



Josef Habich, BSc.

Einsatz der Thermografie zur Diagnose des Werkzeugzustandes von Produktionsmaschinen

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Wirtschaftsingenieurwesen-Maschinenbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Institut für Maschinenbau- und Betriebsinformatik

Institutsleiter

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Siegfried Vössner

Betreuer

Dipl.-Ing. Clemens Gutschi, BSc.

Dipl.-Ing. Dietmar Neubacher

Graz, Mai 2017

In Kooperation

mit

Audi
Hungaria



EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Datum

Unterschrift

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen Personen bedanken, die mich in meiner Studienzeit und auch während dieser Arbeit unterstützt und begleitet haben.

Ein besonderer Dank gilt meinem Betreuer bei Audi Hungaria, Albert Fazekas, der mir während der Zeit in Ungarn stets behilflich war und immer ein offenes Ohr für mich hatte. Ohne ihn wäre die praktische Umsetzung der Arbeit bei Audi in dieser Form nicht möglich gewesen. Einen weiteren Dank möchte ich an Christian Müller und Markus Schulemann richten, die von Anfang an involviert waren und durch konstruktive Kritik und Vorschläge die Arbeit verbesserten.

Ebenfalls möchte ich mich für die großartige Unterstützung und Betreuung seitens der TU Graz bei Dipl.-Ing. Clemens Gutschi, BSc. bedanken. Er stand stets mit fachlichem Rat zur Seite und durch seine Anregungen konnte ich diese Arbeit so erfolgreich durchführen. Zudem möchte ich mich bei Dipl.-Ing. Dietmar Neubacher bedanken, der mir beim Verfassen meiner Arbeit sehr geholfen hat. Durch ihn konnte diese Arbeit erst diesen Standard erreichen.

Insbesondere bedanken möchte ich mich auch bei meinen Freunden, die nicht nur im Studium, sondern auch privat immer für mich da waren und noch sind. Sie haben mich dabei unterstützt diesen Abschnitt meines Lebens zu bewältigen.

Der größte Dank gilt allerdings meiner Familie. Dabei insbesondere meinen Eltern, ohne die ich dieses Studium finanziell und mental nicht absolvieren hätte können, und meiner Schwester, die mir vor allem in den letzten Jahren eine besondere Stütze in allen Lebenslagen war. Sie hat mir den Rückhalt gegeben, den ich benötigt habe und mich immer bei meinen Problemen und Entscheidungen ermutigt.

Abstract

Maintenance is becoming increasingly important in production sector of the metals industry. With low downtimes and fast identification of faults, machines can be operated efficiently and economically. To achieve this, monitoring systems are used to observe the performance and the state of the machine's components to be able to plan and execute maintenance more efficiently. This thesis deals with the suitability of condition monitoring of production machines by using thermography. First of all, various components of a production line which are to be monitored are examined. Then, the recognition of tool wearing of the production machine through thermography and the appropriate measurement are discussed in more detail. For this purpose, the measurement setup is prepared, and the milling operations are carried out with various milling cutters as dry processing. Then, several test series with different designs, materials, and tool conditions are compared with one another. The obtained measurement data are subsequently processed and graphically displayed to receive a report about the difference in the condition of the tools. These evaluations show a clear difference in temperature of tools used during production. From this, it can be deduced that an infrared camera can be used to monitor the condition of the tools. A recommendation is made for the possible implementation of the condition monitoring with regards to the position of the camera as well as the execution and evaluation of the recordings. Finally, a cost model for the economic consideration of the implementation of diagnostics in production is prepared and exemplarily considered for a production plant. With this monitoring system, the life cycle of certain components or tools could be prolonged at previously selected plants and, therefore, the planning of maintenance operations could be improved. This thesis provides the basis for the targeted use of diagnostics in production to minimize maintenance costs.

Kurzfassung

In metallverarbeitenden Unternehmen wird auf die Instandhaltung heutzutage immer mehr Wert gelegt. Für eine wirtschaftliche und effiziente Produktion ist es wichtig, dass Anlagen und Maschinen eine geringe Stillstandszeit aufweisen und auftretende Störungen schnell und gezielt erkannt werden. Dazu kommt es immer häufiger zum Einsatz von Zustandsüberwachungssysteme, um ausreichend viele Komponenten einer Anlage und deren aktuellen Zustand zu überwachen. Dadurch können Instandhaltungsmaßnahmen besser geplant und durchgeführt werden. Diese Arbeit beschäftigt sich generell mit der Eignung der Zustandsüberwachung von Produktionsmaschinen mittels Thermografie. Zu Beginn werden verschiedene Komponenten einer Produktionslinie für die Eignung untersucht, wobei in weiterer Folge genauer auf die Erkennung des Werkzeugverschleißes einer Bearbeitungsmaschine mit Thermografie und einen geeigneten Messaufbau eingegangen wird. Die Bearbeitungen werden mit verschiedenen Fräswerkzeugen als Trockenbearbeitung durchgeführt. In mehrere Versuchsreihen werden unterschiedliche Bauformen, Werkstoffe und Werkzeugzustände zur Bearbeitung herangezogen und miteinander verglichen. Die erhaltenen Messdaten der Aufnahmen werden anschließend aufbereitet und grafisch dargestellt, um eine Aussage über den Unterschied der Werkzeugzustände zu erhalten. Diese Auswertungen zeigen einen deutlichen Temperaturunterschied der verwendeten Werkzeugzustände während der Bearbeitung. Daraus kann abgeleitet werden, dass eine Zustandsüberwachung der eingesetzten Werkzeuge mit Hilfe einer Infrarot-Kamera möglich ist. Daraus wird eine Empfehlung für eine mögliche Umsetzung der Werkzeugzustandsüberwachung hinsichtlich der Position der Kamera, sowie der Durchführung und Auswertung der Aufnahmen gegeben. Zum Schluss wird ein Kostenmodell für die wirtschaftliche Betrachtung der Umsetzung von Diagnostik in der Produktion erstellt und exemplarisch für eine Anlage betrachtet. Es besteht dadurch die Möglichkeit, die Lebensdauer bestimmter Komponenten oder Werkzeuge an zuvor ausgewählten Anlagen zu verlängern und dadurch die Planbarkeit der Instandhaltungsmaßnahmen zu verbessern. Diese Arbeit liefert die Grundlage für den gezielten Einsatz von Diagnostik in der Produktion um die Instandhaltungskosten zu minimieren.

Abkürzungen und Symbole

Abkürzungen:

TPM	Total Productive Maintenance
RCM	Reliability Centered Maintenance
OEE	Overall Equipment Efficiency
CM	Condition Monitoring
IR	Infrarot
BAZ	Bearbeitungszentrum
ZKG	Zylinderkurbelgehäuse
AF	Arbeitsfolge

Symbole:

λ	[m]	Wellenlänge
M_λ	[W/m ²]	spezifische Ausstrahlung
ε_λ	[]	Emissionsgrad
α_λ	[]	Absorptionsgrad
τ_λ	[]	Transmissionsgrad
ρ_λ	[]	Reflexionsgrad
T	[K]	Temperatur

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Grundlagen der Instandhaltung.....	3
2.1 Entwicklung der Instandhaltung.....	3
2.2 Ziele und Definition der Instandhaltung	5
2.3 Instandhaltungsstrategien und -konzepte.....	6
2.3.1 Strategien	6
2.3.2 Konzepte	10
3. Zustandsüberwachung.....	13
3.1 Grundlagen der Zustandsüberwachung	13
3.2 Zustandsüberwachung von Werkzeugen	18
3.2.1 Möglichkeiten zur Überwachung von zerspanenden Werkzeugen	20
3.2.2 Sensoren zur Überwachung von zerspanenden Werkzeugen.....	23
3.2.3 Thermografie als Zustandsüberwachung.....	25
3.2.4 Temperaturveränderungen durch Verschleiß eines Werkzeuges	28
3.3 Thermografie	30
3.3.1 Einführung in die Temperaturmessung	31
3.3.2 Einteilung der Temperaturmessverfahren.....	33
3.3.3 Physikalische Grundlagen	36
3.3.4 Thermografische Geräte und Verfahren	39
3.3.5 Messsignalverarbeitung und Bildauswertung	47
4. Experimentelle Versuchsdurchführung	48
4.1 Auswahl der Anlage und Messmittel	49
4.1.1 Anlagenauswahl	49
4.1.2 Auswahl des Thermografiekamerasystems	51

Inhaltsverzeichnis

4.2	Varianten der Versuchsdurchführung.....	55
4.3	Versuchsreihe 1: fixe Kameraposition	58
4.3.1	Versuchsaufbau und -durchführung.....	59
4.3.2	Auswertung.....	60
4.3.3	Ergebnisse.....	62
4.3.4	Fazit.....	65
4.4	Versuchsreihe 2: Materialvergleich mit mitgeführter Kamera	66
4.4.1	Versuchsaufbau.....	67
4.4.2	Versuchsdurchführung.....	68
4.4.3	Auswertung.....	69
4.4.4	Ergebnisse.....	74
4.4.5	Fazit.....	75
4.5	Versuchsreihe 3: Produktionsnahe Versuche mit mitgeführter Kamera	76
4.5.1	Versuchsdurchführung.....	77
4.5.2	Auswertung.....	78
4.5.3	Ergebnisse.....	80
4.5.4	Fazit.....	83
4.6	Diskussionen	83
4.6.1	Diskussion der Ergebnisse	84
4.6.2	Diskussion der Auswertung und des Aufbaues.....	84
5.	Kostenmodell für Umsetzung von Diagnostik in der Produktion.....	86
5.1	Aufstellung des Kostenmodelles einer Anlage in der Produktionslinie	86
5.2	Identifikation der Anlage	87
5.3	Ergebnis des Kostenmodells	89
6.	Zusammenfassung und Ausblick	91
6.1	Zusammenfassung.....	91
6.2	Ausblick.....	93

Inhaltsverzeichnis

Literaturverzeichnis	94
Abbildungsverzeichnis	97
Tabellenverzeichnis	100

1. Einleitung

Mit dem Werk in Ungarn verfügt Audi derzeit über das größte Motorenwerk weltweit. Audi gehört zum Volkswagenkonzern und ist ein weltweit agierendes Unternehmen. Der Standort Győr (Audi Hungaria Zrt.) produzierte als einziges Motorenwerk jemals mehr als über zwei Millionen Motoren pro Jahr. Sie produzieren die Motoren nicht nur für den eigenen Konzern und weitere Gesellschaften, sondern beliefern auch Dritte. Damit ist ein problemloser Ablauf in der gesamten Produktion notwendig, um solche Stückzahlen auch fertigen zu können.

Im Rahmen eines Projektes, in Zusammenarbeit des Instituts für Maschinenbau- und Betriebsinformatik in Graz und Audi in Ungarn, wurde das Thema der Arbeit entwickelt. Die Instandhaltung von Maschinen in der Produktion gewinnt immer mehr an Bedeutung, um die Anlagenverfügbarkeit zu erhöhen und somit ungeplante Stillstände zu minimieren. Zudem werden die meisten Bearbeitungen von Anlagen und Maschinen mit zerspanenden Werkzeugen durchgeführt. Derzeit finden noch viele Instandhaltungstätigkeiten bei Audi Hungaria (AHM) nach der zeitbasierten, periodischen Instandhaltungsstrategie statt. Das bedeutet, dass Komponenten und Bauteile nach einer bestimmten Zeit oder Anzahl an Bearbeitungsvorgängen ausgetauscht werden. Allerdings ohne das Wissen, ob die Bauteile noch weiterverwendet werden könnten oder eventuell schon früher gewechselt hätten werden müssen. Eine Umstellung auf eine zustandsbasierte Strategie, kann die optimale Ausnutzung der Werkzeuglebensdauer zur Folge haben. Außerdem könnte der Werkzeugwechsel während eines geplanten Stillstandes durchgeführt werden.

In dieser Arbeit soll dahingehend überprüft werden, ob es möglich ist, mit einer neuen Technologie einen Zustand einer Komponente einer Bearbeitungsmaschine zu erkennen. Genauer soll die Wärmeentwicklung mit Hilfe eines Thermografiemessgerätes von unterschiedlichen Werkzeugzuständen während der Bearbeitung gemessen werden und anschließend sollen diese Werte miteinander verglichen werden. Zudem soll ein geeigneter Messaufbau für die Untersuchungen entwickelt und umgesetzt werden. Die vorherrschenden Bedingungen in der Produktion, wie eingesetzte Maschinentypen oder zu bearbeitende Werkstoffe sollen in dieser Betrachtung miteinbezogen werden.

Die Arbeit wird demnach in zwei theoretische, zwei praktische und in ein zusammenfassendes Kapitel eingeteilt. Die beiden theoretischen Kapitel behandeln die Grundlagen der Instandhaltung, die Zustandsüberwachung im Allgemeinen und im Speziellen auf die Thermografie bezogen und zum Schluss die wichtigsten Grundlagen, die für die Thermografie notwendig sind. Die beiden praktischen Kapitel teilen sich auf in die gesamte experimentelle Versuchsdurchführung und in die Entwicklung eines Kostenmodells für die wirtschaftliche Betrachtung von Diagnostik in der Produktion. Im letzten Kapitel wird eine Zusammenfassung über die gesamte Arbeit gegeben, Ergebnisse und Erkenntnisse diskutiert und auf die Möglichkeiten der Umsetzung eines Zustandsüberwachungssystems eingegangen.

2. Grundlagen der Instandhaltung

Dieses Kapitel dient als wissenschaftliche Grundlage für diese Arbeit im Bereich der Instandhaltung. Einführend wird ein kurzer Überblick über die geschichtliche Entwicklung der Instandhaltung bis zum heutigen Tage dargestellt. In weiterer Folge werden die Ziele und die Begriffsdefinition der Instandhaltung genauer erläutert, um anschließend die aus den Zielen abgeleiteten Instandhaltungsstrategien und Managementkonzepte aufzuzeigen.

2.1 Entwicklung der Instandhaltung

Für die Entwicklung der Instandhaltung ist die Industrialisierung in vielen Bereichen der Produktion am Beginn des 19. Jahrhunderts maßgeblich gewesen. Die Tätigkeiten an den Maschinen und Anlagen konnten meist aufgrund der fehlenden Ausbildung im Bereich der Instandhaltung nicht von den Maschinenbedienern durchgeführt werden. Um den immer höher werdenden Anforderungen der Produktion, wie zum Beispiel höhere Qualität und schneller Herstellung, gerecht zu werden, musste ein neuer Zweig

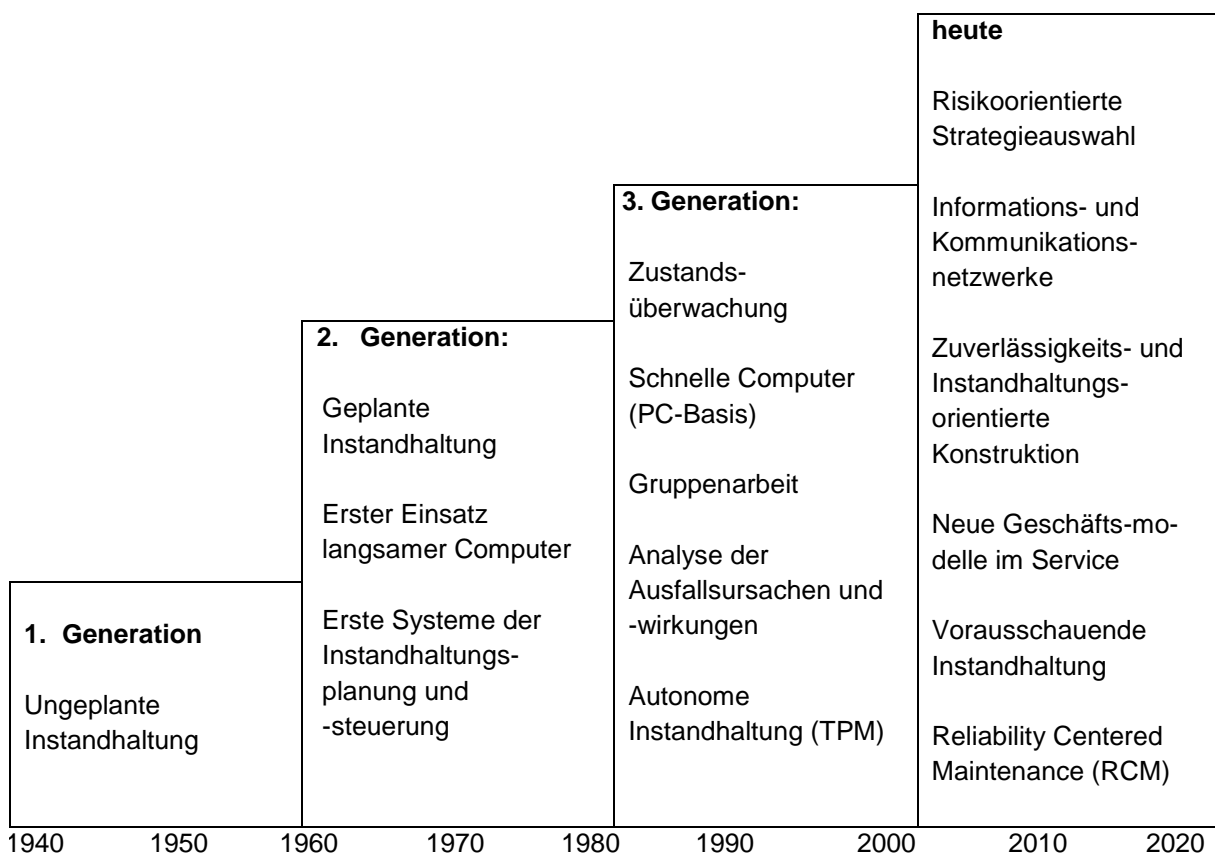


Abbildung 1: Entwicklung der Instandhaltungstechniken (Matyas 2013, S. 200)

in vielen Unternehmen eingeführt werden. Dies war der Beginn einer rasanten Entwicklung der Instandhaltung, die sich nun in die folgenden vier Generationen unterteilen lässt: (Schenk 2010, S. 1; Reichel, Müller, Mandelartz 2009, S. 52)

Wie die Abbildung 1 zeigt, wurden in der ersten Generation der Instandhaltung Reparaturen nur durchgeführt, um die Funktion der Maschine oder Anlage nach einem Ausfall schnellstmöglich wiederherzustellen. Außer Reinigen, Abschmieren und Inspizieren gab es kaum vorbeugende Maßnahmen. Die nächste Generation wurde vorangetrieben durch die steigende Nachfrage an verschiedensten Gütern und Produkten und somit auch stieg die Anzahl der für die Herstellung notwendigen Maschinen und Anlagen. Dieser Schritt führte zu einer zunehmenden Mechanisierung und Komplexität der Maschinen. Die dadurch erhöhten Stillstandszeiten waren Grundlage für die Einführung neuer Instandhaltungskonzepte, die die Instandhaltung kontrollierbarer machen sollten. Der finanzielle Aspekt wurde für die Entwicklung der Planungs- und Lenkungssysteme immer bedeutender, da die ersten Computerprogramme viele Bereiche wie Ressourcen, Arbeitsaufträge und Kosten verwalteten. Die weiteren technischen Entwicklungen bis hin zu sehr komplexen, verketteten Anlagen, welche eine erhöhte Störanfälligkeit aufwiesen, verlangten gänzlich neue Instandhaltungstechniken. Durch diese Merkmale der 3. Instandhaltungsgeneration sind zum Beispiel die zustandsorientierte Instandhaltung, die Total Productive Maintenance (TPM) oder die Rüstzeit-Minimierung entwickelt und eingeführt worden. Auch Änderungen in den Organisationsstrukturen, wie beispielsweise die Einführung eines zentralen oder dezentralen Instandhaltungssystems sollten die Effektivität steigern. Heutzutage sind noch weitere Aspekte, wie gesetzliche Umweltauflagen und Arbeitssicherheit dazugekommen, die eine Auswirkung auf die vierte Generation haben. Des Weiteren kann aufgrund der steigenden Komplexität der Anlagen die Fehlersuche länger dauern und meist nur von qualifizierten Arbeitskräften durchgeführt werden. Die Zeiträume, in denen Anlagen für Reparaturen stillstehen können, ohne beispielsweise Verluste in der Ausbringung zu erleiden, werden immer kürzer. Durch diese Faktoren wird die Bedeutung der Instandhaltung aufgezeigt und sie wird verstärkt in die Unternehmensstruktur mit eingebunden. Die vierte Generation der Instandhaltung beinhaltet nicht nur die Anlagenverfügbarkeit und Kosten, sondern beschäftigt sich auch mehr mit Effizienz, Sicherheit, Umweltschutz und Produktqualität. (Pawellek 2013, S. 1; Matyas 2013, S. 23; Reichel, Müller, Mandelartz 2009, S. 52ff)

2.2 Ziele und Definition der Instandhaltung

Aufbauend auf die zuvor genannten Aufgaben und Herausforderungen in der Produktion wurden unterschiedliche Ziele der Instandhaltung in der Literatur eingeführt. Eine genauere Definition des Instandhaltungsbegriffs wird durch eine Norm beschrieben. Im nachfolgenden Abschnitt werden deswegen diese essenziellen Begriffe der Instandhaltung detaillierter beschrieben.

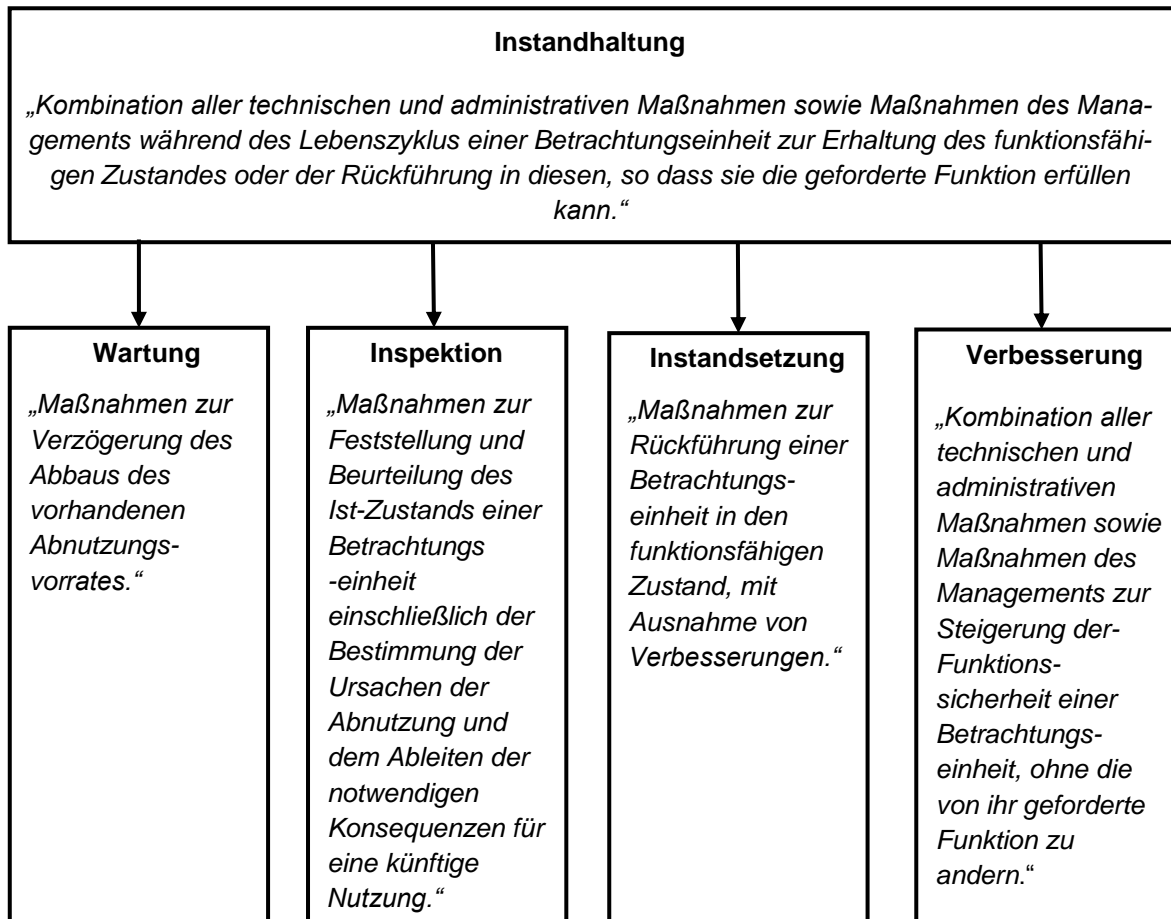


Abbildung 2: Definition und Gliederung Instandhaltung nach DIN 31051 (DIN 31051:2012-09, S. 4; Pawellek 2013, S. 14)

Ziele der Instandhaltung:

Die grundlegenden Ziele der Instandhaltung einer Anlage oder Maschine beinhalten laut Matyas 2013 die nachfolgenden Punkte:

- Sicherheitsmaximierung
- Zuverlässigkeitsmaximierung
- Kostenminimierung
- Gewinnmaximierung

Das bedeutet für die ersten beiden Ziele, dass von der Anlage keine Gefahr ausgehen darf und sie den Betrieb aufnehmen und störungsfrei durchführen kann. Zur Erreichung der anderen Ziele wird versucht, die Restnutzungsdauer so gut wie möglich zu verlängern. (Leidinger 2014, S. 15; Matyas 2013, S. 25)

Definition Instandhaltung:

Die Abbildung 2 beinhaltet die genaue Definition der Instandhaltung, sowie der der Gliederung der Teilaufgaben bzw. Grundmaßnahmen laut DIN 31051.

Wie einleitend erwähnt, entstanden im Laufe der Zeit unterschiedliche Instandhaltungsstrategien, um die Ziele der Instandhaltung zu erreichen. In einem weiteren Schritt entstanden nach und nach Instandhaltungs- und Managementkonzepte, die mit Hilfe der Strategien und mittels weiteren Aspekten die Instandhaltung maßgeblich beeinflussten. Das nachfolgende Kapitel erläutert die derzeit geläufigen Strategien und Konzepte.

2.3 Instandhaltungsstrategien und -konzepte

2.3.1 Strategien

Für die Instandhaltungsstrategien existieren keine bestimmten und einheitlichen Definitionen. Sie sollen aber regeln, welche Maßnahmen zu welchem Zeitpunkt an welchem Objekt/Bauteil und wie oft durchgeführt werden sollen. Die zeitliche Einteilung der Instandhaltung kann laut Schenk 2010 systematisch oder unsystematisch erfolgen.

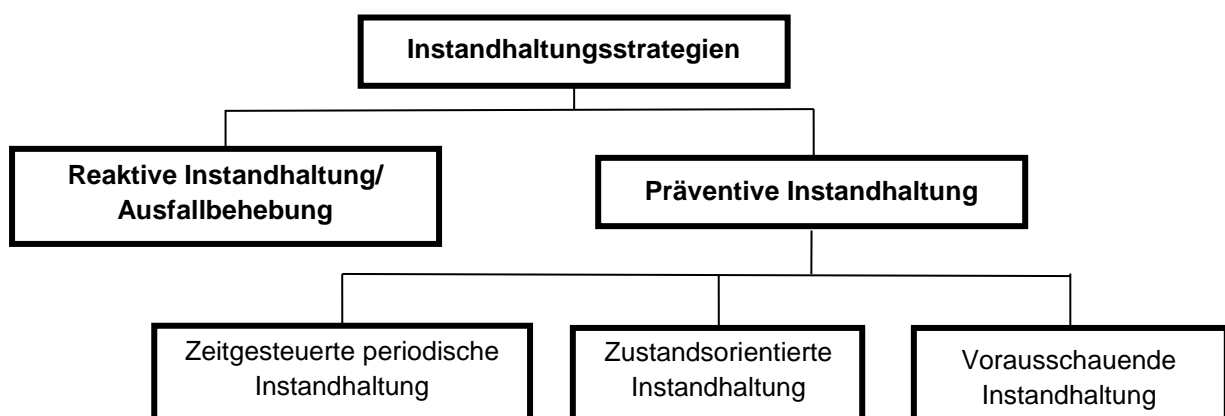


Abbildung 3: Instandhaltungsstrategien (in Anlehnung Matyas 2013, S. 106; Schenk 2010, S. 27)

Bei der unsystematischen Wahl des Zeitpunktes werden die Maßnahmen erst bei Bedarf oder einem Ausfall getätigt.

Erfolgt die Instandhaltung systematisch, so werden die Tätigkeiten in periodischen Zeit- oder Nutzungsabständen durchgeführt, oder sie werden zu einem festgelegten oder vorhergesagten Zustand des Teiles verrichtet. Es lassen sich hiermit vier Grundstrategien ableiten, wie in Abbildung 3 zu sehen ist. (Matyas 2013, S. 105; Schenk 2010, S. 26; Pawellek 2013, S. 128)

Reaktive Instandhaltung/ Ausfallbehebung:

Bei dieser Art der Instandhaltung werden die Maschinen oder Anlagen so lange betrieben, bis ein Ausfall einer Komponente auftritt oder eine festgelegte Abnutzungsgrenze, wie in Abbildung 4 zu sehen ist, erreicht wird. Es kann daher nicht von einer Strategie im eigentlichen Sinne gesprochen werden, da eine solche ein geplantes, längerfristiges Ziel verfolgt. Wichtig hierbei ist allerdings das spontane und schnelle Vorgehen, um den meist plötzlich auftretenden Fehler zu beheben.

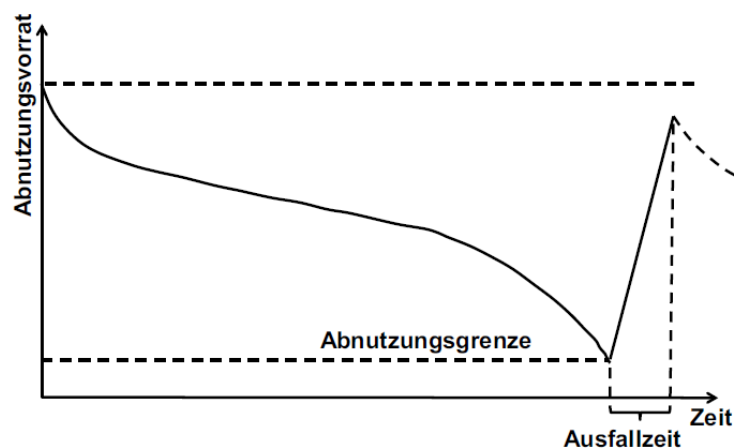


Abbildung 4: Schadensbedingte Instandhaltungsstrategie und deren Auswirkung auf den Abnutzungsvorrat (Pawellek 2016, S. 174)

Dadurch steigt die Notwendigkeit, bestimmte Ressourcen wie zum Beispiel Personal, Ausrüstung und Ersatzteile, die für den Schadensfall dauerhaft bereitzustellen. Diese Art der Instandhaltung besitzt damit die höchsten Ausfallzeiten und verursacht die meisten Ausfallfolgekosten im Vergleich zu den anderen Instandhaltungsstrategien. Nach Pawellek 2013 wird sie meist nur bei folgenden Anlagen eingesetzt: (Schenk 2010, S. 27; Mobley 2002, S. 2; Pawellek 2013, S. 130)

- Kaum genutzte Anlagen
- Anlagen, die bei Stillstand nicht zu Lieferschwierigkeiten führen
- Redundante Systeme
- Anlagen, die keine Sicherheitsanforderungen erfüllen müssen

Zeitgesteuerte periodische Instandhaltung:

Die zeitgesteuerte oder zeitbasierte Instandhaltung beruht auf dem Prinzip, dass die Instandhaltungsmaßnahmen der Komponenten in ereignis- oder zeitbezogenen Intervallen durchgeführt werden (z.B. Kalendertermin, Stückzahl, Betriebsstunden). Die Tätigkeiten können fast vollständig zuvor geplant werden, womit auch die Bereitstellung der dafür benötigten Instandhaltungsressourcen leichter erfolgen kann. Als ein Nachteil der periodisch vorbeugenden Instandhaltung kann die nicht vollständige Ausnutzung des Abnutzungsvorrates gesehen werden, da in der Regel die Komponenten zu früh getauscht werden. Dadurch kommt es zwar zu einer Senkung der Ausfallkosten, aber die Kosten für Ersatzteile steigen. Anwendung findet diese Strategie hauptsächlich, wenn Umwelt- und Sicherheitsfaktoren gefordert sind, oder wenn die erwartete Lebensdauer der unterschiedlichen Komponenten relativ genau bekannt ist. (Pawellek 2013, S. 128f; Leidinger 2014, S. 16f)

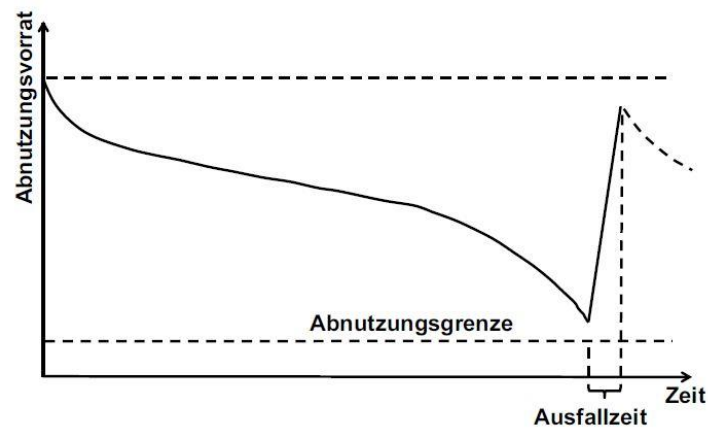


Abbildung 5: Zeitbasierte Instandhaltungsstrategien und deren Wirkung auf den Abnutzungsvorrat (Pawellek 2016, S. 175)

Abbildung 5 zeigt einen beispielhaften Verlauf des Abnutzungsvorrates über die Einsatzzeit. Es ist zu erkennen, dass nicht der komplette Abnutzungsvorrat aufgebraucht wird. Die Schwierigkeit der Methode liegt darin, die richtigen Intervalle für alle Komponenten einer Anlage zu finden und so einzuteilen, dass sie zu einem optimalen (kostenminimalen) Intervall während der Instandhaltung durchgeführt werden. Dieses Problem kann durch die zustandsorientierte Instandhaltung gelöst werden. (Matyas 2013, S. 108)

Zustandsorientierte Instandhaltung:

Durch diese Methode der Instandhaltung kann die zuvor beschriebene Problematik der Intervallfindung gelöst werden, da die Terminfindung aufgrund des technischen Zustandes der Komponente erfolgt. Es soll dadurch eine möglichst hohe Ausnutzung des Abnutzungsgrades und damit auch eine Erhöhung der Wirtschaftlichkeit dieser Komponente erreicht werden. Zur Bestimmung des Zustandes können geeignete Methoden zur Überwachung und Diagnose eingesetzt werden wie z.B. Inspektion, Prüfung, Online- oder Offlinediagnostik.

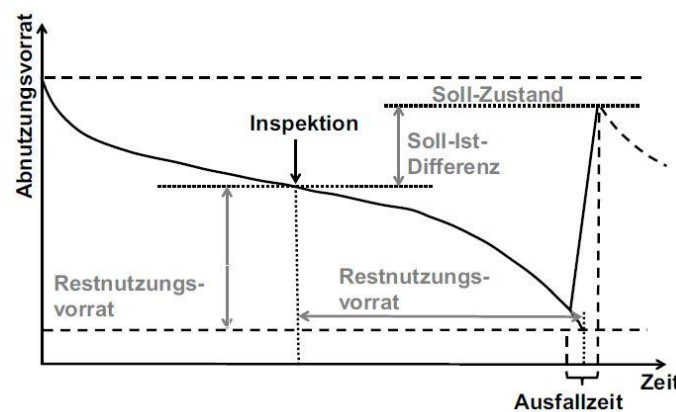


Abbildung 6: Zustandsbasierte Instandhaltungsstrategie und deren Auswirkung auf den Abnutzungsgrad
(Pawellek 2016, S. 176)

Wie in Abbildung 6 zu sehen ist, wird hier als Regelgröße für den Zeitpunkt der Instandhaltung der Restnutzungsvorrat herangezogen, der aus den bereitgestellten Zustandsinformationen (z.B. Inspektion) ermittelt wird. Damit kann erreicht werden, dass der Austausch zu einem optimalen Zeitpunkt, also kurz vor Eintritt der Störung, durchgeführt wird. (Schenk 2010, S. 30f; Pawellek 2013, S. 131; Matyas 2013, S. 109f)

Vorausschauende Instandhaltung:

Die Weiterentwicklung der zustandsbasierten Instandhaltung stellt die vorausschauende Instandhaltung dar. Es wird dabei versucht, auf sogenannte verdeckte Störungen, also potentielle Fehler genauer einzugehen, sie zu erkennen und in weiterer Folge eine Fortpflanzung dieser zu verhindern. Eine der Schwierigkeiten dieser Methode besteht darin zu entscheiden, ob die Maßnahmen überhaupt technisch umsetzbar sind bzw. sie sich auch wirtschaftlich lohnen. Diese Instandhaltungsmethodik hat somit das Ziel, das Ausfallrisiko durch zuvor durchgeführte Maßnahmen weitgehend zu senken. Die geplante und detaillierte Fehlersuche von verdeckten Funktionen einer Anlage ist eine der Maßnahmen der vorausschauenden Instandhaltung und wird je

nach gewünschter Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit, zulasten der Instandhaltungskosten, durchgeführt. (Matyas 2013, S. 121f; Schenk 2010, S. 31ff)

Welche dieser Strategien angewendet werden soll, wird einerseits von den Kosten für die Instandhaltung, andererseits von der geforderten Zuverlässigkeit der Anlage oder Maschine bestimmt. In der Regel erfolgt die Auswahl der Strategie oft auf Anlagenebene und bei technisch komplexen Anlagen sogar auf Komponentenebene. Es sollte ein optimaler Mix aus den genannten Instandhaltungsstrategien sein, der durch umfassende Analysen herausgefunden werden kann. (Matyas 2013, S. 106; Schenk 2010, S. 26, S. 34)

2.3.2 Konzepte

Aus den oben beschriebenen Strategien und mit Hilfe weitere Daten und Fakten, wurden eine Reihe unterschiedlicher Managementkonzepte für die Instandhaltung erstellt. Pawellek 2013 teilt diese in folgende fünf Konzepte ein, die heutzutage hauptsächlich verwendet werden. (Pawellek 2013, S. 4ff)

- Total Productive Maintenance (TPM)
- Reliability Centered Maintenance (RCM)
- Lean Maintenance (Schlanke Instandhaltung)
- Total Lifecycle Cost Strategy (TLC)
- Knowledge Based Maintenance (wissensbasierte Instandhaltung)

In dieser Arbeit werden die Begriffe TPM und RCM genauer erklärt, da diese bedeutend für die weiteren Kapitel sind.

Total Productive Maintenance (TPM):

Die Definition von TPM kann in der ursprünglichen Form als

„Produktivitätsorientierte Instandhaltung, die unter aktiver Teilnahme aller Mitarbeiter die Effizienz der Anlagen kontinuierlich verbessert“ (Matyas 2013, S. 191)

verstanden werden. Dadurch sollen die Maximierung der Gesamtanlageneffektivität (Kennzahl OEE¹) und die Vermeidung von Wirkverlusten unter Miteinbeziehung aller Mitarbeiter (vom Mitarbeiter im Werk bis hin zum Top-Manager) erreicht werden.

¹ Overall Equipment Efficiency: Verfügbarkeitsgrad x Leistungsgrad x Qualitätsfaktorgrad (May, Koch 2008, 245ff)

Ein Weg diese Ziele zu erreichen, kann die Übertragung von Verantwortung an den Mitarbeiter für beispielsweise die eigene Maschine/Anlage sein, um damit seine Motivation zu steigern. Als eine weitere Möglichkeit kann die Vermeidung der unterschiedlichen Verlustquellen, wie z.B. Anlagenausfälle, Anlaufverluste oder Prozessfehler gesehen werden. Dafür wurde das 5-Säulen-Modell (5 S-Modell) entwickelt, welches zur Umgehung, beziehungsweise Vermeidung der zuvor erwähnten Verluste. (Pawellek 2013, S. 200ff; Matyas 2013, S. 200ff; Biedermann 2015, S. 47)

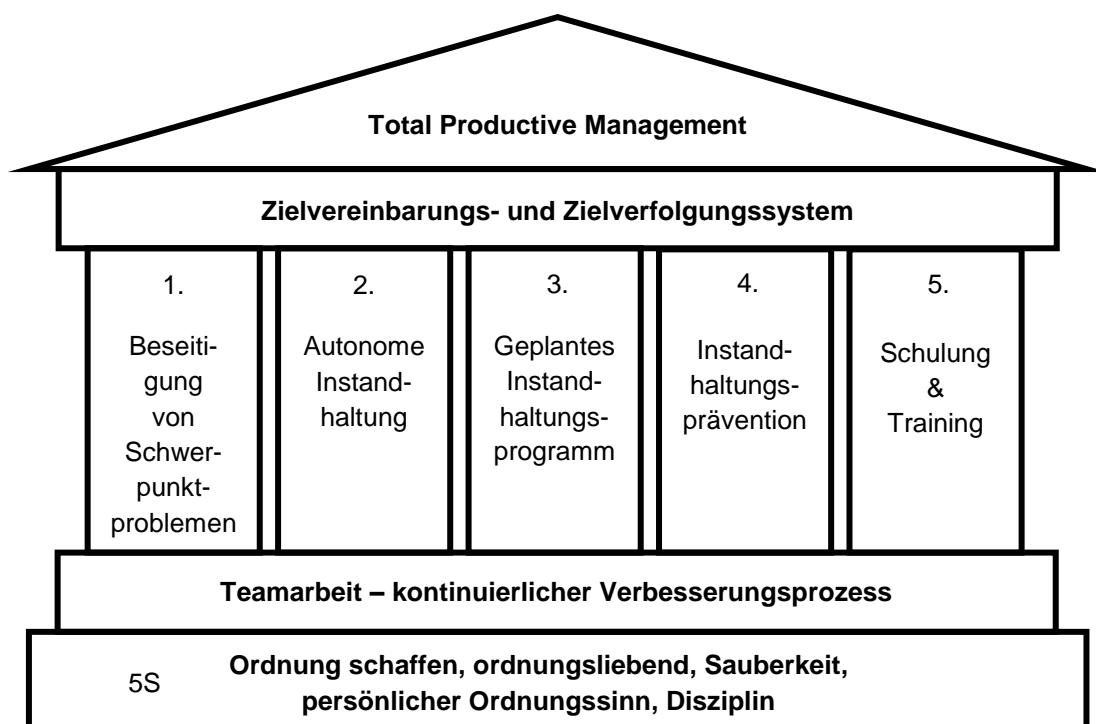


Abbildung 7: Die 5 Säulen von TPM (Matyas 2013, S. 200; Pawellek 2013, S. 5)

Die 5S beziehen sich auf die Wörter der untersten Ebene, die im japanischen alle mit einem S beginnen und das Fundament für die Maximierung der Gesamtanlageneffektivität bilden. Eine Stufe darüber befinden sich die kontinuierlichen Verbesserungsprozesse, die durch Teamarbeit in kleinen Schritten die Grundlage für die fünf Säulen sind. Die einzelnen Säulen stellen die unterschiedlichen Teilziele dar, um TPM erfolgreich einsetzen zu können. Zusammengehalten werden die Säulen durch das Dach, die Zielvereinbarungen und Zielverfolgungssystemen. (Matyas 2013, S. 200; Pawellek 2013, S. 5)

Reliability Centered Maintenance (RCM)

Unter RCM versteht man die zuverlässigkeitsorientierte Instandhaltung, bei der neben der ausfallorientierten Strategie auch die vorrausschauende Instandhaltung sehr von Bedeutung ist. Bei diesem Konzept sollte vorab geprüft werden, ob vorbeugende Maßnahmen nicht teurer sind als der Maschinenausfall und dessen Nachfolgekosten. Neue Aspekte, wie unterschiedliche Ausfallverhalten von nicht baugleichen Komponenten sind bei RCM hinzugekommen. Davor wurde bei der reaktiven Instandhaltung nur von einer einzigen Ausfallkurve ausgegangen, bei der erst am Ende der Lebensdauer ein Anstieg der Ausfälle erkennbar war. In einer Weiterentwicklung wurde die sogenannte „Badewannenkurve“ eingeführt, die zu Beginn und am Ende des Lebenszyklus eine höhere Ausfallwahrscheinlichkeit aufweist. Das RCM-Modell geht über diese eine Überlegung des Ausfallrisikos hinaus und unterscheidet zwischen sechs verschiedene Varianten von Bauteil- oder Anlagenausfällen. Die unterschiedlichen Ausfallsmodelle sind notwendig, um das tatsächliche Verhalten einer Anlage zu untersuchen und zu analysieren. (Biedermann 2015, S. 47; Pawellek 2013, S. 8)

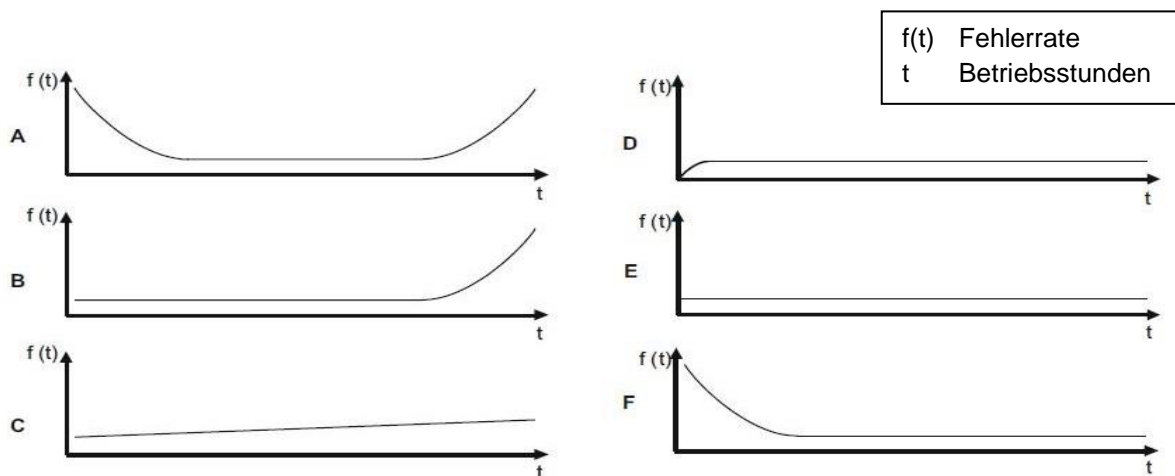


Abbildung 8: Die sechs verschiedenen Ausfallkurven (Pawellek 2013, S. 8)

3. Zustandsüberwachung

Aufgrund der fokussierten Aufgabenstellung wird zu Beginn dieses Kapitels das sogenannte „Condition-based Monitoring“ oder auch „Condition Monitoring“ (deutsch: „zustandsbasierte Überwachung“ oder „Zustandsüberwachung“) beschrieben. Dabei wird besonders auf die Ziele und die Möglichkeiten dieser Methode eingegangen. Im Hinblick auf den Werkzeugverschleiß von Bearbeitungsmaschinen, werden weiterführend die verschiedenen Überwachungsmöglichkeiten genauer beschrieben und Varianten einer Überwachung, speziell von zerspanenden Bearbeitungen und deren Wirkprinzipien, erklärt. Anschließend werden die heutzutage dafür verwendeten Sensoren und deren Einsatzgebiete zusammengefasst. Auf den Einsatz der Thermografie im Bereich der Zustandsüberwachung und auf die Werkzeugzustandsüberwachung wird im Abschnitt 3.2.3 näher eingegangen. Bei der Bearbeitung von Bauteilen kommt es durch unterschiedliche Faktoren zu einem Verschleiß des Werkzeuges und zu einer damit verbundenen Temperaturveränderung, deren Ursachen in dieser Arbeit angeführt sind.

Da man Thermografie häufig zur Messung von Temperaturfeldern einsetzt, wird zuerst noch auf die Temperaturmessung und auf deren Messverfahren Bezug genommen. Um die Vorgänge der bildgebenden Thermografie besser verstehen zu können, sind ab Kapitel 3.3.3 die physikalischen Grundlagen erklärt, anschließend die verschiedenen Geräte und die in dieser Arbeit verwendete Art von Wärmebildapparatur beschrieben. Um ein thermografisches Bild auswerten zu können, werden zum Schluss die für die Messsignalverarbeitung und Bildauswertung unterschiedlichen Verfahren angeführt.

3.1 Grundlagen der Zustandsüberwachung

In Kapitel 2.3.1 wurde schon auf die zustandsorientierte Instandhaltung eingegangen. Dabei wird versucht, möglichst genau den Zustand eines Objektes zu kennen, um mögliche Instandhaltungsmaßnahmen am Ende des Abnutzungsvorrates durchzuführen. Die Zustände können durch sogenannte Anlagenüberwachungen und Anlagendiagnosen, in der Literatur auch oftmals als „technische Diagnostik“ oder „Condition Monitoring (CM)“ bezeichnet, ermittelt werden. In der Industrie werden solche Systeme unter dem Begriff „CM -Systeme“ zusammengefasst und werden bei zunehmender Komplexität der Anlagen eingesetzt. Durch die frühzeitige Erkennung von Fehlern und

Störungen kann der Einsatz solcher Systeme die Verfügbarkeit einer Anlage optimieren. (Schenk 2010, S. 132; Matyas 2013, S. 111f)

Ziele des Condition Monitoring (CM):

Als Ziele von CM gelten neben der Optimierung der Verfügbarkeit, auch die Diagnose von Schädigungsverläufen und Grenzwertüberwachung, sowie die frühe Erkennung potenzieller Fehler und das Verhindern von Anlageausfällen. Diese Früherkennung hilft vor allem bei der Planung der Instandhaltung, um zeitgerecht die erforderlichen Maßnahmen zu setzen und somit Folgeschäden zu vermeiden. Mit den zusätzlichen Informationen aus der Überwachung können beispielsweise anstehende Instandsetzungen von Komponenten dann erfolgen, wenn bei anderen Bauteilen Wartungsarbeiten durchgeführt werden müssen. Die Anwendung eines CM-Systems kann somit zu einer Verbesserung der Kostensituation führen, indem ein Kompromiss, zwischen möglicher Kostenreduktion durch längerer Verwendung der Komponenten und den technisch dringend nötigen Maßnahmen für einen störungsfreien Betrieb, gefunden wird. (Pawellek 2016, S. 160ff; Schenk 2010, S. 132ff)

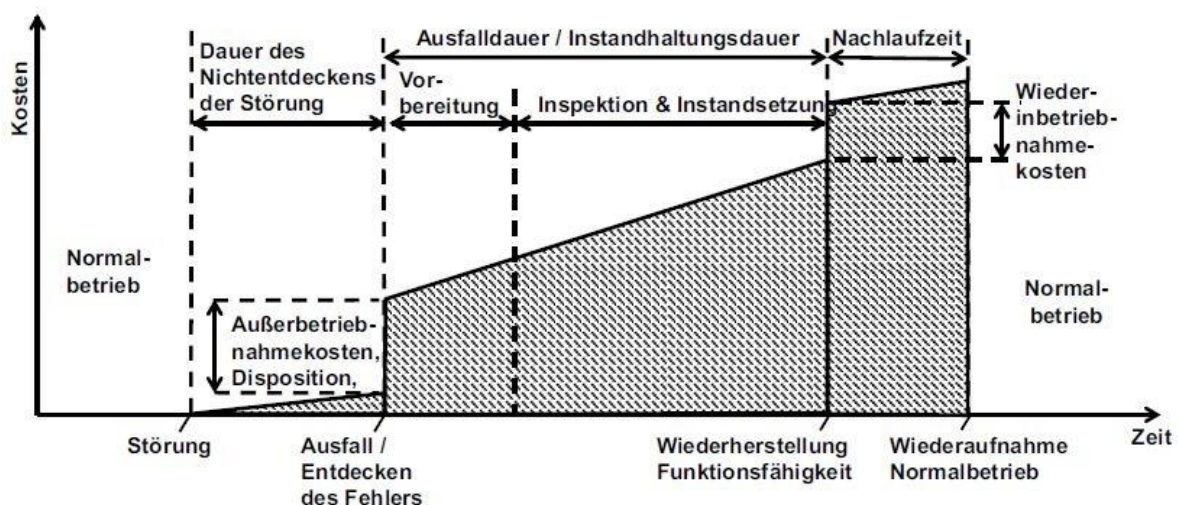


Abbildung 9: Kostenentwicklung eines störungsbedingten Anlageausfalles ohne CM-System (Leischnig 2009, S. 50)

In der Abbildung 10 ist diese mögliche Kostenersparnis zu erkennen. Die obere Abbildung 9 zeigt die Kosten bei einer Störung ohne ein implementiertes CM-System, die untere die Kosten bei der gleichen Anlage mit einem integrierten CM-System im Vergleich zu einer Anlage ohne dieses System. Mit dem CM-System kann schon vor dem eigentlichen Störfall ein Verschleiß der Komponente erkannt werden und in weiterer Folge können dementsprechende Instandhaltungsmaßnahmen geplant werden.

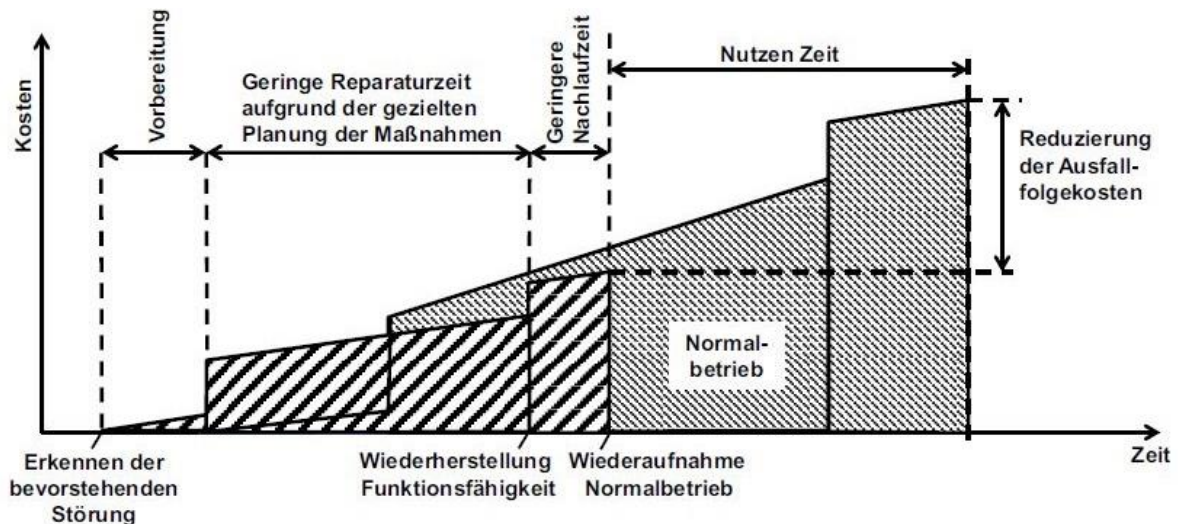


Abbildung 10: Kostenentwicklung eines störungsbedingten Anlageausfalles mit und ohne CM-System (Leischnig 2009, S. 50)

Aufgrund der frühzeitigen Planung lassen sich die eigentlichen Tätigkeiten der Instandhaltung schneller und effizienter durchführen, da zum Beispiel die dafür benötigten Mitarbeiter und die Ersatzteile schon bereitgestellt wurden.

Für die Einführung eines CM-Systems stellt sich nun die Frage, welche Möglichkeiten der Überwachung zum Einsatz kommen können. Laut Matyas 2013 kann eine Einteilung in folgenden Zustandsüberwachungsmethoden erfolgen, die nachstehend kurz beschrieben werden:

- Zustandsüberwachung durch den Menschen
- Condition Monitoring mit Sensoren
- Online- und Offlineüberwachung

Zustandsüberwachung durch den Menschen:

Einer der einfachsten Wege eine Zustandsüberwachung durchzuführen, ist eine Überprüfung durch den Menschen. Dazu kann beispielsweise das menschliche Ohr dienen, da es ein sehr hochentwickeltes Organ im menschlichen Körper ist. Ein geschultes Ohr kann kleinste Veränderungen im Klang einer Maschine oder Anlage erkennen, was zum Vorteil hat, dass ein Fehler sehr schnell und ohne große Messmittel identifiziert werden kann. Als eine weitere Möglichkeit kann die visuelle Inspektion für eine technische Diagnose gesehen werden. Hierbei wird eine optische Prüfung der einsehbaren Bauteile und Komponenten hinsichtlich geometrischen Abweichungen, Flüssigkeitsständen, Dichtheit oder Korrosion durchgeführt. Allerdings benötigen diese Methoden sehr viel Erfahrung und können nicht als 100%ige Überwachung herangezogen

werden, da sie nur eine subjektive Bewertung liefern oder die Zugänglichkeit nicht gegeben ist, um die mögliche Ursache des Schadens zu erkennen. Für ein objektives Bewertungssystem können Methoden verwendet werden, die auf physikalischen Grundlagen basieren. (Matyas 2013, S. 113; Schenk 2010, S. 132)

Condition Monitoring mit Sensoren:

Für jene Bauteile oder Komponenten, die nicht für die zuvor erwähnte Inspektion durch den Menschen zugänglich sind, oder deren Komplexität eine Zustandserkennung nicht möglich machen, werden Systeme eingesetzt, die auf zu messenden Größen beruhen. Es gibt kaum eine Messgröße, die nicht in irgendeiner Form aufgezeichnet werden kann und daher kommen eine Vielzahl von Sensoren für die Aufzeichnung und Auswertung zum Einsatz. Für die Verständlichkeit zeigt die Tabelle 1 die technischen bzw. physikalischen Prinzipien und die dazugehörigen Messmethoden.

Tabelle 1: Technisches Prinzip und zugehörige Diagnoseart (Pawellek 2016, S. 155)

Messprinzip	Anwendung Diagnose
akustisch	Körperschallanalyse
ultraschallakustisch	Abstands-, Dickenmesssysteme, Füllstandmessung, Ultraschallspektrometrie zur Partikelgrößenanalyse
induktiv	Wegaufnehmer, Beschleunigungsaufnehmer, berührungsloser Dreh- schwingungsaufnehmer,
kapazitiv	Kapazitiver Druck-, Kraft- und Beschleunigungsaufnehmer
magnetostatisch	Hall-Sonde
piezoelektrisch	Piezoelektrischer Kraft- und Beschleunigungsaufnehmer
optisch	Photometrischer Öl- und Trübungsmelder, Infrarotsensor für berührungs- lose Temperaturmessung
laseroptisch	Laser-Distanzmesser (Phasenvergleichsverfahren, Autokorrelation) Laser- Abstandsmesssystem
thermoelektrisch	Thermoelement
Widerstand	DMS-Kraftaufnehmer (z.B. Wägezellen), DMS- Drehmomentenaufnehmer

Aufbauend auf diese Messmethoden werden für die unterschiedlichsten Bereiche Sensoren eingesetzt, die die physikalischen Messgrößen aufnehmen und in elektrische Signale umwandeln. Die Digitalisierung erfolgt in sogenannten Analog-Digital-Wandlern, welche die Daten weiter mit einer geeigneten Software untersuchen und diese so ausgewertet werden können. Wie in Abbildung 11 zu erkennen ist, gibt es meist eine Zwischenspeicherung der Daten, die letztendlich weiter zur Software geleitet werden. Es kann zuvor schon zu einer Filterung kommen, um so die erhaltenen Daten von

Messfehlern zu bereinigen und die anfallende Menge zu begrenzen. Mit einer geeigneten Software lassen sich Fehler bzw. Abweichungen von einem Normalzustand erkennen und die gesammelten Daten können genutzt werden, um Instandhaltungsmaßnahmen einzuleiten. Der Aufbau von CM-Systemen kann von einfachen Grenzwertüberwachungen einzelner Komponenten bis hin zu der Analyse und Auswertung komplexer Baugruppen reichen. (Pawellek 2016, S. 154f; Matyas 2013, S. 113f; Schenk 2010, S. 132ff)

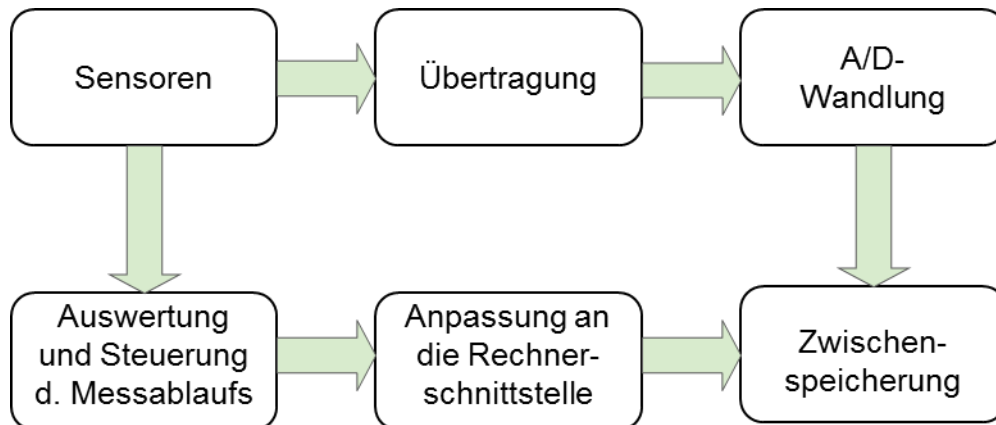


Abbildung 11: Messkette zur Zustandsüberwachung (in Anlehnung an Matyas 2013, S. 114)

Online- und Offlineüberwachung:

Der Unterschied zwischen der Online- und Offlinezustandsüberwachung liegt darin, dass bei den Offlinesystemen die Daten auf einem Datensammler gesammelt werden und erst zu einem späteren Zeitpunkt ausgewertet werden. Dies kann durchgeführt werden, wenn die Abnutzung von Komponenten bei einem Prozess bekannt ist und zeitlich langsam abläuft. Die Daten können daher in periodischen Zeitabständen überprüft werden, um anschließend die Abnutzung messen und bewerten zu können. Auch die Datenmenge kann dadurch geringer gehalten werden als bei der Online-Methode, da es meist nur zu einer periodischen Aufnahme der Daten kommt. Beim Online-System werden die, durch die Sensoren erfassten Daten direkt in das Bewertungsprogramm übergeführt. Zumeist werden sie aber zuvor schon gefiltert, um den Rechen- und Speicheraufwand geringer zu halten. Damit kann die Bewertung von Bauteilen oder Komponenten, deren Ausfall einen starken Einfluss auf die Zuverlässigkeit der Anlage haben, schneller erfolgen und es können die richtigen Maßnahmen gesetzt werden, um eine ungeplante Störung zu vermeiden. (Schenk 2010, S. 192; Matyas 2013, S. 114; Pawellek 2016, S. 156f)

3.2 Zustandsüberwachung von Werkzeugen

Für die Herstellung unterschiedlicher Güter und Bauteilen wird heutzutage in der Produktionstechnik für die Fertigung eine Vielzahl verschiedener Werkzeugmaschinen eingesetzt. Eine genaue Definition einer Werkzeugmaschine ist daher nicht so einfach. Wird davon ausgegangen, dass eine Werkzeugmaschine mit Hilfe eines Werkzeuges ein Werkstück bearbeitet, trifft diese Aussage auch bei anderen Maschinen zu, die ein Werkzeug besitzen und damit Gegenstände bearbeiten. Beispielsweise besitzt eine Brotschneidmaschine ein Werkzeug, mit dem das Brot in Scheiben geschnitten werden kann, aber solch eine Maschine wird nicht als Werkzeugmaschine bezeichnet. Jene Maschinen, die Werkstücke mittels Werkzeugen herstellen, welche keine Halbzeuge oder Verbrauchsgüter sind, sondern meist Teile sind, die zu einem späteren Zeitpunkt in anderen Maschinen, Baugruppen oder Gütern eingebaut werden, werden als Werkzeugmaschinen bezeichnet. In Abbildung 12 werden die Werkzeugmaschinen nach ihrem Fertigungsverfahren eingeteilt. (Hirsch 2016, S. 1ff; Neugebauer 2012, S. 4f; Bahmann 2013, S. 1; Klocke, König 2008, S. 405f)

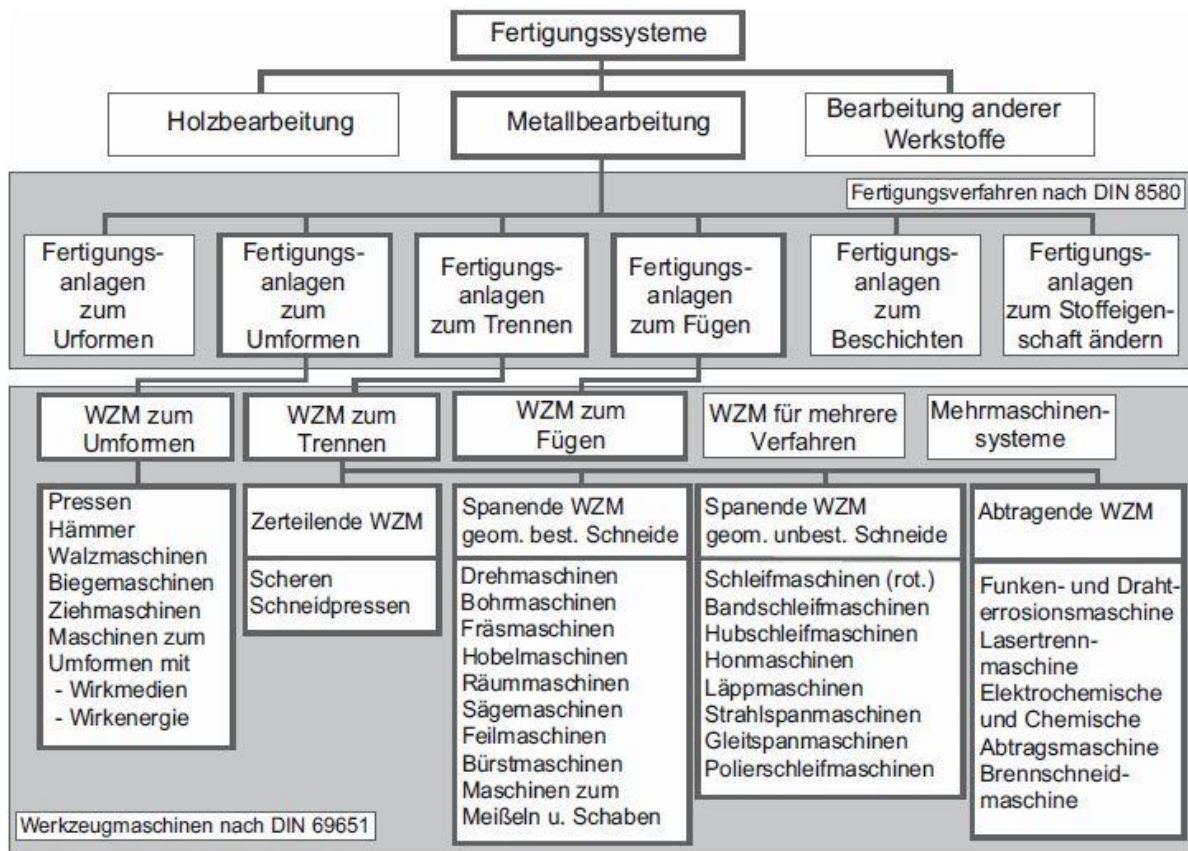


Abbildung 12: Gliederung der Werkzeugmaschinen (Weck, Brecher 2005, S. 16)

Eine weitere Einteilung der Werkzeugmaschinen kann noch in spanende, umformende Maschinen und nach ihrem Automatisierungsgrad erfolgen. Verfügt eine Werkzeugmaschine über mehrere Fertigungsverfahren (z.B. Fräsen und Bohren), so wird bei der Bezeichnung der Maschine der Ausdruck „Bearbeitungs-“ oder „Fertigungs-“ davor gesetzt. Aus der in Abbildung 13 dargestellten Einteilung nach dem Automatisierungsgrad ist zu entnehmen, dass beispielsweise eine Anlage mit automatisiertem Antrieb für Vorschub- und Schnittbewegung und integriertem Werkzeugspeicher, welche auch noch verschiedene Fertigungsverfahren durchführen kann, als Bearbeitungszentrum bezeichnet werden kann. (Weck, Brecher 2005, S. 4)

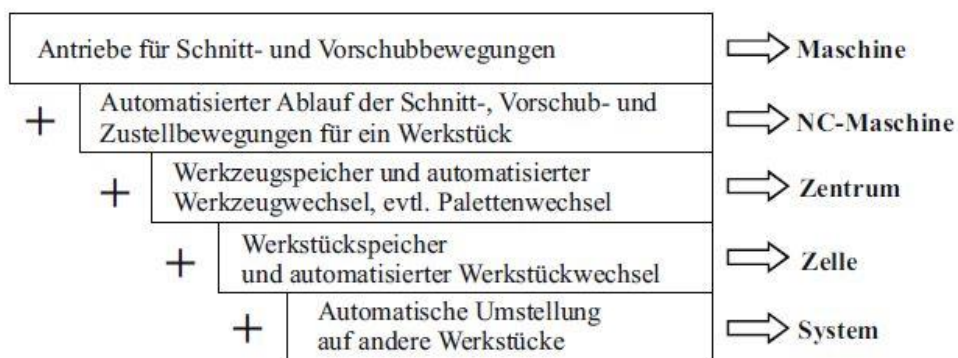


Abbildung 13: Klassifizierung der Werkzeugmaschinen nach dem Automatisierungsgrad (Hirsch 2016, S. 4)

Für die Herstellung der zuvor schon genannten Bauteile, wird eine Vielzahl verschiedener Werkzeuge verwendet. Durch die hohe Bearbeitungsgeschwindigkeit und -genauigkeit werden die verwendeten Werkzeuge in der Produktion sehr stark beansprucht und teilweise bis an ihre Grenzen belastet. Der Abnutzungsgrad (umgekehrter Restnutzungsvorrat) ist daher ein sehr wichtiger Faktor, um eine maximale Produktivität zu erreichen. Um diesen Faktor am besten ausnutzen zu können, eignet sich die Zustandsüberwachung der Werkzeuge, um den hohen Anforderungen gerecht zu werden und um Störungen oder Ausfälle zu vermeiden. Mit einer zustandsbasierten Überwachung kann auch bei unbeaufsichtigter Bearbeitung eine höhere Prozesssicherheit erreicht werden. (Weck, Brecher 2006, S. 267)

Um nun den Zustand eines Werkzeuges bestimmen zu können, sind die zwei Teilaufgaben der Überwachung noch genauer zu erklären. Die Überwachung wird in die Zustandserfassung und den Zustandsvergleich eingeteilt. Die Erfassung beinhaltet die Aufnahme eines Kennwertes, der den derzeitigen Zustand des zu überwachenden Teiles wiedergeben soll.

Dieser Wert (Ist-Zustand) soll anschließend mit einem vorgegebenen Soll-Zustand verglichen werden. Die Schwierigkeit an dieser Methode liegt in der Findung des Sollwertes und kann teilweise nur durch Erfahrungswerte oder durch Lernprozesse in der laufenden Produktion ermittelt werden. Mit dem Zustandsvergleich können zwei weitere Aufgaben erfüllt werden. Einerseits können damit Grenzwerte für die Einhaltung vorgegebener Toleranzen überprüft, andererseits zeitliche Verläufe aufgezeichnet und bewertet werden.

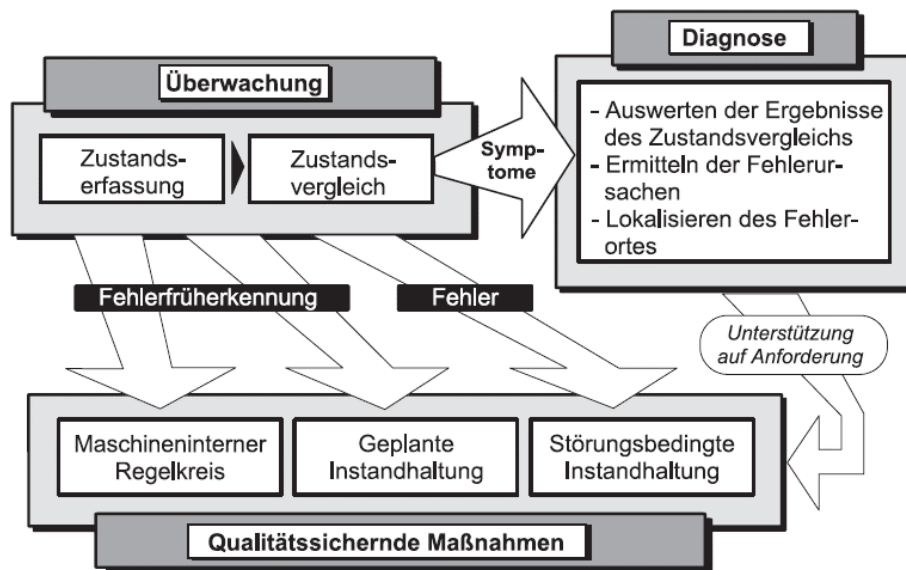


Abbildung 14: Aufgaben und Maßnahmen im Umfeld der Fertigung aus Sicht der Qualitätssicherung (Weck, Brecher 2006, S. 269)

Die Abbildung 14 zeigt die weiteren Vorgänge, die mit Hilfe der Teilaufgaben der Überwachung, fortgeführt werden können. Mit dem Zustandsvergleich können die sogenannten „Symptome“ als Ausgangswert der Diagnose verwendet werden, um beispielsweise frühzeitig den Ort oder die Ursache der auftretenden Störung zu ermitteln. Durch diese beiden Punkte können nun Maßnahmen besser und effizienter geplant und durchgeführt werden und somit zu einer Steigerung der Anlagenverfügbarkeit beitragen. (Weck, Brecher 2006, S. 268ff)

3.2.1 Möglichkeiten zur Überwachung von zerspanenden Werkzeugen

Der Überwachung von Fertigungsabläufen in der Produktion wird immer mehr Bedeutung zugeschrieben, da ein ungestörter Prozess die Produktivität und die Kapazitätsauslastung steigert. Bestimmte Störungen lassen sich allerdings nicht vermeiden, ein Werkzeugbruch oder eine unterschiedliche Werkstoffzusammensetzung des bearbeiteten Bauteils können dafür die Ursachen sein. Vor allem bei Werkzeugbrüchen kann es zu enormen Schäden am Werkstück, Werkzeug oder der Maschine kommen, wenn

Tabelle 2: Zuordnung von Messgrößen zu physikalischen Funktionsprinzipien (Klocke, König 2008, S. 387)

Physikalisches Funktionsprinzip zur Prozessbeschreibung	Zugehörige Messgrößen
mechanisch (Bewegung, Verlagerung, Steifigkeit)	Position, Beschleunigung, Geschwindigkeit, Kraft, Moment, Druck, etc.
thermisch (kinetische Energie von Atomen und Molekülen)	Temperatur, Wärmefluss, spezifische Wärme, Wärmeleitfähigkeit, etc.
elektrisch (elektrisches Feld)	Spannung, Strom, Ladung, Leitfähigkeit, etc.
magnetisch (magnetisches Feld)	Permeabilität, magnetischer Fluss, etc.
Strahlung (elektromagnetische Strahlung)	Energie, Intensität, Emission, Reflektion, Durchlässigkeit, etc.
chemisch (Kräfte zwischen Atomkernen und Elektronen, Bindungsenergien von Molekülen)	Chemische Komponenten, Konzentrationen, etc.

Bei den Messmethoden muss noch zwischen direkten und indirekten Methoden unterschieden werden. Die direkte Messung erfolgt durch einen unmittelbaren Vergleich der zu messenden Größen mit einer bekannten Normalen derselben physikalischen Größe. Hierbei kommt es zu dem Problem, dass die Sensorik direkt an der zu messenden Stelle angebracht werden muss und dies nicht immer möglich ist. Bei der indirekten Messmethode wird eine Hilfsgröße erfasst, welche in einem beschreibbaren und bekannten Zusammenhang mit der zu bestimmenden Größe steht und somit auf diese zurückgeführt werden kann. Die Problematik dieser Methode ist, dass durch andere Prozesseinflüsse die Zuordnung der zu messenden Größe schwierig werden kann. Welche dieser beiden Methoden sich besser eignet, lässt sich im Allgemeinen nicht sagen und muss für den jeweiligen Anwendungsfall gesondert betrachtet werden.

Nachfolgend werden die dafür geeigneten Sensoren und ihre Prinzipien dargestellt, wobei auf die Thermografie im Allgemeinen als Überwachungsmöglichkeit genauer eingegangen wird.

3.2.2 Sensoren zur Überwachung von zerspanenden Werkzeugen

Dehnungsmessstreifen:

Sie können mechanische Dehnung in einen elektrischen Widerstand umwandeln. Dadurch lassen sich damit indirekt beispielsweise Drücke, Kräfte oder Drehmomente messen. Die Dehnung von metallischen Teilen kann für den elastischen Bereich nach dem Hook'schen Gesetz ermittelt werden und ist proportional zur Belastung. (Keil 2017, S. 13; Klocke, König 2008, S. 338f)

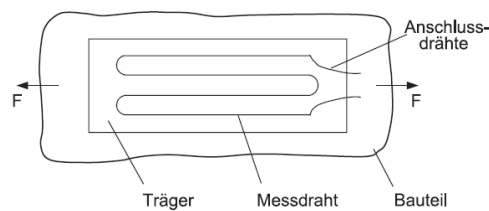


Abbildung 16: Aufbau von Dehnungsmessstreifen (Weck, Brecher 2006, S. 282)

Piezoelektrische Kraftmesselemente:

Durch die elektromagnetische Wechselwirkung zwischen elektrischem und mechanischem Zustand von Kristallen (z.B. Quarz) entsteht die Piezoelektrizität. Beim Einwirken einer mechanischen Belastung, kommt es zu einer Deformation des Kristallgitters und die Gitterbausteine verschieben sich gegeneinander. Dabei kommt es zu einer Ladungsverschiebung, die mit Hilfe eines Ladungsverstärkers in eine Spannung umgewandelt und gemessen werden kann. In Abbildung 17 ist dieses Prinzip grafisch dargestellt. (Weck, Brecher 2006, S. 282; Klocke, König 2008, S. 390)

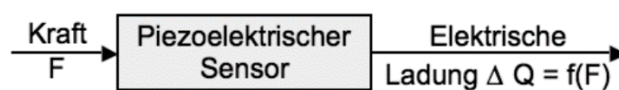


Abbildung 17: Sensorprinzip zur Kraftmessung (Czichos 2008, S. 96)

Körperschall- und Beschleunigungssensoren:

Diese Art von Sensoren wird bei der Messung von dynamischen Prozessen in der Zerspanung verwendet. Sie können Körperschallschwingungen aufnehmen, die von einem defekten Element oder vom Bearbeitungsprozess angeregt werden. Der Beschleunigungsaufnehmer funktioniert nach dem Prinzip, dass er über den Zusammenhang $F = m \cdot a$ mit bekannter Masse m die Beschleunigung in Sensorlängsrichtung indirekt misst. Allerdings werden auch schon Beschleunigungssensoren verwendet,

die auf dem piezoelektrischen Effekt beruhen, da diese Sensoren eine Linearität in großen Frequenzbereichen aufweisen. Abbildung 18 zeigt den Aufbau eines solchen Sensors mit den verschiedenen Komponenten im Halbschnitt. (Weck, Brecher 2006, S. 290f; Klocke, König 2008, S. 297)

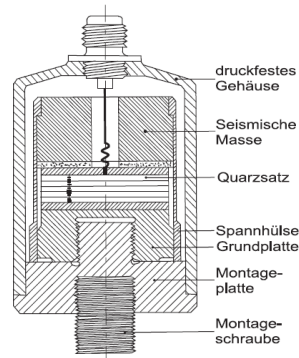


Abbildung 18: Aufbau eines piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmers (Weck, Brecher 2006, S. 291)

Strom- und Leistungsmessung:

Bei der Bearbeitung kommt es in Fertigungsprozessen zu einer Verschiebung oder Verlagerung der Zerspankomponenten, die wiederum eine Änderung in der Strom- und Leistungsaufnahme der Haupt- und Vorschubantriebe zur Folge hat. Das Anwendungsgebiet liegt hauptsächlich in der Werkzeugbrucherkennung und der Werkzeugkollision. Zur Verschleißerkennung müssen ausreichend große Kraftänderungen erfolgen, um diese Methode effizient anwenden zu können.

Temperatursensoren:

Für die Messung der thermischen Belastung in der Kontaktzone bei der Bearbeitung mit zerspanenden Werkzeugen, kommen immer häufiger Temperatursensoren zum Einsatz. Hierbei werden Widerstandsthermometer, Thermoelemente und heutzutage immer häufiger Thermografiekameras eingesetzt.

Thermoelemente nutzen den thermoelektrischen Effekt zwischen zwei leitenden, unterschiedlichen Metallen. Diese werden mit einander verbunden und dabei entsteht eine von der Temperatur abhängige elektrische Spannung, die sogenannte Thermospannung, die dann gemessen wird und auf die Temperatur zurückgeführt werden kann. Sie benötigen nur einen sehr kleinen Bauraum und reagieren schnell auf Temperaturänderungen. Ein Nachteil ist die sehr geringe, freiwerdende Thermospannung, die mit erhöhtem Aufwand verstärkt werden muss.

Widerstandsthermometer verwenden die Temperaturabhängigkeit des Widerstandes

von Leitern (oder Halbleitern) zur Messung. Diese Sensoren weisen eine annähernd lineare Kennlinie in einen sehr großen Messbereich auf. Je nach Leitermaterial besitzen sie einen unterschiedlich großen Einsatzbereich. (Weck, Brecher 2006, S. 297f; Klocke, König 2008, S. 402f)

Wie zuvor schon erwähnt, werden für die Temperaturmessung bei Zerspanungsprozessen immer häufiger Thermografiegeräte eingesetzt. Da in der Arbeit darauf abgezielt wird, den Einsatz einer speziellen Thermografiekamera für die Verschleißüberwachung zu untersuchen, wird insbesondere auf diese Thematik eingegangen und als eigener Unterpunkt hier angeführt.

3.2.3 Thermografie als Zustandsüberwachung

Als ein weiteres wichtiges Merkmal kann gesehen werden, dass sich die Thermografie als Überwachungsmöglichkeit in sehr vielen Bereichen einsetzen lässt. Die Thermografie wird derzeit nicht nur in der Industrie für Prozessüberwachungen und vorbeugende Instandhaltung eingesetzt, sondern eignet sich das Verfahren beispielsweise auch als Diagnosemöglichkeit in der Medizintechnik. Eine Anwendung stellt die Aufnahme der Körperoberfläche dar, um eine Analyse der Asymmetrien der Temperaturverteilung durchzuführen, die Hinweise auf Krankheiten geben kann. Die Abbildung 19 zeigt das thermografische Bild von einer Durchblutungskontrolle. Dabei kann erkannt werden, welche Bereiche der Handoberfläche stark oder weniger stark durchblutet

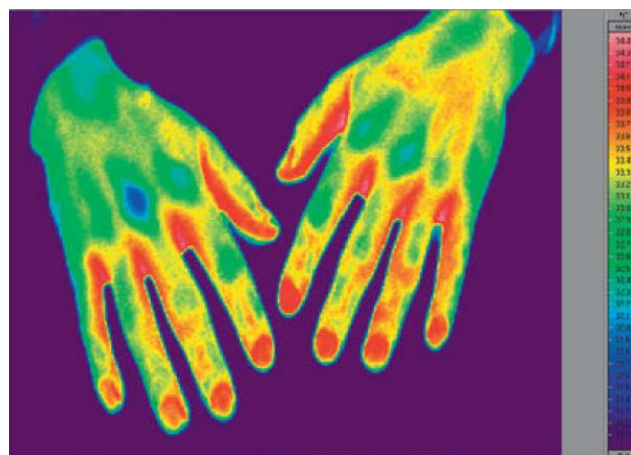


Abbildung 19: Darstellung der Temperaturverteilung auf der Handoberfläche zur Durchblutungskontrolle (Tränkle, Reindl 2014, S. 996)

werden und es lassen sich daraus eventuelle Durchblutungsstörungen ableiten. Eine weitere sehr verbreitete Anwendung ist die Mammographie, die auf eine mögliche Brustkrebserkrankung schließen lässt und heutzutage sehr häufig vor allem bei Frauen durchgeführt wird.

Ein weiterer sehr bekannter Bereich für die Zustandsüberwachung stellt die Gebäudethermografie dar. Sie wird vor allem für Bausubstanzenanalysen und der thermische Lecksuche bei Wärmedämmungen eingesetzt. (Tränkle, Reindl 2014, S. 994ff)

Thermografietemperaturmessung bei spanender Bearbeitung:

Es werden für die Messung der Temperatur von spanenden Werkzeugen grundsätzlich Arten von Geräten eingesetzt, die in der Industrie bereits verwendet werden. Aufgrund der hohen Temperatur, der relativ kleinen Kontaktzone zwischen Werkzeug und Werkstück, der hohen Beanspruchungen und des steilen Temperaturgefälles erweisen sich

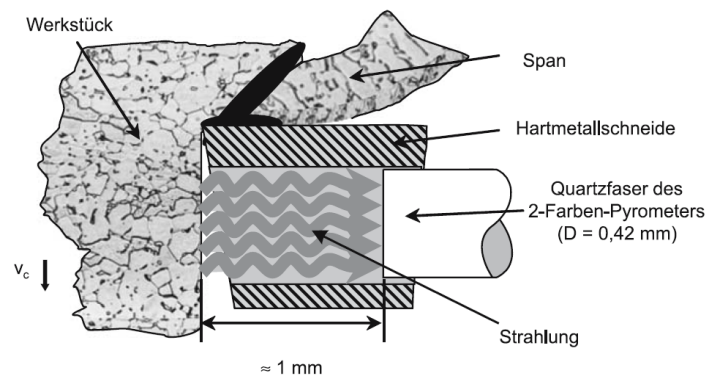


Abbildung 20: Temperaturmessung an der gefertigten Fläche eines Werkstückes
(Klocke, König 2008)

die Messungen als eher schwierig. Meist werden prinzipiell zwei Arten von Wärmestahlungsmessgeräten eingesetzt, deren Funktionsweise im Kapitel 3.3.4 detailliert beschrieben wird. Einerseits sind es die punktförmigen messenden Pyrometer, die nur einen sehr kleinen Bereich der Bearbeitung messen können. Sie haben den Vorteil, dass sie hochdynamisch und sehr genau absolute Temperaturen messen können. Um weitere Einflüsse gering wie möglich zu halten, muss der Sensor wie in Abbildung 20 sehr nahe beim Werkstück angebracht sein. Hierbei wird ein sogenanntes 2-Farben-Pyrometer oder auch Quotientenpyrometer eingesetzt, das zur Familie der Photonsensoren gehört. Die zweite Möglichkeit der Überwachung erfolgt mittels Thermografiekamera, die zu den Thermosensoren gehört. Der Hauptvorteil vom Einsatz dieser Geräte liegt darin, dass relativ große Messbereiche und bewegte Bilder der Zerspanung damit aufgezeichnet und ausgewertet werden können. Abbildung 21 zeigt die schematische Anordnung eines Messaufbaues bei einem Zerspanprozess von Stahl (Drehprozess).

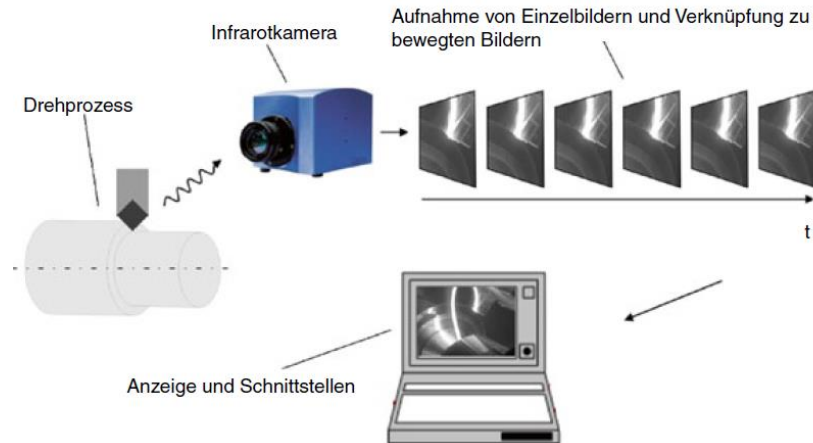


Abbildung 21: Anordnung einer Messeinrichtung zur Infrarotthermografie beim Drehen
(Denkena, Tönshoff 2011, S. 100)

Diese Gerätetechnik hat den Nachteil, dass sie bei der Temperaturmessung vom Emissionsgrad abhängig ist (siehe Kapitel 3.3.1). Dieser besitzt einen großen Einfluss auf die Messung und damit können Messfehler im Temperaturfeld hervorgerufen werden. Die Abbildung 22 zeigt ein Standbild des Drehprozesses, bei dem zu erkennen ist, dass sich die Infrarotstrahlung des abgehobenen Spans im Werkstück selbst wieder spiegelt. Somit ist eine Auswertung des Temperaturfeldes relativ komplex. Für beide Verfahren gilt, dass es bei den Messungen mit Verwendung von Kühlschmierstoffen zu erheblichen Schwierigkeiten kommen kann, da die optischen Eigenschaften dieser Stoffe bei Benetzung der Optik äußerst instabil sind. (Denkena, Tönshoff 2011, S. 98ff; Klocke, König 2008, S. 402ff)

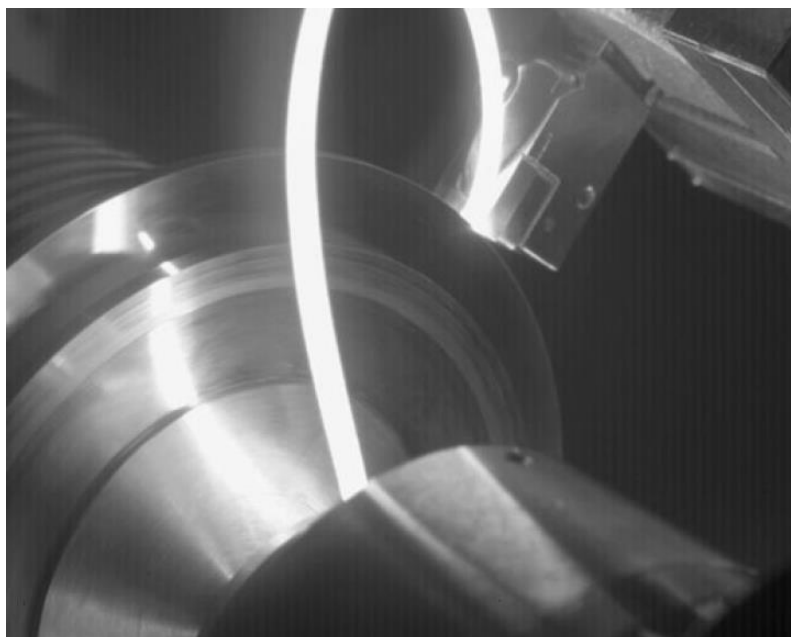


Abbildung 22: Infrarotbild eines Fließspans beim Drehen von Stahl (Denkena, Tönshoff 2011, S. 100)

Bei der Bearbeitung kommt es natürlich zu einem Verschleiß des Werkzeuges. Dieser Verschleiß hat mehrere Ursachen und eine Folge daraus ist auch eine Temperaturveränderung im Bereich der Bearbeitung. Diese Ursachen und Folgen werden im nächsten Abschnitt beschrieben.

3.2.4 Temperaturveränderungen durch Verschleiß eines Werkzeuges

Durch den Verschleiß eines Werkzeuges während der Verwendung kommt es zu einer Änderung der benötigten Kräfte, um eine Bearbeitung durchführen zu können. Aber nicht nur die Kräfte haben einen Einfluss auf den Verschleiß von Zerspanungswerkzeugen, sondern auch beispielsweise der Vorschub oder die Spanungsdicke. Somit wird die notwendige Energie zum Zerspanen als Wirkarbeit bezeichnet, die sich, wie in Abbildung 23, in Reibungs- und Verformungsarbeit aufteilt. Die Wirkarbeit wird dabei fast vollständig in Wärme umgesetzt und die Wärmequellen entstehen hauptsächlich aufgrund der Scher- und Reibarbeit des Werkzeuges.

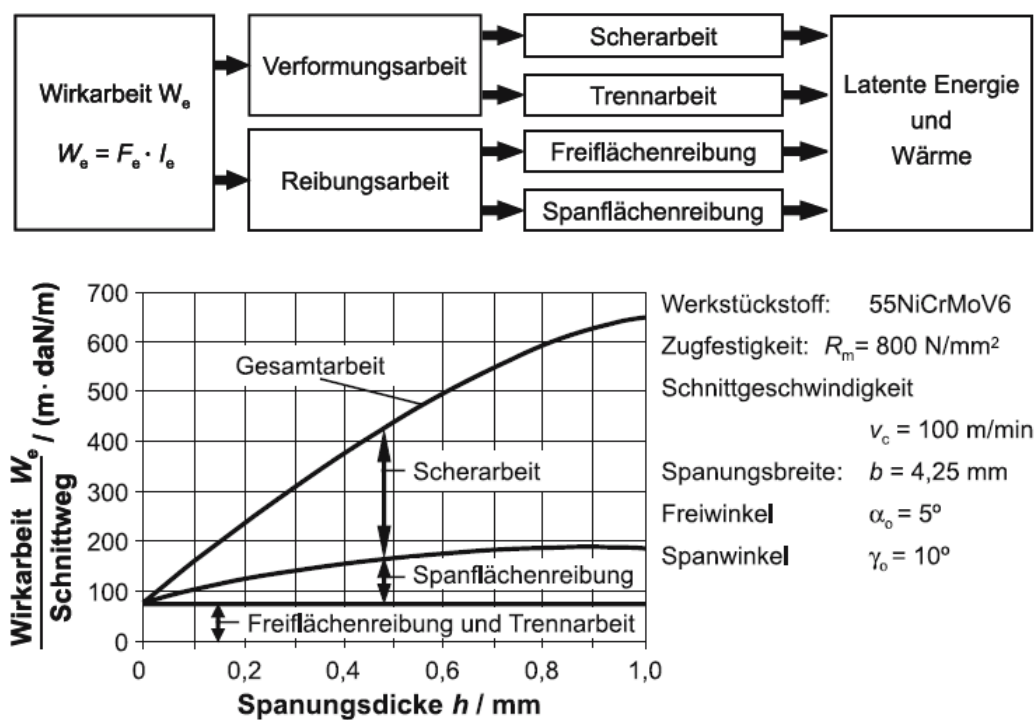


Abbildung 23: Aufteilung der Wirkarbeit beim Zerspanen in Abhängigkeit von der Spanungsdicke (Klocke, König 2008, S. 65)

Die Verteilung der entstehenden Wärmemengen ist in Abbildung 24 dargestellt und wird von Werkstück, Werkzeug und Span aufgenommen, wobei der größte Anteil vom Span abgeführt wird. Die prozentuelle Aufteilung gilt hier aber nur bei diesem speziellen Fall, bei der Bearbeitung von Stahl und unter bestimmten Parametern.

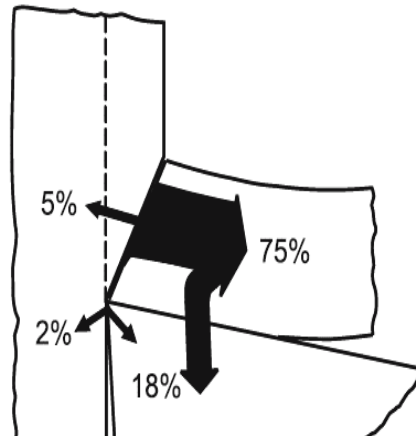


Abbildung 24: Wärmentwicklung in Werkstück, Span und Werkzeug bei der Stahlzerspannung (Klocke, König 2008, S. 66)

Durch die unterschiedlichen Beanspruchungen auf das Werkzeug (Mechanische, Thermische und Chemische) treten in weiterer Folge auch verschiedene Verschleißarten auf, die sich wiederum jeweils in anderen Verschleißmodelle äußern. Der Verschleiß führt, wie Eingangs schon erwähnt, zu einer höheren Wirkarbeit und dadurch auch zu einer höheren Reibarbeit. Diese Reibarbeit wird in Wärme umgewandelt und eben durch Span, Werkstück und Werkzeug abgeführt. Dadurch ist es auch naheliegend, dass bei einem verschlissenen Werkzeug, die entstehende Wärmemenge höher ist und sich damit auch die Temperatur in bestimmten Bereichen erhöhen wird. Die Höhe der auftretenden Temperaturen hängt vom zerspanenden Werkstoff, Schneidwerkstoff, den gewählten Schnittbedingungen, vom Kühlmedium und vom Werkzeugverschleiß ab. Ein direkter Vergleich zwischen den Temperaturen bei Zerspanungsprozessen, die in der Literatur bereits erfasst wurden, ist laut Klocke, König 2008 nur sehr schwer möglich, da sich die Bedingungen (zerspanender Werkstoff, Schneidwerkstoff usw.) zu stark unterscheiden. (Denkena, Tönshoff 2011, S. 90ff, S. 135ff; Klocke, König 2008, S. 58ff)

Bisher wurde auf die Zustandsüberwachung und deren Möglichkeiten, besonders im Hinblick auf die Thermografie näher eingegangen. Das nachfolgende Unterkapitel beschäftigt sich nun mit den Grundlagen der Thermografie im Allgemeinen, sowie mit der Temperaturmessung und der Messsignalverarbeitung.

3.3 Thermografie

Die Thermografie macht sich als Grundlage zum Nutzen, dass jeder Körper oberhalb des absoluten Nullpunktes ($> 0 \text{ K}$) eine thermisch angeregte elektromagnetische Strahlung aussendet. Die Strahlung bei nichttransparenten Festkörpern und Flüssigkeiten wird nur von der Oberfläche (wird als Wärmestrahlung bezeichnet) bestimmt, bei semitransparenten Stoffen hingegen, sind auch tiefer liegende Schichten beteiligt. Wie Tabelle 3 zeigt, sind für die Thermografie im Wesentlichen die Wellenlängen oberhalb des sichtbaren Bereiches von Interesse, also jene der Infrarotstrahlung.

Tabelle 3: Benennung der Wellenlängenbereiche der Temperaturstrahlung (Bernhard 2014, S. 1164)

Benennung	Kurzzeichen	Wellenlängenbereich		
Optische Strahlung		100nm	...	1 μm
- Ultraviolettstrahlung	UV	100nm	...	380nm
- Sichtbare Strahlung (Licht)	VIS	380nm	...	780nm
Infrarotstrahlung	IR		...	
- Nahes Infrarot	NIR	780nm	...	3 μm
- Mittleres Infrarot	MIR	3 μm	...	50 μm
- Fernes Infrarot	FIR	50 μm	...	1nm

Sogenannte Strahlungsthermometer (z.B. Pyrometer) können die mittlere Temperatur, abhängig von Messgerät und Anordnung, nur von einer bestimmten Messfläche ermitteln. Mit Hilfe der Thermografie lassen sich sicher allerdings Temperaturfelder über eine Vielzahl von Messpunkten eines Objektes berührungsfrei erfassen. Im Vergleich zu den Berührungsthermometern besitzen die Strahlungsmessgeräte unter anderem folgende Vorteile: (Bernhard 2014, 1163f; Herwig, Moschallski 2014, S. 167ff)

- Berührungslose Messung
- Messung relativ hoher Temperaturen ($> 1500^\circ\text{C}$)
- Messungen an ruhenden und bewegten Objekten
- Messungen schnell veränderlicher Temperaturen
- Erkennung und Ortung von Schäden
- Früherkennung von herannahenden Schäden von Bauteilen

Aus den eben genannten Gründen eignet sich die Thermografie des Weiteren für eine Überwachung des Zustandes von Werkzeugen mit geometrisch bestimmter Schneide.

Für das bessere Verständnis wird im nachfolgenden Abschnitt zuerst auf die Temperaturmessung im speziellen eingegangen.

3.3.1 Einführung in die Temperaturmessung

Die Temperaturmessung gilt als eine der am häufigsten eingesetzten Methoden zur Ermittlung von technisch-physikalisch Größen. Ein wichtiger Grund dafür ist, dass praktisch alle mechanischen, elektrischen, magnetischen und optischen Stoffeigenschaften temperaturabhängig sind. Auf der einen Seite hat diese Abhängigkeit zur Folge, dass die Temperatur bei der Messung von vielen anderen Größen mitgemessen

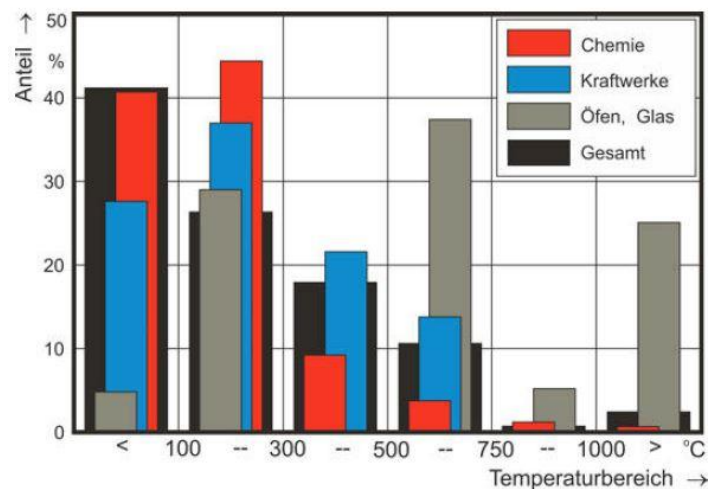


Abbildung 25: Häufigkeit der Temperaturbereiche bei Temperaturmessungen in der Verfahrenstechnik (Bernhard 2014, S. 2)

werden muss. Andererseits sind genau diese temperaturabhängigen Stoffeigenschaften Grundlage für bestimmte Messmethoden. Thermische Messverfahren und Temperaturmessungen kommen in der Analysemesstechnik und der technischen Diagnostik, sowie in der Material- und Bauteilstrukturanalytik immer häufiger vor. Der technisch mögliche Anwendungsbereich dieser Messungen beginnt in etwa beim absoluten Nullpunkt (<1K) und reicht bis zu den Temperaturen von Plasmen, welche über 10 000K liegen. Aus Abbildung 25 kann entnommen werden, dass der Haupteinsatzbereich von Temperaturmessstellen heutzutage im Bereich von 0 bis 100°C liegt. In Abbildung 26 und Abbildung 27 sind einige der wichtigsten Temperaturmessmethoden und -sensoren grafisch in Abhängigkeit von deren Temperatureinsatzbereich dargestellt. Die gezeigten Einsatzbereiche sind nicht für jegliche technische Ausführung und Anwendung gültig, sondern dienen nur als Abschätzung. Anzumerken ist, dass die schraffierten Areale nur unter bestimmten Umständen möglich bzw. zulässig sind. (Bernhard 2014, S. 1ff)

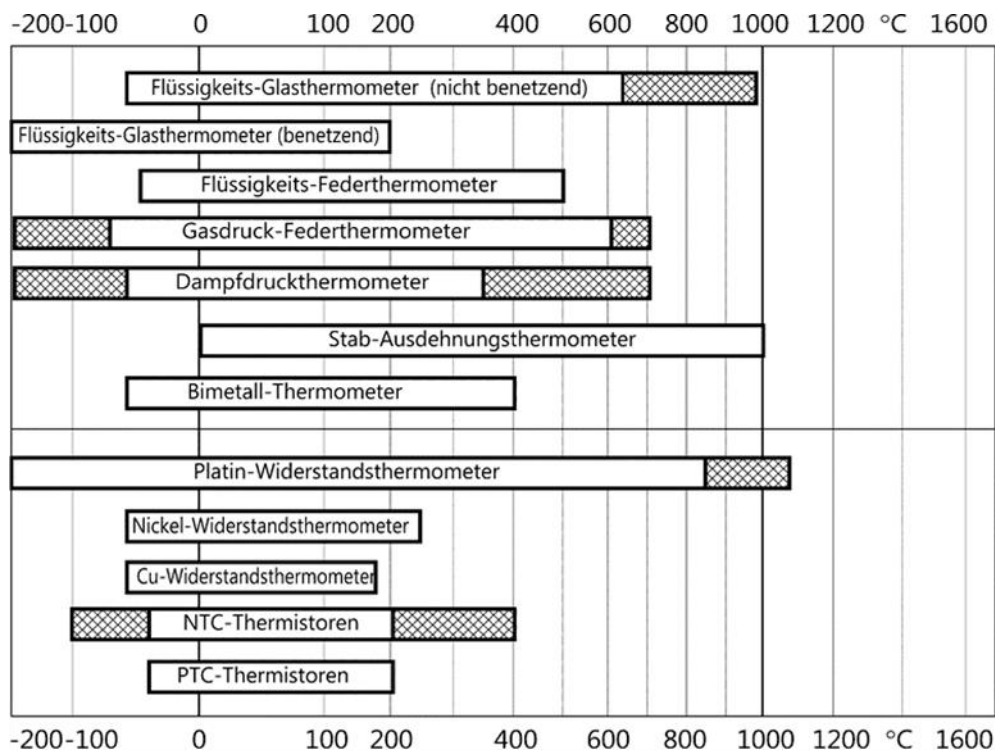


Abbildung 26: Übersicht über technische Temperaturmessverfahren und ihre Messbereiche (1) (Bernhard 2014, S. 5)

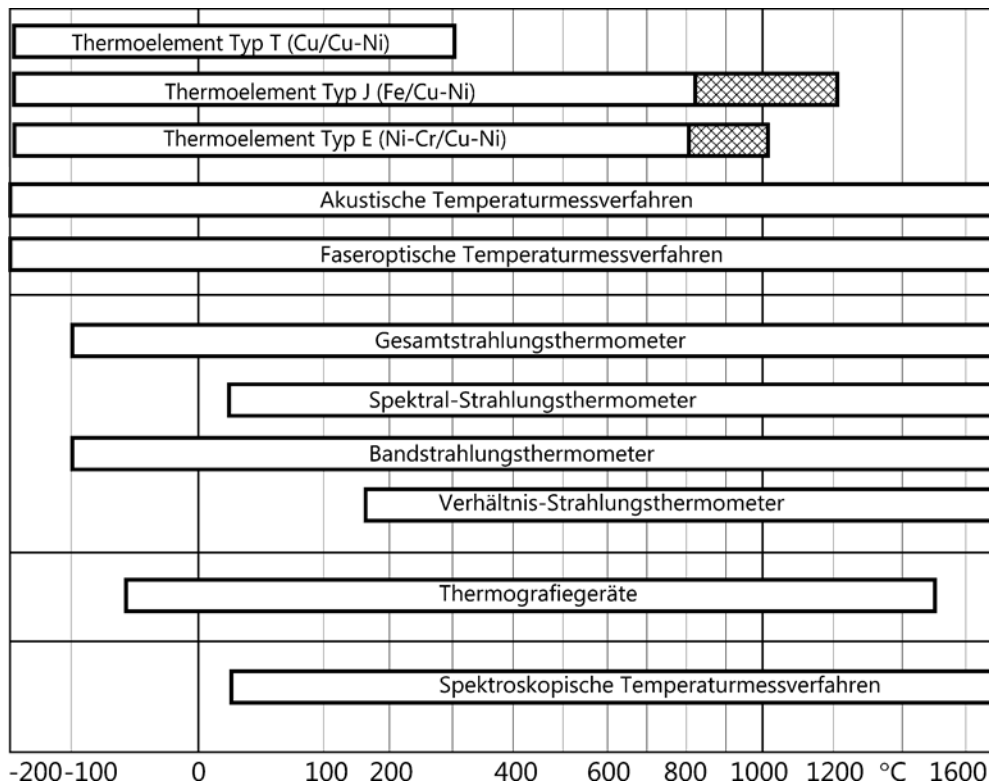


Abbildung 27: Übersicht über technische Temperaturmessverfahren und ihre Messbereiche (2) (Bernhard 2014, S. 6)

In Abbildung 26 und Abbildung 27 sind einige der wichtigsten Temperaturmessmethoden und -sensoren grafisch in Abhängigkeit von deren Temperatureinsatzbereich dargestellt. Die gezeigten Einsatzbereiche sind nicht für jegliche technische Ausführung

und Anwendung gültig, sondern dienen nur als Abschätzung. Anzumerken ist, dass die schraffierten Areale nur unter bestimmten Umständen möglich bzw. zulässig sind. (Bernhard 2014, S. 5)

3.3.2 Einteilung der Temperaturmessverfahren

Die für die Messung der Temperatur verwendeten Verfahren können nach unterschiedlichen Gesichtspunkten unterteilt werden. Im folgenden Abschnitt werden diese Verfahren kurz erläutert und es wird erklärt, in welchen Bereichen sie Anwendung finden. Die erste Einteilung zwischen direkter und indirekter Messmethode wurde im Kapitel 3.2.1 bereits erwähnt und prinzipiell erklärt. Hier wird im speziellen noch auf die Messung der Temperatur und auf die mögliche Umsetzung der Messung eingegangen.

Direkte Temperaturmessung:

Die direkte Temperaturmessung basiert auf dem Prinzip, dass die Messung der gewünschten Größe, bezogen auf die Einheit der Größe, durch einen quantitativen Vergleich mit einer bekannten gleichen Größe erfolgen muss. Diese Vergleichsgröße muss fein einstellbar sein und es muss mittels eines Indikators die Gleichheit der Mess- und Vergleichsgröße festgestellt werden. Beide diese Bedingungen müssen erfüllt sein, um eine direkte Messung durchführen zu können. Die zweite Bedingung kann allerdings nur durch additiv verhaltende extensiven Größen erfüllt werden und damit ist eine direkte Messung der intensiven Größe Temperatur laut dieser Definition nicht möglich. (Bernhard 2014, S. 22)

Um nun die Temperatur eines Objektes messen zu können, wird die indirekte Temperaturmessung verwendet.

Indirekte Temperaturmessung

Hierbei wird immer eine extensive Abbildungsgröße gemessen und durch eine Messumwandlung auf die Temperatur zurückgeführt. Für diese Umwandlung ist es notwendig, dass die mathematische Beziehung zwischen der Abbildungsgröße und der Messgröße stetig, eindeutig und hinreichend genau ist. (Bernhard 2014, S. 23)

Wie zuvor erwähnt, kann die Temperatur nur indirekt, also durch eine Umwandlung in eine andere Größe, gemessen werden. Daher kann eine andere Unterteilung in Primären und sekundären Messverfahren erfolgen.

Primäre Temperaturmessung:

Die zuvor erwähnte Umwandlung erfolgt bei der primären Temperaturmessung ausschließlich über eine nur mit Naturkonstanten beschreibbare Beziehung, ohne dabei auf stoff- oder temperaturabhängige Parameter zurückgreifen zu müssen. Zu den primären Verfahren gehören beispielsweise Gasthermometer mit konstantem Volumen oder akustische Gasthermometer. Da diese Methoden nur auf Gleichungen basieren, die nur bei Idealbedingungen gültig sind, ist ein hoher experimenteller Aufwand und umfangreiche Korrekturberechnungen erforderlich, um diese einsetzen zu können. (Bernhard 2014, S. 23f)

Sekundäre Temperaturmessung:

Zu den sekundären Messverfahren gehören nun alle, die nicht zu den Primären zählen. Um diese Verfahren einsetzen zu können, muss durch eine Kalibrierung oder einen Vergleich mit Normalthermometer eine Kennlinie für die Umwandlung von Abbildungsgröße zur Temperatur experimentell ermittelt werden.

Eine weitere Einteilung der Messprinzipien kann durch die Art der Umwandlung der Abbildungsgröße erfolgen und zwar in unmittelbare und mittelbare Temperaturmessungen. (Bernhard 2014, S. 24)

Unmittelbare Temperaturmessung:

Bei der unmittelbaren Temperaturmessung wird die Größe X_A direkt durch das Messobjekt selbst erzeugt und somit als Abbildungsgröße für die zu messende Temperatur verwendet. Es werden dabei sowohl temperaturabhängige Stoffeigenschaften des Messobjektes (parametrisches Temperaturmessprinzip), als auch die Umwandlung von thermischer Energie in eine andere Energieform (generatives Messprinzip) ausgenutzt. Zu den Verfahren nach dem generativen Prinzip können gezählt werden:

- Messung der Temperatur von Gleitlagern aus der durch Reibung entstehenden Thermospannung
- Die Temperaturbestimmung von Schneidwerkzeugen bei der Bearbeitung von Metallen durch die auftretende Thermospannung zwischen Werkzeug und Werkstück
- Alle Strahlungstemperaturmessverfahren

Abbildung 28 zeigt, dass die Messgrößenwandlung gleich im ersten Glied der Messkette erfolgt. Für diese Messung müssen allerdings noch folgende Voraussetzungen erfüllt werden:

- Ausreichende Messbarkeit der Abbildungsgröße
- Homogenität des Messobjektes, wenn diese auf der Änderung der Stoffeigenschaft beruht
- Hinreichende Kenntnis der Kennlinie des Messobjektes

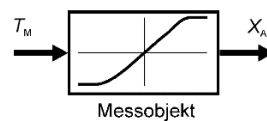


Abbildung 28: Prinzip einer unmittelbaren Temperaturmessung
(Bernhard 2014, S. 25)

Für die meisten Anwendungen können diese Punkte aber nicht erfüllt werden und daher wird das Prinzip der mittelbaren Messung der Temperatur eingesetzt. (Bernhard 2014, S. 25ff)

Mittelbare Temperaturmessungen:

Um eine mittelbare Messung durchzuführen, wird ein Berührungssensor mit einer genügend bekannten und stabilen Kennlinie verwendet. Durch eine thermische Kopplung mit der Temperatur T_M des Messobjektes muss ein Temperatúrausgleich mit der Temperatur T_S des Sensors erfolgen, um eine Messung durchführen zu können. In Abbildung 29 wird genau dieses Prinzip grafisch dargestellt. (Bernhard 2014, S. 27f)

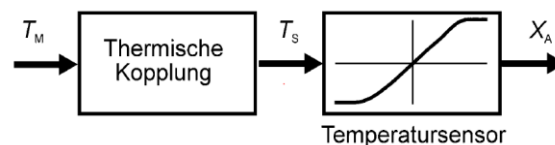


Abbildung 29: Prinzip einer mittelbaren Temperaturmessung
(Bernhard 2014, S. 28)

Wie in diesem Abschnitt erwähnt, zählt dieses Strahlungstemperaturmessverfahren zu den unmittelbaren Messverfahren. Da die Thermografie auf den Grundlagen der Strahlungstemperaturmessung beruht, wird hier die Temperatur auch durch Umwandlung in eine Abbildungsgröße unmittelbar gemessen. Im nachfolgenden Abschnitt werden die wichtigsten physikalischen Grundlagen der Thermografie/Strahlungstemperaturmessung kurz zusammengefasst.

3.3.3 Physikalische Grundlagen

Planck'sches Gesetz:

Die Leistung einer Strahlung wird durch das Planck'sche Strahlungsgesetz als Funktion der Wellenlänge für die jeweilige Temperatur angeführt und lautet wie folgt:

$$M_{\lambda,S} = \frac{C_1 * \lambda^{-5}}{e^{(C_2/\lambda T)} - 1} [W/m^2] \quad (\text{Gl. 1})$$

$M_{\lambda,S}$ ist die vom idealen („schwarzen“) Strahler emittierte Strahlungsleistung, bezogen auf eine Flächeneinheit und das Wellenlängenintervall. Dabei sind C_1 und C_2 konstante Faktoren, die nur Naturkonstanten beinhalten. Diese Gleichung ist allerdings nur für den idealen Strahler gültig, da er jegliche einfallende Strahlung, egal mit welcher Wellenlänge, absorbiert bzw. emittiert (Kirchhoffsches Strahlungsgesetz²). Schwarze Strahler können künstlich erzeugt werden, beispielsweise für Hohlraumstrahler zur Kalibrierung thermografischer Instrumente, die für Experimente verwendet werden. Reale Objekte strahlen hingegen, bei gleichen Bedingungen immer weniger thermische Strahlung ab, als schwarze Strahler. (Bernhard 2014, S. 1397; Herwig, Moschallski 2014, S. 171)

Emissionsgrad:

Um nun die Strahlungsleistung eines realen Objektes zu erhalten, wurde der sogenannte Emissionsgrad $\varepsilon_\lambda(\lambda, T)$ als multiplikativer Faktor eingeführt. Durch (Gl. 2) wird dieser Zusammenhang beschrieben, wobei mit bekannter Temperatur des Körpers und bekanntem Emissionsgrad die Strahlungsleistung des Messobjektes bestimmt werden kann.

$$M_\lambda(\lambda, T) = \varepsilon_\lambda(\lambda, T) * M_{\lambda,S}(\lambda, T) \quad (\text{Gl. 2})$$

Umgekehrt kann somit auch der Emissionsgrad von realen Objekten bestimmt werden. Dies führt allerdings nicht immer zu einem genauen Ergebnis, da beispielsweise eine raue Oberfläche die Abstrahlungsrichtung verändern kann und somit den exakten Wert verfälschen würde. In der Praxis werden daher auch oft empirisch ermittelte Werte für die Emissivität herangezogen. Somit ist der Emissionsgrad nicht nur von der Wellenlänge und der Temperatur abhängig, sondern auch von der Abstrahlrichtung.

² Kirchhoffsches Strahlungsgesetz besagt, dass wenn sich ein Strahler im Strahlungsgleichgewicht befindet, er durch Wärmestrahlung gleich viel Energie abgibt, wie er durch die absorbierte Strahlung aufgenommen hat $\varepsilon(\lambda) = \alpha(\lambda)$ (Bernhard 2014, S. 1170)

Häufig wird die Wellenlänge und die Abstrahlrichtung aber vernachlässigt und man spricht dann von einem „grauen“ Strahler, der immer einen, für eine bestimmte Temperatur konstanten Emissionsgrad, kleiner als eins, aufweist. Werden die zuvor genannten Einflüsse (Temperatur, Wellenlänge, Abstrahlrichtung) berücksichtigt, sind solche Objekte als „selektive“ Strahler zu bezeichnen. Praktisch alle technischen Objekte sind genau genommen selektive Strahler. Wie in Abbildung 30 zu sehen ist, sind die Emissionsgrade des grauen und selektiven Strahlers immer geringer als die des schwarzen Strahlers bei gleicher Temperatur. Der Faktor der Emission beeinflusst das Ergebnis der Messung stark, daher werden oft Thermografiegeräte mit einem begrenzten Wellenlängenbereich verwendet. Dabei wird der Emissionsgrad für den relevanten Wellenlängenbereich von λ_1 bis λ_2 als konstanter Wert angenommen, der sogenannte Bandemissionsgrad ε_B . Wegen ihrer einfachen Handhabung werden Bandstrahlungsthermometer häufig bei der Temperaturmessung von Zerspanungsprozessen eingesetzt.

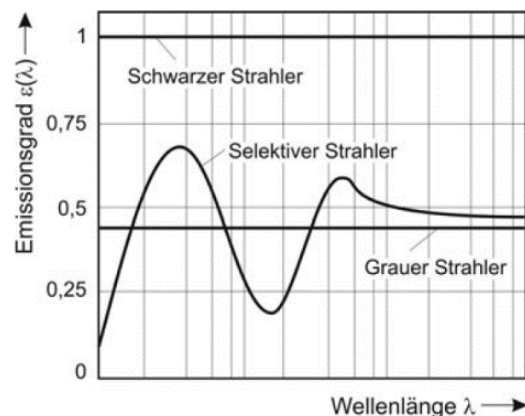


Abbildung 30: Schematische Darstellung von Emissionsgrad für Schwarze, graue und selektive Strahler gleicher Temperatur
(Bernhard 2014, S. 1184)

Eine weitere Möglichkeit zur Messung bietet das Quotiententhermometer, welches die Strahlung zweier Wellenlängen aufnimmt. Der Einfluss des Emissionsgrades kann weitgehend eliminiert werden, da nur der Quotient der aufgenommenen Strahlung aufgezeichnet wird und die Emissionszahl sich aus der Gleichung herauskürzt. Der Nachteil davon ist, dass die Strahlung von nur zwei bestimmten Wellenlängen genutzt wird und es zu einer begrenzten Empfindlichkeit der Messung kommt. Für Messungen über den ganzen Wellenlängenbereich werden Gesamtstrahlungsthermometer verwendet. (Bernhard 2014, S. 1171ff; Sackewitz 2011, S. 8)

Für eine genau, berührungsfreie Messung sind noch weitere Faktoren von Bedeutung, da je nach Material die Strahlung unterschiedlich stark ausgesendet, empfangen und hindurchgelassen wird.

Spektrale Absorption, Reflexion, Transmission:

Für die eben angesprochenen Faktoren wurden drei dimensionslose Zahlen eingeführt, die allerdings auch stark von Temperatur des Materials und Wellenlänge der Strahlung abhängen. Die Absorption $\alpha(\lambda, T)$ steht für die aufgenommene Strahlung eines Körpers im Vergleich zur Einstrahlung, der Reflexionsgrad $\rho(\lambda, T)$ bezeichnet das Verhältnis von eingestrahelter zu zurückstrahlender Strahlungsleistung. Die Transmission $\tau(\lambda, T)$ legt fest, wie viel von der eingestrahelten Leistung durch das Material durchgelassen wird. In Gleichung (Gl. 3) wird der Zusammenhang dieser drei Faktoren gezeigt, der in Summe immer den Wert 1 ergeben muss.

$$\alpha(\lambda, T) + \rho(\lambda, T) + \tau(\lambda, T) = 1 \quad (\text{Gl. 3})$$

Viele Materialien, die zerstörungsfrei überprüft werden, sind undurchlässig für infrarote Strahlung und daher gilt für diese, dass die Transmission $\tau(\lambda, T) = 0$ gesetzt werden kann. Daraus folgt die Gleichung Gl.4, die mit Hilfe des Planck'schen Strahlungsgesetzes die Beziehung zwischen Emissionsgrad, Reflexion und Absorption beschreibt.

$$\alpha(\lambda, T) = 1 - \rho(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) \quad (\text{Gl. 4})$$

Bei sehr glatten, metallischen Oberflächen kommt es öfters vor, dass sie sehr stark im infraroten Bereich reflektieren. Dadurch kommt es zur einer höheren thermischen Strahlung des Hintergrundes als der Strahlung des Messobjektes selbst und somit wird ein gewisser Messfehler verursacht. (Bernhard 2014, S. 1169ff; Sackewitz 2011, S. 9)

Weitere wichtige Einflussfaktoren:

Durch die strahlungsphysikalischen Eigenschaften und Gesetze von Messobjekt, Übertragungsmedium und Messtechnik, sind folgende Einflussfaktoren bei der Strahlungstemperaturmessung von großer Bedeutung:

- Möglichst genaue Kenntnis des Emissionsgrades
- Richtungsselektivität des Strahlers
- Fremdstrahlung (direkte oder von Objekten anderer Temperatur)
- Strahlung von Kameraanteilen (Gehäuse-Innenseite, Objektiv, Filter usw.)
- Transmission der Übertragungsstrecke, der Optik und von Filtern

- Abbildungsfehler der Optik
- Rauschen elektronischer Baugruppen

Diese Faktoren können als Quelle von Messfehlern bzw. -unsicherheiten in der Thermografie gesehen werden. Ziel bei der Temperaturmessung sollte es sein, Einflussfaktoren, wie den Emissionsgrad oder reflektierende und eingestreuete Strahlung von außen zu korrigieren oder zu vermeiden. (Bernhard 2014, S. 1398)

Damit sind alle relevanten Grundlagen für den Einsatz einer Thermografiekamera beschrieben. In nächsten Abschnitt werden die zwei unterschiedlichen Funktionsweisen der Aufnahmegерäte erläutert, sowie Beispiele von Ausführungen und Verwendungsarten gezeigt. Da für die Arbeit nur ein bestimmter Kamerateyp verwendet wurde, wird auf diesen genauer eingegangen.

3.3.4 Thermografische Geräte und Verfahren

Grundsätzlich können Thermografiegeräte bzw. Sensoren für die Strahlungstemperaturmessung in zwei verschiedenen Verfahren eingeteilt werden, thermische Sensoren und Photonensensoren.

Photonensensoren:

Bei dieser Art von Sensoren werden die ankommenden Photonen vom Photonensensor pro Zeiteinheit „gezählt“. Diese Zählung funktioniert nur, wenn die Energie des eingehenden Photons höher als die, je nach Halbleiterart benötigte, Anregungsenergie ist. Diese Sensoren weisen allerdings eine bestimmte Wellenlängenabhängigkeit auf und können oberhalb einer Grenzwellenlänge kein Signal mehr abgeben. Um nun diese Grenzwellenlänge zu verändern und um weitere Einflüsse auf die Detektivität (oder Nachweißempfindlichkeit) des Sensors zu verbessern, müssen Sensoren gekühlt werden. Somit müssen alle Photonensensoren für den mittleren und fernen Infrarotbereich gekühlt werden, um diesen Grenzwert des Wellenlängenbereichs nicht zu erreichen. Vorteil: Durch Kühlung auf z.B. 77K kann bei einer Wellenlänge von bis zu 12 μm , ein- um das ein bis zweifach höherer Detektivitätswert erreicht werden, als bei der besten Messung mit einem ungekühlten, thermischen Sensor. (Tränkler, Reindl 2014, S. 965ff; Bernhard 2014, S. 1408)

Tabelle 4: Grenzwellenlänge ausgewählter Einhalbleiter und Eigenschaften moderner Photonendetektoren für hochauflösende Arrays (Tränkle, Reindl 2014, S. 966)

Sensormaterial Halbleiter	Grenzwellenlänge λ_G in [μm]	Betriebstemperatur T in [K]
CdS	0,52	295
Si	1,1	295
PbSe	5,4	195
PbxSn1-xTe	4–30	77

Wie in Tabelle 4 ersichtlich ist, können bei niedrigeren Temperaturen (in Abhängigkeit vom Material des Halbleiters) höhere Grenzwellenlängen erreicht werden. Für Wellenlängen, die kleiner $3\mu\text{m}$ sind, eignen sich auch ungekühlte Photonensensoren. (Tränkle, Reindl 2014, S. 965ff; Bernhard 2014, S. 1408)

Für einen Einsatz von Sensoren für den mittleren und fernen Infrarotbereich, die auch bei Raumtemperatur arbeiten, eignen sich besonders jene, die nach dem thermischen Prinzip arbeiten.

Thermische Sensoren:

Die thermischen Sensoren gehören zu der zweiten großen Gruppe der Infrarotsensoren und basieren darauf, dass die abgestrahlte Leistung gemessen wird. Als großer Vorteil dieser Sensoren kann gesehen werden, dass sie prinzipiell wellenlängenunabhängig arbeiten. Die Empfindlichkeit dieser Sensoren hängt daher nur vom spektralen Absorptionsgrad und dem spektralen Transmissionsgrad der optischen Elemente

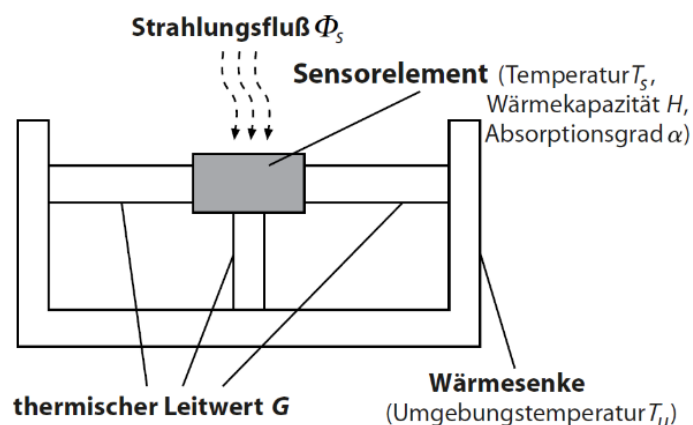


Abbildung 31: Prinzip der thermischen Verhältnisse am thermischen Sensor (Tränkle, Reindl 2014, S. 949)

(Linse, Filter, usw.) ab. In Abbildung 31 ist das Prinzip der thermischen Sensoren aufgezeichnet. Die einfallende Strahlung führt zu einer Erhöhung der Sensortemperatur. Diese führt wiederum zu einer Erhöhung des thermischen Widerstandes und eben diese Steigerung wird gemessen. Wie zu erkennen ist, wird der Sensor durch eine Aufhängung in einer Wärmesenke befestigt. Somit wirken auf den Sensor noch andere Einflüsse, wie zum Beispiel die Wärmeleitung durch Konvektion, der mechanischen Aufhängung und der Atmosphäre. Um diese Einflüsse auf die Detektivität weitestgehend zu vermeiden, werden sie in einer Vakuumatmosphäre (oder einem anderen Gas, mit geringer thermischer Leitfähigkeit) mit sehr dünnen Halterungen befestigt. Die Detektivität dieser Sensoren besitzt allerdings eine physikalische Grenze durch den Strahlungseinfluss (Strahlungsrauschen). (Tränkler, Reindl 2014, S. 942ff; Bernhard 2014, S. 1284)

Beide Prinzipien der Strahlungstemperaturmessung haben gemein, dass sie meist die auftretende Strahlung in ein elektrisches Signal (Strom, Spannung, Widerstand) umwandeln.

Entwicklung der Thermografiegeräte:

Es gibt noch eine weitere Unterteilung der Sensoren für die Strahlungstemperaturmessung und zwar bezüglich der Anzahl der Sensorelemente selbst.

Diese Einteilung kann nach Bernhard 2014 für beide Prinzipien gleich verwendet werden und wird, wie in Abbildung 32 ersichtlich, unterteilt in:

- Einzel-Detektoren
- 1-dimensionale Detektorzeile
- 2-dimensionales Detektorarray

Einhergehend mit dieser Unterteilung kann auch die geschichtliche Entwicklung der Thermografiegeräte aufgezeigt werden, die häufig in sogenannte Generationen eingeteilt wird. In der Literatur gibt es allerdings keine einheitlichen bzw. gleichen Merkmale der Einteilung.

Laut Bernhard 2014 werden Kameras der ersten Generation mit einem gekühlten Element-Photonen-Detektor und mechanischen Zeilen- und Spaltenabtastung verwendet (siehe Abbildung 32, links). Bei der zweiten Generation kommen schon Zeilendetektoren mit einer eindimensionalen optomechanischen Abtastung zum Einsatz (siehe Abbildung 32, Mitte).

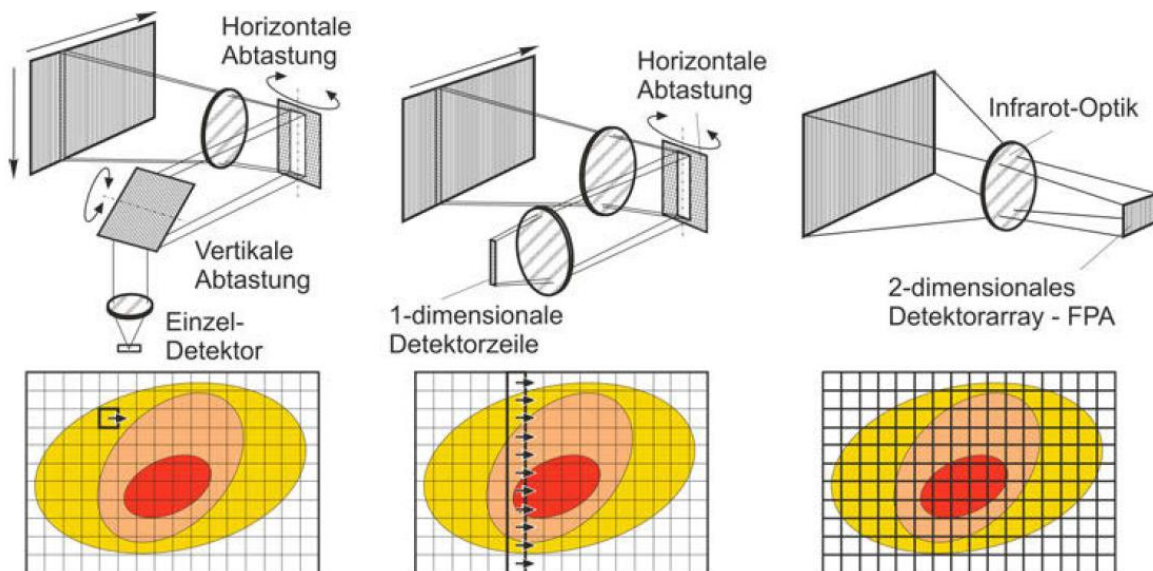


Abbildung 32: Aufbau und Arbeitsprinzipien von Thermografiegeräten (Bernhard 2014, S. 1417)

Diese besitzen gegenüber der ersten Generation Verbesserungen in der Inhomogenität über das Messfeld und im Kontrast. Die dritte Generation beinhaltet schließlich die heutzutage verwendeten gekühlten und ungekühlten Thermografiekameras, die mit einem Detektorarray ohne optischer Scanvorrichtung ausgestattet sind (siehe Abbildung 32, rechts). Diese Arrays bestehen, wie schon die Zeilendetektoren, aus einer Vielzahl mit einander verbundener Einzeldetektoren, die durch die Weiterentwicklung der Elektronik immer kleiner wurden. Die einzelnen Ausgangssignale der Detektoren werden sehr rasch elektronisch ausgelesen und mit umfangreicher, leistungsstarker Messverarbeitung und Bildbearbeitung ausgewertet. In älteren Geräten wurden die unterschiedlichen, analogen Signale (Spalten-, Zeilen- und Temperaturwert) getrennt voneinander ausgegeben und dann zusammengefügt. Bei modernen Geräten werden rein digitale Signale erzeugt und weiterverarbeitet. (Bernhard 2014, S. 1416)

Basierend auf dieser dritten Generation entwickelten sich die sogenannten Mikrobolometer, die mit thermischen Sensoren arbeiten und heutzutage wegen ihrer vielseitigen Anwendbarkeit und einfachen Handhabung weit verbreitet sind.

Mirkobolometer:

Diese Art von Thermografiegeräten arbeitet mit ungekühlten Mikrobolometer-Arrays und gehören damit zu den zuvor erwähnten 2-dimensionalen Detektorarrays. Durch kommerzielle Entwicklung in den letzten zwei Jahrzehnten ist der Preis für einfachste Wärmebildgeräte mit dieser Technik schon unter 1000€ gefallen. Die Abbildung 33 (links) zeigt ein einzelnes Detektorelement eines Mikrobolometer-Arrays. Anfänglich lag die Größe eines solchen Elements (in weiterer Folge Pixel genannt) bei 50µm. Mittlerweile hat sich die Pixelgröße auf 17µm verringert und die derzeitige Pixelanzahl der Arrays variiert von 60x60 bis hin zu 1024x768 und mehr. Durch die ungekühlten Arrays, die immer kleiner gewordenen Sensorchips und verbesserten Optiken, sanken nicht nur die Kosten, sondern der Geräteaufwand reduzierte sich ebenfalls und es konnten kleinere Kameras gebaut werden. (Tränkler, Reindl 2014, S. 952ff; Bernhard 2014, S. 1424ff)

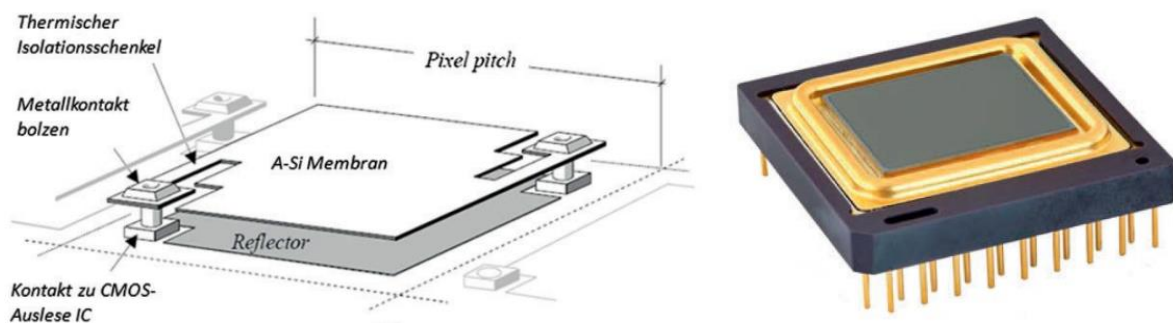


Abbildung 33: Modernes Bolometerarray: Aufbauschema (links) und gehäustes Bolometerarray (rechts)
(Tränkler, Reindl 2014, S. 955)

Je nach Anwendung und Anforderung an die Messaufgabe, ist es wichtig abzuwägen, mit welcher Art von Thermografiekamera sich das bestmögliche Ergebnis erzielen lässt. Aufgrund der technischen Spezifikationen kann nicht mit jeder Kamera das gleiche Messziel erreicht werden. Die Wärmebildgeräte mit Mikrobolometer-Arrays besitzen weitere Eigenschaften, die eine Messung beeinflussen können.

Wichtige Kenngrößen für die Messung mit Mikrobolometern:

Tabelle 5: Ausgewählte Kenngrößen für Wärmebildgeräte (Tränkler, Reindl 2014, S. 977)

Wichtige Kriterien	Begründung/Beschreibung
Pixelanzahl/ Auflösung	Je nach gewünschter räumlicher Auflösung werden Kameras mit unterschiedlicher Pixelanzahl angeboten.
Zeitkonstante	Zeitdauer nach abrupter Strahlungsflussänderung. Sollte so gering wie möglich sein, um eine höhere thermische Grenzfrequenz zu erreichen.
thermische Empfindlichkeit	Sollte so groß wie möglich sein, um geringe Änderungen der Temperatur detektieren zu können.
NEDT (rauschbegrenzte Temperaturauflösung)	Minimal auflösbare Temperaturdifferenz des Sensors. Vor allem durch Sensorrauschen und Optik beeinflusst.
Messgenauigkeit	Toleranz des Absolut-Messfehlers, bezogen auf ideale Körperstrahlung bei vorgegebenen Bedingungen. Je geringer dieser Wert, desto genauer kann die Temperatur bestimmt werden.
Spektralbereich	Durch Sensor, Optik und Filter bestimmter Wellenlängenbereich in dem das Gerät die IR-Strahlung misst
Bildwiederholungsfrequenz	Wird bestimmt durch Bildaufbauzeit für ein Vollbild
Temperaturmessbereich	minimal und maximal messbare Temperatur des Objektes
Winkelauflösung	Durch optische Abbildung bestimmtes Gesichtsfeld eines Sensorelements.
Öffnungswinkel	Bei einer Messentfernung a ergibt sich daraus der Öffnungswinkel
Gesichtsfeld	Durch optische Abbildung entstehendes Gesichtsfeld eines Vollbildes

In Tabelle 5 sind nur ausgewählte Größen angeführt, die auch von den meisten Kameraherstellern angegeben werden und je nach Hersteller besitzen sie meist unterschiedliche Bezeichnungen. Um die beiden letzten Kenngrößen veranschaulichen zu können, wird in Abbildung 34 ein Beispiel eines Messfeldes einer Array-Kamera dargestellt. In Abhängigkeit der Entfernung bei gegebenem Öffnungswinkel, vergrößern sich daher die zur Messung herangezogenen Flächenelemente des Messobjektes. (Tränkler, Reindl 2014, S. 976ff; Bernhard 2014, S. 1424f)

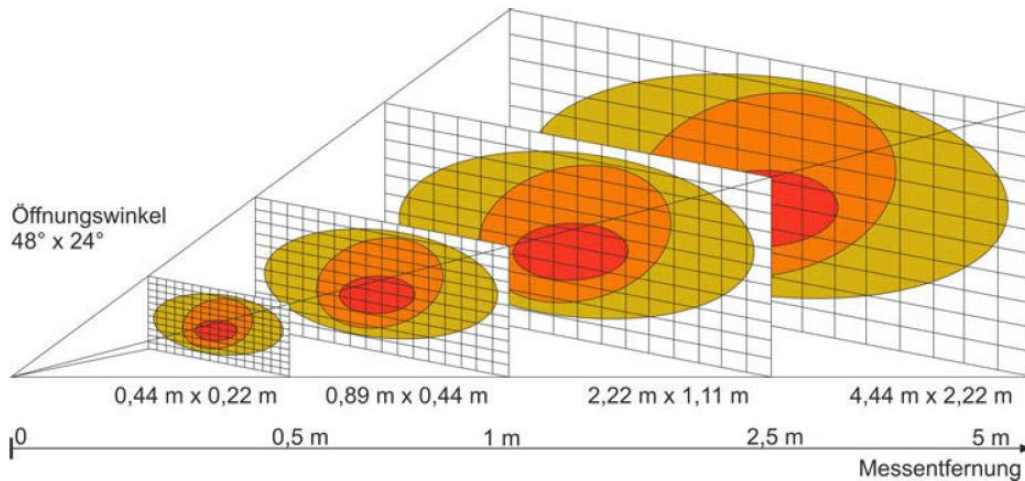


Abbildung 34: Messfeld einer IR-Kamera in Abhängigkeit von der Messentfernung
(Bernhard 2014, S. 1425)

Es wird eine Vielzahl der beschriebenen Kameras für die Strahlungstemperaturmessung von vielen verschiedenen Unternehmen angeboten, daher sind auch die einzelnen Spezifikationen teilweise sehr unterschiedlich. Abbildung 35 (a) bis (d) zeigen einige verschiedene Varianten und Ausführungen von Thermografiegeräten unterschiedlicher Hersteller. Abbildung 35 (a) zeigt den Innenaufbau einer stationär betriebenen Thermografiekamera für einen speziellen Einsatz der Feuerraumüberwachung einer Müllverbrennungsanlage.



(a)



(b)



(c)



(d)

Abbildung 35: Verschiedene Arten und Bauformen von Mikrobolometer Kameras (Bernhard 2014, 1427ff)
(a) Innenaufbau einer stationären Thermografiekamera mit Mikrobolometer-Array (Bildquelle: DIAS Infrared GmbH); (b) IR-Kamera VarioCAM@hr (Jenoptik, Bildquelle: InfraTec GmbH); (c) Beispiele für Hand-held Thermografiekameras (Bildquelle: Testo); (d) USB-IR-Kamera (Bildquelle: optris GmbH)

Abbildung 35 (a) zeigt den Innenaufbau einer stationär betriebenen Thermografiekamera für einen speziellen Einsatz der Feuerraumüberwachung einer Müllverbrennungsanlage. In Abbildung 35 (b) ist eine Kamera mit vielen Extrafunktionen, wie beispielsweise einem Autofokus und einer digitalen Zoomfunktion, abgebildet. Sie verfügt unter anderem über einen roten Laser-Pointer, eine digitale Farbvideokamera und ein LED-Videolicht. Auf dem eingebauten Display können die aufgenommenen Videos direkt oder im Nachhinein angesehen werden.

Bei der sehr kompakten Bauweise, welche in Abbildung 35 (c) zu sehen ist, handelt es sich um eine vollwertige und zugleich sehr kleine Variante einer Thermografiekamera. Sie kann für den stationären Einsatz verwendet werden, benötigt allerdings eine Verbindung zu einem Ausgabegerät (z.B. ein Laptop).

Sogenannte „hand-held“ Kameras werden immer häufiger eingesetzt und stehen jenen, die für den stationären Betrieb entwickelt wurden, in ihrer Leistung kaum nach. In Abbildung 35 (d) sind zwei verschiedene Typen dieser Gattung (hand-held) zu sehen, die zwar nicht alle Funktionen von speziellen Kameras aufweisen, aber für schon sehr viele Anwendungen durchaus ausreichend sind.

(Bernhard 2014, S. 1427ff)

Um nun eine Aufnahme mit diesen Geräten bewerten zu können, sind unterschiedliche Herangehensweisen möglich, die im nachfolgenden Kapitel besprochen werden.

3.3.5 Messsignalverarbeitung und Bildauswertung

Als Ausgangssignal einer Thermografiekamera werden die Strahlungswerte der einzelnen Pixel ausgegeben und müssen noch visualisiert werden. Für die visuelle Ausgabe werden die Strahlungsdichten entweder in Graustufen oder in wählbaren Farb-abstufungen angezeigt und können nachfolgend bearbeitet werden. Die meisten Systeme für die Bearbeitung bieten folgende Auswertungs- bzw. Darstellungsmöglichkeiten:

- Berechnung und Darstellung von Temperaturprofilen entlang Objektstrukturen oder vorgegebenen Bildausschnitten
- Temperaturänderungen gegenüber einem Soll- oder Ausgangsbild durch Bildsubtraktion
- Temperaturengabe $T(x,y)$ einzelner Bildpunkte im Messfeld
- Zeitliche Funktion von lokalen Temperaturen $T(x,y,t)$
- Zeitliche und örtliche Mittelwerte von Temperaturfeldern, die zuvor vorgegeben werden können und deren Emissionsgrad und Temperaturbereich eigens eingestellt werden kann
- Überwachung und Ermittlung von lokalen und zeitlichen Extrema

Auch die zeitgleiche Aufnahme von Bildern des gleichen Messfeldes mit anderen Infrarot-Wellenlängenbereichen oder im VIS-Bereich können wertvolle Zusatzinformationen liefern. Es können dadurch z.B. Objektstrukturen erkannt werden, oder Korrekturen von lokalen Emissionsgraden ermöglicht werden. (Bernhard 2014, S. 1447)

4. Experimentelle Versuchsdurchführung

Wie schon im Kapitel 3.1.3 erwähnt wurde, wird die Wärmebildgebung in sehr vielen Bereichen eingesetzt und der Einsatz wird immer mehr erweitert. Spezielle Anwendung in der Verschleißverfolgung von Werkzeugen, insbesondere von Fräs Werkzeugen werden in der Industrie kaum verwendet. Daher werden im folgenden Abschnitt die durchgeführten Versuche und Ergebnisse in genau diesem Bereich der Thermografie ausführlich beschrieben und erläutert.

Im ersten Kapitel wird auf die zu untersuchende Anlage bzw. Maschine und die für die Versuche verwendete Infrarotkamera (IR-Kamera) genauer eingegangen. Im weiteren Verlauf werden Varianten zur Versuchsdurchführung entwickelt, für die einige Begriffsdefinitionen wie beispielsweise der verwendeten Werkzeugzustände von Bedeutung sind. Die Versuchsreihen, die durchgeführt wurden, sind ab Kapitel 4.3 genau beschrieben. Es werden bei jeder Versuchsreihe der Aufbau, die Durchführung und Auswertung und vor allem die Ergebnisse detailliert erklärt.

Abschließend kommt es zu einer Diskussion der Ergebnisse der Versuche und einer weiteren Diskussion des Messaufbaues und der Auswertung, da diese eine sehr spezielle Rolle in der kompletten Versuchsdurchführung spielt und daher gesondert erklärt wird.

Parallel zu dieser Arbeit gab es noch eine weitere Masterarbeit, die sich mit der Thematik der Werkzeugzustandserkennung mittels Akustik beschäftigte. Dadurch musste beispielsweise auch die Auswahl der zu untersuchenden Anlage für beide Arbeiten geeignet sein, da die Verantwortlichen bei Audi einen Vergleich der beiden Technologien anstrebten. Nähere Informationen zu der zweiten Arbeit kann in Altziebler 2017 2017 nachgeschlagen werden.

Abbildung 36 soll den Messaufbau darstellen, welcher für alle Versuche prinzipiell gleich aufgebaut ist. In der Abbildung ist links das Bearbeitungszentrum zu sehen, in dem die Werkstücke bearbeitet werden. Die mit einem Rechner verbundene IR-Kamera zeichnet die Bearbeitungen auf und anschließend können diese Aufnahmen ausgewertet und bearbeitet werden.

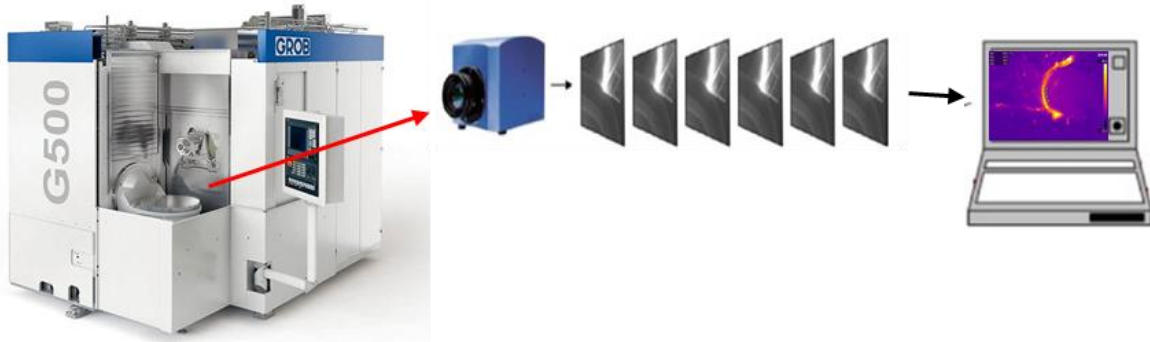


Abbildung 36: Schematischer Messaufbau der Versuche

In dieser Arbeit werden nicht alle Bilder und Diagramme der Versuche und der Auswertungen dargestellt. Die Daten aller Versuche sind auf die beiliegende CD gebrannt, welche sich auf der letzten Seite der Arbeit befindet. Die CD beinhaltet nur exemplarische Videoaufnahmen, da die Datenmenge der gesamten Videos sehr groß ist.

4.1 Auswahl der Anlage und Messmittel

4.1.1 Anlagenauswahl

Im Rahmen des TPM 4.0 – Projektes, welches in Kooperation mit dem Institut für Maschinenbau und Betriebsinformatik und Audi Hungaria Zrt. durchgeführt wird, gab es zum Zeitpunkt der Durchführung dieser Arbeit eine Pilotlinie. In dieser Pilotlinie wurden die Neuerungen des Projektes gleich direkt auf die Linie und auf die einzelnen Arbeitsfolgen umgesetzt und getestet. Die Pilot-Pleuellinie ist in unterschiedlichen Arbeitsfolgen (AF) aufgeteilt. Es würden sich für die Werkzeugüberwachung die Bohr oder Fräsbearbeitung anbieten, allerdings kam es in dem Beobachtungszeitraum bei diesen Maschinen nur zu sehr wenigen Ausfällen. Wie zuvor schon erwähnt, wurde eine weitere Abschlussarbeit zu einem ähnlichen Thema verfasst. Für beide Masterarbeiten musste eine geeignete Anlage/Maschine gefunden werden, die für eine technisch und wirtschaftlich sinnvolle Zustandsüberwachung geeignet ist. Aus dem vorhandenen System konnten die Betriebsdaten der Linie entnommen werden. Diese Daten zeigten, dass sich die AF40 der Pilotlinie eignen könnte, da es sehr häufig zu Stillständen kommt. Bezeichnet wird die AF40 als Crack- und Montagemaschine, welche mehrere Arbeitsschritte beinhaltet, wie beispielsweise den Crackvorgang des Pleuels oder die Verschraubung der zwei Pleuelhälften nach dem Cracken. Im nächsten Schritt musste identifiziert werden, welcher dieser Arbeitsabläufe die häufigen Stillstände verursacht, da dies aus den Betriebsdaten nicht genau ersichtlich war. Mit Hilfe eines Experten vor

Ort wurde die AF hinsichtlich der häufigen Stillstände und der Möglichkeit für die Überwachung mittels Thermografie und Akustik genauer untersucht. Das Problem und somit die Ursache der häufigen Stillstände besteht in der Verschraubung des Crackkopfes. Dieser zweiteilige Kopf wird mit vier Schrauben zusammengehalten, die allerdings nicht richtig dimensioniert sind und es daher öfters zum Bruch einer der Schrauben kommt. Die Folgen des Schraubenbruches sind Qualitätsverfehlungen beim Crackvorgang. Grundsätzlich wäre hier eine Zustandsüberwachung für beide Systeme möglich. Nach Absprache mit den Verantwortlichen bei Audi, wäre es technisch und wirtschaftlich sinnvoller, eine Änderung der Konstruktion vorzunehmen (z.B. Schrauben mit höherer Festigkeit). Durch diesen Umstand konnte die Umsetzung einer Werkzeugzustandsüberwachung für diese Linie nicht erfolgen.

Als eine geeignete Alternative wurde im Zuge weiterer Gespräche mit den Experten und Verantwortlichen ein Maschinentyp gefunden, welcher sehr häufig in der Motorenproduktion eingesetzt wird und sich für eine Zustandsüberwachung des Werkzeuges eignen würde. Um den Aufbau der Versuche umsetzen zu können, müsste allerdings die Anlage oder sogar die komplette Produktionslinie stillstehen. Bei den meisten Linien sind die geplanten Stillstandszeiten für Instandhaltungstätigkeiten belegt und ein ungeplanter Stopp der Linie/Anlage wäre nicht wirtschaftlich. Somit wurde gemeinsam mit den Verantwortlichen eine Maschine ausgewählt, die für Sonderarbeiten in einem anderen Bereich des Werkes eingesetzt wird. Die Vorteile dieser Anlage sind, dass sie nicht durchgehend eingesetzt wird und sie ist den sehr häufig verwendeten Maschinen in der Produktion sehr ähnlich. Hauptsächlich wird dieses Bearbeitungszentrum für die Erprobung neuer Fertigungsprozesse verwendet, die dann in der Produktion umgesetzt werden.

Es handelt sich dabei um ein Bearbeitungszentrum (Typ G500) der Firma Grob, welches in Abbildung 37 dargestellt ist. Die Anlagen, die sehr häufig in der Produktion zum Einsatz kommen (Typ G520), besitzen zwei Hauptspindeln für den Werkzeugantrieb. Das ist der hauptsächliche Unterschied zum Typ 500 und damit ist diese Maschine in wirtschaftlicher und technischer Hinsicht sehr geeignet, um Versuche durchzuführen. Durch den vorgegebenen Belegungsplan dieser Maschine verzögerten sich die Tests, da der Versuchsaufbau und die Durchführung für beide Abschlussarbeiten relativ komplex ist. Somit musste an mehreren Tagen getestet werden, um alle Versuche durchführen zu können.



Abbildung 37: Bearbeitungszentrum Grob G500
(GROB-WERKE 2017)

Spezifikationen

5 – Achsen Bearbeitungszentrum

Eine Hauptspindel für Werkzeugantrieb

Werkzeugrevolver für 25 Werkzeuge

Drehzahl Hauptspindel bis zu 16000 U/min

Drehmoment Hauptspindel bis 690Nm

4.1.2 Auswahl des Thermografiekamerasystems

In der Theorie wurde schon genau auf die sogenannten Mikrobolometer (Thermografiekamera) eingegangen. Für die Versuchsdurchführung wurde bei Audi solch ein Gerät zur Verfügung gestellt, welches für den gesamten Zeitraum verwendet werden konnte. Ein weiterer Vorteil war die bereits vorhandene Software, die zur Kamerabedienung und -einstellung diente und nicht eigens für die Arbeit zugekauft werden musste. Die Verantwortlichen entschieden daher, dass die Versuche mit dem vorhandenen Messequipment durchgeführt werden soll.

Thermografiekamera:

Für die thermografischen Aufnahmen wurde eine Kamera der Firma FLIR verwendet. Es handelt sich dabei, wie in Kapitel 3.3.4 erklärt, um ein ungekühltes Mikrobolometer und wird in dieser Ausführung hauptsächlich als fest montiertes Überwachungssystem verwendet und in der Forschung und Entwicklung in vielen Bereichen eingesetzt. Die Übertragung der Aufnahmen erfolgt über eine USB-Schnittstelle, die direkt mit dem PC und der eigenen Software verbunden ist. Es besteht die Möglichkeit, die Daten kabelgebunden über das lokale Netzwerk an einen anderen Rechner zu senden. Mit einem Netzkabel und einem Netzteil wird IR-Kamera mit Strom versorgt. Durch die herumfliegenden, heißen Späne musste die kabelgebunden Strom- und Datenübertragung geschützt werden. Das Gerät verfügt über einen Stativadapter, um die Kamera entweder auf einem Stativ oder einer Halterung fixieren zu können. Die beiden Abbildungen

37 und 38 zeigen die Kamera mit den Befestigungslöchern auf der Seite und ihre Anschlussmöglichkeiten. Die Tabelle 6 beinhaltet die wichtigsten Spezifikationen der IR-Kamera.



Abbildung 38: 3D Ansicht Flir A645sc
(flir-infrarotkamas 2017)

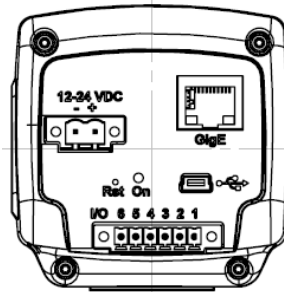


Abbildung 39: Anschlüsse Flir 645sc
(FLIR Systems 2011)

Tabelle 6: Wichtige Produktspezifikationen FLIR A645sc

Produktspezifikation FLIR A645sc	Werte
Bildgröße	640 x 480 Pixel
Zeitkonstante	Normalerweise 8ms
thermische Empfindlichkeit	< 0,05 °C bei +30 °C
NEDT (rauschbegrenzte Temporaufösung)	50 mK
Messgenauigkeit	+/-2 °C oder +/-2 % des Ablesewertes
Spektralbereich	7,5 - 14 µm
Bildwiederholungsfrequenz	25Hz
Temperaturmessbereich	-40°C - +650°C
Öffnungswinkel/ Sichtfeld/ minimale Fokulentfernung	25° x 19° / 0,25 m

Aufnahme- und Analysesoftware:

Um eine Aufnahme mit der IR-Kamera erstellen zu können, muss eine Verbindung mit einem Rechner bestehen. Über die Software von der Firma FLIR oder über ein Toolkit für LabVIEW® kann die Verbindung vom PC zur Kamera hergestellt werden. Wie schon erwähnt, wurde für diese Arbeit direkt die Software (FLIR ResearchIR Max 3.1) der Firma FLIR verwendet.

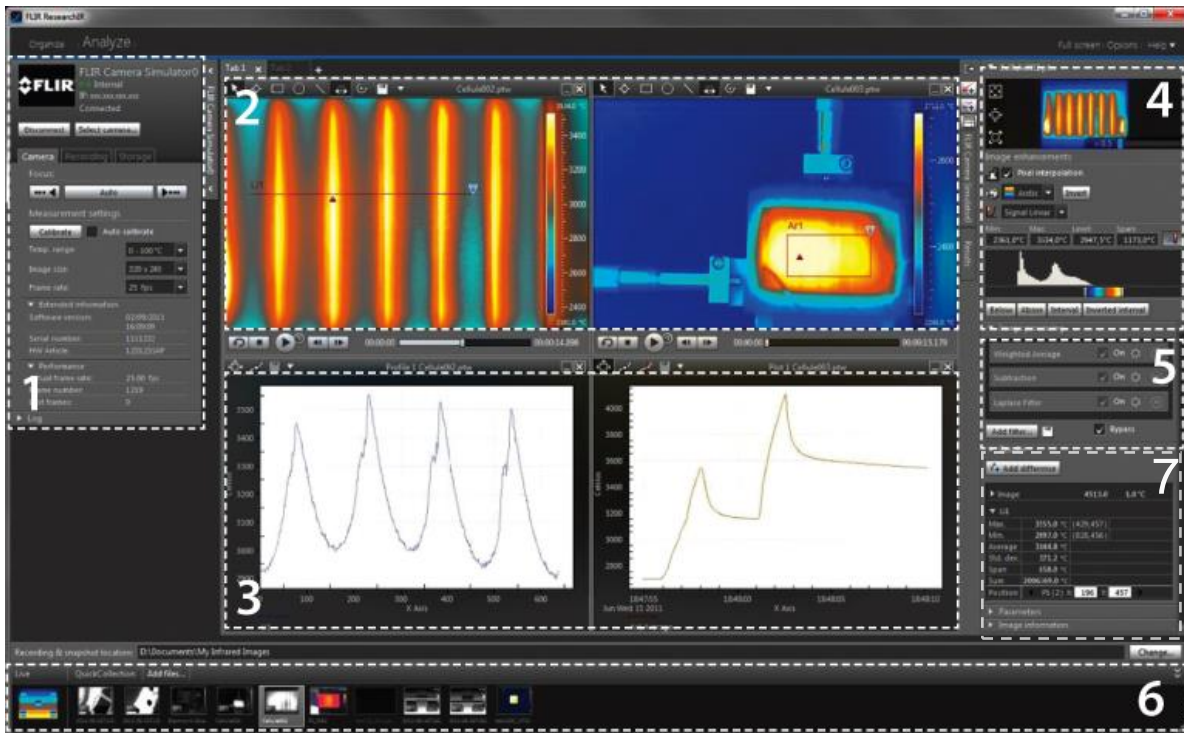


Abbildung 40: Analyseoberfläche FLIR ResearchIR Max 3.1 (Thermokameras 2017)

Die Abbildung 40 stellt die Benutzeroberfläche der verwendeten Software dar, mit der alle Aufnahmen aufgezeichnet, die ersten Auswertungen durchgeführt und anschließend die Daten zur weiteren Analyse exportiert wurden. In Tabelle 7 werden die grundlegenden Funktionen der Softwareoberfläche kurz erklärt, wobei die Nummern dem vorherigen Bild entsprechen.

Wie in Abbildung 36 schon gezeigt wurde, wird für die Aufnahme eines IR-Videos bzw. IR-Bildes die Kamera, die Übertragungs- und Stromverkabelung und ein Rechner zur Aufnahme und Auswertung benötigt. Nun wurde überlegt, welche möglichen Positionen und Versuchsdurchführungen umgesetzt werden können. Im nachfolgenden Kapitel werden diese Punkte erläutert.

Experimentelle Versuchsdurchführung

Tabelle 7: Beschreibung der Funktionen von FLIR ResearchIR Max 3.1

Positionsnummer	Beschreibung
Bereich 1	<ul style="list-style-type: none">• Verbindung mit Kamera herstellen• Temperaturmessbereich einstellen (kann je nach Kamertyp eingestellt werden)• Bildgröße und Bildwiederholungsrate einstellen (meist von Kamera vorgegeben)• Autofokusfunktion
Bereich 2: Aufnahme- und Auswertefenster	<ul style="list-style-type: none">• Mitverfolgung der IR-Aufnahmen• Nachträgliche Wiedergabe mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten möglich• Für genaue Analyse können unterschiedliche geometrische Formen (Bildpunkt, Rechteck, Kreis usw.) in Aufnahme eingefügt und extra ausgegeben werden• Temperaturskala
Bereich 3: Plotfenster	<ul style="list-style-type: none">• Hier lassen sich Temperaturen über die Aufnahmezeit aus dem gesamten Bildbereich oder den zuvor ausgewählten Bereichen durch die geometrischen Formen ausgeben• Es kann zwischen Höchst-, Niedrigst- und Durchschnittstemperatur eines Bereiches für die Ausgabe gewählt werden• In einem Plot können mehrere Bereiche gleichzeitig eingetragen werden• Die Daten der Plots können hier auch exportiert werden (z.B. als Excel-Format)
Bereich 4: Farbskalen- und Temperaturbereich	<ul style="list-style-type: none">• Einstellen der gewünschten Farbskala (Graustufen oder unterschiedliche Farbabstufungen)• Angezeigte Farbskala kann auch nur in einem bestimmten Temperaturbereich eingestellt und angezeigt werden
Bereich 5: Filter	<ul style="list-style-type: none">• Hier können unterschiedliche digitale Filter für die genauere Auswertung der Aufnahmen ausgewählt werden• z.B. Hochpass- oder Tiefpassfilterung
Bereich 6: Speicherung	<ul style="list-style-type: none">• Anzeige, welche Videos oder Bilder zuletzt aufgenommen wurden und wo sie abgespeichert sind
Bereich 7: Parameter- und Ergebnisdisplay	<ul style="list-style-type: none">• Es können hier die Einflussparameter wie Emissionsgrad oder Umgebungstemperatur (Raumtemperatur), die für die Auswertung wichtig sind, eingestellt werden• Im zweiten Untermenü werden die berechneten Temperaturwerte für die ausgewählten Bereiche angezeigt

4.2 Varianten der Versuchsdurchführung

Für Versuche wurde eine Matrix erstellt, um verschiedene Varianten der Umsetzung darzustellen. Sie soll als Übersicht dienen, um die durchgeführten Versuche besser einordnen und vergleichen zu können.

Kamera-Bewegung zeitliche Bildfolge	Unbewegt/ fixe Position	Mit Werkzeug mitgeführt
diskret	Variante 1: <ul style="list-style-type: none"> • Fixe Kameraposition • Einzelaufnahme 	Variante 3: <ul style="list-style-type: none"> • Kamera bewegt sich parallel zum Werkzeug mit • Einzelaufnahme
kontinuierlich	Variante 2: <ul style="list-style-type: none"> • Fixe Kameraposition • Videoaufnahmen 	Variante 4: <ul style="list-style-type: none"> • Kamera bewegt sich parallel zum Werkzeug mit • Videoaufnahmen

Diese vier Möglichkeiten wurden zu Beginn für die Versuchsdurchführung ausgewählt. Im Laufe dieser Arbeit wurden dann bestimmte Einschränkungen und Änderungen eingeführt, um die Versuche so gut wie möglich durchführen zu können. Durch Gespräche mit Experten wurden im Zuge der Experimente Adaptionen beim Versuchsaufbau durchgeführt.

Zunächst müssen noch die Begriffe für die Bildfolgen und die Kamerabewegung bzw. -position erläutert werden. Dafür sind in Tabelle 8 die genauen Beschreibungen für die zeitliche Bildfolge enthalten, mit der die Aufnahmen erstellt wurden.

Definition der zeitlichen Bildfolge:

Tabelle 8: Definition zeitliche Bildfolge der Aufnahmen

Bezeichnung	Definition
diskrete Aufnahmen	Es werden nur zu gewissen Zeitpunkten oder in zuvor definierten Zeitabständen Bilder aufgenommen. In dieser Arbeit wurden je nach Bearbeitungsdauer alle 1,5 Sekunden oder alle 5 Sekunden ein Bild aufgenommen
kontinuierliche Aufnahmen	Es wird über den gesamten Bearbeitungszeitraum ein Video aufgezeichnet. Mit dieser Kamera werden pro Sekunde 25 Bilder aufgenommen und anschließend hintereinander abgespielt.

Der Vorteil der Aufnahme von einzelnen IR-Bildern liegt darin, dass die entstehende Datenmenge geringer gehalten werden kann und somit eine Übertragung und Speicherung vereinfacht wird. Die Bilder müssen immer zum gleichen Bearbeitungszeitpunkt bzw. -schritt erstellt werden, um sie anschließend mit zuvor aufgenommenen Referenzbildern vergleichen zu können. Bei den kontinuierlichen Videoaufnahmen hingegen sind aufgrund der hohen Bildwiederholungen pro Sekunde die Datenmenge sehr groß. Eine Aufnahme von wenigen Sekunden der Bearbeitung benötigen mehrerer 100MB an Datenspeicherung. Es kann daher zu Problemen in der direkten Übertragung und der Speicherung der Daten kommen. Durch die Videoaufnahmen können allerdings genaue Verläufe über die Bearbeitungszeit aufgezeichnet und mit einander verglichen werden.

Definition der Kamerabewegung/ -position:

Die Kamera wurde für die Versuche an zwei unterschiedlichen Positionen montiert, in den ersten Versuch an einer bestimmten Position aufgestellt und für die zwei weiteren Versuche mit der Werkzeugbewegung mitgeführt. Nachfolgend werden die zwei Durchführungsarten kurz erklärt.

Tabelle 9: Definition Kamerabewegung/ -position

Bezeichnung	Definition
Unbewegte/ fixe Kameraposition (Versuchsreihe 1)	Es wurden die ersten beiden Varianten (Variante 1 & 2) mit der gleichen Kameraposition außerhalb des BAZ's durchgeführt. In weiterer Folge wurden keine andere fixe Position für einen weiteren Versuch angewendet.
Kameraführung folgt der Werkzeugbewegung (Versuchsreihe 2 und 3)	Bei den Versuchen mit mitbewegter Kamera wurde eigens eine Vorrichtung gebaut, die es möglich machte, die Kamera innerhalb des BAZ's mit der Werkzeugbewegung mitzuführen. Damit wurden die Varianten 3 und 4 der Versuchsmatrix durchgeführt.

Der Versuch mit der fixen Kameraposition sollte einer ersten Abschätzung zur Umsetzung des Einsatzes einer IR-Kamera für die Werkzeugüberverschleißerkennung dienen. Die beiden anderen Versuchsreihen wurden so durchgeführt, dass sich die Kamera mit dem Werkzeug mitbewegte. Beim zweiten Versuch wurden Werkstücke aus unterschiedlichen Materialien mit gleicher Bauform verwendet. Für die letzte Versuchsreihe wurde eine möglichst produktionsnahe Bearbeitung umgesetzt und ausgewertet.

Werkzeugzustände:

Wichtig in diesem Zusammenhang ist noch die Definition der Werkzeugzustände, die bei den Versuchen verwendet wurden. In Tabelle 10 sind die einzelnen Begriffe der Zustände und deren genaue Beschreibung zu finden.

Tabelle 10: Definition Werkzeugzustände

Bezeichnung	Definition
Neues Werkzeug	Als neues Werkzeug wird jenes Werkzeug bezeichnet, welches mit neuen Wendeschneidplatten bestückt wurde oder bei dem die Schneiden nachgeschliffen und somit wieder als neuwertig bezeichnet werden können
Gebrauchtes Werkzeug	Sind Werkzeuge, die direkt aus der Produktionslinie entnommen wurden. Sie waren bereits eine bestimmte Zeit (oder Anzahl von Bearbeitungen) im Einsatz. Über den Grad der Abnutzung kann allerdings keine genaue Aussage getroffen werden, da keine genauen Informationen vorhanden sind
Verschlissenes Werkzeug	Verschlossene Werkzeuge haben bereits beschädigte Wendeschneidplatten oder Schneiden, dass sie für einen Einsatz nicht mehr geeignet sind, da die geforderte Qualität der Oberfläche nicht mehr erreicht werden kann

Für eine bildliche Darstellung dieser Definitionen soll die Abbildung 41 dienen. Es handelt sich hierbei allerdings nur um eine schematische Darstellung der Verschleißkurve zum besseren Verständnis. Für einen genauen Verlauf der Kurve müssten Langzeituntersuchungen vorgenommen werden.

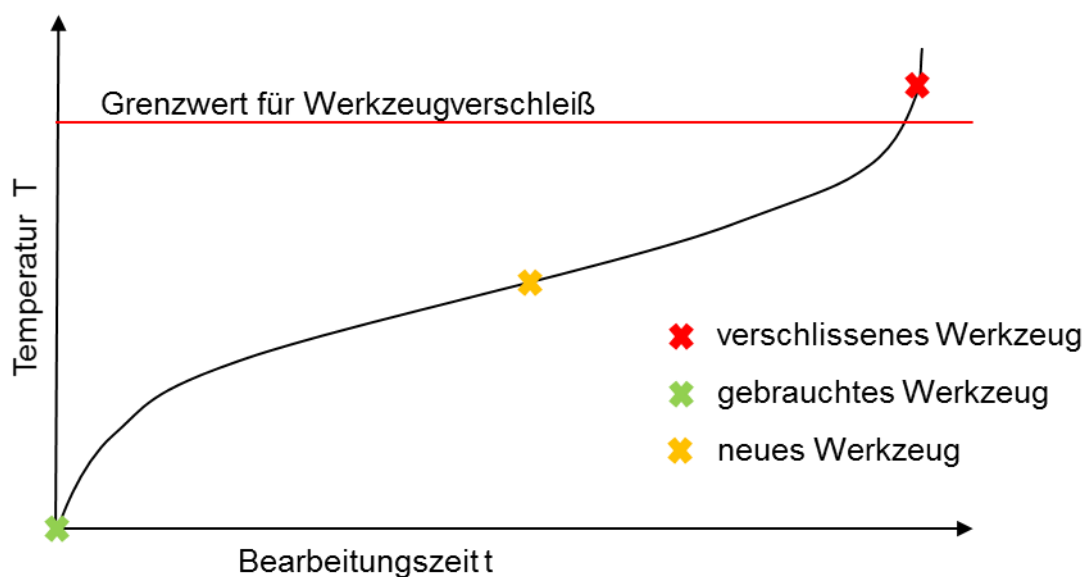


Abbildung 41: Schematische Darstellung einer Verschleißkurve (Weck, Brecher 2006, S. 361)

4.3 Versuchsreihe 1: fixe Kameraposition

Durch die örtlichen Gegebenheiten war es leider nicht möglich, die Kamera innerhalb des BAZ's an einer fixen Position anzubringen. Die Tabelle 11 beinhaltet die wichtigsten Punkte des Vorgehens, wie beispielsweise das verwendete Werkzeug und die Bearbeitungsparameter, sowie das Ziel dieses Versuches.

Vorgehensweise:

Tabelle 11: Vorgehen 1. Versuchsreihe

Bezeichnung	Beschreibung
Ziel	Erste Abschätzung der Durchführbarkeit für Werkzeugverschleißerkennung; Testen der fixen Position der Kamera außerhalb des BAZ
Werkstück	Stahlguss Zylinderkurbelgehäuse (ZKG)
Werkzeuge	Stirnfräser Ø 80 mm 6 Wendeschneidplatten
Werkzeugzustände	Neues Werkzeug Verschlissenes Werkzeug
Bearbeitungsparameter	
Drehzahl	$n = 1500 \text{ U/min}$
Schnittgeschwindigkeit	$v_c = 1500 \text{ mm/min}$
IR-Kameratyp	Ungekühlter Mikrobolometer
Bearbeitung pro Werkzeug	
Zyklen	5
Bahnen/Zyklus	3
Abtrag/Zyklus	0,5 mm
Bearbeitungsschritte gesamt (= Zyklen x Bahnen)	15 (2,5 mm Gesamtmaterialabtrag)

4.3.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Der grundsätzliche Aufbau der Messungen wurde schon in Abbildung 36 dargestellt. Bei dieser Versuchsreihe wurde die Kamera, wie in Abbildung 42 (links und Mitte) ersichtlich ist, außerhalb des ebenfalls zuvor beschriebenen Bearbeitungszentrums (BAZ) an einer fixen Position aufgestellt, um die Aufnahmen durchzuführen.

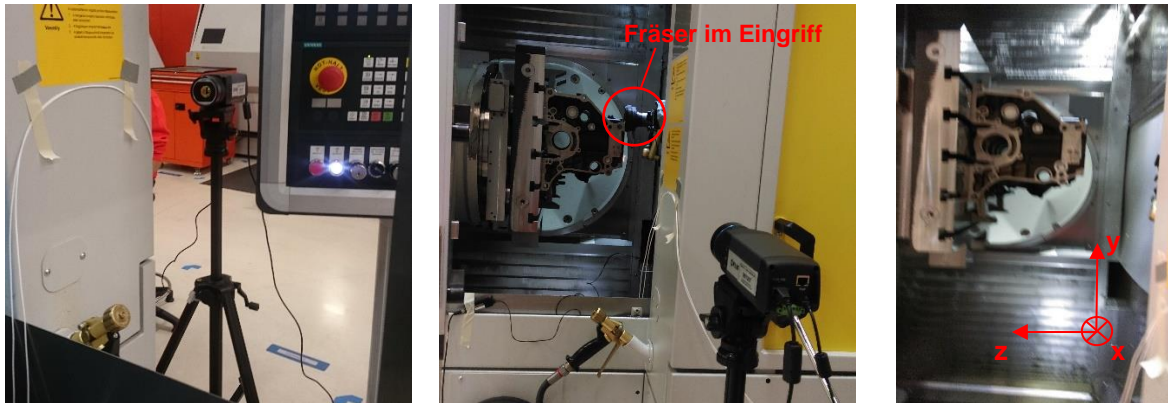


Abbildung 42: Bilder Kameraposition 1. Versuchsreihe; links: Kamera steht außerhalb von BAZ; Mitte: Blickwinkel des Gerätes auf ZKG; rechts: Lage der ZKG's während der Bearbeitung

Im mittleren Bild ist der im Eingriff befindliche Fräser zu erkennen, das rechte Bild zeigt die Lage des bearbeiteten Werkstückes. Bei diesem Typ von BAZ bewegt sich das Werkzeug über die zu bearbeitende Fläche in zwei Richtungen. In diesem Fall bedeutet das die Zustellung in die x- und z-Achse dieser Maschine. Die Bewegung des Werkzeuges in x-Richtung bei der Versuchsreihe ist eine Bewegung in die Bildebene hinein und aus der Bildebene heraus. Für die Zustellung der z-Achse bewegt sich der Fräser während der Aufzeichnung nach links bzw. rechts. Führt das Werkstück eine Bewe-

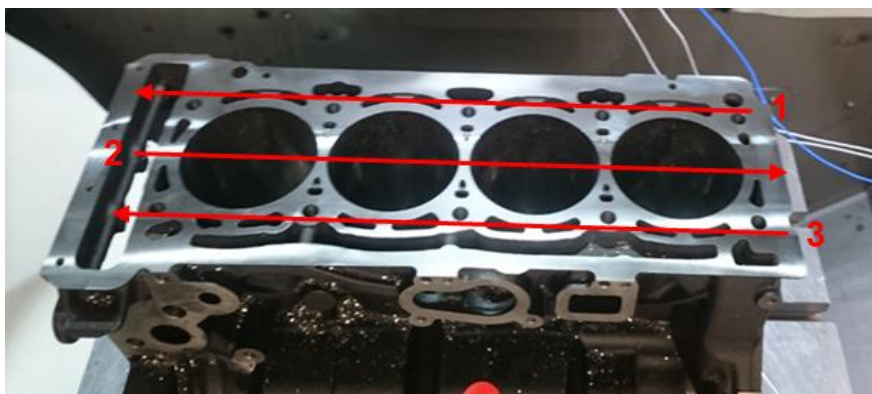


Abbildung 43: Bearbeitungsschritte 1. Versuchsreihe

gung in den Aufnahmen nach oben oder unten, so handelt es sich um die Bewegung in y-Richtung. Der Tisch, auf dem das Werkstück befestigt ist, könnte sich noch um zwei weitere Achsen bewegen, diese werden aber bei dieser Bearbeitung nicht benö-

tigt. Die Bearbeitung des Werkstückes wird in sogenannte Bearbeitungszyklen eingeteilt, welche aus mehreren Bearbeitungsschritten bestehen. Die Schritte werden in Abbildung 43 für die erste Versuchsreihe grafisch dargestellt. In diesem Fall mussten drei Bearbeitungsschritte für die komplette Bearbeitung der Zylinderkopffläche mit dem Fräser durchgeführt werden. Die Zustelltiefe betrug jeweils 0,5 mm und es wurden insgesamt fünf Zyklen durchgeführt, somit kam es zu einem Gesamtabtrag von 2,5 mm. Um eventuelle Fehler in der Messung erkennen und eliminieren zu können, wurden mehrere Bearbeitungszyklen durchgeführt

Es wurde für die Auswertung jeweils ein Video mit einem neuen und einem verschlissenen Werkzeug über den gesamten Zyklus aufgenommen. Die Daten wurden direkt auf einen Rechner übertragen und aufgezeichnet. In weiterer Folge wurden sie dann analysiert und ausgewertet.

4.3.2 Auswertung

Bei der Auswertung können in der Software alle wichtigen Parameter, wie Emissionsgrad oder Umgebungstemperatur nachträglich noch geändert werden. Für diesen Versuch wurden die Parameter verwendet, die in Tabelle 12 angeführt sind.

Tabelle 12: Parameter Auswertung 1.Versuchsreihe

Parameter	Wert
Emissionsgrad (FLIR Systems 2011, S. 94)	0,21
Atmosphärische Temperatur (Raumtemperatur)	22°C
Relative Luftfeuchtigkeit	0,5
Transmissionsgrad	1
Entfernung des Messobjektes	1,2m

Der Wert der Emission wurde aus einer Tabelle für poliertes Gusseisen des Benutzerhandbuches entnommen. Die relative Luftfeuchtigkeit ist standardmäßig auf 0,5 eingestellt und durch eine zusätzliche Messung verifiziert. Der Transmissionsgrad ändert sich automatisch im Programm bei einer geringen Distanz zum Messobjekt auf den Wert 1, da die Atmosphäre bei so geringen Distanzen keinen Einfluss auf die Messung hat.

Zu Beginn der experimentellen Versuchsdurchführung sind die zwei verschiedenen Varianten für die Auswertung beschrieben worden. Einerseits die Auswertung von Bildern zu bestimmten Zeitpunkten, andererseits die Auswertung über den gesamten Beobachtungszeitraum. Nun werden die Auswertungen der beiden Varianten für die fixe Position der Kamera erklärt.

Auswertung der diskreten Bildfolge:

Bei der Auswertung von den Bildern zu bestimmten Zeitpunkten wurden die Aufnahmen des neuen und des verschlissenen Werkzeuges so eingestellt, dass genau die gleichen Bilder zur gleichen Bearbeitungszeit gegenübergestellt wurden. Damit konnte die Abstrahlung in der Schneidzone miteinander verglichen werden. Für die erste Abschätzung des Temperaturunterschiedes wurde nur eine rein subjektive Bewertung herangezogen. In Abbildung 44 wird die Bearbeitung des ZKG's mit einem neuen (links) und einem verschlissenen (rechts) Werkzeug verglichen. Die Bilder wurden genau zum gleichen Bearbeitungszeitpunkt aufgenommen. Parameter und Temperaturskalen wurden für beide Aufnahmen gleich eingestellt. Es lässt sich schon durch die reine Betrachtung der beiden Bilder sagen, dass im rechten Bild im Bereich der Schneidzone eine höhere Abstrahlung zu sehen ist, als im linken Bild.

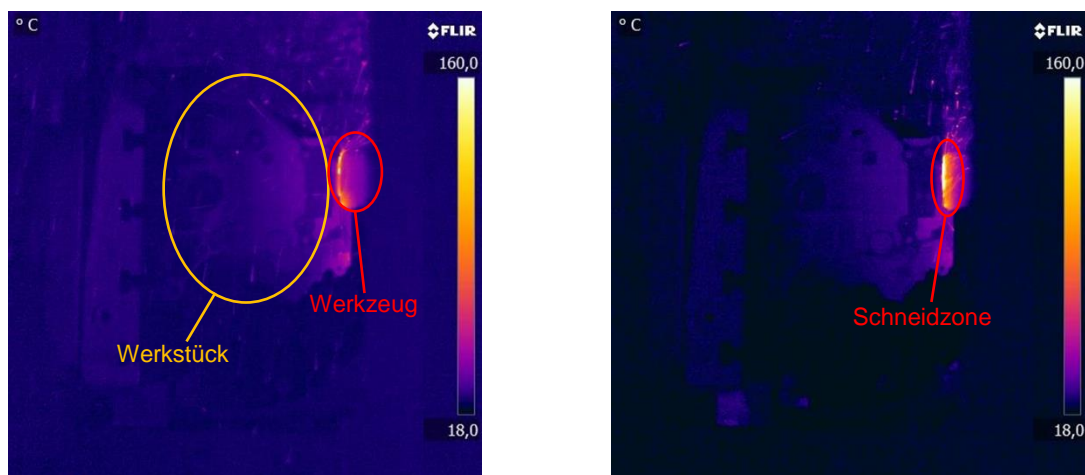


Abbildung 44: Vergleich Bearbeitung ZKG mit beiden Werkzeugzuständen
links: neues Werkzeug; recht: verschlissenes Werkzeug

Es wurden nun die Bilder zu verschiedenen Zeitpunkten miteinander verglichen und bewertet. Die Ergebnisse werden im Kapitel 4.3.3 genau besprochen.

Auswertung der kontinuierlichen Bildfolge:

Die Auswertung der Videoaufnahmen erfolgte ähnlich, wie zuvor die Auswertung der Bilder. Der hauptsächliche Unterschied in der Auswertung ist, dass bei den Aufnahmen der beiden Werkzeugzustände jeweils die maximale Temperatur im gesamten Bildbereich aufgezeichnet und über die Bearbeitungszeit ausgegeben wurde. Exemplarisch zeigt die Abbildung 45 eine eben beschriebene Auswertung für die Bearbeitung mit dem neuen Werkzeug. Bei diesem Bild sind nur die ersten beiden Bearbeitungszyklen zu sehen, da sich die weiteren Zyklen kaum voneinander unterscheiden. Alle Messwerte der beiden Bearbeitungen wurden aufgezeichnet und als Excel-Werte exportiert, um in Excel die weitere Auswertung durchführen zu können. Die Kamera hat eine Bildwiederholungsfrequenz von 25Hz, das bedeutet, dass pro Sekunde 25 Bilder aufgenommen werden. Es werden pro Sekunde 25 Datenpunkte für die maximale Temperatur aufgezeichnet. Wird eine Bearbeitung von einer Minute aufgenommen und nur die Datenpunkte der maximalen Temperatur aufgezeichnet, so entstehen insgesamt 1500 Datenpunkte für diese eine Minute. Anschließend wurden die exportierten Daten in Excel geöffnet und es wurde ein Vergleich der beiden Werkzeugzustände über die gesamte Bearbeitungszeit erstellt.

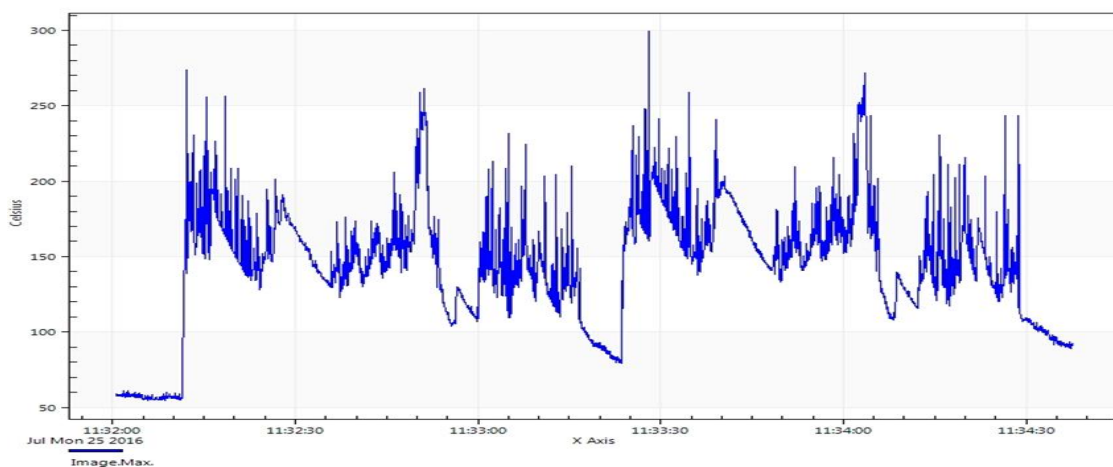


Abbildung 45: Aufzeichnung der maximalen Temperatur im Bildbereich über die Bearbeitungszeit des neuen Werkzeuges

4.3.3 Ergebnisse

Aus den beiden Auswertungen für Bild- und Videomaterial können nun die Ergebnisse zusammengefasst und genauer erläutert werden. In weiterer Folge werden auch die Vor- und Nachteile der beiden Varianten besprochen. Für beide Ergebnisse kann aber

schon gesagt werden, dass ein Unterschied in der Abstrahlung und somit der Temperatur in der Schneidzone erkennbar ist und dadurch der Unterschied der Werkzeugzustände eindeutig nachweisbar ist.

Ergebnis der diskreten Bildfolge:

Die Auswertungen der Bildervergleiche haben ergeben, dass ein deutlicher Unterschied in der Abstrahlung, direkt während der Bearbeitung, zu sehen ist. Es wurde auch untersucht, ob ein Temperaturunterschied direkt nach dem Bearbeitungszyklus mit dem neuen und dem verschlissenen Werkzeug zu erkennen ist. Da die Temperaturabkühlrate von spanenden Werkzeugen sehr hoch ist, ist ein kleiner Temperaturunterschied zu erkennen, dieser eignet sich daher nicht so gut für eine genaue Überwachung. Damit kann gesagt werden, dass eine Bildauswertung für die Werkzeugzustandsüberwachung möglich ist, allerdings muss eine geeignete Position der Kamera für Aufnahmen gefunden werden.

Ergebnis der kontinuierlichen Bildfolge:

Aus den Daten der Videoauswertung konnte eine erste Abschätzung über die Durchführbarkeit einer Verschleißerkennung abgeleitet werden. Das große Problem bei der Auswertung der Videos war, dass sich das Werkzeug und das Werkstück während der Aufnahmen im Raum (in x- und y-Richtung) bewegten. Mit dieser Software war eine Objektverfolgung des Werkzeuges nicht möglich und somit konnte keine detaillierte Auswertung in der Schneidzone erfolgen. Wie schon zuvor erwähnt, wurden nur die maximalen Strahlungswerte des gesamten Bildbereiches ausgegeben. Ein weiteres Problem war, dass die Hauptbearbeitung in x-Richtung (siehe Abbildung 42 rechts) erfolgte. Das bedeutet, dass bei den Bearbeitungsschritten 1 und 3 bei diesem Versuch die Rückseite des Fräsers zu sehen war.

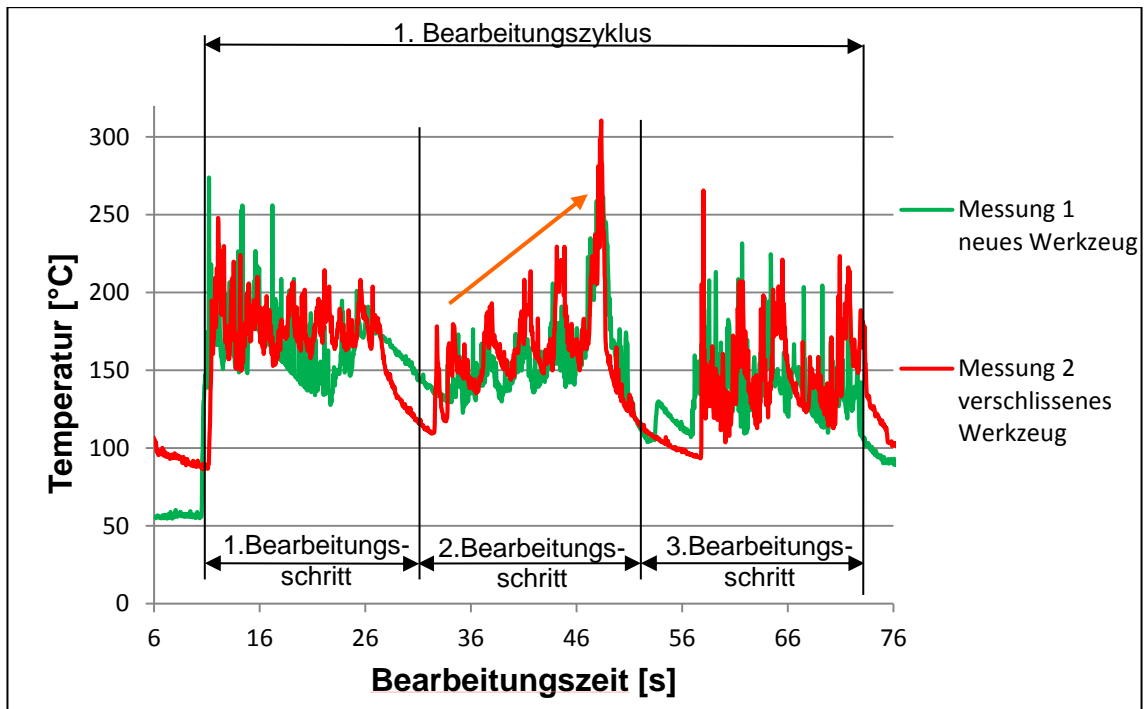


Abbildung 46: Zeitlicher Verlauf der Temperaturen von neuem und verschlissenem Werkzeug der ersten Versuchsreihe

Nur bei Bearbeitungsschritt 2 hatte die Optik direkten Blick auf die Schneidzone, die untersucht werden soll. Abbildung 46 zeigt exemplarisch den ersten Bearbeitungszyklus mit den drei Bearbeitungsschritten, bei dem diese Problematik zu erkennen ist. Bei den Bearbeitungsschritten 1 und 3 sind die Verläufe der Temperaturen der beiden Werkzeugzustände nicht eindeutig voneinander zu unterscheiden und somit ist es nicht sinnvoll, sie miteinander zu vergleichen. Für den 2. Bearbeitungsschritt können

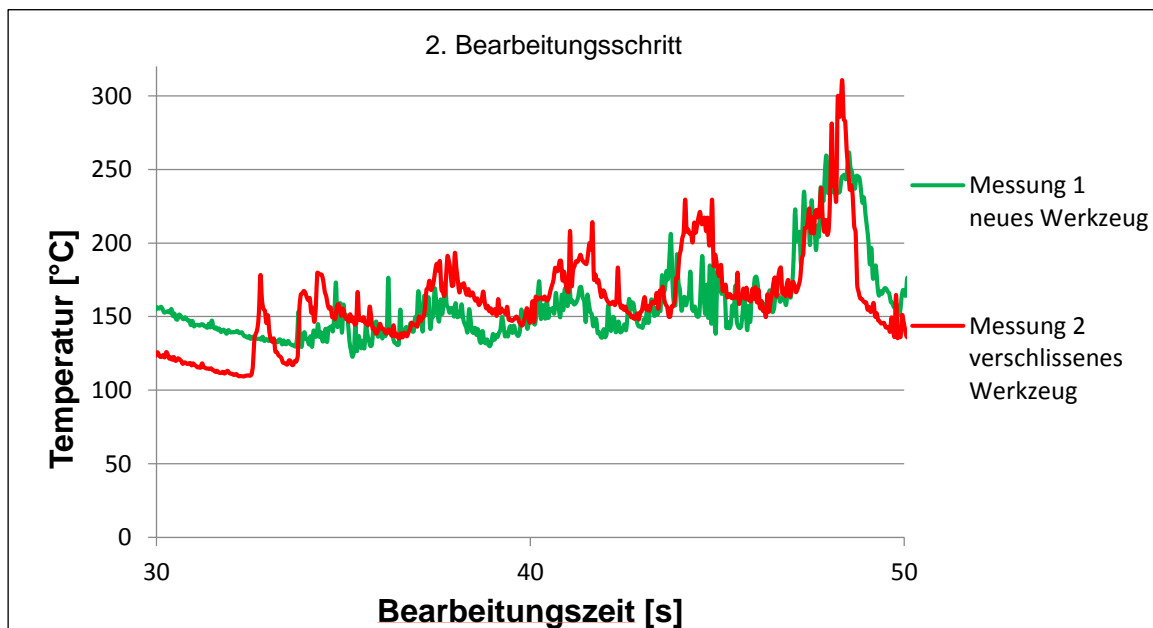


Abbildung 47: Zeitlicher Verlauf des 2. Bearbeitungsschrittes des ersten Zyklus der ersten Versuchsreihe

die beiden Verläufe viel besser verglichen werden, da sie eine sehr ähnliche Charakteristik aufweisen.

Um diese deutlicher zu sehen, ist in Abbildung 47 nur der 2. Bearbeitungsschritt zu sehen. In Rot ist der Verlauf des verschlissenen Werkzeuges zu erkennen und der grüne Verlauf stellt jenen des neuen Werkzeuges dar. Zu nahezu jedem Zeitpunkt ist zu erkennen, dass die Werte der roten Linie höher sind, als die der Grünen. Es wurde somit gezeigt, dass es einen deutlichen Temperaturunterschied zwischen neuem und verschlissenem Werkzeug gibt.

Der Anstieg der beiden Verläufe während der Bearbeitung ergibt sich daraus, dass sich das Werkzeug zur Kamera hinbewegte und es dadurch zu einer höheren Strahlungsintensität aufgrund der geringer werdenden Entfernung zwischen Messobjekt und Kameraoptik gekommen ist. In Abbildung 46 ist dieser Anstieg beim 2. Bearbeitungsschritt mit dem orangen Pfeil markiert.

4.3.4 Fazit

Mit einer fixen Position der Kamera außerhalb des BAZ ist ein Unterschied der Temperatur in der Schneidzone erkennbar. Es konnte sowohl eine Differenz in der Abstrahlung bei dem Bildervergleich als auch bei den Videoaufnahmen identifiziert werden. Nachteilig bei der festen Position des Aufnahmegerätes und der Videoauswertung war, dass keine Objektverfolgung des Werkzeuges möglich war und damit eine genaue Aussage über die tatsächliche Abstrahlung nicht möglich ist. Somit eignet sich die Bildauswertung bei der fixen Position eher, da dann ein Referenzwert für die Abstrahlung des neuen Werkzeuges für eine genau definierte Position während der Bearbeitung erstellt werden kann. Problematisch ist nur, dass bei einem neuen oder anderen Bearbeitungsprozess zuerst wieder eine geeignete Bildposition gefunden und ein neues Vergleichsbild mit einem neuen Werkzeug erstellt werden muss.

Ein weiterer Punkt, der aus der Versuchsdurchführung hervorgekommen ist, dass die Entfernung der Kameraoptik eine sehr große Rolle spielt. Hier wurde auch schon in der Theorie im Kapitel 3.2.3 darauf hingewiesen, dass eine möglichst geringe Entfernung zum Messobjekt die genauesten Messergebnisse liefert. Somit wurde im Zuge der Arbeit, mit den Verantwortlichen entschieden, dass bei weiteren Versuchen die Kamera so nahe wie möglich an den Fräser herangebracht werden muss.

Für die weiteren Versuchsreihen wurde dann die Kamera mit dem Werkzeug mitgeführt, um einen Vergleich zu der fixen Position zu erhalten. Auch dabei wurde wieder das Bild- und Videomaterial getrennt voneinander betrachtet.

4.4 Versuchsreihe 2: Materialvergleich mit mitgeführter Kamera

Die IR-Kamera wurde bei der Durchführung der Versuchsreihe 2 und 3, wie schon erklärt, mit dem Werkzeug mitbewegt. Dafür wurde eigens eine Vorrichtung hergestellt, die direkt im BAZ montiert werden konnte. Damit konnte das Problem der Entfernung der Optik zum Messobjekt beseitigt werden. Bei den Versuchen wurden beide Varianten der Bildfolge getestet, wie bereits im vorherigem Versuch. In Tabelle 13 sind die wichtigsten Punkte und Parameter dieser Versuchsreihe zusammengefasst.

Vorgehensweise:

Tabelle 13: Vorgehen 2. Versuchsreihe

Bezeichnung	Beschreibung	
Ziel	Testen der mitgeführten Kamerabewegung; Prüfung der Übertragbarkeit auf andere Materialien; Erkennung von Temperaturunterschieden bei Verwendung verschiedener Bearbeitungsparameter der Werkzeuge (Programm 1 und Programm 2)	
Werkstücke	Rundproben aus Stahl, Guss und Aluminium	
Werkzeuge	Stirnfräser (Ø 80 mm) 6 Wendeschneidplatten	
Werkzeugzustände	Neues Werkzeug Verschlissenes Werkzeug	
Bearbeitungsparameter	Programm 1	Programm 2
Drehzahl	n = 1500 U/min	n = 1500 U/min
Schnittgeschwindigkeit	v _c = 1500 mm/min	v _c = 2000 mm/min
IR-Kameratyp	Ungekühlter Mikrobolometer	
Bearbeitung pro Werkzeug		
Zyklen	2	
Bahnen/Zyklus	2	
Abtrag/Zyklus	0,5 mm	
Bearbeitungsschritte gesamt (= Zyklen x Bahnen)	4 (1 mm Gesamtmaterialeabtrag)	

Bei dieser Versuchsreihe wurden spezielle Werkstücke aus verschiedene Materialien und denselben Abmessungen angefertigt, um eine Aussage über die Vergleichbarkeit zwischen den Werkstoffen erhalten zu können. Aus Tabelle 13 (Werkstücke) ist ersichtlich, dass Materialien verwendet wurden, die auch in der Produktion bei Audi vorkommen.

4.4.1 Versuchsaufbau

Der Unterschied zum Aufbau bei dem ersten Versuch wurde schon kurz erwähnt. Die IR-Kamera konnte durch eine eigens angefertigte Vorrichtung innerhalb des BAZ befestigt werden. Sie wurde so installiert, dass sie sich mit dem Werkzeug in Bearbeitungsrichtung mitbewegen konnte.

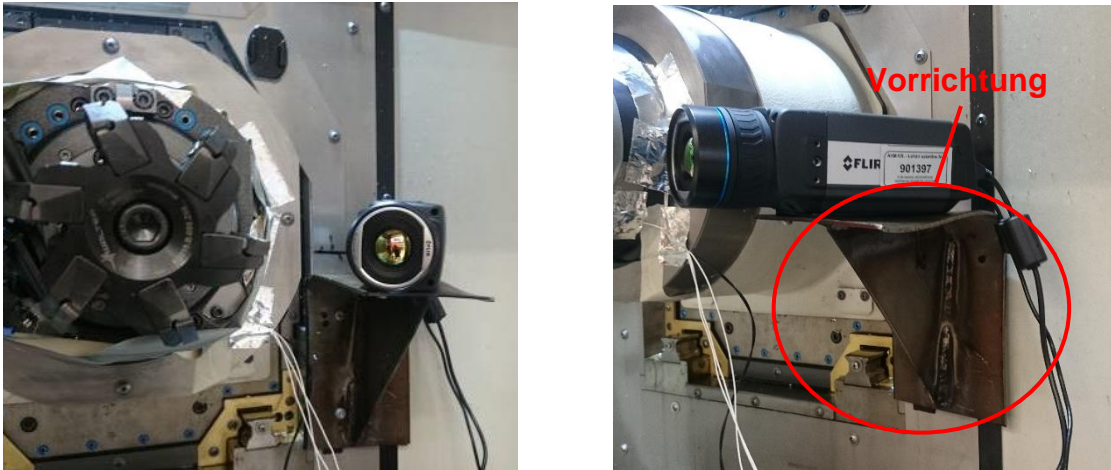


Abbildung 48: Vorrichtung für Kamerabefestigung innerhalb des Bearbeitungszentrums
links: Ansicht auf Kameraoptik und Fräser; rechts: Seitenansicht der Vorrichtung

Die Vorrichtung wurde, wie in Abbildung 48 (links) zu sehen ist, mit Schrauben neben der Hauptspindel fixiert und die Kamera konnte mit einer weiteren Schraube auf der Vorrichtung befestigt werden. Durch diese Installation der Kamera, konnte die Entfernung zum Messobjekt stark verringert werden. Ein weiterer Punkt war allerdings, einen Schutz für die sehr empfindliche Kameraoptik zu finden. Alle Bearbeitungen bei den Versuchen wurden als Trockenbearbeitung durchgeführt. Die heißen Späne könnten dadurch ungehindert auf die Kamera gelangen und im schlimmsten Fall diese auch beschädigen. Mit Absprache eines Experten wurde die Kamera in weiterer Folge in eine temperaturbeständige, transparente Folie gewickelt, um das Aufnahmegerät vor den heißen Spänen zu schützen. Die Folie ist allerdings nur im sichtbaren Licht transparent, im IR-Bereich kam es zu einer starken Dämpfung der Strahlung und was somit wie ein Filter vor der Optik wirkte. Nur durch Versuche unter Laborbedingungen könnte gemessen werden, wie stark die Folie die IR-Strahlung absorbiert bzw. welchen genauen Emissionsgrad die Folie besitzt. Solch eine genaue Messung konnte nicht durchgeführt werden und es musste daher eine andere Alternative für eine ungefähre Abschätzung des Emissionsgrades überlegt werden, welche sich für eine möglichst genaue Messung eignete. Dafür wurde ein LötKolben, mit einer zuvor eingestellten Temperatur, im Bereich der Wendeschneidplatten des Fräasers gehalten.

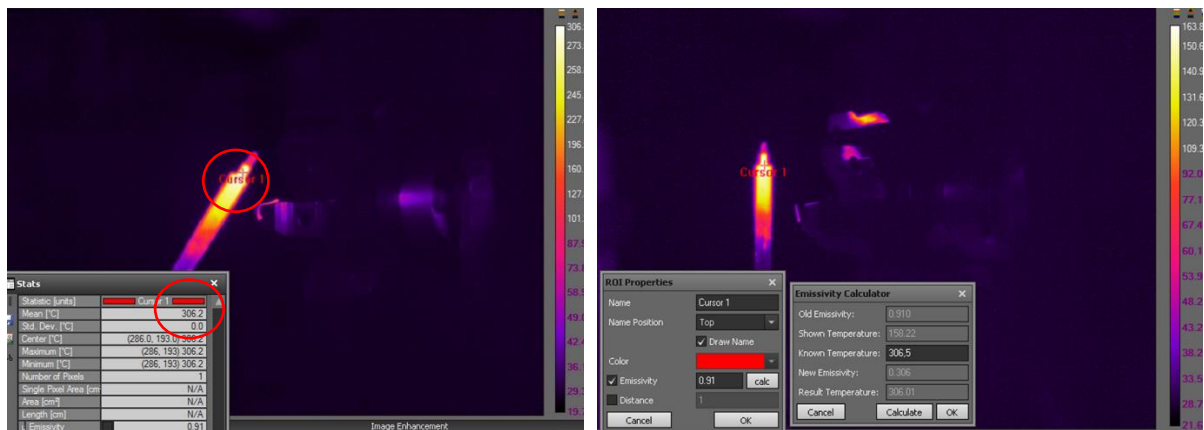


Abbildung 49: IR-Bilder des LötKolbens neben Fräser; links: ohne Folie; rechts: mit Folie

In Abbildung 49 links wurde die Temperatur des LötKolbens ohne Folie gemessen und aufgezeichnet. Im rechten Bild wurde die Folie vor das Objektiv gehalten und es wurde eine weitere Aufnahme des LötKolbens mit gleicher Temperatur erstellt. Mit dem Auswertungstool konnte die zuvor gemessene Temperatur ohne Folie eingegeben werden und daraus der neue Emissionsgrad errechnet werden. Dieser Wert blieb für alle weiteren Versuche gleich, um einen besseren Vergleich zwischen den unterschiedlichen Materialien durchführen zu können.

4.4.2 Versuchsdurchführung

Die Versuche wurden mit drei unterschiedlichen Werkstoffen durchgeführt, die in Tabelle 14 mit genauer Bezeichnung angeführt sind. Wie in Abbildung 50 zu sehen ist, besitzen alle drei Werkstücke die selben Abmaße und es wurden die gleichen Bearbeitungszyklen mit dem gleichen Werkzeug durchgeführt. Als Werkzeug wurde bei allen Materialien ein Fräser mit sechs Wendeschneidplatten verwendet.



Abbildung 50: Probestücke für 2.Versuchsreihe

Tabelle 14: Werkstoffbezeichnungen
2.Versuchsreihe

Werkstoff	Kurzbezeichnung (Materialnummer)
Grauguss	GGG60 (GJS-600)
Stahlguss	16MnCr5 (1.7131)
Aluminium	AlZn5,5MgCu (3.4365)

Die Bearbeitungsschritte sind in Abbildung 51 eingezeichnet. Ein Zyklus besteht bei diesen Versuchen aus zwei Schritten und es wurden jeweils zwei Zyklen durchgeführt. Pro Zyklus wurden jeweils 0,5 mm in die Werkstücktiefe zugestellt und abgetragen.

Wie schon bei der ersten Versuchsreihe, wurden mehrere Zyklen aufgezeichnet, um stochastische Fehler ausschließen zu können. Zudem wurden zwei verschiedene Programme verwendet, die sich nur in der Schnittgeschwindigkeit unterschieden. Es sollte getestet werden, ob eine unterschiedliche Schnittgeschwindigkeit das Ergebnis der Versuche stark beeinflusst. Zunächst wurden alle Werkstücke mit den zwei verschiedenen Werkzeugzuständen und den Parametern des 1. Programms und anschließend mit dem 2. Programm (= höhere Schnittgeschwindigkeit) bearbeitet.

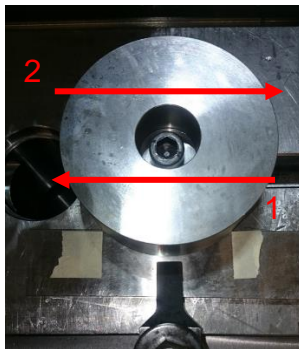


Abbildung 51: Bearbeitungsschritte 2. Versuchsreihe

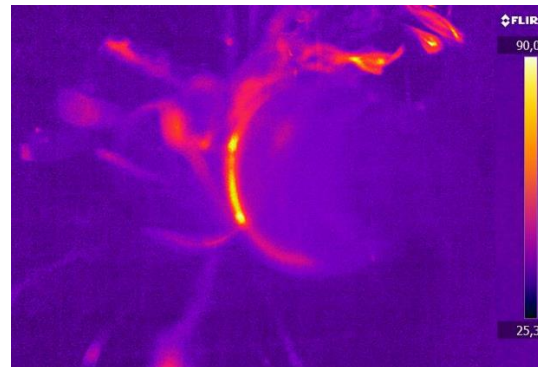


Abbildung 52: IR-Aufnahme der Bearbeitung von Stahl mit verschlissenen Werkzeug

Das aufgenommene Videomaterial aller Bearbeitungen wurde dann mit Hilfe der Software für die erste Auswertung aufbereitet.

4.4.3 Auswertung

Bei der zweiten Versuchsauswertung wurden in der Software wieder die Parameter für jede Aufnahme gleich eingestellt, damit ein besserer Vergleich gegeben ist. Wie zuvor schon beschrieben, wurde der Emissionsgrad diesmal nicht selbst gewählt, sondern mit Hilfe der Software berechnet. Alle Werte, die in dem Programm eingestellt wurden, sind in Tabelle 15 aufgelistet.

Tabelle 15: Parameter 2. Versuchsreihe

Parameter	Wert
Emissionsgrad	0,305
Atmosphärische Temperatur (Raumtemperatur)	22°C
Relative Luftfeuchtigkeit	0,5
Transmissionsgrad	1
Entfernung des Messobjektes	0,3 m

Es wird bei der Auswertung wieder zwischen diskreter und kontinuierlicher Bildfolge unterschieden, wobei bei dieser und der letzten Versuchsreihe mehr auf die kontinuierliche Aufnahme eingegangen wurde. Aus dem ersten Versuch konnte schon abgeleitet werden, dass eine Auswertung zu bestimmten Zeitpunkten möglich ist. Die 2. Versuchsreihe sollte diese Aussage weiterhin bestätigen und die Auswirkungen der veränderten Bedingungen zeigen.

Auswertung der diskreten Bildfolge:

Der Vorgang für diese Auswertung erfolgte genau gleich, wie bei der ersten Versuchsreihe. Zum Vergleich wurde für alle drei Werkstoffe eine Aufnahme zum selben Zeitpunkt der Bearbeitung jeweils mit dem neuen und dem verschlissenen Werkzeug herangezogen. Es wurde im Abstand von einer Sekunde ab Bearbeitungsbeginn eine Auswertung erstellt. Aufgrund der Tatsache, dass die Abkühlung im Schneidbereich relativ rasch erfolgt, wurde hier auf die Auswertung nach den Bearbeitungszyklen verzichtet. In Abbildung 53 sind exemplarisch die IR-Bilder des neuen (links) und des verschlissenen Werkzeuges (rechts) bei der Bearbeitung von Stahl gegenübergestellt. Die hier rot markierten Bereiche stellen die Schneidzonen der Bearbeitung dar. In den grünen Bereichen ist der Spanflug zu erkennen. Bei diesen Versuchen ist das Werkstück in den IR-Aufnahmen immer nur sehr schwer zu erkennen, da die Temperatur im Bereich der Schneidzone deutlich höher ist, als die Temperaturen von den anderen Objekten im Bildbereich.

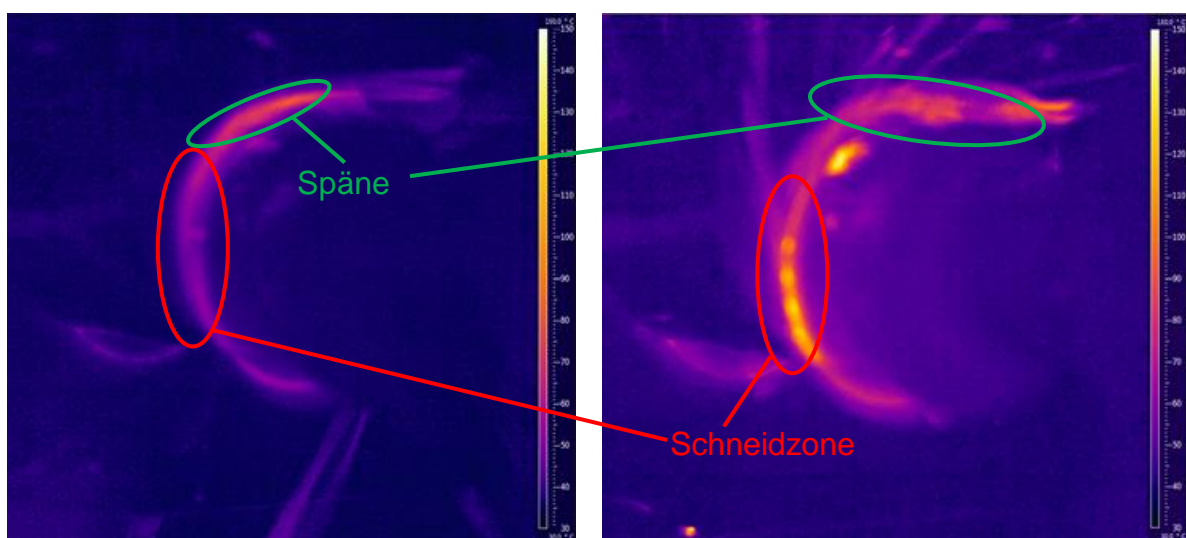


Abbildung 53: IR-Aufnahmen von der Bearbeitung der Probe aus Stahl mit neuem und verschlissenen Werkzeug
links: Bearbeitung mit dem neuen Werkzeug; rechts: Bearbeitung mit dem verschlissenen Werkzeug

Mit dem Auswertungsprogramm wurden in allen Aufnahmen die gleichen einzelnen Bildpunkte im Bereich der Schneidzone herausgenommen, die für die weitere Auswertung miteinander verglichen werden konnten. Diese Punkte wurden auch für die Auswertung der kontinuierlichen Auswertung zur Weiterverarbeitung herangezogen.

Auswertung der kontinuierlichen Bildfolge:

Es wurde wieder ein ähnliches Verfahren, wie bei der ersten Versuchsreihe angewendet. Die gemessenen Temperaturen der zuvor erwähnten Bildpunkte, in Abbildung 54, wurden über die gesamte Bearbeitungszeit aufgezeichnet und mit der Software konnten die Daten in ein Excel-Format übertragen und exportiert werden. In Excel fand die weitere Aufbereitung der Daten statt, auf die genauer eingegangen wird. Als Beispiel wird in diesem Kapitel immer nur die Bearbeitung des Werkstücks aus Stahl genommen. Die Auswertung für die anderen beiden Werkstoffe erfolgte analog.

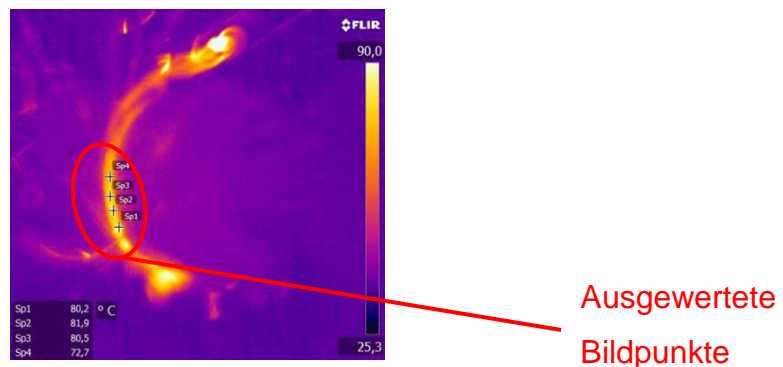


Abbildung 54: Ausgewählte Bildpunkte für die Auswertung der 2. Versuchsreihe

Die Daten der vier Bildpunkte wurden zunächst zu einem Mittelwert für jeden aufgenommenen Zeitpunkt zusammengefasst. Aus dieser Darstellung konnte schon ein sehr deutlicher Unterschied in der auftretenden Temperatur herausgelesen werden, wie die Abbildung 55 gut verdeutlicht. Die rote Linie zeigt den Verlauf des verschlissenen Werkzeugs und die grüne den Verlauf des neuen Werkzeuges über die Bearbeitungszeit. Da die Kamera sich mit dem Werkzeug mitbewegte, war nur in einem Bearbeitungsschritt pro Zyklus die Schneidzone genau im Bildaufnahmebereich. Das sind jene Bereiche, die von den violetten Linien eingeschlossen werden. Somit sind diese beiden Zonen der Bearbeitung von Interesse. Wie im schwarzen Kreis zu erkennen ist, kommt es bei einigen Stellen im Verlauf zu starken, sehr kurzen Ansprüngen.

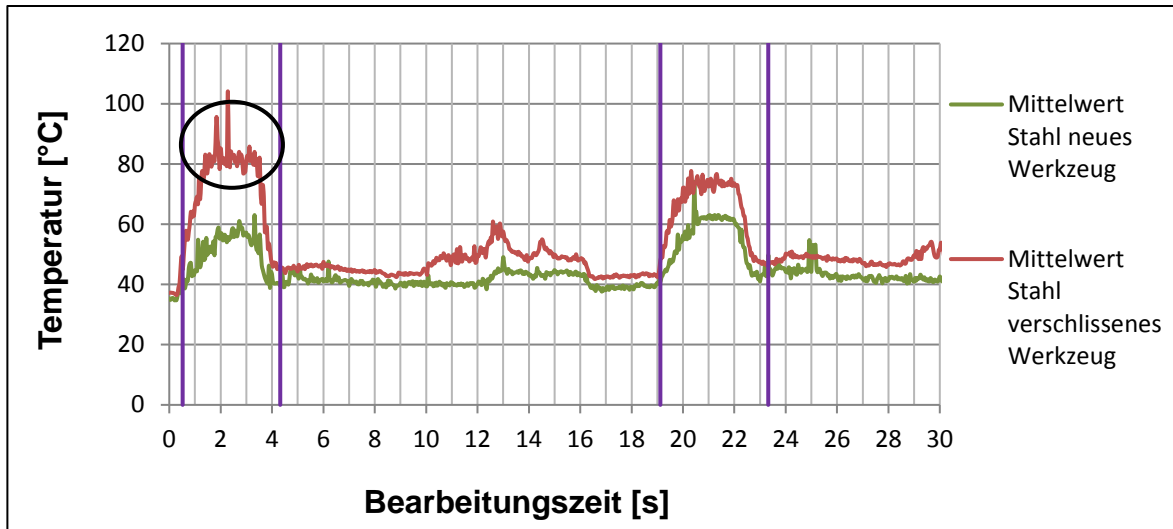


Abbildung 55: Mittelwerte der Datenpunkte der Bearbeitung von Stahl mit neuem und verschlissenem Werkzeug

Diese sprunghaften Anstiege konnten dadurch erklärt werden, dass bei genauer Betrachtung der Videoaufnahmen zu diesen Zeitpunkten ein sehr heißer Span durch das Bild bzw. durch die ausgewählten Bildpunkte flog. Im Theorieteil dieser Arbeit wurde auch schon erläutert, dass über den Span der größte Teil der entstehenden Wärmemenge abgeführt wird. Daher kann darauf geschlossen werden, dass dieser Spanflug die Messdaten verfälscht hat und die IR-Kamera eine viel höhere Temperatur in diesen Bereich misst, als die tatsächlich vorherrschende Temperatur in diesem Bereich wirklich betrug. Laut Buttler 1996 kann ein öffentlich falscher Wert als ein sogenannter „Ausreißer“ beschrieben werden. Dieser darf mit einer Begründung korrigiert oder durch einen plausiblen Wert ersetzt werden. Die Begründung wurde durch die Aufnahmen geliefert und für die in der Datenreihe vorkommenden Ausreißer wurde eigens eine Funktion entwickelt, die genau diese Werte korrigieren soll.

$$T_{t \text{ filter}} = f(t) = \begin{cases} T_t & \text{für } (1-\alpha)T_{t-1} < T_t < (1+\alpha)T_{t+1} \\ T_t & \text{für } (1-\alpha)T_{t+1} < T_t < (1+\alpha)T_{t-1} \\ T_{t \text{ neu}} = \left(\frac{T_{t+1} + T_{t-1}}{2} \right) & \text{sonst} \end{cases} \quad (\text{Gl. 6})$$

Die Funktion soll die Werte korrigieren, die beispielsweise in Abbildung 55 eingekreist sind und nachweislich durch die heißen Späne verfälscht wurden. Jeder y-Wert steht für die Temperatur (y,T) zu einem bestimmten Zeitpunkt (x,t). Mit Hilfe dieser Funktion wurde überprüft, wie weit jeder y-Wert von seinen beiden benachbarten Werten in y-Richtung entfernt ist. Somit wurde eine Art Distanzmessung durchgeführt, bei der der zu überprüfende Wert nicht zu weit von einer zuvor definierten Spannweite α entfernt

sein darf. In Abbildung 56 wird einer dieser Fälle grafisch dargestellt. Es werden somit alle Werte, die von ihren benachbarten Werten zu weit entfernt sind, zu einem Mittelwert korrigiert, welcher aus dem linken und rechten Wert gebildet wird

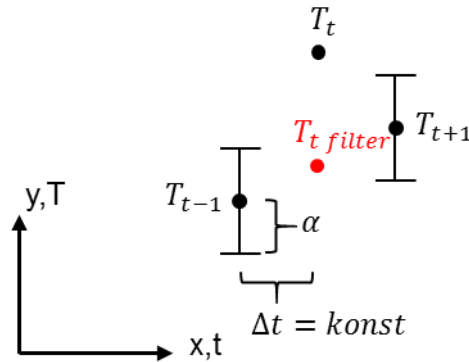


Abbildung 56: Bildliche Darstellung von (Gl. 6)

Für die Spannweite α wurde immer der Wert 0,05 verwendet. Das bedeutet, dass wenn der zu unterscheidende Wert um 5% nach oben oder unten von den benachbarten Werten abweichen sollte, wird dieser als Ausreißer identifiziert und ausgebessert. Das Ergebnis daraus ist in Abbildung 57 gut zu erkennen. Bei den beiden roten Linien zeigt die stark ausgezogene Linie die neuen Werte und die dahinterliegende, transparente Linie die gemittelten Werte des verschlissenen Werkzeuges. Hier wird nur ein Ausschnitt des Verlaufes gezeigt, um diese Korrektur besser erkennen zu können. Somit wurde der Verlauf zum Teil schon geglättet und somit ist die Interpretation der Verläufe einfacher. Es wurde auch ein Vergleich zwischen den unterschiedlichen Materialien mit der gleichen Auswertungsmethodik durchgeführt.

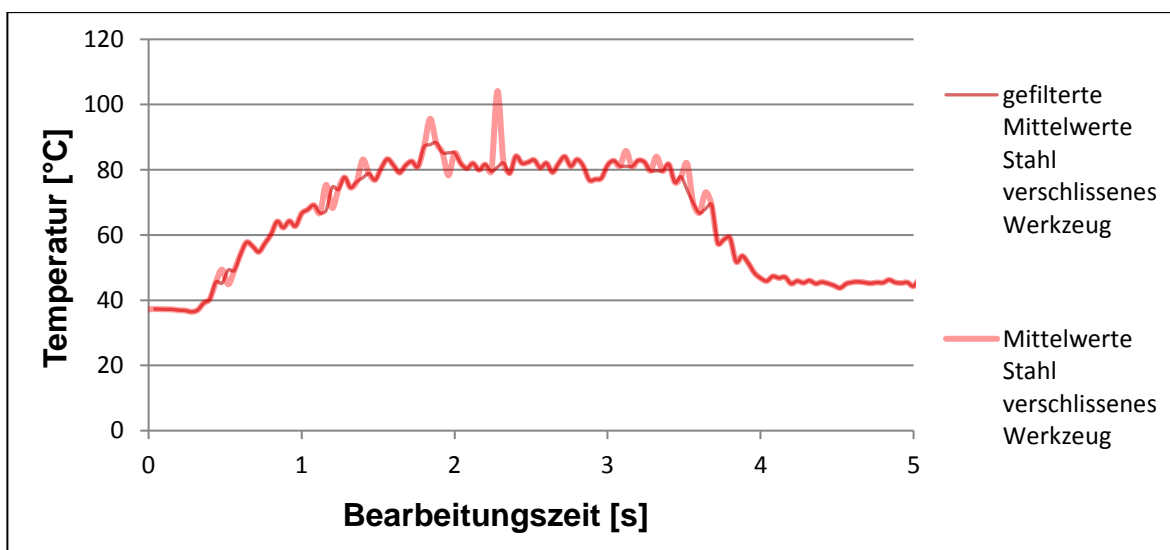


Abbildung 57: Ausschnitt der gefilterten und gemittelten Temperaturverläufe über die Bearbeitungszeit von neuem und verschlissenem Werkzeug bei der Bearbeitung von Stahl

4.4.4 Ergebnisse

Als Bestätigung der Versuchsreihe des Kapitels 4.3, kann die 2. Versuchsdurchführung herangezogen werden. Es konnte prinzipiell bei allen Versuchen dieser Reihe ein Unterschied zwischen neuen und verschlissenen Werkzeugzuständen während der Bearbeitung erkannt werden. Es folgt wieder die gleiche Aufteilung wie bei der Auswertung, nämlich wird erneut zwischen diskreter und kontinuierlicher Bildfolge unterschieden.

Ergebnisse der diskreten Bildfolge:

Zu erkennen ist hier, dass im linken Bild bei Abbildung 53 eine deutlich geringere Abstrahlung als im rechten Bild auftritt. Die Vergleiche der erwähnten Bildpunkte bestätigten die subjektiv abgeschätzte Aussage, dass die gemessenen Temperaturen beim verschlissenen Werkzeugzustand höher waren, als bei der Bearbeitung mit dem neuen Werkzeug. In Tabelle 16 wurden für die beiden Bilder die gemessenen Temperaturen zum gleichen Zeitpunkt der Aufnahme aus dem Datensatz entnommen und konnten so genau verglichen werden.

Tabelle 16: Auswertung der Bildpunkte bei der Bearbeitung von Stahl

Auswertepunkt	SP1	SP2	SP3	SP4
Werkzeugzustand				
Neues Werkzeug	41,6	49,5	50,9	46,5
Verschlissenes Werkzeug	80,2	81,9	80,5	72,7

Bei allen vier Punkten liegt die Temperatur des verschlissenen Werkzeuges deutlich über der Temperatur des neuen Werkzeuges. Dieses Verhalten ist bei den anderen beiden Werkstoffen ziemlich ähnlich, nur dass die Höhe der gemessenen Temperaturen bei den weicheren Materialien geringer war, als bei Stahl. Der Grund dafür ist, dass weniger Arbeit für die Abtragung bei den weicheren Materialien benötigt wird und somit auch weniger Energie entsteht, die in Form von Wärme abgeführt wird.

Im Gegensatz zur ersten Versuchsreihe kann gesagt werden, dass die Temperaturunterschiede bei allen ausgewerteten Positionen viel deutlicher sind.

Ergebnis der kontinuierlichen Bildfolge:

Bei den Ergebnissen der kontinuierlichen Bildfolgen können die gleichen Aussagen getroffen werden, wie bei der Diskreten. Die Temperaturunterschiede sind für alle

Werkstoffe deutlicher erkennbar, als bei der ersten Versuchsreihe. Durch die Anbringung der Kamera innerhalb des BAZ's konnte der Verlauf der Temperatur über die Bearbeitungszeit viel genauer dargestellt werden. Dabei spielt die Entfernung der Optik sicher auch eine große Rolle. Die thermische Auflösung konnte aufgrund der deutlich verringerten Entfernung verbessert werden, somit konnte ein besserer Vergleich zwischen neuem und verschlissenem Werkzeug hergestellt werden. Durch die Filterung (=Korrektur der Ausreißer) der Daten konnten die Ergebnisse noch besser interpretiert werden, da es zu einer Glättung der Verläufe gekommen ist.

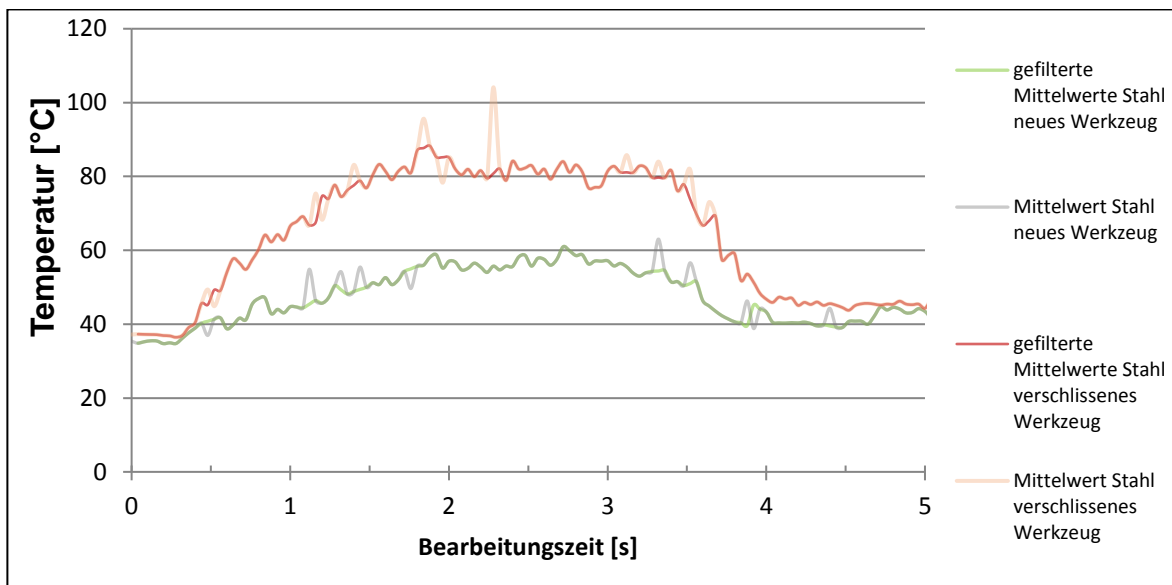


Abbildung 58: Vergleich des Temperaturverlaufs von neuem und verschlissenem Werkzeug bei der Bearbeitung von Stahl

4.4.5 Fazit

Wichtig zu erwähnen ist, dass für alle Werkstoffe das gleiche Werkzeug (Wendeschneidplatten) und die gleichen Bearbeitungsparameter verwendet wurden. Das bedeutet eine bessere Vergleichbarkeit der Werkstoffe untereinander, da immer die gleichen Parameter verwendet wurden. Die Wendeschneidplatten des Fräasers waren aber für Aluminium nicht geeignet. Für diesen Fräser standen keine anderen Wendeschneidplatten zur Verfügung und somit wurden alle Werkstoffe mit demselben Werkzeug bearbeitet.

Die Ergebnisse aller Versuche zeigen die Möglichkeit der Erkennung unterschiedlicher Werkzeugzustände für verschiedene Werkstoffe. Welche Variante der zeitlichen Bildfolge sich besser eignet, lässt sich allerdings in diesem Zusammenhang nicht eindeutig beurteilen. Auf die Vor- und Nachteile wurde schon in Kapitel 4.2 kurz eingegangen.

Für die kontinuierliche Aufnahme würde die Kenntnis des Temperaturverlaufes während der gesamten Bearbeitungszeit sprechen. Allerdings sind die zu übertragenden Datenmengen sehr groß, da pro Sekunde 25 Bilder aufgenommen und übertragen werden müssten. Die diskrete Bildfolge ist dahingehend nicht so einfach zu implementieren, da das aufgenommene Bild bei jeder neuen Bearbeitung zum exakt gleichen Zeitpunkt erstellt werden müsste, wie das zuvor aufgenommene Referenzbild. Die Datenmenge würde allerdings sehr gering gehalten werden, was für diese Variante spricht. Im Kapitel 6.2 wird auf eine mögliche Variante der Durchführung noch genau eingegangen.

Die Mitführung der Kamera und somit die Verringerung der Entfernung von Optik und Messobjekt kann als sehr positiv gesehen werden. Die Verläufe waren bei allen untersuchten Werkstoffen viel eindeutiger zu interpretieren, als bei der fixen Positionierung. Die mitgeführte Kamera hatte den Vorteil, immer die gleichen Bereiche in den Aufnahmen untersuchen zu können. Da eine Objektverfolgung mit dieser Software nicht möglich war, war das eine Variante, die Aufnahmen genauer und vor allem gleich auswerten konnte.

4.5 Versuchsreihe 3: Produktionsnahe Versuche mit mitgeführter Kamera

Wie oben erwähnt, ist für eine genaue Aussage über die mögliche Überführung der Überwachungsmöglichkeit auf die Produktion eine weitere Versuchsdurchführung notwendig. Dafür werden bei dieser Versuchsreihe zwei Zylinderkurbelgehäuse aus unterschiedlichen Werkstoffen mit den dafür vorgesehenen Werkzeugen bearbeitet, die direkt aus den Produktionslinien stammen. Es werden bei diesen Versuchen jeweils unterschiedliche Werkzeugzustände verwendet und mit einander verglichen. Der Messaufbau hinsichtlich Kameraposition und -führung hat sich zur Versuchsreihe 2 nicht geändert und wird daher nicht nochmal beschrieben (siehe Kapitel 4.4.1). Lediglich der Blickwinkel musste für die zwei unterschiedlichen ZKG's jeweils neu eingestellt werden. In Tabelle 17 ist die prinzipielle Vorgehensweise angeführt, wie auch bei den vorherigen Versuchen.

Tabelle 17: Vorgehensweise 3.Versuchsreihe

Bezeichnung	Beschreibung	
Ziel	Vergleich verschiedener Werkzeugzustände unter produktionsnahen Bedingungen.	
Werkstücke	Zylinderkurbelgehäuse V6 (ZKG V6) Stahlguss	Zylinderkurbelgehäuse R4 (ZKG R4) Aluminium
Werkzeuge	Stirnfräser (Ø 93 mm) 10 Wendeschneidplatten	2 x Stirnfräser (Ø 123 mm) 18 Schneiden
Werkzeugzustände	Neues Werkzeug verschlissenes Werkzeug	Neues Werkzeug gebrauchtes Werkzeug
Bearbeitungsparameter		
Drehzahl	n = 533 U/min	n = 8000 U/min
Schnittgeschwindigkeit	v _c = 1551 mm/min	v _c = 17280 mm/min
IR-Kameratyp	Ungekühlter Mikrobolometer	Ungekühlter Mikrobolometer
Bearbeitung pro Werkzeug		
Zyklen	4	4
Bahnen/Zyklus	3	2
Abtrag/Zyklus	0,5 mm	0,5 mm
Bearbeitungsschritte gesamt (= Zyklen x Bahnen)	12 (2 mm Gesamtmaterialabtrag)	8 (2 mm Gesamtmaterialabtrag)

4.5.1 Versuchsdurchführung

Die Durchführung der dritten Versuchsreihe war der zweiten Reihe sehr ähnlich, da die Ergebnisse mit diesem Aufbau und dem Vorgehen sehr vielversprechend waren. Diesmal wurden zwei unterschiedliche ZKG's bearbeitet, zum einen ein ZKG aus Aluminium, zum anderen ein ZKG aus Stahlguss. Die Bearbeitungen unterschieden sich in der Anzahl der benötigten Schritte, die in Abbildung 59 eingezeichnet sind, um die gesamte Zylinderkopffläche abzufräsen. Diesmal wurden die Parameter für die Bearbeitung so gewählt, dass sie jenen aus der Produktion entsprachen.

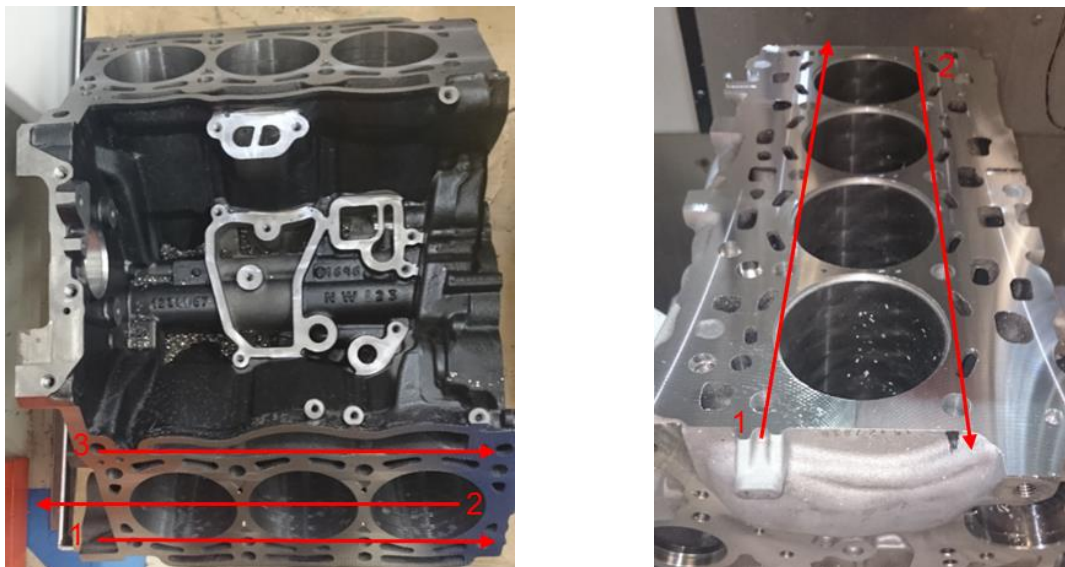


Abbildung 59: Bearbeitete Zylinderkurbelgehäuse der 3.Versuchsreihe
links: Stahlguss ZKG V6; rechts: Aluminium ZKG R4

Es wurden diesmal vier Bearbeitungszyklen je ZKG durchgeführt, wobei bei dem Stahlguss-ZKG drei Bearbeitungsschritte und bei dem Aluminium-ZKG nur zwei Schritte benötigt wurden. Bisher wurden die Wendeschneidplatten der Werkzeuge gewechselt, um einen neuen bzw. verschlissenen Werkzeugzustand zu erhalten. Der Aluminiumfräser besteht aus Schneiden, die nach einer bestimmten Anzahl an Bearbeitungen nicht ausgetauscht, sondern nachgeschliffen werden.

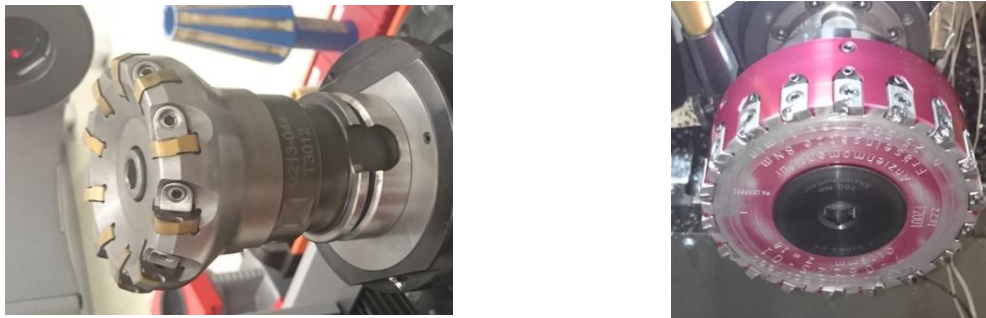


Abbildung 60: Verwendete Fräser der 3. Versuchsreihe
links: Fräser für Bearbeitung von Stahlguss; rechts: Fräser für die Bearbeitung von Aluminium

Aus diesem Grund wurden für die Durchführung zwei Fräser zur Verfügung gestellt. Verwendet wurden ein neu nachgeschliffener Fräser und ein zweiter Fräser, der nach der vorgegebenen Anzahl an Bearbeitungen aus der Linie entnommen wurde. Die Fräserarten sind in der Abbildung 60 dargestellt, wobei rechts der Fräser für die Bearbeitung von Aluminium und links jener für Stahlguss, ist. Die Aufnahmen wurden wieder mit der gleichen Kamera durchgeführt, die mit dem Werkzeug mitgeführt wird. Es musste der Blickwinkel der Kamera für die zwei ZKG's so verändert werden, dass sie genau den Kontaktbereich zwischen Werkzeug und Werkstück erfassen konnte. Die ZKG's wurden mit den verschiedenen Werkzeugen bearbeitet und es wurden davon jeweils ein IR-Video pro ZKG und Werkzeugzustand aufgenommen. Die erste Auswertung erfolgte zuerst mit der Kamerasoftware und in weitere Folge wurden die Daten wie schon bei den anderen Versuchen mit Excel weiterverarbeitet.

4.5.2 Auswertung

Die erste Aufbereitung der auszuwertenden Daten wurde mit der Software durchgeführt. Die eingestellten Parameter in der Software waren genau gleich wie bei der Versuchsreihe 2 und können aus Tabelle 15 entnommen werden. Diesmal wurden nicht einzelne Bildpunkte in der Kontaktzone ausgewertet, sondern es wurde ein Raster von Rechtecken in die Aufnahmen eingefügt. Damit soll herausgefunden werden, ob die

Auswertung in einem vergrößerten Untersuchungsbereich die gleichen bzw. ähnlichen Ergebnisse liefert, wie die Bildpunktuntersuchungen. Das würde eine Vereinfachung in der Auswertung bedeuten, da nicht mehr gezielt nach bestimmten Bildpunkten in dieser Kontaktzone gesucht werden muss.

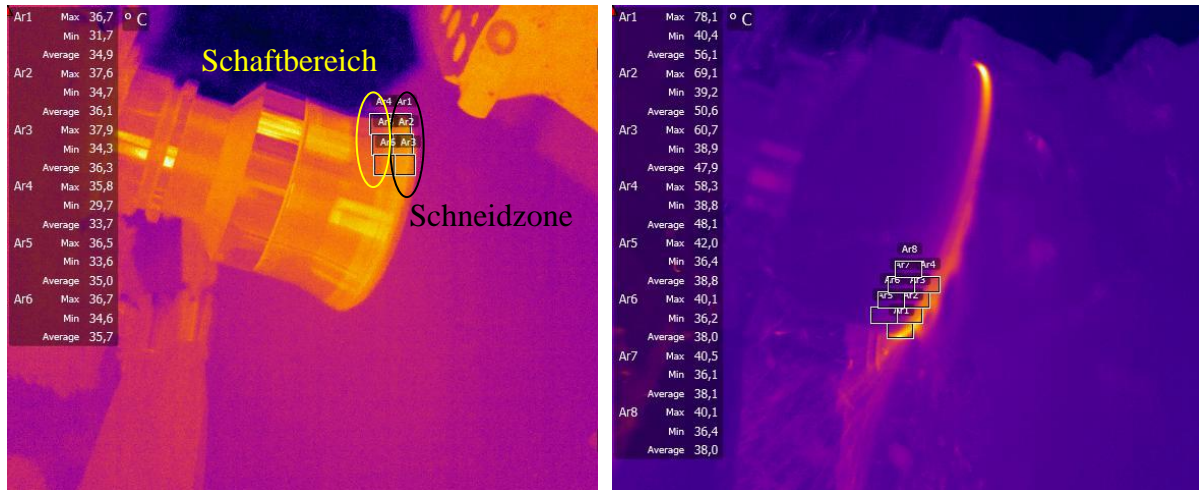


Abbildung 61: Rasterung der Schneidzone der verwendeten Fräsen der 3. Versuchsreihe
links: Auswertungsraster des Stahlgussfräasers; rechts: Auswertungsraster des Aluminiumfräasers

Abbildung 61 zeigt die Raster für die zwei verschiedenen Werkzeuge. Links ist das Rasterbild für den Stahlgussfräser vor der Bearbeitung und rechts jenes für den Aluminiumfräser, welcher sich bereits im Eingriff befindet. Die Rechtecke im Bereich der Kontaktzone sollen wie bei dem vorherigen Versuch die Temperatur über die Bearbeitungszeit messen. Die Rechtecke links von der Schneidzone wurden diesmal neu eingeführt, um zu sehen, ob ein Temperaturunterschied des Werkzeughalters bei einem verschlissenen Werkzeug erkennbar ist. Es wurden die Bereiche in der Schneidzone und in der Werkzeughalterung (Schaftbereich) getrennt voneinander ausgewertet. Dazu wurden die durchschnittlichen Temperaturen in den einzelnen Rechtecken ausgegeben und als Excel-Datei abgespeichert. Im Excel fand anschließend die Weiterverarbeitung der Daten statt. Die Durchschnittswerte wurden zu Mittelwerten über den gesamten Betrachtungsbereich zusammengefasst und es wurde der gleiche „Ausreißer“ – Filter wie in der Versuchsreihe 2 angewendet. Um den Verlauf noch ein wenig zu glätten, wurde im Anschluss von jeder gefilterten Datenreihe ein gleitender Mittelwert erstellt. In Abbildung 62 ist im Hintergrund leicht transparent der Verlauf der gemittelten Durchschnittswerte der Rechtecke der Bearbeitung des Stahlguss-ZKG zu sehen. Das Stahlguss-ZKG wird in weitere Folge auch als V6 abgekürzt. Die stark rot ausgezogene Linie ist der zuvor erwähnte, gleitende Mittelwert der gefilterten Daten.

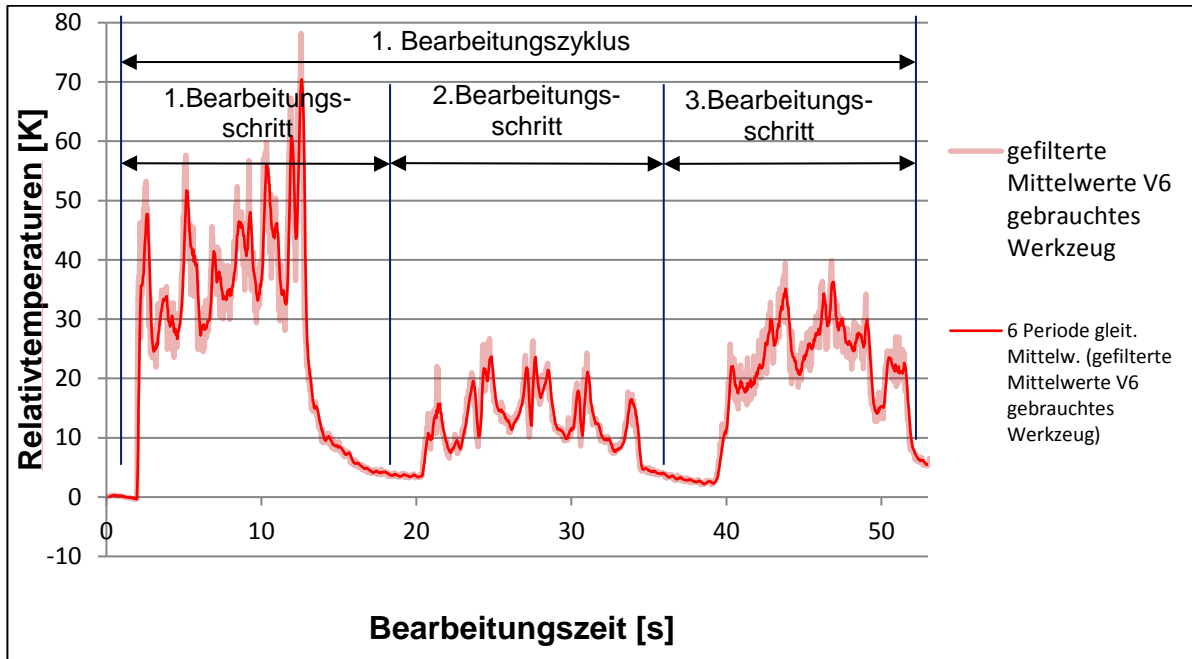


Abbildung 62: Verlauf des gleitenden Mittelwertes der gefilterten Daten für die Bearbeitung des Stahlguss-ZKG

Es wurde hier nur der erste Zyklus der Bearbeitung des V6-ZKG's angeführt, da der weitere Verlauf sich sehr ähnlich verhält und dies nur eine exemplarische Darstellung sein soll.

Diese Schritte wurden für die verschiedenen Werkzeugzustände der Bearbeitungen durchgeführt und miteinander verglichen. Für diesen Versuch wurde nur eine Auswertung der kontinuierlichen Bildfolge erstellt, da schon in den vorherigen Versuchen gezeigt wurde, dass beide Varianten möglich sind.

4.5.3 Ergebnisse

Für den letzten Versuch wird wie gerade beschrieben keine Unterscheidung von diskreter und kontinuierlicher Bildfolge der Aufnahmen vorgenommen. Es wird dafür genauer auf die zwei unterschiedlichen Zylinderkurbelgehäuse und auch auf die zwei verschiedenen Auswertungsbereiche eingegangen. Ein weiterer Unterschied zu den anderen Versuchen ist auch, dass die Auswertung nicht mehr in Absoluttemperaturen sondern in Relativtemperaturen erfolgte. Eine genaue Aussage der vorherrschenden Temperaturen in der Schneidzone ist bei dieser Art der Thermografiemessung aufgrund der vielen Einflussfaktoren nur sehr schwer möglich. Allen Voraus konnte der Emissionsgrad nur schätzungsweise ermittelt und eingestellt werden.

Ergebnisse Stahlguss-ZKG:

Aus den Daten wurden für die Schneidzone und den Schaffbereich jeweils die Verläufe des verschlissenen (rot) und des neuen Werkzeuges über die Bearbeitungszeit erstellt. In Abbildung 63 ist nur die Auswertung der Schneidzone für den ersten Bearbeitungsschritt des ersten Zyklus eingezeichnet.

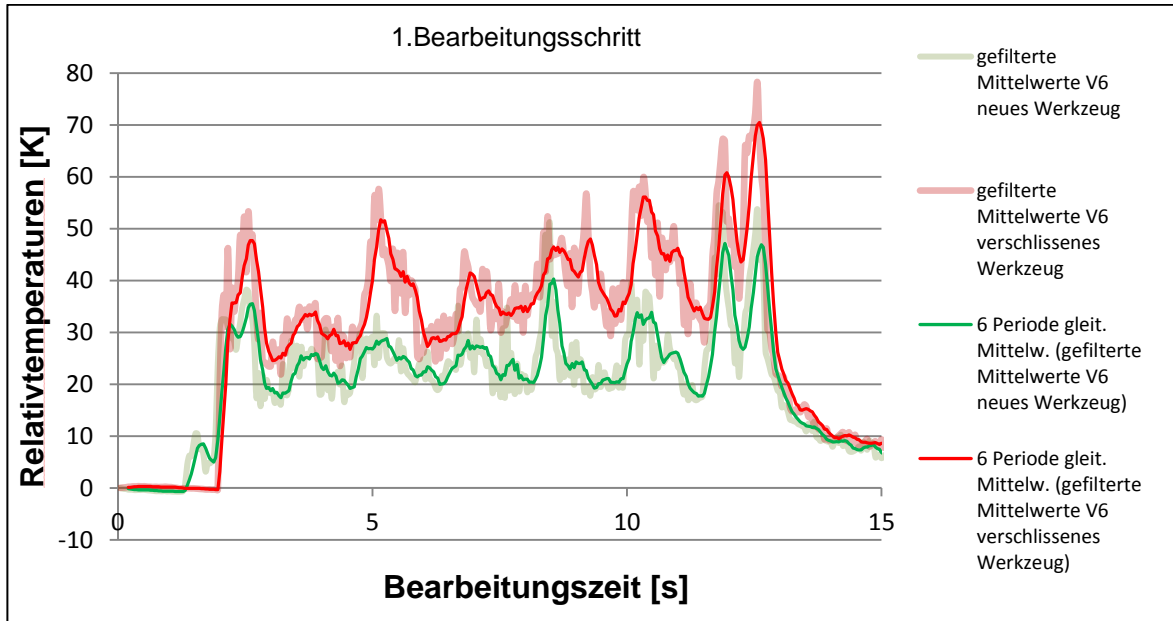


Abbildung 63: Vergleich der Werkzeugzustände von der Bearbeitung des Stahlguss-ZKG's im Bereich der Schneidzone

Zudem veränderte sich das grundsätzliche Verhalten der Verläufe für beide Werkzeugzustände über die Zeit nicht und deshalb ist dieser Darstellungsbereich ausreichend. Der Vergleich der beiden Werkzeugzustände zeigt eindeutig, dass es zu jedem Zeitpunkt der Bearbeitung einen Unterschied in der Temperatur gibt.

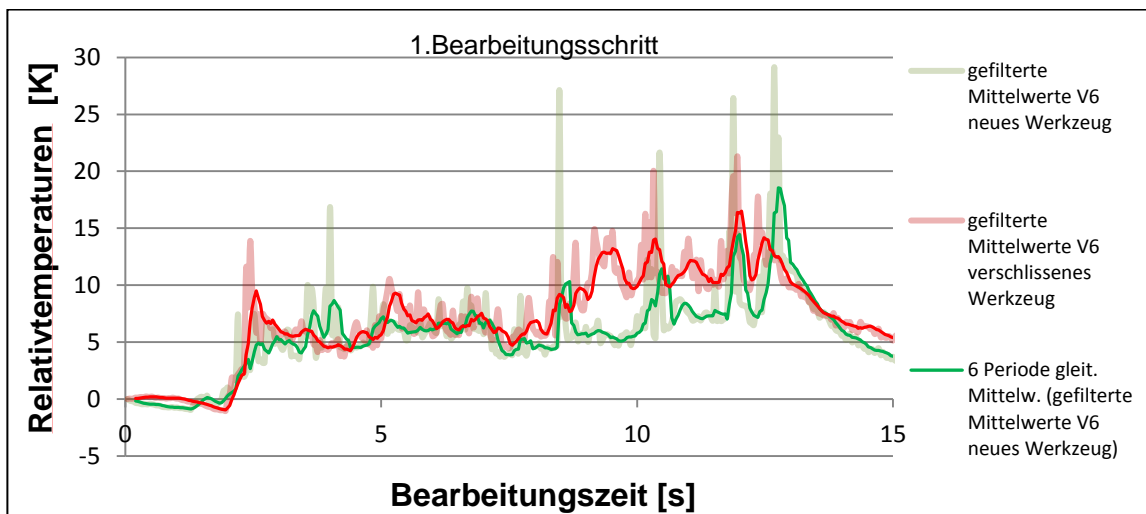


Abbildung 64: Vergleich der Werkzeugzustände von der Bearbeitung des Stahlguss-ZKG's im Schaffbereich

Daher konnte auch unter produktionsähnlichen Bedingungen nachgewiesen werden, dass die abgestrahlten Leistungen von neuem und verschlissenem Werkzeug deutliche Differenzen aufweisen. Abbildung 64 beinhaltet den Temperaturvergleich im Schaftbereich im gleichen Betrachtungsintervall. Hier ist allerdings zu erkennen, dass sich die Verläufe kaum unterscheiden. Wird die gesamte Bearbeitungszeit betrachtet, so ist auch dort kein eindeutiger Unterschied erkennbar.

Ergebnisse Aluminium-ZKG:

Die Verläufe der Bearbeitung des Aluminium-ZKG's wurden auf die gleiche Weise erstellt, wie bei den oben gezeigten Abbildungen. Auch hier wurde wieder ein bestimmter Teil der Bearbeitung zur besseren Übersicht herausgenommen. Die gesamten Verläufe weisen wie schon zuvor eine sehr ähnliche Charakteristik auf. Aufgrund des sehr weichen Materials des Werkstückes, werden hier sehr hohe Schnittgeschwindigkeiten zur Bearbeitung verwendet. In Abbildung 65 sind die ersten beiden Bearbeitungszyklen zu sehen, die jeweils in die zwei Schritte aufgeteilt sind. Hier wurde wieder ein gleitender Mittelwert eingeführt, der aber bei diesem Material nicht zwingend notwendig wäre, da die Verläufe der Mittelwerte schon sehr geglättet sind. Es wurde nur zur Vergleichbarkeit mit der Auswertung des Stahlguss-ZKG's erstellt.

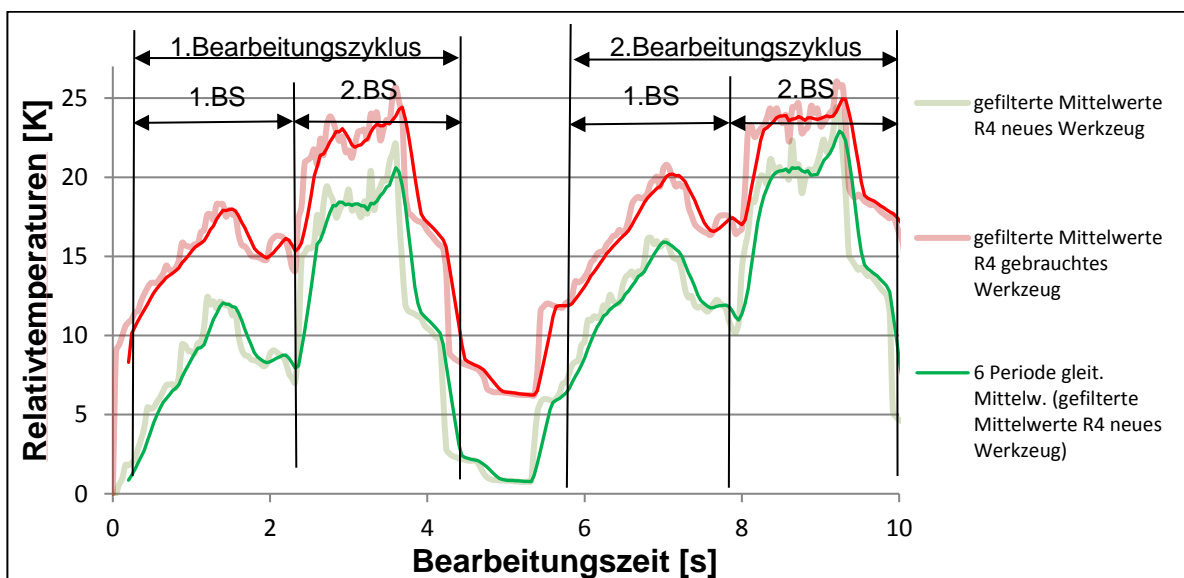


Abbildung 65: Vergleich der Werkzeugzustände von der Bearbeitung des Aluminium-ZKG's im Bereich der Schneidzone

Die Unterschiede zwischen neuem und gebrauchtem Werkzeug sind wieder deutlich zu erkennen. Wie zu Beginn dieses Kapitel schon erklärt, wurde hier ein gebrauchtes Werkzeug verwendet. Somit wurde das Werkzeug nach einer bestimmten Anzahl von

Bearbeitungsvorgängen aus der Produktionslinie entnommen, ohne zu überprüfen, ob eine weitere Bearbeitung ohne Qualitätsverluste noch möglich wäre. Es lässt sich aus diesem Versuch nicht direkt ableiten, ob das Werkzeug schon seinen kompletten Abnutzungsvorrat aufgebraucht hat, oder ob noch weitere Bearbeitungen damit möglich wären. Dazu müssten weitere Vergleiche mit einem, per Definition „verschlissenen“ Werkzeug durchgeführt werden, um eine eindeutige Aussage darüber treffen zu können. Für den Schaftbereich bei dieser Bearbeitung ergab sich ein sehr ähnliches Bild, wie zuvor schon bei der Bearbeitung von Stahlguss. Der Unterschied der Temperaturen der beiden Werkzeugzustände über die Bearbeitungszeit ist für einen genauen Vergleich nicht aussagekräftig genug. Dies könnte bei beiden Materialien daran liegen, dass die Bearbeitungszeit viel zu kurz war. Um dahingehend eine Aussage treffen zu können, müssten Aufnahmen über die gesamte Einsatzzeit eines Werkzeuges gemacht werden.

4.5.4 Fazit

Mit diesen Versuchen kann das Ziel der gesamten Experimente unterstrichen werden. Vor allem ist es auch unter produktionsähnlichen Bedingungen möglich, mittels Thermografie einen Temperaturunterschied der verschiedenen Werkzeugzustände zu erkennen. Die Ergebnisse der kontinuierlichen Bildfolge können sehr gut interpretiert werden und damit konnten die Versuche mit einem positiven Ausgang beendet werden. Über einen Einsatz dieser Technologie zur Werkzeugzustandsüberwachung wird im nachfolgenden Kapitel noch genauer diskutiert.

4.6 Diskussionen

Eingangs muss erwähnt werden, dass die Arbeit darauf abgezielt hat, herauszufinden, ob grundsätzlich ein Temperaturunterschied verschiedener Werkzeugzustände (in diesem Fall Fräswerkzeuge) mit Hilfe einer Thermografiekamera erkennbar ist. Es wurden daher immer nur Vergleiche zwischen einem per Definition neuen Werkzeug und einem verschlissenen oder gebrauchten Werkzeug durchgeführt. In dieser Arbeit wurden keine direkten Verschleißkurven aufgezeichnet, da dafür Langzeittests durchgeführt hätten werden müssen. Die Ergebnisse werden getrennt von der Auswertung und dem Aufbau betrachtet.

4.6.1 Diskussion der Ergebnisse

Wichtig für die Diskussion der Ergebnisse sind vor allem die Definitionen der Werkzeugzustände. Hier wurde unterschieden zwischen neuem Werkzeug, von der Linie ausgemustertem Werkzeug und Werkzeug, welches nachweislich nicht mehr für den Einsatz verwendbar war. Die genauen Definitionen sind in Tabelle 10 zu finden. Bei allen Versuchen waren Unterschiede in der Temperatur je nach Werkzeugzustand erkennbar. Es ließ sich allerdings keine genaue Aussage treffen, ob mit dem gebrauchten Werkzeug noch weitere Bearbeitungen möglich gewesen wären. Dazu müsste das ausgemusterte Werkzeug weiterverwendet werden und dabei aufgezeichnet werden, bis es zu nachweislichen Qualitätsverfehlungen kommen würde. Damit hätte man auch gleich eine Referenz, ab welcher Temperaturdifferenz das Werkzeug nicht mehr sinnvoll eingesetzt werden kann. Dies konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt werden, da diese Langzeittests den Zeitrahmen überstiegen hätten.

Eine Aussage über die tatsächliche Absoluttemperatur in der Schneidzone kann aufgrund vieler Einflussfaktoren nicht getroffen werden. Einer der Hauptfaktoren ist dabei der Emissionsgrad, welcher die Ergebnisse sehr stark beeinflusst. Um den genauen Emissionsgrad messen zu können, müsste immer ein Referenzpunkt, als eine Art idealer Strahler am Werkstück angebracht werden, welcher im Bildbereich liegt und sich nicht verändert. Dies war im Zuge der durchgeführten Versuche nicht möglich und es wurden daher für die produktionsnahen Versuche nur die Relativtemperaturen in den Ergebnissen verwendet.

4.6.2 Diskussion der Auswertung und des Aufbaues

Auswertung:

Für die Auswertung wurde die vorhandene Software der Kamera verwendet. Mit dieser Software war es möglich, einzelne Bildpunkte aus den Aufnahmen herauszunehmen, um einen zeitlichen Verlauf der Temperatur zu erhalten. Das Problem dabei ist, dass die Bildpunkte subjektiv gewählt wurden und es dadurch zu einer ungenauen Messung kommen kann. Sie wurden immer im Bereich der Schneidzone ausgewählt und dann verglichen. In weiterer Folge wurde dann bei den Auswertungen für die produktionsnahen Versuche nicht nur punktuell ein Vergleich angestellt, sondern es wurde ein vergrößertes Raster verwendet. Aus den einzelnen Rasterkästchen wurde die gemittelte Temperatur für alle Werkzeugzustände ausgegeben und verglichen.

Eine bessere Möglichkeit würde eine Subtraktion der Aufnahmen ergeben. Dabei werden die aktuellen Strahlungswerte der Aufnahmen (Istwerte) von zuvor definierten Ausgangsaufnahmen (Sollwerte) abgezogen. Sollte hier ein Wert nun eine bestimmte Grenze überschreiten, so könnte ein Alarmsignal ertönen, dass das Werkzeug zu tauschen ist. Um diese Grenze zu erhalten, wären allerdings noch weitere Untersuchungen notwendig.

Versuchsaufbau/ Kameraposition:

Bei der ersten Versuchsreihe wurde die Kamera in einer fixen Position außerhalb des BAZ's aufgestellt. Diese Position war allerdings in mehreren Hinsichten nicht optimal. Die Entfernung von der Messoptik und dem Messobjekt sollte für eine genaue Aussage der Abstrahlung so nahe wie möglich sein, um die äußeren Einflüsse gering zu halten. Es kann durch glatte Oberflächen (z.B. polierter Stahl) dazu kommen, dass im Bildbereich unerwünschte Spiegelungen auftreten, die die Messung verfälschen können. Auch für die Auswertung war die Entfernung nicht vom Vorteil. Durch die Bewegung des Werkzeuges in die Bildebene hinein und aus der Bildebene heraus verändert sich die Intensität der Strahlung, da der Abstand zum Messobjekt eine wesentliche Rolle in der Thermografie spielt.

Für die weiteren Versuche wurde eine Vorrichtung gebaut, die es möglich machte, den Abstand von Optik und Messobjekt konstant zu halten. Die Kamera wurde somit mit dem Werkzeug mitgeführt. Diese Mitführung ist allerdings in der Praxis nicht so einfach durchzuführen und somit würde sich wieder eine feste Position der Kamera eher eignen. Daher kann gesagt werden, dass beide Varianten der Kamerabewegung möglich sind. Die Vor- und Nachteile der beiden Möglichkeiten sind schon zuvor in der Arbeit genau erklärt worden. Es kann allerdings nicht eindeutig gesagt werden, dass sich eine der beiden besser eignet, als die andere.

5. Kostenmodell für Umsetzung von Diagnostik in der Produktion

Als Abschluss dieser Arbeit soll noch erhoben werden, ob sich der Einsatz eines Diagnosesystems für die Werkzeugüberwachung auch wirtschaftlich rentiert. Es wurde dazu ein Beispiel einer Kostenaufstellung für eine spezielle Anlage bei Audi erstellt. Die dafür erhaltenen Daten wurden von den Verantwortlichen von Audi zur Verfügung gestellt. Dieses Modell soll einen Entwurf für weitere Nachforschungen darstellen, welches auch für andere Anlagen angewendet werden kann.

Es wurde eine Anlage einer Linie gefunden, bei der sich eine Werkzeugzustandsüberwachung, laut Meinung des Experten vor Ort, eignen würde. Für diese Anlage wurde eine Aufstellung der möglichen Kosten vorgenommen, die im schlimmsten Fall entstehen könnten, wenn es zur Nichterkennung des zerstörten Werkzeuges kommt.

5.1 Aufstellung des Kostenmodelles einer Anlage in der Produktionslinie

Dieses Modell wurde für eine bestimmte Anlage einer Produktionslinie erstellt. Die grundsätzliche Problematik an so einem Modell ist bei den verschiedenen Arten der Anlagen zu suchen. Die Abbildung 66 soll schematisch die drei verschiedenen Typen zeigen.



Abbildung 66: Schematische Darstellung der verschiedenen Anlagentypen

Aus diesen drei Typen von Anlagen sind die Produktionslinien bei Audi grundsätzlich aufgebaut. Je nach Linie werden sie in unterschiedlicher Reihenfolge aufgebaut und eingesetzt. Dies war eines der ersten Kriterien, nachdem entschieden werden kann, wie kostenintensiv eine nicht sofortige Erkennung eines Werkzeugbruchs sein kann. Kommt es beispielsweise bei einer alleinstehenden Anlage zu einem Werkzeugbruch,

sind die Einsatzkosten der Maschine deutlich geringer als die einer Transferstraße, da in solch einer Transferstraße meist mehrere Arbeitsschritte nacheinander erfolgen. Ein weiteres Kriterium für das Modell war, nach wie vielen Bauteilen eine Überprüfung dieser Teile stattfindet. Es gibt Anlagen, bei denen jedes zehnte Bauteil im Nachhinein auf die richtige Durchführung der Bearbeitung überprüft wird. Bei anderen Anlagen wird nur jedes hundertste Bauteil überprüft oder nachgemessen.

Das letzte Kriterium, welches in dieses Modell noch eingeflossen ist, sind die Kosten für den Betrieb der Anlage und die dafür benötigten Mitarbeiter. Je nach Anlage wird ein eigener Anlagenstundensatz errechnet, der sich aus mehreren Faktoren wie Energiekosten, Abnutzung usw. zusammensetzt. Die genaue Aufschlüsselung dieser Faktoren konnte leider nicht erfolgen.

Anhand dieser Faktoren wurde ein zwar sehr einfaches, aber trotzdem aussagekräftiges Modell erstellt, das sich wie folgt zusammensetzt:

$$\begin{aligned}
 & \text{Personalkosten} \\
 & \left(\begin{array}{l} \text{maximale Anzahl} \\ \text{an Bauteilen für} \\ \text{Nachbearbeitung} \end{array} * \begin{array}{l} \text{Dauer für Nachmessung} \\ \text{und für Be- und} \\ \text{Entladevorgänge} \end{array} * \begin{array}{l} \text{Fertigungs-} \\ \text{Personalkosten} \end{array} \right) + \\
 & + \left(\begin{array}{l} \text{maximale Anzahl} \\ \text{an Bauteile für} \\ \text{Nachbearbeitung} \end{array} * \begin{array}{l} \text{Taktzeit} \\ \text{der Anlage} \end{array} * \begin{array}{l} \text{Anlagen-} \\ \text{stundensatz} \end{array} \right) = \text{Gesamtkosten für} \\
 & \hspace{10em} \text{Nachbearbeitungen} \hspace{10em} \text{(Gl. 6)} \\
 & \hspace{10em} \underbrace{\hspace{15em}}_{\text{Anlagenkosten für Nachbearbeitung}}
 \end{aligned}$$

5.2 Identifikation der Anlage

Um diese Formel für eine Anlage anzuwenden, musste zunächst eine geeignete Anlage gefunden werden. Dafür wurde ein Gespräch mit einem Linienleiter geführt, bei dem Fragen zu der Linie bzw. den Anlagen gestellt wurden. Diese Fragen sollen als Entscheidungshilfe für die sinnvolle Umsetzung eines Diagnosesystems zur Werkzeugüberwachung dienen. Aus den vorhandenen Betriebsdaten des bereits vorhandenen Systems können solche Informationen nicht identifiziert werden. Deswegen wurde auch ein persönliches Gespräch geführt, um mit Fragen die wichtigsten Informationen zu diesem Thema zu erhalten.

Fragen an Linienleiter/Experten:

1. Gibt es Ihrer Meinung nach eine oder mehrere Maschinen, die sich für den Einsatz der Werkzeugüberwachung eignen?
2. Wenn ja, um welche Bearbeitungsschritte bzw. welches Werkzeuge handelt es sich?
3. Nach wie vielen bearbeiteten Bauteilen findet eine Überprüfung der Bauteile statt?
4. Wie oft kommt es zu einem Versagen des Werkzeuges?
5. Taktzeit der Anlagen
6. Dauer für die Nachmessungen und Be- und Entladevorgänge pro falsch gefertigtem Bauteil

Die Kosten für Personal und der Anlagenstundensatz mussten in einer eigenen Kostenstellenabteilung nachgefragt werden, daher können diese beiden Punkte nicht gleich im Gespräch geklärt werden. Diese Fragen können nicht auf jede Linie genau gleich angewendet werden, sondern müssen für jede Linie adaptiert werden. Dies war im Rahmen dieser Arbeit aus zeitlichen Gründen nicht möglich.

Expertengespräch mit Linienleiter:

In weitere Folge fand ein Gespräch mit einem Linienleiter statt, dem diese Fragen gestellt wurden. Da die erste Frage positiv beantwortet wurde, konnten die nächsten Fragen gestellt werden. Im Laufe des Gesprächs kristallisierten sich Arbeitsschritte heraus, die sich nach Meinung des Experten für eine Werkzeugzustandsüberwachung eignen würden. Es handelte sich dabei um die Bearbeitung eines Gewindebohrers. Bei diesem Bohrer kommt es häufiger vor, dass der Bohrer genau in Längsrichtung bricht. Bei diesem Schritt gibt es schon eine Art Werkzeugüberwachung, die überprüft, ob der Bohrer komplett abgebrochen ist, oder nicht. Bricht er aber in besagter Längsrichtung, so gibt die derzeitige Überwachung trotzdem das Signal, dass der Bohrer verwendet werden kann. Eine Überwachung mit einem anderen System könnte beide Braucharten identifizieren und somit zu einer Kostenreduktion führen. Das Modell wurde für genau diesen Bearbeitungsschritt aufgestellt und ausgerechnet.

5.3 Ergebnis des Kostenmodells

Mit den zuvor erwähnten Daten des Bearbeitungsschrittes konnte nun das Kostenmodell für genau diesen einen Bearbeitungsschritt aufgestellt werden. Die hier angeführten Daten entsprechen nicht den tatsächlichen Daten der Linie und daher kann diese ungefähre Abschätzung der Kosten nur exemplarisch aufgestellt werden. In Tabelle 18 sind die benötigten Daten des Modelles enthalten

Tabelle 18: Daten für Bearbeitungsschritt Gewindebohren

Beschreibung	Wert	Einheit
maximale Anzahl der Bauteile für die Nachbearbeitung	150	#
Dauer der Nachmessung und für Be- und Entladevorgänge	7,5	min/#
Taktzeit	0,5	min/#
Werkzeugbrüche	90	#/Jahr
Fertigungs-Personalkosten	25	€/h
Anlagenstundensatz	70	€/h

Daraus konnten nun die Personalkosten und die Anlagenkosten für die Nacharbeit pro nichterkanntem Werkzeugbruch berechnet werden. Diese Personal- und Anlagekosten werden in Tabelle 19 nochmals getrennt aufgelistet. Diese Kosten werden nun addiert und mit der Anzahl der Werkzeugbrüche pro Jahr multipliziert.

Tabelle 19: Kostenrechnung für Werkzeugbrüche

Kosteneinteilung	Kosten
Personalkosten für Nacharbeit pro Bruch	468,75 €
Anlagenkosten für Nachbearbeitung pro Bruch	87,5 €
Summe pro nicht erkanntem Werkzeugbruch	556,25 €
Werkzeugbrüche pro Jahr	90
Gesamtkosten pro Jahr	50 062,5 €

Diese Summe stellt nun die maximalen Kosten bei der Nichterkennung dieser Werkzeugbrüche dar. Der Wert ist wie gesagt nur ein Maximalwert, da davon ausgegangen wird, dass die Erkennung des Bruches tatsächlich erst nach 90 bearbeiteten Bauteilen erfolgt. Diese Kosten stellen aber auch nur einen Teil der tatsächlichen Kosten bei

einem Ausfall einer Maschine oder Anlage dar. Eine komplette Kostenaufstellung wäre sehr aufwendig und konnte daher in dieser Arbeit nicht durchgeführt werden. Diese Kosten dienen als eine Abschätzung für die Entscheidungsträger und diese Berechnung kann mit relativ wenig Aufwand auch bei anderen Linien durchgeführt werden.

6. Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung

Aus der Literatur war schon ersichtlich, dass die Instandhaltung eine sehr wichtige aber auch komplexe Thematik in der Produktion ist. Es wird immer häufiger versucht, die Instandhaltungstätigkeiten so gut wie möglich planbar zu gestalten, um ungeplante Stillstände von Anlagen zu vermeiden bzw. ihnen vorzubeugen. Dafür eignet sich die beschriebene Zustandsüberwachung von Komponenten und Bauteilen. In vielen metallverarbeitenden Unternehmen werden Maschinen und Anlagen verwendet, die mit zerspanenden Werkzeugen arbeiten. So ist es auch bei AHM in der Motorenproduktion. Deswegen wurde diese Arbeit erstellt, um eine Technologie zu testen, die bisher in der Industrie noch nicht sehr häufig zum Einsatz gekommen ist. Für die Bearbeitung mit Fräswerkzeugen gibt es bisher kein ausgereiftes System auf dem Markt. Daher wurden für diese Arbeit Versuche durchgeführt, mit dem Ziel, Unterschiede zwischen verschiedenen Werkzeugzuständen zu erkennen.

Die erste Versuchsreihe sollte dazu dienen, grundsätzlich zu überprüfen, ob ein Unterschied in der Temperatur während der Bearbeitung mit verschiedenen Werkzeugzuständen erkennbar ist. Da dies der Fall war, wurden in der zweiten Versuchsreihe Werkstücke mit drei unterschiedlichen Werkstoffen bearbeitet und untersucht, die häufig in der Produktion verwendet werden. Auch bei diesen Versuchen konnte jeweils ein deutlicher Unterschied in den Temperaturen während der Bearbeitung identifiziert werden. Die letzte Versuchsreihe wurde unter möglichst produktionsnahen Bedingungen durchgeführt. Die Bearbeitungen wurden an zwei Zylinderkurbelgehäusen mit deren dafür vorgesehenen Werkzeugen und Bearbeitungsparameter durchgeführt.

Bei allen Versuchen wurden die Aufnahmen mit der gleichen Kamera durchgeführt. Es wurde allerdings die Position der Kamera bzw. die Kameraführung während den Versuchen geändert. Beim ersten Versuch wurde die Kamera außerhalb der Bearbeitungsmaschine in einer fixen Position aufgestellt. Es stellte sich zum einen heraus, dass die Kamera zu weit vom Messobjekt entfernt war. Zum anderen war die Bewegung des Werkstückes und des Werkzeuges innerhalb der Aufnahmen für die Auswertung nicht optimal. Deswegen wurde für die weiteren Versuchsreihen eine Vorrichtung

gebaut, die es ermöglichte, die Kamera innerhalb der Maschine zu befestigen. Sie wurde mit dem Werkzeug mitgeführt, was die Auswertungen erheblich erleichterte und die zuvor erwähnten Einflussfaktoren minimierte.

Für die Aufzeichnung und Aufbereitung der IR-Aufnahmen wurde die von der Kamerafirma eigene Software verwendet. Damit konnten nicht nur die Aufnahmen gespeichert und nachträglich die IR-Parameter (z.B. Emissionsgrad) verändert werden, sondern war es auch möglich, für spezielle Bereiche in der Aufnahme (z.B. Bildpunkte oder Rechtecke) die maximalen oder mittleren Temperaturen eigens ausgeben zu lassen. Im Bereich der Schneidzone wurden dann die Temperaturen ausgegeben und weiter in Excel-Dateien exportiert. Mit Excel fand die weitere Auswertung der Daten statt. Für den ersten Versuch wurden die maximalen Strahlungswerte des gesamten Blickfeldes miteinander verglichen und bei den anderen beiden Versuchen nur bestimmte Bereiche der Aufnahmen. Die Kameraposition und die Mitführung spielten hierbei eine große Rolle. Durch die Anbringung der Kamera innerhalb des Bearbeitungszentrums konnte durch die Verringerung der Distanz von Optik zu Messobjekt die Auswertung um einiges erleichtert werden. Auch die Interpretation der Daten konnte dadurch verbessert werden. Damit wurde die Theorie bestätigt, dass eine geringe Entfernung der Optik zum Messobjekt ein besseres Ergebnis liefert.

Im letzten Teil dieser Arbeit wurde ein Modell zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung entwickelt, welches den Einsatz eines Diagnosesystems hinsichtlich der Kosten bei einer Nichterkennung eines Werkzeugbruches aufzeigen soll. Hier wurde ein Bewertungsmodell entwickelt, das die maximalen Anlagen- und Personalkosten für die Nachbearbeitung bei Nichterkennung eines Werkzeugbruches darstellt. Dieses Modell wurde für einen zuvor ausgewählten Arbeitsschritt einer Maschine angewendet, welche sich laut Experten für eine Zustandsüberwachung eignen würde. Das Ergebnis daraus war, dass rein bei der Betrachtung der Nacharbeitskosten, ein großes Potential zur Kosteneinsparung steckt. Zudem könnten mit diesem Modell noch weitere Linien/Anlagen untersucht werden und als Entscheidungshilfe für die Umsetzung eines Diagnosesystems dienen.

6.2 Ausblick

Die Versuche haben gezeigt, dass ein Temperaturunterschied in den Werkzeugzuständen bei der Bearbeitung unterschiedlicher Materialien erkennbar ist. Der Einsatz der Thermografie für diese Untersuchungen ist, unter bestimmten Voraussetzungen, möglich. In der Thermografie gibt es allerdings auch viele Einflussfaktoren, allen voran der Emissionsgrad. Dieser ist entscheidend für die Bestimmung der gemessenen Temperatur, aber nicht immer einfach zu bestimmen, vor allem, wenn unterschiedliche Materialien im Bildbereich sind.

Um eine sinnvolle Online/Inline-Umsetzung des Einsatzes einer Thermografiekamera für die Werkzeugzustandsüberwachung durchzuführen, müsste zuerst überlegt werden, wie diese am besten angebracht werden kann, um geeignete Aufnahmen zu erstellen. Am besten wäre es, sie an einer fixen Stelle zu platzieren, dass der Vergleich mit Einzelaufnahmen zu einem zuvor definierten Bearbeitungszeitpunkt möglich ist. Damit wäre das Problem der Kameramitführung und der großen Datenmengenübertragung gelöst. Es müssten auch noch Langzeituntersuchungen mit einem definierten Aufbau an einer Anlage durchgeführt werden, um ein Verschleißmodell für das Werkzeug ableiten zu können. Hier müsste immer ein Vergleich mit der Qualität der bearbeiteten Fläche erfolgen, um eine sinnvolle Aussage über den Werkzeugzustand treffen zu können.

Die Thermografie wird in der Industrie schon in sehr vielen Bereichen eingesetzt, wie auch schon in der Theorie angeschnitten. Somit könnte der Einsatz der Thermografie mit anderen Untersuchungen hinsichtlich der Verschleißerkennung von Bauteilen in Kombination durchgeführt werden. Eine Möglichkeit wäre, die elektrischen Komponenten einer Produktionsmaschine mittels Wärmebildgebung zu untersuchen. Damit könnten auch Verschleißerscheinungen aufgrund der Erwärmung dieser Komponenten erkannt werden. Dazu müssen aber auch Langzeittests durchgeführt werden, da beispielsweise die Lebensdauer von einer Werkzeugspindel über zwei Jahre betragen kann. Wird aber z.B. ein Lagerschaden frühzeitig durch ein Diagnosesystem erkannt, können Instandhaltungsmaßnahmen viel besser geplant werden und somit auch wirtschaftlicher durchgeführt werden. Für die Zustandsüberwachung bei Fräswerkzeugen könnte sich eine Schwingungsmessung besser eignen. Nähere Informationen dazu können in der parallel erstellten Abschlussarbeit von Altziebler 2017 gefunden werden.

Literaturverzeichnis

ALTZIEBLER, Christian: *Condition Monitoring - Akustische Zustandsüberwachung von Produktionsmaschinen*. Masterarbeit, 2017

BAHMANN, Werner: *Werkzeugmaschinen kompakt : Baugruppen, Einsatz und Trends*. 21., überarb. Aufl. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2013. – ISBN 978-3-658-03748-2

BERNHARD, Frank (Hrsg.): *Handbuch der Technischen Temperaturmessung*. 2. Aufl. Berlin : Springer Vieweg, 2014 (VDI-Buch). – ISBN 978-3-642-24505-3

BIEDERMANN, Hubert: *Die Arbeitsorganisation der Instandhaltung im Kontext zu Industrie 4.0*. In: *Industrie 4.0 Management* (2015), Nr. 3, S. 45–48. URL [http://www.gitoverlag.de/home-page/im/imhp.nsf/0/4B45DD73110A2E86C1257E5400334304/\\$FILE/biedermann_Die-Arbeitsorganisation-der-Instandhaltung-im-Kontext-zu-Industrie%204.0_IM-2015-3.pdf](http://www.gitoverlag.de/home-page/im/imhp.nsf/0/4B45DD73110A2E86C1257E5400334304/$FILE/biedermann_Die-Arbeitsorganisation-der-Instandhaltung-im-Kontext-zu-Industrie%204.0_IM-2015-3.pdf) – Überprüfungsdatum 2017-02-12

BUTTLER, Günter: *Ein einfaches Verfahren zur Identifikation von Ausreißern bei multivariaten Daten*. URL <https://www.econstor.eu/handle/10419/29594>. – Aktualisierungsdatum: 2013-05-22 – Überprüfungsdatum 2017-05-16

CZICHOS, Horst: *Mechatronik : Grundlagen und Anwendungen technischer Systeme ; mit 12 Tabellen*. 2., aktualisierte und erweiterte Auflage. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2008. – ISBN 978-3-8348-0373-3

DENKENA, Berend ; TÖNSHOFF, Hans Kurt: *Spanen : Grundlagen*. 3., bearb. und erw. Aufl. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011 (VDI-Buch). – ISBN 978-3-642-19772-7

FLIR SYSTEMS (Hrsg.): *Benutzerhandbuch FLIR A6xxseries*, 2011

FLIR-INFRAROTKAMERAS: *FLIR A645sc/25° Infrarot Wärmebildkamera*. URL <http://www.flir-infrarotkamas.de/FLIR-A645sc-Infrarot-Waermebildkamera> – Überprüfungsdatum 2017-05-03

GROB-WERKE: *Bearbeitungszentren/G-Module - GROB-WERKE GmbH & Co. KG*. URL <http://www.grobgroup.com/produktbereiche/systemloesungen/bearbeitungszentren-g-module.html> – Überprüfungsdatum 2017-05-03

HERWIG, Heinz ; MOSCHALLSKI, Andreas: *Wärmeübertragung : Physikalische Grundlagen - Illustrierende Beispiele - Übungsaufgaben mit Musterlösungen*. 3., erw. u. überarb. Aufl. 2014. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014. – ISBN 978-3-658-06208-8

HIRSCH, Andreas: *Werkzeugmaschinen : Anforderungen, Auslegung, Ausführungsbeispiele*. 3., überarbeitete und aktualisierte Auflage. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2016. – ISBN 978-3-658-14249-0

KEIL, Stefan: *Dehnungsmessstreifen*. 2nd ed. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017. – ISBN 978-3-658-13612-3

KLOCKE, Fritz ; KÖNIG, Wilfried: *Fertigungsverfahren 1 : Drehen, Fräsen, Bohren*. 8. Aufl. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2008 (VDI-Buch). – ISBN 978-3-540-35834-3

LEIDINGER, Bernhard: *Wertorientierte Instandhaltung : Kosten senken, Verfügbarkeit erhalten*. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014. – ISBN 978-3-658-04400-8

LEISCHNIG, Steffen: *Entwicklung standardisierter Abläufe zur Verbesserung der Prozesszuverlässigkeit von Fertigungsanlagen*. Zugl.: Chemnitz, Techn. Univ., Diss., 2008. Chemnitz : IBF, 2009 (Wissenschaftliche Schriftenreihe des Instituts für Betriebswissenschaften und Fabrikssysteme 74)

MATYAS, Kurt: *Instandhaltungslogistik : Qualität und Produktivität steigern*. 5., überarbeitete Auflage. München : Hanser, 2013. – ISBN 978-3-446-43560-5

MAY, Constantin ; KOCH, Arno: *Overall Equipment Effectiveness (OEE)*. In: *Zeitschrift der Unternehmensberatung* (2008), Nr. 6, S. 245–250

NEUGEBAUER, Reimund: *Werkzeugmaschinen : Aufbau, Funktion und Anwendung von spanenden und abtragenden Werkzeugmaschinen*. Berlin Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2012 (VDI-Buch). – ISBN 978-3-642-30078-3

PAWELLEK, Günther: *Integrierte Instandhaltung und Ersatzteillogistik : Vorgehensweisen, Methoden, Tools*. Berlin, Heidelberg : Springer, 2013. – ISBN 978-3-642-31383-7

PAWELLEK, Günther: *Integrierte Instandhaltung und Ersatzteillogistik : Vorgehensweisen, Methoden, Tools*. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg : Springer Vieweg, 2016 (VDI-Buch). – ISBN 978-3-662-48667-2

REICHEL, Jens (Hrsg.); MÜLLER, Gerhard (Hrsg.); MANDELARTZ, Johannes (Hrsg.): *Betriebliche Instandhaltung*. Berlin : Springer, 2009 (VDI-Buch). – ISBN 978-3-642-00501-5

SACKEWITZ, Michael (Hrsg.): *Leitfaden zur Wärmefluss-Thermographie : Zerstörungsfreie Prüfung mit Bildverarbeitung*. Stuttgart : Fraunhofer-Verl., 2011 (Vision 12). – ISBN 978-3-8396-0234-8

SCHENK, Michael: *Instandhaltung technischer Systeme : Methoden und Werkzeuge zur Gewährleistung eines sicheren und wirtschaftlichen Anlagenbetriebs*. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. – ISBN 978-3-642-03948-5

THERMOKAMERAS: *ResearchIR2.png (767x473)*. URL <http://www.thermokameras.com/ir-systeme/software/ResearchIR2.png>. – Aktualisierungsdatum: 2016-04-01 – Überprüfungsdatum 2017-05-03

TRÄNKLER, Hans-Rolf (Hrsg.); REINDL, Leonhard M. (Hrsg.): *Sensortechnik : Handbuch für Praxis und Wissenschaft*. 2., völlig neu bearb. Aufl. Berlin : Springer Vieweg, 2014 (VDI-Buch). – ISBN 978-3-642-29942-1

WECK, Manfred ; BRECHER, Christian: *Werkzeugmaschinen 1 : Maschinenarten und Anwendungsbereiche*. 6., neu bearb. Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005 (VDI-Buch). – ISBN 978-3-540-28085-9

WECK, Manfred ; BRECHER, Christian: *Werkzeugmaschinen 3 : Mechatronische Systeme, Vorschubantriebe, Prozessdiagnose*. 6., neu bearbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006 (VDI-Buch). – ISBN 978-3-540-32506-2

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Entwicklung der Instandhaltungstechniken	3
Abbildung 2: Definition und Gliederung Instandhaltung nach DIN 31051	5
Abbildung 3: Instandhaltungsstrategien	6
Abbildung 4: Schadensbedingte Instandhaltungsstrategie und deren Auswirkung auf den Abnutzungsvorrat.....	7
Abbildung 5: Zeitbasierte Instandhaltungsstrategien und deren Wirkung auf den Abnutzungsvorrat	8
Abbildung 6: Zustandsbasierte Instandhaltungsstrategie und deren Auswirkung auf den Abnutzungsvorrat.....	9
Abbildung 7: Die 5 Säulen von TPM.....	11
Abbildung 8: Die sechs verschiedenen Ausfallkurven	12
Abbildung 9: Kostenentwicklung eines störungsbedingten Anlageausfalles ohne CM-System.....	14
Abbildung 10:Kostenentwicklung eines störungsbedingten Anlageausfalles mit und ohne CM-System.....	15
Abbildung 11: Messkette zur Zustandsüberwachung	17
Abbildung 12: Gliederung der Werkzeugmaschinen.....	18
Abbildung 13:Klassifizierung der Werkzeugmaschinen nach dem Automatisierungsgrad.....	19
Abbildung 14: Aufgaben und Maßnahmen im Umfeld der Fertigung aus Sicht der Qualitätssicherung	20
Abbildung 15:Prozessäußerungen zur Überwachung in der Zerspanung	21
Abbildung 16: Aufbau von Dehnmessstreifen	23
Abbildung 17: Sensorprinzip zur Kraftmessung.....	23
Abbildung 18: Aufbau eines piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmers	24
Abbildung 19: Darstellung der Temperaturverteilung auf der Handoberfläche zur Durchblutungskontrolle	25
Abbildung 20: Temperaturmessung an der gefertigten Fläche eines Werkstückes ..	26
Abbildung 21: Anordnung einer Messeinrichtung zur Infrarotthermografie beim Drehen.....	27
Abbildung 22: Infrarotbild eines Fließspans beim Drehen von Stahl	27

Abbildung 23: Aufteilung der Wirkarbeit beim Zerspanen in Abhängigkeit von der Spanungsdicke	28
Abbildung 24: Wärmentwicklung in Werkstück, Span und Werkzeug bei der Stahlzerspanung.....	29
Abbildung 25: Häufigkeit der Temperaturbereiche bei Temperaturmessungen in der Verfahrenstechnik.....	31
Abbildung 26: Übersicht über technische Temperaturmessverfahren und ihre Messbereiche (1).....	32
Abbildung 27: Übersicht über technische Temperaturmessverfahren und ihre Messbereiche (2).....	32
Abbildung 28: Prinzip einer unmittelbaren Temperaturmessung	35
Abbildung 29: Prinzip einer mittelbaren Temperaturmessung	35
Abbildung 30: Schematische Darstellung von Emissionsgrad für Schwarze, graue und selektive Strahler gleicher Temperatur	37
Abbildung 31: Prinzip der thermischen Verhältnisse am thermischen Sensor.....	40
Abbildung 32: Aufbau und Arbeitsprinzipien von Thermografiegeräten	42
Abbildung 33: Modernes Bolometerarray:	43
Abbildung 34: Messfeld einer IR-Kamera in Abhängigkeit von der Messentfernung	45
Abbildung 35: Verschiedene Arten und Bauformen von Mikrobolometer Kameras ..	45
Abbildung 36: Schematischer Messaufbau der Versuche	49
Abbildung 37: Bearbeitungszentrum Grob G500	51
Abbildung 38: 3D Ansicht Flir A645sc	52
Abbildung 39: Anschlüsse Flir 645sc.....	52
Abbildung 40: Analyseoberfläche FLIR ResearchIR Max 3.1	53
Abbildung 41: Schematische Darstellung einer Verschleißkurve.....	57
Abbildung 42: Bilder Kameraposition 1.Versuchsreihe	59
Abbildung 43: Bearbeitungsschritte 1. Versuchsreihe	59
Abbildung 44: Vergleich Bearbeitung ZKG mit beiden Werkzeugzuständen	61
Abbildung 45: Aufzeichnung der maximalen Temperatur im Bildbereich über die Bearbeitungszeit des neuen Werkzeuges	62
Abbildung 46: Zeitlicher Verlauf der Temperaturen von neuem und verschlissenem Werkzeug der ersten Versuchsreihe	64
Abbildung 47: Zeitlicher Verlauf des 2.Bearbeitungsschrittes des ersten Zyklus der ersten Versuchsreihe.....	64

Abbildung 48: Vorrichtung für Kamerabefestigung innerhalb des Bearbeitungszentrums.....	67
Abbildung 49: IR-Bilder des LötKolbens neben Fräser	68
Abbildung 50: Probestücke für 2.Versuchsreihe.....	68
Abbildung 51: Bearbeitungsschritte 2.Versuchsreihe	69
Abbildung 52: IR-Aufnahme Bearbeitung von Stahl mit verschlissenenem Werkzeug .	69
Abbildung 53: IR-Aufnahmen von der Bearbeitung der Probe aus Stahl mit neuem und verschlissenenem Werkzeug.....	70
Abbildung 54: Ausgewählte Bildpunkte für die Auswertung der 2. Versuchsreihe....	71
Abbildung 55: Mittelwerte der Datenpunkte der Bearbeitung von Stahl mit neuem und verschlissenenem Werkzeug.....	72
Abbildung 56: Bildliche Darstellung von (Gl. 6).....	73
Abbildung 57: Ausschnitt der gefilterten und gemittelten Temperaturverläufe über die Bearbeitungszeit von neuem und verschlissenenem Werkzeug bei der Bearbeitung von Stahl	73
Abbildung 58: Vergleich des Temperaturverlaufs von neuem und verschlissenenem Werkzeug bei der Bearbeitung von Stahl	75
Abbildung 59: Bearbeitete Zylinderkurbelgehäuse der 3.Versuchsreihe	77
Abbildung 60: Verwendete Fräser der 3.Versuchsreihe	78
Abbildung 61: Rasterung der Schneidzone der verwendeten Fräsen der 3.Versuchsreihe.....	79
Abbildung 62: Verlauf des gleitenden Mittelwertes der gefilterten Daten für die Bearbeitung des Stahlguss-ZKG	80
Abbildung 63: Vergleich der Werkzeugzustände von der Bearbeitung des Stahlguss-ZKG's im Bereich der Schneidzone	81
Abbildung 64: Vergleich der Werkzeugzustände von der Bearbeitung des Stahlguss-ZKG's im Schaftbereich	81
Abbildung 65: Vergleich der Werkzeugzustände von der Bearbeitung des Aluminium-ZKG's im Bereich der Schneidzone	82
Abbildung 66: Schematische Darstellung der verschiedenen Anlagentypen	86

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:Technisches Prinzip und zugehörige Diagnoseart	16
Tabelle 2: Zuordnung von Messgrößen zu physikalischen Funktionsprinzipien	22
Tabelle 3: Benennung der Wellenlängenbereiche der Temperaturstrahlung.....	30
Tabelle 4: Grenzwellenlänge ausgewählter Einhalbleiter und Eigenschaften moderner Photonendetektoren für hochauflösende Arrays.....	40
Tabelle 5: Ausgewählte Kenngrößen für Wärmebildgeräte	44
Tabelle 6: Wichtige Produktspezifikationen FLIR A645sc.....	52
Tabelle 7: Beschreibung der Funktionen von FLIR ResearchIR Max 3.1	54
Tabelle 8: Definition zeitliche Bildfolge der Aufnahmen	55
Tabelle 9: Definition Kamerabewegung/ -position	56
Tabelle 10: Definition Werkzeugstände	57
Tabelle 11: Vorgehen 1. Versuchsreihe.....	58
Tabelle 12: Parameter Auswertung 1.Versuchsreihe	60
Tabelle 13: Vorgehen 2. Versuchsreihe.....	66
Tabelle 14: Werkstoffbezeichnungen 2.Versuchsreihe.....	68
Tabelle 15: Parameter 2.Versuchsreihe	69
Tabelle 16: Auswertung der Bildpunkte bei der Bearbeitung von Stahl	74
Tabelle 17: Vorgehensweise 3.Versuchsreihe.....	77
Tabelle 18: Daten für Bearbeitungsschritt Gewindebohren	89
Tabelle 19: Kostenrechnung für Werkzeugbrüche.....	89