch komplett unterschiedliche Verhalten zeigen können.

Vielen Dank für dieses erste Interview im Rahmen meiner Diplomarbeit, das mir Berührungspunkte mit weiteren Experten nahm.

Interview 2

Technischer Leiter der Instandhaltung von thermischen Kraftwerken (H)

Persönliches Interview durch Ing. Andreas Fiel, BSc (F)

20.02.2018, 09:00

Transkription bestätigt durch den Experten am 08.03.2018

Anschließend an Begrüßung und Vorstellung wurde, nach Einholung des Einverständnisses, das Gespräch zur anschließenden Transkription aufgezeichnet.

H: Wird diese Arbeit geheim gehalten oder gleich veröffentlicht?

F: Nach Rücksprache mit meinem Betreuer wird die Diplomarbeit nicht geheim gehalten. Wenn es gewünscht ist, kann ich dir vor Veröffentlichung der Arbeit das Transkript unserer Unterhaltung zur Verfügung stellen.

H: Bitte auf keinen Fall meinen Namen oder Firmennamen erwähnen. Bitte schreibe nur von einem Interview in einem thermischen Kraftwerk, damit keine Rückschlüsse gezogen werden können. Die Informationen, die ich dir gebe, sind bitte nur anonym und allgemein wiederzugeben. Ich habe schon schlechte Erfahrungen mit Offenlegungen gemacht.

F: Ich habe meinem vorigen Interviewpartner zugesichert, dass er nach Fertigstellung der Arbeit ein Exemplar bekommen wird. Das kann ich dir auch zusichern. Nach Rücksprache mit meinem Betreuer werde ich dir, wie gesagt, auch vor Fertigstellung der Arbeit das Transkript zukommen lassen, um dir die Möglichkeit einer etwaigen Korrektur einzuräumen.

H: Zur Zeit bin ich Projektleiter im Bereich Kraftwerke und neben dieser Tätigkeit auch Fachbereichsingenieur im Bereich Nebenanlagen im Kraftwerk. Das Kraftwerk ist aus maschinenbaulicher Sicht in drei Teile unterteilt: Fachbereich Turbine, Fachbereich Kessel und Fachbereich Nebenanlagen. Der umfasst alles andere wie z.B. Brennstoff-, Fernwärmeversorgung, uvm. Hier habe ich mein Team, mit dem ich für die Instandhaltung zuständig bin. In unserer Tätigkeit ist es unheimlich wichtig für die Kraftwerke, dass wir ständig verfügbar und abrufbar sind.

F: Das heißt, wir werden heute vor allem über Turbinen und Generatoren reden. Oder? Meine Fragen werden sehr allgemein gehalten sein. Es wird um CM und die Entwicklung von CM gehen und darum, was sich in dem Bereich getan hat und in Zukunft tun wird.

H: Vorab will ich bitte noch wissen, was du unter CM verstehst? Es ist für mich wichtig, dass ich weiß welche Definition du für CM hast.

Geht es deinem Verständnis nach um Verschleiß aus maschinenbaulicher Sicht? Trennst du auch zwischen zyklisch, nicht zyklisch, online oder offline?

F: Für mich ist CM das Feststellen des aktuellen Zustandes des Maschinenelementes bzw. der Maschine. Man will am Ende den Zustand wissen, in dem sich die Maschine befindet, kann aber nur die einzelnen Maschinenelemente überwachen. Meiner Meinung nach wird CM angewendet, wenn einem die Maschine so wichtig ist, dass man mittels der Überwachung von Komponenten den Istzustand festzustellen versucht, um damit auf bestehenden oder zukünftigen Verschleiß schließen zu können.

Ja, es geht um den Verschleiß aus maschinenbaulicher Sicht. Diese Arbeit differenziert zwischen online und offline, interessiert sich aber eher für die online-Messung. Leider werden in vielen Forschungsberichten Rasterelektronenmikroskop-Auswertungen angeführt, die zu den offline-Verfahren zählen. Wenn sich die Autoren der Veröffentlichungen auf ihre Bilder oder Bildanalysen beziehen, führe ich das allerdings trotzdem in meiner Arbeit an. In manchen Artikeln wird auch beschrieben dass Maschinen gar nicht überwacht werden, sondern es wird erst nach dem Ausfall der Schaden fotografiert und analysiert, um dann auf die Zukunft und zukünftig eingebaute Teile zu schließen. Das verstehe ich nicht unter zyklisch, aber auch diese Artikel führe ich an.

H: Das ist dann meiner Meinung nach auch kein CM. Bei manchen Anlagen ist es einem einfach egal, oder nicht wert, dass man ein bestimmtes Maschinenelement überwacht. Wenn ein Teil defekt ist, wird es einfach ausgetauscht. Manche Ersatzteile hat man auf Lager liegen, in anderen Fällen hat man unter Umständen ein redundantes System und dadurch auch die Zeit und Möglichkeit, das Defektteil in einem gewissen zukünftigen Zeitraum zu tauschen.

Auf der anderen Seite gibt es Anlagenteile, die man ständig, auch online schutzüberwachen muss. Aus den Daten gilt es anschließend auch eine entsprechende Diagnose zu erstellen und zu verwenden. Das kann online oder zyklisch umgesetzt werden.

F: Ich habe mir fünf Haupt- und fünf Nebenfragen zusammengeschrieben und möchte jetzt mit dem ersten Punkt beginnen.

Welche Maschinenelemente überwacht dein Unternehmen am meisten und welche fallen am meisten aus? Sind es eher Zahnräder und Lager oder eher die Getriebe als Zusammenbau der Komponenten die ausfallen?

H: Turbine und Generator sind für uns am Wichtigsten. Dabei legen wir aber auch Wert auf Nebenaggregate, deren Ausfall vielleicht nicht so kostspielig wäre, die aber trotzdem essentiell für unsere Anlage sind. Online-CM wird in unserem Unternehmen bei fast allen Aggregaten angewandt. Dabei handelt es sich um die großen Motoren, Pumpen (mit und ohne Getriebe), z.B. Speisepumpen, Frischlüfter, Rezirkulationsgebläse, Ansaugung für

die Kesselluft oder Verbrennungsluft uvm., also alle großen Aggregate.

F: Werden diese Aggregate als Gesamtes überwacht, z.B. mittels Schwingungsanalyse des Gehäuses? Oder analysiert ihr einzelne Bauteile des Aggregates?

H: Unsere Anlage wird mittels Schwingungsanalysen überwacht, jedoch nur analyse- bzw. diagnosemäßig. Dabei werden z.B. Gehäuseschwingungen, Lagergehäuseschwingungen, Drehzahl uvm. überwacht. Wellenschwingungen werden bei unseren Aggregaten nicht gemessen. Zusätzlich wird die Wellenlage bei den Speisepumpen überwacht.

Bei Turbinen und Generatoren haben wir, zusätzlich zum CM, eine Schutzschaltung der Anlage über die Messungen der Signale verwirklicht. Diese ist viel wesentlicher als die Analyse der einzelnen Daten. Wenn gewisse Schwingungswerte erreicht werden, wird automatisch der Trip ausgelöst und die Maschine fährt in den gesicherten Zustand.

Die Sensorsignale werden bei uns zuerst vom Schwingungsschutz überprüft und anschließend an die Diagnose, bzw. die Überwachung, weitergeleitet. Zusätzlich – das ist aber nicht unbedingt CM – sind bei uns sämtliche Aggregate von unserem Personal 24 Stunden, sieben Tage die Woche überwacht, auch wenn unser Kraftwerk nicht in Betrieb ist (also Turbine und Kessel). Die Aggregate sind immer in Betrieb und müssen überwacht werden. Bei ihnen geht es um Druckverhältnisse, Temperaturen und verschiedenste andere Parameter, die in unserem Leittechniksystem zusammengefasst sind. Man kann sich dort die Überwachung der Maschinen bildlich z.B. in Form von Diagrammen anschauen.

Es können Lagertemperatur und Öldruck in einem bestimmten Lager in Relation gesetzt werden. Das ist für den Betrieb notwendig und nicht unbedingt CM. Grundsätzlich monitored sind, wie gesagt, unsere Aggregate, Turbinen und Generatoren, und das hauptsächlich mit Schwingungsüberwachung.

Wir haben gerade ein Großprojekt, dessen Ziel es ist noch mehr CM im Unternehmen zu realisieren. Es soll uns dann möglich sein, noch mehr relevante Daten aufzuzeichnen und abzuspeichern, um daraus Auswertungen ableiten zu können.

F: Hat dein Unternehmen dafür eine interne Abteilung oder wurde diese Aufgabe ausgelagert?

H: Es ist geplant das CM auszulagern. Das bestehende System gibt es bei uns schon lange, es wurde jedoch in der Vergangenheit stiefmütterlich behandelt. Es gab keinen Mitarbeiter, der speziell dafür zuständig war, sondern unsere Techniker haben das System mitbetreut. Da sie aber mit Projekten und anderen betrieblichen Arbeiten beschäftigt waren, ist die Auseinandersetzung mit dem System ins Hintertreffen geraten.

Nun soll das System auf den neuesten Stand der Technik gebracht werden und anschließend an externe Experten vergeben werden. In welchem Rahmen ausgelagert werden soll muss allerdings noch entschieden werden, wobei noch zu klären ist, ob online oder zyklisch monitored wird. Entweder man übermittelt periodisch ein Datenpaket an die Experten

die dann Auffälligkeiten dokumentieren und rückmelden, oder die Datenübertragung erfolgt online und die Überwachung durch das externe Unternehmen geschieht 24 Stunden, sieben Tage die Woche.

Unsere Maschinen werden fast täglich gestartet und wieder abgestellt, was eine erhöhte Beanspruchung für das Material bedeutet. Die externe Firma könnte diese Starts überwachen und gegebenenfalls bei Grenzwertüberschreitungen informieren. All diese Möglichkeiten sind, wie gesagt, derzeit noch im Gespräch.

F: Wurde auch die Option behandelt, eine eigene Instandhaltung aufzubauen, die sich ausschließlich mit CM befasst?

H: Das ist leider zu kostspielig. In der Vergangenheit wurde CM mitbetreut, allerdings war der Output nicht zufriedenstellend.

Man müsste mindestens einen Mann extra dafür abstellen. Das CM und die Schwingungsüberwachung ist so komplex, dass man, als nicht ausgebildeter Schwingungstechniker, große Probleme hat, von den erhaltenen Daten auf notwendige Schritte zu schließen. Deshalb möchten wir, dass ein Expertenbüro die Daten analysiert. Das kommt uns voraussichtlich kostengünstiger, als einen eigenen Mann dafür abzustellen, der dann wahrscheinlich nicht die Ergebnisse liefern kann, die uns eine Expertenfirma bieten wird.

F: Sehe ich auch so. Ich glaube, dass z.B. die Beschleunigungssensoren schnell montiert sind, aber dass die anschließende Auswertung sehr kompliziert ist. Das kann ich sagen, da ich während meiner Recherche über NN und selbstlernende Systeme gelesen, sie aber nicht in meiner Arbeit behandelt habe. Mit diesem Wissen kann ich mir vorstellen, dass man bei der Auswertung schnell überfordert ist.

Daran möchte ich gleich meine nächste Frage anschließen: Was hat sich in letzter Zeit bei CM getan, und wie sieht deiner Meinung nach die Zukunft aus? Vielleicht mit dem Hintergrund der I4.0, die gerade in aller Munde ist?

H: Meine Firma hatte eigentlich schon vor dem Jahr 2000 eine Art von CM. In letzter Zeit versucht man jedoch mehr aus den Daten zu lernen. Früher ist CM von einem Mitarbeiter „nebenbei“ betreut worden. Heute schenkt man dem Ganzen viel mehr Aufmerksamkeit. Wie in unserem Fall sucht man ein Expertenteam, das die Daten allumfassend behandeln soll, um für die Zukunft Rückschlüsse zu erlauben. Man will aus diesen Daten lernen.

IT-technisch hat sich natürlich auch viel getan. Ich bin sicherlich kein IT-Techniker, aber ich kann unser altes und das neue System vergleichen. Die Baugruppen sind z.B. viel kleiner geworden. Das bringt allerdings nicht nur Vorteile mit sich. Die heutigen Bauteile haben oft keine analogen Ausgänge mehr, was früher Usus war. Als Beispiel wollen wir aktuell ein Aggregat in die Leittechnik einbinden. Dafür muss aber das Diagnoseelement mit dem Leittechniksystem, das analoge Eingänge hat, verbunden werden. Das Diagnoseelement ist jedoch schon so klein, dass es keine analogen Ausgänge mehr hat. Wir brauchen

also ein für uns speziell adaptiertes Diagnoseelement mit Analogausgängen, damit unser Leittechniksystem mit Signalen versorgt werden kann.

Das Leittechniksystem brauchen wir, damit der Pultfahrer oder der Wartenleiter die Überwachung durchführen kann.

F: Früher oder später wird es sich also als notwendig erweisen, das gesamte Pult den neuen Gegebenheiten anzupassen, sprich auszutauschen. Verstehe ich das richtig?

H: Wir haben das CM-System und wir haben unsere Leittechnik. Die CM-Daten kommen zusätzlich zu den Daten der Anlagenüberwachung (z.B. Lagertemperatur, Lagerdruck, uvm.) ins Leitsystem, damit unsere Kollegen auf einen Blick den Zustand der Anlage sehen und bewerten können. Dieses Leitsystem und das Schwingungsüberwachungs-CM-System ist in allen unseren Kraftwerken erneuert und auf dem aktuellen Stand der Technik. Bei den neuen Geräten gibt es, wie gesagt, nur ein Problem, wenn man gewisse Daten an das Leittechniksystem anbinden will. In dem Fall stößt man immer wieder an Grenzen des Systems, weil auf den Geräten Steckplätze fehlen.

Softwaremäßig gibt es heute natürlich eine sehr viel höhere Benutzerfreundlichkeit. Meiner Meinung nach ist hier die Entwicklung vergleichbar mit der Entwicklung der Anwendbarkeit bei PCs oder Notebooks.

Zusätzlich ist das System viel genauer geworden. Mit der gleichen Sensorik kann man heute viel mehr Details erkennen als früher.

F: Hast du auch Windräder monitored? Während der Recherche habe ich die Behauptung vernommen, dass es möglich ist, die Spannung einer Windkraftanlage zu überwachen und auf den Zustand der Geräte oben am Turm zu schließen. Stimmt das?

H: Ich habe Windkraftanlagen nicht monitored, sondern die Projektplanung gemacht. Betrieben werden die Anlagen von unserer Betriebsführungsmannschaft und nicht von den Kollegen, die sie planen. Es gibt verschiedenste Windkraftanlagen (mit und ohne Getriebe, synchron, asynchron, uvm.), die für den jeweiligen Standort geeignet sein müssen. Zusätzlich waren die Windkraftanlagen wie Blackboxes.

F: Ich habe die genannte Behauptung kritisch betrachtet. Vor allem, weil davon die Rede war, auf den Zustand einzelner Lager schließen zu können. Ich war deswegen skeptisch, da ich glaube, dass man aufgrund von Erfahrungswerten auf den Zustand einer Einheit (also Lager und Welle) schließen kann, allerdings nicht auf einzelne Lager. Wenn sich eine Welle durch eine defekte Lagerung langsamer dreht, kann ich meiner Meinung nach vielleicht aufgrund der Ausgangsspannung auf die Welle schließen, jedoch nicht auf ein bestimmtes Lager.

H: Zu diesem Thema habe ich leider keine Erfahrungswerte.

Aber ich kann dir sagen, dass die Firma, die das CM in den Kraftwerken gemacht hat, auch eine der führenden Firmen beim Monitoring von Windkraftanlagen weltweit ist. Die verwenden auch Schwingungssensoren, um 24 Stunden am Tag, sieben Tage die Woche die Anlagen zu überwachen. Die meisten Betreiber haben einen Vollwartungsvertrag mit den Herstellerfirmen für die Windräder abgeschlossen. Die Herstellerfirmen fungieren dann auch als Wartungsfirmen. Wir machen zwar die Betriebsführung und überwachen die Wartungsarbeiten, letztere werden aber nicht von uns selbst gemacht. Die Hersteller haben viele Windkraftanlagen auf der ganzen Welt, was ihnen die Möglichkeit gibt das komplette Knowhow zentral zu bündeln und daraus zu lernen.

F: Wird der Mensch durch CM ersetzt? So hat z.B. der Dreher vor 50 Jahren am Geräusch seiner Maschine bemerkt, wenn die Zahnräder defekt waren. Heutzutage hat man CNC-Maschinen mit automatischem Werkstück- und Werkzeugwechsel in der Produktion, die den Zustand der Anlagen durch Signalleuchten anzeigen. Man muss im schlimmsten Fall externe Firmen kontaktieren, die kommen und schauen, wo der Fehler liegt.

H: Ja und Nein. Früher gab es in Kraftwerken viel mehr Personal, das im Schichtdienst Kontrollrundgänge gemacht hat. Auch jetzt gibt es Kontrollgänge, wo die Mitarbeiter angehalten sind, mit allen Sinnesorganen Unregelmäßigkeiten zu erkennen. CM hat in diesem Teilbereich allerdings die Mitarbeiteranzahl sicherlich dezimiert. Das hat aber schon längst stattgefunden.

Also haben wir die unterste Grenze des Mitarbeiterstandes bereits längst erreicht. Einer pro Fachgebiet sollte meiner Meinung nach immer anwesend sein. Der Prozess des Einsparens an Arbeitskräften durch CM ist also schon längst geschehen.

F: Wurden die Arbeitskräfte umgelagert oder eingespart?

H: Manche Arbeitskräfte wurden umgeschult, andere eingespart.

F: Es gibt die Vision von virtuellen Maschinen, die aufgrund des CM oder der Überwachung den Mitarbeiter mittels VR-Brille²⁸ zu dem defekten Teil lotsen. Der Mitarbeiter muss dann nur den defekten Teil austauschen. Alles Wissen über die gesamte Anlage ist nur mehr in der digitalen Welt gespeichert. Der Mitarbeiter wird zum ausführenden Organ degradiert.

H: Bei uns sagt das Leitsystem z.B. dass beim REZ-Gebläse die Temperatur am vorderen, motorseitigen Lager zu hoch ist. Anschließend schickt der Pultfahrer einen Mitarbeiter zur Maschine um dieses Lager zu kontrollieren. Das ist der analoge Weg.

²⁸VR-Brillen, in der erwähnten Ausführung, ermöglichen dem Träger zusätzliche Informationen zur Umwelt im Sichtfeld zu erkennen.

Die digitale Variante ist dann deine Version. Ich stelle mir die Frage, ob da nicht sehr viel Knowhow verloren geht, wenn man alles in die digitale Welt auslagert.

F: Beim Ansatz der digitalen Lösung wäre auch vorgesehen, dass der Mitarbeiter aus Aufträgen lernt und so Wissen über die Anlage generiert. Dieser Ansatz wird unter dem Titel „digital learning“ beschrieben.

H: Jeder, der bei uns arbeitet, muss voll mit der Anlage vertraut sein. Ohne diese Kenntnis kann er nicht im Schichtdienst arbeiten. Bei uns gibt es nicht nur den normalen Instandhaltungsbetrieb, sondern es gibt auch Problem- oder sogar Ernstfälle, wo der Kollege genau wissen muss, was er wo zu tun hat. Wenn man mit der VR-Brille zum Einsatzort geführt werden muss, ist alles zu spät. Eine VR-Brille wäre in unserem Betrieb auch ein großes Sicherheitsrisiko, weil es viele Leitungen und scharfe Kanten gibt, die mit einer VR-Brille leicht übersehen werden können.

Ich will gar nicht abstreiten, dass virtuelle Instandhaltung kommen wird. Ob sie für die Kraftwerkstechnik kommen wird, wage ich aber zu bezweifeln.

Die erneuerbare Energie ist heute im Vormarsch. Die Kraftwerkstechnik ist mittlerweile eine Brückentechnologie, bis es uns gelingt, die erneuerbaren Energien zu speichern. Das Problem der erneuerbaren Energien ist, dass Wind und Sonne nur zu bestimmten Zeiten da sind. Das Kraftwerk kann hochgefahren werden, wenn es notwendig ist. Deshalb muss für die volatile Stromerzeugung auch ein Backupsystem gegeben sein. Das Kraftwerk ist also das Backup für die erneuerbare Energie. Irgendwann wird es uns gelingen Energie zu speichern. Es ist also die Frage, ob man Kraftwerke mit der neuen digitalen Technologie ausrüsten soll oder ob man mit der derzeit angewandten analogen Technologie die Zeit bis zur Energieversorgung mittels erneuerbarer Energie überbrückt. Die Arbeiten für den Umstieg wären immens.

Industrietechnisch kann ich mir diese Zukunftsvision sehr gut vorstellen. Es ist ja jetzt immer mehr so, dass Technologie und Wissen ausgelagert werden. Wenn z.B. eine externe Expertenfirma für ein spezielles Aggregat zuständig ist, kennen sich die Spezialisten in unserer Firma im Normalfall nicht aus. Die Fremdfirmen sind aber monatelang in der Revision auch anderer Betriebe tätig. Könnten sie mittels einer VR-Brille durch unser Unternehmen gelotst werden können, wäre das sicher arbeitserleichternd.

Die Idee der VR-Brille ist sicher gut, aber noch nicht aktuell oder anwendbar.

Wir hatten erst kürzlich einen diesbezüglichen Test, wobei das Problem auftauchte, dass die VR-Brille im Freien klaglos funktionierte, im Gebäude jedoch aufgrund von Belichtungsproblemen versagt hat.

F: Was hältst du von der Idee der Diplomarbeit?

H: Wenn ich es richtig verstanden habe, generierst du eine Anleitung, die mir sagt: Wenn dieser oder jener Fall eintritt, kann ich den Artikel anklicken und bekomme Informationen, wie ich damit umgehen soll.

F: Ja. Man kann recherchieren, was bei diesem Verschleiß, bei diesem Sensor oder diesem Effekt in der Vergangenheit bereits gemacht werden musste, und kann auf das eigene Problem schließen. Meine Arbeit ist eine State-of-the-art-Recherche. Ich habe demnach nur Artikel seit 2013 analysiert.

H: Also nicht auf meine Firma oder meinen Standort bezogen, sondern allgemein.

F: Sehr allgemein. Es werden Artikel von überall auf der Welt analysiert. Und anhand der Arbeit kann ich recherchieren, was gemacht wurde, warum es gemacht wurde und was die Resultate waren. Im besten Fall kann man den Autor sogar kontaktieren.

H: Das ist sicher ein sehr guter Ansatz. Man muss nur aufpassen, dass man nicht bequem wird und sich nur auf die Veröffentlichungen verlässt. Es ist meiner Meinung nach wichtig, dass man sich trotzdem mit seiner Maschine beschäftigt. Ganz allgemein wird einem durch die Möglichkeit des Nachschlagens von Wissen viel Lernwille genommen.

F: Einem Produzenten oder einem CM-Betrieb bietet die Tabelle die Möglichkeit sich zu informieren, was es sonst noch für Möglichkeiten, außer der bereits angewandten, auf dem Markt gibt. Gleichzeitig verweist die Arbeit auch auf die entsprechenden Referenz-Artikel.

H: Mir gefällt der Ansatz der Arbeit. Ich will aber darauf hinweisen, dass diese Tabelle vielleicht nicht im Sinne des z.B. Getriebelieferanten ist. Der möchte ja einen Wartungsvertrag für seine Maschine platzieren. Mit dieser Tabelle kann jede Firma auf die Erfahrung von vielen Berichten zugreifen und braucht im besten Fall keinen Wartungsvertrag, weil sie alle Probleme mit den Erfahrungswerten aus den Artikeln beheben kann. In dem Fall fällt der Getriebelieferant um die Einnahmequelle des Wartungsvertrages um.

F: Die Tabelle ist nur ein Anfang. Man müsste meiner Meinung nach viel mehr Artikel einpflegen, um aussagekräftige Informationen zu generieren. Ich hatte zu Beginn der Arbeit nur den wissenschaftlichen Auftrag und stellte mir natürlich die Frage, ob diese Liste auch in der Wirtschaft genutzt werden kann.

H: Ich finde den Ansatz wirklich sehr interessant.

Vielen Dank für die Ausführungen, und besonders für die Betonung der Wichtigkeit des Weiterlernens anstatt sich auf die virtuelle Intelligenz zu verlassen.

Interview 3

Positionen im Unternehmen (alphabetisch):

- Dipl.-Ing. Dr. Norbert Gamsjaeger ist Geschäftsführer von AAC²⁹ (G)
- Dipl.-Ing. Balázs Jakab ist Wissenschaftler für TriboSystem Charakterisierung bei AC²T³⁰ (J)
- Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Michael Scheerer ist Leiter der Polymer Verbundwerkstoffe Gruppe bei AAC (S)

persönliches Interview durch Ing. Andreas Fiel, BSc (F)

Wiener Neustadt, 22.02.2018, 10:00

Transkription bestätigt durch Dipl.-Ing. Dr. Norbert Gamsjaeger am 14.03.2018

Transkription bestätigt durch Dipl.-Ing. Balázs Jakab am 12.03.2018

Transkription bestätigt durch Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Michael Scheerer am 25.03.2018

Anschließend an Begrüßung und Vorstellung wurde, nach Einholung des Einverständnisses, das Gespräch zur anschließenden Transkription aufgezeichnet.

F: In meiner Diplomarbeit geht es um CM im Gesamten und CM von so vielen Maschinenelementen wie möglich, wobei bei diesen nicht darauf eingegangen wird, ob es sich um Lager (einem Verbund von wenigen Bauteilen), eine Gleitfläche (also nur zwei Bauteile) oder ein ganzes Getriebe handelt. Das Resultat soll einen Zusammenhang bilden zwischen dem Maschinenelement, der Verschleißart, dem Verschleißeffekt und dem Sensor, mit dem man den Verschleiß messen kann. Dabei sollen möglichst viele Maschinenelemente abgedeckt werden. Dazu wurden wissenschaftliche Artikel ausgewertet und in eine Tabelle eingepflegt.

Aus dieser Tabelle kann man z.B. folgende Schlussfolgerung ziehen: Ich habe bei meiner Anwendung Gleitverschleiß. Dieser wird bei Wälzlagern im Online-CM meistens mit Beschleunigungssensoren festgestellt. Es ist jedoch auch möglich, eine Bildverarbeitung zur Messung heranzuziehen. Dazu muss das Lager allerdings ausgebaut werden. Oder ich messe mittels Mikrofon, also auch einem Beschleunigungssensor, die akustische Schwingung und nicht die des Bauteils.

Eine der Interviewfragen wird anschließend auch sein, ob sie diese Herangehensweise aus der Praxis als zielführend erachten.

Beginnen will ich bitte mit einer Vorstellung der Experten.

²⁹Aerospace und Advanced Composites GmbH bietet Forschungs-, Entwicklungs- und Engineeringdienstleistungen in den Fachgebieten Werkstoffe, Verfahrenstechnologie und Prüftechnik an. <https://www.aac-research.at/>

³⁰AC²T research GmbH agiert als zentraler Knoten für nationale und internationale Forschungsaktivitäten in der Tribologie. <http://www.ac2t.at/>

J: Ich bin Wissenschaftler bei AC²T. AC²T research GmbH ist Österreichs erstes Kompetenzzentrum für Tribologie. Die Tribologie beschäftigt sich mit Verschleiß, Schmierung und Reibung. Ich habe vor 10 Jahren als Labortechniker begonnen und arbeite jetzt als Forscher in der Abteilung Tribosystem Charakterisierung. Wir befassen uns mit tribologischer Interaktion zwischen beweglichen Teilen, wobei unterschiedliche Parameter und Bedingungen erfasst, gemessen, beurteilt und bewertet werden, um Verschleiß und Verschleißmechanismen zu beschreiben und kennenzulernen.

Das Unternehmen besteht aus zehn Abteilungen. Unter anderem beschäftigen wir uns, in einer speziellen Arbeitsgruppe, mit Schmierung und Schmierstoffanalytik, was sehr wohl in den Bereich CM fällt. Es gibt eine sehr starke Simulationsabteilung, die versucht Vorhersagen zu machen ohne die Umgebungsparameter unbedingt während einer Messung oder einer Real-Time-Messung erfassen zu müssen, sondern Parameter durch die Simulation schon vorhersagen zu können.

Die Charakterisierung mittels analytischer Möglichkeiten, bei denen wir die Proben zerstören müssen, machen wir in der Mikroskop-Abteilung.

S: Ich bin seit der Gründung im Jahr 2010 bei AAC und leite die Abteilung Polymer Composites, d.h. Faserverbundwerkstoffe mit Kunststoffmatrix.

Nach dem Physikstudium habe ich das Doktorat in Maschinenbau-Werkstoffwissenschaften an der RWTH Aachen geschrieben.

Die AAC beschäftigt sich hauptsächlich mit der Prüfung von Materialien und Komponenten. Wir interessieren uns in erster Linie für Weltraum-, aber auch für Luftfahrt- und maschinenbauliche Anwendungen. Das Material wird von uns charakterisiert.

Ich persönlich beschäftige mich schon seit 20 Jahren mit zerstörungsfreier Prüfung und als weiterführendem Thema mit onlinefähiger zerstörungsfreier Prüfung. Das heißt wir erfassen die Gesundheitszustände von Bauteilen im Einsatz, unter dem Deckmantel des „structural health monitoring“.

Da wir das Thema Faserverbundwerkstoffe erweitert betrachten, wird nicht nur der Einsatz online überwacht, sondern auch schon die Produktion des Bauteils. Sensoren monitoren bereits die Herstellung und verbleiben anschließend am Bauteil. Dort überwachen sie ihn weiter, solange dieser verwendet wird. Das geschieht online bis zum „end of life“.

F: Diesen Ansatz kenne ich noch nicht und finde ihn sehr interessant.

S: Der Ansatz ist ein „through-life-monitoring“ von Bauteilen. Das ist nicht überall so trivial. Bei Teilen, die zusammengebaut werden, weiß ich nicht, wie easy der ist. Aber bei Verbundwerkstoffen, die reine Strukturkomponenten sind, und wo es keine funktionalen Bauteile gibt, die zusammengebaut werden, gibt es Konzepte, die sehr gut funktionieren.

G: Ich bin seit 2010 bei AAC im Bereich Geschäftsführung. Meine Fachgebiete sind die Chemie und funktionale Oberflächen. Composites behandle ich zusammen mit Herrn Dr.

Scheerer. Er ist eher der Faserverbundexperte, ich selbst komme aus der Harz-Ecke. Zu CM kann ich noch aus meiner früheren Tätigkeit in der Papierindustrie bei Voith etwas erzählen. Da war es gang und gäbe, dass bestimmte Lager kontinuierlich überwacht wurden, um die Lebensdauer zu bestimmen und festzustellen, ob vorbeugende Instandhaltung notwendig ist. Das ist auch der heutige Stand der Technik und zur Zeit ein Thema in einem Forschungsprojekt, bei dem es um Überwachung von Kalanderwalzenbezügen geht. Bei den Kalandern werden die Walzen durch den Verschleiß vielflächig und müssen gewechselt werden. Auch das ist eine Monitoringschiene, bei der über Schwingungsanalysen der Zustand bestimmt wird. Man versucht z.B., einen bestimmten Schwingungslevel festzulegen und bei dem wird dann auch die Walze ausgebaut.

F: Die Schwingungsmessung kommt also sehr oft vor und ist daher ein Kernthema. Was fällt in ihrem Bereich am häufigsten aus? Was wird am ehesten gemonitored?

J: Es geht hauptsächlich um den Verschleiß. Die Maschinenkomponenten sollen möglichst lang funktionieren. Einige haben eine funktionelle Beschichtung, die möglichst lange erhalten bleiben muss. Diese müssen wir dann beobachten und bestimmen, was die geeignetsten Werkstoffe/Beschichtungen sind.

F: Es handelt sich also um Abrieb?

J: Diesen Abrieb kann man über die Verschleißbeobachtung oder über die Korrelation zum Abriebverhalten feststellen. Ergänzend dazu werden meistens die auftretenden Kräfte im Kontakt, also die Kräfteänderungen in der Reibrichtung, gemessen und/oder variiert. Die Bedingungen werden im Labormaßstab abgebildet und so auf die Verschleißrate/Verschleißintensität, die konstant bleiben oder eine bestimmte Bedingung erfüllen soll, geschlossen.

F: Es wird also hauptsächlich die Kraft gemessen?

J: Ja. Und wenn möglich, wird auch der Verschleiß (von einem Körper oder von beiden Körpern) gemessen. Wenn es möglich ist, online, damit die Korrelation gefunden werden kann.

F: Wie kann ich mir das Verschleißmessen vorstellen? Wird das Volumen gemessen, wird eine Bildanalyse gemacht?

J: Es hängt davon ab, welche Methode, welche Kontaktbedingung, welche Relativbewegung überhaupt stattfindet. Es gibt verschiedene Tribometer, die die Relativbewegung zwischen den beweglichen Körpern abbilden. Es kann auch eine linienförmige, oszillierende Bewegung in nur eine oder in beide Richtungen, eine kreisförmige Gleitbewegung, eine rollende Bewegung oder eine rollend-gleitende Bewegung sein. Dementsprechend sind die-

se Tribometer mit unterschiedlichen Messmethoden ausgestattet, damit der Verschleiß an sich, während der ganzen Bewegung, online erfasst werden kann. Das basiert meistens auf Materialverlust. Wenn eine großflächige Volumenberechnung erforderlich ist, wird das berechnet und/oder mit mikroskopischen oder analytischen Methoden erst nachher durchgeführt.

S: Ich konzentriere mich mehr auf den Bereich der Strukturüberwachung von Faserverbundstoffen.

Auf die Frage, welche Messungen gemacht werden, muss festgehalten werden: Das Haupteinsatzgebiet von Structural Health Monitoring ist Gebäude- und Infrastrukturüberwachung. Es gibt Überwachungen von großen, erdbebengefährdeten Gebäuden, von Staumauern uvm. seit über 20 Jahren. Dafür gibt es mehrere Methoden.

Eine Methode ist die statische Dehnung mittels Dehnmessstreifen klassischer oder faseroptischer Natur. Letztere sind im Moment sehr populär, weil es den Vorteil bringt, dass man verteilt messen kann, d.h. man kann an bis zu 100 Stellen in der einen Glasfaser messen, oder sogar kontinuierlich.

Eine andere Methode sind Beschleunigungssensoren, bei der die Veränderungen der Eigenschwingungsmodi beobachtet werden, ob es zu Frequenzverschiebungen oder Dämpfungsveränderungen kommt uvm.. Bei Lagerschäden von Brücken wird auf diese Art gemessen. Bei großen Bauwerken arbeitet man mit GPS, wobei Lageveränderungen über GPS getrackt werden.

Bei kleineren Bauwerken oder Strukturen, wie z.B. Windflügelrädern, werden Schall und auch Ultraschall eingesetzt. Also eine Methode, die nicht über so große Distanzen messen kann.

Wir arbeiten meistens mit Ultraschall. Dabei wird eine Ultraschallwelle generiert und an einer zweiten Stelle ein Signal detektiert. Kontrolliert wird dann ob sich das Signal, durch eine Änderung der Struktur, verändert.

Das ist die eine Methode, die andere ist passiv. Das heißt, jedes Mal, wenn ein Riss entsteht, bildet sich eine akustische Welle im Ultraschallbereich aus, die quasi durch den Riss initiiert und passiv detektiert wird. Und das ist Schallemission. Das machen wir auch.

So weit ich weiß, sind Online-Überwachungssysteme in der Luft- und Raumfahrt nicht im Einsatz. Das ist immer noch Forschung. Es gibt einen einzigen Ausnahmefall, aber das ist ein Testprojekt. Bei DELTA-Airlines werden, mit vier oder fünf Herstellern von Online-Überwachungssystemen, zwei Flugzeuge ultraschallbasiert oder dehnungsbasiert ausgestattet und testmäßig im Flugbetrieb mitüberwacht. Das passiert nicht zu dem Zweck, die konventionelle, zerstörungsfreie Prüfung jetzt schon zu ersetzen.

Von der Luftfahrtzulassungsbehörde in den USA und auch in Europa ist es zulässig, dass man solche Systeme, als parallel-NDT-Verfahren³¹, zusätzlich zu dem was konventionell gemacht wird, andenkt. Aber sie werden die konventionellen Methoden noch nicht er-

³¹Non Destructive Testing (NDT) ist der Übergreif für zerstörungsfreie Material- und Bauteilprüfung

setzen. Der Weg dorthin ist noch sehr weit, da es noch ein großer Qualifikationsweg bis dorthin ist.

Der Unterschied zu Messungen auf der Erde ist, dass es da nicht um die Gewichtsproblematik geht, wenn man zusätzliche Messelektronik mitnehmen muss. Man kann diese jederzeit tauschen. Die Apparatur muss nicht autonom arbeiten. Das Messen auf der Erde hat also lauter Vorteile. Deshalb gibt es für Infrastrukturen, die erdgebunden sind, viel mehr Anwendungsmöglichkeiten. Wobei dazugesagt werden muss, dass jedes Online-Überwachungssystem mindestens die Lebensdauer der zu überwachenden Struktur haben sollte.

Das ist eigentlich das große Hauptproblem, das stellt sich z.B. bei Brücken. Niemand kann heute sagen, ob die jetzt verfügbaren elektronischen Überwachungssysteme die für die prognostizierte Lebensdauer der Brücke von, sagen wir, 70 Jahren halten können. Dann stellt sich die Frage: Hilft das System oder gibt es Schwierigkeiten damit, weil das System getauscht werden muss? Bei langlebigen Strukturen muss also auch überlegt werden, ob die Lebensdauer des Überwachungssystems zur Lebensdauer des überwachten Objekts passt. Hingegen gibt es in Flugzeugen die Engine-Überwachung schon ganz lange. Das war das erste Online-Überwachungssystem in Flugzeugen, das es überhaupt gegeben hat: indem man Ströme misst, beobachtet ob der Motorstrom zunimmt uvm.. Sind also ganz alte Sachen, die wichtig sind. Aber für Strukturen, also z.B. den Druck in tragenden Bauteilen, ist das trotzdem noch ein relativ neues Thema.

G: In der Papierindustrie sind viele Walzen und viele Lager zu überwachen, die teilweise frischölgeschmiert sind. Das ist eher die einfache Seite.

Die andere Seite ist der Kalandar, der gerade bei uns in einem Projekt behandelt wird. Im Kalandar wird das Papier zwischen einer beheizten Stahlwalze und einer sehr harten kunststoffbeschichteten/faserverbundbeschichteten Walze geprägt und geglättet. Es gibt Kalandar-konzepte von zwei bis zu vierzehn Walzen. Dort sind immer beheizte und elastische Walzen abwechselnd angeordnet, wobei die beheizten glätten. Der glatte Zustand des Papiers soll erhalten bleiben und während der weiteren Walzendurchläufe nicht verschleifen. Die Walzen werden gewechselt, wenn sie zu rau werden, oder weil sie über die Geometrie (Länge, Breite oder Umfang) verschleifen. Online ist ein Messen nicht durchführbar. Manches kann über Papiereigenschaften (Papierglätte oder Papierdicke) indirekt herausgefunden werden. Die Komplexität der Mehrwalzenpakete ist eine Herausforderung. Denn, wenn eine Walze zu verschleifen beginnt, sei es wegen einer Überlastung am Rand oder weil sie vielflächig um den Umfang wird, pflanzt sich das über das ganze Walzenpaket fort. Irgendwann steigert sich das Level der Walzenschwingungen, bis es den Tausch der Walzen erforderlich macht. Die Komplexität für die Kollegen ist, rechtzeitig auf die Schwingungen aufmerksam zu werden und sich mit der Frage: „Welche Walze tausche ich zuerst?“ auseinanderzusetzen.

Dieses Thema ist nicht wirklich wissenschaftlich systematisch zu beantworten, sondern hängt stark von dem empirischen Erfahrungswert der Walzenbedienung ab. Zum Beispiel:

Der Verschleißzustand der obersten Walze ist am wichtigsten, weil das Papier dort noch sehr rau ist und dadurch die Walze aufraut/verschleißt. Die unterste Walze hat zwar das glatte Papier, trägt jedoch zusätzlich noch das Gewicht des Walzensystems und ist deshalb einer höheren Belastung ausgesetzt.

Die Überwachung findet meistens mit einer nicht stationären Schall- oder Schwingungsüberwachung statt, wobei oft nur die Lagerschwingung über Schwingungssensoren überwacht wird. Im Gegensatz dazu bedienen sich die Kollegen im Süden Österreichs einer Schallüberwachung. Dabei beginnt der Kalandar irgendwann zu „singen“ bzw. wird mit einer „nervigen“ Frequenz hörbar. Altgediente Papierhersteller werden bereits von diesen Tönen gewarnt. Andere verlassen sich auf die Messtechnik.

In diesem unheimlich komplexen System, das mittels empirischer Grenzwerte gar nicht sauber auseinandergepflückt werden kann, kann man nur hoffen, die richtigen Entscheidungen zur richtigen Zeit zu treffen. Im Instandhaltungsfall werden die Walzen ausgebaut, geschliffen und danach wieder geometrisch sauber eingebaut.

F: Heißt das jetzt, im Umkehrschluss, dass die von mir konzipierte Tabelle in der Papierindustrie nicht verwendet werden kann, weil jahrelange Erfahrungswerte und Gepflogenheiten ausschlaggebend sind?

Ich biete mit der Tabelle an dass, wenn die Überwachung eines z.B. Lagers mittels Schwingungssensoren in der Vergangenheit nicht zu dem gewünschten Ergebnis geführt hat, man die Möglichkeit hat, sich Alternativen aufzeigen zu lassen. Zum Beispiel die Überwachung mittels Mikrophon (zur Aufnahme der Geräusche), oder auch über optische Messungen oder Ultraschallüberwachung zu versuchen.

G: Ein grundlegender Überblick über alle Möglichkeiten ist immer gut. Meine Erfahrungen aus meinem früheren Aufgabengebiet besagen, dass die bereits gemachten Erfahrungen die Entscheidungen beeinflussen, wobei man sich sukzessive herantastet, wenn man das Thema Lager beiseite lässt und sich auf das Barring-Thema beschränkt, welches eines der komplexesten Schwingungsthemen ist. Auch wenn man nur eine Erregerfrequenz hat, die vom Antrieb, von den Zähnen des Antriebsgetriebes oder von vielen anderen Erregern kommen kann, überträgt sich diese auf viele andere Komponenten. Es bleibt einem also wahrscheinlich nichts anderes übrig, als sich sukzessive heranzutasten. Eine Übersicht über die verschiedenen Überwachungsmöglichkeiten macht da durchaus Sinn. Trotzdem kann man nicht von fixen Größen ausgehen, sondern muss sich, wie gesagt, an jeden einzelnen Fall herantasten.

J: Wichtig für uns sind oft die empirischen Daten. Es gibt Fachleute, die Jahrzehnte an den Maschinen arbeiten und sie dementsprechend gut kennen. Sie kennen sozusagen die Seele der Maschine. Aus deren Erfahrungen heraus erfolgen die jeweils notwendigen Schritte bei individuellen Grenzwerten.

F: Das Knowhow des Maschinenbetreuers ist also zum Knowhow des Instandhaltungstechnikers geworden?

Früher bemerkte Bedienpersonal an der Maschine über die Akustik etwaige Abnützungserscheinungen. Auch in der Stahlindustrie hat man weniger Bediener, es wird immer weiter automatisiert, aber der Instandhaltungstechniker muss sich umso besser auskennen, was wo passiert.

S: Die Tabelle ist eine Korrelation zwischen physikalischer Sensormesstechnik und Anwendung auf gewisse Fälle. Das, was danach kommt, ist mindestens genauso wichtig. Man muss wissen: Was macht man mit den Daten? Welche Daten verknüpft man und wie baut man sie zu einem Maintainingsystem zusammen? Das ist der große Wurf. Es gibt super Sensoren, die super Daten liefern, aber es gibt sehr, sehr viele Forschungsarbeiten zum Thema data mining, mashine learning, NN uvm.. Für mich der wichtigste Punkt ist allerdings: Wie können die erhaltenen Daten zu einer Aussage verknüpft werden?

Es gibt unter anderem auch Arbeiten darüber, wie man das Knowhow des Bedienungspersonals bzw. Maintenancepersonals in ein automatisches System einbindet. Wie integriere ich empirisches Wissen in automatisierte Datenverarbeitungssysteme? Mit fuzzy-logic oder anderen Technologien versucht man, soviel Wissen und Erfahrung, gemeinsam mit neuen Daten, zu generieren, um Aussagen treffen zu können. Das ist das Schwierige, weil ich glaube, dass da noch viel zu tun ist. Dazu müsste man zuerst die Maschine machen lassen, auch kaputt werden lassen, um im Endeffekt Aussagen treffen zu können. Diese Arbeit ist sehr zeitintensiv und im täglichen Betrieb praktisch nicht umsetzbar, da man die Produktion außer Gefecht setzt.

F: Dazu müsste nicht nur die Zeit im Betrieb zur Verfügung stehen, sondern auch das Geld, das benötigt wird, um eine Maschine im Betrieb bewusst ausfallen zu lassen.

Die aktuelle Entwicklung im CM, vor allem in der Bauindustrie, ist also erst im Kommen. Da gibt es also kaum einen Rückblick. Oder habe ich da was falsch verstanden?

S: Das CM in der Infrastrukturüberwachung ist total etabliert. Es wird trotzdem überwacht, auch wenn nicht klar ist, ob die Lebensdauer der Sensoren die Lebensdauer des Objektes erreichen. Es gibt glaube ich, keine Brücke in Japan, die neu gebaut wird, die nicht mit Brückenüberwachungssystemen aus hunderten Sensoren (GPS-, Beschleunigungs- und faseroptische oder konventionelle Dehnungssensoren) ausgestattet ist. Es werden auch die Dämpfer der Brücken überwacht.

Auch die Hochhäuser werden mit unzähligen Sensoren überwacht, einfach um ein Feedback von den Systemen zu erhalten.

Es werden auch oft retrofit-Systeme³² gemacht. Die BERNARD-Ingenieure machen das und der Herr Wenzel von MCE. Diese Leute sind weltweit sehr gut und machen auch das

³²Retrofit-Systeme beschreiben nachgerüstete oder umgerüstete Anlagen und Betriebsmittel.

Instrumentieren von Türmen uvm.. Es wird auch gemacht, wenn die Bauwerke alt sind und die Lebensdauer verlängert werden soll. Es gibt zwar noch Probleme, wie man das so effektiv macht, dass nichts ersetzt werden muss, aber es wird trotzdem verwendet.

Nur im Luft- und Raumfahrtbereich gibt es diese Systeme gar nicht. Natürlich gibt es Überwachungssysteme für alle möglichen Mechanismen, aber nicht für Strukturen. Ein Mechanismus muss als Mechanismus qualifiziert werden. Nach dem Motto: „Da bewegt sich was. Der will was bewirken.“ Eine Struktur hat nur die Aufgabe alles zusammenzuhalten. In dem Moment, wo man auf eine Struktur einen Sensor appliziert, wird aus der Struktur ein Ding, das ich ganz anders qualifizieren muss. Der Aufwand, irgendwas Neues reinzubringen, ist, speziell in der Luftfahrt, so hoch, weil alles was an normalem Material bereits getestet und qualifiziert worden ist, nochmals getestet werden muss. Da geht es um Geldbeträge in Höhe von hunderten Millionen. Auch ist das Vertrauen in neue Online-Systeme nicht so groß, weil sie unbekannt sind.

Eine zerstörungsfreie Prüfung ist mittlerweile etabliert. Aber vor dem ersten Flugzeug, wo es nur die fatigue-crack-Schäden³³ gegeben hat, war es total üblich, dass auf Sicherheit designed worden ist, weil jede zerstörungsfreie Überprüfung viel Zeit und Geld kostet und natürlich Verzögerung im Betrieb bedeutet. Das ist das Mittel zum Zweck, aber im Gegensatz dazu hat es dort durch die periodische Prüfung dazu geführt, dass man mit neuen Konzepten so leicht designen hat können, dass sie gemeinsam mit der Sicherheit günstiger geworden sind. Es dauert also seine Zeit.

F: Ein periodisches Hin- und Her-Spiel.

Die letzte Frage im Hauptteil: Es geht um die Verarbeitung von Signalen. In meiner Vorfeldrecherche habe ich festgestellt, dass die Einbindung dieses Themas die Grenzen meiner Arbeit sprengen würde. Deshalb habe ich diesen Teil ausgespart. Ich kann auch jetzt nur einen Anstoß geben und sicher nicht alles abdecken. Die Liste der Maschinenelemente ist viel länger als die, die ich in der Arbeit wirklich verwende. Manche Elemente fehlen, weil ich keine wissenschaftlichen Arbeiten dazu gelesen habe. Andere Elemente werden in der Arbeit auch nur mit ein oder zwei Artikeln erwähnt, was die Aussagekraft natürlich mindert.

Wenn ich die Verarbeitung der Signale in meine Arbeit einbezogen hätte, wäre ich schon mit elastischen Bauteilen oder Wälzlagern an den Rand meiner Kapazität gestoßen.

Es war gut, dass sie angesprochen haben, ob man einen oder mehrere, vielleicht sogar verschiedene Sensorarten auf Bauteilen installiert, und eine Analyse der Signale versucht. Mit den entsprechenden Logiken dahinter ergäben sich noch viele weitere Spalten, die man miteinander vergleichen müsste. Ich musste die Signalverarbeitung also weglassen, obwohl ich wusste, dass sie unglaublich wertvoll für die Arbeit wäre. Ob ich jetzt nur die Kraft aufnehme, oder auch die Beschleunigung dazu, und die Signale dann verbinde, ist um soviel mehr wert, je mehr Sensoren zusammenspielen. Allein von zwei Kennwerten

³³fatigue-crack-Schäden sind Ermüdungsrisse

kann man ja schon unglaublich viele Rückschlüsse ziehen.

Wie verarbeiten sie hier die Signale?

Wir sprachen von einem Trigonometer, der das mehr oder minder automatisch macht. Man nimmt die Kraft, die Beschleunigung im Zyklus XY und bekommt Z-Daten. Oder wird bei ihnen noch mit zusätzlichen Ergänzungen und Zusatzsensoren gearbeitet? Was ist die Logik dahinter? Gibt es da Informationen?

J: Wir versuchen, realitätsnahe Bedingungen nachzustellen, für die Haupteffekte eines Verschleißproblems Lösungen anzubieten oder einen Modell-Prüfstand zu bauen. Dazu werden die Geräte mit den erforderlichen Sensoren ausgestattet. Wenn es nur um den Makroverschleiß geht, d.h. wieviel Verschleiß habe ich nach einer Woche, ist das ziemlich einfach: Der Versuch läuft eine Woche und danach wird der Materialverlust gemessen.

Wenn es sich um eine zyklische Belastung handelt, ist meist schon die Frage, wie verändern sich die Verschleißintensität, die Reib- und die Kraftverhältnisse im Kontakt in den jeweiligen Zyklen? Da kommen schon die Signalverarbeitungen so nahe, dass man Zyklen miteinander vergleichen kann (z.B. den Anfang des Lebenszyklus mit dem Ende).

Es gibt auch Abschaltkriterien. Ein gewisser Reibkraft-Level darf nicht überschritten werden, sonst wird der Versuch abgebrochen. Auch bei der Verschleißintensität gibt es Grenzen, die in einer bestimmten Zeit nicht überstiegen werden dürfen. Oder es geht um Schwankungen innerhalb eines Zyklus in Abhängigkeit von verschiedenen Bedingungen. Diese Schwankungsbreite kann auch ein Kriterium für die Abschaltung sein. Wenn Material- oder Werkstoffvergleiche gemacht werden, werden die Signale im Nachhinein möglichst genau, also im Mikrobereich, verglichen. Es macht einen großen Unterschied, ob man im Makro-, Mikro- oder sogar im Nanobereich analysiert und die Signale zeitgleich oder erst im Nachhinein verarbeitet werden.

S: Typischerweise versuchen wir bei Strukturschäden ein bildgebendes Verfahren zu verwenden. Das heißt, wenn was defekt ist, interessiert: Wo ist was passiert und wie stark ist es? Mittels z.B. „retracing-“ oder bildforming-Algorithmen versucht man rückzuschließen, wo der Schaden entstanden ist, und aus Falschfarben-Bilddarstellung oder Vergleich von einer guten zu einer schlechten Struktur die Größe des Schadens darzustellen.

Man verwendet also einen Bauteil, simuliert einen Schaden und analysiert über ein darüber gelegtes Bild, mittels einer Rot-Grün-Falschfarbendarstellung, die Stelle, wo der Schaden passiert ist.

F: Laut meiner Literaturrecherche haben sie auch sehr viel mit FE-Programmen zu tun.

S: Ja. Da geht es eher um Prozess-Überwachung. In einem aktuellen Projekt überwachen wir einen trockenen Bauteil (trockene Kohlefaser), der voll mit Harz getränkt wird. Dabei wird mittels Sensoren die Fließfront überwacht. Es wird festgestellt, wann die Fließfront an einem bestimmten Sensor erreicht ist. In weiterer Folge soll das aber dazu dienen, in

dem Moment, wo der Sensor das Signal bekommt, ein Steuersignal zu setzen. Dieses gesetzte Steuersignal dient dazu, eine vorher durchgeführte Simulation zu beurteilen und im Falle einer Abweichung korrektiv einzugreifen. Das sind vorgeschaltete Parameterstudien in der Simulation, die sagen, unter diesen Randbedingungen ergibt sich bei jenem Herstellungsprozess folgendes Verhalten. Man kann also ein Modellupdating auf Basis der Sensordaten machen und dann den Prozess weiter steuern. Danach muss man das Harz aushärten. Normalerweise gibt es dann noch eine Methode, mit der man den Aushärtegrad des Harzes mit Sensoren bestimmen kann. Das soll dazu dienen, dass man, wenn der Aushärtegrad erreicht ist, den Temperierzyklus, der sehr energieaufwändig ist, stoppen kann. Die Idee ist, man nimmt Sensordaten, vergleicht sie mit dem was man an Modellvorhersagen hat und bei Abweichungen muss geklärt werden, was korrektiv am Modell oder an der Steuerung geändert werden muss. Das „hero“ Ziel ist eine interaktive Sensorsimulation.

Mit der vorhandenen Hardware zum Erfassen der Signale sollen Steuersignale generiert werden, die zur Verarbeitung weiter gesendet werden.

Wir machen sowohl Simulationen, als auch die Signalverarbeitung, allerdings ist das alles noch eher im Forschungsumfeld. Wenn ein Hersteller in der automatisierten Fertigungsstraße so etwas macht, kann man wohl die Technologie übergeben, die Logik muss aber vor Ort passieren. Es ist jedenfalls zur Zeit ein Riesenthema.

G: In der Papierindustrie gibt es zwei Ebenen. Die Papierproduktion wird unendlich gemonitort. Es werden die Papierdicke, verschiedene Positionen, Temperaturen, Stoffkonsistenz uvm., also alles was technologisch ist, permanent aufgezeichnet und das ist auch ein Entscheidungskriterium für irgendwelche Adaptionen.

Die zweite Ebene sind das CM und die Bauteilüberwachung in der Instandhaltungsebene. Soweit meine Information stimmt, geschieht das anlassbezogen, keine 24-h-Überwachung, sondern die Aufstellung erfolgt wenn sie gebraucht wird, und es wird isoliert ausgewertet. Es gibt keinen 24-h-Permanent-Automatismus, das wäre zu komplex in der Interpretation. Dass eine Einrichtung mitteilt, wann ein Kalender zu tauschen ist, soweit sind wir noch nicht. Es wird hier noch auf die persönliche Erfahrung zurückgegriffen.

Vielleicht gibt es schon eine Anlage, wo die Überwachung bereits potenziell drinnen ist, aber meines Wissens sind es noch immer die Papiermacher oder die Instandhaltungscrow, die für das reibungslose Funktionieren der Anlage verantwortlich sind. Die Ersteren kümmern sich um das Produkt, die Zweiteren um die Anlage selbst.

J: Auch ich habe schon erlebt dass, wenn die Probleme intern nicht gelöst werden konnten, externe Experten zugeschaltet wurden. Oder man appliziert, wenn es schon irgendwo brennt, eine spezielle Messtechnik, um das Problem so zu lösen.

F: Wird der Mensch durch all diese Überwachung ersetzt? Die Standard-I4.0-CM-Frage ist: Wird der Mensch ersetzt oder wird er vom Maschinenbetreuer zum Instandhalter?

J: Dass Daten und Parameter erfasst werden können, ist sehr gut und wichtig. Man braucht Erfahrung, um mit den Daten umzugehen und sie interpretieren zu können. Es gibt auch automatisierte Auswertungsmethoden, die bei verschiedenen Themen helfen und automatisiert werden können. Ich denke, die Überwachung sollte eine Ergänzung zu herkömmlichen Methoden sein. Die Messtechnik sollte die Menschen nicht eins-zu-eins ersetzen. Wenn solche Überwachungssysteme installiert werden, muss ja überlegt werden, was soll gemessen werden und welche Ergebnisse werden erwartet. Da ist menschliche Erfahrung noch immer wichtig und notwendig.

S: Wenn man jetzt vom Maschinenbau absieht, und nur von der Inspektion von Flugzeugen spricht, passiert die Überwachung zu 85 Prozent visuell. Nach wie vor. Gefühlsmäßig wird sich daran auch nichts ändern, auch wenn man Hilfsmittel wie konventionelle NDT hat. Auch die wird von geschultem Personal und nicht automatisiert durchgeführt. Es wird also meiner Meinung nach in dem Bereich noch sehr lange dauern, bis der Mensch ersetzt wird. Die Jobs werden sich ändern. Ich spreche nur von Luft- und Raumfahrt was Inspektion und Überwachung von Teilen angeht, weil das eher ein Spezialgebiet ist. Ich glaube, dass sich da nicht allzu viel ändert. Denn wenn man z.B. einen Ultraschallprüfer braucht, ist das nicht der Billigarbeiter, den man ersetzen würde, sondern der ist hochqualifiziert. Ob sich das Tool ändert, mit dem man arbeitet, sei es im Vor- oder Nachfeld, macht für diese Facharbeiter keinen Unterschied. Ich kann mir eher vorstellen, dass ein Arbeiter durch Automatisierung ersetzt werden kann.

F: Nicht im Monitoring selbst?

S: Ich glaube nicht. Das, was sich potenziell schon ändern wird, wenn man von der Herstellung von Bauteilen spricht, ist die Produktion, die zur Zeit extrem oft manuell gemacht wird. Einfach um die Qualität zu garantieren. Das wird handgelegt. Schon maschinenassistiert, aber nur assistiert. Natürlich ist Automatisierung ein Riesenthema. Das heißt, in der Produktion selbst wird es einen deutlichen Jobabbau geben, wenn die Qualität im automatisierten Verfahren erreicht werden kann.

G: In der Papierindustrie steht dort auf der einen Seite eine Investition, in Form einer Papiermaschine, um ein paar 100 Millionen Euro. Auf der anderen Seite sind zum Betrieb der Papiermaschine 25 – 30 Leute notwendig. D.h. eine riesige, komplexe Anlage wird von ein paar wenigen Experten bedient. Die Instandhaltungsgruppen sind also oft größer als das Operating-Personal. Die Spezialisierung ist dort jetzt schon sehr hoch. Es werden nicht noch mehr Auswertungen oder Algorithmen zum Tragen kommen. Es ist also sehr wichtig, wie man das Ganze zu einem sinnvollen Konzept zusammenführen kann.

Um bei dem Barring-Beispiel zu bleiben: Kommt das Barring, weil die Walze kaputt ist, das Papier wellig vom Stoffauflauf herkommt, irgendeiner der X-Antriebe defekt ist, die Befeuchtungsanlage (Dampfblaskasten) nicht stimmt, uvm.? Das wird nicht möglich sein,

das auf Knopfdruck in einem Expertensystem elektronisch auszugeben. Die Interpretation, die Zusammenführung, steht und fällt mit der persönlichen Erfahrung. Die Experten werden also stärker denn je gefragt sein. Die Spezialisierung wird steigen, aber sie wird Leute nicht wirklich arbeitslos machen.

J: Das kann man mit dem selbstfahrenden Auto vergleichen. Sobald man für alle möglichen Verkehrssituationen einen Ablaufprozess definieren kann, wird es funktionieren. Aber in der Industrie ist das genauso. Für jeden einzelnen Fall, der passieren kann muss man einen Ablauf definieren, der automatisiert erledigt werden soll. Wenn wir so weit sind, kann man den Menschen umgehen, wenn klar ist, was gemessen wurde, geschehen ist und daher passieren soll. So weit sind wir aber meiner Meinung nach noch nicht.

F: Es gibt ein Gedankenmodell, Mitarbeiter einzustellen, die keine Ahnung von der Anlage haben, und auch nicht vorbereitet sind, was in der Anlage zu tun sein wird. Diese Mitarbeiter bekommen halbtransparente VR-Brillen, die sie im Bedarfsfall zu dem Schaden hinführen und ihnen auch vorgeben, was sie auszutauschen haben. Die Ersatzteillagerhaltung ist natürlich auch schon voll automatisiert. Der Mitarbeiter bekommt das Teil, das er mittels der Führung der Brille austauschen soll. Dafür muss das System sehr viel wissen, viel können. Das Problem ist dann: Ein Fehler, der nicht vorhergesehen wurde, kann nicht behoben werden. Der Mitarbeiter lernt zwar bei jeder Reparatur dazu, aber ein unvorhersehbarer Fall kann trotzdem nicht behandelt werden.

Dieses Modell ist interessant, wird aber meiner Meinung nach in der nächsten Zeit nicht auf den Markt kommen.

Bei meinem letzten Interview habe ich gehört, dass das Modell schon erprobt wurde, aber schon bei den Lichtverhältnissen gab es Probleme. Beim Gang von einer Werkshalle zur nächsten konnte der Lichtsensor nicht mithalten.

G: In St. Pölten gibt es ein Ingenieur-Büro, das sich mit Virtualisierung von Gebäudeplänen beschäftigt. Der Vortrag bei der Innovationspreisverleihung hat mich schon beeindruckt. Alles, was an Elektro-, Lüftungs-, Sanitär- und Wasserinstallationen vorhanden war, war eingespeichert. Man setzt sich die Brille auf und findet alles. Das kann ich mir schon vorstellen. In dem Fall sehe ich mit der Brille, was im Umfeld des Schadens sonst noch für Leitungen vorhanden sind.

Bei einem neuen Gebäude, bei dem die Installationen dokumentiert sind, ist das leicht implementierbar. Jede Reparatur, Änderung und Neuinstallation muss aber auch dokumentiert werden, sonst fehlt sie im System.

F: Zum Abschluss: Gibt es noch Fragen zu meiner Arbeit, zu meiner Tabelle? Gibt es Fragen zu dem Gespräch?

J: Wir konnten leider innerhalb dieses Interviews nur einen Bruchteil von dem behandeln, was in unserem sehr vielfältigen Umfeld passiert. Ich hoffe, wir haben alles so richtig und zweckmäßig zusammengefasst und konnten damit die richtige Unterstützung geben. Wenn es eine Zusammenfassung gibt, die wir noch korrigierend oder ergänzend bearbeiten können, wäre das vielleicht sehr hilfreich. Wir sind ja auf dem besten Weg zu automatisierten Abläufen. Die Messmethoden und die Monitoring-Systeme unterstützen sehr gut alle Entwicklungen, Beobachtungen, Sicherheit uvm. und es wird immer vielfältiger.

F: Die Fragen sind sehr allgemein gestellt. Damit eröffnet sich aber die Möglichkeit, viele verschiedene Fachbereiche in einem Interview zu behandeln. Ich bereite mich auf jedes Gespräch einzeln vor. Die Hauptfragen bleiben aber gleich, um einen Leitfaden zu haben.

S: Aber die Idee dahinter ist, ein industrielles Feedback des jetzigen Standes, wie die Prozessüberwachung für gewisse Anwendungsfälle mit welcher Sensorik unterstützt wird, einzuholen?

F: Es ist absolut eine state-of-the-art-Recherche. Ich behandle nur wissenschaftliche Artikel ab 2013.

Man kann es von der Anwenderseite betrachten. Man geht von einer Maschine aus, für die keine Garantie besteht, die instandgehalten werden soll. Oder der Zugang: Ein Produzent hat ein Überwachungssystem, das er mit der Maschine verkauft. Nun werden neue Anstöße, neue Ideen gesucht, die vielleicht praktischer im Monitoringsystem umgesetzt werden können.

S: Es gibt ein eigenes EU-Programm dazu, das im „Horizon2020“ läuft unter „factories of the future“. Ich habe schon zwei Ausschreibungen gehabt, wobei es um maintenance of monitoring of production machinery geht. Dazu gibt es derzeit laufend 5 - 6 große EU-Projekte. Das ist nämlich genau das Thema. Es ist nicht leicht herauszufinden, welche Projekte zu diesem Thema gerade laufen. Normalerweise wird auf den Homepages veröffentlicht, was Thema ist. Ich werde mich erkundigen. Wie lange habe ich Zeit?

F: Ich habe am 12.3. ein Gespräch mit meinem Betreuer und werde also wahrscheinlich ein Monat später abgeben.

S: Ich werde mich bemühen, ihnen ein paar Kürzel zu schicken. Da gibt es dann einen groben Überblick. Da geht es um die Verwendung von unkonventionellen Sensoren für Produktionsmaschinen, Überwachung von Fräsmaschinen (wodurch können die Wartungsintervalle verkürzt werden). Das ist ja ein klassisches europäisches SME-Problem. Die produzierende Industrie ist sehr groß. Wie bekommt man sie fit für die Zukunft? Intelligentes Betreiben der Maschine und Überwachung. Maintenancestrategien uvm..

Da wird gezeigt dass, neben Veröffentlichungen in Dual-Konsortien, die sehr industriege-

trieben sind, auch daran gedacht wird „wo es hingehet“. Da sind auch große Forschungsinstitute dabei, aber ohne Industrie würden die nie kommen, es ist also ein sehr guter Konnex. Im Endeffekt sollte da also wirklich etwas herauskommen und nicht nur Forschung der Forschung wegen betrieben werden.

G: Ich hoffe, du könntest mit meinen Ausführungen etwas anfangen. Brauchst du vielleicht noch Artikel über Kalander?

F: Nein, Kalander im Speziellen kommen in meiner Arbeit nicht vor. Ich führe die Gespräche, um die Tabelle im Gesamten zu validieren. Da waren teilweise Walzen dabei, Lager und Reibflächen. Gebäude kommen weniger vor, aber composite habe ich extra nachgepflegt, weil ich wusste, dass ich hierher komme. Zum Validieren der Tabelle ist auf jeden Fall etwas dabei.

Für den allgemeinen Teil kann ich aus diesem Gespräch sehr viel mitnehmen. Für das Kapitel „In der Zukunft“ oder „Ausblick“ habe ich gutes Material. Es wird nicht jedes Maschinenelement einzeln validiert, wenn es in einem Interview vorgekommen ist, sondern die Idee der Tabelle im Gesamten.

Es war sehr gut, dass wir so viele Themen abdecken konnten in einem Interview. Danke für die vielen Inputs. Wenn das Interview transkribiert und korrekturgelesen ist, schicke ich die Rohentwürfe aus.

J: Die Schmierstoffüberwachung mittels Ölsensoren ist noch ein Riesenthema, das gar nicht beleuchtet wurde. Da wäre der Herr Schneidhofer zuständig.

Zur Komplettierung: Wir nehmen auch an Sensorentwicklungen teil, damit Moleküle, Substanzen oder Partikel im Schmierstoff detektiert werden können, ob sie einen Auslöser für ein Problem darstellen.

F: Sind das magnetische Sensoren oder Bildauswertungssysteme?

J: Das ist unterschiedlich. Es gibt magnetische, es gibt das Ultraschall-Prinzip, es gibt Indikatoren, die drinnen sind, verfärben oder ein elektrisches Signal ausschicken, wenn ein Partikel dort mitschwimmt. Der Schmierstoff nimmt an einem Kreislauf teil, schwimmt praktisch bei einem Kontakt vorbei und nimmt die Informationen, was im physischen Kontakt gerade passiert, mit. Man kann die Veränderung des Schmierstoffes auslesen. Das Schmiermittel kann also als Hilfsmessstoff verwendet werden.

F: In ein oder zwei Artikeln geht es um Getriebe mit Standschmierung, wo das Öl nur alle paar Monate gewechselt wird. Das Getriebe wird angebohrt und das Öl wird - ergänzend zur Schwingungsmessung - gemessen. Aus dem Öl kann ich auch einige Daten herauslesen.

J: Auch der Ölwechsel beim Auto ist wichtig. Aus dem Öl kann man ersehen, wie und wo das Auto gefahren wurde und wie der Zustand des Motors ist.

Vielen Dank für die zahlreichen neuen Einsichten und wissenschaftlichen Anstöße, die mir unser Gespräch gegeben hat.

Tabellarische Darstellung der gesammelten Daten

In der Folge ist die Tabelle angeführt, die zum Einpflegen der Artikel verwendet wurde.

Tabelle 2: Tabelle der Quellen

Quellen- Nummer	Quelle
1	IEEE
2	phmsociety
3	MDPI
4	Scholar
5	ScienceDirect
6	Scientific
7	SPM
8	SpringerLink

Tabelle 4: Vom Sensor zum Maschinenelement

Sensor	Effekt	Verschleißart	Maschinenelement	Quelle
Beschleunigungssensor	Abrieb	Gleitverschleiß	Getriebe	Hu et al. (2016)
				Peng and Kessissoglou (2003)
		Wälzverschleiß	Getriebe	Hu et al. (2016)
				Peng and Kessissoglou (2003)
	Bruch	Gleitverschleiß	Wälzlager	Ali et al. (2015)
				Dalvand et al. (2016)
		Wälzverschleiß	Wälzlager	Ali et al. (2015)
				Dalvand et al. (2016)
		Werkzeugverschleiß	Schneide	Ratava et al. (2017)
	Geometrieänderungen	Gleitverschleiß	Kugelgewindetriebe	Vogl et al. (2015)
		Erosion	Kugelgewindetriebe	Vogl et al. (2015)
		Stoßverschleiß	Kugelgewindetriebe	Vogl et al. (2015)
			Rad/ Schiene	Kaewunruen (2014)
		Wälzverschleiß	Kugelgewindetriebe	Vogl et al. (2015)
	Grübchen/Bruch	Gleitverschleiß	Wälzlager	Verbij and BV (2018)
		Wälzverschleiß	Wälzlager	Caesarendra et al. (2016)
				Verbij and BV (2018)

...

Tabelle 4: Vom Sensor zum Maschinenelement (Fortsetzung)

Sensor	Effekt	Verschleißart	Maschinenelement	Quelle
Beschleunigungssensor	Vibrationen	Gleitverschleiß	Getriebe	Ahmaida et al. (2014)
				Hu et al. (2016)
				Peng and Kessissoglou (2003)
			Gleitflächen	Baccar and Söffker (2015)
			Wälzlager	Ali et al. (2015)
				Dalvand et al. (2016)
				Prieto et al. (2013)
				Verbij and BV (2018)
		Stoßverschleiß	Rad/ Schiene	Kaewunruen (2014)
			Wälzlager	Chacon et al. (2015)
		Wälzverschleiß	Getriebe	Ahmaida et al. (2014)
				Hu et al. (2016)
				Peng and Kessissoglou (2003)
			Wälzlager	Ali et al. (2015)
				Chacon et al. (2015)
				Dalvand et al. (2016)
				Prieto et al. (2013)
				Verbij and BV (2018)

...

Tabelle 4: Vom Sensor zum Maschinenelement (*Fortsetzung*)

Sensor	Effekt	Verschleißart	Maschinenelement	Quelle
Beschleunigungssensor	Vibrationen	Werkzeugverschleiß	Schneide	Ahmad et al. (2015)
				Ratava et al. (2017)
				Zhang et al. (2016)
Bildauswertung	Abrieb	Gleitverschleiß	Gelenke	Rosenberg (2003)
			Getriebe	Feng et al. (2015)
				Peng and Kessissoglou (2003)
				Singh et al. (2018)
			Gleitflächen	Li et al. (2018)
			Kugelgewindetriebe	Saknararak et al. (2015)
			Pressverbände	Zhang et al. (2017)
			Rad/ Schiene	Yusof and Ripin (2016)
			Schrauben	Liu et al. (2016)
			Schrauben	Zhang et al. (2018)
			Stahlseil	Chen et al. (2016)
				Cruzado et al. (2012)
			Verbundwerkstoffe	Correa et al. (2015)
				Correa et al. (2017)

...

Tabelle 4: Vom Sensor zum Maschinenelement (Fortsetzung)

Sensor	Effekt	Verschleißart	Maschinenelement	Quelle
Bildauswertung	Abrieb	Gleitverschleiß	Verbundwerkstoffe	Friedrich et al. (2017)
				Wei et al. (2018)
			Walzen	Jakab et al. (2018)
		Erosion	Walzen	Jakab et al. (2018)
		Stoßverschleiß	Gelenke	Rosenberg (2003)
			Kugelgewindetriebe	Saknararak et al. (2015)
		Wälzverschleiß	Gelenke	Rosenberg (2003)
			Getriebe	Feng et al. (2015)
				Peng and Kessissoglou (2003)
				Singh et al. (2018)
			Kugelgewindetriebe	Saknararak et al. (2015)
			Rad/ Schiene	Yusof and Ripin (2016)
Bruch		Gleitverschleiß	Elastische Teile	Song et al. (2016)
			Gelenke	Rosenberg (2003)
			Getriebe	Singh et al. (2018)
			Kupplungsflächen/ Bremsen	Zhou et al. (2018)
			Pressverbände	Zhang et al. (2017)

...

Tabelle 4: Vom Sensor zum Maschinenelement (*Fortsetzung*)

Sensor	Effekt	Verschleißart	Maschinenelement	Quelle
Bildauswertung	Bruch	Gleitverschleiß	Schrauben	Zhang et al. (2018)
			Verbundwerkstoffe	Correa et al. (2017)
		Schwingungsverschleiß	Verbundwerkstoffe	Diel (2015)
		Stoßverschleiß	Gelenke	Rosenberg (2003)
		Wälzverschleiß	Gelenke	Rosenberg (2003)
			Getriebe	Singh et al. (2018)
	Geometrieänderungen	Erosion	Turbinenschaufeln	Cherepova et al. (2014)
			Walzen	Jakab et al. (2018)
		Gleitverschleiß	Turbinenschaufeln	Cherepova et al. (2014)
			Stahlseil	Cruzado et al. (2012)
			Walzen	Jakab et al. (2018)
		Schwingungsverschleiß	Verbundwerkstoffe	Diel (2015)
		Werkzeugverschleiß	Schneide	D'Addona et al. (2015)
	Grübchen/Bruch	Gleitverschleiß	Elastische Teile	Song et al. (2016)
			Gelenke	Rosenberg (2003)
			Getriebe	Singh et al. (2018)
			Kupplungsflächen/ Bremsen	Zhou et al. (2018)

...

Tabelle 4: Vom Sensor zum Maschinenelement (*Fortsetzung*)

Sensor	Effekt	Verschleißart	Maschinenelement	Quelle
Bilddauswertung	Grübchen/Bruch	Gleitverschleiß	Rad/ Schiene	Heck (2015)
			Verbundwerkstoffe	Correa et al. (2015)
	Stoßverschleiß		Gelenke	Rosenberg (2003)
		Wälzverschleiß	Gelenke	Rosenberg (2003)
			Getriebe	Singh et al. (2018)
			Rad/ Schiene	Heck (2015)
			Wälzlager	Caesarendra et al. (2016)
	Kraftaufwand steigt	Gleitverschleiß	Gleitflächen	Li et al. (2018)
	Riefen	Erosion	Turbinenschaufeln	Cherepova et al. (2014)
		Gleitverschleiß	Turbinenschaufeln	Cherepova et al. (2014)
		Verbundwerkstoffe	Correa et al. (2015)	
			Friedrich et al. (2017)	
			Wei et al. (2018)	
	Erosion	Turbinenschaufeln	Cherepova et al. (2014)	
Vibrationen	Gleitverschleiß	Getriebe	Peng and Kessissoglou (2003)	
	Wälzverschleiß	Getriebe	Peng and Kessissoglou (2003)	
Drehmoment	Abrieb	Gleitverschleiß	Getriebe	Singh et al. (2018)

...

Tabelle 4: Vom Sensor zum Maschinenelement (Fortsetzung)

Sensor	Effekt	Verschleißart	Maschinenelement	Quelle
Drehmoment	Abrieb	Wälzverschleiß	Getriebe	Singh et al. (2018)
	Bruch	Gleitverschleiß	Getriebe	Singh et al. (2018)
		Wälzverschleiß	Getriebe	Singh et al. (2018)
	Grübchen/Bruch	Gleitverschleiß	Getriebe	Singh et al. (2018)
Elektrizität		Wälzverschleiß	Getriebe	Singh et al. (2018)
	Bruch	Gleitverschleiß	Wälzlager	Dalvand et al. (2016)
		Wälzverschleiß	Wälzlager	Dalvand et al. (2016)
	Vibrationen	Gleitverschleiß	Wälzlager	Dalvand et al. (2016)
Finite Elemente	Abrieb	Gleitverschleiß	Gelenke	Bai et al. (2013)
			Pressverbände	Zhang et al. (2017)
			Schrauben	Liu et al. (2016)
			Stahlseil	Chen et al. (2016)
			Cruzado et al. (2012)	
Bruch		Gleitverschleiß	Elastische Teile	Song et al. (2016)
			Pressverbände	Zhang et al. (2017)
			Schrauben	Zhang et al. (2018)

...

Tabelle 4: Vom Sensor zum Maschinenelement (*Fortsetzung*)

Sensor	Effekt	Verschleißart	Maschinenelement	Quelle
Finite Elemente	Bruch	Schwingungsverschleiß	Verbundwerkstoffe	Diel (2015)
	Geometrieänderungen	Gleitverschleiß	Gelenke	Bai et al. (2013)
			Stahlseil	Cruzado et al. (2012)
		Schwingungsverschleiß	Verbundwerkstoffe	Diel (2015)
	Grübchen/Bruch	Gleitverschleiß	Elastische Teile	Song et al. (2016)
			Rad/ Schiene	Heck (2015)
Gyroskop		Erosion	Kugelgewindetriebe	Vogl et al. (2015)
		Wälzverschleiß	Rad/ Schiene	Heck (2015)
	Geometrieänderungen	Gleitverschleiß	Kugelgewindetriebe	Vogl et al. (2015)
		Stoßverschleiß	Kugelgewindetriebe	Vogl et al. (2015)
Härte		Wälzverschleiß	Kugelgewindetriebe	Vogl et al. (2015)
	Bruch	Gleitverschleiß	Kupplungsflächen/ Bremsen	Zhou et al. (2018)
Kraft	Grübchen/Bruch	Gleitverschleiß	Kupplungsflächen/ Bremsen	Zhou et al. (2018)
	Abrieb	Gleitverschleiß	Schrauben	Liu et al. (2016)
				Zhang et al. (2018)
			Verbundwerkstoffe	Correa et al. (2015)

...

Tabelle 4: Vom Sensor zum Maschinenelement (Fortsetzung)

Sensor	Effekt	Verschleißart	Maschinenelement	Quelle
Kraft	Abrieb	Gleitverschleiß	Walzen	Jakab et al. (2018)
		Erosion	Walzen	Jakab et al. (2018)
Bruch	Gleitverschleiß	Schrauben	Schrauben	Zhang et al. (2018)
		Schwingungverschleiß	Verbundwerkstoffe	Diel (2015)
		Werkzeugverschleiß	Schneide	Ratava et al. (2017)
Geometrieänderungen	Gleitverschleiß	Walzen	Walzen	Jakab et al. (2018)
		Schwingungverschleiß	Verbundwerkstoffe	Diel (2015)
Erosion	Erosion	Walzen	Walzen	Jakab et al. (2018)
		Verbundwerkstoffe	Verbundwerkstoffe	Correa et al. (2015)
Kraftaufwand steigt	Werkzeugverschleiß	Schneide	Schneide	Nouri et al. (2015)
		Verbundwerkstoffe	Verbundwerkstoffe	Correa et al. (2015)
Riefen	Gleitverschleiß	Verbundwerkstoffe	Verbundwerkstoffe	Correa et al. (2015)
		Wälzlager	Wälzlager	Shanmukha Priya et al. (2014)
Vibrationen	Wälzverschleiß	Wälzlager	Wälzlager	Shanmukha Priya et al. (2014)
		Schneide	Schneide	Ratava et al. (2017)
Magnetismus	Abrieb	Gleitverschleiß	Getriebe	Feng et al. (2015)
		Wälzverschleiß	Getriebe	Feng et al. (2015)

...

Tabelle 4: Vom Sensor zum Maschinenelement (*Fortsetzung*)

Sensor	Effekt	Verschleißart	Maschinenelement	Quelle
Rauheit	Abrieb	Gleitverschleiß	Verbundwerkstoffe	Correa et al. (2017)
	Bruch	Gleitverschleiß	Verbundwerkstoffe	Correa et al. (2017)
Temperatur	Grübchen/Bruch	Gleitverschleiß	Getriebe	Singh et al. (2018)
		Wälzverschleiß	Getriebe	Singh et al. (2018)
	Bruch	Gleitverschleiß	Getriebe	Singh et al. (2018)
		Wälzverschleiß	Getriebe	Singh et al. (2018)
	Abrieb	Gleitverschleiß	Getriebe	Singh et al. (2018)
		Wälzverschleiß	Getriebe	Singh et al. (2018)
Verschleißvolumen	Abrieb	Gleitverschleiß	Gleitflächen	Li et al. (2018)
			Rad/ Schiene	Yusof and Ripin (2016)
			Stahlseil	Chen et al. (2016)
				Cruzado et al. (2012)
			Verbundwerkstoffe	Correa et al. (2017)
				Friedrich et al. (2017)
		Wälzverschleiß	Rad/ Schiene	Yusof and Ripin (2016)
	Bruch	Gleitverschleiß	Verbundwerkstoffe	Correa et al. (2017)
	Geometrieänderungen	Gleitverschleiß	Stahlseil	Cruzado et al. (2012)
	Kraftaufwand steigt	Gleitverschleiß	Gleitflächen	Li et al. (2018)

...

Tabelle 4: Vom Sensor zum Maschinenelement (*Fortsetzung*)

Sensor	Effekt	Verschleißart	Maschinenelement	Quelle
Verschleißvolumen	Riefen	Gleitverschleiß	Verbundwerkstoffe	Friedrich et al. (2017)
Winkelmesser	Abrieb	Gleitverschleiß	Schrauben	Zhang et al. (2018)
	Bruch	Gleitverschleiß	Schrauben	Zhang et al. (2018)
	Geometrieänderungen	Erosion	Kugelgewindetriebe	Vogl et al. (2015)
		Gleitverschleiß	Kugelgewindetriebe	Vogl et al. (2015)
		Stoßverschleiß	Kugelgewindetriebe	Vogl et al. (2015)
		Wälzverschleiß	Kugelgewindetriebe	Vogl et al. (2015)

Tabelle 5: Von der Verschleißart zum Sensor

Verschleißart	Effekt	Sensor	Quelle
Erosion	Abrieb	Bildausswertung	Jakab et al. (2018)
		Kraft	Jakab et al. (2018)
	Geometrieänderungen	Beschleunigungssensor	Vogl et al. (2015)
		Bildausswertung	Cherepova et al. (2014)
			Jakab et al. (2018)
		Gyroskop	Vogl et al. (2015)
		Kraft	Jakab et al. (2018)
		Winkelmesser	Vogl et al. (2015)
			Cherepova et al. (2014)
Riefen	Bildausswertung	Cherepova et al. (2014)	
Gleitverschleiß	Abrieb	Beschleunigungssensor	Hu et al. (2016)
			Peng and Kessissoglou (2003)
	Bildausswertung		Chen et al. (2016)
			Correa et al. (2015)
			Cruzado et al. (2012)
			Feng et al. (2015)
			Friedrich et al. (2017)
			Jakab et al. (2018)

...

Tabelle 5: Von der Verschleißart zum Sensor (*Fortsetzung*)

Verschleißart	Effekt	Sensor	Quelle			
Gleitverschleiß	Abrieb	Bildauswertung	Liu et al. (2016)			
			Li et al. (2018)			
			Peng and Kessissoglou (2003)			
			Rosenberg (2003)			
			Saknararak et al. (2015)			
			Singh et al. (2018)			
			Wei et al. (2018)			
			Yusof and Ripin (2016)			
			Zhang et al. (2017)			
			Zhang et al. (2018)			
			Drehmoment			
			Finite Elemente			Singh et al. (2018)
						Bai et al. (2013)
						Chen et al. (2016)
Cruzado et al. (2012)						
Liu et al. (2016)						
Zhang et al. (2017)						
Zhang et al. (2018)						
Kraft			Correa et al. (2015)			

...

Tabelle 5: Von der Verschleißart zum Sensor (*Fortsetzung*)

Verschleißart	Effekt	Sensor	Quelle
Gleitverschleiß	Abrieb	Kraft	Jakab et al. (2018)
			Liu et al. (2016)
			Zhang et al. (2018)
			Feng et al. (2015)
			Correa et al. (2017)
			Singh et al. (2018)
			Chen et al. (2016)
			Correa et al. (2017)
			Cruzado et al. (2012)
			Friedrich et al. (2017)
Li et al. (2018)			
Yusof and Ripin (2016)			
		Winkelmesser	Zhang et al. (2018)
Bruch		Beschleunigungssensor	Ali et al. (2015)
			Dalvand et al. (2016)
			Correa et al. (2017)
			Rosenberg (2003)

...

Tabelle 5: Von der Verschleißart zum Sensor (*Fortsetzung*)

Verschleißart	Effekt	Sensor	Quelle
Gleitverschleiß	Bruch	Bildauswertung	Singh et al. (2018)
			Song et al. (2016)
			Zhang et al. (2017)
			Zhang et al. (2018)
			Zhou et al. (2018)
		Drehmoment	Singh et al. (2018)
		Elektrizität	Dalvand et al. (2016)
		Finite Elemente	Song et al. (2016)
			Zhang et al. (2017)
			Zhang et al. (2018)
	Härte	Zhou et al. (2018)	
	Kraft	Zhang et al. (2018)	
	Rauheit	Correa et al. (2017)	
	Temperatur	Singh et al. (2018)	
	Verschleißvolumen	Correa et al. (2017)	
	Winkelmesser	Zhang et al. (2018)	
	Geometrieänderungen	Beschleunigungssensor	Vogl et al. (2015)
		Bildauswertung	Cherepova et al. (2014)

...

Tabelle 5: Von der Verschleißart zum Sensor (*Fortsetzung*)

Verschleißart	Effekt	Sensor	Quelle
Gleitverschleiß	Geometrieänderungen	Bildauswertung	Cruzado et al. (2012)
			Jakab et al. (2018)
		Finite Elemente	Bai et al. (2013)
			Cruzado et al. (2012)
		Gyroskop	Vogl et al. (2015)
		Kraft	Jakab et al. (2018)
		Verschleißvolumen	Cruzado et al. (2012)
		Winkelmesser	Vogl et al. (2015)
		Grübchen/Bruch	Beschleunigungssensor
Bildauswertung	Correa et al. (2015)		
	Heck (2015)		
	Rosenberg (2003)		
	Singh et al. (2018)		
	Song et al. (2016)		
	Zhou et al. (2018)		
Drehmoment	Singh et al. (2018)		
Finite Elemente	Heck (2015)		

...

Tabelle 5: Von der Verschleißart zum Sensor (*Fortsetzung*)

Verschleißart	Effekt	Sensor	Quelle
Gleitverschleiß	Grübchen/Bruch	Finite Elemente	Song et al. (2016)
		Härte	Zhou et al. (2018)
	Kraftaufwand steigt	Kraft	Correa et al. (2015)
		Temperatur	Singh et al. (2018)
Riefen	Kraftaufwand steigt	Bildausswertung	Li et al. (2018)
		Verschleißvolumen	Li et al. (2018)
Vibrationen	Beschleunigungssensor	Bildausswertung	Cherepova et al. (2014)
			Correa et al. (2015)
			Friedrich et al. (2017)
			Wei et al. (2018)
		Kraft	Correa et al. (2015)
		Verschleißvolumen	Friedrich et al. (2017)
Vibrationen	Beschleunigungssensor		Ahmada et al. (2014)
			Ali et al. (2015)
			Baccar and Söffker (2015)
			Dalvand et al. (2016)
			Hu et al. (2016)
			Peng and Kessissoglou (2003)

...

Tabelle 5: Von der Verschleißart zum Sensor (*Fortsetzung*)

Verschleißart	Effekt	Sensor	Quelle
Gleitverschleiß	Vibrationen	Beschleunigungssensor	Prieto et al. (2013)
			Verbij and BV (2018)
		Bildauswertung	Peng and Kessissoglou (2003)
		Elektrizität	Dalvand et al. (2016)
		Kraft	Shanmukha Priya et al. (2014)
Wälzverschleiß	Abrieb	Beschleunigungssensor	Hu et al. (2016)
			Peng and Kessissoglou (2003)
		Bildauswertung	Feng et al. (2015)
			Peng and Kessissoglou (2003)
			Rosenberg (2003)
			Saknararak et al. (2015)
			Singh et al. (2018)
			Yusof and Ripin (2016)
		Drehmoment	Singh et al. (2018)
		Magnetismus	Feng et al. (2015)
		Temperatur	Singh et al. (2018)
		Verschleißvolumen	Yusof and Ripin (2016)

...

Tabelle 5: Von der Verschleißart zum Sensor (*Fortsetzung*)

Verschleißart	Effekt	Sensor	Quelle
Wälzverschleiß	Bruch	Beschleunigungssensor	Ali et al. (2015)
			Dalvand et al. (2016)
	Bildauswertung		Rosenberg (2003)
			Singh et al. (2018)
		Drehmoment	Singh et al. (2018)
	Elektrizität	Dalvand et al. (2016)	
	Temperatur	Singh et al. (2018)	
Geometrieänderungen	Beschleunigungssensor	Vogl et al. (2015)	
	Gyroskop	Vogl et al. (2015)	
	Winkelmesser	Vogl et al. (2015)	
Grübchen/Bruch	Beschleunigungssensor	Caesarendra et al. (2016)	
		Verbij and BV (2018)	
	Bildauswertung	Caesarendra et al. (2016)	
			Heck (2015)
			Rosenberg (2003)
			Singh et al. (2018)
	Drehmoment		Singh et al. (2018)

...

Tabelle 5: Von der Verschleißart zum Sensor (*Fortsetzung*)

Verschleißart	Effekt	Sensor	Quelle
Wälzverschleiß	Grübchen/Bruch	Finite Elemente	Heck (2015)
		Temperatur	Singh et al. (2018)
	Vibrationen	Beschleunigungssensor	Ahmaida et al. (2014)
			Ali et al. (2015)
		Chacon et al. (2015)	
		Dalvand et al. (2016)	
		Hu et al. (2016)	
		Peng and Kessissoglou (2003)	
		Prieto et al. (2013)	
		Verbij and BV (2018)	
Stoßverschleiß	Abrieb	Bildauswertung	Peng and Kessissoglou (2003)
		Elektrizität	Dalvand et al. (2016)
		Kraft	Shanmukha Priya et al. (2014)
	Bruch	Bildauswertung	Rosenberg (2003)
			Saknararak et al. (2015)
	Geometrieänderungen	Bildauswertung	Rosenberg (2003)
		Beschleunigungssensor	Kaewunruen (2014)

...

Tabelle 5: Von der Verschleißart zum Sensor (*Fortsetzung*)

Verschleißart	Effekt	Sensor	Quelle
Stoßverschleiß	Geometrieänderungen	Beschleunigungssensor	Vogl et al. (2015)
		Winkelmesser	Vogl et al. (2015)
		Gyroskop	Vogl et al. (2015)
	Grübchen/Bruch	Bildauswertung	Rosenberg (2003)
Vibrationen	Beschleunigungssensor		Chacon et al. (2015)
			Kaewunruen (2014)
Schwingungverschleiß	Bruch	Kraft	Diel (2015)
		Finite Elemente	Diel (2015)
		Bildauswertung	Diel (2015)
		Kraft	Diel (2015)
Werkzeugverschleiß	Bruch	Beschleunigungssensor	Ratava et al. (2017)
		Kraft	Ratava et al. (2017)
	Geometrieänderungen	Bildauswertung	D'Addona et al. (2015)
	Kraftaufwand steigt	Kraft	Nouri et al. (2015)
Vibrationen	Beschleunigungssensor		Ahmad et al. (2015)
			Ratava et al. (2017)
			Zhang et al. (2016)

...

Tabelle 5: Von der Verschleißart zum Sensor (*Fortsetzung*)

Verschleißart	Effekt	Sensor	Quelle
Werkzeugverschleiß	Vibrationen	Kraft	Ratava et al. (2017)

Aufstellung der Maschinenelemente

Das folgende Diagramm und die nachstehende Tabelle ordnen den Maschinenelementen die gelesenen Artikel zu. Diese Darstellungen ermöglichen es dem Leser, den Umfang der gelesenen Arbeiten pro Maschinenelement nachzuvollziehen.

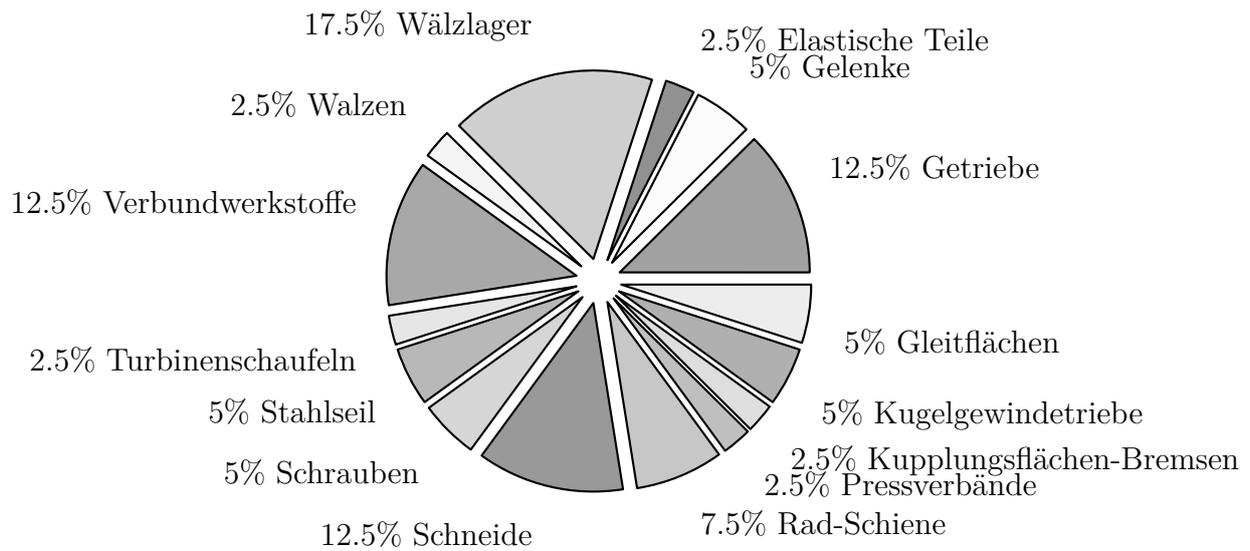


Abbildung 7: Anteile der gelesenen Artikel

Tabelle 6: Aufstellung der Maschinenelemente

Maschinenelement	Anzahl	Quellen
Elastische Teile	1	Song et al. (2016)
Gelenke	2	Bai et al. (2013); Rosenberg (2003)
Getriebe	5	Ahmaida et al. (2014); Peng and Kessissoglou (2003); Feng et al. (2015); Hu et al. (2016); Singh et al. (2018)
Gleitflächen	2	Li et al. (2018); Baccar and Söffker (2015)
Kugelgewindetriebe	2	Saknararak et al. (2015); Vogl et al. (2015)
Kupplungsflächen/ Bremsen	1	Zhou et al. (2018)
Pressverbände	1	Zhang et al. (2017)
Rad/ Schiene	3	Kaewunruen (2014); Heck (2015); Yusof and Ripin (2016)
Schneide	5	Ahmad et al. (2015); Nouri et al. (2015); Ratava et al. (2017); Zhang et al. (2016); D'Addona et al. (2015)
Schrauben	2	Liu et al. (2016); Zhang et al. (2018)
Stahlseil	2	Chen et al. (2016); Cruzado et al. (2012)
Turbinenschaufeln	1	Cherepova et al. (2014)
Verbundwerkstoffe	4	Correa et al. (2015, 2017); Friedrich et al. (2017); Wei et al. (2018)
Walzen	1	Jakab et al. (2018)
Wälzlager	7	Ali et al. (2015); Caesarendra et al. (2016); Chacon et al. (2015); Dalvand et al. (2016); Prieto et al. (2013); Verbij and BV (2018); Shanmukha Priya et al. (2014)