

FH Aachen

Fachbereich Maschinenbau und Mechatronik

Studiengang Produktentwicklung im Maschinenbau

Masterarbeit

Prozessüberwachung beim Werkzeugschleifen von WC-Co Hartmetallschaftfräsern

vorgelegt von Alexander Nordmann
Matrikel-Nr. 3228340

Referent: Prof. Dr. Raphael Pfaff

Externer Betreuer: Ulrich Müller, M. Sc.

Datum: 12. Januar 2022

Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die im Quellenverzeichnis angegebenen Quellen benutzt habe. Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder noch nicht veröffentlichten Quellen entnommen sind, sind als solche kenntlich gemacht. Die Zeichnungen oder Abbildungen in dieser Arbeit sind von mir selbst erstellt worden oder mit einem entsprechenden Quellennachweis versehen. Diese Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form noch bei keiner anderen Prüfungsbehörde eingereicht worden.

Aachen, Januar 2022

Alexander Nordmann

I Inhaltsverzeichnis

I	Inhaltsverzeichnis	i
II	Formelzeichen und Abkürzungen	iii
III	Abbildungsverzeichnis	vii
IV	Tabellenverzeichnis	x
1	Einleitung	1
1.1	Vorgehensweise	1
1.2	Aufbau der Arbeit	2
2	Stand der Technik	3
2.1	Grundlagen der Prozessüberwachung	3
2.1.1	Fertigungsmesstechnik	4
2.1.2	Sensoren	5
2.2	Fertigung von Zerspanwerkzeugen	14
2.2.1	Prozesskette zur Herstellung von Fräsern	14
2.2.2	Werkzeugschleifen	15
2.3	Ansätze der Prozessüberwachung beim Werkzeugschleifen	19
3	Problemstellung und Zielsetzung	23
4	Versuchsaufbau und Versuchsmethodik	25
4.1	Werkzeugschleifmaschine	26
4.2	Sensorischer Werkzeughalter	27
4.3	Versuchsmethodik	28
4.4	Ablauf einer Messung	30
4.5	Software: spike Tool Analyser	31
5	Ergebnisse	33
5.1	Analyse des Torsionsmoments M_t	34
5.1.1	Einfluss des Vorschubs v_f auf das Torsionsmoment $M_{t,S}$	34
5.1.2	Einfluss der Schnittgeschwindigkeit v_c auf das Torsionsmoment $M_{t,S}$	35
5.1.3	Einfluss des Vorschubs v_f auf das Torsionsmoment $M_{t,W}$	36
5.1.4	Einfluss der Schnittgeschwindigkeit v_c auf das Torsionsmoment $M_{t,W}$	36
5.1.5	Vergleich der Torsionsmomente $M_{t,S}$ und $M_{t,W}$	37

5.2	Analyse des Biegemoments M_b	39
5.2.1	Einfluss des Vorschubs v_f auf das Biegemoment $M_{b,S}$	39
5.2.2	Einfluss der Schnittgeschwindigkeit v_c auf das Biegemoment $M_{b,S}$	40
5.2.3	Einfluss des Vorschubs v_f auf das Biegemoment $M_{b,W}$	41
5.2.4	Einfluss der Schnittgeschwindigkeit v_c auf das Biegemoment $M_{b,W}$	42
5.2.5	Vergleich der Biegemomente $M_{b,S}$ und $M_{b,W}$	43
5.3	Vergleich der Momente $M_{t,S}$ und $M_{b,S}$	44
5.3.1	Einfluss der Vorschubänderung und des Schärfens	44
5.4	Analyse der Prozessergebnisse	46
5.4.1	Auswertung des Mittenrauheitswertes Ra	46
5.4.2	Auswertung des Schleifscheibenverschleißes Δr_s und Δr_k	47
5.5	Grafische Auswertung	49
5.6	Erfahrung mit dem Messsystem	51
6	Fazit und Ausblick	53
6.1	Fazit	53
6.2	Ausblick	53
VI	Literaturverzeichnis	xi

II Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
A	mm ²	Querschnittsfläche
a_e	mm	Zustellung
a_p	mm	Schnitttiefe
b_s	mm	Breite des Schleifscheibenbelags
d_{ij}	-	piezoelektrische Ladungskonstante
d_k	μm	Mittlere Korngröße
d_s	mm	Schleifscheibendurchmesser
d_w	mm	Durchmesser Rohling
d_{WC}	μm	Mittlere Korngröße des Wolframkarbids
F	N	Kraft
f_z	mm	Vorschub je Zahn
I	A	Stromstärke
L	mm	Länge
$l_{w,i}$	mm	Länge des Rohlings
$M_{b,S}$	Nm	Biegemoment an der Spindel
$M_{b,W}$	Nm	Biegemoment am Werkstückhalter
$M_{t,S}$	Nm	Torsionsmoment an der Spindel
$M_{t,W}$	Nm	Torsionsmoment am Werkstückhalter
n	-	Anzahl
P	W	Leistung

Q_W'	$\text{mm}^3/(\text{mm}\cdot\text{s})$	Bez. Zeitspannungsvolumen
Q_x	C	Ladungsdifferenz in x-Richtung
Q_y	C	Ladungsdifferenz in y-Richtung
R	Ω	Widerstand
Ra	μm	Arithmetischer Mittenrauwert
Rpk	μm	Reduzierte Spitzenhöhe
Rvk	μm	Reduzierte Talhöhe
U	V	Spannung
V_W'	mm^3/mm	Bez. Zerspanungsvolumen
v_B	%	Bez. Bindungsvolumen
v_f	mm/min	Vorschubgeschwindigkeit
v_K	%	Bez. Kornvolumen
v_P	%	Bez. Porenvolumen
v_s	m/s	Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit
Δr_k	μm	Kantenverschleiß der Schleifscheibe
Δr_s	μm	Radialverschleiß der Schleifscheibe
ρ_e	$\Omega \cdot \text{m}$	Spezifischer Widerstand
φ	$^\circ$	Winkel

Abkürzung	Beschreibung
AE	Acoustic-Emission
AI	Artificial intelligence
ANN	Artificial neural networks
CAD	Computer-aided design
CAM	Computer-aided manufacturing
CBN	Cubic Boron Nitride – Kubisches Bornitrid
CNC	Computerized Numerical Control
CVD	Chemical vapour deposition
DP	Polykristalliner Diamant
DMS	Dehnungsmessstreifen
F	Frequenz
FMT	Fertigungsmesstechnik
HSS	High speed steel
KSS	Kühlschmierstoff
PVD	Physical vapour deposition
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
USB	Universal Serial Bus
vgl.	vergleiche

III Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Prozessregelkreis bei der Prozessüberwachung [TÖNS02, S. 554].....	3
Abbildung 2.2: Ishikawa-Diagramm der Messabweichung [DIN96].....	5
Abbildung 2.3: Piezoelektrischer Longitudinaleffekt [KLOC08, S. 391].....	8
Abbildung 2.4: Piezoelektrischer Schereffekt [KLOC08, S. 392].....	8
Abbildung 2.5: Piezoelektrischer Transversaleffekt [KLOC08, S. 393].....	8
Abbildung 2.6: Grundaufbau eines Dehnungsmessstreifen [KLOC08, S. 389].....	9
Abbildung 2.7: Wheatstonesche Brückenschaltung [KLOC08, S. 390].....	10
Abbildung 2.8: Überlagerung von Abweichungen am Oberflächenprofil [KEFE18, S. 112]...	11
Abbildung 2.9: Abgrenzung des Welligkeitsprofil vom Rauheitsprofil [CARL21, S. 1].....	12
Abbildung 2.10: Messprinzipien zur Längenänderungsbestimmung [PART16, S. 180].....	13
Abbildung 2.11: Prozesskette der Herstellung von Fräswerkzeugen [FRIE02, S. 18].....	15
Abbildung 2.12: Schleifen als Fertigungsverfahren nach DIN 8580 [DIN03].....	16
Abbildung 2.13: Zusammensetzung der Schleifscheibenbezeichnung [KLOC17a, S. 52].....	16
Abbildung 2.14: Bruchzähigkeit über der Härte von Schleifkornwerkstoffen im Vergleich zu Bearbeitungswerkstoffen [KLOC17a, S. 24].....	17
Abbildung 2.15: Volumenanteile von Schleifkörpern, Gibbsches Dreieck [KLOC17a, S. 51]	18
Abbildung 2.16: Entwicklung der Modellierung und Simulation von Schleifprozessen [BRIN06, S. 667].....	19
Abbildung 2.17: Relevante Signale und Messgrößen beim Schleifprozess [TÖNS02, S. 552]	21
Abbildung 2.18: Störquellen der Maschinen und ihre Frequenzbereiche [KLOC17a, S. 428]	22
Abbildung 4.1: Versuchsaufbau, Werkzeugschleifmaschine und Messeinrichtung.....	25

Abbildung 4.2: Versuchsmaterialien	26
Abbildung 4.3: Messkette der Komponenten des Messsystems von pro-micron.....	27
Abbildung 4.4: Schematische Darstellung der angreifenden Kräfte und Momente	28
Abbildung 4.5: Versuchspunkte der ersten Versuchsreihe, Nutengeometrie	29
Abbildung 4.6: Bewertungsgrößen an Werkstück und Werkzeug.....	30
Abbildung 4.7: spike Tool Analyser, Verlauf der Messgrößen am Werkzeughalter	31
Abbildung 4.8: spike Tool Analyser, Verlauf der Messgrößen am Werkstückhalter.....	31
Abbildung 4.9: spike Tool Analyser, Einstellung eines bestimmten Zeitintervalls	32
Abbildung 5.1: Torsionsmoment der Spindel $M_{t,S,max}$ in Abhängigkeit des Vorschubs v_f	34
Abbildung 5.2: Torsionsmoment $M_{t,S,max}$ über Schnittgeschwindigkeit v_c	35
Abbildung 5.3: Torsionsmoment $M_{t,W,max}$ über Vorschub v_f	36
Abbildung 5.4: Torsionsmoment $M_{t,W,max}$ über Schnittgeschwindigkeit v_c	37
Abbildung 5.5: Torsionsmomente $M_{t,arithm}$ über bezog. Zerspanungsvolumen V_W'	38
Abbildung 5.6: Biegemoment $M_{b,S,max}$ über dem Vorschub v_f	39
Abbildung 5.7: Biegemoment $M_{b,S,max}$ über Schnittgeschwindigkeit v_c	40
Abbildung 5.8: Biegemoment $M_{b,W,max}$ über Vorschub v_f	41
Abbildung 5.9: Biegemoment $M_{b,W,max}$ über Schnittgeschwindigkeit v_c	42
Abbildung 5.10: Biegemoment $M_{b,max}$ über bezog. Zerspanungsvolumen V_W'	43
Abbildung 5.11: Vergleich von Torsionsmoment und Biegemoment	44
Abbildung 5.12: Einfluss der Vorschubänderung und des Schärfens der Schleifscheibe.....	45
Abbildung 5.13: Mittenrauwert R_a unterschiedlicher Zustellungen.....	46
Abbildung 5.14: Arithmetischer Mittenrauwert R_a	47
Abbildung 5.15: Radialverschleiß Δr_s der Schleifscheibe	48

Abbildung 5.16: Kantenverschleiß Δr_k der Schleifscheibe	48
Abbildung 5.17: Polar Plots mit variierender Zustellung a_e	49
Abbildung 5.18: Polar Plots mit variierender Schnittgeschwindigkeit v_c	50
Abbildung 5.19: Polar Plots mit variierendem Vorschub v_f	50

IV Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Messprinzipien aktiver Sensoren [PART16, S. 174]	6
Tabelle 2.2: Messprinzipien passiver Sensoren [PART16, S. 175]	6

1 Einleitung

Die weltweit steigenden Anforderungen der produzierenden Unternehmen an die Prozesssicherheit und die Qualitätssicherung erfordern den Einsatz maßhaltiger Werkzeuge. Dem Schleifen als spanendes Fertigungsverfahren zur Feinbearbeitung von Werkstücken kommt eine besondere Bedeutung zu. Produzierende Unternehmen sind ständig bestrebt, ihre Produkte zu verbessern, sowie gleichzeitig Ausschuss und Nachbearbeitung zu vermeiden. Voraussetzung dafür ist, neben der Bereitstellung stabiler Umgebungsbedingungen, wie einer konstanten Temperatur, um Abweichungen von vornerein zu reduzieren, eine präzise Werkzeugmessung, eine Überwachung des Werkzeugs während des Prozesses und eine möglichst genaue Vorhersage über dessen Standzeit für maßhaltige Schleifprozesse. Dies kann außerhalb und innerhalb der Werkzeugmaschine erfolgen. Während bei der werkstückorientierten Messung die geometrischen Größen Winkel und Länge dominieren, macht die Funktionsprüfung von Maschinen und deren Teilkomponenten, wie der Führung und der Lager, neben der Erfassung geometrischer Größen, die Messung von Prozesszustandsgrößen, wie der Kraft, des Druckes und des Drehmoments erforderlich. Diese Größen können nicht getrennt vom Produktionsprozess betrachtet werden und die Messungen sind innerhalb der Maschine durchzuführen. Sie hängen maßgeblich von den Prozesseingangsgrößen Vorschub, Zustellung und der Schnittgeschwindigkeit ab. Schlussendlich bewirken sie eine Änderung der Oberflächengüte der geschliffenen Werkstücke. Um die Fehlerrate möglichst gering zu halten, ist das prozessnahe Messen nötig. Das Wissen und die Erfahrung über diese Prozesskenngößen helfen, Prozesse sicherer zu gestalten, Standzeiten zu erhöhen, Fehler bei der Bearbeitung zu vermeiden und die Maßhaltigkeit der Werkstücke zu verbessern. Die gezielte Entwicklung von effektiven Überwachungs- und Diagnosesystemen, die regulierend in den Prozess eingreifen, erfordert detaillierte Kenntnisse über die Abweichungsursache und deren möglichen Auswirkungen auf das Produkt. Der Fokus dieser Arbeit liegt darin, diese herauszuarbeiten.

1.1 Vorgehensweise

Mitthilfe der statistischen Versuchsmethodik und der Messeinrichtung spike der pro-micron GmbH werden Prozessdaten zur Bewertung des Prozessergebnisses beim Werkzeugschleifen von WC-Co Hartmetallschaftfräsern identifiziert. Um Korrelationen und Kausalitäten zwischen den Prozesseingangsgrößen und den Prozesskenngößen festzustellen, werden systematisch Prozesseingangsgrößen bei den Schleifversuchen modifiziert. Der spike ist ein sensorischer Werkzeughalter, der Zerspankraftmessungen unmittelbar am Werkzeug ermöglicht. Der spike ist akkubetrieben und überträgt die Messsignale kabellos an einen Empfänger. Zwei dieser Sensoren werden in der 5-Achsen CNC Werkzeugschleifmaschine Helitronic Vision 400 L von der Walter Maschinenbau GmbH installiert, einer werkzeugseitig an der Spindel und der zweite am Werkstückhalter. Iterativ werden Nuten in WC-Co Hartmetallrohlinge geschliffen und die Prozesskenngößen aufgezeichnet. Die einstellbaren Prozesseingangsgrößen an der Werkzeugmaschine sind der Vorschub, die Schnittgeschwindigkeit und die Zustellung der

Schleifscheibe. Die korrelierenden Prozesskenngrößen sind das Torsionsmoment, das Biegemoment und die Axialkraft sowohl an der Schleifscheibe als auch am Werkstück. Während der Versuchsreihe wird der Verschleiß der Schleifscheibe dokumentiert, um diese anschließend ebenfalls in Korrelation zu den Messergebnissen zu setzen. Zuletzt wird die Oberflächengüte der geschliffenen Nuten der Rohlinge bestimmt und ausgewertet.

1.2 Aufbau der Arbeit

In Kapitel 1 werden in der Einleitung die Motivation und Zielsetzung der Arbeit beschrieben. Ebenso werden die Vorgehensweise und der Aufbau des Versuchs kurz beschrieben. Danach werden in Kapitel 2 die Grundlagen der Prozessüberwachung erklärt und die relevanten Sensortypen sowie deren Messprinzipien dargestellt. In Kapitel 3 wird die Herausforderung der Schleifprozessüberwachung aufgezeigt und die Zielsetzung präzisiert. Die Installation des Messsystems, die Beschreibung des Versuchsaufbau und die Versuchsmethodik werden in Kapitel 4 erläutert. Die Ausarbeitung und Auswertung der Messergebnisse erfolgen in Kapitel 5. Abschließend werden in Kapitel 6 die gewonnenen Erkenntnisse zusammengefasst und die Erfahrungen mit dem Messsystem beurteilt.

2 Stand der Technik

Um die relevanten Themen einzuordnen, werden in diesem Kapitel einige fertigungsmesstechnische Grundlagen erläutert, Arten der Sensortechnik erklärt und auf Ausgewählte genauer eingegangen, um diese im direkten Vergleich gegenüberzustellen. Anschließend werden Zerspanwerkzeuge und ihr Aufbau beschrieben. Dabei wird der Herstellungsprozess von Fräswerkzeugen genauer betrachtet und das Werkzeugschleifen im Detail erklärt.

2.1 Grundlagen der Prozessüberwachung

Um Fertigungsprozesse besser zu verstehen und systematisch zu dokumentieren, werden diese mittels unterschiedlicher Verfahren und Methoden überwacht. Dabei steht bei der Prozessüberwachung, oder auch Prozessmonitoring genannt, die Sicherheit des Fertigungsprozesses als Ziel an oberster Stelle. Zudem führen immer kleiner werdende Toleranzen dazu, dass die verwendete Sensorik immer empfindlicher und präziser werden muss, um die Qualität der Produkte zu gewährleisten. Dadurch verlagert sich auch die Qualitätsüberwachung, zu einem gewissen Teil, unmittelbar in der Fertigungsmaschine. Der Prozessregelkreis einer Maschine ist in Abbildung 2.1 skizziert. [TÖNS02, S. 552]

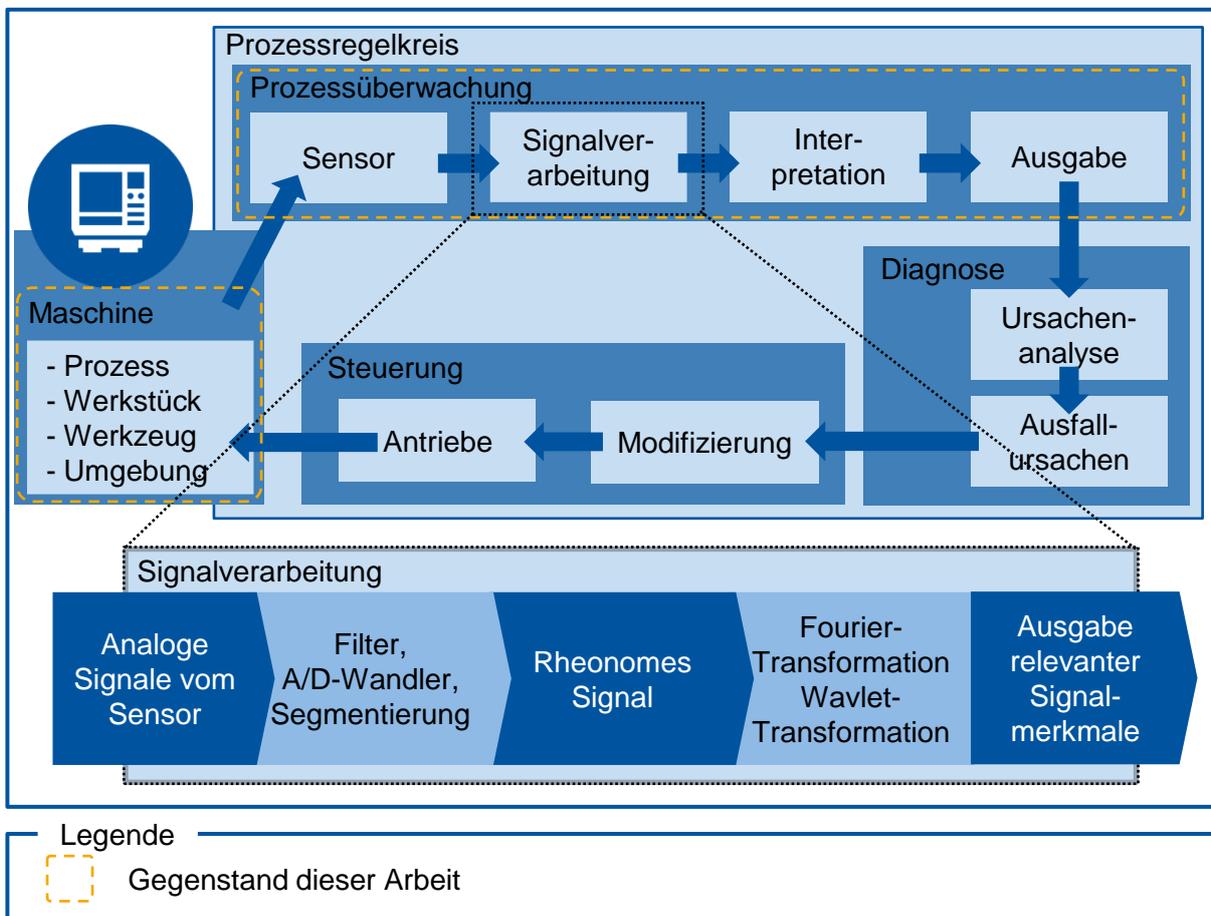


Abbildung 2.1: Prozessregelkreis bei der Prozessüberwachung [TÖNS02, S. 554]

Innerhalb dieses Regelkreises übernimmt die Prozessüberwachung nur einen gewissen Teil, unter welche wiederum auch die Fertigungsmesstechnik zählt. Das Messen eines Wertes ist alleinstehend nicht aussagekräftig. Erst wenn er in Relation gesetzt und mit einer Einheit versehen wird, lässt sich eine Schlussfolgerung aus diesem Messwert ziehen und der gesamte Regelkreis entsprechend anpassen. Die Messwertaufbereitung beziehungsweise Signalverarbeitung ist nicht trivial, da meist Störsignale auftreten, die sehr individuell, einer Maschine zugehörig, sind. Mittels dem zweckmäßigen und dem Messproblem entsprechenden Sensor die relevanten Signale zu messen, zu filtern, im Anschluss richtig zu interpretieren und Prozessstörungen zu minimieren ist Aufgabe der Prozessüberwachung. Mit Hilfe dieser lassen sich voll- oder teilautomatisierte Fertigungsabläufe realisieren und gewährleisten eine hohe Produktivität. [WECK06, S. 267–274]

2.1.1 Fertigungsmesstechnik

Während der Entwicklung, der Konstruktion und schließlich der Fertigung eines Produktes, fallen immer wieder Messungen und Prüfaufgaben an. Zusammengefasst zählen sie alle zur Fertigungsmesstechnik (FMT). Zu Beginn der Industrialisierung waren die Aufgaben der FMT einfache Längen- und Winkelmessungen mittels Lehren oder Handmessmitteln. Steigenden Anforderungen und Qualität der Produkte korrelieren mit neuen Messmethoden und umfassenderer Messtechnik. Dabei wurden bewährte Messverfahren, wie zum Beispiel mittels Lehren nicht verdrängt, sondern zusätzlich weiterentwickelt. Heutzutage werden messtechnische Aufgaben immer häufiger von Sensoren prozessbegleitend innerhalb der Werkzeugmaschine übernommen. Somit lassen sich vorbeugende Maßnahmen durch direkte Werkzeugüberwachung deutlich besser umsetzen. So kann beispielsweise ein Bruch detektiert werden, bevor es zu einem Schaden am Werkstück oder sogar an der Werkzeugmaschine selbst kommt. Neben präventiver Schadensvermeidung dient die Sensorik auch der direkten Qualitätskontrolle während oder im Anschluss eines Prozesses. Einheitliche Grundlagen und Normen bilden das Grundgerüst der FMT ein und dienen der besseren globalen Zusammenarbeit. Das internationale Einheitensystem (SI) gibt die Maßeinheiten für physikalische Größen vor. Normen und Richtlinien für diesen Bereich werden versucht in der Geometrischen Produktspezifikation (GPS) festzuhalten. Letzten Endes weicht jedes Maß vom eigentlichen Nennmaß ab. Diese Maßabweichung sind einerseits die Folge von kleinsten Fertigungstoleranzen, andererseits von Messabweichungen. Für letztere gibt es verschiedenste Ursachen, einige sind in der Abbildung 2.2 im Ishikawa-Diagramm zusammengefasst. Man ist bestrebt die Messabweichung stetig zu reduzieren. Dabei wird zwischen systematischer und zufälliger Messabweichung unterschieden. Die Zufällige kann kaum bis gar nicht beeinflusst oder korrigiert werden, da sie nicht reproduzierbar ist und so nicht detektierbar ist. Die systematischen Messabweichungen werden wiederum in bekannte und unbekannt Abweichungen unterteilt. Ziel ist es die bekannten Messabweichungen zu korrigieren, um so ein möglichst genaues Messergebnis zu erhalten. [DIN96; KEFE18, S. 17–26]

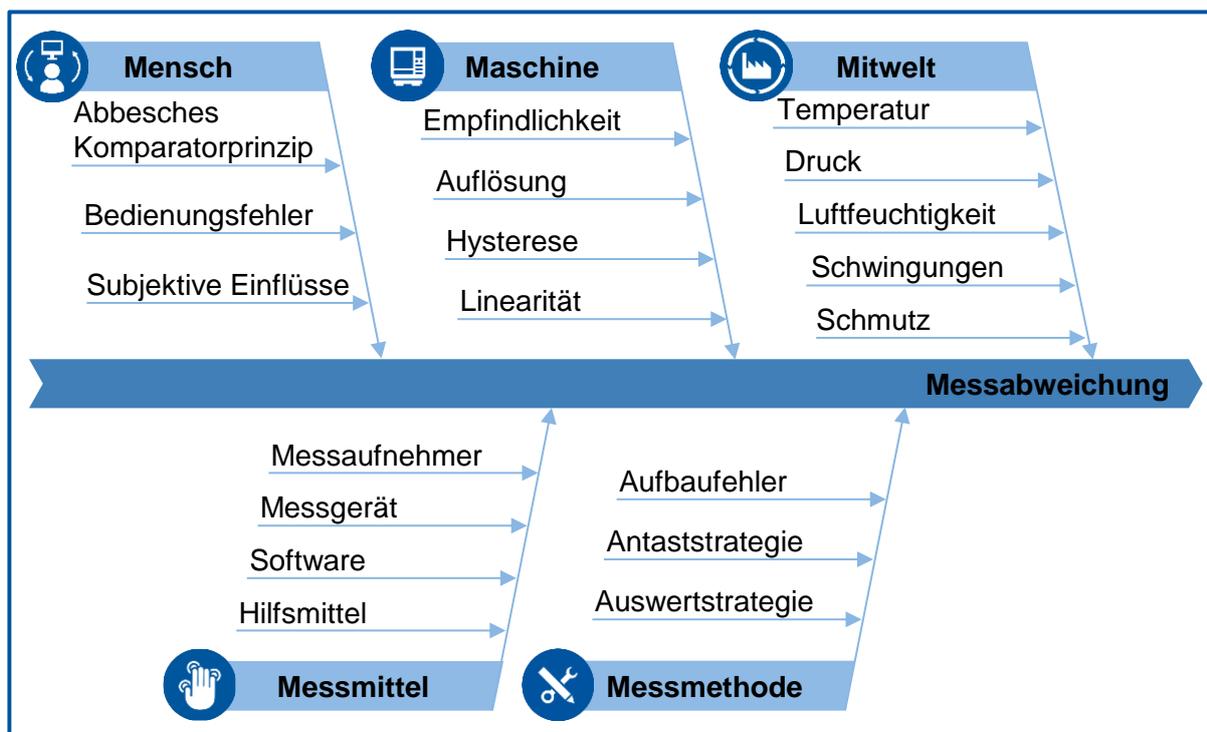


Abbildung 2.2: Ishikawa-Diagramm der Messabweichung [DIN96]

2.1.2 Sensoren

Die immer geringer werdenden Toleranzen in der Produktion erfordern auch immer präziser messende Sensoren, welche auch als Aufnehmer oder Fühler bezeichnet werden. Das Messobjekt und dessen zu ermittelndem Parameter geben das Messverfahren vor und dies wiederum bestimmt die Art des Sensors maßgebend. Ein Werkstück kann hinsichtlich seiner Geometrie über Maßangaben, Form und Lagetoleranzen, sowie Oberflächeneigenschaften, wie Rauheit und Welligkeit, vollständig definiert werden. Daraus ergibt sich eine grobe Einteilung der Messgeräte in Koordinatenmessgeräte, Form- und Lagemessgeräte, und die Oberflächenmessgeräte. Koordinatenmessgeräte können innerhalb eines dreidimensionalen Koordinatensystems jeden Punkt auf einem Werkstück antasten. Form- und Lagemessgeräte sind in der Lage Formabweichungen, wie Rundheit oder Ebenheit, sehr genau festzustellen. Grundsätzlich lässt sich eine Vielzahl von physikalischen Effekten für die Konstruktion von Sensoren ausnutzen. Die Wahl des geeigneten Effektes korrespondiert mit dem angestrebten Ziel der Messung. Sensoren lassen sich allgemein in passive und aktive Sensoren einteilen. Passive Aufnehmer verändern ihre elektrischen Eigenschaften unter dem Einfluss einer nichtelektrischen Größe, beispielsweise ändert sich der Widerstand eines elektrischen Leiters infolge einer Temperaturänderung. Sie benötigen jedoch zur Auswertung des analogen Messsignals immer eine Hilfsenergie. Im Vergleich dazu wandeln aktive Sensoren eine nichtelektrische physikalische Größe direkt in eine elektrische Größe um. Die erforderliche Energie wird der Messgröße entzogen, womit keine Hilfsenergie zur Auswertung erforderlich ist. Sie sind somit als Energiewandler zu betrachten. In der Tabelle 2.1 und Tabelle 2.2 sind zur Veranschaulichung aktive und passive Sensoren und deren Messprinzipien aufgelistet. Im Folgenden werden einige themenrelevante Sensoren und deren Messprinzipien erläutert. [DIN95]

Tabelle 2.1: Messprinzipien aktiver Sensoren [PART16, S. 174]

Aktive Sensoren		
Sensor	Einwirkende nichtelektrische Größe	Ausgegebene elektrische Größe
Fotoelement	Beleuchtungsstärke	Spannung (Leerlaufbetrieb) Strom (Kurzschlussbetrieb)
Thermoelement	Temperaturdifferenz zweier Messpunkten	Spannung
Piezokristall	Druck	Ladungsmenge bzw. -verschiebung

Tabelle 2.2: Messprinzipien passiver Sensoren [PART16, S. 175]

Passive Sensoren		
Sensor	Einwirkende nichtelektrische Größe	Beeinflusste elektrische Größe
Potentiometer	Länge, Winkel	Ohm'scher Widerstand
Widerstand-thermometer	Temperatur	Ohm'scher Widerstand
Dehnungsmessstreifen	Längenänderung	Ohm'scher Widerstand
Fotodiode	Beleuchtungsstärke	Ohm'scher Widerstand
Induktive Sensoren	Länge, Winkel	Induktivität
Kapazitive Sensoren	Länge, Winkel	Kapazität

Legende



Gegenstand dieser Arbeit

In der Fertigungsmesstechnik werden meist piezoelektrische Sensoren oder Dehnungsmessstreifen zur Kraftmessung innerhalb einer Maschine verwendet. Seltener sind induktive und kapazitive Wegaufnehmer. Je nach Konstruktion des zu messenden Systems wählt man den entsprechenden Sensor. Dabei ist zu beachten, dass weder Steifigkeit oder Festigkeit des Gesamtsystem durch den Sensor beeinflusst werden noch der Sensor an sich beschädigt wird. Bei Kristallen ohne ein Symmetriezentrum, wie zum Beispiel Turmalin, Quarze (SiO_2) oder ferroelektrische Keramiken, werden bei äußerer Krafteinwirkung die positiven und negativen Gitterbausteine verschoben, was zu einem elektrischen Dipolmoment führt und als

piezoelektrischer Effekt bezeichnet wird. Die dabei entstehende Spannung ist messbar und wird an der Oberfläche der Kristalle abgegriffen. Die Ladungsverschiebung für einer bestimmten Kraft ist als piezoelektrischer Koeffizient definiert. Er ist bei piezoelektrischen Materialien richtungsabhängig und wird entlang polarer Achsen bestimmt. Unterschiedliche Achsen haben somit unterschiedliche Empfindlichkeiten. Bei einer mechanischen Krafteinwirkung werden drei Effekte am piezoelektrischen Material unterschieden, der Longitudinaleffekt, der Schereffekt und der Transversaleffekt. [KLOC08, S. 390] Beim Longitudinaleffekt, wie in der Abbildung 2.3 zusehen, verschieben sich die Kristalle senkrecht zum Kraftvektor. Die daraus entstehende Ladungsverschiebung erzeugt eine Spannung auf der polaren Achse die parallel zum Kraftvektor zeigt. Eine Erhöhung der Ladungsverschiebung kann nicht durch eine Vergrößerung des Kristalls erreicht werden, jedoch lassen sich mehrere Kristallscheiben stapeln und elektrisch parallelschalten. Die folgende Formel (2-1) zeigt die Berechnung der Ladungsdifferenz Q_x beim Longitudinaleffekt einer polaren Achse, hier beispielhaft in x-Richtung. Sie errechnet sich aus der piezoelektrischen Ladungskonstanten d_{ij} , der angreifenden mechanischen Kraft F_x und der Anzahl n der Kristallscheiben.

$$Q_x = d_{ij} * F_x * n \quad (2-1)$$

Wie auch beim Longitudinaleffekt, in dem die Deformation durch die Kraft parallel zum Ladungsabgriff verläuft, wirkt die Scherkraft beim piezoelektrischen Schereffekt, wie in der Abbildung 2.4 dargestellt, ebenfalls entlang der polaren Achsen eines Kristalls. Bei der Berechnung der auftretenden Ladungsdifferenz Q_x sind auch hier dieselben Faktoren von Bedeutung, die piezoelektrische Ladungsverschiebung d_{ij} , die angreifende mechanische Scherkraft F_x und die Anzahl n der verwendeten Kristallscheiben, siehe Formel (2-2).

$$Q_x = 2 * d_{ij} * F_x * n \quad (2-2)$$

Der dritte Effekt der Piezoelektrizität ist der Transversaleffekt und ist in der Abbildung 2.5 dargestellt. Hierbei erzeugt die Ladungsverschiebung eine Spannung orthogonal zur angreifenden Kraft. Im Vergleich zu den zwei anderen Effekten, ist die Größe des Kristalls beim Transversaleffekt von Bedeutung. Ein Faktor der Formel (2-3) ist das Verhältnis von Höhe b zur Breite a des Kristalls. Dabei zeigt die Höhe b in Richtung des Kraftvektors F und die Breite a orthogonal dazu.

$$Q_y = -d_{ij} * F_y * \frac{b}{a} \quad (2-3)$$

Wegen ihrer sehr geringen Verformung können die piezoelektrischen Kristalle in sehr steifen Sensorstrukturen verbaut werden. Daraus folgt eine hohe Eigenfrequenz, womit wiederum hochfrequente Schwingungen messbar werden. Für Messungen unter Dauerbelastungen ist der piezoelektrische Sensor jedoch in den meisten Fällen ungeeignet, da die Ladungsverschiebung mit der Zeit abfällt, sich dynamisch an die Belastung anpasst und schlussendlich keine Ladungsdifferenz aufweist. Eine Spannungsmessung ist damit nicht mehr möglich.

Kraftänderungen aufgrund von Temperaturänderungen sind schwer nachzuvollziehen und machen eine Betrachtung der Temperaturhysterese einer Maschine nahezu unmöglich.

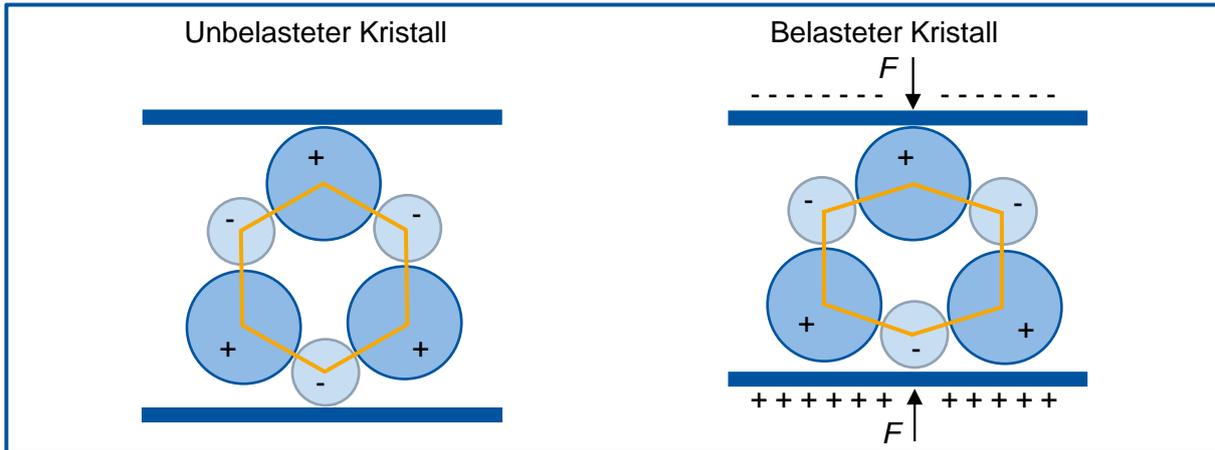


Abbildung 2.3: Piezoelektrischer Longitudinaleffekt [KLOC08, S. 391]

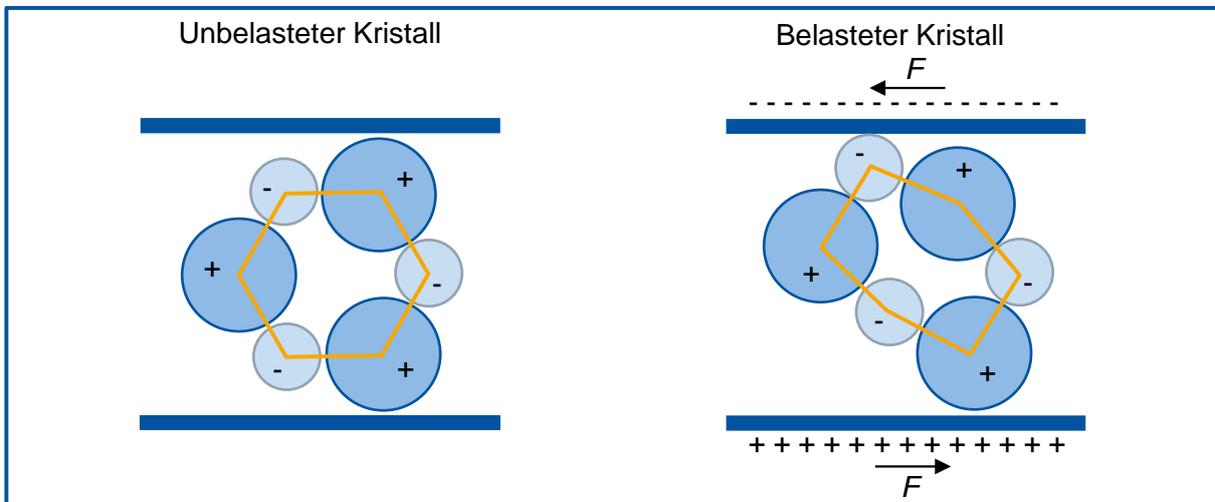


Abbildung 2.4: Piezoelektrischer Schereffekt [KLOC08, S. 392]

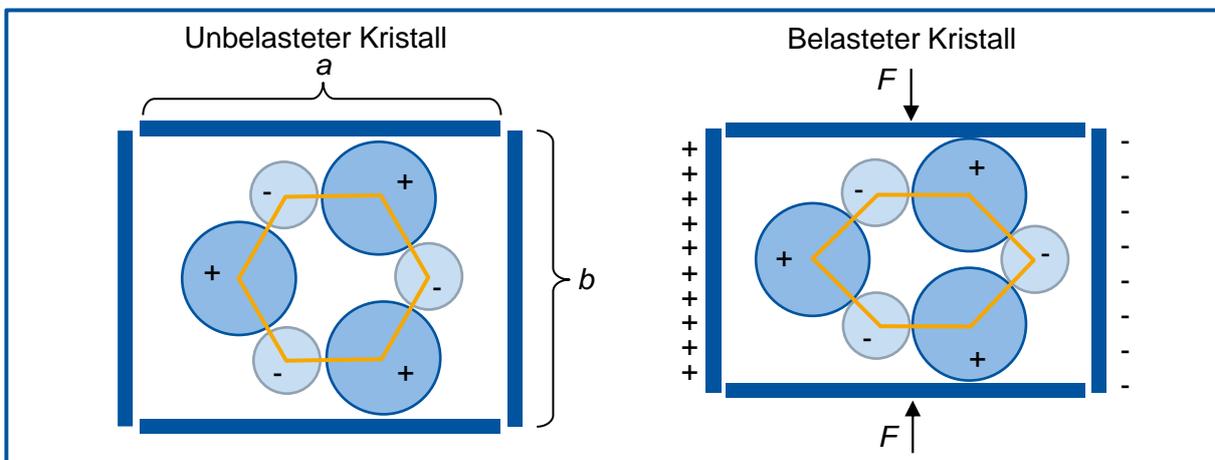


Abbildung 2.5: Piezoelektrischer Transversaleffekt [KLOC08, S. 393]

Die Dehnung eines Bauteils infolge einer externen Krafteinwirkung kann mittels Dehnungsmessstreifen (DMS) gemessen werden. Der Aufbau eines solchen DMS ist schematisch in der Abbildung 2.6 dargestellt. Ein Messmäander, im einfachsten Fall ein langer dünner Draht, wird auf einer Trägerfolie fest platziert, welche wiederum auf dem Messkörper verklebt wird. Durch die Klebeverbindung ist eine konstante Kraftverteilung über die gesamte Länge des DMS gegeben. Für die Messung ist die Messrichtung entscheidend. Die zu messende Längenänderung ist immer in x -Richtung des DMS selbst auszurichten, vgl. Abbildung 2.6, um eine maximale Längenänderung des Drahtes zu gewährleisten. Die Empfindlichkeit quer zur Messrichtung, hier entsprechend in y -Richtung, ist sehr viel geringer, da nur die Umlenkstellen des Mäanders in eine Längenänderung einfließen. Der Widerstand R eines Drahts berechnet sich wie in Formel (2-4) aus seinem Material ρ_e , seiner Länge L und seinem Querschnitt A . [KLOC08, S. 389]

$$R = \rho_e * \frac{L}{A} \quad (2-4)$$

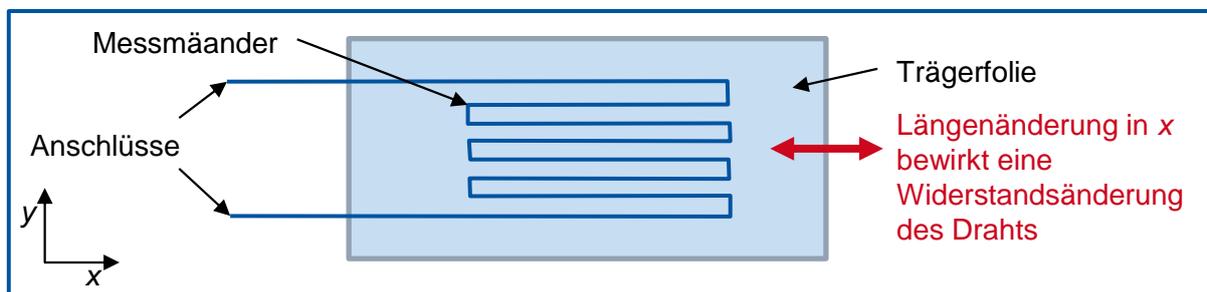


Abbildung 2.6: Grundaufbau eines Dehnungsmessstreifen [KLOC08, S. 389]

Daraus ergibt sich bei einer Längenänderung des Drahts in Messrichtung durch eine Stauchung oder Dehnung des DMS eine Widerstandsänderung ΔR des Drahtes. Diese Widerstandsänderungen sind sehr klein, lassen sich aber mittels einer Wheatstoneschen Brückenschaltung in eine Spannungsänderung ΔU umwandeln. Der Schaltplan einer solchen Brückenschaltung ist in Abbildung 2.7 dargestellt. Die einzelnen Widerstände ($R_1 - R_4$) lassen sich durch Dehnungsmessstreifen ersetzen, je nachdem wie viele Messpunkte verwendet werden sollen. Dabei unterscheidet man die Viertel- (ein DMS), die Halb- (zwei DMS) und die Vollbrücke, bei der vier DMS zum Einsatz kommen. Dabei ist nach Möglichkeit darauf zu achten, dass alle Widerstände, inklusive der DMS, die gleiche Temperaturänderungen erfahren, um so eine Temperaturkompensation zu gewähren und dadurch entstehende Messunsicherheiten direkt auszuschließen. Die zu messende Spannung U_M berechnet man wie folgt mit den Formeln (2-5), (2-6) und (2-7), abhängig von Anzahl der DMS.

$$\text{Viertelbrücke} \quad U_M = U_0 * \frac{\Delta R}{R} \quad (2-5)$$

$$\text{Halbbrücke} \quad U_M = U_0 * \frac{\Delta R}{2R} \quad (2-6)$$

Vollbrücke

$$U_M = U_0 * \frac{\Delta R}{4R} \quad (2-7)$$

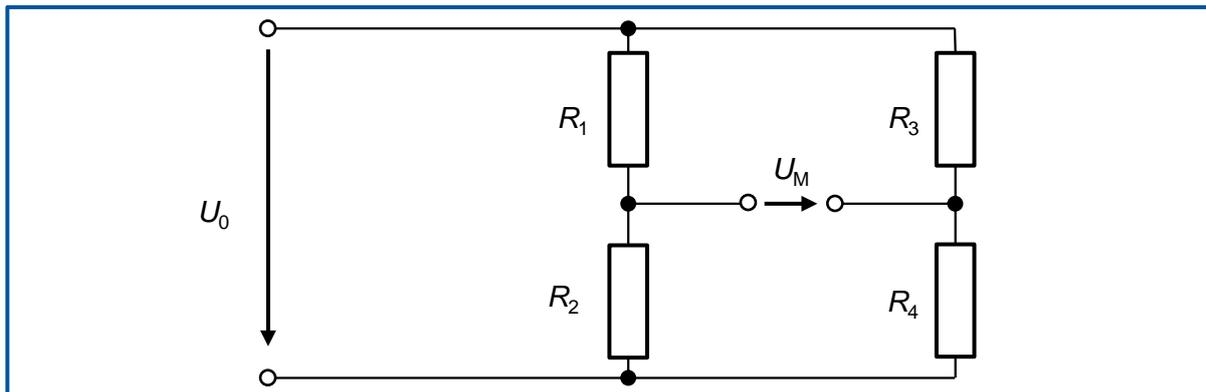


Abbildung 2.7: Wheatstonesche Brückenschaltung [KLOC08, S. 390]

Die genannte Temperatorkompensation ist auch ein Vorteil gegenüber piezoelektrischen Sensoren. Außerdem sind statische Messungen mit dem DMS drifffrei und langzeitstabiler, da beim piezoelektrischen Prinzip Ladungen über die Zeit verloren gehen und so die zu messende Spannung sukzessive wieder abfällt. Bei kleinen zu messenden Kräften fällt dieser Effekt umso stärker auf, da hier die Ladungsverschiebung per se schon geringer ist. Die Eigenfrequenz des DMS ist im Vergleich deutlich niedriger, da er flexibel gebaut sein muss, um Verformung aufzunehmen. Somit ist er für hochfrequente dynamische Messungen eher ungeeignet. Die Sensoren beider Prinzipien lassen sich gut in Gehäusen unterbringen und hermetisch verschließen, wodurch sie in nahezu jeder Umgebung einsetzbar sind. Piezoelektrische Aufnehmer lassen sich hierbei etwas kleiner und somit platzsparender konstruieren als die mit DMS. [KLOC08, S. 390]

Taktile Sensoren werden meist zur Erfassung geometrischer Größen, genauer zur Werkstück- oder Werkzeugvermessung, verwendet. Durch die Relativbewegung von Messobjekt und Sensor, wird entweder, durch mehrfaches Abtasten, eine Punktwolke erstellt oder nur einzelne relevante Messpunkte aufgenommen. Konventionelle Tastsysteme besitzen eine Tastspitze, welche die Auslenkkraft zum eigentlichen Sensor überträgt und so ein Tastsignal erzeugt. Die Tastsysteme arbeiten mit einem Optischen Schalter als Sensor, nach dem Lichtschrankenprinzip, oder erzeugen einen Schaltimpuls infolge eines Drucksensors, meist ein Piezoelement [FELD10]. Abgesehen von den unterschiedlichen Messprinzipien ist der Grundaufbau derselbe. Um die durch den Tastvorgang ausgelenkte Tastspitze in ihre ursprüngliche Position zu stellen, verfügen sie über drei Federn, die nach dem Dreibein-Prinzip eine möglichst homogene Kraftverteilung gewährleisten sollen. Jedoch ist die Kraft je nach Auslenkrichtung eine andere, sodass es beim Messen zu richtungsabhängigen Messunsicherheiten kommt. Die Antastwiederholgenauigkeit aus derselben Richtung wird bei einem Sensor mit Dreibein-Prinzip jedoch nicht beeinflusst. Die Vorteile taktile Sensorik sind die sehr geringen Anschaffungskosten und das oberflächenunabhängige Messen. Die Grenzen liegen aufgrund des mechanischen Kontaktes zum einen in der Messgeschwindigkeit und zum anderen in der Antastkraft, die bei ein bis zwei Newton radial und acht Newton axial liegt, wodurch die Gefahr besteht,

filigrane oder weiche Messobjekte zu beschädigen. Die Ausnahme sind hier die Rauheitsmessgeräte, welche auf dem Wegmessprinzip der Induktivität beruhen und mit kleinsten Anstastkräften arbeiten. Ferner führt die berührungsaktive Auslenkung im Gegensatz zum optischen Scannen dazu, dass viele Messpunkte sehr viel Zeit kosten und folglich keine Freiformflächen aufgenommen werden können. [KEFE18, S. 76]

Bei der Oberflächen- und Konturmesstechnik unterscheidet man drei Profilgrößen, das Formprofil, das Welligkeitsprofil und das Rauheitsprofil. Die einzelnen Profile einer Oberfläche und deren Überlagerung, dem Primärprofil, sind in Abbildung 2.8 dargestellt. Bei einer Rauheitsmessung wird ein klar definierter Profilschnitt auf der Oberfläche des Werkstücks mittels einem Tastsystem abgetastet. Daraus ergibt sich das Primärprofil, welches in mehreren Stufen gefiltert werden muss. Mittels der Methode der kleinsten Quadrate wird eine Mittellinie für das Primärprofil errechnet und ergibt beispielsweise eine Gerade, einen Kreisbogen oder ähnliches. Diese Kenngrößen werden als P-Kenngrößen bezeichnet. [DIN10] Im nächsten Schritt wird diese Mittellinie begradigt, um das Welligkeitsprofil zu ermitteln. Das in der Abbildung 2.9 dargestellte beispielhafte Profil ist die Überlagerung eines Welligkeitsprofils und eines Rauheitsprofils und dient der Abgrenzung dieser beiden Messgrößen. Das Rauheitsprofil von dem Welligkeitsprofil zu unterscheiden ist nicht immer trivial. Hierzu wird eine Grenzwellenlänge definiert, welche festlegt, welche Wellenlänge der Welligkeit und welche der Rauheit zugeordnet wird. [DIN02] Für die Art der Rauheit sind bei der spanabhebenden Bearbeitung die ausschlaggebenden Faktoren die Geometrie und Kinematik der Werkzeugschneide und die daraus resultierende Spanbildung. Im Vergleich hierzu sind bei der spanlosen Bearbeitung die Kristallstruktur und Kornstruktur, sowie chemische und physikalische Einflüsse auf die Oberfläche von Bedeutung. [KEFE18, S. 112]



Abbildung 2.8: Überlagerung von Abweichungen am Oberflächenprofil [KEFE18, S. 112]

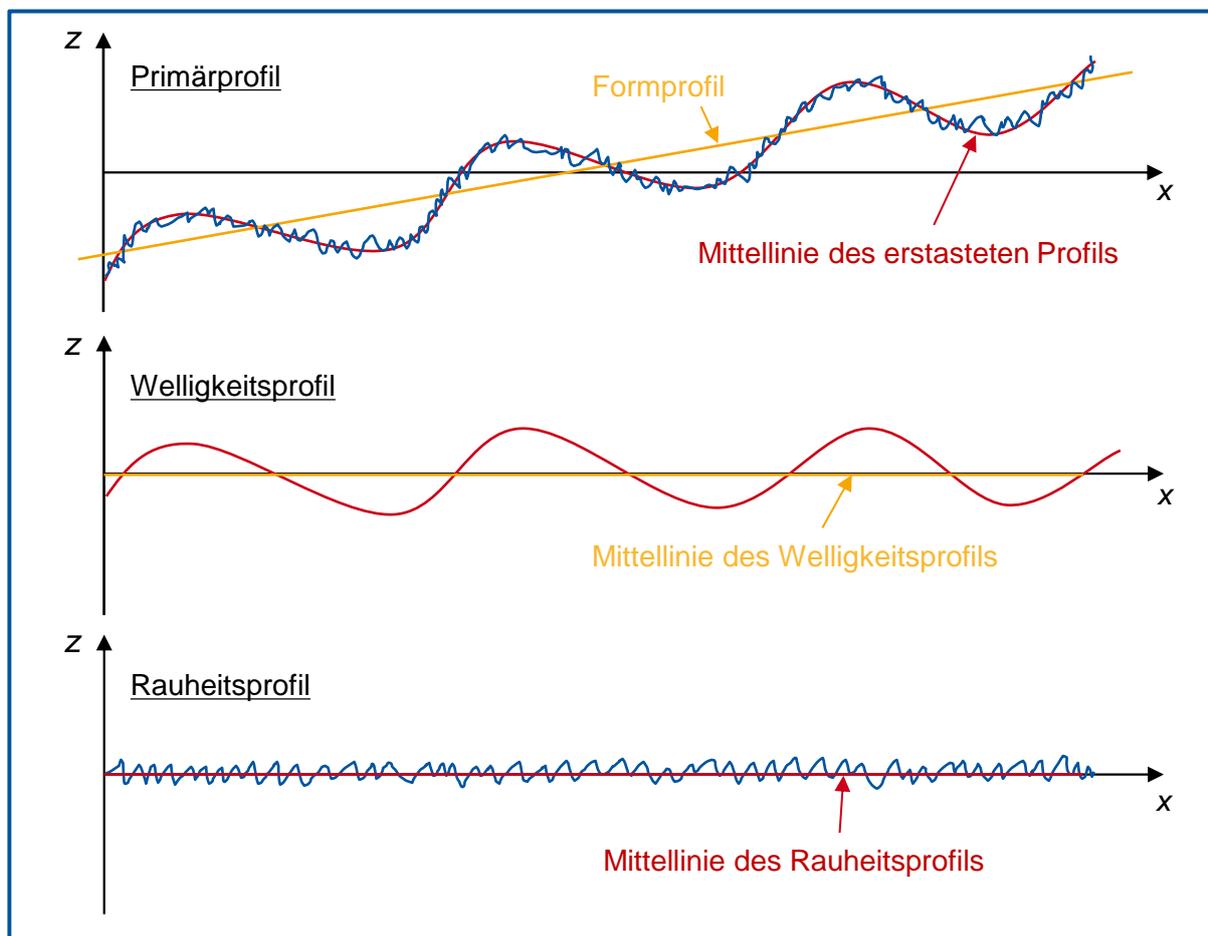


Abbildung 2.9: Abgrenzung des Welligkeitsprofil vom Rauheitsprofil [CARL21, S. 1]

Neben den taktilen Sensoren werden auch optische Sensoren verwendet. Es gibt eine Vielzahl optischer Messeinrichtungen beruhend auf der Lasertechnik, beispielsweise die Laufzeitmessung, die Interferometrie, die Triangulation und die Lichtschranke. Die Erkennung von Fehlern in der Oberfläche des Messobjektes wie zum Beispiel von Kratzern, Ausbrüchen oder Poren ist keine direkte Aufgabe der optischen Messtechnik, sondern ist dem Bereich der Sichtprüfung zuzuordnen. Die Laufzeitmessung wird verwendet, um Längenmessungen über weite Distanzen durchzuführen. Hierzu werden Laserimpulse ausgesendet und parallel die Zeit gemessen, die er benötigt, um die Messstrecke zurückzulegen. Die Wirkprinzipien zur optischen Erfassung von geometrischen Parametern wie Länge, Dicke, Form und Lage beruhen hauptsächlich auf den Gesetzen der Strahlenoptik. So lassen sich Interferenz und kohärentes Licht für kleinste Längenmessungen nutzen. Beim Laserinterferometer wird der Laserstrahl nach dem Prinzip des Michelson-Interferometers an einem halbdurchlässigen Spiegel in zwei Strahlenanteile gespalten. Beide Strahlenanteile werden, wie in Abbildung 2.10 dargestellt, an zwei total reflektierenden Reflektoren zum halbdurchlässigen Spiegel zurückgeworfen. An dieser Stelle interferieren die beiden Strahlenanteile je nachdem welchen Weg Δs der bewegliche Spiegel zurückgelegt hat. Die Interferenz wird von einem Fotodetektor wahrgenommen. Bei gleicher Phasenlage der Lichtstrahlen resultiert eine Addition der Wellen, woraus eine Helligkeitszunahme resultiert. Bei einer halben Wellenlänge $\lambda/2$ Phasenverschiebung löschen sich beide Strahlenanteile gegenseitig aus und es trifft kein Licht mehr auf den Fotodetektor. Die

sich periodisch wiederholenden Auslöschungen werden vom Fotodetektor gezählt und anschließend mit der Wellenlänge λ multipliziert, um die zurückgelegte Strecke zu errechnen. [KEFE18, S. 236] Das Prinzip der Triangulation ist ebenfalls in Abbildung 2.10 dargestellt. Eine Längenänderung der Strecke zwischen Sensor und Messobjekt hat zufolge, dass der Laserstrahl unter einem anderen Winkel die Linse durchläuft und resultierend daraus ein anderer Teil des Fotodetektors beleuchtet wird. Diese Änderung spiegelt den zurückgelegten Weg wider. Misst man zusätzlich die Zeit für diesen Weg, so ergibt sich daraus die Geschwindigkeit des Messobjekts. Die Lichtschranke ist eine der einfachsten optischen Messeinrichtungen. Sie setzt sich zusammen aus gegenüberstehendem Sender und Empfänger. Neben einfachen Kontrollaufgaben, wie beispielsweise der Anwesenheit eines Teiles bei Unterbrechung des Laserstrahls, eignet sie sich für den Aufbau inkrementaler Weg- oder Winkelmesssysteme. Die Vorteile optischer Messeinrichtungen liegen vor allem darin, dass sie kontaktlos und verschleißfrei Messungen durchführen können. Desweiteren erzielen sie höhere Messgeschwindigkeiten bei flächenhafter Geometrieerfassung als taktile Sensorik. Messungen von steilen, spiegelnden oder stark gekrümmten Flächen sind grundsätzlich nicht möglich. Anhaftende Flüssigkeitsfilme auf dem Messobjekt und Önebel innerhalb der Maschinen können zu Messfehlern führen, weshalb optische Messeinheiten über Abblasvorrichtungen und Sperrluft innerhalb der Optik verfügen müssen, was wiederum dazu führt, dass zusätzlich zur Signalleitung eine Pneumatikleitung gelegt werden muss. Oft kommt es bei der Werkzeugvermessung innerhalb der Maschine zu Problemen, da die optische Messeinrichtung nicht so platziert werden kann, dass sie vom Werkzeug, beziehungsweise das Werkzeug von ihr, angefahren werden kann. [KEFE18, S. 217]

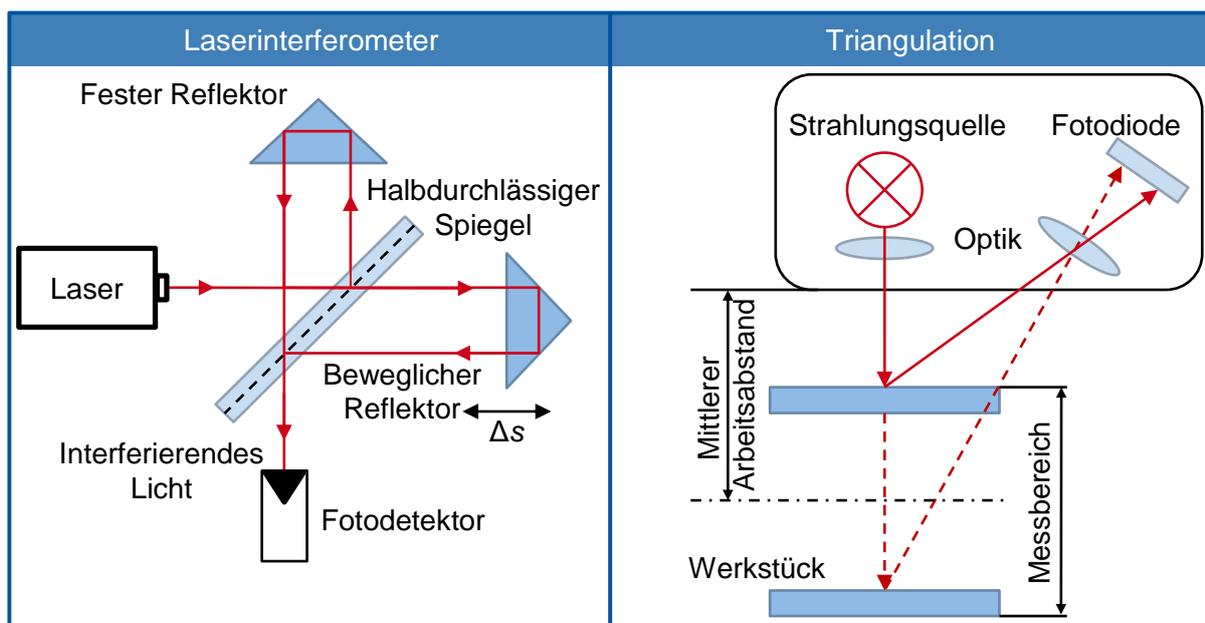


Abbildung 2.10: Messprinzipien zur Längenänderungsbestimmung [PART16, S. 180]

2.2 Fertigung von Zerspanwerkzeugen

Bei Werkzeugen, die bei der spanenden Fertigung eingesetzt werden, differenziert man in zwei Gruppen, die mit geometrisch bestimmter Schneide und die mit geometrisch unbestimmter Schneide, vgl. Abbildung 2.12. Zu den Werkzeugen für das Spanen mit bestimmter Schneide zählen unter anderem Fräswerkzeuge, der Drehmeißel, der Bohrer und Räumwerkzeuge. Des Weiteren unterscheidet man Werkzeuge der Massivbauweise und die Werkzeuge die modular aufgebaut sind. So gibt es bei Fräswerkzeugen jene die aus einem einzigen durchgängigen Material bestehen und im Vergleich dazu die die aus einem Schaft und mehreren Wendescheidplatten zusammengesetzt werden. Im Folgenden wird dargestellt, wie Zerspanwerkzeuge gefertigt werden. Beispielhaft wird die Prozesskette von massiven Fräswerkzeugen beschrieben.

2.2.1 Prozesskette zur Herstellung von Fräsern

Die Herstellung eines Fräasers beginnt mit der Auswahl des pulvermetallurgischen Werkstoffs für das Ausgangsprodukt, dem Rohling, welche von der Art des Einsatzzwecks des endgültigen Werkzeugs abhängt. Rohlinge werden durch Sinterung hergestellt und dabei in eine zylindrische Form gepresst. Die wesentlichen Prozessschritte zur Herstellung von Fräsern aus einem Rohling sind das Schleifen, die Kantenpräparation, die Vorbehandlung der Oberflächen, das Beschichten und die Nachbehandlung. Die in der Abbildung 2.11 gezeigte Prozesskette gilt grundlegend nicht nur für Fräswerkzeuge, sondern auch nahezu alle anderen Zerspanungswerkzeuge mit geometrisch bestimmter Schneide, die aus einem Rohling hergestellt werden. Das Schleifen der hochharten und verschleißfesten Schneidstoffrohlinge ist der wohl kostspieligste Bearbeitungsschritt. Andere Fertigungsverfahren wie die Funkenerosion oder Laserschneiden kommen eher selten vor. Durch eine Vielzahl von System- und Prozesseingangsgrößen sind beim Schleifen unterschiedlichste Geometrien, Abtragungsraten und Oberflächenqualitäten möglich. Die Kantenpräparation hat einen bedeutenden Einfluss auf die Spanbildung mit geometrisch bestimmter Schneide. Dabei gilt, umso scharfkantiger die Schneiden sind, desto niedriger sind die Prozesskräfte und desto besser ist die Oberflächenqualität des Werkstücks. Für weniger anspruchsvolle Zerspanprozesse reichen oftmals die fertig geschliffen Schneidkanten aus. Werden sie weiterbehandelt, so ist zu berücksichtigen, dass die Beschichtung zu einer Erhöhung des Kantenradius führt. Nach der Kantenpräparation werden die Oberflächen und besonders die Randzonen der Werkzeuge behandelt, um eine möglichst gute Beschichtungsgrundlage zu schaffen. Die folgende Beschichtung soll den Werkstoff gegen Verschleiß, Oxidation und Korrosion schützen und so die Standzeit des Werkzeugs verlängern. Es gibt eine Vielzahl von Beschichtungsverfahren, die entweder nur die Gefügestruktur des Grundwerkstoffes ändern oder ein Stoffverbund mit diesem herstellen. Dabei ist besonders auf die physikalischen Eigenschaften, wie zum Beispiel dem Wärmeausdehnungskoeffizienten, der beiden Stoffe zu achten, um ein Abplatzen der Beschichtung zu verhindern. Mit den Verfahren der physikalischen und chemischen Gasphasenabscheidung (PVD, CVD) werden dünnste hochfeste Metallschichten oder Kohlenstoffschichten, synthetischer Diamant, auf das Werkzeug aufgebracht. Die aktuelle Tendenz zeigt, dass sich die

physikalische Gasphasenabscheidung aus Kosten- und Umweltgründen wohl für die meisten Schneidwerkzeuge am besten eignet. Nur bei besonders schwer zugänglichen Oberflächenstrukturen, wie einem Hinterschnitt, weist das CVD Verfahren eine bessere Oberflächenbenetzung auf. Durch die Nachbehandlung der beschichteten Werkzeuge wird eine Optimierung der Spanabfuhr durch Glättung eingestellt [FRIE02, S. 4–8]



Abbildung 2.11: Prozesskette der Herstellung von Fräs Werkzeugen [FRIE02, S. 18]

2.2.2 Werkzeugschleifen

Nach der DIN 8580 werden sechs Hauptgruppen von Fertigungsverfahren unterschieden, dargestellt in der Abbildung 2.12. Das Schleifen gehört zu der dritten Hauptgruppe dem Trennen und der Gruppe des Spanens mit geometrisch unbestimmtem Schneiden und zählt zu den Feinbearbeitungsverfahren. Wegen der hohen Härte, der Verschleißfestigkeit und der fehlenden Duktilität der zu bearbeitenden Werkstoffe wird ihre Bearbeitbarkeit eingeschränkt. Aus diesem Grund werden pulvermetallurgische Schneidstoffe spanend mit geometrisch unbestimmter Schneide und hochharten Schleifmitteln wie Diamant bearbeitet [FRIE02, S. 18]. Bei der Herstellung von Werkzeugen ist die richtige Auswahl von Schleifscheiben wichtig. Unabhängig von der Form und den Abmessungen weisen alle Schleifscheiben den gleichen Aufbau aus Kornwerkstoff, Bindung und Porenraum auf.

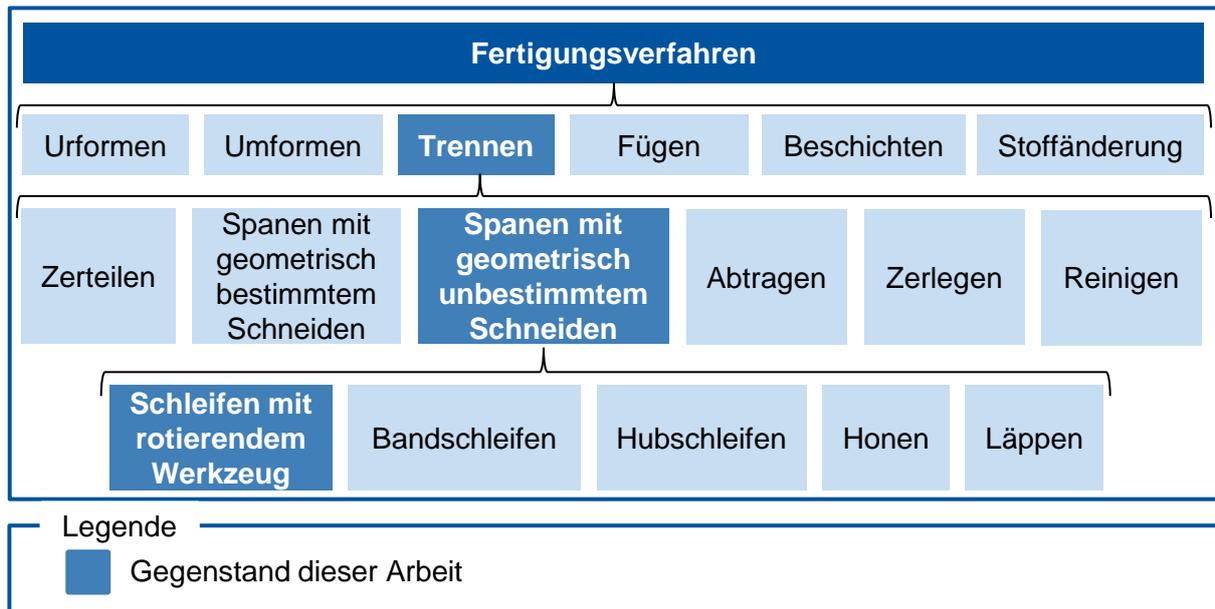


Abbildung 2.12: Schleifen als Fertigungsverfahren nach DIN 8580 [DIN03]

Die Formen, die Bezeichnung und die dazugehörigen Abmessungen sind in der ISO 525 (10) definiert. Ein Beispiel einer konventionellen Schleifscheibenbezeichnung ist in Abbildung 2.13 aufgeführt. Der Kornwerkstoff aus denen die Schleifkörner bestehen ist der Teil der Schleifscheibe, der in den zu schleifenden Werkstoff eingreift. Somit werden folgenden Forderungen an den Kornwerkstoff gestellt. Eine hohe Härte und Zähigkeit, um die Materialzerspanung zu ermöglichen und die Schärfe der Kornschneiden möglichst lange zu halten. Außerdem müssen sie eine hohe thermische und chemische Beständigkeit aufweisen, um sowohl den hohen und stark wechselnden Bearbeitungstemperaturen standzuhalten als auch chemische Reaktionen aus dem Zusammenwirken von Luft, Kühlschmierstoff und Werkstückwerkstoff zu vermeiden. [KLOC17, S. 210]

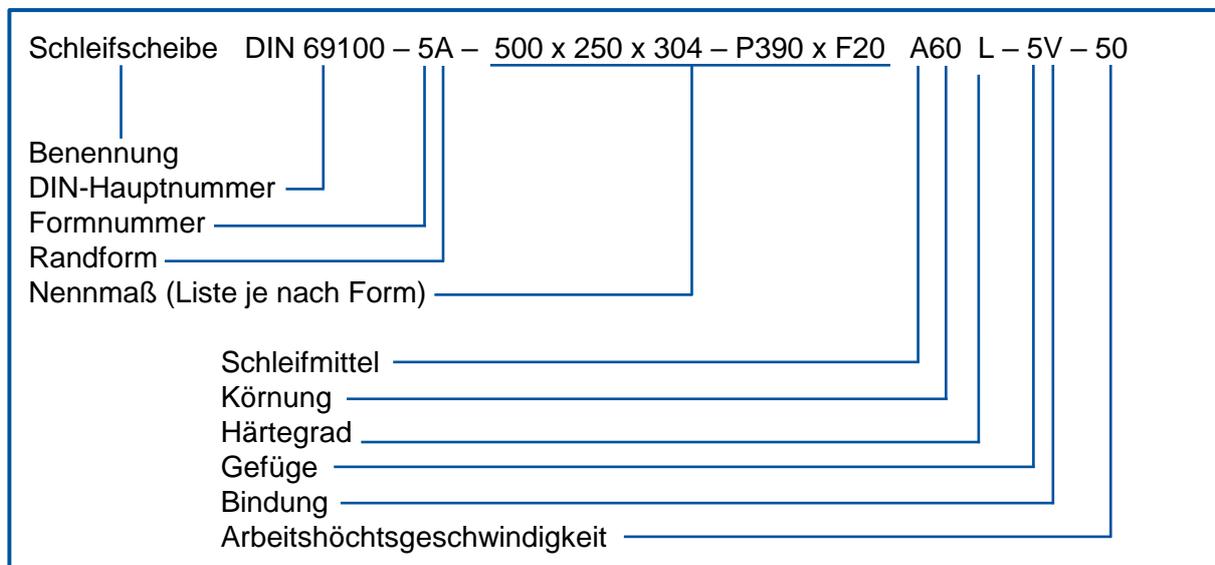


Abbildung 2.13: Zusammensetzung der Schleifscheibenbezeichnung [KLOC17, S. 52]

Je nach Bearbeitungsfall werden abhängige Anforderungen an den Kornwerkstoff gestellt. Da kein Werkstoff allen Anforderungen gleichzeitig gerecht wird, gibt es natürliche und synthetisch hergestellte Kornwerkstoffe. Zu den natürlichen Kornwerkstoffen zählt Quarz, Korund, Schmirgel, Garant und Naturdiamant. Die synthetischen Kornwerkstoffe sind Korund (Al_2O_3), Siliziumkarbid (SiC), kubisches Bornitrid (CBN) und synthetischer Diamant. Durch die gute Reproduzierbarkeit der Kornqualität synthetischer Werkstoffe wurden die natürlichen Kornwerkstoffe in der industriellen Anwendung, mit Ausnahme des Naturdiamanten, nahezu komplett verdrängt. Zum Vergleich der Werkstoffe ist deren Bruchzähigkeit über ihrer Härte in der Abbildung 2.14 zu sehen. Bei allen Schleifscheiben, mit Ausnahme von ungebundenen Schleifmitteln, werden die Körner untereinander und mit der Unterlage verbunden. Dabei bezeichnet man zusammenfassend alle Komponenten als Bindung, außer die Schleifkörner. Die Bindung hat die Aufgabe die Körner so lange zu halten, bis diese abgestumpft sind. Die dadurch resultierenden erhöhten Schneidkräfte eines einzelnen Kornes führen schließlich dazu, dass sie herausbrechen und neue scharfe Schleifkörner in das Werkstück eingreifen können. [DIN15]

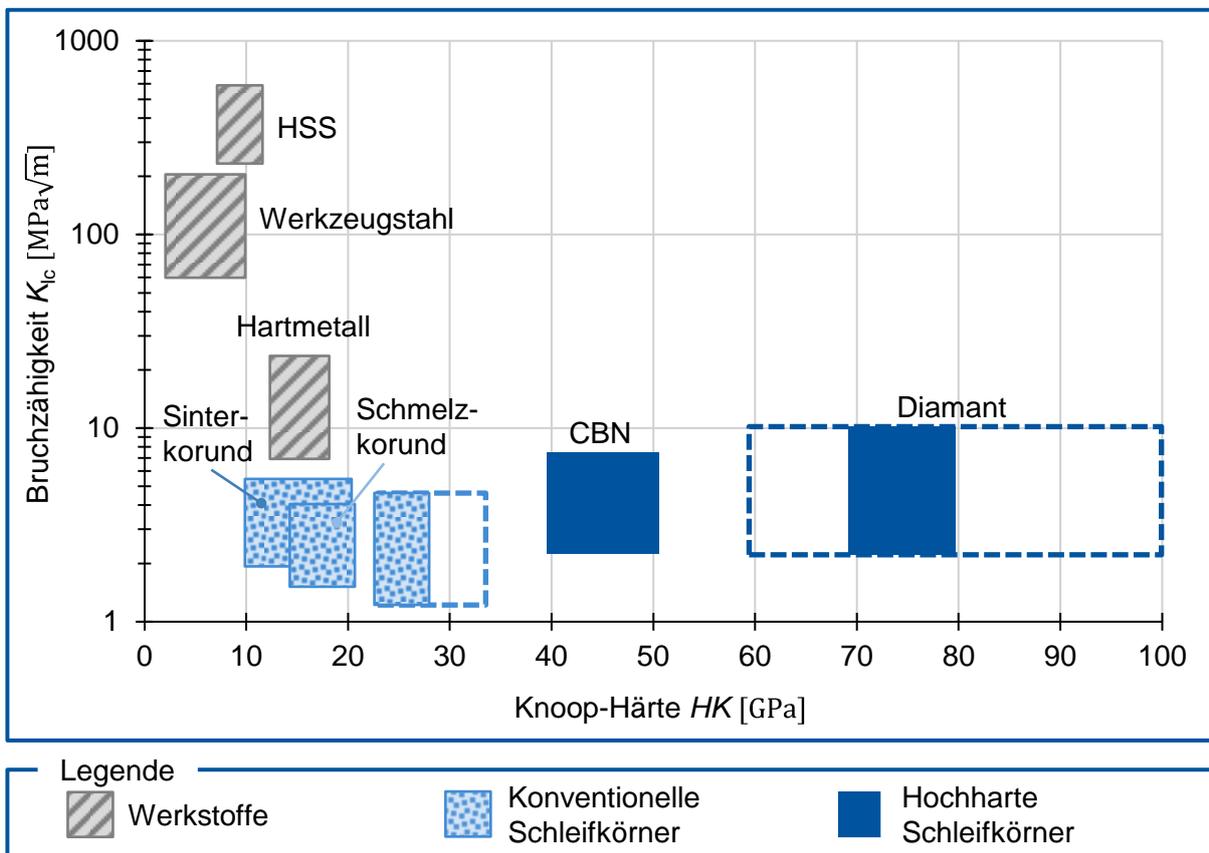


Abbildung 2.14: Bruchzähigkeit über der Härte von Schleifkornwerkstoffen im Vergleich zu Bearbeitungswerkstoffen [KLOC17, S. 24]

Die Eigenschaften der Schleifscheibenbindung lassen sich über die Zusammensetzung der Bindung selbst, über die Volumenanteile der Komponenten Bindung, Korn und Poren, als auch über den Herstellungsprozess einstellen. Man unterteilt die Bindungsarten in drei Hauptgruppen, die Kunstharz-, Metall- und Keramikbindungen. Die Kunstharzbindung besteht trotz der Vielzahl heutiger Werkstoffe meist aus Phenolresol zur Kornbenetzung sowie einem Phenol-Pulverharz auf der Basis von Novolak-Hexamethylentetramin. Sie werden in einem

Trockenmischverfahren hergestellt. Die Härte und Sprödigkeit lassen sich durch Zugabe von Elastomerverbindungen beeinflussen. Kunstharzgebundene Schleifscheiben sind unempfindlich gegen Stoß oder seitlichem Druck, erlauben hohe Umfangsgeschwindigkeiten und Zerspanungsvolumina beim Trenn- oder Schruppschleifen. Außerdem ermöglichen sie eine hohe Oberflächengüte durch ihre Elastizität bei Polier- und Feinschleifarbeiten. Metallgebundene Schleifwerkzeuge weisen im Vergleich zu keramisch- und kunstharzgebundenen Schleifscheiben eine sehr viel bessere Wärmeleitfähigkeit auf. Außerdem haben sie einen hohen Verschleißwiderstand, was jedoch mit der sehr schwierigen Abrichtbarkeit einhergeht. Als Metallbindung wird überwiegend modifizierte Kuper-Zinn- oder Kobalt-Bronze verwendet. Hartmetallbindungen bestehen überwiegend aus Wolfram oder Wolframkarbid. Sie werden meist mit hochharten Schneidstoffen wie CBN oder Diamant bestückt. Schleifscheiben dieser Art bestehen im Gegensatz zu konventionellen Schleifscheiben aus einem Grundkörper und einem darauf aufgetragenen Schleifbelag, der im Verhältnis zum Schleifscheibendurchmesser von geringerer Dicke ist. Keramische Bindungen sind sehr spröde und daher relativ stoßempfindlich. Sie besitzen eine hohe Widerstandsfähigkeit und, bezogen auf ihre Maßhaltigkeit, eine gute Temperaturbeständigkeit, reagieren jedoch empfindlich auf schnelle Temperaturwechsel. Sie werden aus den natürlichen Silikaten roter und weißer Ton, Feldspat, Kaolin, Quarz und als Zusatzmittel Fritten hergestellt. Fritten sind glasartige, bereits vorgeschmolzene und zu Pulver verarbeitete Gemische organischer und anorganischer Art, die als Flussmittel dienen. Über das Mischungsverhältnis werden die gewünschten Eigenschaften eingestellt. So lassen sich zusätzlich die Porengrößen bestimmen. Zuletzt bestimmen die Poren die Eigenschaften der Schleifscheibe. So lässt sich die Schleifscheibenhärte steigern durch eine Minderung der Porengröße. Dies geschieht entweder durch eine Erhöhung des Bindungsvolumens oder durch der Korndichte. Somit geht die Steigerung der Härte des Schleifkörpers meist einher mit der Abnahme seiner Aufnahmefähigkeit für das abgetragene Material. Für konventionelle und CBN Schleifscheiben sind deren Volumenanteile in der Abbildung 2.15 im Gibbschen Dreieck dargestellt. [KLOC17, S. 50]

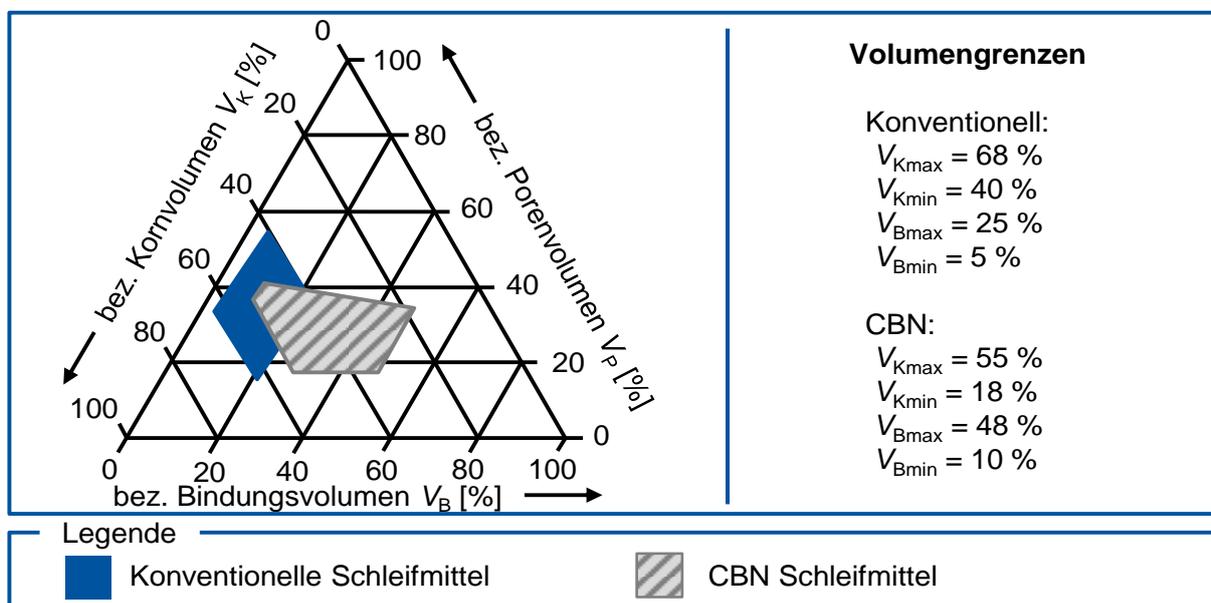


Abbildung 2.15: Volumenanteile von Schleifkörpern, Gibbsches Dreieck [KLOC17, S. 51]

2.3 Ansätze der Prozessüberwachung beim Werkzeugschleifen

In diesem Kapitel sollen mögliche Prozessüberwachungsmethoden, die für das Werkzeugschleifen entwickelt wurden, vorgestellt werden. Für einen Schleifprozess ist die Kenntnis und die Kontrolle der physikalischen Prozessgrößen, wie die der Prozesskräfte oder der Schleiftemperatur entscheidend. Sie hängen jeweils stark von dem gegebenen tribologischen System und der Maschinenkinematik ab. Der Zustand der Schleifscheibe beeinflusst das Schleifergebnis erheblich. Somit ist neben der Prozessüberwachung selbst, die ständige Zustandsbestimmung der Schleifscheibe nötig. Die Simulation von Prozessen hat sich als gutes Werkzeug zur Beurteilung und Optimierung von Schleifprozessen etabliert. Bestätigt wird dies durch die immer weiter steigende Anzahl von Zitaten und Veröffentlichungen zu diesem Thema, siehe Abbildung 2.16. [BRIN06, S. 667]

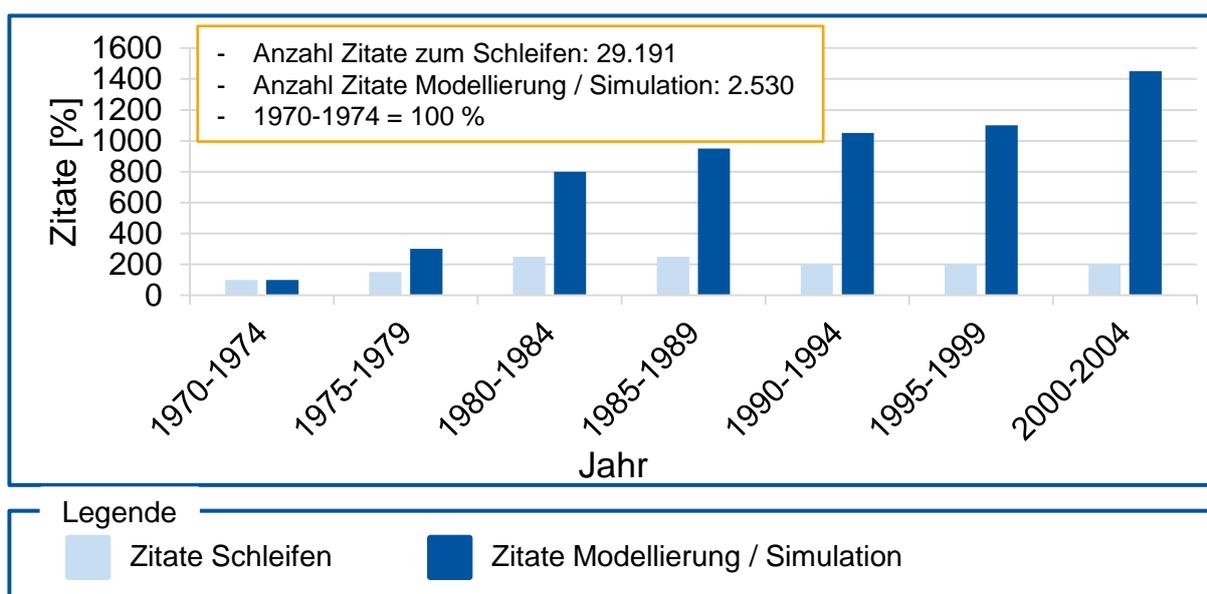


Abbildung 2.16: Entwicklung der Modellierung und Simulation von Schleifprozessen [BRIN06, S. 667]

Um die kausalen Zusammenhänge zu erklären und besser zu verstehen, wurden verschiedene Modellierungen und Simulationen von Schleifprozessen entwickelt. Die Modellierungen sollen den realen Prozess möglichst detailliert widerspiegeln. Dabei sollen mit denselben Prozesseingangsgrößen dieselben Ausgangsgrößen in der Simulation erreicht werden. Einige der entwickelten Modelle seien hier genannt und lassen sich drei Hauptgruppen zuordnen. Erstens die physikalischen Modelle, zweitens den empirischen Modellen mittels Regressionsanalyse und drittens den heuristischen Prozessmodellen. Bei Letzteren wird versucht mit begrenztem Wissen und Zeitknappheit, eine möglichst gute Lösung zu finden, ohne eine quantifizierbare Aussage über die kausalen Zusammenhänge zu treffen.

Die Fundamentalanalyse ist ein analytisches und numerisches Modell. Der Ansatz zielt darauf ab, Vorhersagen zu entwickeln, die sich deduktiv aus grundlegenden physikalischen Zusammenhängen ableiten lassen und ist somit den physikalischen Modellen zuzuordnen. Es werden physikalische Modelle basierend auf dem Wissen über den Schleifprozess und Auswahl von

geeigneten Prozessgrößen entwickelt und versucht mittels mathematischer Formeln auszudrücken. Die Wechselwirkung von Schleifscheibe, genauer dem Schleifkorn, und dem Werkstück ist dabei entscheidend. Diese bestimmt maßgebend den Materialabtrag und hängt von den tribologischen Eigenschaften des Systems ab. Die komplexen Zusammenhänge zwischen der Topographie der Schleifscheibe, der Maschinenkinematik und dem Werkstück fließen in diese Modellbildung mit ein. [BRIN06, S. 668–671]

Bei dem kinematischen Modell Dreidimensionale betrachtet man den Schleifprozesses auf Grundlage der geometrischen Lage von Werkstück und dem Werkzeug beziehungsweise der Schleifscheibe. Diese wird mittels Scan-Verfahren real abgebildet und im Anschluss ein dreidimensionales Modell erzeugt. Auf der Grundlage statistischer Analysen wird eine Oberflächentopographie erzeugt. Darin fließen Mittelwerte und Verteilung der Korngrößen, Kornabstände und Kornüberstandhöhen ein. Für die Verteilung solcher Modellkörner auf der Scheibenoberfläche werde Zufallsverteilungen verwendet. Bei kinematischen Modellen wird von einem idealen tribologischen Eingriff der Schleifscheibe im Werkstück ausgegangen. Der Verschleiß einer Scheibe sowie das Materialverhalten bei Hochgeschwindigkeits-Zerspanprozessen werden nicht berücksichtigt. Somit ist eine genau Vorhersage von Schleifkräften und Spindelleistung nicht möglich. Eine Temperatursimulation in der Kontaktzone kann nicht durchgeführt werden, womit thermische Schäden an Werkzeug- und Werkstückoberfläche nur schwer prognostizierbar sind. Ebenfalls als ideal angenommen wird die Maschinensteifigkeit, als auch Schwingungen werden vernachlässigt, jedoch beeinflussen schon kleinste Verformungen der Maschine den Schleifprozess und das Ergebnis. [BRIN06, S. 672–674]

Das Finite Elemente Modell (FEM) beruht auf numerischen Methoden. Sowohl die Finite Differences Method (FDM) also auch die Finite Element Analysis (FEA) versucht die Prozesse mit endlichen Elementen möglichst real abzubilden. Diese finiten Elemente werden durch Knoten begrenzt, die wiederum in einer Gitterstruktur zusammengefasst, das Bauteil widerspiegeln. Die Modelle und deren Anwendung hängen vom Prozess und dem Untersuchungsobjekt ab. Die FEA eignet sich auch zur Bestimmung der durch die Schleifprozesse verursachten thermischen Einflüsse auf den Werkstoff. Sie trägt so zu einem besseren Verständnis des Schleifprozesses in der Kontaktzone bei und hilft komplexe Versuchsergebnisse zu analysieren. Die Nachteile sind, dass, komplexe Geometrien abzubilden, sehr aufwendig ist und das Gitter nur als gesamte Struktur verfeinert werden kann. [BRIN06, S. 675–678]

Die Artificial Neural Networks Modelle (ANN) sind ein Teilgebiet der Artificial Intelligence (AI). Sie zeichnen sich durch mehrere Eigenschaften aus, die sie für die Modellierung komplexer und nicht stationärer Prozesse qualifizieren. Das ANN Modell wird automatisch auf der Grundlage von gesammelten Prozessdaten trainiert. Sie können die Informationen mehrerer Sensortypen gleichzeitig aufnehmen und zu einem gemeinsamen Ergebnis verarbeiten. ANN wird sowohl beim Rundschleifen als auch beim Flachsleifen eingesetzt. Mit ihrer Hilfe können Vorhersagen von Ausgangsparametern beim Schleifen getroffen werden, wie zum Beispiel die Oberflächenrauheit oder Schleifkräfte. Rückwirkend lassen sich so passende Eingangsparameter ermitteln. Zum Beispiel können Schleifbrand oder Rattern dadurch deutlich verringert oder ganz vermieden werden. Der nächste Schritt könnte sein die verschiedenen Modelle zu

kombinieren und die Vorteile jedes Ansatzes zu nutzen. Somit könnte eine detailliertere Vorhersage zum Materialverhalten, der Verformung und der Wechselwirkung von Werkzeug und Werkstück während des Schleifprozesses getroffen werden. [BRIN06, S. 682–684] Eine erfolgreiche Anwendung dieser Modelle hängt maßgeblich von der Auswahl repräsentativer Signale, der geeigneten Signalvorverarbeitung und entsprechender Merkmalauswahl für die Datenbasis ab. Grundlegend sind die in der Abbildung 2.17 aufgelisteten messbaren Signale und Größen. Bei der Sensormontage ist grundlegend darauf zu achten, dass sie möglichst nah am Ursprung des zu messenden Signals zu montieren werden, um die bestmöglichen Messergebnisse zu erzielen. [TÖNS02, S. 551]

Messbare Signale	
Prozesssignale	Ausgangsgrößen
<ul style="list-style-type: none"> - Spindelleistung - Prozesskräfte - Temperatur - Schallemission (AE) - Vibrationen - Schleifscheiben Topographie 	<ul style="list-style-type: none"> - Abmessungen, Form - Microgeometrie - Oberflächenintegrität - Scheibenverschleiß - Kühlmittleigenschaften

Abbildung 2.17: Relevante Signale und Messgrößen beim Schleifprozess [TÖNS02, S. 552]

Zur Bestimmung der Spindelleistung werden Stromsensoren beruhend auf dem Hall-Effekt immer häufiger verwendet. [KLOC17, S. 425] Diese werden an den Stromleitungen je Phase des Spindelmotors montiert. Die gemessene Wirkleistung stehen im direkten Zusammenhang zur Leistungsaufnahme der Spindel und spiegelt so das abgegebene Drehmoment auf der Spindelachse wider. Das Drehmoment resultiert aus der durch den Eingriff entstehenden Tangentialkraft am Schleifscheibenumfang und dem Schleifscheibenradius. Die Leistung ist nach der Formel (2-8) definiert. Die Wirkleistungssensoren haben im Vergleich zu einigen anderen Sensoren den Vorteil, dass sie driftfrei messen und so sowohl für dynamische als aber auch statische Fälle einsetzbar sind.

$$\text{Wirkleistung} \quad P = \sqrt{3} * U * I * \cos \varphi \quad (2-8)$$

In der Schleiftechnik werden hauptsächlich zwei Arten der Kraftsensoren eingesetzt. Die etwas teurere Variante auf der piezoelektrischen Basis wird in der Praxis nicht häufig verwendet. Deswegen werden zunehmend mehrere Einkomponenten-Quarze in Kraftmessplatten oder -ringen verbaut, welche im Kraftfluss der Maschinenkinematik montiert werden. Jedoch ist eine direkte Zuordnung der Prozesskräfte nicht trivial und eine deduktive Rückführung auf den Verschleiß der Schleifscheibe sehr aufwendig bis nahezu unmöglich. Außerdem stellt die Driftkompensation nach wie vor ein großes Problem da, weshalb die Werkzeugmaschinen entweder mehrere Stunden warmlaufen müssen oder die Umgebungsbedingungen in klimatisierten Räumen konstant gehalten wird. Letztes wird nur für Feinbearbeitungen umgesetzt, da zusätzliche Kosten anfallen. Neben der piezoelektrischen Kraftmessung können DMS zur Aufnahme der Prozesskräfte verwendet werden. Hierbei ist ebenfalls zu erwähnen, dass der Montage-

und Messort individuell für die jeweilige Werkzeugmaschine bestimmt werden muss. Dies geht oft mit einer aufwendigen Analyse der Maschinenkinematik einher. Wie auch schon die Wirkleistungsmessgeräte, können Kraftmesssensoren dieser Bauarten an bestehenden Maschinen nachgerüstet werden. [KLOC17, S. 423]

Schallemissionssensoren, auch AE-Sensoren (Acoustic Emission) genannt, nehmen den vom Prozess emittierten Schall auf. Sie müssen individuell auf das System eingestellt werden, um nicht prozessrelevante Schwingungen zu filtern. Die jeweiligen Frequenzbereiche können gedämpft oder verstärkt werden. Dabei sollte auch die Eigenresonanz der Sensor konstruktion beachtet werden. Ein Vorteil der Schallsensoren ist die flexible Montage und der Einsatzort. Sie können unmittelbar an der rotierenden Schleifscheibe oder dem Werkstück den Schall aufnehmen. Eine indirekte Schallübertragung ist über den Kühlschmierstoffstrahl möglich. Somit kann der Prozessschall direkt im Eingriffspunkt gemessen werden und andere Störquellen, die nicht direkt vom Prozess selbst emittiert werden, mittels der Montagekonstruktion reduziert werden. Mögliche Störquellen und ihr Frequenzbereich sind in der Abbildung 2.18 aufgelistet. [KLOC17, S. 427]

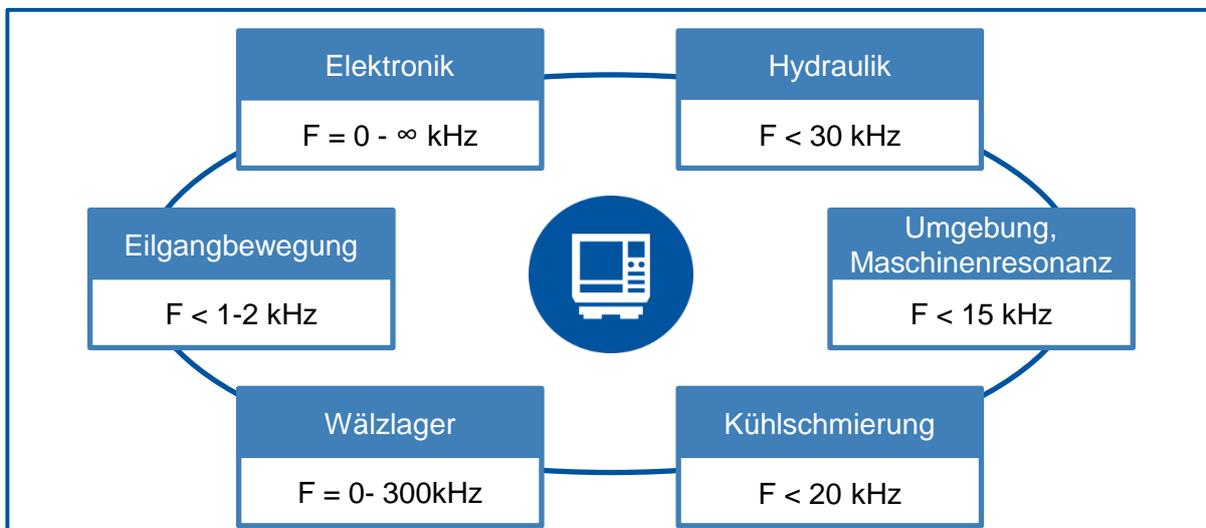


Abbildung 2.18: Störquellen der Maschinen und ihre Frequenzbereiche [KLOC17, S. 428]

3 Problemstellung und Zielsetzung

Da Schleifprozesse komplex sind und eine große Anzahl von Parametern aufweisen, ist eine exakte Prozessanalyse des Schleifprozesses zur Vorhersage der resultierenden Produktqualität schwierig. Bei der Implementierung eines Überwachungssystems ist darauf zu achten, welche Messsignale oder Messgrößen geeignet sind den Schleifprozess zu überwachen und welcher Sensor diese aufnehmen kann. Der verwendete Sensor soll in der Lage sein, unerwartete Fehlfunktionen des Prozesses rechtzeitig zu erkennen, um Folgeschäden zu vermeiden. In der industriellen Praxis ist die Akzeptanz solcher Prozessüberwachungssysteme jedoch bislang gering, da das dynamische und stochastische Verhalten des Schleifprozesses immer wieder zu Fehlalarmen des Systems führt. Außerdem resultiert unzureichendes Wissen über die Korrelationen von Prozesseingangs-, Prozesszustands- und Prozessergebnisgrößen beim Schleifen von Wolframcarbid-Kobalt-Hartmetallen in Nachbearbeitungen des Werkstücks. Nachbearbeitungen sind kosten- und zeitintensiv. Die durch die Messung gesammelten Informationen sollen helfen, den Prozess zu optimieren und die Prozesseingangsgrößen anzupassen, um Nachbearbeitungen zu senken. Die wesentliche Prozesseingangsgrößen sind die Art des Schleifverfahrens, die zu verwendende Schleifscheibe und das Material des zu schleifenden Werkstücks. Die zu erreichende Qualität des Werkstücks und die Prozesseingangsgrößen des Schleifprozesses müssen bei der Auswahl des Prozessüberwachungssystems berücksichtigt werden. Die verwendete Schleifmaschine und ihre Maschinenumgebung sind ebenfalls zu nennen. Je nach Schleifverfahren sind unterschiedliche Prozesskinematiken zu betrachten. Im Gegensatz zum Plan- oder Rundschleifen, welche meist nur zwei Achsen aufweisen, werden beim Werkzeugschleifen fünf Achsen berücksichtigt. Diese Betrachtung kann jedoch vereinfacht werden, wenn das Sensorsystem direkt auf der Spindelachse beziehungsweise Werkstückhalterachse montiert wird. Dadurch bleiben die resultierenden Kräfte immer an dieselbe Ursache geknüpft, unabhängig von der relativen Achsenbewegung. Die Schleifprozessparameter beeinflussen das Messergebnis am meisten. Die Zustellung a_e , die Vorschubgeschwindigkeit v_f und die Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit v_s werden vom Maschinenbedienenden angepasst und bewirken Änderungen der Prozessgrößen. Sie dienen jedoch nur als indirektes Hilfsmittel, um eine Identifikation der kausalen Zusammenhänge zu analysieren. Daraus werden Ableitung zur Bewertung der Prozessergebnisse eines Werkstücks ermittelt. Mithilfe des Prozessüberwachungssystems spike von der pro-micron GmbH wird der Werkzeugschleifprozess aufgezeichnet. Das Ziel dieser Arbeit ist, Interpretationsansätze zu finden, die den Zustand der Schleifscheibe erklären und Rückschlüsse auf die Qualität der geschliffenen Werkstücke geben. Damit sollen Nachbearbeitungen und weitere Qualitätskontrollen reduziert werden, jedoch ohne Qualitätsverluste beim Produkt selbst. Die Standzeiten der Maschinen sollen erhöht und die Maschinenkosten gesenkt werden. Davon lassen sich Zeit- und Kostensenkungen ableiten. Dem entgegen steht der Mehraufwand durch die Installation des Überwachungssystems. Dennoch sollte es eine Amortisierung durch die Produktion in großen Mengen geben. Die Festlegung dieses Break-even-Points bedarf jedoch weiterer Untersuchungen, muss individuell auf das Werkstück bezogen werden und ist nicht Teil dieser Arbeit.

4 Versuchsaufbau und Versuchsmethodik

Die Hauptkomponenten des Aufbaus sind die Werkzeugschleifmaschine HELITRONIC VISION 400 L der Walter Maschinenbau GmbH und die sensorische Messeinrichtung spike der pro-micron GmbH. Die Messeinrichtung besteht aus den zwei Sensoren, den spikes, den dazugehörigen Empfangseinheiten und zwei Rechnern mit der entsprechenden Software. In der Abbildung 4.1 ist der Gesamtaufbau zu sehen und grob erläutert. Neben der Werkzeugmaschine und der Messeinrichtung sind die verwendete Schleifscheibe und die Hartmetallrohlinge entscheidend für den Versuch. Die Schleifscheibe ist eine metallisch gebunden Diamantscheibe und durch den Schleifmittelhersteller Tyrolit bereitgestellt worden. Für den Versuch werden 74 Wolframcarbidge-Kobalt-Hartmetallrohlinge bereitgestellt. In der Abbildung 4.2 sind die Versuchsmaterialien und ihre genauen Spezifikationen aufgelistet. In den folgenden Kapiteln wird im Detail auf die Schleifmaschine und die Messeinrichtung eingegangen. Anschließend wird die Versuchsmethodik erläutert.

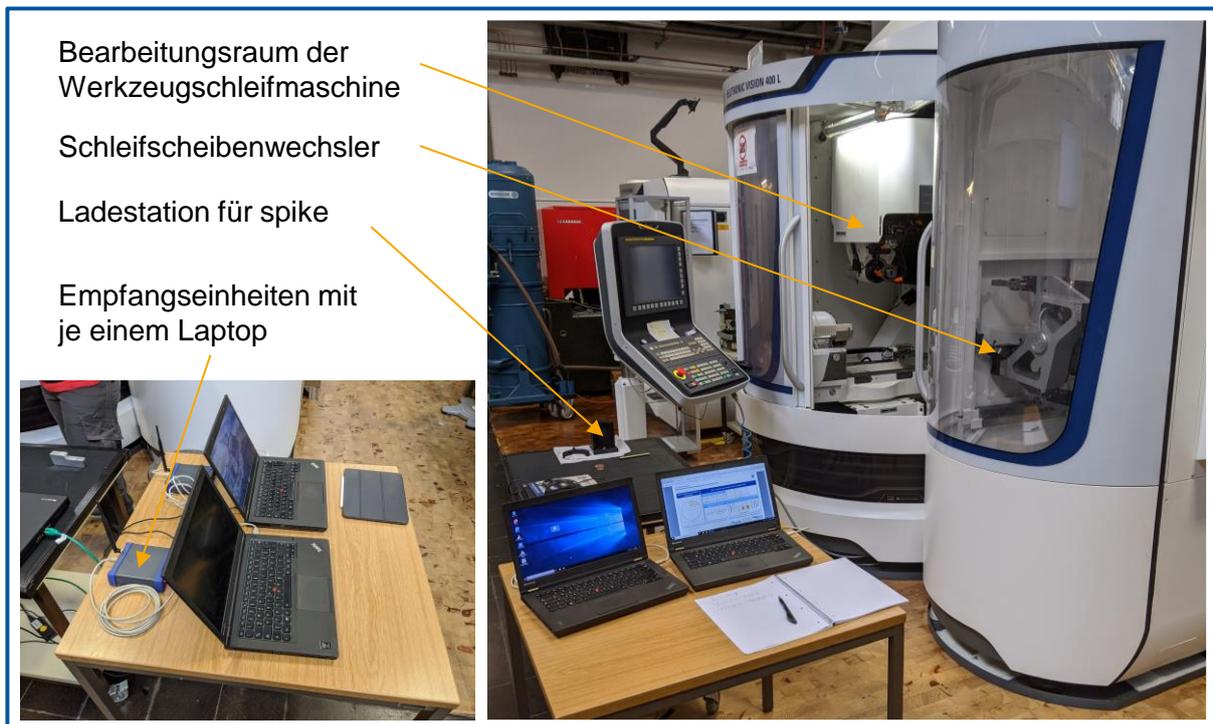


Abbildung 4.1: Versuchsaufbau, Werkzeugschleifmaschine und Messeinrichtung

Schleifscheibe	Hartmetallrohlinge
 <p>Bezeichnung: 1A1 D54-3-MXPP</p> <p>Kornwerkstoff und Bindung: Metallisch gebundener Diamant</p> <p>Mittler Korngröße: $d_k = 54 \mu\text{m}$</p> <p>Außendurchmesser $d_s = 100 \text{ mm}$</p> <p>Breite des Schleifbelags: $b_s = 15 \text{ mm}$</p>	<p>Hartmetallspezifikation: EMT 210</p> <p>Zusammensetzung des Hartmetalls: Kobaltanteil $x_{\text{Co}} = 10 \%$ Wolframkarbidanteil $x_{\text{WC}} = 89 \%$</p> <p>Mittler Korngröße des Wolframkarbids: $d_{\text{WC}} = 0,8 \mu\text{m}$</p> <p>Geometrie der Rohlinge: Durchmesser $d_w = 10 \text{ mm}$ Länge $l_{w,1} = 110 \text{ mm}$ (75 Stk.) $l_{w,2} = 165 \text{ mm}$ (16 Stk.)</p>

Abbildung 4.2: Versuchsmaterialien

4.1 Werkzeugschleifmaschine

Die Schleifmaschine HELITRONIC VISION 400 L von der Walter Maschinenbau GmbH ist eine 5-Achsen CNC Werkzeugschleifmaschine. Damit ist sie neben ihrer Hauptaufgabe, die Produktion von rotationssymmetrischen Werkzeugen, auch für das Schleifen komplexer Geometrien und das Nachschärfen von Werkzeugen konstruiert. Als Werkstoffe können Hartmetalle, Hochleistungsschnellschnittstahl (HSS), Keramik, Zement und kubisches Bornitrid (CBN) bearbeitet werden. Produziert werden können Werkstücke mit einer maximalen Bearbeitungslänge von 420 mm, einem Durchmesser von 3 mm bis 325 mm und einem maximalen Stückgewicht von 50 kg. Ein Umspannen der Werkstücke ist oftmals nicht nötig. Optional kann durch einen Ladesystem der Prozess des Be- und Entladen der Werkstückaufnahme automatisiert werden, was jedoch in dem uns vorliegenden Fall nicht installiert war. Das Gesamtgewicht der Maschine beträgt 7000kg. Das Maschinenbett ist aus Mineralguss gefertigt und in Portalbauweise konstruiert. Dies soll eine schwingungsarme Bearbeitung ermöglichen und so ein gute Oberflächengüte gewährleisten. Das 5-Achsen CNC System wird realisiert durch die drei Linearachsen X, Y und Z mit Linearantrieben und die zwei Drehachsen A und C mit Torquemotoren. Die A-Achse dient der Werkstückaufnahme. An der C-Achse ist die direktangetriebene Motorspindel montiert. Sie verfügt über eine Spitzenleistung von 33 kW und eine maximale Drehzahl von 10500 min^{-1} . Über das Spannsystem Hohlschaftkegel 50 (HSK 50) können Schleifscheiben, die auf einer Werkzeugaufnahme ISO 50 aufgespannt sind, mit einem maximalen Schleifscheibendurchmesser von 254 mm eingesetzt werden. Optional können verschiedene Schleifscheibenwechsler modular an der Maschine montiert werden. In diesem Fall wird dieser nicht verwendet, da nur eine einzige Schleifscheibe für die gesamte Versuchsreihe zum Einsatz kommt. Bei langen und dünnen Werkstücken kann eine Lünette oder Reitstock verwendet werden, um Verbiegung vorzubeugen und vergleichbare Prozesskräfte zu realisieren. Die Maschine verfügt über ein automatisiertes Kalibrierungssystem der Maschinenreferenz. Ein Tastsystem misst die relativen Abstände von Spindel zu Werkstückhalter an einer Kalibrierkugel und hinterlegt diese in der Maschinensteuerung. Der Taster MP250 von Renishaw plc ist am Spindelgehäuse montiert. Des Weiteren wird er für die Ermittlung der Ausspannlänge des Werkstücks genutzt und macht eine Korrektur durch den Bediener

unnötig. Die CNC Steuerungstechnik der Werkzeugmaschine ist von FANUC. Das Werkstückdesign, die entsprechende Programmierung, die Simulation des Prozesses und schlussendlich die Produktion werden über die CAD/CAM Software HELITRONIC TOOL STUDIO von Walter gesteuert. Als Kühlschmierstoff (KSS) wurde ein Schleiföl der Blaser Swisslube GmbH verwendet. Der Durchflussstrom der KSS-Anlage beträgt konstante 90 Liter pro Minute.

4.2 Sensorischer Werkzeughalter

Die verwendete messtechnische Einrichtung von pro-micron ist dafür konzipiert Kräfte und Momente während eines Bearbeitungsprozesses aufzuzeichnen und diese zu analysieren. Die Haupteinsatzbereiche des Systems sind Zerspanungsprozesse wie das Fräsen, Bohren, Senken, Gewinden, Drehen und Schleifen. Der eigentliche Sensor, der spike ist ein Werkzeughalter mit integrierten Dehnungsmessstreifen. Es sind drei unterschiedliche Kräfte und Momente messbar, die Axialkraft, das Biegemoment und das Torsionsmoment. Die Axialkraft F_a ist in Richtung der Rotationsachse der Spindel gerichtet. Das Biegemoment M_b ist bei einem rotierenden Werkzeug das resultierende Moment aus mindestens zwei Vektoren und einem Hebelarm. Die am Umfang der Schleifscheibe angreifende Tangentialkraft resultiert in einem Torsionsmoment M_t auf der Spindelachse. Neben den Kräften und Momenten wird die Temperatur des Werkzeughalters aufgezeichnet. Die Abbildung 4.4 dient dem Überblick der messbaren Kräfte und Momente mit dem spike. Der spike verfügt über einen integrierten wiederaufladbaren Lithium-Polymer Akku und sollte nach jeder Messreihe täglich geladen werden, da die Ladeleistung sehr gering ist und einige Stunden in Anspruch nimmt. Die Messdaten werden zwischen dem spike und der Empfangseinheit (READ) drahtlos übertragen. Die Abtastrate f_{ab} beträgt 2,5 kHz und das Übertragungsprotokoll ist nach dem Standard IEEE 802.15.4 definiert. Die Empfangseinheit wiederum ist per USB-Schnittstelle mit dem Computer verbunden. Über die Computersoftware spike Tool Measurement 2016 SP3 von pro-micron werden die Messwerte dokumentiert und in einer weiteren Software, Tool Analyser von pro-micron, zur weiteren Analyse visualisiert. Die Abbildung 4.3 skizziert die Messkette des Messsystems mit seinen Schnittstellen und stellt die Peripherie des Messsystems dar. Der gesamte Versuchsaufbau umfasst zwei der beschriebenen Messsysteme. Ein spike wird in der Werkstückaufnahme und ein Weiterer in der Werkzeugaufnahme installiert. Jede Empfangseinheit benötigt zum jetzigen Zeitpunkt einen separaten Messrechner zur Visualisierung der Messung.



Abbildung 4.3: Messkette der Komponenten des Messsystems von pro-micron

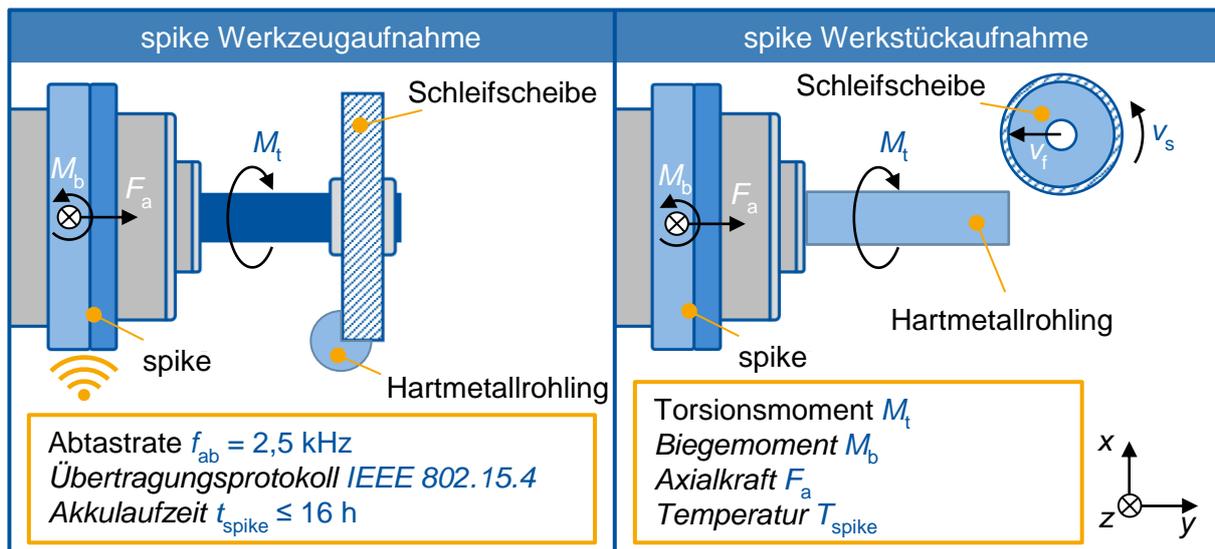


Abbildung 4.4: Schematische Darstellung der angreifenden Kräfte und Momente

4.3 Versuchsmethodik

Aufgabe des Versuchs ist die Überprüfung der Annahme, dass sich die Prozesskräfte einer Werkzeugschleifmaschine in den Messergebnissen identifizieren lassen. Dabei soll der kausale Zusammenhang von Ursache und Wirkung untersucht werden, ob bestimmte Prozessänderungen einen Einfluss auf die Messergebnisse haben und sich diese quantifizieren lassen. Mittels dem sensorischen Werkzeughalter spike von pro-micron werden die Prozesskräfte beim Schleifen von Nuten aufgezeichnet und im Anschluss analysiert. Um vergleichbare Messergebnisse zu erzeugen, müssen möglichst wenige Parameter verändert werden. Somit können die gemessenen Kräfte den potentiell zugehörigen Parametern leichter zugeordnet werden und mögliche Zusammenhänge identifiziert werden. Irritative Messungen des selben Schleifprogramms mit Änderung einzelner Prozessparameter sollen dies ermöglichen. Hierzu werden einfache Nuten in WC-Co Hartmetallrohlingen geschliffen. Die einstellbaren Parameter, die untersucht werden, sind die Zustellung a_e , die Vorschubgeschwindigkeit v_f und die Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit v_s . Die Eingriffslänge für jede Nut l_n beträgt für die gesamte Versuchsreihe 35 mm. Die Eingriffsbreite a_p des Rohlings mit dem Durchmesser d_w variiert mit der Zustellung a_e und berechnet sich nach folgender Formel (4-1).

$$\text{Eingriffsbreite} \quad a_p = \sqrt{(d_w * a_e) - a_e^2} \quad (4-1)$$

Die Nutengeometrie ist als Querschnitt in der Abbildung 4.5 skizziert. Die Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit ist direkt proportional an die Drehzahl der Spindel gebunden. Für den Versuch sollen je Parameter drei unterschiedliche Werte verwendet werden und mit jeweils den anderen beiden Parametern kombiniert werden. Für die Zustellung sollen die Werte $a_e = [3,4,5] \text{ mm}$ verwendet werden, für die Vorschubgeschwindigkeit $v_f = [80,100,120] \text{ mm/min}$ und für die Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit $v_s = [16,18,20] \text{ m/s}$. Daraus ergeben sich in der ersten Versuchsreihe mit

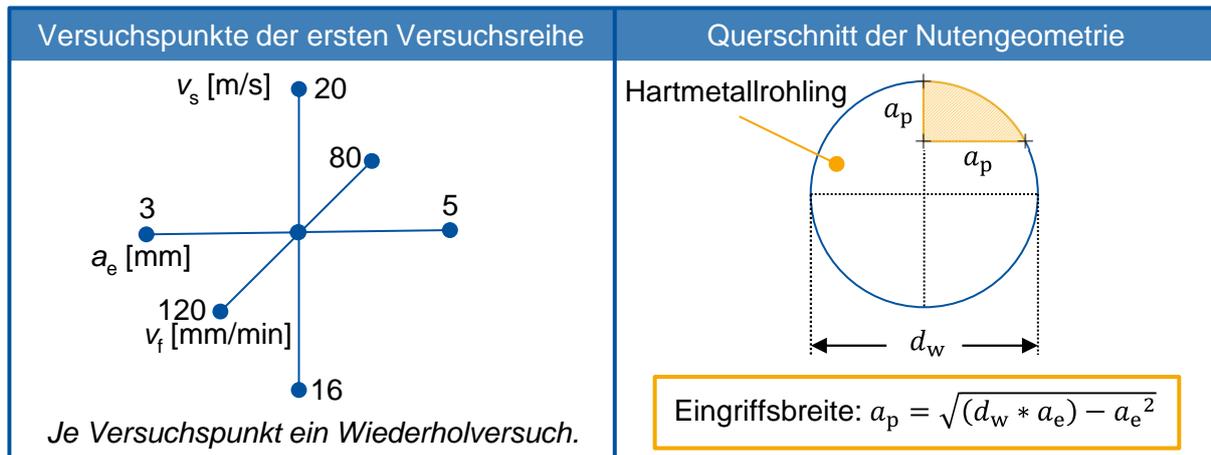


Abbildung 4.5: Versuchspunkte der ersten Versuchsreihe, Nutengeometrie

diesen Parametern $3^3 = 27$ durchzuführende Messungen, dargestellt in der Abbildung 4.5. Zusätzlich zu jedem Versuch, soll mit den selben Parametern derselbe Versuch wiederholt werden, um mögliche Messunsicherheiten vorzubeugen. Hierzu wird der Rohling jeweils um 180° in der A-Achse gedreht, um eine zweite Nut in denselben Rohling zu schleifen. Nach der ersten Versuchsreihe soll eine Weitere mit gleichbleibenden Parametern ($a_e = 5$ mm; $v_f = 100$ mm/min; $v_c = 20$ m/s) durchgeführt werden, um den Verschleiß der Schleifscheibe besser identifizieren zu können. Aufgrund der gleichbleibenden Parameter soll gezeigt werden, dass sich der Verschleiß in den Messdaten widerspiegelt. Für alle Versuchsreihen wird eine einzige Schleifscheibe verwendet. Diese wird zu Beginn des Versuchs auf dem Werkzeughalter des spike Sensors montiert und mit der Auswuchtmaschine Tool Dynamic 2009 von der Haimer GmbH gewuchtet. Dabei werden Gewindestifte unterschiedlicher Größe beziehungsweise Gewicht im Auswuchtring am äußersten Ende des Werkzeugdorns verschraubt.

Nach den Messungen der einzelnen Schleifprozesse werden die Werkstücke und das Werkzeug anhand von Bewertungsgrößen begutachtet. Hierzu wird der Verschleiß der Schleifscheibe nach jedem Schleifversuch dokumentiert. Dabfür taucht die Schleifscheibe mit ihrem Profil senkrecht in ein Verschleißplättchen ein und erzeugt ein Negativ des Schleifscheibenprofils. Das Verschleißplättchen wird aus einseitig kupferbeschichteten Leiterplatten zugeschnitten. Das Negativprofil wird im Anschluss mit einem Konturenmessgerät, MarSurf PCV von der Mahr GmbH, abgetastet und anhand des Radialverschleiß Δr_s und Kantenverschleiß Δr_k analysiert. Die Schleifscheibenoberfläche ohne Verschleiß dient als Referenz bei der Messung des Radialverschleißes. Innerhalb der Software von Mahr wird jeweils eine Tangente an die Oberfläche mit Verschleiß und die Oberfläche ohne Verschleiß gelegt. Der Abstand dieser parallelen Tangenten quantifiziert den Radialverschleiß Δr_s . Um den Kantenverschleiß Δr_k zu bestimmen, wird innerhalb der Mahr-Software ein Kreis gezeichnet, der den Radius der Kante r_k bestmöglich abbildet. Der Radius der Kante ändert sich dynamisch und bildet kein kreisrundes Negativprofil. Dies erschwert die Messung des Radius. Zuletzt wird die Oberflächenqualität der geschliffenen Nuten begutachtet. Mit einem Rauheitsmessgerät, hommel-etamic nanoscan 855 von der Jenoptik AG, werden der arithmetische Mittenrauwert Ra , die reduzierte Spitzenhöhe Rpk und die reduzierte Talhöhe Rvk durch drei iterative Messungen je Rohling ermittelt. Die Abbildung 4.6

veranschaulicht die zwei zuletzt genannten Messmethoden zur Bestimmung der werkstückseitigen und werkzeugseitigen Bewertungsgrößen.

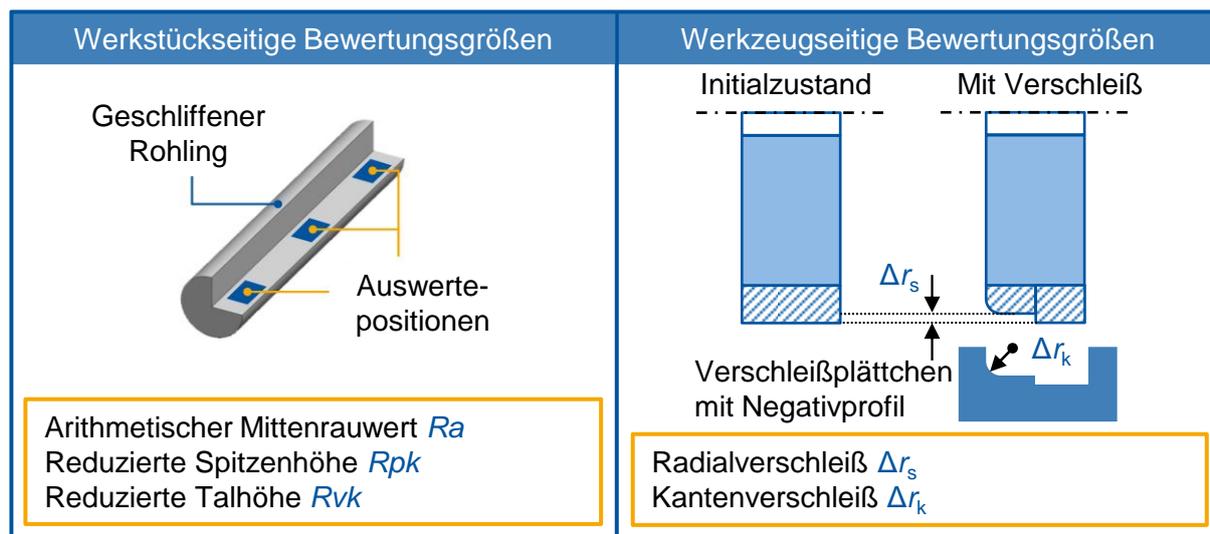


Abbildung 4.6: Bewertungsgrößen an Werkstück und Werkzeug

4.4 Ablauf einer Messung

Zur Veranschaulichung sind die einzelnen Schritte der Messung eines Versuchspunktes stichpunktartig aufgelistet:

- 1) Rohling im Spannfutter der A-Achse einsetzen
- 2) Parameter des Versuchspunktes in der Maschinensteuerung eintragen
- 3) Aufzeichnung am Computer vorbereiten
 - a. Neue Datei erstellen
 - b. Parameter des Versuchspunktes eintragen
 - c. spike kalibrieren
- 4) Ausspannlänge des Rohlings wird von Messtaster aufgenommen und in der Maschinensteuerung hinterlegt
- 5) Werkstückseitiger spike durch einen leichten Schlag mit metallischem Gegenstand aktivieren
- 6) Schleifprogramm starten, KSS an
- 7) Werkzeugseitiger spike wird durch die Rotation der Spindel aktiviert
- 8) Messaufzeichnung an beiden Rechnern manuell starten
- 9) Aufzeichnung des Schleifprozesses
- 10) Programmablauf abwarten, KSS aus
- 11) Aufzeichnung an beiden Rechnern manuell stoppen
- 12) Programm für den Profilabdruck im Verschleißplättchen nach jedem Versuchspunkt
- 13) Programm zum Schärfen der Schleifscheibe alle vier Versuchspunkte

4.5 Software: spike Tool Analyser

Neben der Software spike Tool Measurement zum Aufzeichnen einer Messung, können die Messerwerte mit einer zweiten Software spike Tool Analyser auf dem Rechner ausgewertet werden. Die Messwerte für den Zug/Druck, die Torsion und das Biegemoment werden über der Zeit dargestellt. In der Abbildung 4.7 ist die Software zu sehen. Der Graph spiegelt den Messwertverlauf einer einzelnen Messung wider und sah für jede andere Messung sehr ähnlich aus. Zum Vergleich ist beispielhaft für alle Messungen der Messwertverlauf am Werkzeughalter in der Abbildung 4.8 zu sehen.

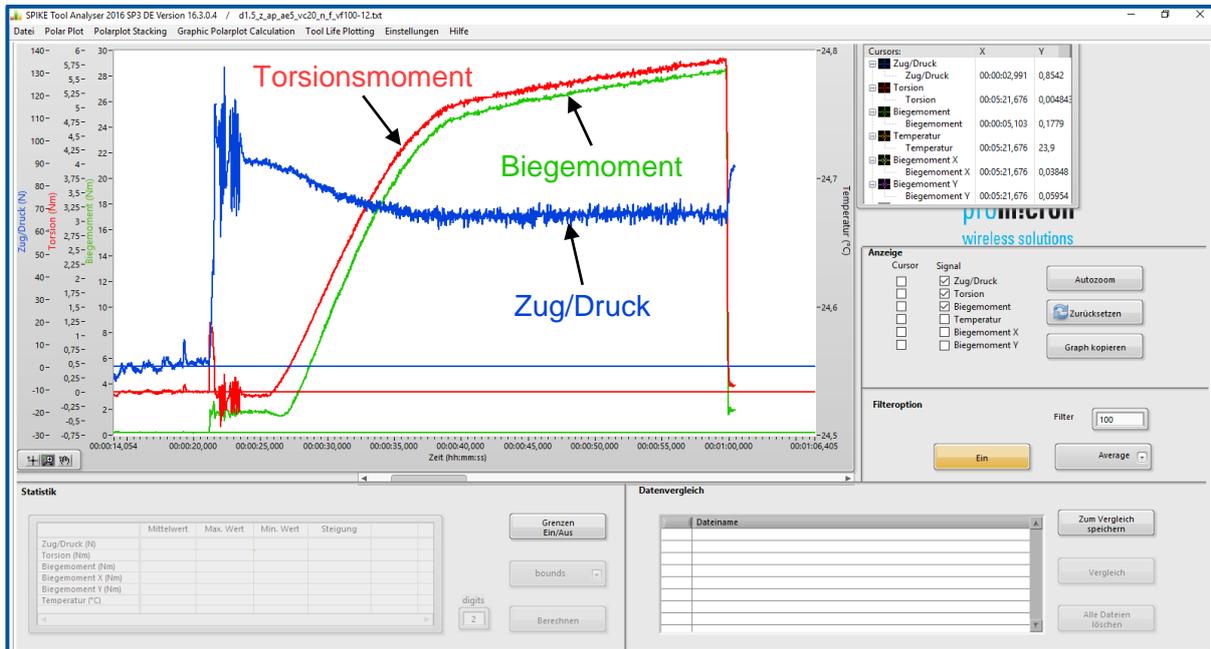


Abbildung 4.7: spike Tool Analyser, Verlauf der Messgrößen am Werkzeughalter

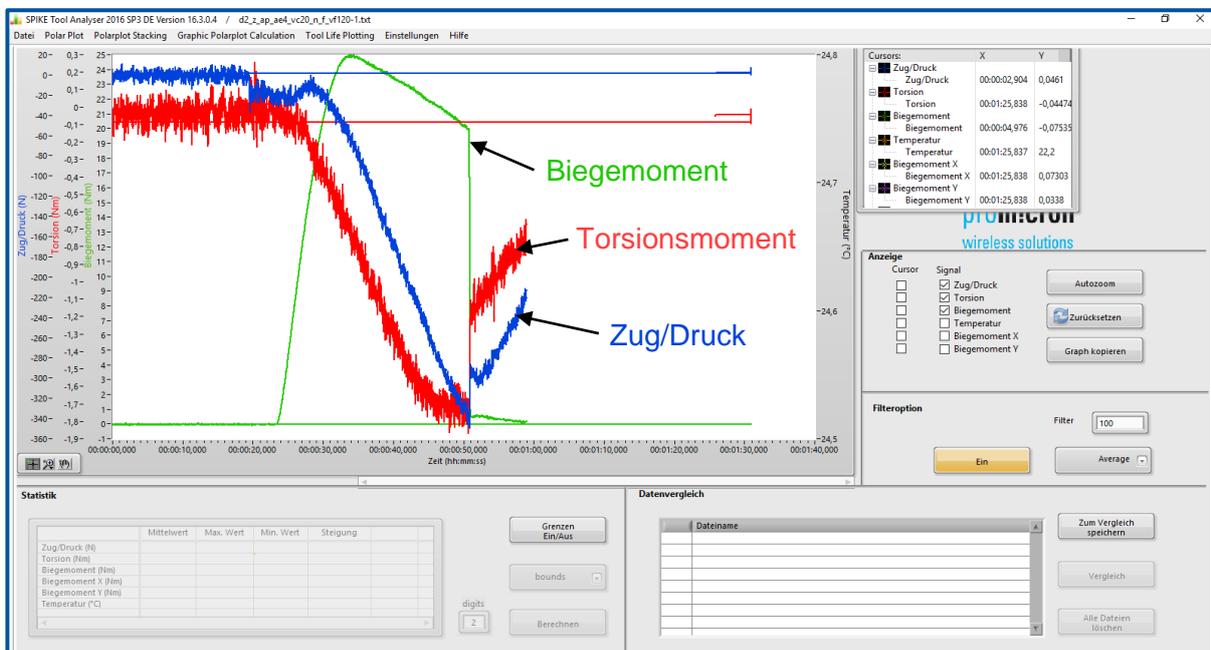


Abbildung 4.8: spike Tool Analyser, Verlauf der Messgrößen am Werkstückhalter

Wie in der Abbildung 4.9 zu sehen, kann mittels der zwei schwarzen Zeitschiebern ein bestimmtes Zeitintervall ausgewählt werden, in welchem für die einzelnen Messgrößen der Mittelwert, der maximale und minimale Wert also auch die Steigung angegeben wird. Somit lassen sich relevante Messwerte von den Unrelevanten getrennt betrachten. Außerdem lassen sich über den Anzeigefilter, rechts in der Abbildung, die Messgrößen einzeln auswählen. Wählt man immer dasselbe Zeitintervall erhält man vergleichbare Messergebnisse. Die daraus resultierenden Messwerte werden tabellarisch in einer Statistik ausgegeben, siehe roter Rahmen in der Abbildung 4.9, und wurden für die weitere Auswertung in eine Excel-Tabelle übertragen.

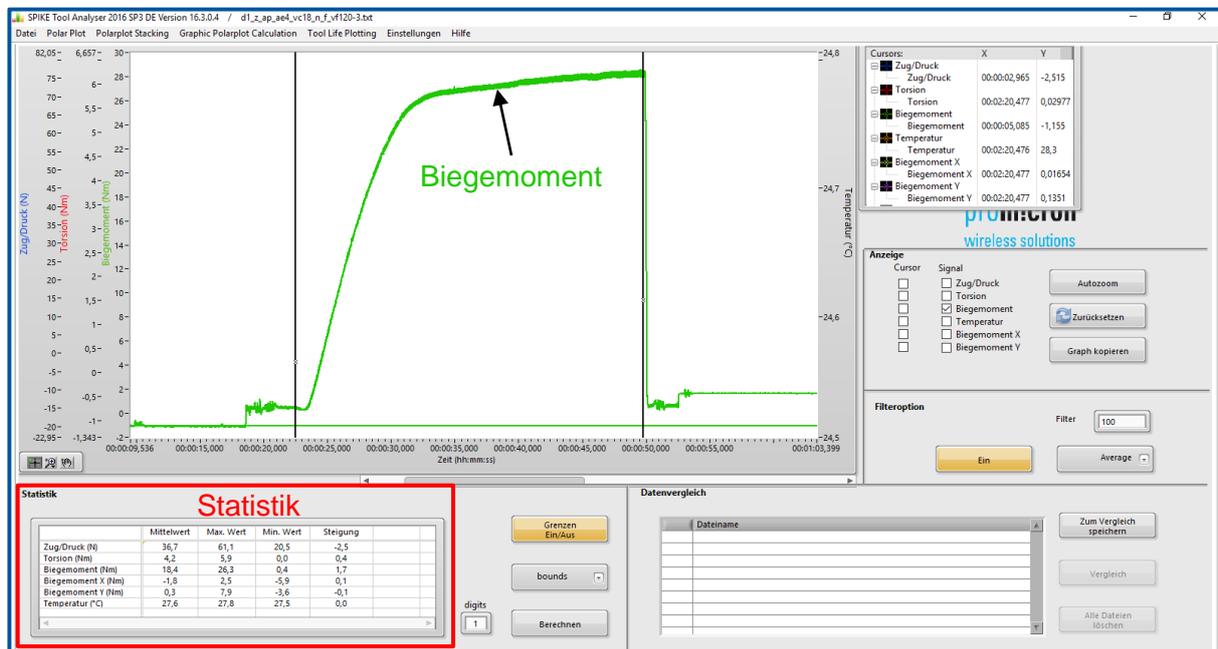


Abbildung 4.9: spike Tool Analyser, Einstellung eines bestimmten Zeitintervalls

5 Ergebnisse

Bei Messungen im Mikrometer Bereich fließen sehr viele Einflussgrößen mit ein, welche nicht immer eindeutig separiert werden können, dafür ist die Maschinenkinematik der Werkzeugmaschinen zu komplex. Im Folgenden soll gezeigt werden, welchen Einfluss die einzelnen Prozesseingangsgrößen auf das Messergebnis haben. Die Messwerte wurden von der Software spike Tool Measurement nach einer Messung in einzelnen Text-Dokumenten (*.txt) auf dem Versuchsrechner abgelegt. Anschließend wurden diese in der Software spike Tool Analyser 2016 geladen und ausgewertet. Neben der Auswertung der Messwert innerhalb der spike Software wurden die Messwerte in Microsoft Excel exportiert und grafisch in Relation gesetzt, um Zusammenhänge zu erkennen und abzuleiten. Im Anschluss werden zur Veranschaulichung zweidimensionale Polarplots der Biegemomente betrachtet, die von der Software ausgegeben werden konnten. Die gesamte Versuchsreihe wurde im Gleichlauf geschliffen.

5.1 Analyse des Torsionsmoments M_t

5.1.1 Einfluss des Vorschubs v_f auf das Torsionsmoment $M_{t,s}$

In der folgenden Abbildung 5.1 ist das maximale gemessene Torsionsmoment $M_{t,s,max}$ des spikes werkzeugseitig in Abhängigkeit von dem Vorschub v_f der Schleifscheibe abgebildet. Für eine Zustellung von $a_e = 3$ mm und $a_e = 5$ mm geht eine Erhöhung des Vorschubs v_f mit einem Anstieg des Torsionsmomentes M_t an der Spindel einher. Das gemittelte Torsionsmoment M_t liegt für $a_e = 3$ mm zwischen $3 \text{ Nm} < M_t < 5,5 \text{ Nm}$ und für eine Zustellungen von $a_e = 5$ mm zwischen $6 \text{ Nm} < M_t < 8,2 \text{ Nm}$. Bei einer Zustellung von $a_e = 4$ mm fällt die gemittelte Momentzunahme geringer aus und die Vorschubänderung bewirkt einen geringen Anstieg des Torsionsmoments M_t . Dieser geringe Anstieg resultiert aus der Überlagerung des Schärfens der Schleifscheibe und der Vorschubänderung bei einzelnen Messpunkten in der Messreihe mit einer Zustellung von $a_e = 4$ mm. Das Schärfen der Schleifscheibe bewirkt einen Abfall des Torsionsmoments M_t , vgl. Kapitel 5.3.1. Neben der Torsionsmomentänderung durch den Vorschub v_f , bewirkt eine Erhöhung der Zustellung a_e ein Torsionsmomentanstieg. Bei dieser Versuchsreihe geht eine Erhöhung der Zustellung a_e mit einem erhöhten Zerspanungsvolumen V_w je Rohling einher. Dass die Prozesskräfte bei sonst gleichbleibenden Prozesseingangsgrößen mit zunehmender Zustellung ansteigen, ist trivial. Wenn ein größeres Volumen in gleicher Zeit zerspant werden muss, steigt das spezifische Volumen an, welches jedes einzelnen Korn der Bindung transportieren muss. Dies steht in Korrelation mit einer erhöhten Tangentialkraft in Richtung der Schnittgeschwindigkeit, was in dem Anstieg des Torsionsmomentes widergespiegelt wird.

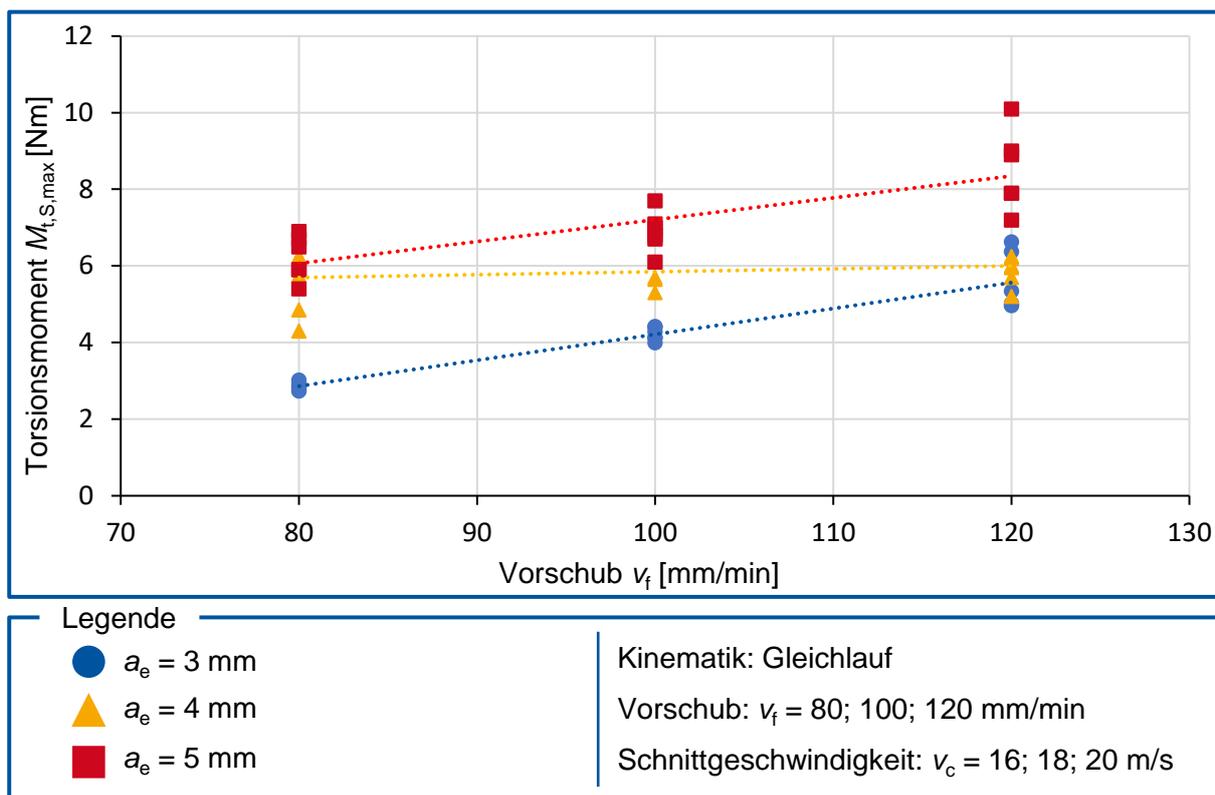


Abbildung 5.1: Torsionsmoment der Spindel $M_{t,s,max}$ in Abhängigkeit des Vorschubs v_f

5.1.2 Einfluss der Schnittgeschwindigkeit v_c auf das Torsionsmoment $M_{t,s}$

Die Abbildung 5.2 zeigt das maximale Torsionsmoment werkzeugseitig $M_{t,s,max}$ in Korrelation zur Schnittgeschwindigkeit v_c . Eine Zunahme der Schnittgeschwindigkeit v_c korreliert mit einer Abnahme des Torsionsmoments $M_{t,s}$ an der Spindel. Im Gegensatz zu einer Zustellung von $a_e = 4$ mm, bei welcher die Abnahme des Torsionsmoments M_t 0,5 Nm für eine Schnittgeschwindigkeitserhöhung von 20 m/s beträgt, nimmt das Moment für eine Zustellung von $a_e = 3$ mm und $a_e = 5$ mm um 0,25 Nm für eine Schnittgeschwindigkeitserhöhung von 20m/s ab. Auch hier bewirkt eine Zustellungserhöhung einen Anstieg des Torsionsmoments M_t . Eine Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit v_c führt zu einem Anstieg der Zerspanung. Dadurch nehmen die Tangentialkräfte, in Richtung der Schnittgeschwindigkeit, der einzelnen Körner im Eingriff ab und das Torsionsmoment M_t , welches auf die Spindel wirkt, sinkt.

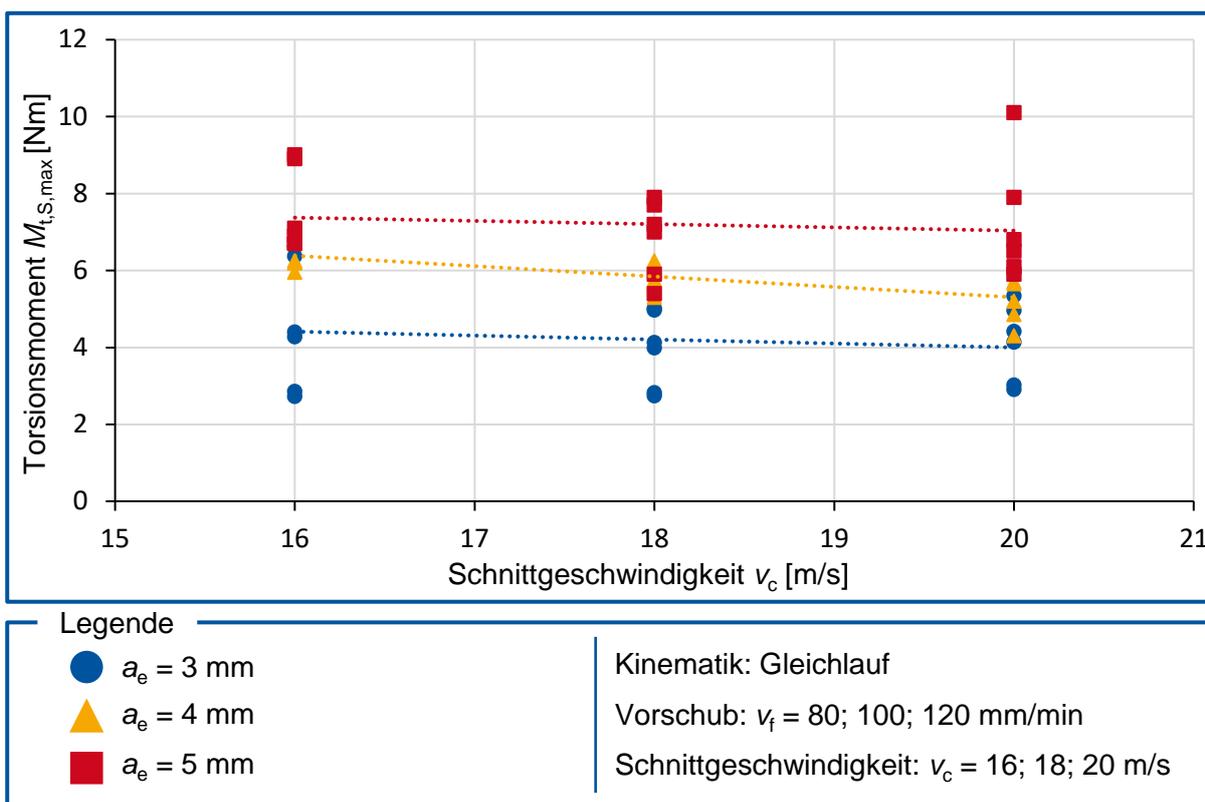


Abbildung 5.2: Torsionsmoment $M_{t,s,max}$ über Schnittgeschwindigkeit v_c

5.1.3 Einfluss des Vorschubs v_f auf das Torsionsmoment $M_{t,w}$

In der Abbildung 5.3 ist das maximale Torsionsmoment $M_{t,w,max}$ am Werkstück über dem Vorschub v_f aufgezeichnet. Zu beachten ist der negative Achsenabschnitt des Torsionsmoments $M_{t,w}$. Dies ist zurückzuführen auf die für den Sensor positive Drehrichtung des Torsionsmoments M_t in der A-Achse beziehungsweise dem Werkstückhalter. Das bedeutet, dass das Torsionsmoment M_t betragsmäßig zunimmt, umso höher der Vorschub v_f und die Zustellung a_e ist. Die geringe Zunahme ist auf den kleinen Hebel zurückzuführen, der durch den Radius des Rohlings bestimmt ist. Eine Erhöhung des Vorschubs v_f steht in Korrelation zu einer Erhöhung der Tangential und Normalkräfte im Eingriff. Da die Normalkraft im Eingriff exzentrisch zur Rohlingachse steht, bewirkt diese ein Verdrehen des Rohlings, was sich in der Torsionsmoment M_t werkstückseitig darstellt. Somit führt eine Erhöhung des Vorschubs v_f zu einem Anstieg des Torsionsmoment M_t werkstückseitig.

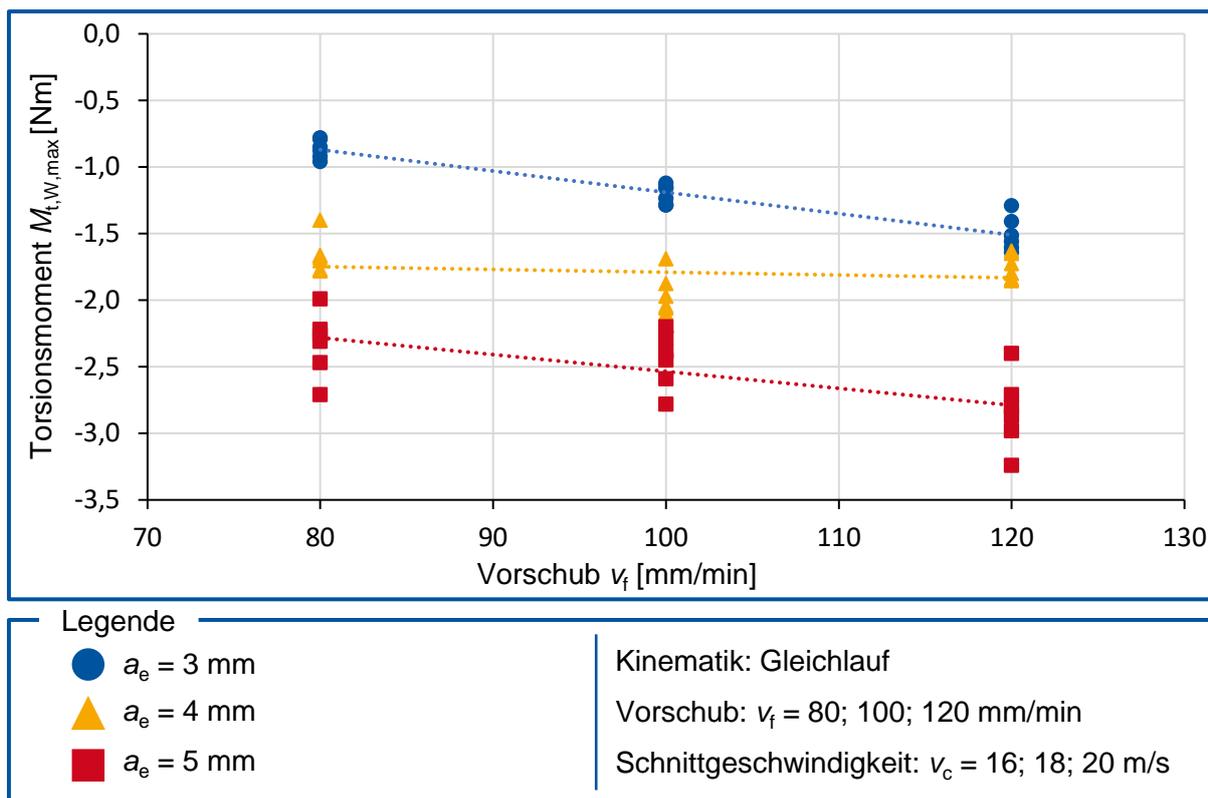


Abbildung 5.3: Torsionsmoment $M_{t,w,max}$ über Vorschub v_f

5.1.4 Einfluss der Schnittgeschwindigkeit v_c auf das Torsionsmoment $M_{t,w}$

Die Abbildung 5.4 zeigt welchen Einfluss die Schnittgeschwindigkeit v_c auf das Torsionsmoment $M_{t,w,max}$ am Werkstück hat. Eine Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit v_c bewirkt für eine Zustellung von $a_e = 3$ mm und $a_e = 5$ mm einen betragsmäßigen Anstieg des Torsionsmoments $M_{t,w}$ von 0,1 Nm werkstückseitig. Für eine Zustellung von $a_e = 4$ mm sinkt des Torsionsmoment im Mittel betragsmäßig von $M_{t,w} = 1,8$ Nm auf $M_{t,w} = 1,75$ Nm um 0,05 Nm. Dieser Abfall ist im Vergleich zum Einfluss durch die Zustellung a_e und den Vorschub v_f vernachlässigbar gering. Eine Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit steht in Korrelation zu einer Abnahme der

Tangential- und Normalkräfte im Eingriff. Da die Normalkraft im Eingriff exzentrisch zur Rohlingachse steht, bewirkt diese ein Verdrehen des Rohlings, was sich in der Torsionsmoment M_t werkstückseitig darstellt. Somit steht die Normalkraft im Eingriff in Korrelation zum Torsionsmoment M_t .

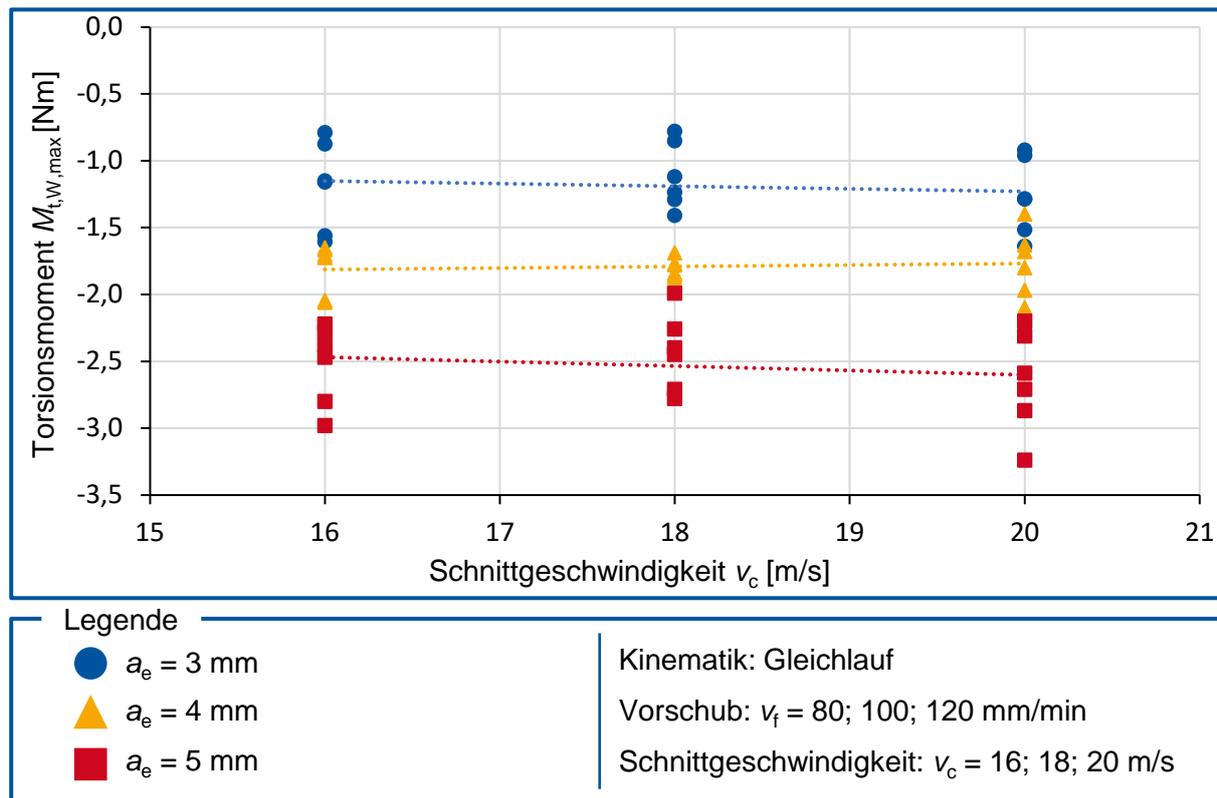


Abbildung 5.4: Torsionsmoment $M_{t,w,max}$ über Schnittgeschwindigkeit v_c

5.1.5 Vergleich der Torsionsmomente $M_{t,s}$ und $M_{t,w}$

In der folgenden Abbildung 5.5 sind parallel über die gesamte Versuchsreihe das arithmetische Torsionsmoment $M_{t,s,arithm}$ der Spindel und das arithmetische Torsionsmoment $M_{t,w,arithm}$ am Werkstückhalter über dem bezogenem Zerspanungsvolumen V_w' dargestellt. Anders als bei den bisherigen Abbildungen der Ergebnisse, wird hier nur die Versuchsreihe betrachtet, bei der die Schnittgeschwindigkeit $v_c = 20$ m/s, der Vorschub $v_f = 100$ mm/min und die Zustellung $a_e^* = 5$ mm konstant gehalten wurde. Dies dient der Vergleichbarkeit der Messpunkte. Es ist auf die Achsenabschnitte der beiden Momente zu achten, dass das Torsionsmoment $M_{t,w}$ werkstückseitig negativ dargestellt ist und betragsmäßig betrachtet werden muss. Die Skalierung ist jedoch auf beiden Achsen dieselbe. Die Korrelation dieser beiden Momente $M_{t,s}$ und $M_{t,w}$ ist gut erkennbar. Mit zunehmendem Schleifscheibenverschleiß nimmt das Torsionsmoment M_t beider ab, werkzeugseitig um 0,35 Nm und werkstückseitig um 0,25 Nm. Zu berücksichtigen ist, dass die Maschine, um den abrasiven Verschleiß der Schleifscheibe in den Prozesszustandsgrößen aufzuzeigen, während der gesamten Versuchsreihe nicht nachjustiert wurde und die Relativbewegung von Spindel zu Werkstückhalter immer dieselben waren.

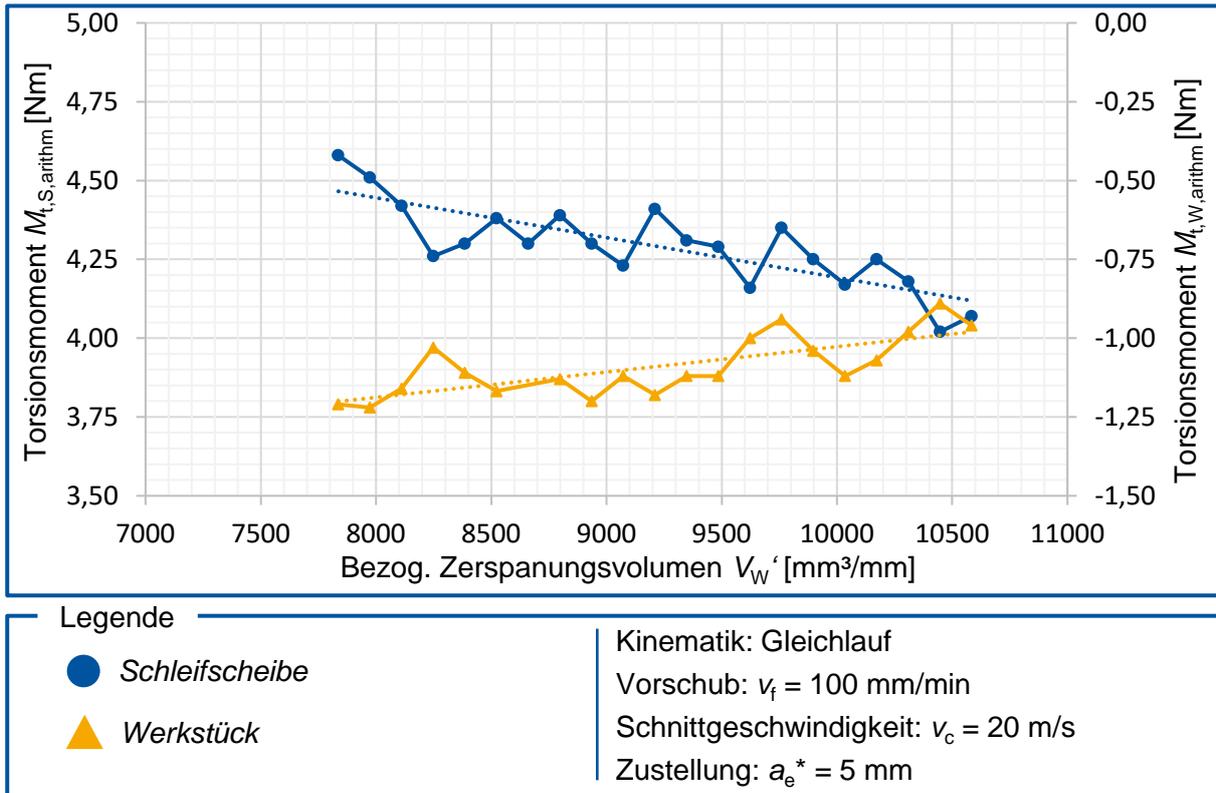


Abbildung 5.5: Torsionsmomente $M_{t,arithm}$ über bezog. Zerspanungsvolumen V_W'

5.2 Analyse des Biegemoments M_b

5.2.1 Einfluss des Vorschubs v_f auf das Biegemoment $M_{b,s}$

In der Abbildung 5.6 ist das Biegemoment $M_{b,s,max}$ über dem Vorschub v_f dargestellt. Relativ gesehen, weist das Biegemoment M_b denselben Zusammenhang auf wie das Torsionsmoment $M_{t,s,max}$ und der Vorschub v_f . Die auftretenden Kräfte sind beim Biegemoment deutlich höher. Der Momentanstieg, der bei einer Zustellung von $a_e = 3$ mm und $a_e = 5$ mm zu erkennen ist, ist wieder nahezu identisch. Bei einer Zustellung von $a_e = 4$ mm ist im Mittel keine Momentzunahme erkennbar. Dies führt dazu, dass das auftretende Biegemoment $M_b = 20$ Nm für $a_e = 3$ mm und $a_e = 4$ mm und einem Vorschub von $v_f = 100$ mm/min gleich groß ist. Dies resultiert bei einem Vorschub von $v_f = 120$ mm/min in einem geringeren Biegemoment $M_b = 20$ Nm für die Zustellung von $a_e = 4$ mm als das Biegemoment $M_b = 26$ Nm für $a_e = 3$ mm. Das Schärfen der Schleifscheibe hat eine Abnahme des Biegemoments M_b zufolge. Eine Quantifizierung dieser ist aufgrund der stetig wechselnden Prozesseingangsgrößen nicht möglich. Der Einfluss des Schärfens der Schleifscheibe überwiegt der Momentzunahme durch die Vorschubänderung.

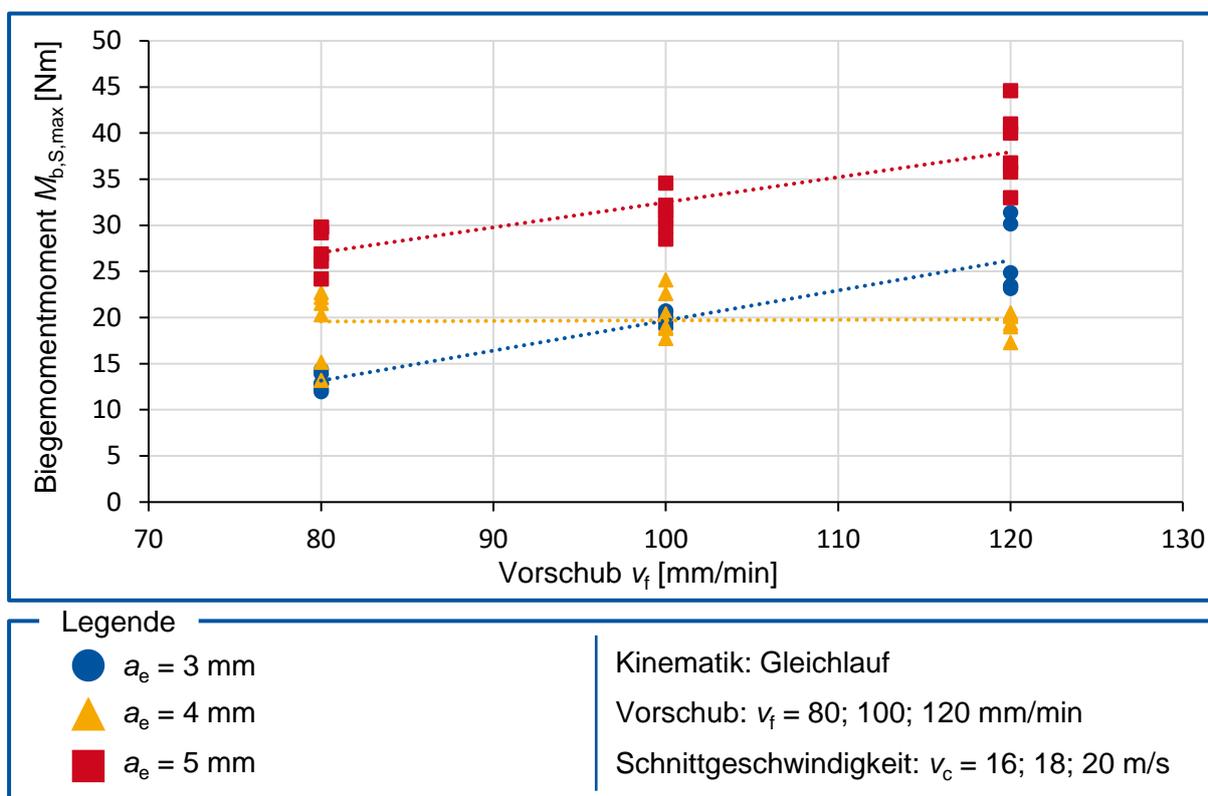


Abbildung 5.6: Biegemoment $M_{b,s,max}$ über dem Vorschub v_f

5.2.2 Einfluss der Schnittgeschwindigkeit v_c auf das Biegemoment $M_{b,s}$

In der Abbildung 5.7 ist das maximale Biegemoment $M_{b,s,max}$ über der Schnittgeschwindigkeit v_c dargestellt. Bei einer Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit v_c lässt sich im Mittel ein Abfall des Biegemoments M_b an der Schleifscheibe beobachten. Bei einer Zustellung von $a_e = 4$ mm sinkt das Biegemoment M_b um 2,5 Nm bei einem Anstieg der Schnittgeschwindigkeit v_c um 2 m/s. Bei einer Zustellung von $a_e = 3$ mm und $a_e = 5$ mm sinkt es um 1 Nm pro 2 m/s Schnittgeschwindigkeitserhöhung. Ein Schärferen der Schleifscheibe führt zu einer Abnahme der Momente. Da während der Versuchspunkte für eine Zustellung von $a_e = 4$ mm öfter geschärft wurde als bei den Zustellungen $a_e = 3$ mm und $a_e = 5$ mm, fällt das arithmetisch gemittelte Biegemoment M_b bei einer Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit v_c stärker ab. Eine Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit v_c führt zu einem Anstieg der Zerspanung. Dadurch nehmen die senkrecht zur Schleifscheibe auftretenden Normalkräfte im Eingriff ab und das Biegemoment M_b , welches auf die Spindel wirkt, sinkt.

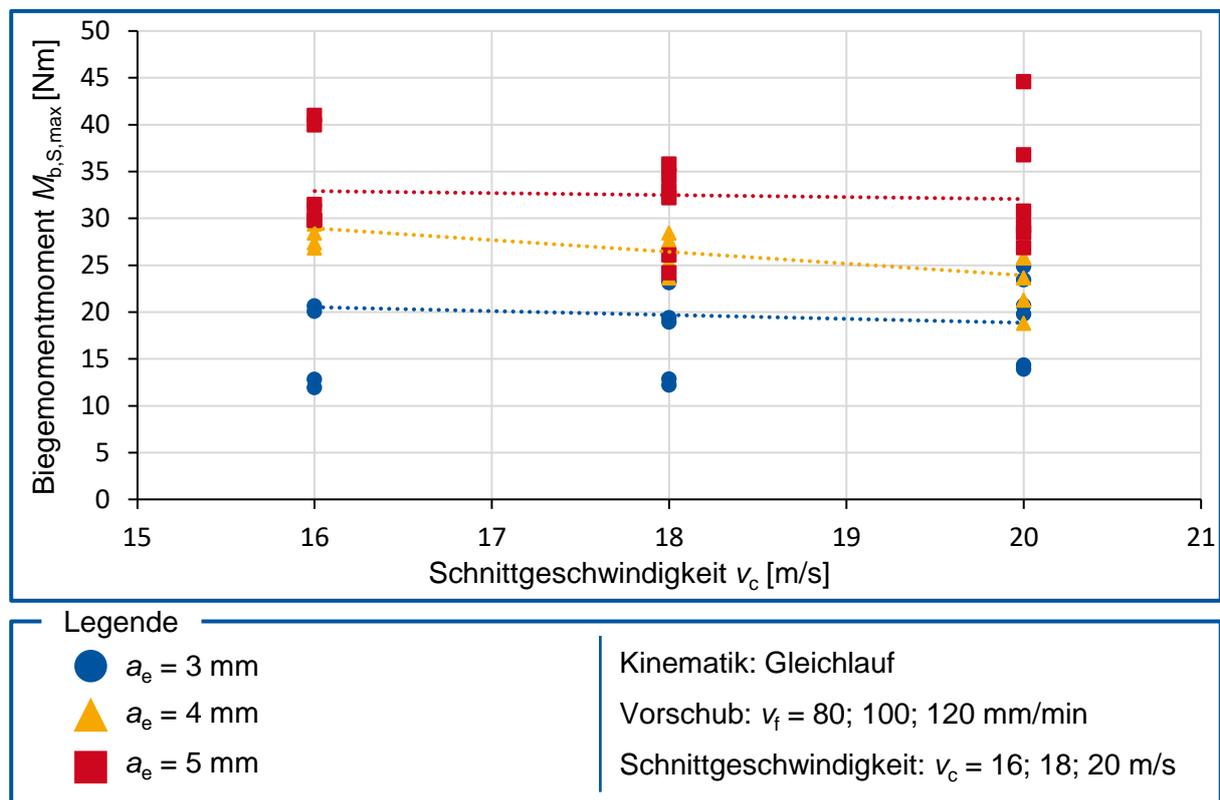


Abbildung 5.7: Biegemoment $M_{b,s,max}$ über Schnittgeschwindigkeit v_c

5.2.3 Einfluss des Vorschubs v_f auf das Biegemoment $M_{b,W}$

In der Abbildung 5.8 ist das Biegemoment $M_{b,W,max}$ am Werkstückhalter unter dem Einfluss der Vorschubänderung zu sehen. Dabei lässt sich bei einer Erhöhung des Vorschubs v_f ein ansteigt des Biegemoments M_b werkstückseitig beobachten. Wie auch schon an der Spindel zeigt sich für eine Zustellung von $a_e = 4$ mm ein anderes Verhalten als bei den jeweils anderen Zustellungen und zu einem Biegemomentanstieg von 1 Nm pro 20 mm/min Vorschubsänderung. Eine Erhöhung des Vorschubs um $\Delta v_f = 20$ mm/min führt bei einer Zustellung $a_e = 3$ mm zu einem Anstieg des Biegemoments M_b um 7 Nm, bei $a_e = 5$ mm um 5 Nm. Der Unterschied, der durch die Zustellungsdifferenz entsteht, ist dennoch erkennbar und wächst, wie bei allen anderen Betrachtungen, mit zunehmender Zustellung a_e .

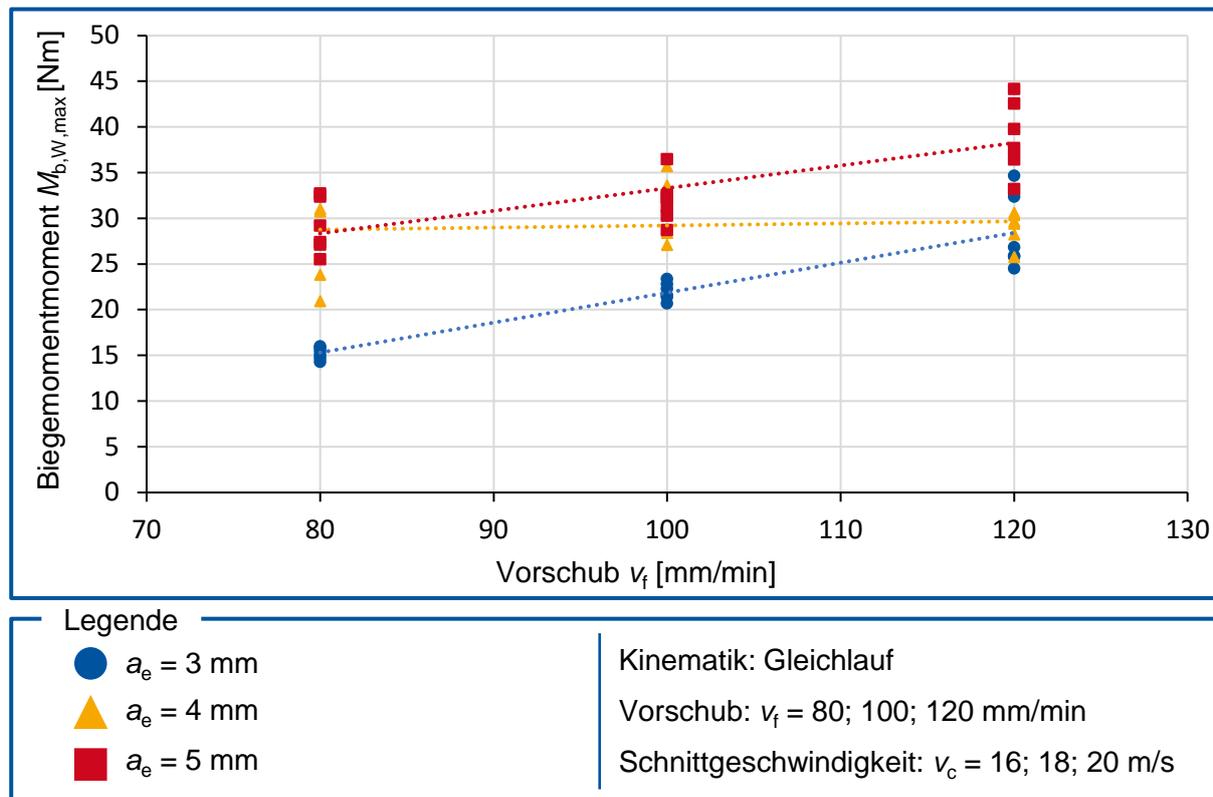


Abbildung 5.8: Biegemoment $M_{b,W,max}$ über Vorschub v_f

5.2.4 Einfluss der Schnittgeschwindigkeit v_c auf das Biegemoment $M_{b,w}$

Wie in Abbildung 5.9 zu sehen, sinkt bei einer Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit v_c das Biegemoment $M_{b,w,max}$ werkstückseitig. Die Versuchspunkte einer Zustellung die weit außerhalb der anderen liegen, entstehen durch das Schärfen der Schleifscheibe. Jedoch zeigt das Mittel jeder Zustellung eine abnehmende Tendenz und eine Abgrenzung zu den jeweils anderen Zustellungen. Im direkten Vergleich zum Anstieg des Biegemoments durch den Vorschub, siehe vorherigen Abbildung 5.8, fällt der Abfall des Biegemoments durch die Schnittgeschwindigkeit deutlich geringer aus.

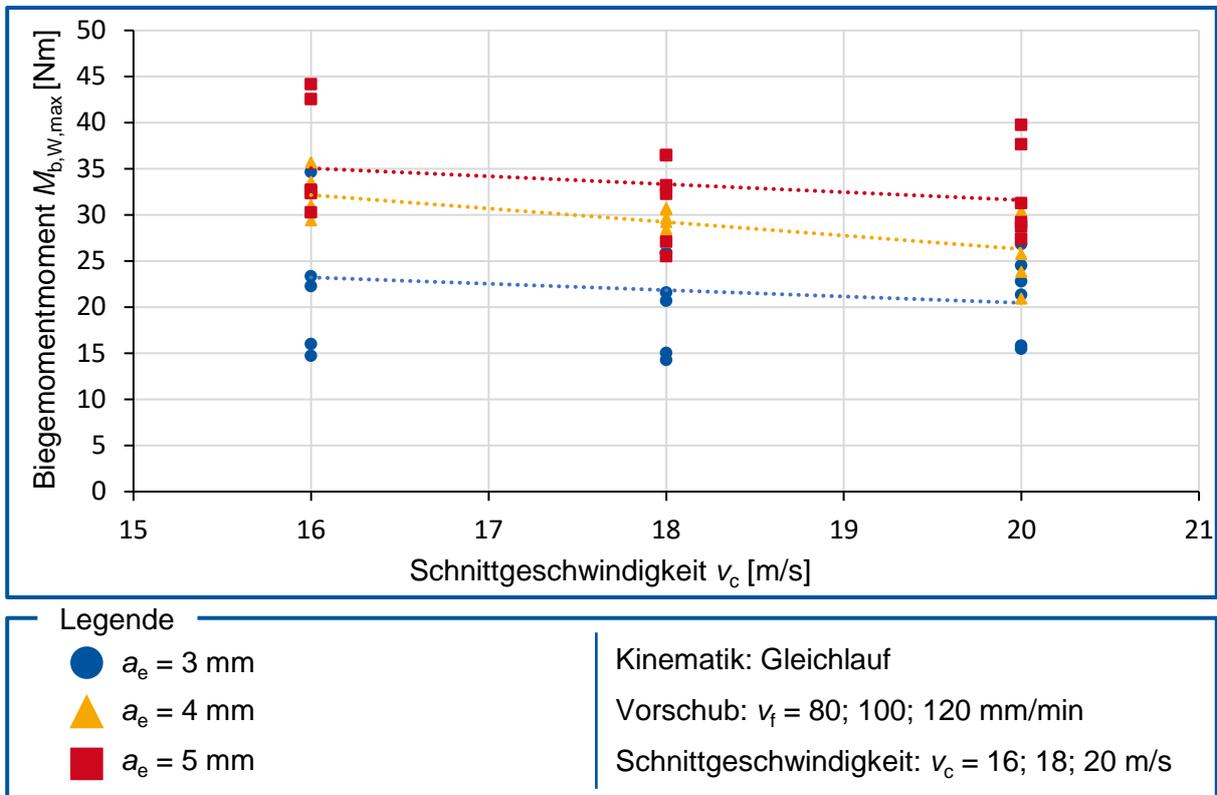


Abbildung 5.9: Biegemoment $M_{b,w,max}$ über Schnittgeschwindigkeit v_c

5.2.5 Vergleich der Biegemomente $M_{b,s}$ und $M_{b,w}$

In der Abbildung 5.10 werden die Biegemomente an der Spindel $M_{b,s,max}$ und am Werkstückhalter $M_{b,w,max}$ in Abhängigkeit vom bezogenen Zerspanungsvolumen V_W' dargestellt. Die Schnittgeschwindigkeit $v_c = 20$ m/s, der Vorschub $v_f = 100$ mm/min und die Zustellung $a_e = 5$ mm sind über die Messpunkte konstant. Die Regressionsgraden der Momente haben nahezu dieselbe Steigung und nehmen mit zunehmendem Zerspanungsvolumen ab. Dies steht in Korrelation zum Verschleiß der Schleifscheibe. Mit zunehmendem Verschleiß wirkt eine immer geringere Kraft im Zerspanungskontakt, bei gleichbleibender Relativbewegung zwischen Spindel beziehungsweise Schleifscheibe und Werkstückhalter.

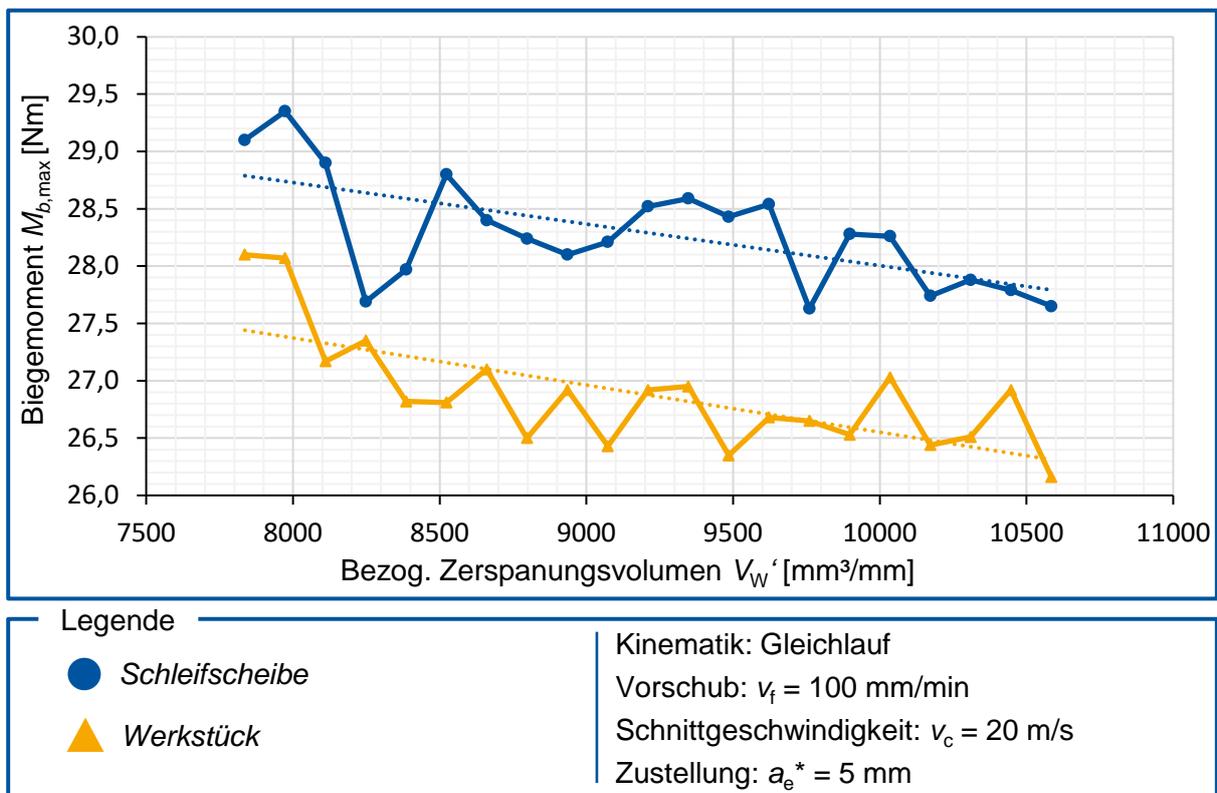


Abbildung 5.10: Biegemoment $M_{b,max}$ über bezog. Zerspanungsvolumen V_W'

5.3 Vergleich der Momente $M_{t,S}$ und $M_{b,S}$

Die Abbildung 5.11 zeigt den direkten Vergleich vom Torsionsmoments $M_{t,S,arithm}$ und dem Biegemoment $M_{b,S,arithm}$ an der Spindel. Beide Momente sind über dem bezogenen Zerspanungsvolumen dargestellt. Zu beachten sind die unterschiedlichen Skalierungen der beiden Achsen von Torsionsmoment $M_{t,S,arithm}$, linke Achse, und Biegemoment $M_{b,S,arithm}$, rechte Achse. Es fällt auf, dass der Verlauf prozentual nahezu identisch ist, nicht aber quantitativ. Die Einflussgrößen wie die Vorschubänderung oder das Schärfen spiegeln sich in beiden Messgrößen prozentual gleich stark wider, vgl. Abbildung 5.12. Die quantitativen Unterschiede sind beim Biegemoment um circa den Faktor fünf größer als beim Torsionsmoment. Dieser Faktor ändert sich mit der Form, Größe und Ausspannlänge der verwendeten Schleifscheibe.

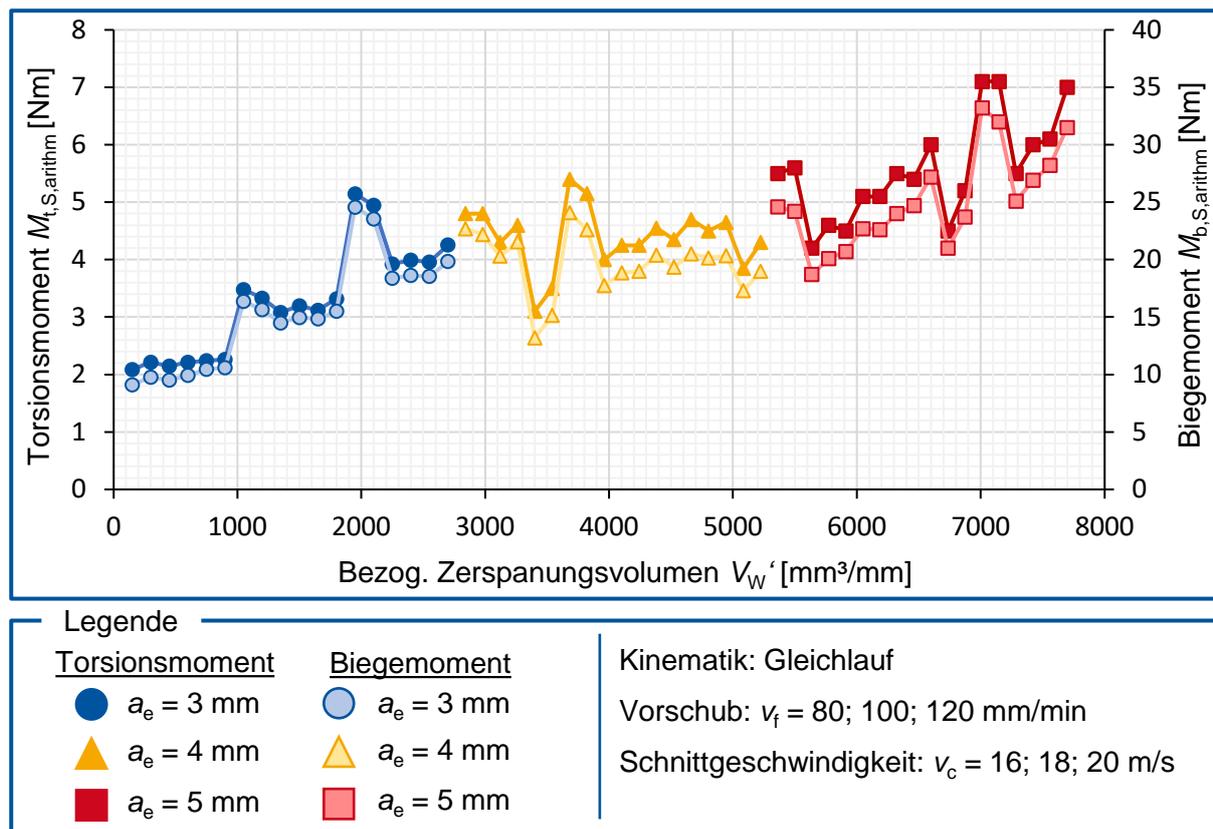


Abbildung 5.11: Vergleich von Torsionsmoment und Biegemoment

5.3.1 Einfluss der Vorschubänderung und des Schärfens

In der Abbildung 5.12 ist das werkzeugseitige Torsionsmoment $M_{t,S}$ über dem bezogenen Zerspanungsvolumen V_W' dargestellt. Einige Messpunkte fallen besonders auf, bei denen das Torsionsmoment M_t eine größere Abweichung aufweist. Vergleicht man diese Punkte mit den jeweiligen Versuchspunkten im Protokoll, stellt man fest, dass bei Ihnen entweder der Vorschub geändert wurde, die Schleifscheibe zuvor geschärft wurde oder beides gleichzeitig durchgeführt wurde. Wenn der Vorschub v_f erhöht wurde, steigt auch das Torsionsmoment M_t . Das Torsionsmoment M_t fällt ab, wenn die Schleifscheibe zuvor geschärft wurde. Überlagern sich beide Effekte, ändert sich das Torsionsmoment M_t kaum. Dasselbe gilt im direkten

Vergleich der blauen, gelben und roten Messreihe mit der grünen Messreihe. Bei Letzterer wurden die Schnittgeschwindigkeit und der Vorschub v_f immer konstant gehalten, sowie vor jedem Messpunkt die Schleifscheibe geschärft. Dies resultiert in einem nahezu konstantem Torsionsmoment M_t und gilt ebenso für das Biegemoment M_b . Die geringe Abnahme des Torsionsmoments $\Delta M_t = 0,6 \text{ Nm}$ der grünen Messreihe (a_e^*) mit zunehmendem Zerspanungsvolumen V_W' wurde in den vorherigen Unterkapiteln erläutert, vgl. Abbildung 5.5.

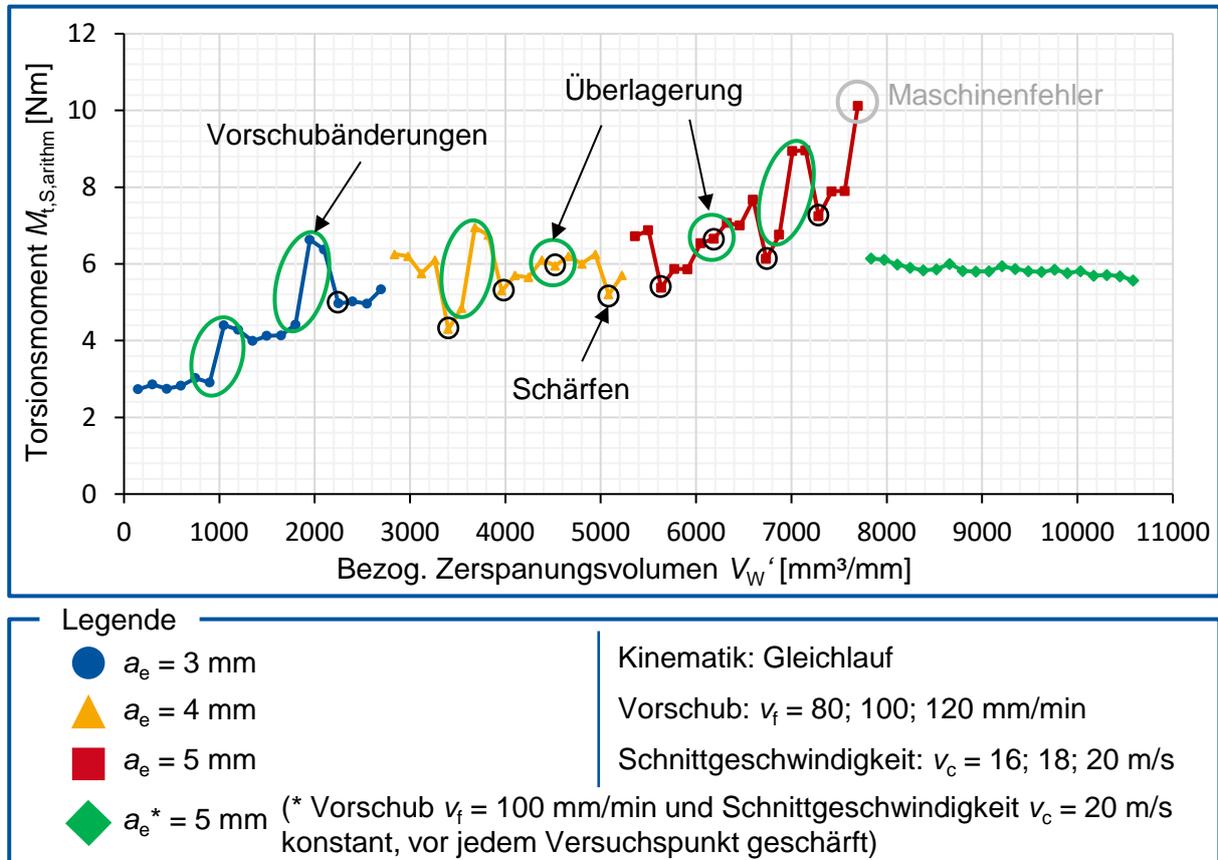


Abbildung 5.12: Einfluss der Vorschubänderung und des Schärfens der Schleifscheibe

5.4 Analyse der Prozessergebnisse

5.4.1 Auswertung des Mittenrauwerths Ra

Die Mittenrauwerthe Ra der geschliffenen Rohlinge wurden im Anschluss an die gesamte Versuchsreihe gemessen. Die Ergebnisse sind in der folgenden Abbildung 5.13 dargestellt. Hierbei ist der Mittenrauwert Ra über dem bezogenen Zeitspannungsvolumen Q_w' dargestellt. Der Mittenrauwert Ra liegt über alle Versuchspunkte zwischen $0,5 \mu\text{m} \leq Ra \leq 0,8 \mu\text{m}$. Erkennbar ist, dass für eine Zustellung von $a_e = 3 \text{ mm}$ und $a_e = 5 \text{ mm}$ mit zunehmendem Zeitspannungsvolumen Q_w' die Oberfläche feiner wird. Das heißt, umso höher der Vorschub v_f und die Schnittgeschwindigkeit v_c sind, desto geringer ist die Oberflächenrauheit. Dies gilt nicht bei einer Zustellung von $a_e = 4 \text{ mm}$. Hier wurde eine entgegengesetzte Verlauf beobachtet, bei dem der Mittenrauwert Ra der geschliffenen Rohlinge mit zunehmendem Zeitspannungsvolumen Q_w' von $Ra = 0,55 \mu\text{m}$ auf $Ra = 0,75 \mu\text{m}$ stieg.

In der Abbildung 5.14 ist der arithmetische Mittenrauwert Ra der unterschiedlichen Zustellungen kumuliert dargestellt. Alle Werte liegen zwischen $Ra = 0,61 \mu\text{m}$ und $Ra = 0,72 \mu\text{m}$. Der geringste arithmetische Mittenrauwert von $Ra = 0,61 \mu\text{m}$ wurde mit einem Vorschub von $v_f = 120 \text{ mm/min}$ und einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 20 \text{ m/s}$ erzielt, unabhängig von der Zustellung a_e . Eine Tendenz, dass der Mittenrauwert Ra mit zunehmender Schnittgeschwindigkeit v_c und zunehmendem Vorschub v_f sinkt, konnte nicht nachgewiesen werden.

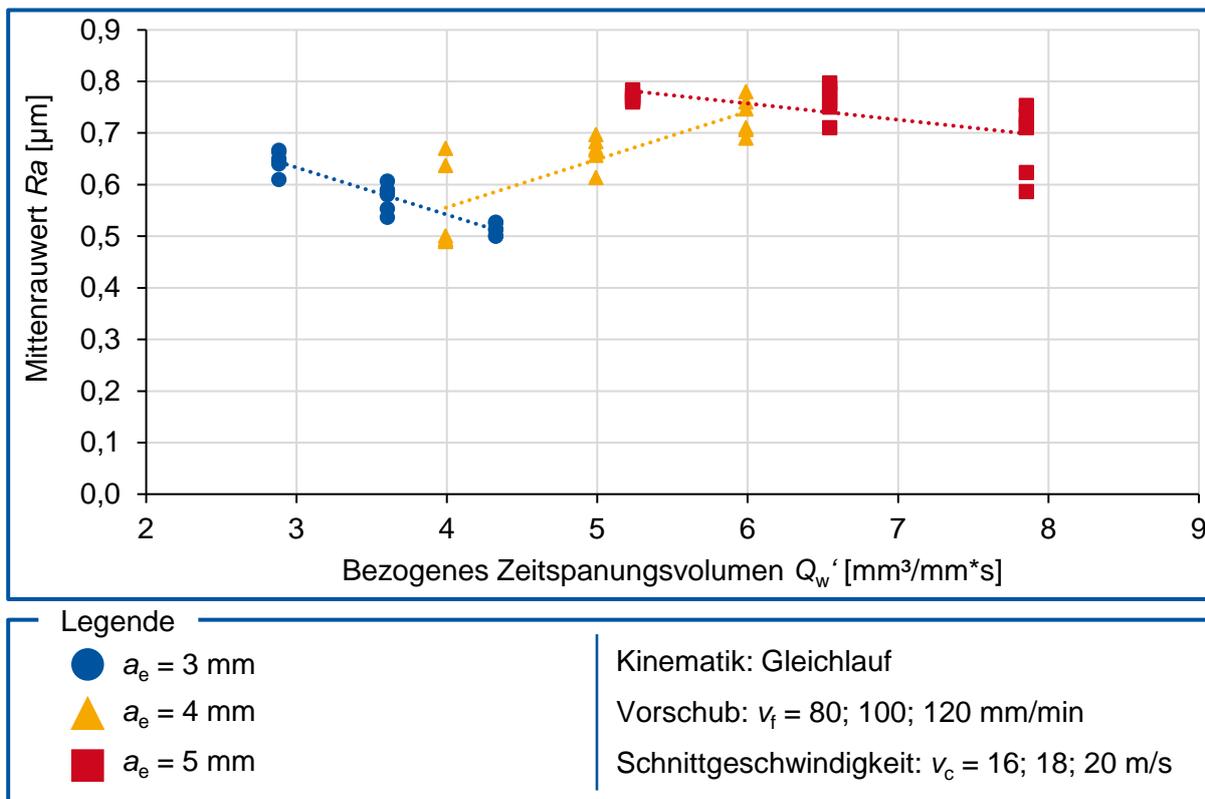


Abbildung 5.13: Mittenrauwert Ra unterschiedlicher Zustellungen

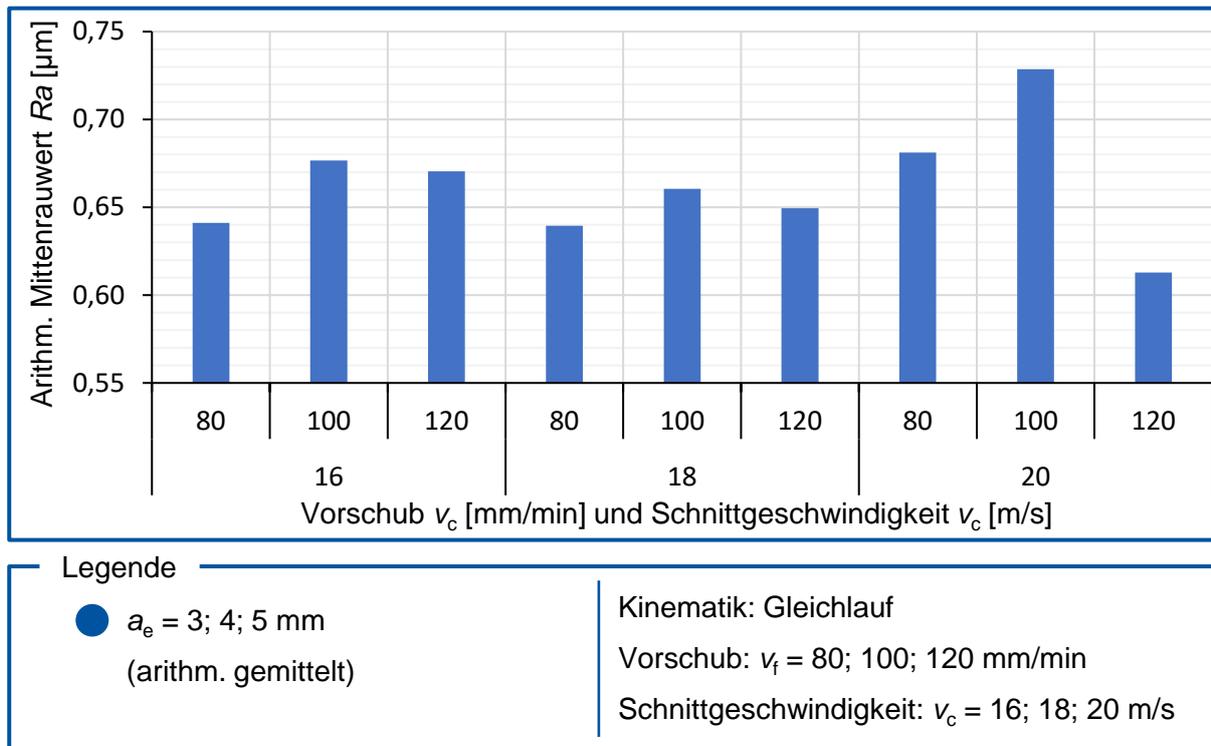


Abbildung 5.14: Arithmetischer Mittenrauwert R_a

5.4.2 Auswertung des Schleifscheibenverschleißes Δr_s und Δr_k

In der Abbildung 5.15 und Abbildung 5.16 sind die zwei betrachteten Verschleißarten, der Schleifscheibe dargestellt. Der Radialverschleiß Δr_s und der Kantenverschleiß Δr_k wurden jeweils über die gesamte Versuchsreihe betrachtet und ausgewertet. Bei der Schleifscheibe ließ sich mit zunehmendem bezogenen Zerspanungsvolumen $V_{W'}$ ein exponentiell ansteigender Radialverschleiß Δr_s beobachten. Die Sprünge der einzelnen Messpunkte sind auf die Messmethode des Radialverschleißes zurückzuführen, bei welcher es nahezu unmöglich ist, Messungenauigkeiten zu vermeiden. Die Regressionslinie verdeutlicht den exponentiellen Radialverschleiß Δr_s der Schleifscheibe. Bei einer Zustellung von $a_e^* = 5$ mm wurde bei jedem Messpunkt die Schleifscheibe geschärft, was den Verschleiß der Scheibe bei gleichbleibend steigendem Zerspanungsvolumen $V_{W'}$ erhöht und einen direkten Vergleich mit den vorangegangenen Messpunkten (Zustellungen $a_e = [3; 4; 5]$) erschwert.

In der Abbildung 5.16 ist der Kantenverschleiß Δr_k dargestellt. Er stagniert und steigt, im Gegensatz zum Radialverschleiß Δr_s , nicht mit zunehmendem bezogenen Zerspanungsvolumen $V_{W'}$ weiter an. Zu Anfang der ersten Messpunkte steigt der Radialverschleiß Δr_s stärker als im weiteren Verlauf der Versuchsreihe. Auch hier sind im Rahmen der Messgenauigkeit Sprünge im Graph zu verzeichnen. Die Tendenz zeigt, dass der Kantenverschleiß um $\Delta r_k = 200$ μm schwankt.

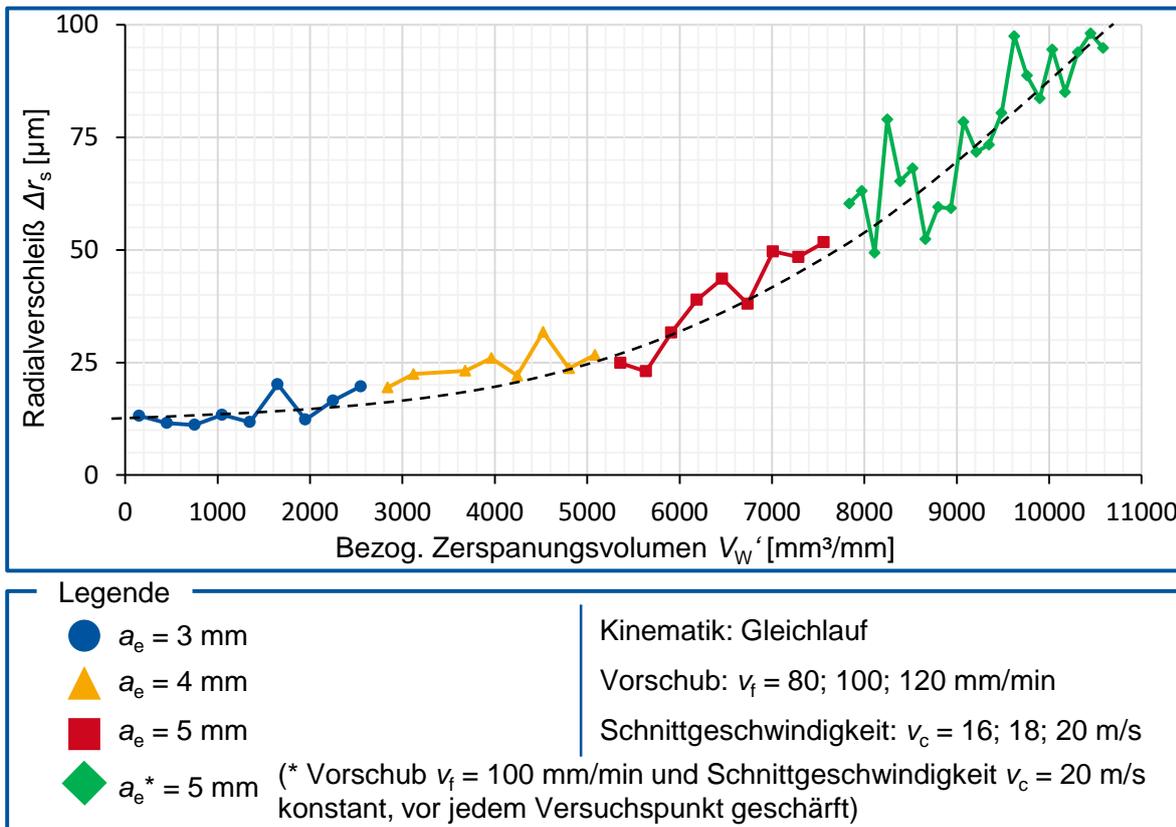


Abbildung 5.15: Radialverschleiß Δr_s der Schleifscheibe

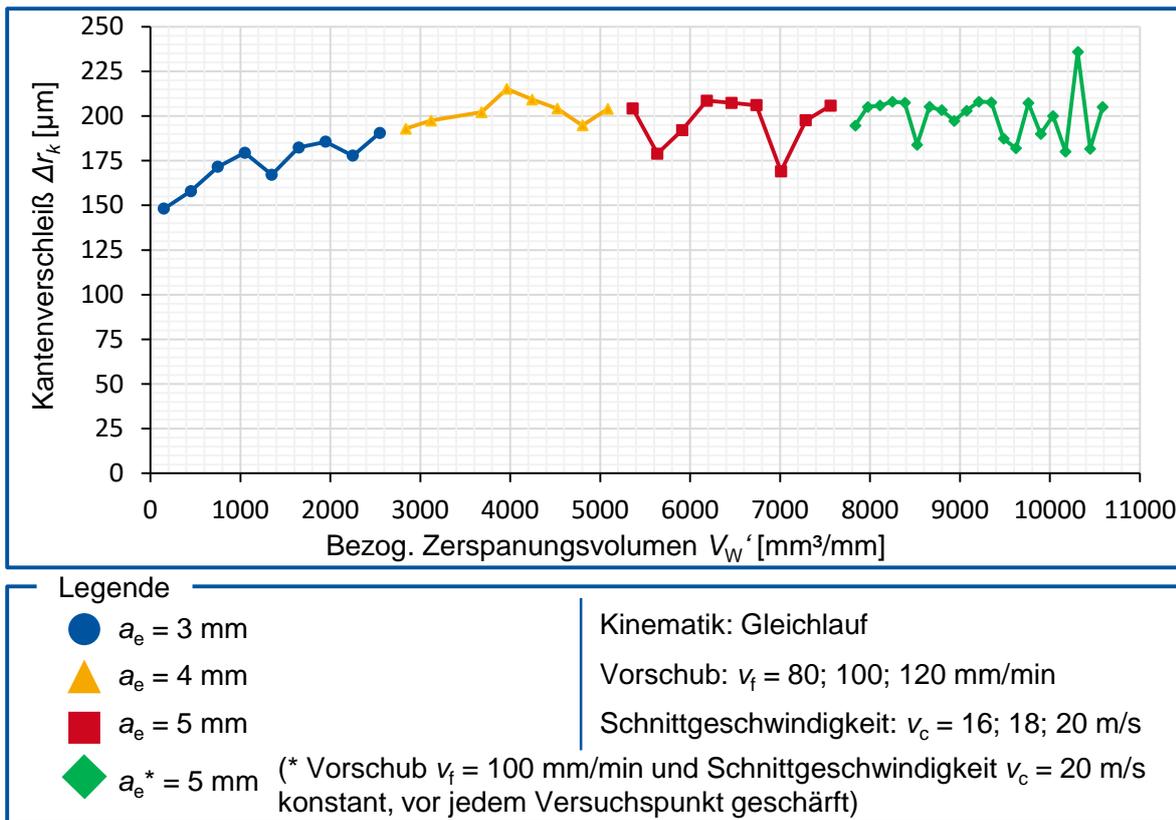


Abbildung 5.16: Kantenverschleiß Δr_k der Schleifscheibe

5.5 Grafische Auswertung

Neben der eigenen Aufbereitung der Messergebnisse, lassen sich Polar Plots mittels der Software spike Tool Analyser 2016 ausgeben. Diese sollen den Zustand der Schleifscheibe veranschaulichen. Hierzu wird ein zweidimensionaler Polar Plot der Biegemomente in x - und y -Richtung erstellt, die vom spike an der Spindel aufgezeichnet wurden. Die Plots in den folgenden Abbildungen sind wegen derselben Skalierung miteinander vergleichbar. In der Abbildung 5.17 sind die Polar Plots für unterschiedliche Zustellungen $a_e = [3; 4; 5]$ mm abgebildet. Der Vorschub v_f und die Schnittgeschwindigkeit v_c sind konstant. Die Korrelation zwischen der Zustellung a_e und dem auftretenden Biegemoment ist zu erkennen. Umso größer die Zustellung, desto größer ist auch das Biegemoment beziehungsweise das damit gezeichnete Abbild der Schleifscheibe.

In der darauffolgenden Abbildung 5.18 variiert nur die Schnittgeschwindigkeit $v_c = [16; 18; 20]$ m/s. Der Unterschied der drei Polar Plots ist nur sehr gering und kaum zu erkennen. Die Überlagerung der Abtastrate des Sensors mit einer bestimmten Schnittgeschwindigkeit v_c beziehungsweise der Winkelgeschwindigkeit ω der Schleifscheibe führt zu einer Anhäufung von Messpunkten an bestimmten Winkeln des kreisrunden Plots. Dies ist bei einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 18$ m/s erkennbar.

In der Abbildung 5.19 variiert schlussendlich nur der Vorschub $v_f = [80; 100; 120]$ mm/min, die Schnittgeschwindigkeit $v_c = 20$ m/s als auch die Zustellung $a_e = 5$ mm bleiben konstant. Die Korrelation zwischen dem Vorschub v_f und dem auftretenden Biegemoment ist zu erkennen. Je schneller der Vorschub v_f ist, desto größer ist das auftretende Biegemoment. Alle Polar Plots haben die Welligkeit im Kreisumfang des Abbildes gemeinsam. Dies könnte auf Schwingungen während des Schleifprozesses zurückzuführen sein.

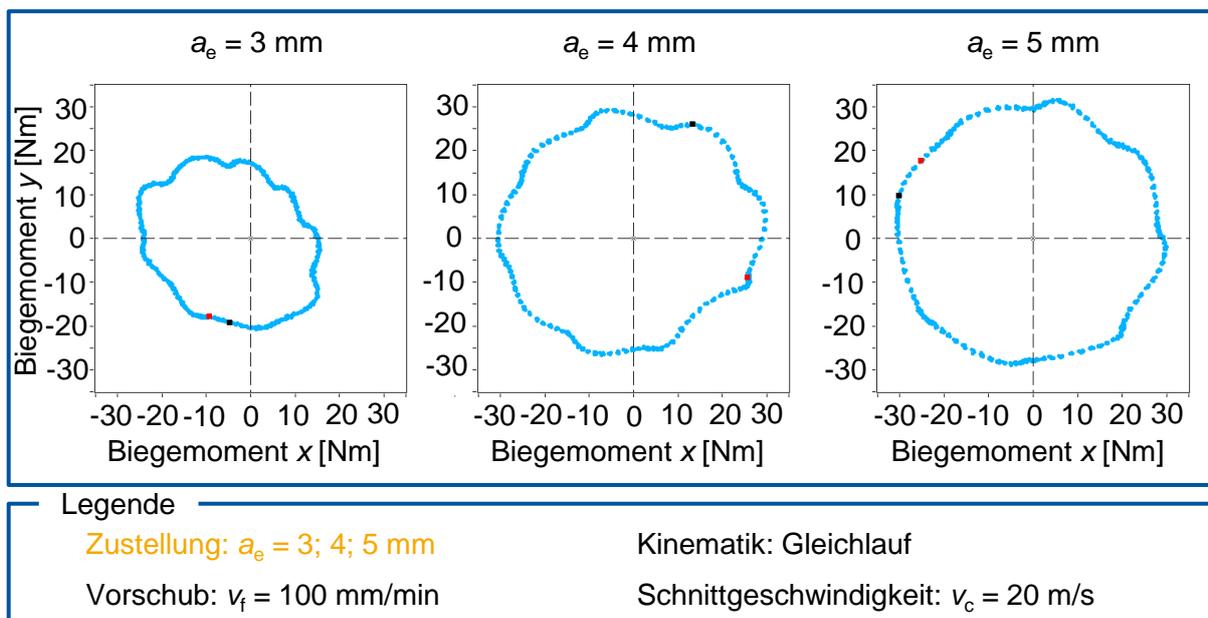


Abbildung 5.17: Polar Plots mit variierender Zustellung a_e

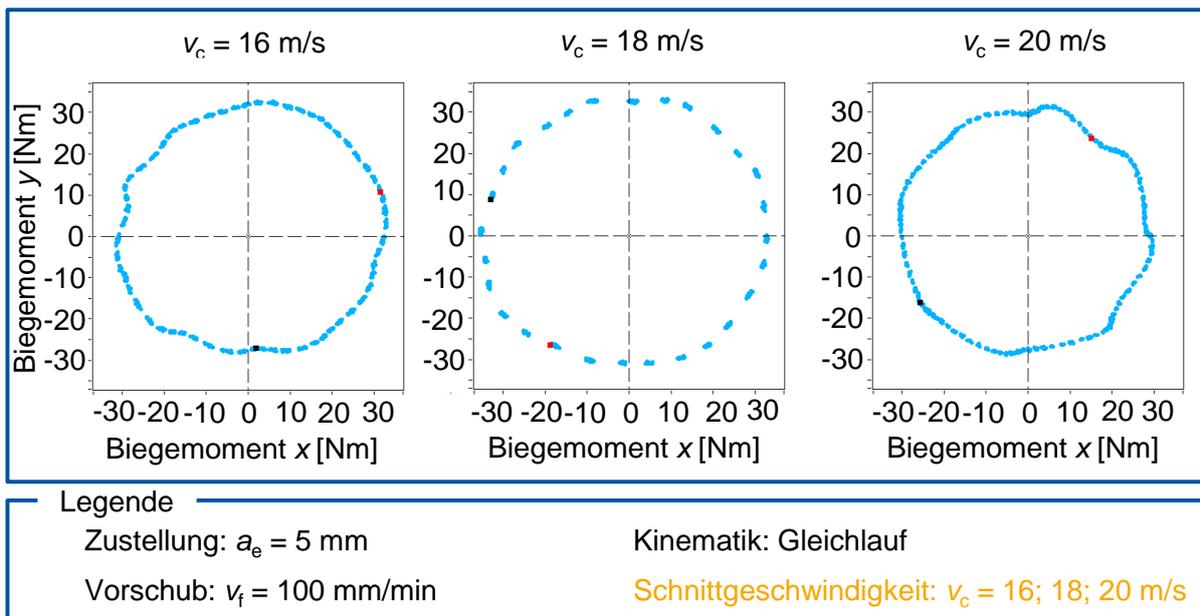


Abbildung 5.18: Polar Plots mit variierender Schnittgeschwindigkeit v_c

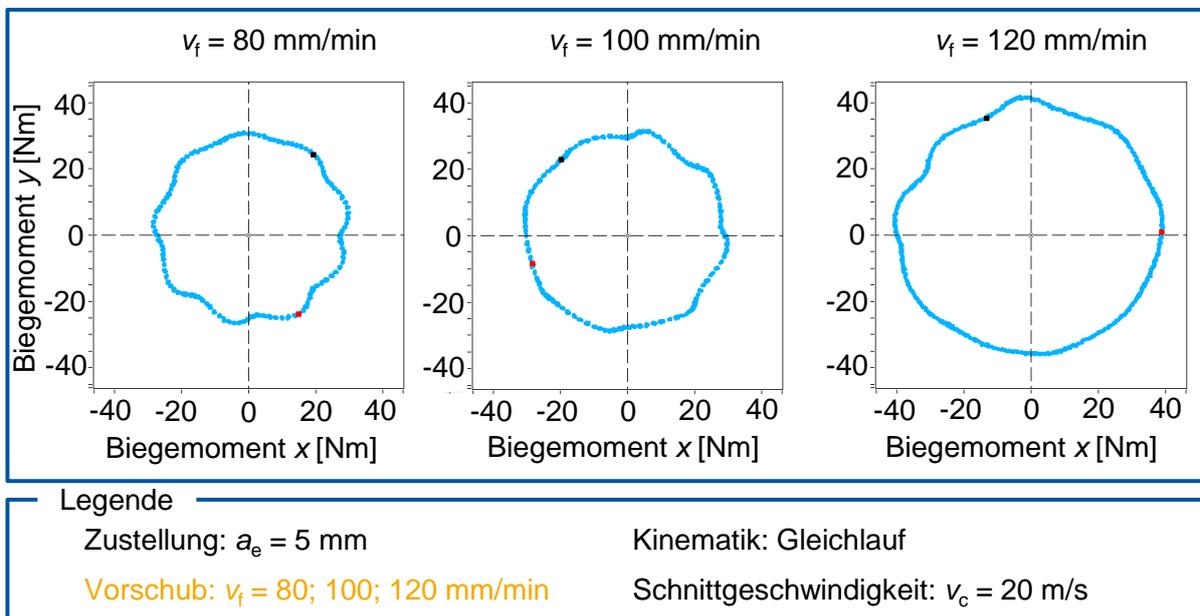


Abbildung 5.19: Polar Plots mit variierendem Vorschub v_f

5.6 Erfahrung mit dem Messsystem

Die Installation des spikes als Werkzeug- und Werkstückhalter erwies sich als einfach. Als Werkzeughalter muss er jedoch für jede Schleifscheibe einzeln montiert und gewuchtet werden, was den Einsatz mit unterschiedlichen Schleifscheiben erschwert. Werkstückseitig können verschiedene Spannfuttergrößen problemlos gewechselt werden. Die Tatsache, dass jeder spike einen eigenen Empfänger und Rechner benötigt, kompliziert den Einsatz in einer Maschine mit einem Schleifscheibenwechsler. Der Empfänger ist für ein gutes Funksignal direkt vor der Maschinentür zu platzieren. Große metallische Gegenstände in der direkten Verbindung zwischen Sensor und Empfänger sind zu vermeiden und würden den Einbau in den Schaltschrank der Maschine erschweren.

Die Programme spike Tool Measurement 2016 und spike Tool Analyser 2016 sind übersichtlich strukturiert und mit entsprechendem Grundwissen intuitiv bedienbar. Die Implementierung des Messsystems in den Ablauf des Schleifprozesses ist nicht trivial. Sie erforderte eine genaue zeitliche Abfolge der Aktivierung des Sensors und dem Start des Schleifprogramms an der Maschine. Die Aktivierung des Sensors und des Programms musste manuell erfolgen und war somit nicht exakt synchron für die einzelnen Messpunkte. Die Messzeitdauer konnte voreingestellt werden. Die "Trigger"-Funktion des Messsystems war leider für diese Versuchsreihe nicht brauchbar. Dies lag daran, dass der spike vor jedem Messpunkt neu tariniert beziehungsweise genullt werden musste, um die Temperaturdrift innerhalb des Sensors zu kompensieren. Zusätzlich haben Störquellen, wie zum Beispiel das Einschalten der Kühlschmierstoffanlage, das Messsystem zu früh oder zu spät aktiviert. Nach manueller Aktivierung des Sensors dauerte es circa fünf Sekunde bis der Sensor die Messung startete und eine Rückmeldung gab. Oft schlug diese fehl und der Versuchspunkt musste abgebrochen und wiederholt werden. Somit ist eine Prozessüberwachung, die in den Prozessregelkreis eingreift, indem sie die Messergebnisse diagnostiziert und die Antriebssteuerung so modifiziert, dass die Endprodukte in der Qualität und der Maßhaltigkeit immer die Gleichen sind, aktuell mit diesem System nicht möglich. Möglich wäre es, auf Basis der ermittelten Prozessgrößen sukzessive die Prozesseingangsgrößen, Zustellung Vorschub und Schnittgeschwindigkeit, so zu ändern, dass schlussendlich dieselbe Qualität der Werkstücke geschliffen wird.

6 Fazit und Ausblick

6.1 Fazit

Mit dem Prozessüberwachungssystem spike der pro-micron GmbH können Messdaten erfasst werden, die zur Auswertung des Schleifprozesses geeignet sind und zur Bewertung des Prozessergebnisses beitragen. Durch die Untersuchung der Schleifprozesse wurden Korrelationen zwischen den Prozesseingangsgrößen, den Prozesszustandsgrößen und den Prozessergebnisgrößen herausgearbeitet. Die Prozesseingangsgrößen Vorschub, Zustellung und Schnittgeschwindigkeit spiegeln sich in den gemessenen Prozesszustandsgrößen, dem Torsionsmoment und dem Biegemoment, wider. Die gemessene Axialkraft und Temperatur des Sensors wurden in dieser Versuchsreihe vernachlässigt, da diese Prozesszustandsgrößen für diesen Schleifprozess kinematisch nicht von Bedeutung sind. Die quantitativen Unterschiede zwischen den einzelnen Messpunkten sind im Biegemoment größer als die im Torsionsmoment. Dies gilt werkzeugseitig an der Schleifscheibe und wird geringfügig vom Schleifscheibendurchmesser und der Schleifscheibenausspannlänge beeinflusst. Werkstückseitig gilt dies jedoch nicht und muss je nach Werkstückgröße und -form neu betrachtet werden. Eine Kausalität wurde zwischen den beiden Biegemomenten festgestellt, welche von der Hebelarmlänge, Ausspannlänge der Schleifscheibe und dem Schleifpunkt am Werkstück abhängen. Eine Änderung des Vorschubs wurde werkzeugseitig als der ausschlaggebendste Einfluss auf das Biege- und Torsionsmoment identifiziert. Die Schnittgeschwindigkeit wurde durch das Torsionsmoment der Schleifscheibe abgebildet, wohingegen das Biegemoment kaum Änderungen aufwies.

Neben den Einflüssen der Prozesseingangsgrößen auf die Prozesszustandsgrößen besteht eine Korrelation zwischen den Prozesszustandsgrößen und dem Verschleiß der Schleifscheibe und der Oberflächengüte der geschliffenen WC-Co Hartmetallrohlinge. Mit steigendem bezogenen Zerspanungsvolumen nahm der Radialverschleiß der Schleifscheibe exponentiell zu. Dies ist jedoch auch auf das deutlich häufigere Schärfen am Ende der Versuchsreihe zurückzuführen. Proportional zum Radialverschleiß sank das Torsionsmoment. Der geringste Mittenrauwert wurde mit einem hohen Vorschub in Verbindung mit einer hohen Schnittgeschwindigkeit erreicht. Das Schärfen der Schleifscheibe bewirkte eine Abnahme des Torsionsmomentes an der Schleifscheibe. In der Überlagerung mit anderen Einflussgrößen, insbesondere der Vorschubänderung, wurde dieser Effekt aufgehoben.

6.2 Ausblick

Um die Korrelationen zwischen den Prozesseingangsgrößen, den Prozesszustandsgrößen und den Prozessergebnisgrößen, wie der Oberflächengüte, zu quantifizieren, müssen weitere Untersuchungen durchgeführt werden. Bei diesen müssen, neben den Einflüssen der betrachteten Prozesseingangsgrößen, weitere Faktoren, wie beispielsweise die Dauer des Schärfens, berücksichtigt und nach Möglichkeit konstant gehalten werden, um die Einflüsse der

Prozesseingangsgrößen zu identifizieren. Bei gleichbleibenden Prozesseingangsgrößen werden die Prozesszustandsgrößen geändert. Dies ist auf das Schärfen und den Radialverschleiß der Schleifscheibe zurückzuführen. Das Schärfen mit konstanter Dauer vor jedem Schleifprozess kann die Abweichungen der gemessenen Prozesszustandsgrößen reduzieren, geht jedoch wiederum mit einem höheren Verschleiß der Schleifscheibe einher. Um die Maßhaltigkeit der Werkstücke zu gewährleisten, muss der Verschleiß der Schleifscheibe und die Temperaturdrift der Maschine kompensiert werden. Der Einfluss der Umgebungstemperatur kann durch einen Klimaraum bei konstanter Raumtemperatur reduziert werden. Zusätzlich kann ein entsprechender Warmlauf der Maschine das Temperaturdelta während des eigentlichen Schleifprozesses senken und so einer Temperaturdrift und -hysterese der Maschinenachsen vorbeugen. Im nächsten Schritt könnten die gewonnenen Daten in den Prozessregelkreis eingebunden werden. Außerdem könnten mehrere Sensoren an eine Empfängereinheiten gekoppelt werden, um mehrere spikes an verschiedenen Schleifscheiben gleichzeitig verwenden zu können. Dies würde einen Einsatz mit einem Schleifscheibenwechsler erleichtern.

VI Literaturverzeichnis

- [BRIN06] Brinksmeier, E.; Aurich, J. C.; Govekar, E.; Heinzl, C.; Hoffmeister, H.-W.; Klocke, F.; Peters, J.; Rentsch, R.; Stephenson, D. J.; Uhlmann, E.; Weinert, K.; Wittmann, M. Advances in Modeling and Simulation of Grinding Processes. In: CIRP Annals. 55. Jg., 2006, 2, S. 667–696
- [CARL21] Heldt, E. Oberflächenparameter Poster, Carl Zeiss, 2021, S. 1
- [DIN02] DIN EN ISO 1302 (Juni 2002). Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Angabe der Oberflächenbeschaffenheit in der technischen Produktdokumentation
- [DIN03] DIN 8580 (September 2003). Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung
- [DIN10] DIN EN ISO 4287 (Juli 2010). Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit
- [DIN15] DIN ISO 525 (Februar 2015). Schleifkörper aus gebundenem Schleifmittel - Allgemeine Anforderungen
- [DIN95] DIN 1319-1 (Januar 1995). Grundlagen der Meßtechnik - Teil 1: Grundbegriffe
- [DIN96] DIN 1319-3 (Mai 1996). Grundlagen der Meßtechnik - Teil 3: Auswertung von Messungen einer einzelnen Meßgröße, Meßunsicherheit
- [FELD10] Feldmann, J. Körperschall-Messtechnik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010
- [FRIE02] Friemuth, T. Herstellung spanender Werkzeuge. Zugl.: Hannover, Univ., Habil.-Schr. (Reihe: Fortschritt-Berichte / VDI Reihe 2, Fertigungstechnik, Bd. 615). Als Ms. gedr.Aufl. Düsseldorf: VDI, 2002
- [KEFE18] Keferstein, C. P.; Marxer, M.; Bach, C. Fertigungsmesstechnik. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018
- [KLOC08] Klocke, F. Fertigungsverfahren 1. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008
- [KLOC17] Klocke, F. Fertigungsverfahren 2. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017
- [PART16] Parthier, R. Messtechnik. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016
- [TÖNS02] Tönshoff, H. K.; Friemuth, T.; Becker, J. C. Process Monitoring in Grinding. In: CIRP Annals. 51. Jg., 2002, S. 551–571
- [WECK06] Weck, M.; Brecher, C. Werkzeugmaschinen 3, Mechatronische Systeme, Vorschubantriebe, Prozessdiagnose. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006