

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 20270 N/2

Thema

Optimierung der CAM-Bahnplanung in der Fräsbearbeitung durch Grey-Box-Simulation von Werkzeugverschleiß

Berichtszeitraum

01.02.2019-31.01.2021

Forschungsvereinigung

1 Forschungsvereinigung Programmiersprachen für Fertigungseinrichtungen e.V. FVP

Forschungseinrichtung(en)

1 Forschungsvereinigung Programmiersprachen für Fertigungseinrichtungen e.V. FVP

2 Fraunhofer Gesellschaft e.V. Fraunhofer Institut für Produktionstechnologie IPT

Aachen, 30.07.2021

Ort, Datum



Michael Königs (FVP), Philipp Ganser (IPT)

Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und Projektleiter der
Forschungseinrichtung(en)

Gefördert durch:

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 20270 N/2

Thema

Optimierung der CAM-Bahnplanung in der Fräsbearbeitung durch Grey-Box-Simulation von Werkzeugverschleiß

Berichtszeitraum

01.02.2019-31.01.2021

Forschungsvereinigung

1 Forschungsvereinigung Programmiersprachen für Fertigungseinrichtungen e.V. FVP

Forschungseinrichtung(en)

1 Forschungsvereinigung Programmiersprachen für Fertigungseinrichtungen e.V. FVP

2 Fraunhofer Gesellschaft e.V. Fraunhofer Institut für Produktionstechnologie IPT

30.07.2021

Ort, Datum

Michael Königs (FVP), Philipp Ganser (IPT)

Name und Unterschrift aller Projektleitenden und Projektleiter der
Forschungseinrichtung(en)

Gefördert durch:

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 20270 N/2

Thema

Optimierung der CAM-Bahnplanung in der Fräsbearbeitung durch Grey-Box-Simulation von Werkzeugverschleiß

Berichtszeitraum

01.02.2019-31.01.2021

Forschungsvereinigung

1 Forschungsvereinigung Programmiersprachen für Fertigungseinrichtungen e.V. FVP

Forschungseinrichtung(en)

1 Forschungsvereinigung Programmiersprachen für Fertigungseinrichtungen e.V. FVP

2 Fraunhofer Gesellschaft e.V. Fraunhofer Institut für Produktionstechnologie IPT

Aachen, 30.07.2021

Ort, Datum

Michael Königs (FVP), Philipp Ganser (IPT)

Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und Projektleiter der
Forschungseinrichtung(en)

Gefördert durch:

Inhaltsverzeichnis

Kurvorstellung des Vorhabens	Seite 3
Einleitung	Seite 4
Literaturrecherche	Seite 6
Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse im Berichtszeitraum	Seite 8
Verwendung der Zuwendung	Seite 66
Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	Seite 66
Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft	Seite 67
Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts	Seite 69
Anhang	Seite 70
Literaturverzeichnis	Seite 73

Kurzvorstellung des Vorhabens:

Das **Forschungsvorhaben »CAMWear«** verfolgt als Ziel die Steigerung der Produktivität in der 5-Achs-Fräsbearbeitung durch Berücksichtigung des Werkzeugverschleißes bei der CAM-Planung auf Basis eines selbstlernenden Algorithmus.

Im Rahmen des Vorhabens soll der Demonstrator eines CAM-Moduls entwickelt werden, der auf Basis einer vorhandenen 5-Achs-Werkzeugbahn und weiteren technologischen Randbedingungen (z.B. Werkzeuggeometrie, Schneidstoff oder Werkstoff) den erwarteten Werkzeugverschleiß vorhersagen und darstellen kann (vgl. Abbildung 1). Das CAM-Modul kann anschließend genutzt werden, um die beschriebene iterative Auslegungsmethode nach dem Prinzip »Versuch und Irrtum« durch eine wissensbasierte Prozessauslegung zu ersetzen.

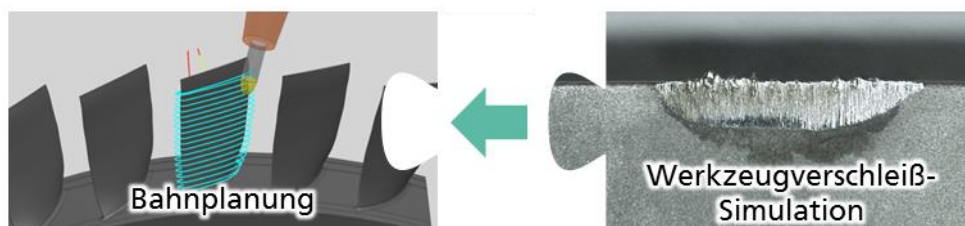


Abbildung 1: Lösungsansatz des Vorhabens »CAMWear«

Um das Hauptziel erreichen zu können, werden im angestrebten Projektvorhaben folgende vier Teilziele verfolgt:

- I. Modellierung des Werkzeugverschleiß bei der Fräsbearbeitung mit hoher Zuverlässigkeit der Vorhersage
- II. Ableitung von wissensbasierten Auslegungsregeln für die Fräsbearbeitung unter Berücksichtigung des Werkzeugverschleiß
- III. Bereitstellung einer Verschleiß-Visualisierung für die CAM-Planung der Fräsbearbeitung
- IV. Integration der Verschleißmodellierung in ein demonstratorisches CAM-Modul

Einleitung:

Verschleiß ist definiert als der fortschreitende Materialverlust aus der Oberfläche eines festen Körpers (Grundkörper), hervorgerufen durch Kontakt- und Relativbewegung eines festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörpers [1].

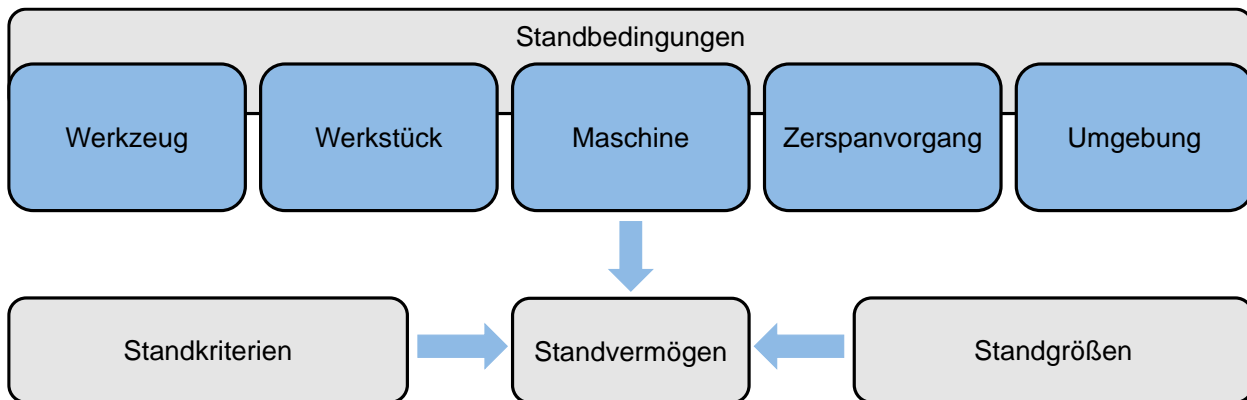


Abbildung 2: Einflüsse auf das Standvermögen von Zerspanungswerkzeugen [2]

Alleine das Werkzeug umfasst die Einflussfaktoren Schneidengeometrie, Schneidstoff, Werkzeugaufnahme und Werkzeugform. Die Schneidengeometrie wiederum umfasst verschiedene Winkel und Maße die die Schneide geometrisch definieren. Die Einflussfaktoren auf den Werkzeugverschleiß bzw. das Standvermögen des Werkzeugs sind entsprechend vielfältig, siehe Abbildung 3. Das gleiche gilt für die Auswirkungen von Werkzeugverschleiß. Die technologischen Nachteile und wirtschaftlichen Folgen von Werkzeugverschleiß sind am Beispiel des Fräsens in Abbildung 3 dargestellt. Die Nachteile umfassen Materialverschwendung, Zeitverschwendung und Qualitätsminderungen am Bauteil. Die Folgen von Werkzeugverschleiß sind erhöhte Werkzeug-, Ausschuss-, Nachbearbeitungs- und Maschinenkosten.



Abbildung 3: Nachteile und Folgen von Werkzeugverschleiß beim Fräsen

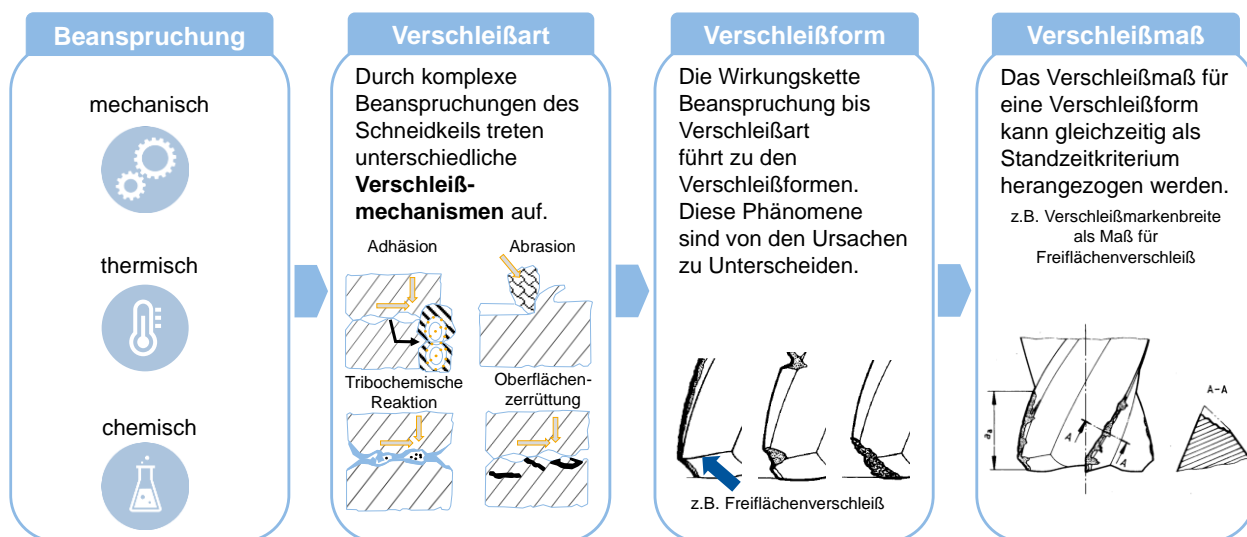


Abbildung 4: Terminologie der Wirkungskette von Zerspanungswerkzeugverschleiß [3]

Zur Quantifizierung des Verschleißes werden Verschleißmaße genutzt, die sich auf eine Verschleißform beziehen, welche sich wiederum aus einem Zusammenspiel verschiedener Verschleißmechanismen durch die physikalischen Beanspruchungen im Zerspanungsprozess ergibt, siehe Abbildung 4. Im Vorhaben CAMWear wird als Verschleißmaß die Verschleißmarkenbreite von Kugelkopfwerkzeugen genutzt. Diese beschreibt den Verschleiß auf der Freifläche des Werkzeugs, die Freifläche ist die von außen sichtbare Fläche, welche unmittelbar an der Werkzeugschneide selbst beginnt. Das Vorhaben zielt darauf ab ein Verschleißmodell auf Basis empirischer Daten zu bilden, dieses in ein CAM-System zu integrieren und zur Prozessoptimierung zu nutzen, siehe Abbildung 5.

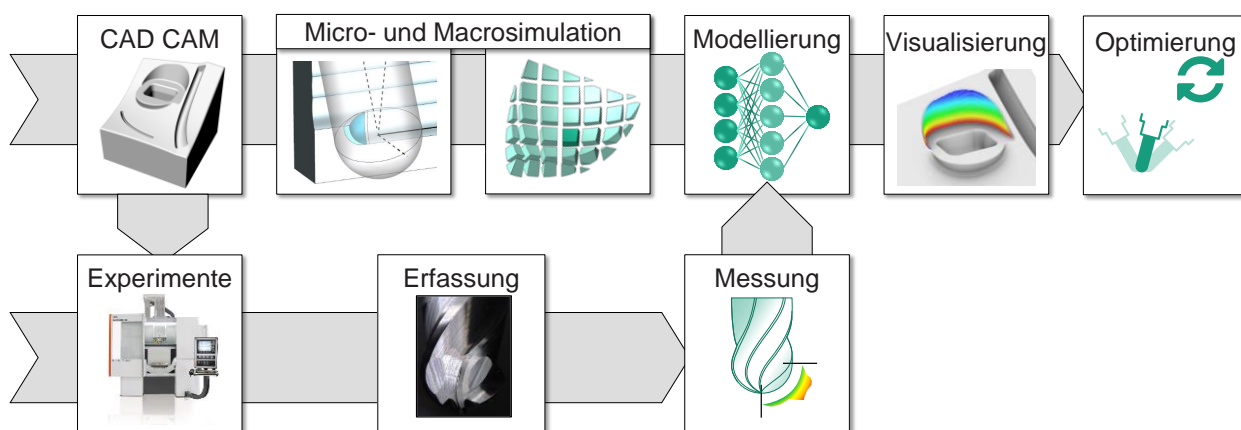


Abbildung 5: Übersicht der Tätigkeiten im Vorhaben CAMWear

Im Folgenden Abschnitt wird im Rahmen einer Literaturrecherche die historische Entwicklung der Forschung zum Thema Zerspanungswerkzeugverschleiß vorgestellt.

Des Weiteren werden aus den bestehenden Ansätzen zur Modellierung des Verschleißes beim Zerspanen die Defizite abgeleitet.

Literaturrecherche:

Die Entwicklung des Werkzeugverschleißes während eines Zerspanungsprozesses hängt, wie oben beschrieben, von mehreren Bedingungen ab: Den Werkstoffeigenschaften von Werkstück und Werkzeug, der Werkzeuggeometrie sowie den Schnittparametern, wie z. B. der Schnittgeschwindigkeit ein [4,5]. Weitere Einflussfaktoren sind Kühlschmierstoffe, Prozessschwingungen sowie die Geometrie und Eigenschaften des Werkstücks [2]. Im letzten Jahrhundert wurden zahlreiche Versuche unternommen, Modelle für den Werkzeugverschleißverlauf in der Zerspanung zu finden. Diese Versuche teilen sich in zwei Hauptkategorien auf: empirische Standzeitgleichungen (ESG) und differentielle Werkzeugverschleißmodelle (DWM) [6]. Erstere geben Abhängigkeiten der Werkzeugstandzeit von Schnittparametern wie der Schnittgeschwindigkeit v_c an. Ihr Zweck ist eine Abschätzung der Standzeit für die industrielle Anwendung in engen Band von Parametern und Randbedingungen. Letztere zielen darauf ab, das Wachstum einer Verschleißform, wie z. B. Freiflächenverschleiß, durch einen physikalischen Ansatz mit den vermutlich dominanten Verschleißmechanismen zu modellieren. Modelleingangsgrößen sind häufig Materialeigenschaften, Schnittparameter und physikalische Konstanten. Der Zweck dieser physikalisch inspirierten differentiellen Modelle ist hauptsächlich die Werkzeugauslegung und die Grundlagenforschung, die eine Erklärung und bzw. oder eine Vorhersage des Phänomens Werkzeugverschleiß anstrebt.

Tabelle 1: Werkzeug Spezifikationen

Jahr	Author/en	Typ	Eingangsgrößen, Methoden (Auszug)	Quelle
1906	Taylor	ESG	Schnittgeschwindigkeit	[7]
1956	Trigger, Chao	ESG	Härte, Normalkraft	[8]
1963	Takeyama	DWM	Temperatur, Kontaktzeit	[9]
1971	Quinn	DWM	Kontaktfläche, Temperatur	[10]
1978	Koren	DWM	Härte, Werkzeugwinkel	[11]
1979	Hastings	ESG	Temperatur	[12]
1984	Usui	DWM	Schnittgeschwindigkeit, Normalspannung	[13]
2004	Yen	DWM	FEM 2D + Usui	[14]
2008	Attanasio	DWM	FEM 3D + Takeyama	[15]

Obwohl die in Tabelle 1 dargestellten Ansätze zu den meist zitierten in der Forschung zum Verschleiß von Zerspanungswerkzeugen zählen, ist eine fundierte Theorie des Zerspanungswerkzeugverschleißes nicht bekannt [6]. Die Ansätze bis zum Jahre 1984, mit Ausnahme von Taylor, benötigen mehrere Eingabeparameter, die nicht ohne hohen Aufwand zu erhalten sind. Eine mögliche Erklärung hierfür sind die zahlreichen Einflussfaktoren und komplexen Wechselwirkungen der physikalisch-chemischen Mechanismen, die beim Zerspanungsprozess eine Rolle spielen. Dies könnte der Grund sein, warum diese Ansätze von der Industrie noch nicht genutzt werden. In den letzten Jahren wurden Versuche unternommen, Werkzeugverschleißratenmodelle mit Finite-Elemente-Methoden (FEM) zu kombinieren [6,14,15]. Die Temperaturen und Kräfte aus numerischen FEM-Simulationen des Zerspanungsprozesses dienen als Eingangsgröße für ein solches Modell. Die berechnete Volumenabnahme des Werkzeugverschleißratenmodells wird zur Aktualisierung der Geometrie der Schneide genutzt, die für die nächste Iteration in das FEM Modell gegen wird. Voraussetzung für die Anwendung der FEM in der Zerspanung ist neben dem hohen Rechenaufwand ein Materialmodell zur Beschreibung des Werkstoffverhaltens im Zerspanungsprozess. Die Johnson-Cook-Konstitutivgleichung beispielsweise benötigt vier Materialkonstanten, zwei Dehnungsparameter und die Schmelzpunkttemperatur des Werkstoffs. Die Bestimmung der meisten dieser Parameter erfordert sorgfältige Grundlagenversuche. Angesichts schwankender Materialchargen ist ein hoher Aufwand erforderlich, um die Materialmodelle zu erstellen, die für numerisch-empirische Werkzeugverschleißmodelle benötigt werden. Ein weiterer zukünftiger Ansatz zur Modellierung des Werkzeugverschleißes könnten atomare Simulationen sein, die darauf abzielen, die Physik der tribologischen Phänomene zu modellieren [16]. Es ist noch nicht machbar, diese Technologie auf reale Probleme wie die Metallzerspanung anzuwenden. Andere Forscher wenden Kurvenanpassungsmethoden auf Paare von Prozessparametern und die Breite der Verschleißmarkenbreite an. Diese Methode erfordert eine große Menge an Eingabedaten und damit aufwendige Experimente, dies konnte auch im Vorhaben CAMWear bestätigt werden [17,18]. Die Gründe für eine fehlende, industrielle Adoption der bisher in der Literatur behandelten Zerspanwerkzeugverschleißmodelle könnten folgende sein:

1. Aufwändige Erzeugung / Messung von Modelleingangsparametern, wie z.B. Materialeigenschaften oder Prozesszustandsgrößen.

2. Eine in den CAD-CAM-Workflow integrierte Simulation für die interaktive Human-in-the-Loop-Optimierungen während der Prozessplanung wurde nicht berücksichtigt und umgesetzt.

3. Es werden hauptsächlich skalare Werte als Verschleißmaß genutzt, zudem findet keine Lokalisierung des auftretenden Verschleißes entlang der Schneidkante statt, mit Ausnahme der rechenintensiven FEM-Ansätzen.

Innerhalb des Vorhabens CAMWear konnten die oben genannten Punkte durch die Entwicklung einer Methode zur CAD-CAM-Workflow-integrierten, orts aufgelösten Modellierung des Verschleißes anhand von geometrischen Spanparametern aus einer dixel-basierten Eingriffssimulation adressiert werden.

1. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse im Berichtszeitraum

Für jedes (Sub-)Arbeitspaket wird im Folgenden ein inhaltlicher Überblick gegeben. Dabei weisen die Überschriften jeweils auf die Beteiligungen der Forschungseinrichtungen an den jeweiligen Arbeitspunkten hin. Die inhaltlich hauptverantwortliche Forschungsstelle, welche mehrheitlich an den Arbeiten mitgewirkt hat, ist dabei jeweils hervorgehoben.

1.1 Definition des Projektlastenhefts (IPT, FVP)

Angestrebte Ziele: Das Arbeitspaket AP1 dient der Definition und Dokumentation der produktionstechnologischen Rahmenbedingungen als Vorbereitung für die Entwicklung der Verschleißmodellierung.

Durchgeführte Arbeiten:

AP1.1 Definition der Demonstrator-Bauteile, des Materials und der Werkzeuge

AP1.2 Ermittlung von Möglichkeiten zur funktionalen Erweiterung von CAM-Systemen

AP1.3 Planen und Einfahren der definierten Demonstrator-Prozesse sowie Ist-Analyse und Dokumentation des Fertigungsprozesses

AP1.1 Definition der Demonstrator-Bauteile, des Materials und der Werkzeuge

Der Werkstoff 1.2343 wurde in einer Befragung von 20 Technikern aus Werkzeugbaubetrieben durch das Fraunhofer IPT als der meistverwendete Werkstoff genannt. Der im Werkzeugbau üblicher Warmarbeitsstahl (X38CrMoV5-1) Werkstoff wird nach EN 10027-2:1992-09 mit der Nummer 1.2343 bezeichnet, gemäß der Richtanalyse weist er einen 5,05 %-igen Chrom-Gehalt sowie einen Molybdänzusatz von 1,18 % auf. Der Warmarbeitsstahl besitzt gute Warmfestigkeitseigenschaften sowie eine hohe Warmzähigkeit und Temperaturwechselbeständigkeit. Da 1.2343 durchgehärtet werden kann, eignet er sich besonders für Werkzeuge zur Verarbeitung von Leichtmetall-Legierungen durch Strangpressen und für Druckgussformen, Kerne und Auswerfer in der Leichtmetallverarbeitung und für Presswerkzeuge verwendet. Mithilfe des Geräts Wilson Hardness UH 250 am Fraunhofer IPT konnte die Härte auf 53 HRC bestimmt werden. Die Wahl des Werkstoffs mit entsprechender Härte deckt sich mit den Umfrageergebnissen des WZL und des IPT beim jährlich stattfindenden Wettbewerb „Excellence in Production“ an dem Werkzeugbaubetriebe aus ganz Deutschland teilnehmen, siehe Abbildung 6.

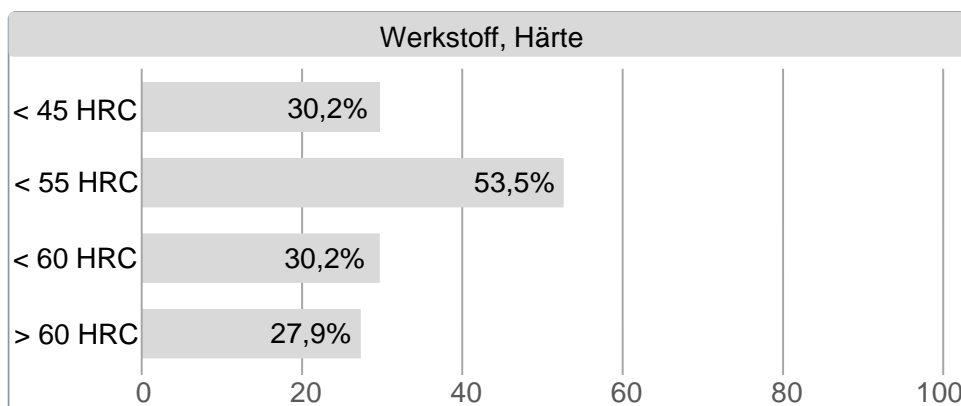


Abbildung 6: Meistgenutzte Werkstoffhärten im Werkzeugbau 2020 [19]

Innerhalb eines Workshops wurde neben dem Werkstoff auch der einzusetzende Werkzeugtyp gewählt. Die Auswahl fiel auf den Typ Kugelkopf, da diese Art Fräswerkzeug zumeist zur Schlichtfräsbearbeitung eingesetzt wird, welche einen hohen Einfluss auf das Bearbeitungsergebnis in Form von geometrischer Genauigkeit sowie Oberflächenqualität hat.

Aus den oben genannten Rahmenbedingungen wurde das Demonstrator-Bauteil sowie der zu verwendende Werkzeugdurchmesser abgeleitet. Der Demonstrator, siehe

Abbildung 7, zeichnet sich durch verschiedene Flächen und Flächenübergänge aus, die den flächigen Features von Bauteilen im Formen- und Werkzeugbau angelehnt sind.

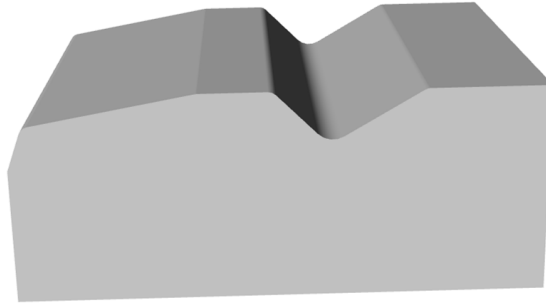


Abbildung 7: Geometrie des Demonstratorbauteils

Als Fräswerkzeug dient ein Vollhartmetall Kugelkopffräser Sphero-XF mit einem Durchmesser von zwölf sowie später sechs Millimetern der Firma Fraisa SA, siehe Abbildung 8. Die Spezifikationen des Werkzeuges sind in Tabelle 2 gegeben.



Abbildung 8: Sphero-XF Kugelkopffräswerkzeug

Tabelle 2: Werkzeug Spezifikationen

Spezifikation	Wert
Typ	Kugelkopf
Material	Vollhartmetall
Beschichtung	X-Al
Durchmesser	$D_1 = 6-12 \text{ mm}$
Radius Rundlauf toleranz	$r = \pm 0.005 \text{ mm}$
Zähnezahl	$z = 2$
Helix Winkel	30°
Spanwinkel	$\gamma = -10^\circ$
Freiwinkel	$\alpha = 0^\circ$

AP1.2 Ermittlung von Möglichkeiten zur funktionalen Erweiterung von CAM-Systemen

Es existieren eine Vielzahl an CAM-Systemen am Markt. Von den eingesetzten Systemen dominiert im Werkzeugbau in Deutschland keines merklich. Spitzenreiter sind Visi CAM mit etwa 18 % Marktanteil und Cimatron mit etwa 16 % Marktanteil. Danach kommen NX (11 %), Tebis (9 %), Solid CAM (7 %), Desp CAM (7 %), PTC Creo (7 %) und CATIA (5 %) [19]. Über eine SDK zur einfachen Erweiterbarkeit des CAM-Kerns verfügt keines der Systeme, da der Berechnungskern zumeist von Spezialisten wie ModuleWorks gestellt wird. Durch eine intensive Recherche und Gespräche mit der Industrie wurde letztendlich ein CAD-Programm mit entsprechenden Funktionalitäten identifiziert: Um die notwendige Erweiterbarkeit des CAM-Systems mit eigens entwickelten Funktionalitäten zu gewährleisten wird das NURBS-basierte (Non-Uniform Rational Basis Spline) CAD-Software-System (Rhino 6) mit integriertem CAM-Modul genutzt (Moduleworks Berechnungskern). Rhino 6 zeichnet sich neben den geringen Lizenzgebühren durch eine besondere Eigenschaft aus: Aufgrund einer offenen Entwicklerschnittstelle ist der Nutzer in der Lage in einer visuellen Skriptsprache oder mithilfe von eingebundenem Code eigene Funktionalitäten hinzuzufügen. Das offene Software Development Kit (SDK) verfügt über einen eingebundenen grafischen Algorithmeneditor, somit können Funktionalitäten aus Eigenentwicklungen sowie Plugins von Dritten integriert werden. Durch die Wahl dieses CAM-Systems ist ein modularer Aufbau von Algorithmen möglich und die Übertragbarkeit der Softwareentwicklungen ist gegeben. Im Vorhaben werden Untersuchungen und Entwicklungen daher zunächst in Rhino 6 umgesetzt. Später erfolgt dann auch demonstratorische Anbindungen an kommerzielle CAM-Systeme, um die industrielle Übertragbarkeit aufzuzeigen.

AP1.3 Planen und Einfahren der definierten Demonstrator-Prozesse sowie Ist-Analyse und Dokumentation des Fertigungsprozesses

Unter Zuhilfenahme des CAM-Berechnungskerns, der CAD-Geometrie und dem gewählten Werkzeug wurde ein Prozess entwickelt und eingefahren (Abbildung 9):

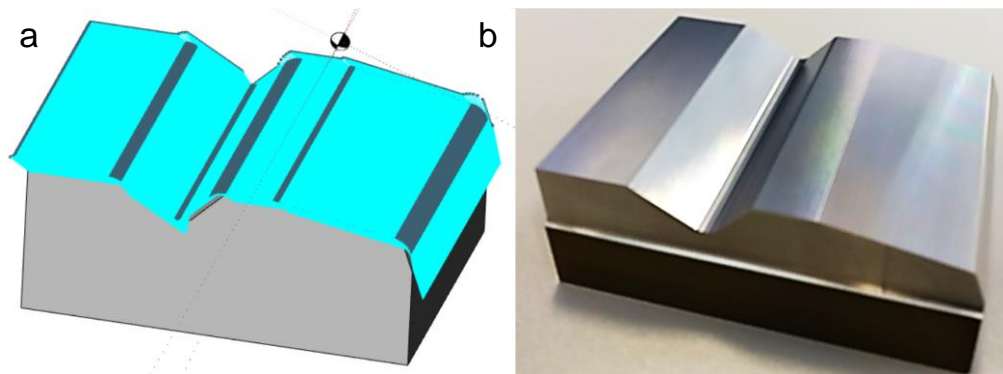


Abbildung 9: Prozessplanung im CAM System (a), Bearbeitetes Demonstrationsbauteil (b)

Dieser Prozess dient als Basisprozess für die weiteren Entwicklungen und den Aufbau des anwendungsspezifischen Verschleißmodells. Es wurde, wie in der Industrie üblich, mit einer Referenzachse für die Anstellung des Werkzeugs gearbeitet. Dadurch ergeben sich während der Bearbeitung unterschiedliche reale Anstell- und Voreilwinkel.

Der Prozess so wie alle folgenden Experimente und Prozesse wurden auf einer fünfachsiggen Fräsmaschine vom Typ GF Mikron HPM 800 UHD mit einer Werkzeugaufnahme HSK-A63 und einem Werkzeughalter mit Hydrodehnspannfutter unter trockenen Schnittbedingungen durchgeführt (Abbildung 10).

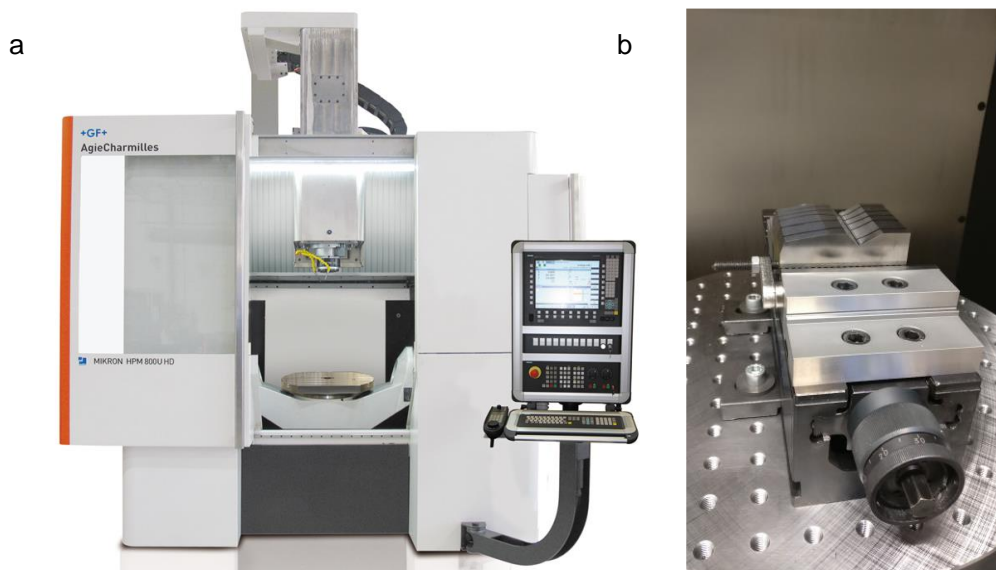


Abbildung 10: Fünfachsigge Fräsmaschine Mikron HPM 800 UHD (a), eingerichtete Maschine mit Demonstrationsbauteil (b)

Erfüllungsgrad: AP1.1 bis 1.3

1.2 Entwicklung des Verschleißmodells (IPT, FVP)

Angestrebte Ziele: Im Rahmen von Arbeitspaket AP2 wird das Vorhersage-Modell für den Werkzeugverschleiß beim Fräsen erarbeitet.

Durchgeführte Arbeiten:

AP2.1 Erzeugung der Datenbasis für die Verschleißmodellierung

AP2.2 Verschleißberechnung mittels Eingriffssimulation

AP2.3 Umsetzung eines selbstlernenden Modells für die Verschleißvorhersage

AP2.4 Verifikation und Validierung des Gesamtmodells

AP2.5 Ableitung und Umsetzung von Optimierungspotenzialen für das Verschleißmodell

AP2.1 Erzeugung der Datenbasis für die Verschleißmodellierung

Grundlagenversuche - Die Verschleißversuche wurden aus dem Prozess aus AP1 abgeleitet. Zu diesem Zweck wurde ein Algorithmus zur Analyse von NC-Programmen für Fräsoptionen entwickelt, dieser wird in folgenden Kapiteln detailliert vorgestellt. Aus der Analyse der Werkzeugbahnplanung des Prozesses konnten Grundlagenexperimente (Blockfräsen) abgeleitet werden die anschließend auf der Fräsmaschine experimentell durchgeführt wurden. Diese Vorgehensweise wurde gewählt, um eine möglichst generische und übertragbare Modellerstellung zu gewährleisten. Zur Untersuchung des Verschleißzustandes der Fräswerkzeugschneiden kam ein Keyence VHX6000 Digitalmikroskop zum Einsatz, siehe Abbildung 11.

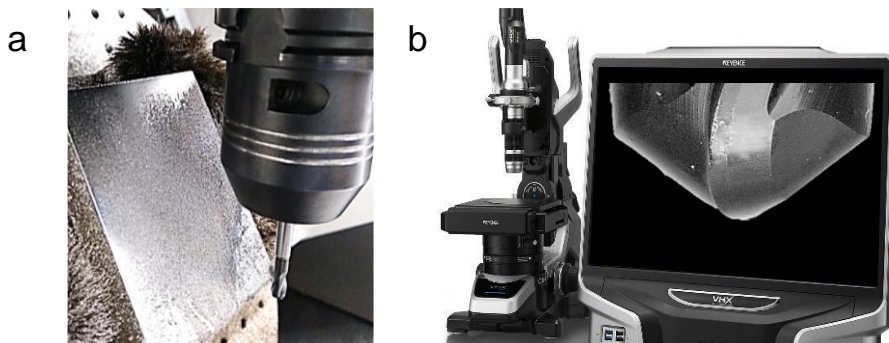


Abbildung 11: Grundlagenversuch (a), Keyence VHX6000 Digitalmikroskop (b)

Linearisierung der Verschleißkurve - Zur Vereinfachung des Werkzeugverschleißverlaufs wird eine lineare Gleichung ohne Offset angewandt. Diese Annahme wird

anhand von 16 exemplarischen Werkzeugverschleißversuchen aus früheren Blockfräsversuchen in Warmarbeitsstahl X38CrMoV5-1 (1.2343) mit Kugelkopffräsern (Sphero-XF) mit 12 mm Durchmesser veranschaulicht. Unter trockenen Bedingungen umfassten diese Zerspanungsversuche folgende Parameter: $v_{c,th} = 400-500$ m/min, $a_e = 0,3-0,5$ mm, $a_p = 0,3-0,5$ mm, $f_z = 0,075-0,150$ mm, $\beta_{fn} = 60^\circ$. Wie in Abbildung 12 zu sehen ist, ergibt die Linearisierung der Verschleißkurve eine gute Annäherung an den beim Blockfräsen auftretenden Verschleiß:

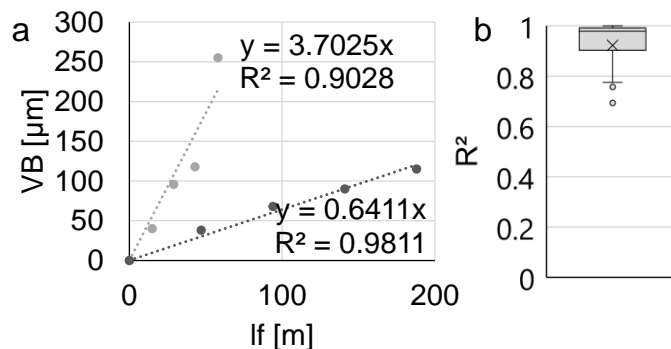


Abbildung 12: Linearisierte Verschleißkurven eines Schlichtprozesses (a), Boxplot der Bestimmtheitsmaße linearisierter Verschleißkurven von 16 Fräsexperimenten (b)

Das mittlere Bestimmtheitsmaß beträgt $R^2 = 0,9$, was auf eine gute Kurvenanpassung hinweist. Diese Näherung sollte nur beim (Vor-)Schlichtfräsen bis zu VB -Werten von etwa 300 μm angewendet werden. Die Literatur unterstützt diese Annahme beim Schlichtfräsen ebenfalls für weitere Werkstoffe wie Inconel718 (2.4668) und Stahl C45 (1.0503) bei der Bearbeitung mit Kugelkopfwerkzeugen aus Hartmetall [23,24].

Vereinfachung durch Gauss-Kurven - Die Verschleißdaten und die Eingriffsdaten werden mit Gauß-Verteilungen komprimiert, siehe Gleichung 1, um die Skalierbarkeit auf verschiedene Simulations- und Messeinstellungen zu gewährleisten.

$$g(x) = g_{\max} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(x - \mu)^2}{\sigma^2}\right) \quad (1)$$

Dabei ist g_{\max} der Maximalwert der Gausskurve, μ dessen Lage in Bezug zur Werkzeugspitze und σ die Standardabweichung der Gausskurve. Mikroskopische Verschleißbilder werden mit Deep Learning zur semantischen Segmentierung auf Basis

von U-Net [1,25] verarbeitet. Wie in Abbildung 13 sichtbar, kann die Breite der Verschleißmarke auf der Freifläche, VB, entlang der Werkzeugachse gemessen werden.

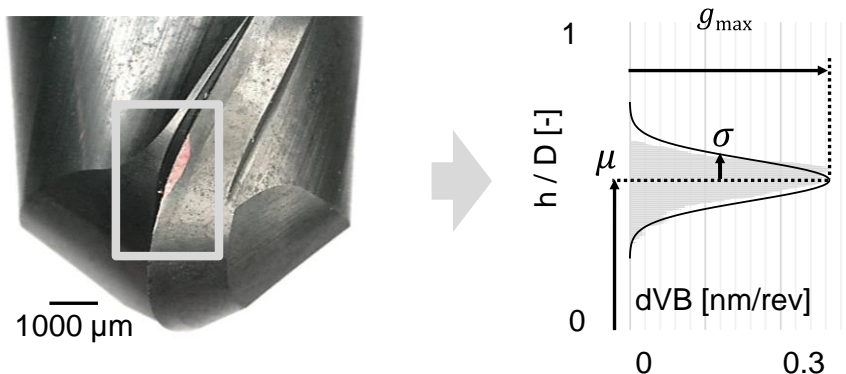


Abbildung 13: Gauss-Methode zur Parametrisierung der Verschleißverteilung

Die Gauss-Methode reduziert mehrere hundert Werte auf drei Parameter. Anstatt mit absoluten Verschleißwerten zu arbeiten, wird die Verschleißrate pro Schnitt (d.h. pro Spindelumdrehung) dVB, berechnet, siehe Abbildung 13. Dies macht das Modell einfach einsetzbar für spätere Berechnungen von Verschleiß entlang des Werkzeugwegs mit Daten aus der Eingriffssimulation. Die Normalisierung des Werkzeugachsenmaßes h mit dem Werkzeugdurchmesser D ermöglicht vermutlich die Verwendung von Verschleißmodellparametern über ein Spektrum von Werkzeuggrößen. Die grafische Darstellung der dVB Kurven von allen 16 Experimenten befindet sich im Anhang.

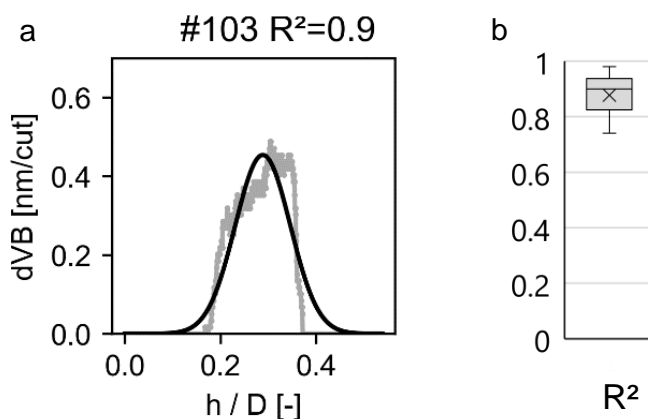


Abbildung 14: Parametrisierung der Verschleißrate eines Fräsexperiments (a), Boxplot der Bestimmtheitsmaße parametrisierter Verschleißraten von 16 Fräsexperimenten (b)

Wie in Abbildung 14 dargestellt, ergibt die Approximation mit Normalkurven ein mittleres Bestimmtheitsmaß von $R = 0,9$ für die Verschleißrate (einzelnes Beispiel a und Boxplot für alle 16 Experimente b), was als erfolgreiche Kurvenanpassung interpretiert wird.

Einige Abweichungen ergeben sich durch unregelmäßige Verschleißmuster, die auf die statistische Natur der Werkzeugverschleißverteilungen zurückzuführen sind. Die Randbereiche der Gausskurven werden bei zwei Sigma abgeschnitten, um in einem späteren Schritt die Qualität des Fits zu erhöhen. Die Verschleißratenparameter für die 16 Experimente sind in Tabelle 3 gegeben.

Tabelle 3: Verschleißparameter nach Gauss-Methode von 16 Grundlagenexperimenten

Operation	$g_{\max,W}$	μ_W	σ_W
101	0.157386	0.270309	0.036873
102	0.089736	0.248217	0.049755
103	0.454303	0.288226	0.057513
104	0.320132	0.244641	0.05982
105	0.461108	0.318944	0.054103
106	0.505574	0.302782	0.054963
107	0.551684	0.310793	0.036956
108	0.252014	0.302017	0.053879
109	0.426778	0.276756	0.046542
110	0.698793	0.302776	0.033044
111	0.464542	0.27916	0.034108
112	0.31984	0.146953	0.050319
201	0.025468	0.189318	0.022999
202	0.014415	0.246122	0.035406
204	0.232273	0.168164	0.035692
205	0.032383	0.181399	0.038558

AP2.2 Verschleißberechnung mittels Eingriffssimulation

Anhand einer dextral-basierten Eingriffssimulation wurden die durchgeführten Verschleißversuche simulativ nachgestellt. Dabei wird als Eingangsgrößen das Werkstück als CAD-Datei, die Werkzeugbahnplanung als CAM-Datei sowie die Werkzeugendaten (wie Durchmesser und Zähnezahl) benötigt. Die Simulationssoftware berechnet den geometrischen Eingriff und die Eingriffsgrößen entlang der Werkzeugachse bzw. entlang des Werkzeugumfangs. Somit sind die Eingriffskenngrößen Spannungslänge, Spannungsdicke und Spannungshöhe diskretisiert entlang der Werkzeugachse bekannt, siehe Abbildung 15.

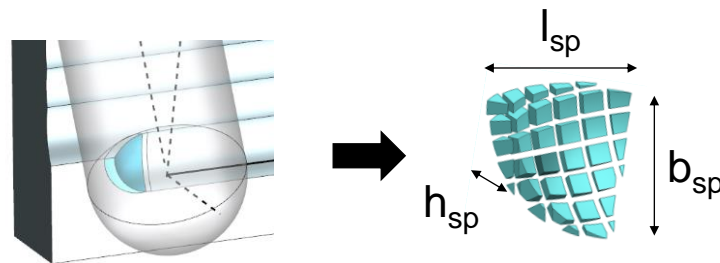


Abbildung 15: Schematische Darstellung ungeschnittener Span und Eingriffskenngrößen

Zudem wird durch die Eingriffssimulation die Kennzahl Eingriffe pro Zahn berechnet welche zur Erfassung der Belastungshistorie eines Werkzeugs notwendig ist.

Minimalbeispiele zur Reduzierung der Simulationszeiten - Die Simulation einer Schlichtoperation bedarf aufgrund der benötigten Auflösung für die kleinen Spanungsgrößen lange Rechenzeiten und hat einen Speicherplatzbedarf der auf üblichen Rechnern nicht gegeben ist. In der Grundkonfiguration wird jeder einzelne Span berechnet, was bei Blockfräsoperationen nicht zielführend ist da die meisten Späne identisch sind. Es wurde daher ein Ansatz gewählt, bei dem an einem Minimalbeispiel simulativ die Eingriffsbedingung des Grundlagenversuchs berechnet wird, siehe Abbildung 16.

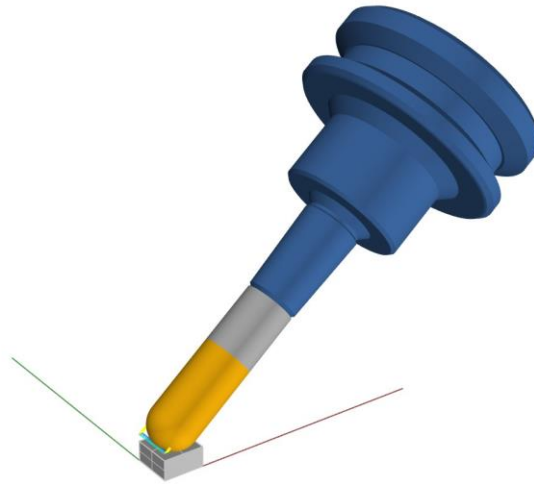


Abbildung 16: Methode zur Erzeugung von Eingriffskennwerten mit reduzierter Rechenzeit anhand von Minimalbeispielen der Grundlagenexperimente

Um werkstückseitige Diskretisierungsfehler bei der Simulation der Eingriffskennwerte auszuschließen wurden mindestens drei parallele Bahnen simuliert und lediglich ein Eingriff in der Mitte des Minimalbauteils zur Bestimmung der Spanungsparameter gewählt. Dies ist für Operation 101 anhand der maximalen Spannungsdicke veranschaulicht (Abbildung 17):



Abbildung 17: Konvergenz des Eingriffsparameters Spandicke für ein Minimalbeispiel

Auf der Abbildung ist zu erkennen, dass bezüglich der Spannungsdicke weder Änderungen innerhalb der dritten Bahn noch im Vergleich zur vorherigen Bahn auftreten. Somit ist sichergestellt, dass Einlauffehler und Diskretisierungsfehler vermieden werden und somit keinen Einfluss auf die Ermittlung der Eingriffskennwerte unter Zuhilfenahme der vorgestellten Methode, der Minimalbeispiele von Grundlagenversuche fürs Blockfräsen, haben.

Vereinfachung durch Gauss-Kurven - Zur Reduzierung der Eingangsparameter des Modells wurde das Spannungsvolumen auf Basis der Spanungsgeometrie wie folgt berechnet. Dabei sind die Indizes wie in Abbildung 18 definiert.

$$V_{sp} = \sum_i \left(l_{sp,i} \cdot H_{slice} \cdot \frac{1}{j} \cdot \sum_j \bar{h}_{sp,j} \right) \quad (2)$$

In Gleichung 2 steht V_{sp} für Spannungsvolumen, l_{sp} für Spannungslänge, H_{slice} für die Höhe der einer diskretisierten Scheibe und \bar{h}_{sp} für die mittlere Spannungsdicke, siehe schematische Zeichnung in Abbildung 15.

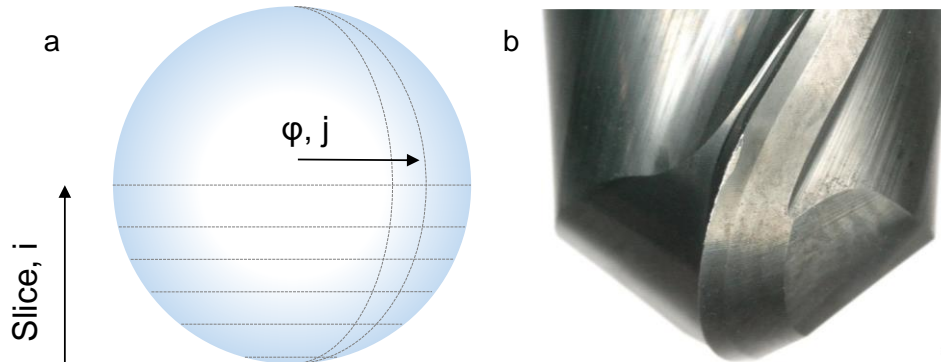


Abbildung 18: Darstellung der Werkzeugdiskretisierung (a), Kugelkopffräser (b)

Wie in AP2.1 bereits für die Verschleißrate beschrieben, wurde auch das Spannungsvolumen mit der Gauss-Methode vorverarbeitet. Das mittlere Bestimmtheitsmaß beträgt ebenfalls etwa $R = 0,9$ (einzelnes Beispiel a und Boxplot über alle 16 Experimente b). Eine Fehlerquelle bei der Anwendung dieser Methode ist die Dreiecksform des Spannungsvolumens weshalb keine Bestimmtheitsmaße jenseits der 90 % erreicht werden, siehe Abbildung 19. Die Volumenparameter für die 16 Grundlagenexperimente sind in Tabelle 4 gegeben.

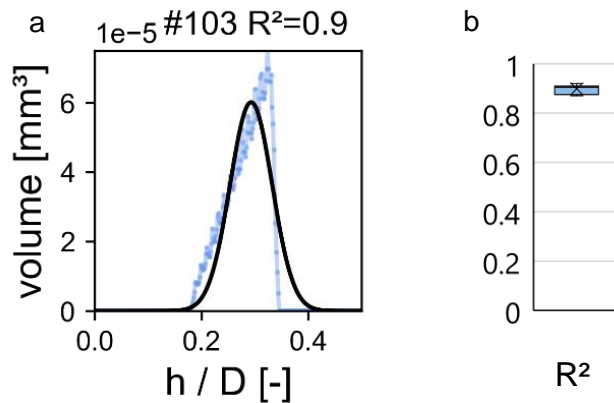


Abbildung 19: Parametrisierung des Spanvolumens eines Fräsexperiments (a), Boxplot der Bestimmtheitsmaße parametrisierter Spanvolumen von 16 Fräsexperimenten (b)

Tabelle 4: Spanvolumenparameter nach Gauss-Methode von 16 Grundlagenexperimenten

Operation	$g_{\max,V}$	μ_V	σ_V
101	0.000984885	0.265566675	0.028806021
102	0.000984885	0.265566675	0.028806021
103	0.00300927	0.292606713	0.039313679
104	0.003334514	0.258751037	0.02972813
105	0.001896455	0.297129692	0.039546816
106	0.004304344	0.289764064	0.039386127
107	0.003003963	0.29255499	0.039244561
108	0.001292663	0.300402246	0.039677063
109	0.002361848	0.261594607	0.029449055
110	0.00191081	0.297396206	0.039628426
111	0.003335297	0.258571415	0.029574576
112	0.001435822	0.262591016	0.02907581
201	0.00039354	0.18959615	0.022925973
202	0.000394295	0.18981629	0.022838099
204	0.000396874	0.189850414	0.022824822
205	0.000395868	0.190489213	0.022894251

AP2.3 Umsetzung eines selbstlernenden Modells für die Verschleißvorhersage

Zur Umsetzung eines selbstlernenden Modells soll ein Greybox Modell aufgebaut werden. Dieses setzt sich zusammen aus einem White-box Modell und einem Black-box Modell. White-box Modelle sind beispielsweise geometrische Berechnungen oder Gleichungen erster Ordnung. Black-box Modell hingegen sind intransparent, wie zum Beispiel neuronale Netze, und werden auf Basis von vorliegenden Daten angepasst. Die

Strukturierung der Gewichtungsmatrix eines Black-box Modells findet in der sogenannten „Trainingsphase“ statt. Es existieren verschiedene Methoden Greybox Modelle zu verschalten. Im vorliegenden Falle wird auf eine serielle Verschaltung zurückgegriffen, bei der das White-box Modell die Eingangsgrößen des Black-box Modells erzeugt.

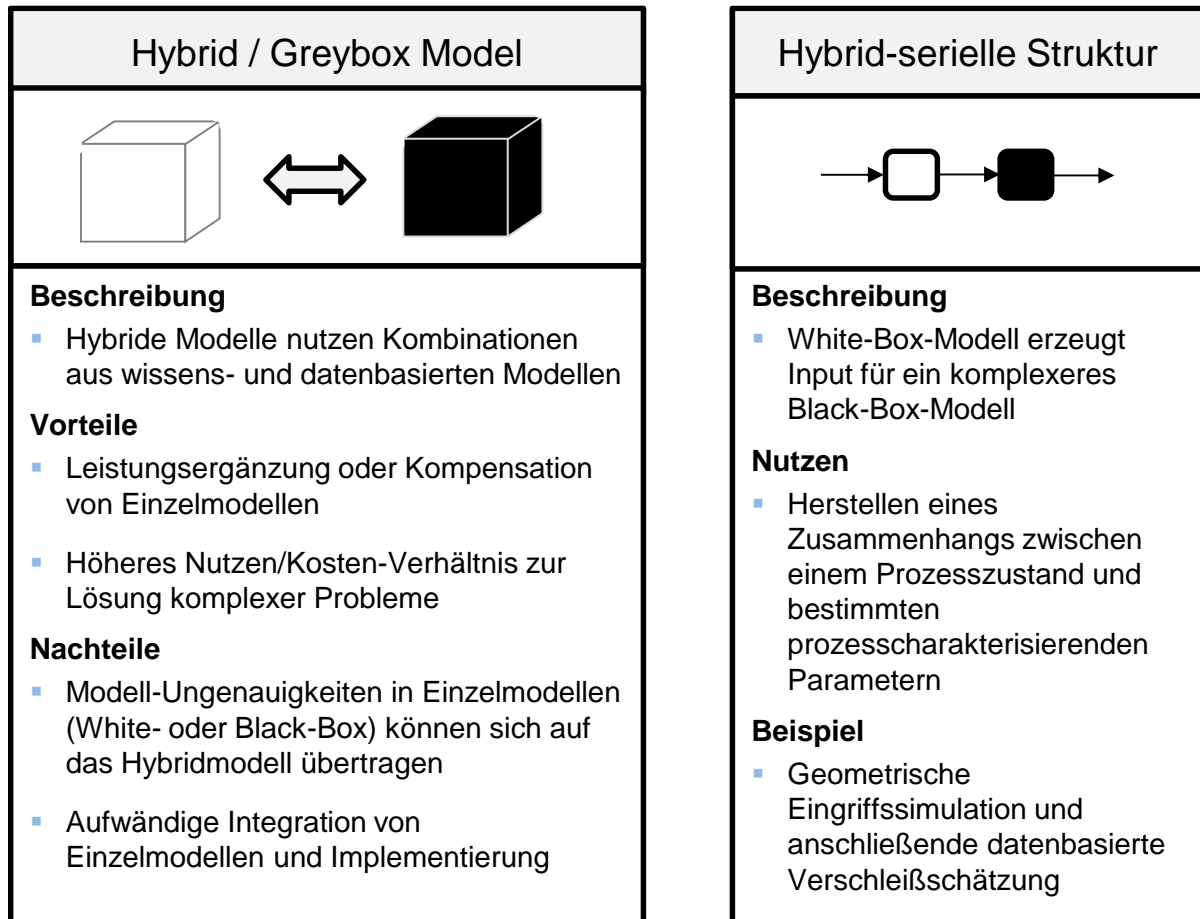


Abbildung 20: Beschreibung, Vorteile und Nachteile der Greybox Modellierung und der zu hybrid-serieller Greybox Struktur

Zur Berechnung der Verschleißparameter auf Basis der Volumenparameter wurde zunächst ein Multi-Layer-Perceptron (MLP) trainiert, um einen Selbstlernenden Ansatz zu testen, wie im Projektplan vorgeschlagen. Das MLP wurde mit vier Eingangs- und drei Ausgangsgrößen trainiert, siehe Abbildung 20.

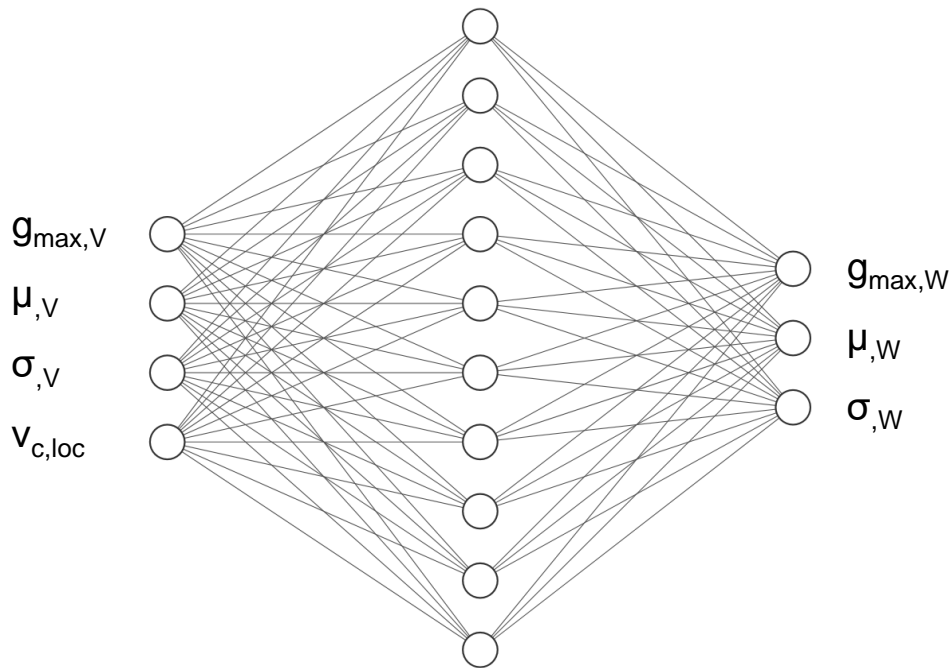


Abbildung 21: Multi-Layer-Perceptron (MLP) zur Modellierung der Verschleißratenparameter auf Basis der Spanvolumenparameter und der technologischen Schnittgeschwindigkeit

Dabei wurde als Eingangsgröße die lokale Schnittgeschwindigkeit, $v_{c,loc}$, ergänzt, um neben dem Ort und Volumen des Spans auch den Einfluss unterschiedlicher Schnittgeschwindigkeiten im Modell zu berücksichtigen. Eine randomisierte Teilmenge der Versuchsdaten von 20% wurde als Validationsdatensatz während des Trainings genutzt. Zudem wurde anhand eines Testdatensatzes, bestehend aus drei Operationen, die während des Trainings nicht eingesetzt wurden, die Güte des Modells geprüft. Leider konnte auf Basis der vorliegenden Daten kein zufriedenstellendes Ergebnis erreicht werden. Der mittlere absolute prozentuale Fehler (MAPE) zwischen Simulation und Experiment in Höhe von mindestens 50 % lässt keine zuverlässige Prädiktion des Verschleißes zu.

AP2.5 Ableitung und Umsetzung von Optimierungspotenzialen für das Verschleißmodell (zeitlich getauscht mit AP2.4)

Aufgrund der nicht zufriedenstellenden Ergebnisse wurde innerhalb eines Workshops eine neue Vorgehensweise erarbeitet. Da die arbeitsintensive Erstellung von Datensätzen für die Verschleißprädiktion, wie in den Kapiteln 2.1 und 2.2, nicht den entsprechenden Nutzen verspricht, wurde ein Konzept zur zielgerichteten Prädiktion von Werkzeugverschleiß für eine spezifische Bearbeitungsaufgabe erstellt. Dieses Konzept beinhaltet folgende Schritte und ist schematisch in Abbildung 22 dargestellt:

1. Identifikation von Clustern mit ähnlichen Eingriffsbedingungen anhand der CAD- und NC-Dateien nach der CAM-Planung. Es ist keine Simulation notwendig was zur Reduzierung von Rechenzeiten führt.
2. Lokale begrenzte dixel-basierte Eingriffssimulation der identifizierten Cluster. Durch diesen Schritt werden die Spanungsparameter berechnet.
3. Berechnung des Volumens aus den diskretisierten Spanungsparametern mit anschließender Bestimmung der Gauß-Parameter.
4. Selektive Grundlagenexperimente zur Generierung von Werkzeugverschleiß bei den Eingriffsverhältnissen der identifizierten Cluster.
5. Messung der Werkzeugverschleißfläche als Funktion der Werkzeughöhe während der Grundlagenexperimente.
6. Bestimmung der Verschleißparameter anhand der vorgestellten Gauss-Methode.
7. Modellanpassung der Verschleißparameter anhand der Volumen-Parameter.
8. Berechnung des Verschleißes entlang des Werkzeugwegs für den Demonstrationsprozess.
9. Visualisierung des akkumulierten Verschleißes entlang der Schneidkante und des Werkzeugwegs, um eine Optimierung durch den CAM-Bediener zu ermöglichen.

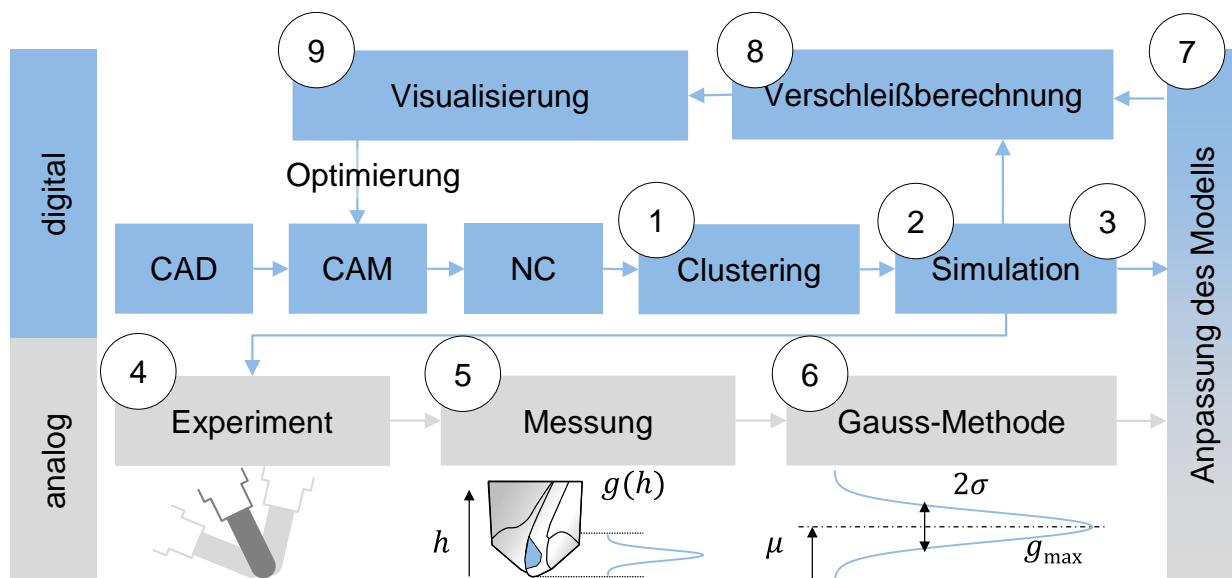


Abbildung 22: Schematische Darstellung des entwickelten Konzepts zur zielgerichteten Erstellung von Modellen zur Verschleißprädiktion für CAM-Systeme

Die vorgestellte Methode hat die folgenden Vorteile:

Komplexität - Die Überlagerung dieser Gaußschen Kurven ermöglicht die Berechnung von Werkzeugverschleißfeldern in komplexeren Zerspanungsvorgängen. Die Gaußanpassung von Werkzeugverschleißflächen benötigt jedoch nur drei Parameter zur Beschreibung der in den Grundlagenversuchen akkumulierten Verschleißfläche an der Werkzeugschneide.

Unabhängig - Die Methode ist nicht von Material- oder Kraftparametern abhängig, die weitere Grundlagenexperimente und Messgeräte erfordern.

Skalierbar - Die Normalverteilung erlaubt einen beliebig hohen Grad an Diskretisierung und Präzision der Simulation sowie eine hohe Variabilität in der Messauflösung und liefert eine zufriedenstellende Anpassung sowohl für das unbearbeitete Spanvolumen als auch für die Werkzeugverschleißrate, siehe Kapitel 2.1 und 2.2.

Integrierbar - Für die Human-in-the-Loop-Optimierung lässt sich das Modell leicht in einen integrierten CAD-CAM-Simulations-Workflow zur benutzerfreundlichen Visualisierung implementieren.

Kostengünstig - Die lokal begrenzte Eingriffssimulation ermöglicht die Berechnung auf handelsüblichen PCs, insbesondere bei großen Operationen.

Linearisiert - Durch Linearisierung des Werkzeugverschleißverlaufs wird die Verschleißrate für eine bestimmte Eingriffssituation als konstant angenommen.

Neben der neu entwickelten Vorgehensweise wurde der Demonstrationsprozess aufgrund von Interesse aus dem Konsortium hin zu einem kleineren Werkzeugdurchmesser und feineren Schlichtparameter geändert. Eine Darstellung des Prozesses ist in Abbildung 23 gegeben.

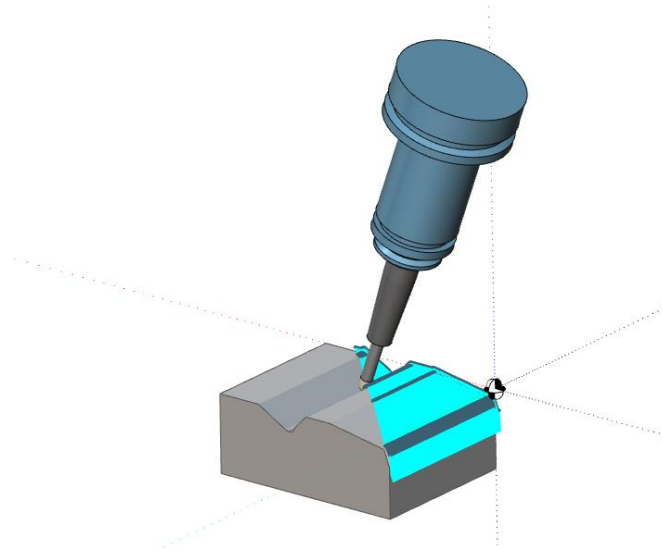


Abbildung 23: Simulation der CAM-Bahnplanung des Demonstrationsprozesses

Vorverarbeitung zur Clusterung - Zur Umsetzung der in Abbildung 22 beschriebenen Schritte 1-9 sind diverse Rechenschritte notwendig. Im ersten Schritt soll eine Clusterung der Fräsoption nach Eingriffsbedingungen stattfinden, ohne dass eine Eingriffssimulation notwendig ist. Dazu wird zunächst angenommen, dass bei gleichbleibender Zustellung die Anstellung des Werkzeugs in Bezug zur Oberfläche die notwendige Information zur Clusterung nach Eingriffsverhältnissen enthält. In der Zerspanung wird zur Beschreibung der Anstellung des Werkzeugs in Bezug zur Oberfläche mit zwei Winkeln gearbeitet:

1. Der Voreilwinkel β_f (engl. lead angle) beschreibt die Neigung des Werkzeugs zwischen der Oberflächennormalen des Werkstücks und Werkzeugachse in Richtung der Vorschubbewegung. Dabei wird bei einem positiven Winkel von einem Ziehschnitt

gesprochen, da das Werkzeug voreilt und der Werkzeugkopf hinterhergezogen wird¹. Das Gegenteil ist der sogenannte Bohrschnitt.

2. Der Anstellwinkel oder „Sturz“ β_m (engl. tilt angle of cutter) beschreibt die Neigung des Werkzeugs zwischen Werkzeugachse und der Normalen von Vorschubvektor und Oberflächennormale des Werkstücks. Vereinfacht gesagt die Neigung des Werkzeugs nach rechts und links in Bezug zur Fräsrichtung. Wenn die Spitze des Werkzeugs in Richtung der zu bearbeitenden parallel liegenden nächsten Bahn zeigt, ist dieser Winkel als positiv definiert.

Zur Berechnung dieser Winkel an jedem NC Punkt sind also die Vorschubvektorkomponenten, die Komponenten der Oberflächennormalen des Werkstücks sowie die Achsvektorkomponenten des Werkzeugs nötig. Die Information zur Oberflächennormalen ist in der CAD-Geometrie (stl-Datei) enthalten. Die Information zum Vorschubvektor und zur Werkzeugachse sind im NC-Code der Bearbeitungsaufgabe (txt-Datei) enthalten. Zunächst wird die die NC Datei vorverarbeitet, um überflüssige Information, wie Bewegungen im Eilgang, zu entfernen. Übrig bleiben lediglich die translatorischen Koordinaten X, Y, Z des Tool Tip Point (TTP) sowie die rotatorischen Koordinaten A, B, C für jeden NC Punkt. Aus den translatorischen und rotatorischen Koordinaten der einzelnen NC Punkte lässt sich die Differenz in allen drei Raumrichtungen, also die jeweilige Komponente des Vorschubvektors sowie des Werkzeugachsvektors, zwischen zwei NC Punkten berechnen. Die Oberflächennormalen an jedem NC Punkt werden durch die Normale am räumlich nächsten Punkt im Oberflächennetz der stl-Datei angenähert. Der Voreil- und Anstellwinkel kann entsprechend der oben beschriebenen Rechnung geometrisch bestimmt werden. In einem letzten Schritt wird je Winkel die Differenz zwischen zwei NC Punkten berechnet, sodass sich die Änderung des jeweiligen Winkels ergibt. Durch die Änderung des Winkels zwischen jedem NC Punkt sollten jeder NC Punkt einem Cluster zugeordnet werden können, welcher ähnliche Eingriffsbedingungen wie die ebenfalls dem Cluster zugehörigen NC Punkte aufweist.

Clusterung der Werkzeugbahn - Zur Clusterung, vergleiche Abbildung 22 Schritt 1, wird ein K-Means-Algorithmus verwendet. Dieser clustert Daten, indem er darauf abzielt,

¹ Die in der Aufzählung genannten Definitionen positiver bzw. negativer Winkel ist nicht allgemeingültig, sondern bezieht sich explizit auf die Implementierung des ModuleWorks Berechnungskern in der CAD Software Rhino6. Im Wörterbuch der CIRP, einem geachteten Standard in der Produktionstechnik, ist der Voreilwinkel beispielsweise andersherum definiert.

Stichproben in Gruppen gleicher Varianz aufzuteilen und dabei ein Kriterium zu minimieren, das als Trägheits- oder Intra-Cluster-Quadratsumme bekannt ist. Bei diesem Algorithmus muss die Anzahl der Cluster vor der Berechnung angegeben werden. Er skaliert gut auf eine große Anzahl von Stichproben durch die Möglichkeit den Algorithmus auf mehreren CPU-Kernen zu Parallelisieren und zeichnet sich daher durch kurze Rechenzeiten aus. Der Algorithmus teilt eine Menge von n Datenpunkten in C Cluster ein, die jeweils durch den Mittelwert μ der Stichproben im Cluster beschrieben werden. Die Mittelwerte werden üblicherweise als Cluster-Zentroide bezeichnet. Der K-Means-Algorithmus zielt darauf ab, Zentroide zu wählen, die das o.g. Kriterium innerhalb des Clusters minimieren, siehe Gleichung 2.

$$\sum_{i=0}^n \min_{\mu_j \in C} (\|x_i - \mu_j\|^2) \quad (3)$$

Es gilt zu prüfen, ob die entwickelte Methode der Clustering von Werkzeugbahnen bei unterschiedlicher Prozessplanung ähnliche Ergebnisse erzeugt. Diese kann anhand folgender Abbildung 24 gezeigt werden. Es kommt dabei auf die Verteilung der Cluster auf der zu bearbeitenden Oberfläche an. Wie in der Abbildung 24 zu erkennen ist, werden bei verschiedener Prozessplanung die gleichen lokalen Cluster identifiziert (die unterschiedliche, randomisierte Farbgebung spielt hier keine Rolle). Damit ist die Methode der Vorverarbeitung und der Clustering geeignet, gleichbleibende Ergebnisse bei der Identifizierung von Eingriffsbedingungen zu produzieren.

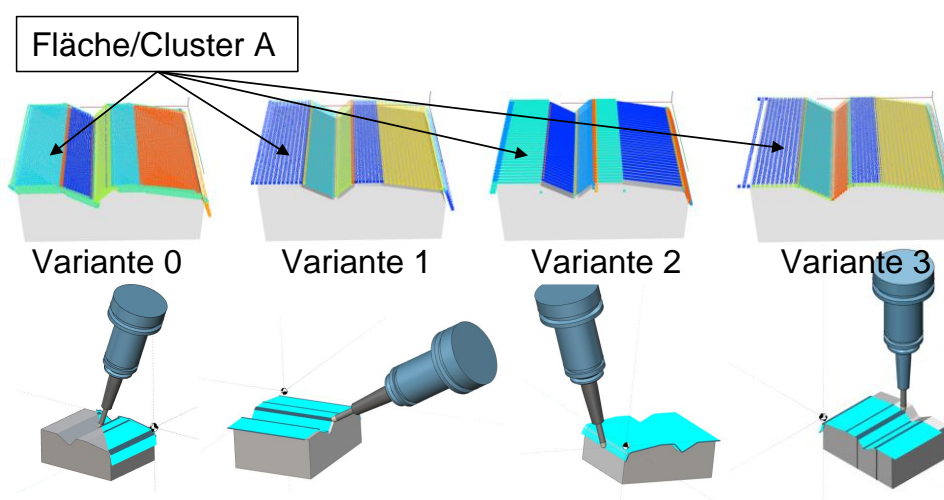


Abbildung 24: Übereinstimmung beim Clustering (Beispielhaft Cluster A) der Werkzeugbahn für verschiedene CAM-Strategien zum Schlichten des Demonstrationsbauteils

Für den Demonstrationsprozess ist die in Abbildung 23 gezeigte Bahnplanung ausgewählt worden. Diese wurde in einem Workshop entwickelt und ausgewählt. Bezugnehmend auf Abbildung 22 kann im Anschluss an das Clustern die Simulation der Minimalbeispiele durchgeführt werden, siehe Abbildung 25. Somit liegen für den Demonstrationsprozess die hauptsächlich auftretenden Eingriffsbedingungen für die weitere Verarbeitung vor.

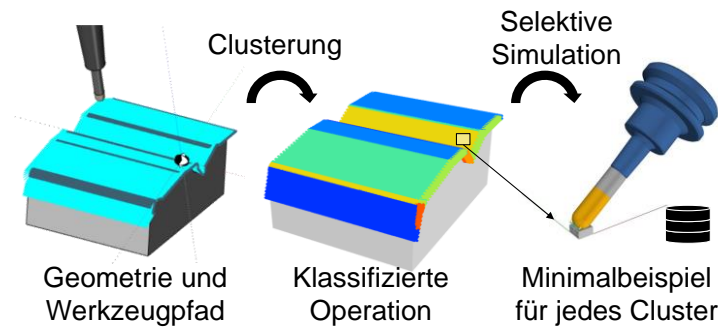


Abbildung 25: Vorgehensweise zur Berechnung der Eingriffskennwerte mithilfe der entwickelten Clustering- und Minimalbeispielmethode

Auf Basis einer Analyse können diejenigen Cluster bzw. Eingriffsverhältnisse identifiziert werden, welche beim angestrebten Prozess am häufigsten auftreten. Aus den gefundenen Clustern lassen sich drei Cluster mit der höchsten Anzahl des Auftretens und einem Abstand von 20 Grad zur Werkstückgeometrie ableiten. Diese Bedingungen repräsentieren den größten Teil der Eingriffe. Um die erforderlichen Werkzeugverschleißdaten für die ausgewählten Cluster zu erhalten, werden Grundlagenversuche durchgeführt.

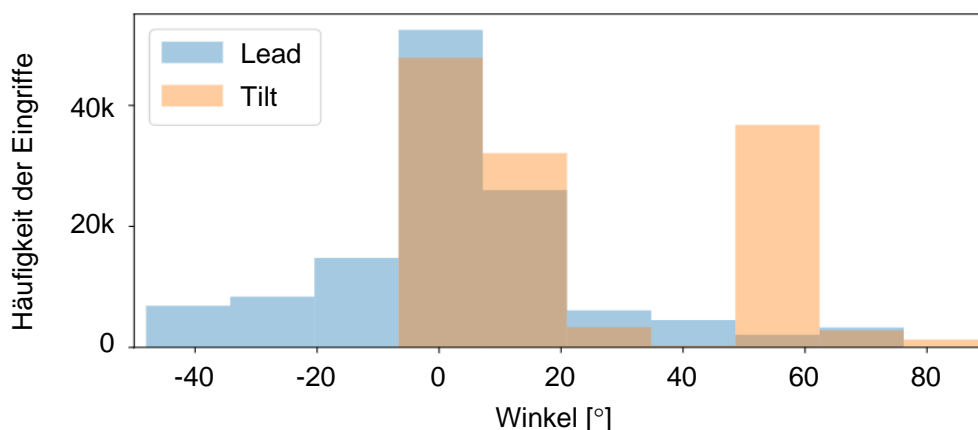


Abbildung 26: Verteilung des Anstell- (Tilt) und Voreilwinkels (Lead) beim Demonstrationsprozess
Grundlagenversuche – Im Folgenden sind in Bezugnahme auf Abbildung 22 die Schritte 4-6 beschrieben. Details zur Gauss-Methode sind bereits in Kapitel 1.2 erläutert.

Für den verfolgten zielgerichteten Ansatz in AP2.5 wurde ein Sphero-FX Kugelkopf Werkzeug mit sechs Millimetern Durchmesser gewählt. Die Prozessparameter für das Schlichten des Demonstratorbauteils wurden wie in Tabelle 5 gezeigt festgelegt.

Tabelle 5: Prozessparameter für den Demonstrationsprozess und die entsprechenden Grundlagenversuche.

Parameter	Wert
Theoretische Schnittgeschwindigkeit	$v_{c,th} = 300 \text{ m/min}$
Vorschub pro Zahn	$f_z = 0.05 \text{ mm}$
Schnitttiefe	$a_p = 0.1 \text{ mm}$
Bahnabstand	$a_e = 0.2 \text{ mm}$

Das Werkstück für die Grundlagenversuche wurde aus demselben Rohstück erodiert, das später für das Demonstratorbauteil verwendet wurde. Das Material ist Warmarbeitsstahl X38CrMoV5-1 (1.2343) mit HRC 53, gemessen auf einem Wilson-Härtegerät UH 250. Alle Versuche wurden auf einem fünfschigen Bearbeitungszentrum Mikron HPM 800U HD mit einer Maschinensteuerung Sinumerik 840D sl unter trockenen Schnittbedingungen durchgeführt. Neben den Prozessparameter in Tabelle 6 wurden die aus dem Clusterprozess identifizierten Anstellwinkel (Tilt) von 0° , -20° und -60° bei einem Voreilwinkel (Lead) von 0° berücksichtigt. Die in den Versuchen ermittelten Gauss-Parameter sind in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6: Verschleißparameter nach Gauss-Methode von 16 Grundlagenexperimenten

$\beta_{fn} [^\circ]$	$g_{max,W} [\text{nm/cut}]$	$\mu_w [h/D]$	$\sigma_w [h/D]$
0	0.01195122	0	0.00833
-20	0.02544715	0.0575	0.01625
-60	0.00914634	0.2688	0.3375

Modellierung - Unter Bezugnahme auf Abbildung 22 werden im Folgenden die Schritte sieben und acht behandelt. Um die Werkzeugverschleißrate als Funktion des ungeschnittenen Spanvolumens zu modellieren, sind zwei Annahmen und eine Regression notwendig. Es wird angenommen, dass die Lage des Spitzenwertes μ und die Standardabweichung σ für Verschleißrate und Volumen etwa identisch sind. Für die

drei durchgeführten Grundlagenexperimente ergibt der R^2 -Wert zur linearen Anpassung dieser Werte sowohl für die Position des Spitzenwertes als auch für die Standardabweichung 0,99. Dies ist ausreichend, um die Annahmen zu stützen. Das Modell benötigt zwei Eingabewerte, die Spitze der Gauß-Kurve für das Volumen $g_{max,V}$ und die mittlere Geschwindigkeit des Spannungskennfelds $v_{c,mean}$, und hat einen Ausgabewert, die Spitze der Gauß-Kurve für die Verschleißrate $g_{max,W}$. Die Geschwindigkeit wurde hinzugenommen, um neben dem Einflussfaktor der Zerspangkraft, hier stellvertretend durch das Spannungsvolumen berücksichtigt, auch die Temperatur im Schnitt, in Form der Schnittgeschwindigkeit, zu berücksichtigen. Aufgrund des negativen quadratischen Verhältnisses von Geschwindigkeit und Gaußschem Verschleißmaximum im untersuchten Bereich, sowie der linearen Abhängigkeit von Volumen und Gaußschem Verschleißmaximum, wurde eine parabolische Zylindergleichung zur Modellierung gewählt, siehe Gleichung 4.

$$g_{max,W} = a \cdot g_{max,V} + b \cdot v_{c,mean} + c \cdot v_{c,mean}^2 \quad (4)$$

Die Modellparameter ergeben sich zu $a = -1,308e03$, $b = 4,513e-04$ und $c = -1,398e-06$. Die Visualisierung der Verschleißentwicklung auf Basis des Modells, also in Bezug auf Abbildung 22 der letzte Schritt des neu entwickelten Konzepts, wird in Kapitel 1.4 Visualisierung der Verschleißdaten beschrieben und gezeigt.

AP2.4 Verifikation und Validierung des Gesamtmodells

Verifikation - Um zu überprüfen, ob die Berechnungen und die Simulation brauchbare Ergebnisse liefern, wird das Modell auf Simulationen der in AP2.1 dargestellten Grundlagenversuche angewendet. Da in den realen Versuchen 15 Schlichtbearbeitungsgänge durchgeführt wurden, wurde auch die Berechnung für 15 Durchgänge durchgeführt. Daraus ergeben sich relative Fehler zwischen Realität und Simulation beim maximalen Verschleiß von -2 % für einen Anstellwinkel von 0° und 1,3 % für einen Anstellwinkel von -20° und -1,9 % für einen Anstellwinkel von -60° . Diese Abweichungen des Verschleißratenmodells, siehe Gleichung 4, werden als akzeptabel angesehen.

Validierung - Zur Validierung wurde der Demonstratorprozess durchgeführt aus dem die Grundlagenversuche für das Modell abgeleitet wurden. Es wurde der gleiche Werkzeugtyp wie bei den oben beschriebenen Grundlagenexperimenten genutzt. Um

relevante VB-Werte zu erreichen, wurde der Schlichtvorgang 30-mal wiederholt. Da die Steigung innerhalb eines Durchgangs zu gering für einen visuellen Unterschied ist, sind in Abbildung 27 der erste, fünfzehnte und dreißigste Schlichtdurchgang dargestellt.

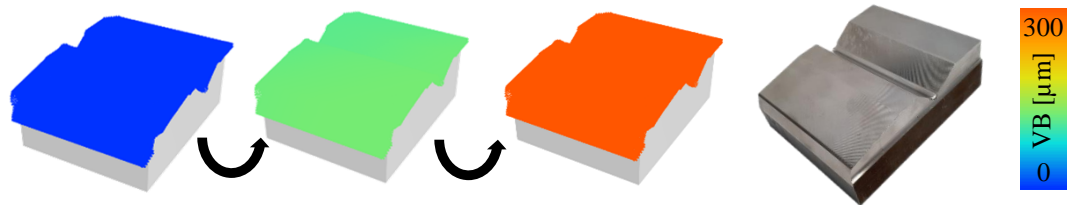


Abbildung 27: Einfärbung der Werkzeugbahn für die 1., 15. und 30. Schlichtbearbeitung des Demonstratorbauteils (ganz rechts)

Die Simulation ergibt eine Werkzeugverschleißverteilung entlang der Werkzeugachse wie in Abbildung 28, mit einem maximalen Verschleiß von etwa 313 µm. Der im Experiment erreichte maximale Verschleiß betrug 323 µm.

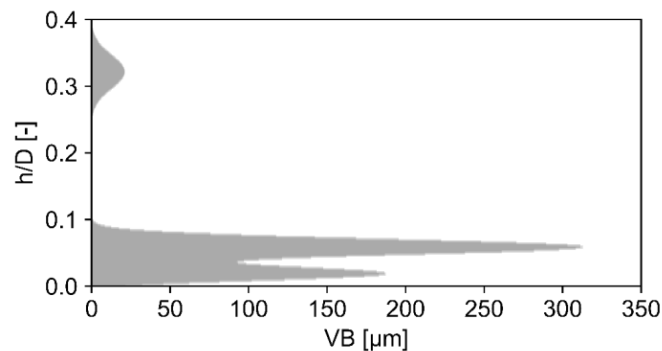


Abbildung 28: Simulierter Verschleiß entlang der Werkzeugachse nach 30 Schlichtvorgängen des Demonstratorbauteils

Somit ergibt sich ein relativer Fehler von etwa -3 %. Die Implementierung der Werkzeugverschleißverteilung entlang der Werkzeugachse in das CAM-System wird in einem weiteren Schritt durchgeführt, um dem Anwender einen Mehrwert zu liefern.

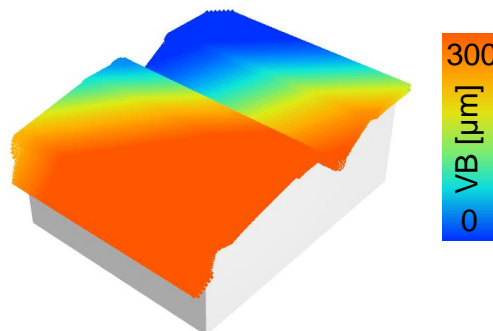


Abbildung 29: Einfärbung der Werkzeugbahn für ein künstlich vergrößertes Demonstratorbauteil

Abbildung 29 zeigt die Simulation eines größeren Bauteils mit der gleichen Werkzeugweg-Operation wie zuvor, wobei ein Verlauf des Werkzeugverschleißes entlang des Werkzeugwegs dargestellt wird. Im folgenden Kapitel wird das Modell für weitere Varianten der Bahnplanung zum Schlichten des Demonstratorbauteils auf diese Weise dargestellt. Zudem wurde für diese Varianten ebenfalls das reale Verschleißverhalten anhand von 30 Schlichtvorgängen der Demonstratorgeometrie untersucht.

Erfüllungsgrad: AP2.1 bis 2.5 erfüllt.

1.3 Systematisierung der Prozessauslegung (IPT, FVP)

Angestrebte Ziele: Im Rahmen von Arbeitspaket AP3 wird eine Auslegungssystematik zur Berücksichtigung des Werkzeugverschleißes beim Fräsen entwickelt

Durchgeführte Arbeiten

AP 3.1 Sensitivitätsanalyse der Verschleißentwicklung

AP 3.2 Ableitung und Formalisierung der Auslegungssystematik

AP 3.3 Überprüfung der entwickelten Auslegungssystematik anhand von Bearbeitungsversuchen

AP 3.1 Sensitivitätsanalyse der Verschleißentwicklung

Die Sensitivitätsanalyse ist die Untersuchung, wie die Unsicherheit in der Ausgabe eines mathematischen Modells den verschiedenen Quellen der Unsicherheit zugeordnet werden kann. Der Prozess der Neuberechnung von Ergebnissen, um die Auswirkung einer Variablen zu untersuchen, kann im Falle der Verschleißmodellierung für das Testen der Robustheit des Modells genutzt werden. Eine visuelle Darstellung des Modells ist in Abbildung 30 zu sehen. Schnittgeschwindigkeiten von 120 bis 200 m/min und geringe Spanvolumina führen tendenziell zu höheren Verschleißraten in der untersuchten Domäne.

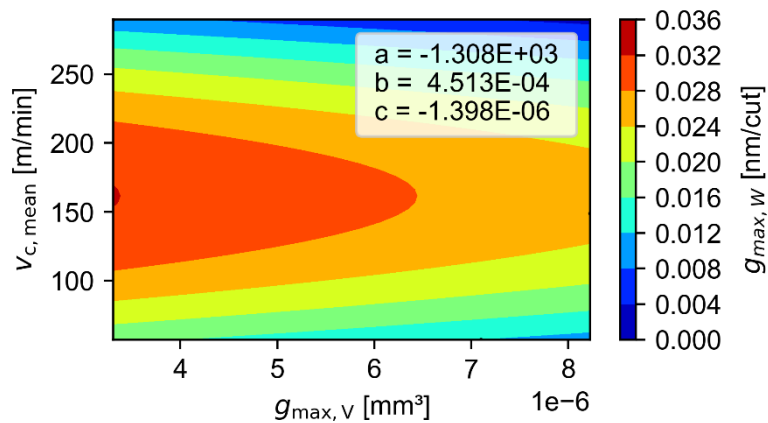


Abbildung 30: Modellierungsdomäne mit Modelleingangs- ausgangsparametern sowie Modellparametern

Weiterhin sollte das Modell lediglich bis zu Schnittgeschwindigkeiten von maximal 300 m/min verwendet werden. Das Modell bildet den (vermutlich) ansteigenden Verschleiß bei deutlich höheren Schnittgeschwindigkeiten nicht ab, siehe Abbildung 31. Im folgenden AP3.2 werden verschiedene Varianten zur Bearbeitung des Demonstrators ausgelegt, um diese innerhalb von AP3.3 simulativ zu berechnen und mit den Ergebnissen aus den zugehörigen Fräsexperimenten zu vergleichen.

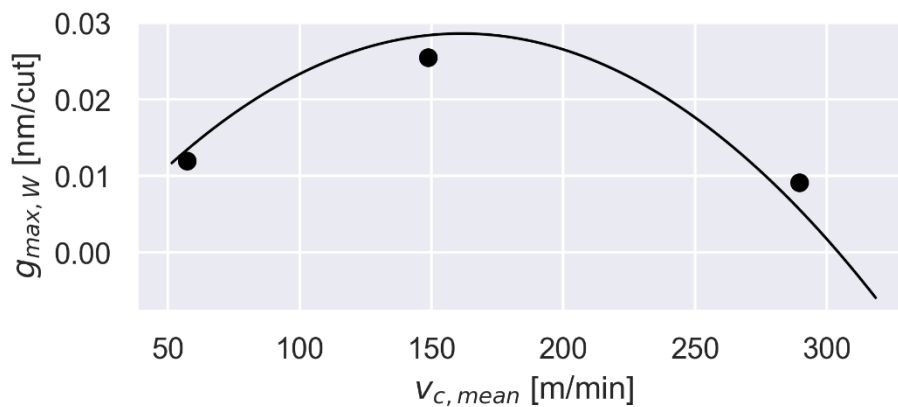


Abbildung 31: Sensitivität des Modells in Abhängigkeit der Schnittgeschwindigkeit bei konstantem $g_{max,w}$ von $6 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^3$

AP 3.2 Ableitung und Formalisierung der Auslegungssystematik

Auf Basis der Analyse in AP3.1 können verschiedene mögliche Verbesserungen der CAM-Planung für das Demonstratorbauteil abgeleitet werden. Zum einen kann dabei die Anstellung entsprechend der Erkenntnis erhöht werden, dass eine erhöhte

Schnittgeschwindigkeit in der untersuchten Domäne zu niedrigerer Verschleißentwicklung führt. Zum anderen kann die Fräsrichtung variiert werden, da im Demonstrationsprozess eine Bearbeitungsrichtung in Bezug auf die Bauteilkanten von 45° gewählt wurde. Zur Vorbereitung eines Workshops wurde die Abhängigkeit der effektiven Schnittgeschwindigkeit vom Anstellwinkel bei unterschiedlichen Schnittgeschwindigkeiten am Umfang berechnet, siehe Abbildung 32. Der Bereich mit der erwartungsgemäß niedrigsten Verschleißneigung ist farblich hervorgehoben.

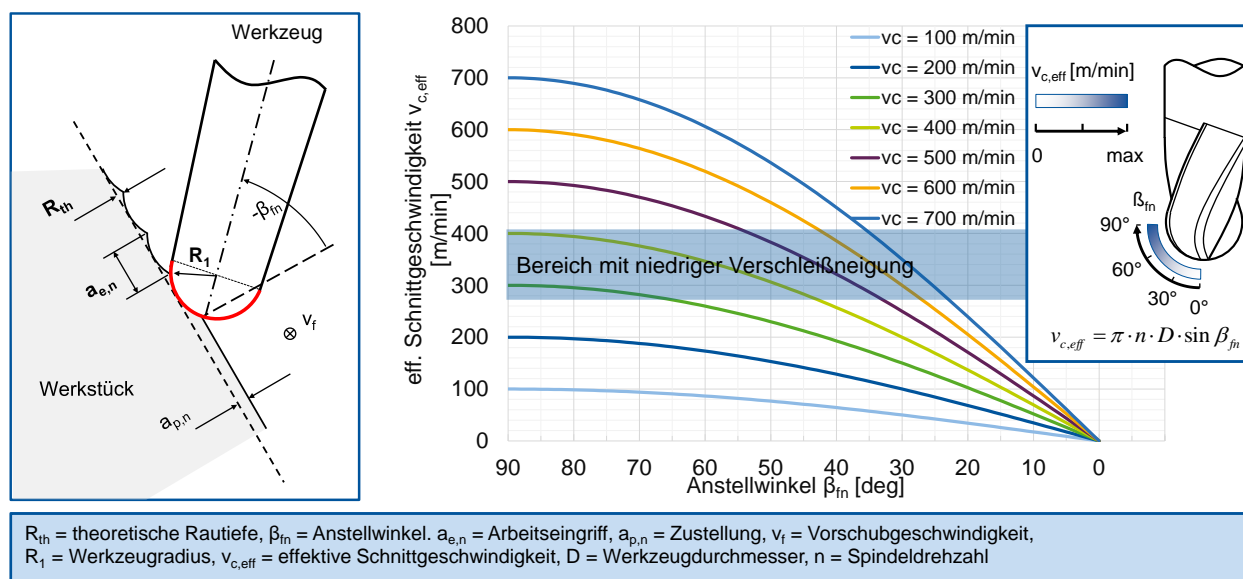


Abbildung 32: Kennfeld zur wissensbasierten Auslegung von Schlichtprozessen (Anstellwinkel und Schnittgeschwindigkeit)

Zudem wurde die Oberflächenrauheit, hier das Maß Rautiefe R_z , als bauteilseitiges Qualitätskriterium hinzugezogen. Dies wurde aufgrund von Interesse aus dem PA an der Auswirkung von Verschleiß auf die erzeugte Oberflächenqualität ergänzt. In Abbildung 33 ist die theoretische Rautiefe in Abhängigkeit des Bahnabstands sowie des Werkzeugradius dargestellt. Bei der Auslegung des Prozesses können diese entsprechend den Anforderungen an die Bauteiloberfläche herangezogen werden. Es ist zu beachten, dass die in den später durchgeführten Fräsexperimenten der drei Prozessvarianten, die reale Rautiefe höher lag als die berechneten Rautiefen, siehe Abbildung 33 eingefärbte Bereiche und vergleiche AP6.2.

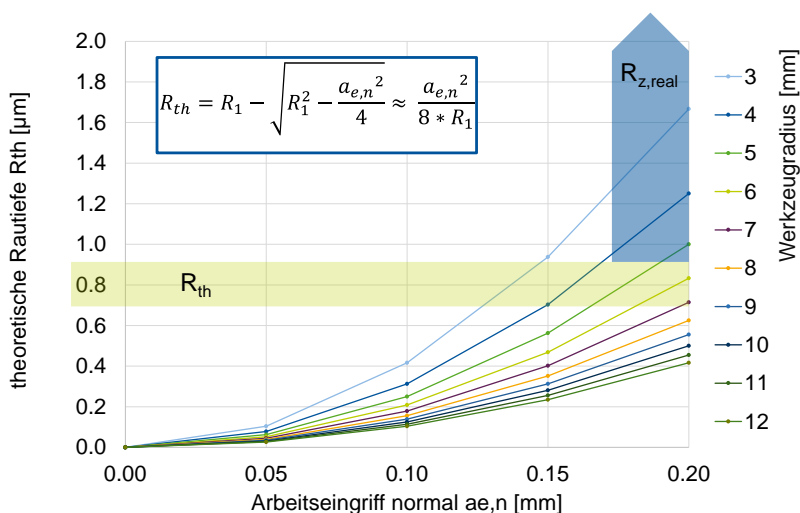
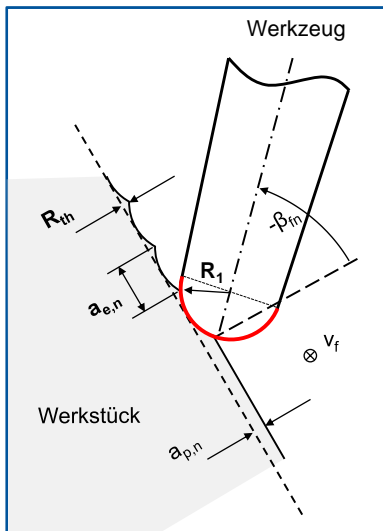


Abbildung 33: Kennfeld zur wissensbasierten Auslegung von Schlichtprozessen bezüglich theoretischer Rautiefe

Auf Basis der vorgestellten Überlegungen wurden in einem Workshop drei weitere Varianten des Schlichtprozesses für das Demonstratorbauteil erarbeitet, die im Folgenden vorgestellt werden. Der Übersicht halber wird der Ausgangsprozess (Variante 0) ebenfalls gezeigt (Abbildung 34).

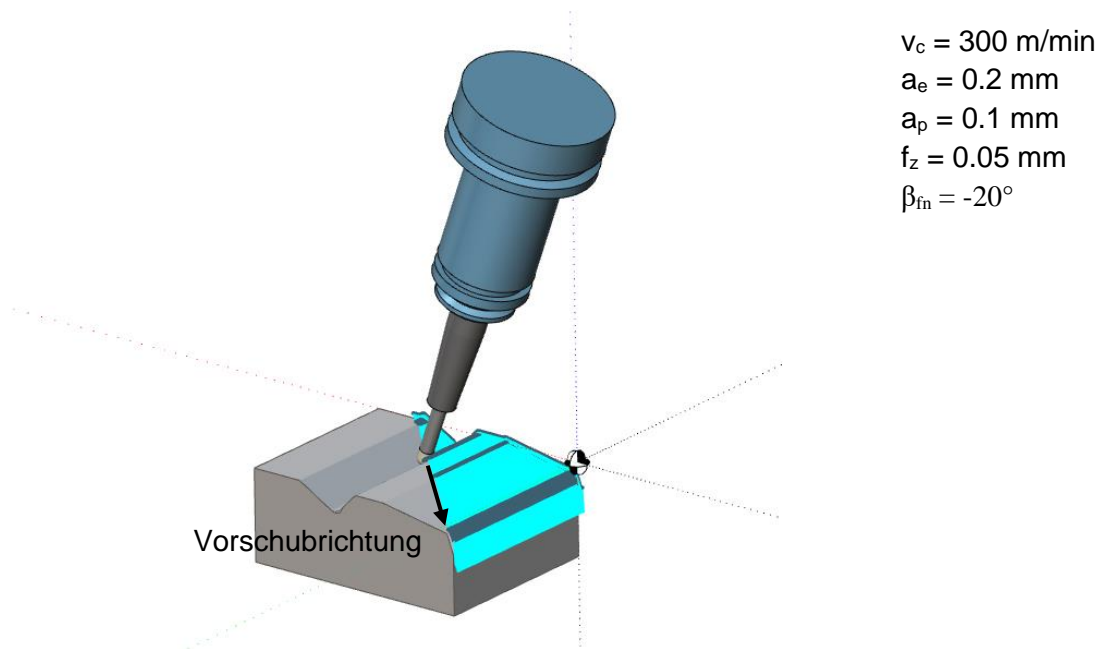


Abbildung 34: Bahnplanung des Demonstrationsprozesses (Variante 0)

Variante 0 beziehungsweise der Demonstrationsprozess wird mit einem Winkel von 20° an einer festen Referenzachse ausgerichtet. Die Richtung der Bearbeitung ist mit 45° in

Bezug auf das Werkstück gedreht. Weitere Informationen zu dieser Ausgangsvariante befinden sich in Kapitel AP1.1.

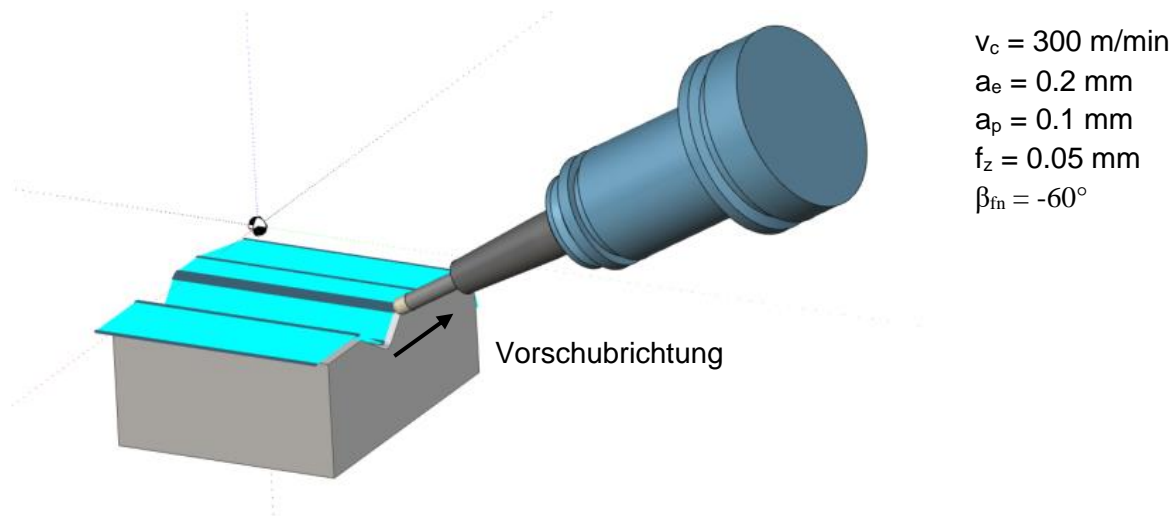


Abbildung 35: Bahnplanung Variante 1

Variante 1 wird mit einem 60° Winkel an einer festen Referenzachse ausgerichtet. Dadurch findet der Eingriff nahe dem Umfang bei hohen Schnittgeschwindigkeiten statt. Die Richtung der Bearbeitung wird um 45° gedreht, sodass das Bauteil entlang der größten Dimension bearbeitet wird. Auf Basis der Grundlagenversuche wird bei dieser Prozessführung eine hohe Standzeit erwartet (Abbildung 35).

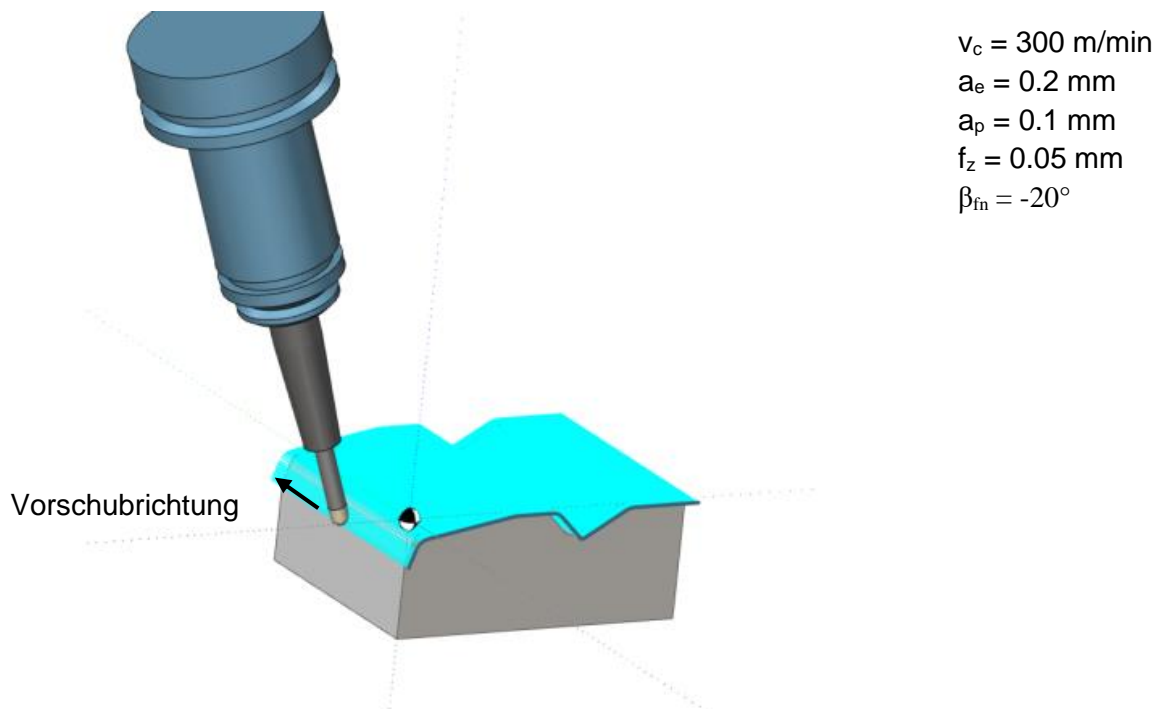


Abbildung 36: Bahnplanung Variante 2

Variante 2 wird ebenfalls an einer Referenzachse ausgerichtet jedoch wird hier ein Winkel von 20° gewählt. Zudem wird die Richtung der Bearbeitung entlang der kurzen Bauteilseite gewählt, sodass sich während der Bearbeitung der verschiedenen schrägen Flächen unterschiedliche Anstellwinkel ergeben. Bei dieser Operation wird aufgrund der mittleren Schnittgeschwindigkeiten eine hohe Verschleißentwicklung erwartet (Abbildung 36).

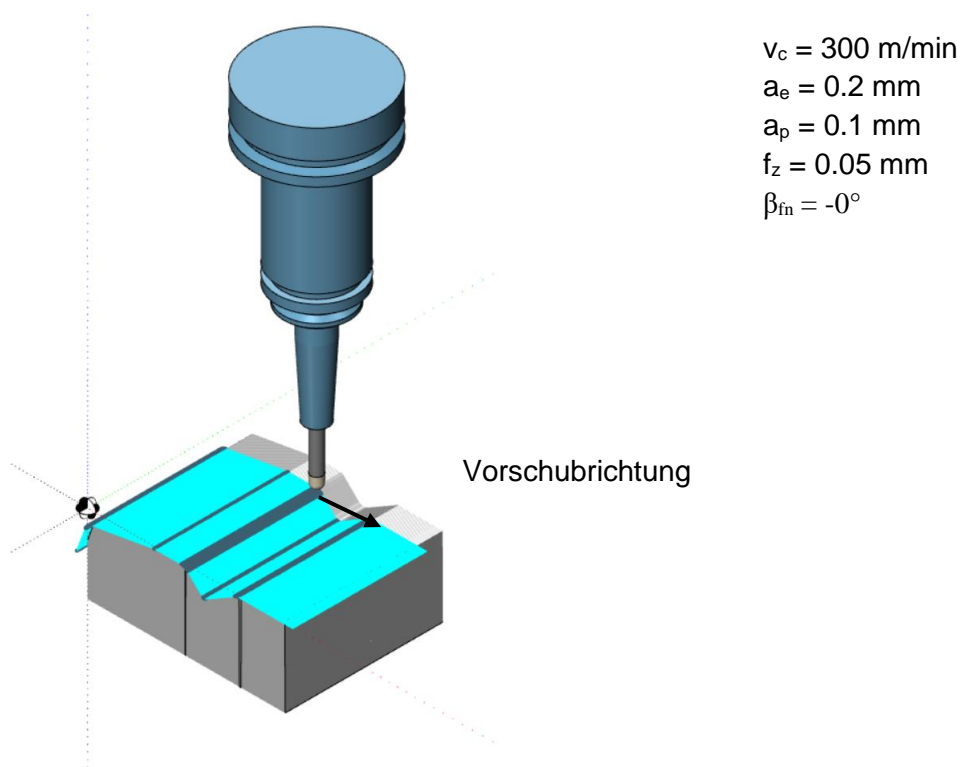


Abbildung 37: Bahnplanung Variante 3

Variante 3 wird an einer Referenzachse von 0° ausgerichtet, um mit tendenziell niedrigen Schnittgeschwindigkeiten in einem Bereich mit geringer Verschleißentwicklung zu bearbeiten. Allerdings ist diese Operation aus Sicht der Workshopteilnehmer kritisch zu sehen aufgrund der zu erwartenden Quetschvorgänge an der Werkzeugspitze (Abbildung 37).

AP 3.3 Überprüfung der entwickelten Auslegungssystematik anhand von Bearbeitungsversuchen

Dieses Arbeitspaket dient dem Vergleich von erwarteten Rauheitswerten sowie der simulativ ermittelten Verschleißwerte für die unterschiedlichen Varianten der Prozessführung mit den experimentell erzeugten Daten. Zur Messung des Verschleißes wurde, wie zuvor, das Keyence VHX6000 eingesetzt. Dieses dient zudem der Erzeugung

von anschaulichen, flächigen Bildern der Bauteiloberfläche. Die Messung der Rauheitsmetrik R_z (Abbildung 38) erfolgte hingegen mit einem Waveline W5 von Jenoptik. Dabei ist L_f die Messstrecke und D_m die mittlere Höhe der Messstrecke

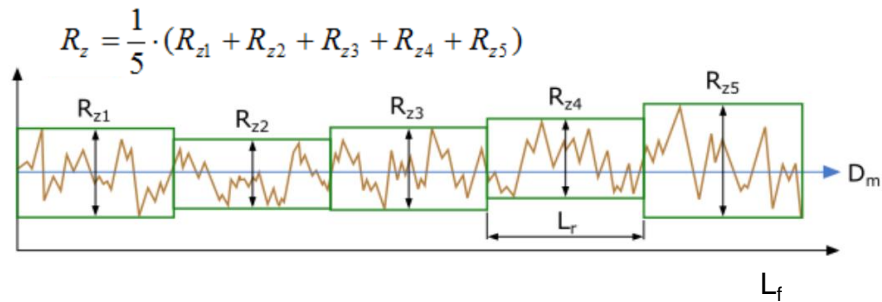


Abbildung 38: Darstellung zur Ermittlung der Rautiefe R_z [20]

Die Messaufbauten zur Erzeugung der 2D Bilder sowie der Rautiefe der Bauteiloberfläche sind in Abbildung 39 dargestellt.

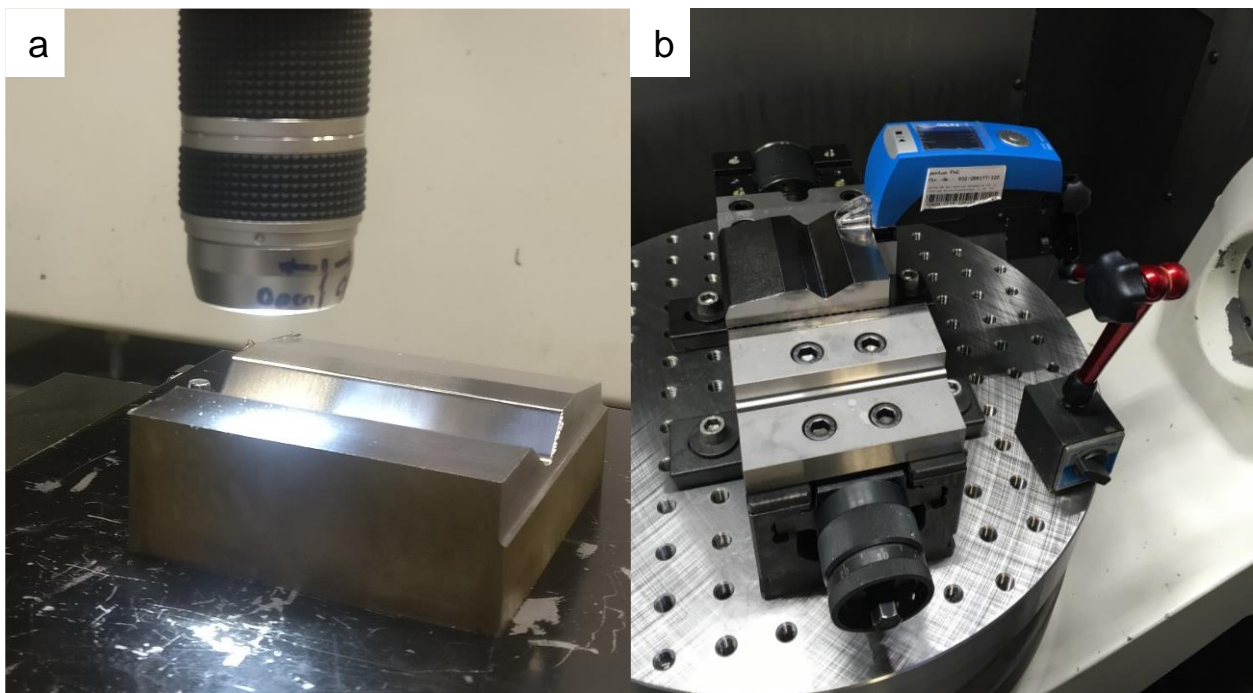


Abbildung 39: Messaufbauten zur Erzeugung der 2D (a) und 1D (b) Rauheitsmessungen

Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen sind in den folgenden Abbildungen dargestellt. Dabei wurden die Messwerte wie in der Abbildung 39: Messaufbauten zur Erzeugung der 2D (a) und 1D (b) Rauheitsmessungen gezeigt ermittelt. Die Messungen wurden jeweils nach 30 Schlichtoperationen durchgeführt. Die Folgenden Abbildungen enthalten:

- ein Standbild der CAM-Bahnplanung des Prozesses
- eine Aufnahme des jeweiligen Bauteils nach 30 Schlichtvorgängen
- eine vergrößerte Aufnahme der erzeugten Oberfläche
- die gemittelten Werte der mehrfach gemessenen Rautiefe
 - parallel zur Vorschubrichtung (=) sowie
 - senkrecht zur Vorschubrichtung (\perp)
- eine Draufsicht des Kugelkopffräswerkzeugs
- das gemittelte Verschleißmaß VB_{\max} der Werkzeugzähne

Variante 0 (Demonstrationsprozess): Nach 30 Schlichtvorgängen mit der gezeigten CAM Strategie beträgt die erreichte Rautiefe $2,75 \mu\text{m}$ in Vorschubrichtung und $3,67 \mu\text{m}$ senkrecht zur Vorschubrichtung. Die maximale Verschleißmarkenbreite auf der Freifläche des Kugelkopfwerkzeugs beträgt $323 \mu\text{m}$ (Abbildung 40).

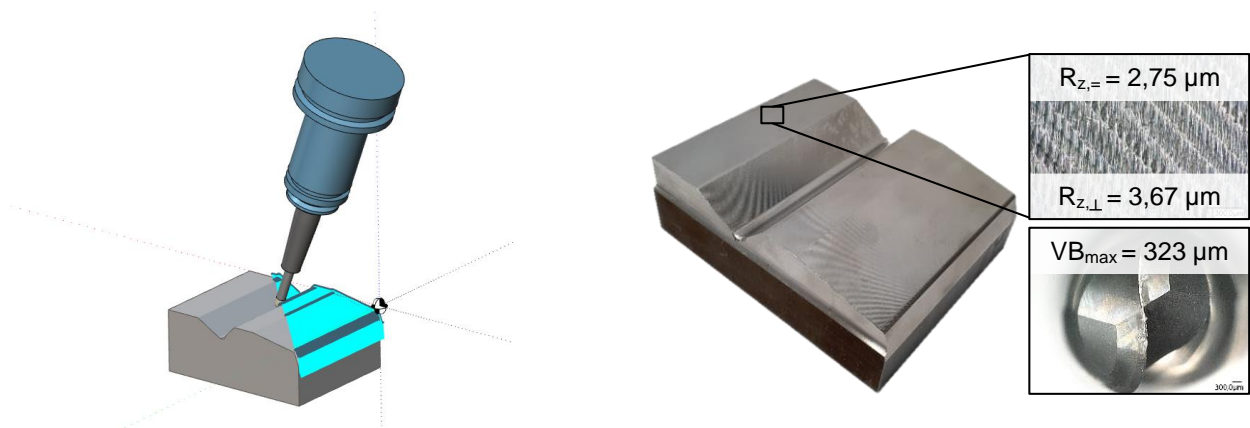


Abbildung 40: Variante 0 CAM-Bahnplanung und gefertigtes Bauteil nach 30 Schlichtprozessen, sowie Rauheitsmessung und Werkzeugverschleißmessung

Variante 1: Nach 30 Schlichtvorgängen mit der gezeigten CAM Strategie beträgt die erreichte Rautiefe $1,57 \mu\text{m}$ in Vorschubrichtung und $4,55 \mu\text{m}$ senkrecht zur Vorschubrichtung. Die maximale Verschleißmarkenbreite auf der Freifläche des Kugelkopfwerkzeugs beträgt $32 \mu\text{m}$ (Abbildung 41).

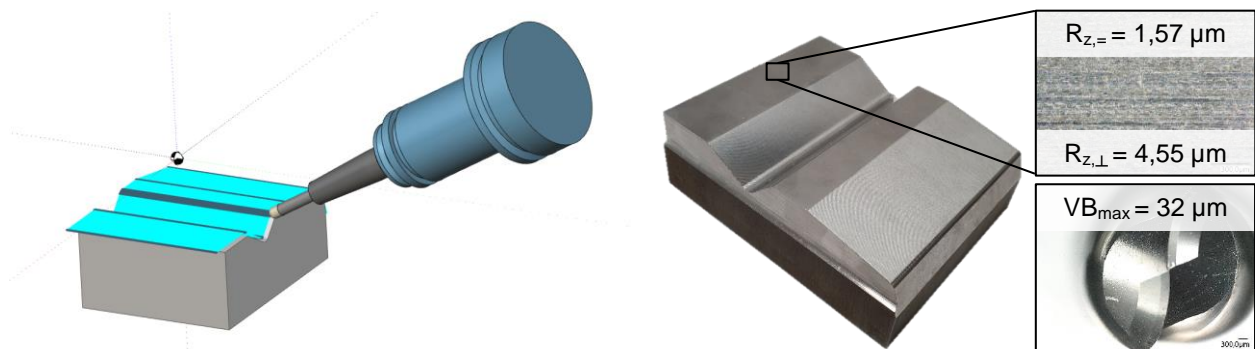


Abbildung 41: Variante 1 CAM-Bahnplanung und gefertigtes Bauteil nach 30 Schlichtprozessen, sowie Rauheitsmessung und Werkzeugverschleißmessung

Variante 2: Nach 30 Schlichtvorgängen mit der gezeigten CAM Strategie beträgt die erreichte Rautiefe $0,90 \mu\text{m}$ in Vorschubrichtung und $1,19 \mu\text{m}$ senkrecht zur Vorschubrichtung. Die maximale Verschleißmarkenbreite auf der Freifläche des Kugelpfandwerkzeugs beträgt $108 \mu\text{m}$ (Abbildung 42).

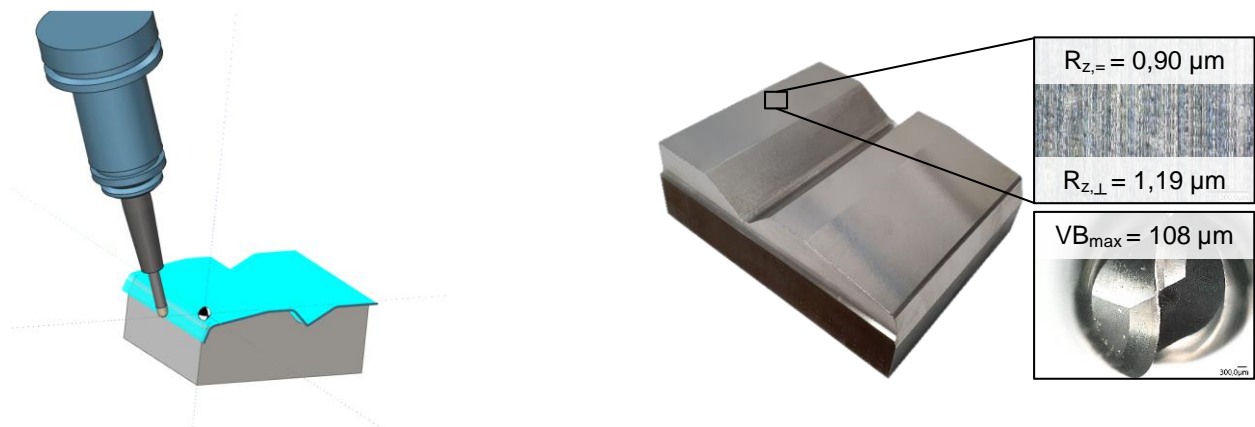


Abbildung 42: Variante 2 CAM-Bahnplanung und gefertigtes Bauteil nach 30 Schlichtprozessen, sowie Rauheitsmessung und Werkzeugverschleißmessung

Variante 3: Nach 30 Schlichtvorgängen mit der gezeigten CAM Strategie beträgt die erreichte Rautiefe $1,20 \mu\text{m}$ in Vorschubrichtung und $1,50 \mu\text{m}$ senkrecht zur Vorschubrichtung. Die maximale Verschleißmarkenbreite auf der Freifläche des Kugelpfandwerkzeugs beträgt $86 \mu\text{m}$ (Abbildung 43).

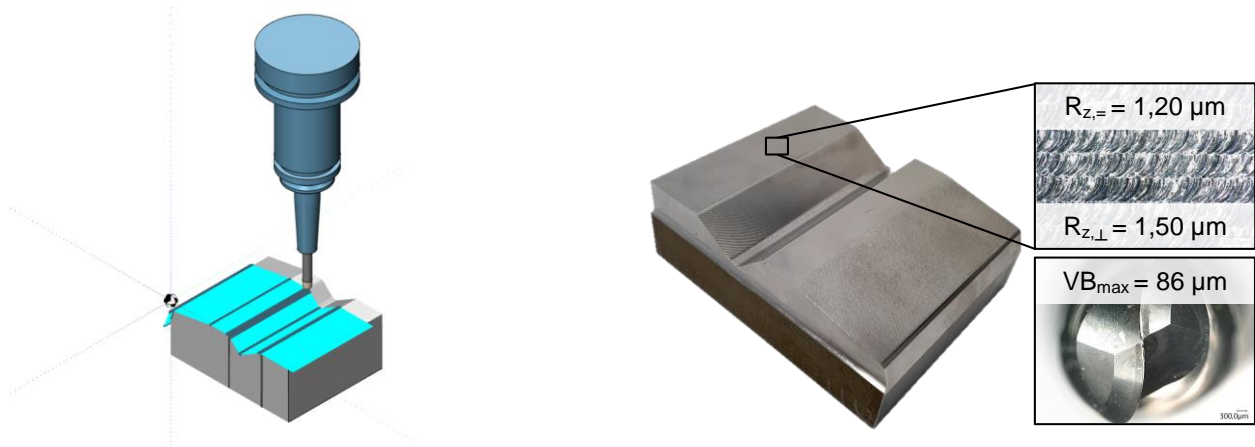


Abbildung 43: Variante 3 CAM-Bahnplanung und gefertigtes Bauteil nach 30 Schlichtprozessen, sowie Rauheitsmessung und Werkzeugverschleißmessung

Ein detaillierter Vergleich der experimentellen und simulativen Verschleißwerte befindet sich in Kapitel 1.6. Im Folgenden werden dennoch einige Beobachtungen bezüglich des Verschleißes und der Rauheit erläutert. Die reale Rautiefe ist durchgängig höher als die analytisch errechnete Rautiefe. Dies ist könnte erklärbar sein durch die thermischen Einflüsse auf das Werkstückmaterial. Wenn der Schneidkeil das Werkstück verlässt wird das erwärmte Material über die erwartbare Oberfläche hinaus mitgezogen und führt somit zu einer höheren Rautiefe als analytisch berechnet. Die Rautiefe ist parallel zur Oberfläche niedriger als senkrecht zur Oberfläche, da die Kämme zwischen den Bahnen ($a_e = 0.2 \text{ mm}$) eine stärkere Erhabenheit aufweisen als die Kämme zwischen zwei Zahnvorschüben ($f_z = 0.05 \text{ mm}$).

Die experimentell erzeugten Ergebnisse stimmen nur in Teilen mit den erwarteten Ergebnissen überein. Aus der Bahnplanung von Variante 0 wurden die Grundlagenversuche abgeleitet, aus denen das Verschleißmodell erstellt wurde. Die Simulation ergab einen maximalen Verschleiß von $VB_{\max,S} = 313 \text{ µm}$, was einem relativen Fehler von -3 % im Gegensatz zum experimentell ermittelten $VB_{\max,E} = 323 \text{ µm}$ entspricht. Für die anderen Varianten des Schlichtprozesses, auf die das Modell bezüglich der auftretenden Eingriffe nicht eingestellt ist, ergaben sich relative Fehler von über 50 %. Entsprechend ist die Methode zur Verschleißmodellerstellung, wie im Konzeptentwurf in Kapitel AP2.5 beschrieben, für eine zielgerichtete Modellierung geeignet. Sie versagt aufgrund des reduzierten Versuchsaufwandes allerdings an Schlichtoperationen mit abweichenden Eingriffsbedingungen.

Erfüllungsgrad: AP3.1 bis AP3.3 umgesetzt

1.4 Visualisierung der Verschleißdaten (IPT, FVP)

Angestrebte Ziele: In AP4 wird die Entwicklung einer Visualisierung des erwarteten Werkzeugverschleißes auf Basis der Werkzeugbahn angestrebt

Durchgeführte Arbeiten:

AP 4.1 Konditionierung der Simulationsdaten

AP 4.2 Entwicklung und Prüfung der Visualisierung

AP 4.3 Optimierung und Einbindung der Visualisierung in CAM-Software

AP 4.1 Konditionierung der Simulationsdaten

Aufgrund der neu entwickelten Modellierungsmethode werden lediglich die Simulationsdaten aus den Minimalbeispielen benötigt. Diese werden aktuell händisch analysiert, um die Konvergenz der Eingriffsparameter und die Wahl des Eingriffs in der Mitte der letzten Bahn des Minimalbeispiels zu gewährleisten. Diese Schritte liegen als Python Code vor und können in Zukunft automatisiert werden. Im anschließenden Workflow ist die erneute Aufbereitung von Simulationsdaten nicht notwendig, da mit den Vorverarbeiteten Daten aus der Clusterung von NC und CAD Daten vorgenommen wird.

AP 4.2 Entwicklung und Prüfung der Visualisierung

Zur anschaulichen Visualisierung des erwartbaren Werkzeugverschleißes wurden zwei Konzepte entwickelt:

1. Die farbliche Darstellung des maximalen Verschleißwertes im Eingriff entlang der Werkzeugbahn (Abbildung 44).

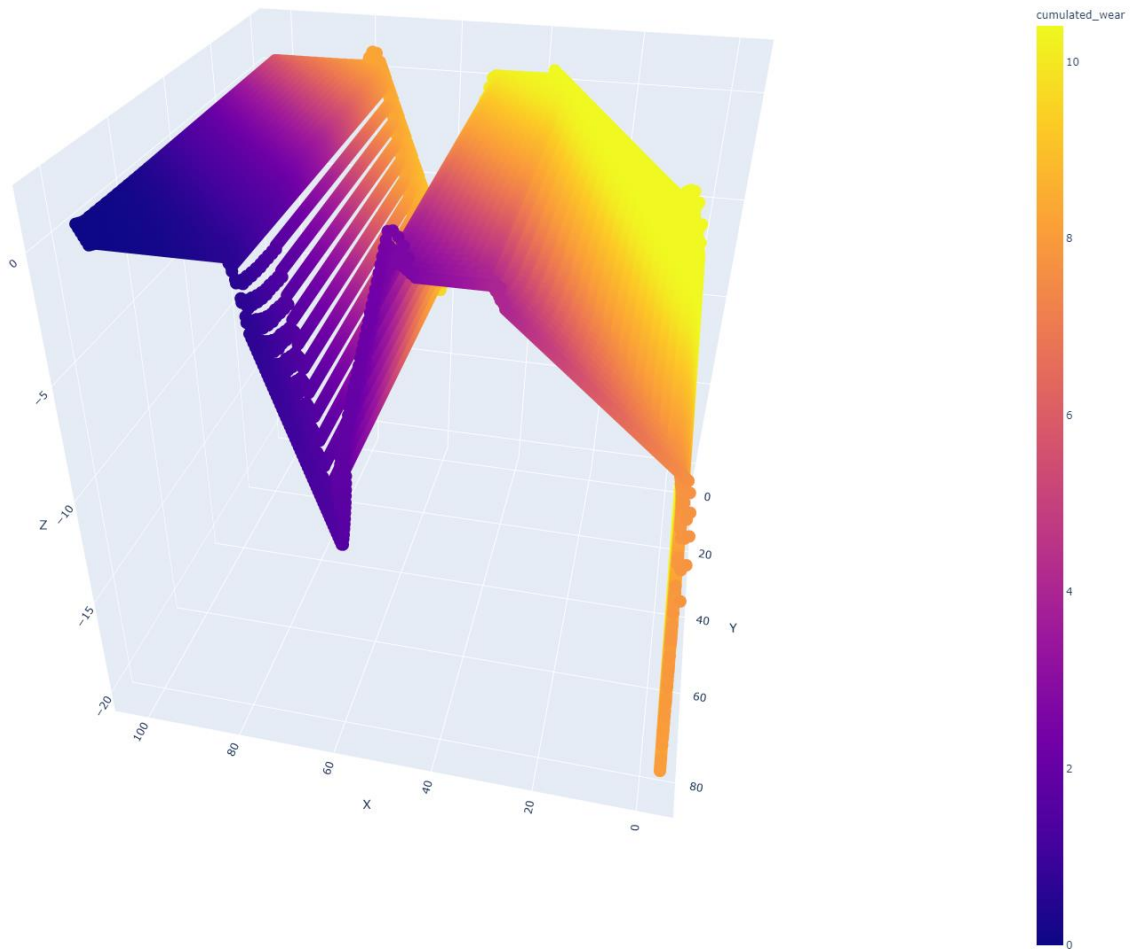


Abbildung 44: Konzept 1 zur Visualisierung des maximalen Verschleißes im Eingriff entlang des Werkzeugpfades (prototypische Darstellung in plotly). Hier nach einem Schlichtvorgang des Demonstrationsprozesses.

2. Die Darstellung der Verschleißverteilung entlang der Werkzeugachse (Abbildung 44).

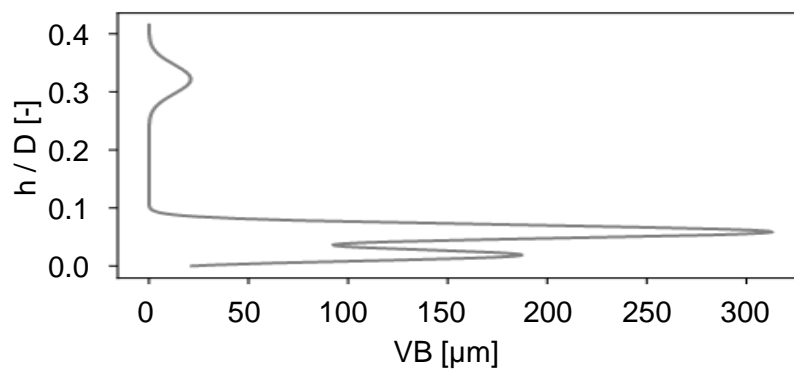


Abbildung 45: Konzept 2 zur Visualisierung der Verteilung des Verschleißes entlang der Werkzeugachse. Hier nach 30 Schlichtvorgängen des Demonstrationsprozesses

Erstere dient der Veranschaulichung der Verschleißentwicklung im Verlauf der Operation sowie der Kenntnis über den Zustand des Teils der Werkzeugschneide, der sich an jeder Stelle des Werkzeugwegs im Eingriff befindet. Zweitere dient der Kenntnis des Ist-Zustandes der gesamten Werkzeugschneide bezüglich des Verschleißes. Gemeinsam erlaubt diese Darstellung die Optimierung der Werkzeuganstellung entlang der Werkzeugbahn in Bezug auf den erwarteten Verschleiß. Speziell die zweite Visualisierung kann zur Wahl von bisher unbeanspruchten Teilen der Werkzeugschneide genutzt werden.

Die Umsetzung dieser Konzepte erfordert, neben der Bereitstellung der experimentellen Daten, eine Aufbereitung der erforderlichen Daten. Zu diesem Zweck können, auf Basis des erstellten Verschleißmodells, die Verschleißzustände für jeden NC-Punkt des Werkzeugpfades entlang der Werkzeugachse berechnet werden. Für Konzept 1 und 2 muss der gesamte Werkzeugzustand entlang der Werkzeugachse für jeden NC Punkt vorliegen. Anschließend kann für Konzept 1 der maximale Wert im Eingriff je NC Punkt selektiert werden, für Konzept 2 müssen allerdings die gesamten Einträge vorliegen.

AP 4.3 Optimierung und Einbindung der Visualisierung in CAM-Software

Da Rhino 6 über einen integrierten grafischen Algorithmeneditor verfügt kann das Konzept 1 dort direkt eingebunden werden. Abbildung 46 (links) zeigt den Algorithmus für das Parsen der tabellarischen Verschleißdaten der Prädiktion sowie der Einfärbung entlang des Werkzeugpfades innerhalb des grafischen Algorithmeneditors. Abbildung 46 (rechts) zeigt den entsprechend visualisierten Werkzeugpfad im CAD-CAM-System. Für die Einbindung von Konzept 2 in das System ist die Programmierung einer Erweiterung notwendig.

Aktuell wird der Verschleiß entlang der Werkzeugachse entsprechend lediglich außerhalb der CAD-CAM-Umgebung visualisiert, siehe Abbildung 47.

In Zusammenarbeit mit den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses wurde in Arbeitspaket 5.1 zunächst ein Gesamtkonzept entworfen, um die in Arbeitspaket 2 bis Arbeitspaket 4 erarbeiteten Modelle in einen Gesamtdemonstrator zu überführen. Das Ergebnis dieser Zusammenarbeit zeigt Abbildung 48.

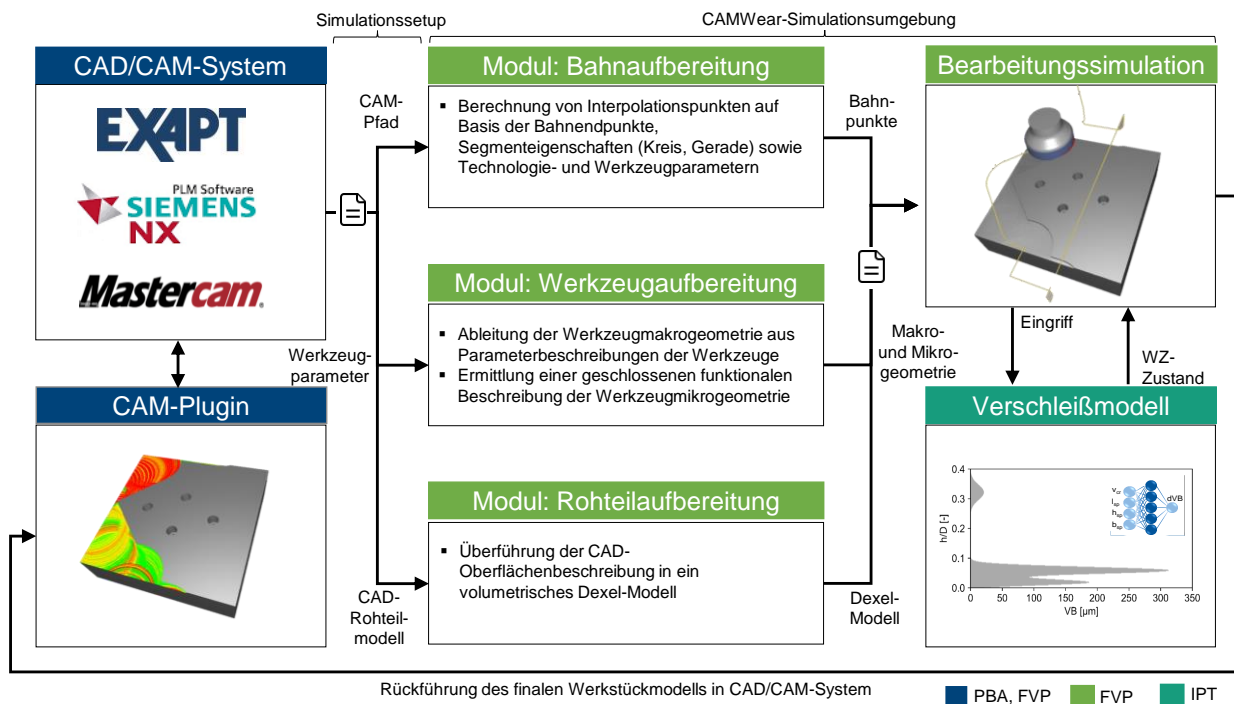


Abbildung 48: Gesamtkonzept für den Aufbau des Software-Demonstrators

Zur Wahrung der Vorwettbewerblichkeit wurde entschieden, keine direkte Integration in ein ausgewähltes CAD/CAM-System durchzuführen. Stattdessen wurde ein Konzept erarbeitet, das eine Anbindung der aufgebauten Verschleißermittlung über eine eigenständige, in diesem Arbeitspaket zu entwickelnde CAMWear-Simulationsumgebung ermöglichen soll. Die Umgebung umfasst dabei, wie im rechten Teil von Abbildung 28 dargestellt, eine Materialabtragssimulation und ein hieran gekoppeltes Verschleißmodell.

Den Ausgangspunkt der Anbindung bildet das Ausleiten von Planungsdaten eines CAD/CAM-Systems. Hieraus soll dann im nächsten Schritt ein CAM-neutrales Simulationssetup abgeleitet werden, welches von der Simulationsumgebung zur Durchführung einer Bearbeitungssimulation genutzt werden kann.

In jedem Schritt der Simulation werden dabei die aktuellen Werkzeugeingriffsgrößen berechnet und an das angebundenes Verschleißmodell weitergereicht. Dieses berechnet

daraus den aktuellen Werkzeugverschleißzustand und reicht diesen zurück an die Materialabtragssimulation. Insgesamt entsteht dabei eine Zeitreihe der Werkzeugverschleißentwicklung, die über die Materialabtragssimulation mit den geplanten Werkzeugpfaden synchronisiert wird.

Nach Abschluss der Simulation liegen sowohl angereicherte Werkzeugpfade als auch ein virtuelles Abbild des Werkstücks vor. Beides soll über ein CAM-Plugin oder eine eigenständige Visualisierungsumgebung CAM-nah dargestellt werden, sodass ein CAM-Bearbeitungsplaner Evaluationen durchführen und die nächsten durchzuführenden Optimierungsmaßnahmen ableiten kann.

Für die Durchführung einer Simulation werden damit folgende Daten benötigt:

- **Diskrete Werkzeugpositionen** zur Relativpositionierung zwischen Bearbeitungswerkzeug und Rohteil
- **Oberflächendarstellung der Bearbeitungswerkzeuge** zur Eingriffsberechnung
- **Volumetrische Rohteildarstellung** zur Durchführung des Materialabtrags

Diese müssen durch das Simulationssetup (explizit oder implizit) bereitgestellt werden.

Da Informationsgehalt und Qualität bzgl. dieser Daten zwischen CAM-Systemen ggf. variieren, wurden zunächst Untersuchungen in den CAM-Systemen *NX CAM* der Siemens AG, *MasterCAM* der CNC Software Inc. Und *EXAPTsolid* der EXAPT Systemtechnik GmbH durchgeführt. Im Anschluss konnten dann Festlegungen für das Ausleiten von Daten sowie den Aufbau des Simulationssetups getroffen werden. Nachfolgend werden die Ergebnisse kurz zusammengefasst.

- **Diskrete Werkzeugpositionen:** Zur Durchführung CAM-interner Bearbeitungssimulationen werden geplante Werkzeugpfade in eine Liste aus diskreten Werkzeugpositionen und -orientierungen überführt. Einige Systeme erzeugen diese stets im Abstand des programmierten Zahnvorschubs und führen darauf aufbauend eine inkrementelle Materialabtragsberechnungen durch. Hierbei werden die aktuelle Werkzeugposition und -orientierung sukzessiv zur Relativausrichtung zwischen Werkzeug und Werkstück genutzt.
Zur Steigerung der Simulationsgeschwindigkeit ist es in einigen CAM-Systemen jedoch auch möglich, die Punktverteilungen auf dem Werkzeugpfad fallabhängig

zu variieren. Für längere Pfadabschnitte ist es dann möglich, eine effizientere Materialabtragsberechnung auf Basis von Spurvolumen durchzuführen.

Fazit: Werden CAM-intern erzeugte Positionsdaten genutzt, muss system-spezifisch mit unterschiedlichen Punktedichten umgegangen werden. Zur Wahrung der Neutralität wurde daher beschlossen, lediglich die CAM-intern geplanten Werkzeugpfade nach ISO 3592 auszuleiten und in das Simulationssetup aufzunehmen.

- **Oberflächendarstellung der Bearbeitungswerkzeuge:** Werkzeuggeometrien beschränken sich CAM-intern meist auf Makrogeometriebeschreibungen, die über eigene geometrische Algorithmen aus werkzeugtypspezifischen Parameterdatensätzen, bspw. nach ISO 3592, DIN 4000 oder ISO 13399, gewonnen werden. Diese lassen sich von allen Systemen durchgängig im STEP-Format (ISO 13303) exportieren. Da jedoch für die Simulation auch Darstellungen der Einzelschneiden benötigt werden, diese jedoch nur schwer aus den Makrogeometrien ableitbar sind, eignen sich die Makrogeometriedarstellung nicht als Ausgangspunkt für die angestrebte Bearbeitungssimulation.

Fazit: Für das Simulationssetup werden Parametersätze nach ISO 13399 erzeugt, ausgeleitet und gespeichert.

- **Volumetrische Rohteildarstellung:** CAM-intern werden CAD-Rohteildarstellungen entweder parametrisch erzeugt (z. B. Blöcke oder Zylinder) oder aus STEP- oder STL-Dateien importiert. Diese werden dann kurz vor Simulationsbeginn in eine räumlich-diskrete Dixel-Darstellungen übersetzt, um während der Simulation einen Materialabtrag darstellen zu können. Eine Übernahme dieser Modellierung in die CAMWear-Bearbeitungssimulation ist zwar grundsätzlich möglich. Da jedoch CAM-intern kein Einfluss auf den Grad der Diskretisierung genommen werden kann, und dieser abhängig von Bauteilabmessungen und Bauteilgeometrie variiert, ist eine direkte Übernahme jedoch nicht sinnvoll.

Fazit: Es wurde beschlossen, lediglich die Oberflächendarstellung des Rohteils im STEP-Format (ISO 13303) auszuleiten und im Simulationssetup zu berücksichtigen.

Eine Marktrecherche zu verbreiteten CAD/CAM-Systeme zeigte anschließend, dass sich diese festgelegte Informationsgrundlage heute mit jedem modernen CAD-CAM-System erstellen lässt. Allerdings ist mit den getroffenen Entscheidungen auch so, dass sich das erstellte Simulationssetup zunächst nicht unmittelbar für die Durchführung einer Bearbeitungssimulation nutzen lässt. Aus diesem Grund sieht das Konzept aus Abbildung 48 zusätzliche Vorverarbeitungsmodule vor, die alle für die Simulation benötigten Modelle aus dem Simulationssetup ableiten können (Abbildung 48, mittig). Konkret handelt es sich dabei um die folgenden Module:

- **Bahnaufbereitung:** Ableitung von diskreten Bahnpunkten aus CAM-Werkzeugpfadbeschreibungen nach ISO 3592
- **Werkzeugaufbereitung:** Ableitung von diskreten Bahnpunkten aus Werkzeugbeschreibungen nach ISO 13399
- **Rohteilauferbereitung:** Ableitung eines volumetrischen Modells (hier ein Dixel-Modell) aus CAD-Daten des Rohteils

Am Anschluss an die Festlegungen konnte dann mit der Implementierung des Software-Demonstrators begonnen werden.

AP 5.2 Implementierung des Software-Demonstrators

Die Implementierung des Software-Demonstrators umfasst neben der Erzeugung eines Simulationssetups und den Modulen zur Datenaufbereitung auch den Aufbau einer Bearbeitungssimulation, die Anbindung des Verschleißmodells und die finale Darstellung des Bauteils in einer CAM-nahen Visualisierungsumgebung. Entlang dieser Einteilung werden die in AP 5.2 geleisteten Arbeiten nachfolgend vorgestellt.

Erstellung eines Simulationssetups

In Zusammenarbeit mit den Projektpartnern EXAPT, Moduleworks und CAMAIX wurden Schnittstellen für die Ausleitung der in AP 5.1 festgelegten Planungsdaten erarbeitet. Die Speicherung der Daten erfolgt dabei für jeden Datenart (Werkzeugpfad, Bearbeitungswerkzeuge, Rohteilgeometrie) in einer eigenen Datei und einem eigenen Format:

- **Werkzeugpfad:** Werkzeugpfade werden in einer ACSII-Datei gespeichert. Darin enthalten sind Werkzeugpfadbeschreibungen im Befehlssatz der ISO 3592. Die Endpunkte von Pfadsegmenten werden vor der Speicherung im Werkstückkoordinatensystem (WCS) ausgedrückt.
- **Bearbeitungswerkzeuge:** Die Beschreibungen aller Werkzeuge werden in Form einer XML-Datei abgespeichert. Neben den geometriebeschreibenden Parametern nach ISO 13399 enthält eine Beschreibung auch den Werkzeugtyp (z. B. Kugelpfäher) und eine eindeutige Benennung, die sich mit den Benennungen der Werkzeugpfaddatei deckt. Auf diese Weise kann während der Simulation sichergestellt werden, dass bei einem Werkzeugwechsel stets die richtige Werkzeuggeometrie für eine Materialabtragsberechnung verwendet wird.
- **Rohteil:** Die Rohteilgeometrie wird in Form einer STEP-Datei (ISO 13303) exportiert. Hierbei wird das Application Protocol (AP) 203 verwendet. Da der Nullpunkt der Rohteilkonstruktion nicht notwendigerweise mit dem Nullpunkt der CAM-Programmierung übereinstimmt, wird vor dem Export ein Basiswechsel durchgeführt, durch den das Rohteil in Bezug zum WCS ausgedrückt wird.

Übergeordnet zu den einzelnen Dateien wird zudem eine Setup-Datei im XML-Format erzeugt. Diese referenziert die erzeugten Dateien und kann durch die CAMWear-Simulationsumgebung direkt eingelesen werden. Deren Inhalte sowie die referenzierten Dateien werden dann Umgebungsintern an die entsprechenden Vorverarbeitungsmodule weitergeleitet. Für das Laden der Setup-Datei wurde eine Import-Klasse auf Basis von C++ sowie der Standard Template Library (STL) umgesetzt.

Modul: Bahnaufbereitung

Durch das Modul „Bahnaufbereitung“ werden zunächst die Pfadsegmente nach ISO 3592 aus der zugehörigen Datei eingelesen und so aufbereitet, dass jedes Pfadsegment

- eine Beschreibung von Werkzeugposition und -orientierung für seine Endpunkte,
- eine Beschreibung seines Interpolationstyps (Kreissegment, Linearsegment)
- Technologieparameter (Vorschub, Spindeldrehzahl) und
- eine Referenz auf das ausführende Bearbeitungswerkzeug

enthält. Unter Rückgriff auf die Werkzeugparameter der XML-Datei lässt sich dann für jedes Pfadsegment der programmierte Zahnvorschub berechnen. Anhand dieses und der Interpolationsvorschrift kann aus einem Pfadsegment wiederum eine Liste aus äquidistanten Zwischenpositionen und -orientierungen erzeugt werden. Die Summe der Listen wird dann an zur Relativpositionierung von Werkzeug und Werkstück an die Materialabtragssimulation weitergeleitet.

Die Implementierung des Moduls erfolgte in der Programmiersprache C++ mit Nutzung der Standard Template Library.

Modul: Werkzeugaufbereitung

Durch das Modul „Werkzeugaufbereitung“ werden zunächst alle Werkzeugparameter nach ISO 13399 aus der zugehörigen Datei eingelesen. Anschließend gilt es dann, diese durch geometrische Aufbereitungsalgorithmen in Makrogeometriedarstellungen und Mikrogeometriedarstellung zu übersetzen. Das Grundvorgehen dieser Algorithmen skizziert Abbildung 49 am Beispiel eines Kugelkopffräsers. Auf eine Benennung der tatsächlichen Parameterbeschreibungen nach ISO 13399 wurde dabei aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet.

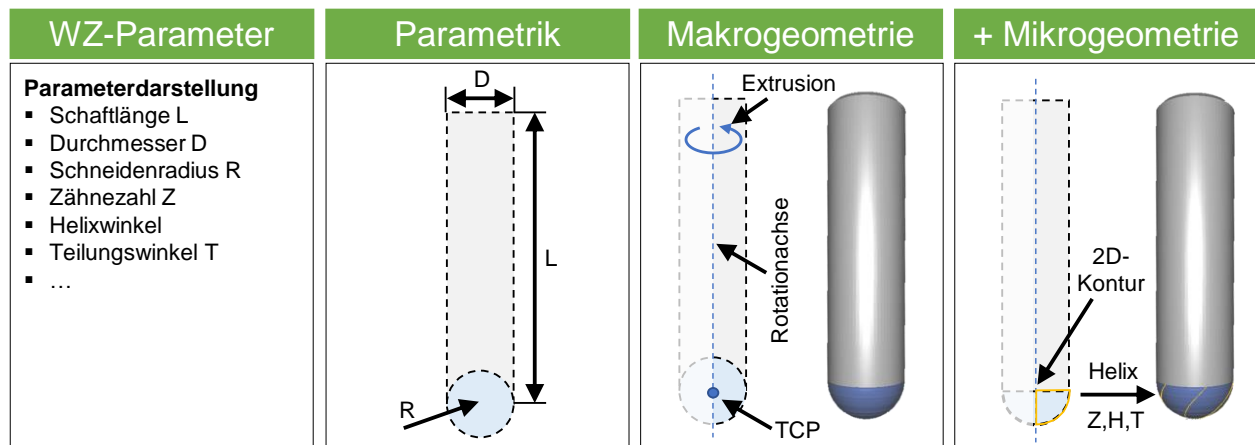


Abbildung 49: Generator-Modul zur Ableitung von Werkzeugmakro- und Werkzeugmikrogeometrie

- **Werkzeugmakrogeometrie:** Basierend auf dem Werkzeugtyp werden auf einer 2D-Zeichenebene zunächst geometrische Grundkörper wie Rechtecke, Kugeln oder Ellipsen erzeugt, über die Werkzeugparameter dimensioniert und durch Boolesche Operationen miteinander kombiniert. Ein Kugelkopffräser setzt sich dabei bspw. aus einem Rechteck für den Schaft und einem Kreis für den Kugelkopf

zusammen. Die so entstehende 2D-Form wird im Anschluss in Bezug zum Tool Center Position (TCP) sowie der Werkzeugrotationsachse ausgerichtet und durch eine rotatorische Extrusion in die gesuchte Makrogeometrie übersetzt.

- **Werkzeugmikrogeometrie:** Zur Erzeugung der Mikrogeometrie wird die Außenkontur der ausgerichteten 2D-Form weiterverwendet. Anhand der Informationen zu Fräserhelix bzw. Drallwinkel wird diese entlang der Werkzeugrotationsachse höhenabhängig in den dreidimensionalen Raum rotiert. Im Anschluss wird die so gewonnene Schneidengeometrie dann entsprechend der Zähnezahl vervielfacht. Die Kopien werden daraufhin anhand der vorgegeben Schneidenteilung positioniert.

Die Erzeugung der Makro- und Mikrogeometrie wurde mit den Modellierungsfunktionen (2D-Zeichnen, 3D-Modellieren) des freien CAD-Kernels OPENCascade umgesetzt (<https://www.opencascade.com/>). Nach erfolgter Modellierung werden die erzeugten Geometriedaten dann in Dreiecksnetze (Makrogeometrie) bzw. Liniensegmente (Mikrogeometrie) überführt und an die Materialabtragssimulation weitergereicht.

Modul: Rohteilaufbereitung

Zur Nutzung des Rohteilmodells innerhalb der Materialabtragssimulation muss dieses zunächst in ein Dreiecksnetz überführt werden. Hierzu wird die Geometriebeschreibung im STEP-Format zunächst geladen und anhand eines Sehnenfehlers in ein dreiecksbasierte Oberflächendarstellung überführt. Diese kann dann nativ durch die Materialabtragssimulation verarbeitet und in ein Dixel-Modell überführt werden.

Die Implementierung des Moduls erfolgte in der Programmiersprache C++. Für das Einlesen der STEP-Datei und die Umwandlung der NURBS-basierten Oberflächenbeschreibung in ein Dreiecksnetz wurde der freie CAD-Kernel OPENCascade eingebunden.

Materialabtragssimulation und Eingriffsgrößenberechnung

Sind alle Vorverarbeitungsschritte abgeschlossen, lässt sich eine Materialabtragssimulation realisieren. Hierzu wird auf die in den IGF-Projekten „HisToolry“ (18729 N)

entstandene Bearbeitungssimulation zurückgegriffen. Ein Ausschnitt dieser Simulation ist im linken Teil von Abbildung 50 dargestellt.

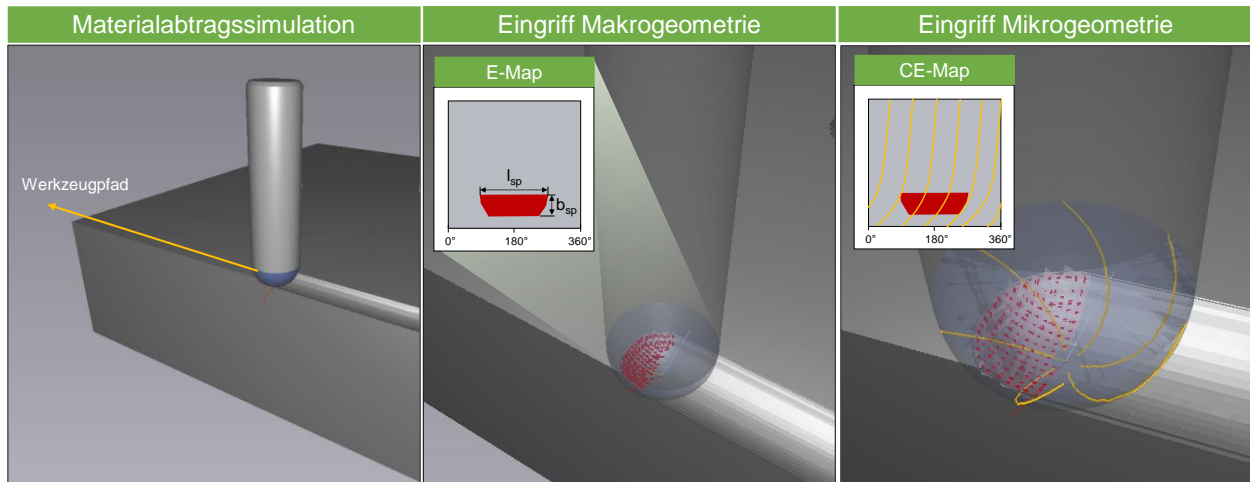


Abbildung 50: Ableitung von Eingriffsgrößen

Vor Projektbeginn war diese Bearbeitungssimulation bereits in der Lage, aus einer Werkzeugmakrogeometrie und einem dixel-basierten Werkstückmodell einen Materialabtrag zu berechnen. Die Bestimmung der in CAMWear benötigten Eingriffsgrößen war jedoch noch nicht möglich, sodass für „CAMWear“ zunächst eine entsprechende Erweiterung vorgenommen werden musste. Das prinzipielle Vorgehen hierzu ist im mittleren und rechten Teil von Abbildung 50 dargestellt.

- **Eingriff Makrogeometrie:** Wie bereits in „HisTooly“ werden Werkzeugposition und -orientierung in jedem Simulationsschritt genutzt, um Werkzeugmakrogeometrie und Werkstückmodell zueinander auszurichten. Anschließend werden die Dixel des Werkstückmodells auf Überschneidungen mit der Makrogeometrie geprüft und entsprechend dem Ergebnis gekürzt, entfernt oder in weitere Dixel zerlegt. Hierdurch wird implizit ein Materialabtrag realisiert. Um hierauf aufbauend nun die aktuellen Eingriffsgrößen abzuleiten, sieht die Erweiterung der Bearbeitungssimulation die Erzeugung sogenannter Engagement Maps (E-Maps) vor. Hierbei werden die entfernten Dixel oder Dixel-Anteile des aktuellen Simulationsschritts auf die Mantelfläche der Werkzeugmakrogeometrie projiziert und durch eine Umwandlung in Kugel- oder Zylinderkoordinaten in einer 2D-Ebene, der Engagement Map, dargestellt. Über Auswertungen der getroffenen 2D-Flächenbereiche lassen sich dann die aktuelle Spannungsbreite und Spannungslänge bestimmen. Ein Beispiel hierfür zeigt der mittlere Teil von Abbildung 50.

- **Eingriff Mikrogeometrie:** Um jeden einzelnen Schneideneingriff zu identifizieren, werden die Linearsegmente der Mikrogeometriedarstellung - die Spindelrotation berücksichtigend - ebenfalls auf die Mantelfläche projiziert und in Kugel- bzw. Zylinderkoordinaten überführt (CE-Map). Eine Auswertung der Engagement Map in entsprechenden Bereichen macht es dann möglich, die Schneideteile mit Eingriff sowie die dort vorliegenden Spannungshöhen zu ermitteln. Ein Beispiel hierfür zeigt der rechte Teil von Abbildung 50.

Anbindung des Verschleißmodells

In jedem Simulationsschritt werden die berechneten Eingriffsgrößen an das Verschleißmodells weitergeleitet sowie die aktuellen Verschleißzustände des Werkzeugs zurückerhalten. Letzterer wird dabei mit Referenz zur zuletzt genutzten Werkzeugposition abgelegt. Zur Datenübertragung wurde eine Schnittstelle zwischen Rhino 6 und der Bearbeitungssimulation der FVP in C++ aufgebaut. Der Datenaustausch erfolgt dabei durch eine bidirektionale TCP-Verbindung.

CAM-nahe Visualisierungsumgebung

Nach durchgeführter Bearbeitungssimulation werden die Endpunkte der Werkstück-Dexel in eine Punktwolke überführt und zusammen mit den angerichteten Werkzeugpositionen und -orientierungen als ASCII-Datei gespeichert. Diese lässt sich dann bspw. in ein CAM-Plugin laden und visualisieren.

Aus Gründen der Vorwettbewerblichkeit wurde zur Darstellung jedoch im Projekt eine eigenständige Visualisierungsumgebung in C++ und OpenGL aufgebaut. Das Ergebnis zeigt der rechte Teil von Abbildung 51.

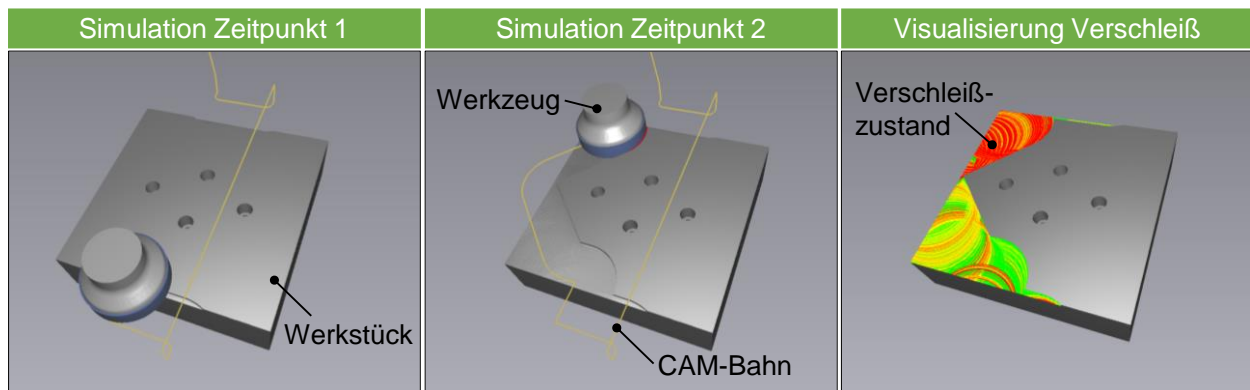


Abbildung 51: Darstellung der Auswirkungen des Werkzeugverschleiß auf der Werkstückoberfläche

Die Umgebung zeichnet sich durch einen geringen Speicher- und Rechenbedarf aus und lässt sich daher parallel zum CAM-System auf einem industrietypischen CAD/CAM-Rechner betreiben, ohne dessen Leistung merklich herabzusetzen. Die übrigen Bilder in Abbildung 52 zeigen den finalen Stand des Software-Demonstrators.

AP 5.3 Benutzerakzeptanztests (Mitarbeit des PA)

Nachdem eine erste Version des Software-Demonstrators bereitstand, wurden mit den Endanwendern des projektbegleitenden Ausschusses Nutzerakzeptanztests durchgeführt. Aufgrund der COVID-19-Pandemie erfolgten diese zum Großteil in Form von Web-Workshops, in denen die Anwender per Fernzugriff auf die CAM-Systeme EXAPTsolid und MasterCAM, sowie den Software-Demonstrator geschaltet wurden.

Früh hat sich hierbei gezeigt, dass eine bahnbezogene Darstellung der Verschleißentwicklung eine direkte technologische Anpassung der CAM-Bearbeitungsplanung deutlich vereinfacht. Um die Auswirkungen des Verschleißes auf die Werkstückoberfläche abschätzen zu können, sind jedoch manuelle Interpretationen notwendig, sobald das Werkzeug nicht nur punktuell mit dem Werkstück in Kontakt ist. Der hierzu zu leistende Transfer gestaltet sich jedoch in der industriellen Praxis aufwändig und wurde daher von allen Teilnehmern beklagt.

AP 5.4 Optimierung des Software-Demonstrators

Infolge wurde gemeinsam mit den Teilnehmern entschieden, neben einer bahnbezogenen Darstellung auch eine oberflächenbezogene Darstellung des Verschleißzustands umzusetzen. Anschließend wurde die Bearbeitungssimulation dahingehend erweitert, dass Verschleißzustände nicht nur der Werkzeugposition

zugeordnet werden, sondern im jeweils nächsten Simulationsschritt auch auf die neu erzeugten Werkstückoberfläche übertragen werden. Durch eine abschließende Erweiterung der CAM-nahen Visualisierung können diese dann auf der Werkstückoberfläche dargestellt werden. Abbildung 51 gibt einen kurzen Einblick zu den vorgenommenen Erweiterungen.

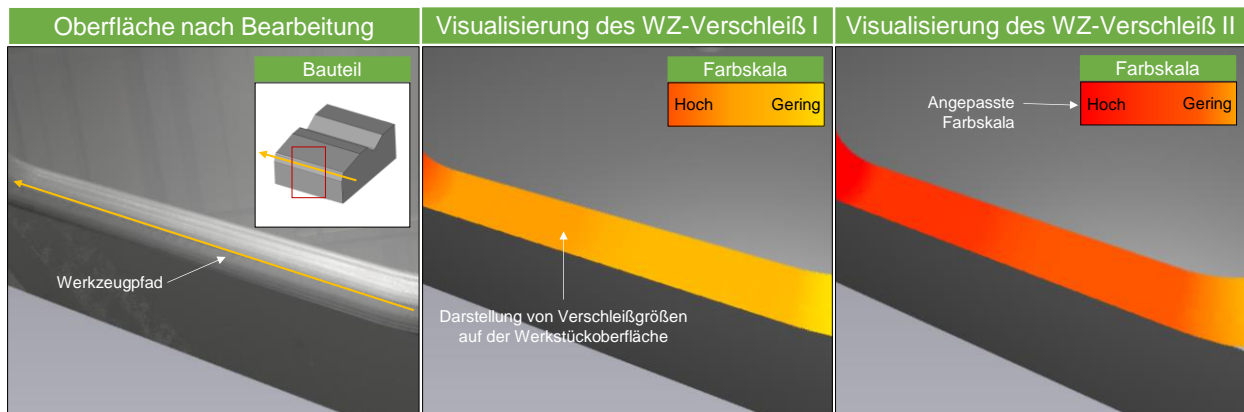


Abbildung 52: Darstellung der Auswirkungen des Werkzeugverschleiß auf der Werkstückoberfläche

AP 5.5 Evaluation und Verbreitung des Software-Demonstrators

Nachdem der finale Software-Demonstrator bereitstand, wurden mit den Endanwendern weitere Evaluierungen durchgeführt. Hierbei hat sich abschließend gezeigt, dass mit dem erarbeiteten Gesamtansatz eine Berücksichtigung des Werkzeugverschleißes während der Prozessauslegung sinnvoll realisierbar ist. Unterstrichen wird dies insbesondere durch die Ergebnisse der praktischen Demonstrator-Anwendung, auf die im Rahmen der Beschreibungen von Arbeitspaket 6 näher eingegangen wird.

Erfüllungsgrad: AP5.1 bis 5.5 umgesetzt.

1.6 Demonstration (IPT, FVP)

Angestrebte Ziele: Im Rahmen von Arbeitspaket AP6 wird das CAM-Modul zur Vorhersage des Werkzeugverschleißes beim Fräsen angewendet und die erzielten Vorteile demonstriert

Durchgeführte Arbeiten:

AP 6.1 Fertigung der Demonstrator-Bauteile

AP 6.2 Analyse und Auswertung der Demonstrator-Fertigung

AP 6.3 Anpassung des Demonstrators oder der Modelle falls erforderlich

AP 6.1 Fertigung der Demonstrator-Bauteile

Das Demonstrationsbauteil und die drei Varianten wurden auf einer fünfachsiggen Fräsmaschine vom Typ GF Mikron HPM 800 UHD mit einer Werkzeugaufnahme HSK-A63 und einem Werkzeughalter mit Hydrodehnspannfutter unter trockenen Schnittbedingungen durchgeführt. Das Werkstückmaterial ist der Warmarbeitsstahl 1.2343 (X38CrMoV5-1). Untersuchungsgegenstand ist ein Werkzeug vom Typ Kugelkopf mit einem Radius von 6 mm (Fresa Sphero-XF). Nach dem Schrupp- und Vorschlichtprozess wurde die Ausgangsgeometrie erreicht. Anschließend konnten 30 Schlichtoperationen mit der jeweiligen Strategie durchgeführt werden. Abbildung 53 zeigt den Schlichtvorgang für Variante 1.

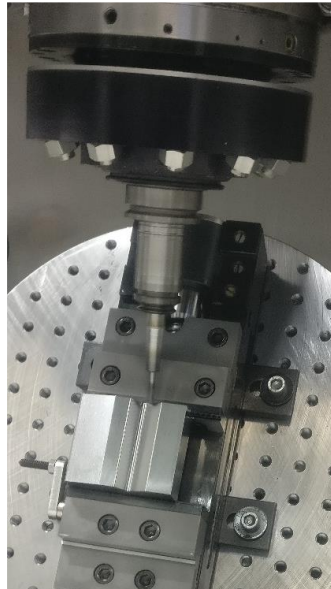


Abbildung 53: Schlichtprozess der Demonstrationsgeometrie mit CAM-Strategie Variante 1

Wie zuvor beschrieben wurden neben der Verschleißmessung des Werkzeugs zusätzlich Rauheitswerte ermittelt, um den Einfluss der Prozessführung bzw. des Verschleißes auf diese Qualitätskenngröße abzuschätzen.

AP 6.2 Analyse und Auswertung der Demonstrator-Fertigung

Die gemessene maximale Verschleißmarkenbreite der Freifläche sowie die Rautiefe in und senkrecht zur Vorschubrichtung sind in Abbildung 54 gegeben. Ein linearer Zusammenhang zwischen Verschleiß und Rautiefe ist wider Erwarten nicht gegeben. Beispielsweise führt Variante 2 mit einer vergleichsweise durchschnittlichen

Verschleißentwicklung zu den niedrigsten Rautiefen im Vergleich zu den anderen drei Prozessen. Dagegen ergibt sich bei Variante 1 eine vergleichsweise hohe Rautiefe bei gleichzeitig niedriger Verschleißentwicklung.

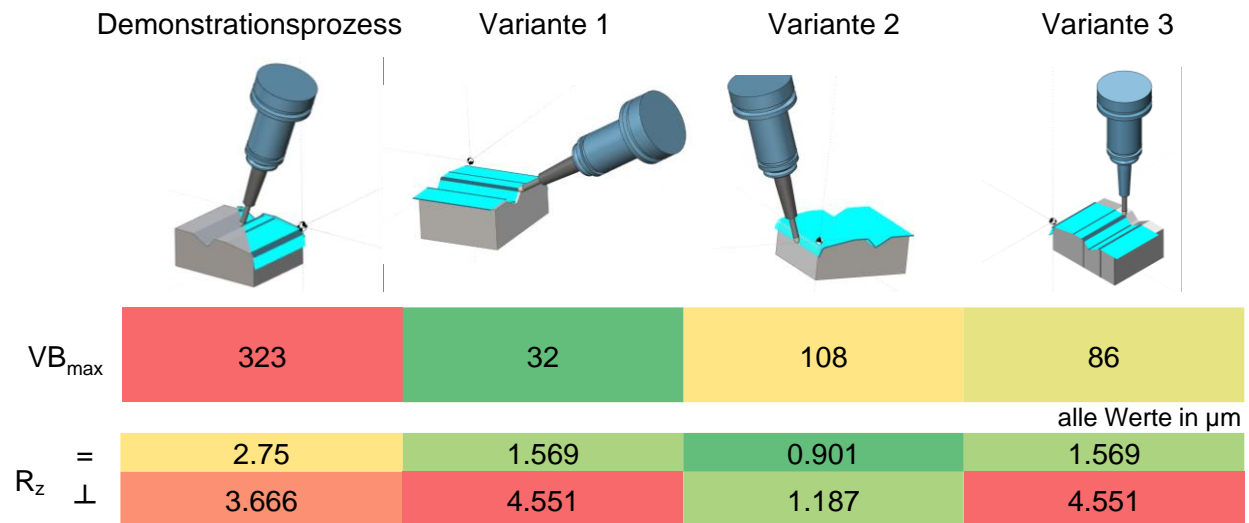


Abbildung 54: Experimentelle Ergebnisse des Demo-Prozesses sowie der drei Varianten

Neben der Analyse des Zusammenhangs von Verschleiß und Rauheit ist die Bewertung der Generalisierungsfähigkeit des Modellierungsansatzes Gegenstand der Analyse. Die simulativ erzeugten Verschleißmarkenbreiten stimmen für die Bahnplanung des Demonstrationsprozesses mit der experimentell erreichten Verschleißmarkenbreiten überein. Die Simulation ergab einen maximalen Verschleiß von $VB_{max,sim} = 313 \mu\text{m}$ (Abbildung 55), was einem relativen Fehler von -3 % im Gegensatz zum experimentell ermittelten $VB_{max,exp} = 323 \mu\text{m}$ entspricht.

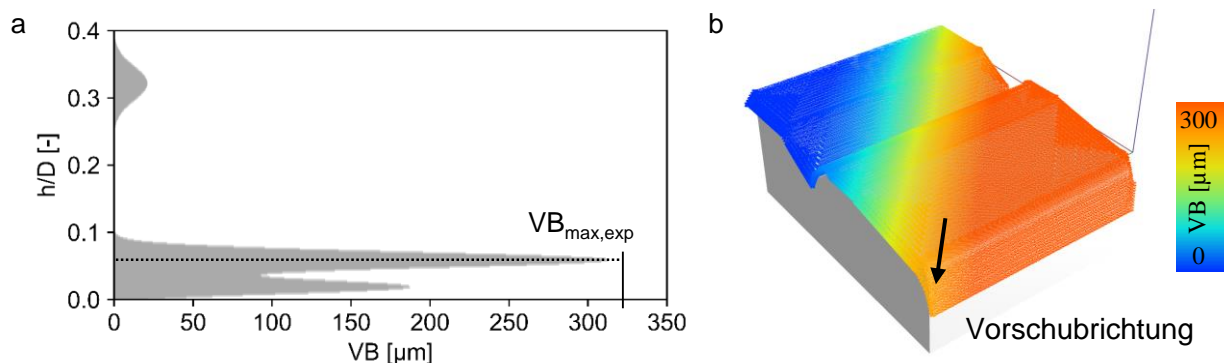


Abbildung 55: Simulierte VB-Verteilung nach 30 Schlichtvorgängen des Demonstrationsprozesses

Dieses Ergebnis zeigt, dass die Methode der zielgerichteten Modellerstellung funktioniert. Die experimentell erzeugten Ergebnisse der Varianten stimmen nur in Teilen mit den

erwarteten Ergebnissen überein. Für die anderen Varianten des Schlichtprozesses, auf die das Modell bezüglich der auftretenden Eingriffe nicht eingestellt ist, ergaben sich große Fehler. Für die Variante 1 des Prozesses ergab sich experimentell ein maximaler Verschleiß von $32\ \mu\text{m}$ wohingegen das Verschleißmodell den maximal auftretenden Verschleiß mit etwa $120\ \mu\text{m}$ stark überschätzt, siehe Abbildung 56.

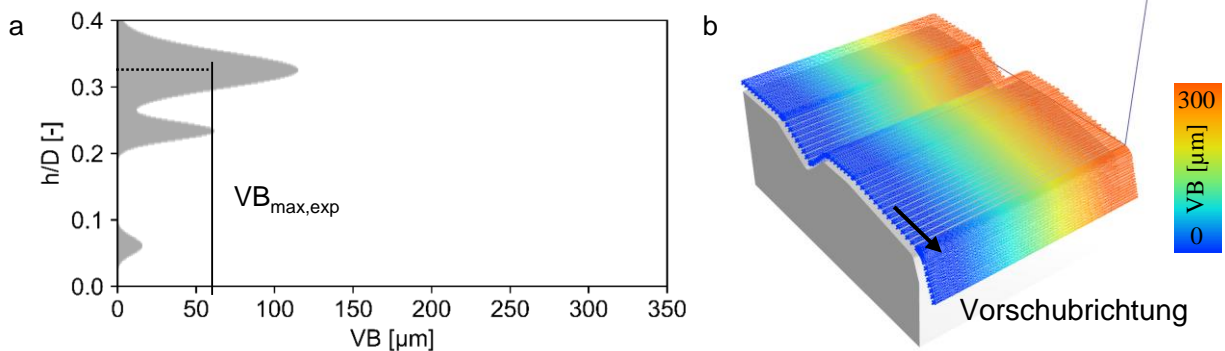


Abbildung 56: Simulierte VB-Verteilung nach 30 Schlichtvorgängen der Variante 1

Für die Variante 2 des Prozesses ergab sich experimentell ein maximaler Verschleiß von $108\ \mu\text{m}$ wohingegen das Verschleißmodell den maximal auftretenden Verschleiß mit etwa $230\ \mu\text{m}$ stark überschätzt, siehe Abbildung 57.

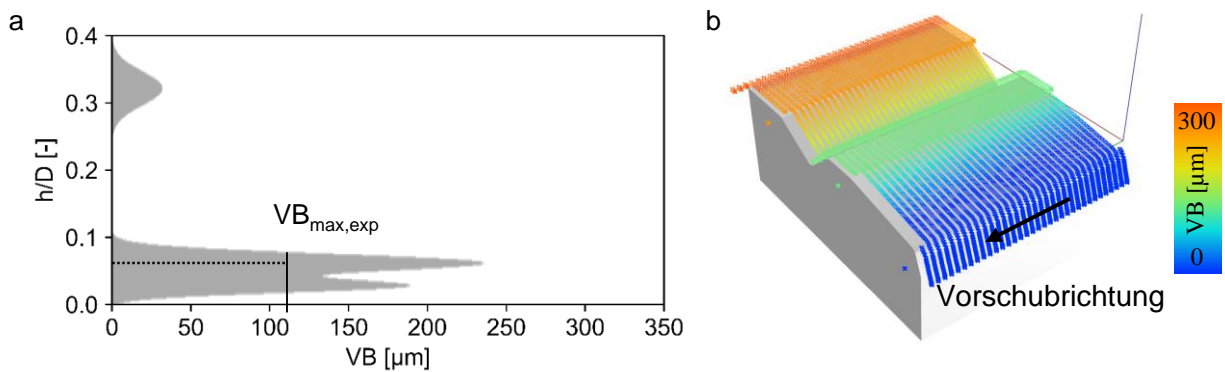


Abbildung 57: Simulierte VB-Verteilung nach 30 Schlichtvorgängen der Variante 2

Für die Variante 3 des Prozesses ergab sich experimentell ein maximaler Verschleiß von $86\ \mu\text{m}$ wohingegen das Verschleißmodell den maximal auftretenden Verschleiß mit etwa $120\ \mu\text{m}$ überschätzt Abbildung 58.

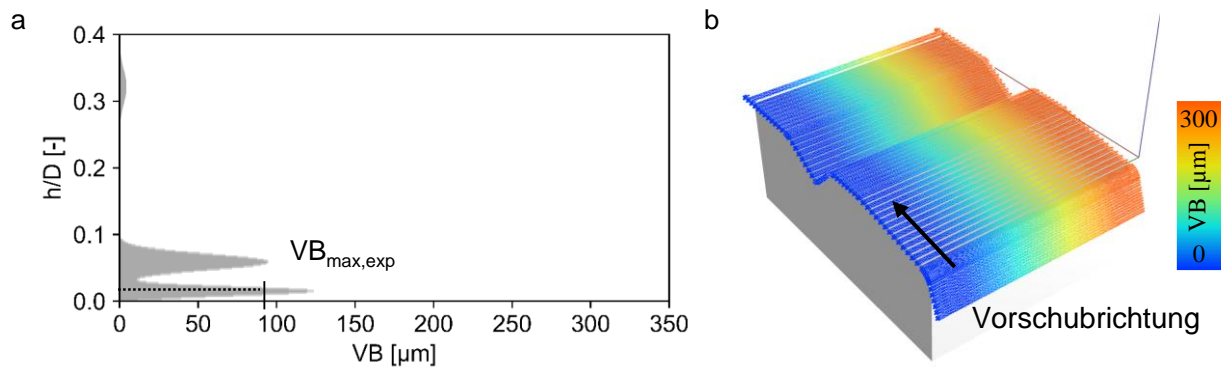


Abbildung 58: Simulierte VB-Verteilung nach 30 Schlichtvorgängen der Variante 3

Das Fazit aus dieser Betrachtung ist die fehlende Übertragbarkeit des Modellierungsansatzes

AP 6.3 Anpassung des Demonstrators oder der Modelle falls erforderlich

Innerhalb des Vorhabens wurden neben dem Demonstratorprozess weitere Varianten entwickelt die in AP3.2 ausführlich beschrieben sind. Diese dienen der Überprüfung der Generalisierungsfähigkeit der in AP2.5 entwickelten Modellierungsmethode. Dieser zweite Ansatz der Modellierung (anwendungsspezifisch für eine Bahnplanung) wurde entwickelt, da die erste Methode (allgemeine Charakterisierung eines Werkzeugs in einem Werkstoff) in Kapitel AP2.3 nicht den erwarteten Erfolg innerhalb eines Datensatzes von 16 Grundlagenexperimenten brachte. Der zweite Ansatz zeigte Erfolg bei der operationsspezifischen Vorhersage des Verschleißes. Jedoch treten bei der Anwendung auf weitere Varianten der Schlichtoperation mit abweichenden Eingriffskennfeldern, hohe Fehler bei der Vorhersage auf. Eine Generalisierbarkeit kann durch diesen Ansatz entsprechend nicht erreicht werden.

Erfüllungsgrad: AP6.1 bis 6.3 umgesetzt.

Fazit:

Zusammenfassend konnte innerhalb des Projektes folgende Punkte erreicht werden:

1. Identifikation einer in der Werkzeugbaubranche relevanten Werkstock-Werkzeug-Kombination mithilfe des PA und einer branchenspezifischen Umfrage.
2. Modellierung des Verschleißes mit dem KI-Werkzeug Multi-Layer-Perceptron in einem Greybox Ansatz zusammen mit der Eingriffssimulation.
3. Eine Linearisierung der Verschleißkurven von Freiflächenverschleiß konnte durchgeführt und validiert werden. Dies dient der Berechnung von Verschleißraten und vereinfacht die Kumulierung von Verschleiß entlang von Werkzeugbahnen.
4. Die Gauss-Methode zur Parametrisierung von Freiflächenverschleiß wurde entwickelt. Diese erlaubt eine Skalierbarkeit von Modellparameter in Bezug auf die Auflösung der Simulationssoftware und eingesetzten Messgeräte.
5. Entwicklung einer Clusterungsmethode mit dem KI-Werkzeug K-Means zur Identifikation verschiedener Eingriffssituationen ohne simulative Eingriffsberechnung.
6. Effiziente Eingriffssimulationen von identifizierten Eingriffsklustern (hier genannt: Minimalbeispiele) zur signifikanten Reduzierung des Rechenaufwandes von mehreren Millionen Eingriffen auf wenige Tausende.
7. Konzeptionierung und Entwicklung einer zielgerichteten Methode der Verschleißmodellierung insbesondere für große Bauteile mit kleinen Losgrößen und hohen Qualitätsanforderungen.
8. Modellierung der Verschleißrate des Freiflächenverschleißes eines Kugelkopfschlichtwerkzeugs mithilfe der entwickelten Methode.
9. Visualisierung des erwartbaren Verschleißes entlang der Werkzeugbahn in einem CAM-System.
10. Untersuchung der erreichten Oberflächenrauheiten und Werkzeugverschleißzustände bei verschiedenen CAM-Strategien der Schlichtoperation des Bauteils.
11. Prüfung der Modellierungsmethode für abweichenden CAM-Strategien, welche Eingriffsbedingungen enthalten, die nicht im Demonstrationsprozess und entsprechend nicht im Modell vorhanden sind.
12. Entwicklung von Eingriffskennfeldern, die der wissensbasierten Auslegung von Schlichtoperationen während der CAM-Planungsphase dienen.

In Bezug auf die in der Literaturrecherche identifizierten Unzulänglichkeiten der bestehenden Werkzeugverschleißmodelle kann folgendes Fazit gezogen werden:

1. Die aufwändige Erzeugung / Messung von Eingangsparametern, wie z. B. Materialeigenschaften oder Prozesszustandsgrößen.

Dieser erste Punkt konnte adressiert werden, da die Anzahl der erforderlichen Grundlagenversuche mit dem zweiten vorgestellten Modellierungsansatz reduziert wurde. Allerdings ist der verbliebene Aufwand von drei Experimenten (siehe AP2.5) für eine wenig komplexe Schlichtoperation weiterhin hoch.

2. Eine in den CAD-CAM-Workflow integrierte Simulation für die interaktive Human-in-the-Loop-Optimierungen während der Prozessplanung wurde nicht berücksichtigt und umgesetzt.

Eine Integration in ein bestehendes CAD-CAM-System konnte erreicht werden. Eine Optimierung der Bahnplanung einer Schlichtoperation mit verschiedenen CAM-Strategien ist aufgrund der zielgerichteten Modellierung jedoch nicht möglich. Es konnte gezeigt werden, dass das Modell für abweichende Strategien keine wertvolle Vorhersage treffen kann. Die in Abbildung 59 dargestellte Schematik der Optimierungsschleife ist entsprechend nur eingeschränkt möglich.

3. Es werden hauptsächlich skalare Werte als Verschleißmaß genutzt, zudem findet keine Lokalisierung des auftretenden Verschleißes entlang der Schneidkante statt, mit Ausnahme der rechenintensiven FEM Ansätzen.

Die entwickelte Modellierungsmethodik liefert ein Kennfeld des Freiflächenverschleißes entlang der Werkzeugachse und liefert ebenfalls die Kenntnis des im Eingriff befindlichen Schneidenbereichs, bzw. des maximalen im Eingriff befindlichen Verschleißes. Dieser wird zudem beispielhaft im CAM System entlang des Werkzeugpfades dargestellt werden.

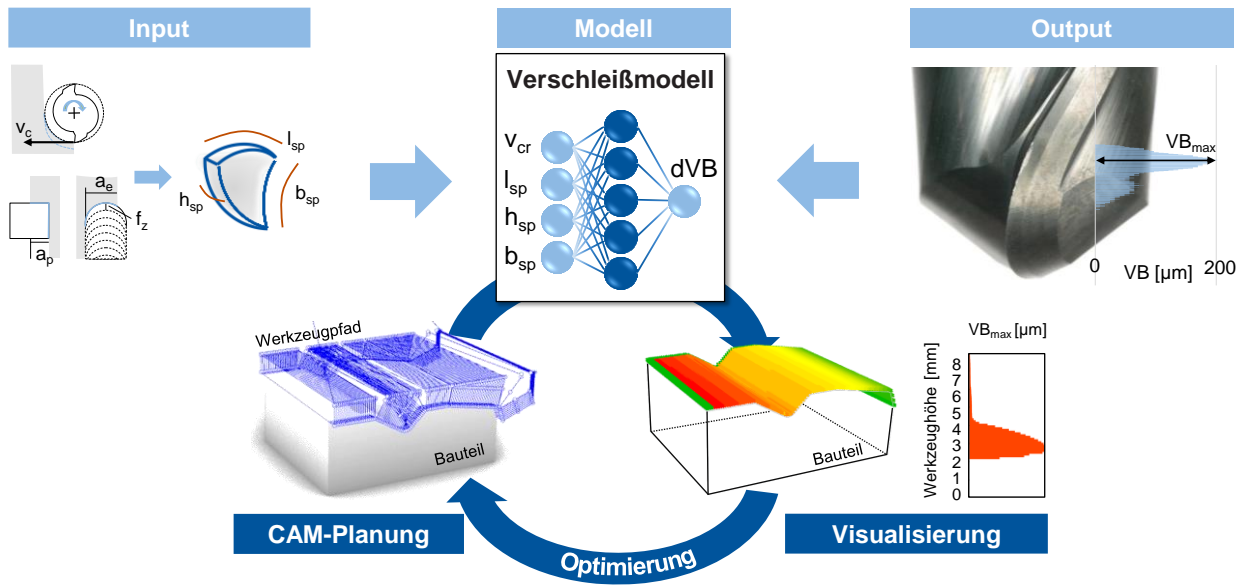


Abbildung 59: Schematische Darstellung der Modellierung von Werkzeugverschleiß und der Anwendung dessen in einer CAM Umgebung

Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten

Die wirtschaftliche Fertigung von Gütern mittels Fräs- und Bohrbearbeitung erfordert kurze Bearbeitungszeiten bei reproduzierbar erfüllten Toleranzen und Oberflächenvorgaben. Der Erfüllungsgrad dieser Forderung stützt sich maßgeblich auf das Technologiewissen der Experten in der Arbeitsvorbereitung und NC-Programmerstellung. Das hier über mehrere Jahre hinweg aufgebaute wirtschaftlich-technologische Erfahrungswissen festigt sich jedoch naturgemäß in Form von individuellen, impliziten Entscheidungsmustern. Scheidet ein Experte aus dem Unternehmen aus, so geht dieses Wissen vollständig verloren. Zudem erschweren kürzere Produktlebenszyklen und eine branchenübergreifend kontinuierlich steigende Produktvielfalt die auftragsübergreifende Auswahl optimaler Werkzeuge und Technologiewerte.

Weiterhin nimmt der Anteil älterer Menschen am Industriestandort Deutschland stetig zu. Dies führt zu einem spürbaren Ungleichgewicht zwischen verfügbaren Nachwuchskräften und altersbedingten Entlassungen ins Rentenalter. Obwohl die damit verbundenen strukturellen Veränderungen grundsätzlich alle in Deutschland produzierenden Unternehmen treffen, fehlen derzeit insbesondere kleinen und mittelständischen Betrieben die notwendigen Mittel für ein proaktives Demografiemanagement. Technologische Kernkompetenzen, liegen bei großen Unternehmen in Spezialabteilungen mit personellen Redundanzen vor, sodass ein Generationswechsel selten zu Problemen führt. Bei KMU stellt sich die Situation deutlich anders dar. Dort liegen die Wettbewerbsvorteile oft personengebunden vor. D.h. die Erfahrung und das Know-How von Einzelpersonen ist häufig für das wirtschaftliche Wohlergehen des Unternehmens mit verantwortlich. Im Forschungsprojekt *CAMWear* wurde daher eine Lösung zur nachhaltigen Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit kleiner und mittelständischer Unternehmen erforscht.

Um als Teilnehmer eines Hochlohnlandes wie Deutschland im internationalen Wettbewerb mithalten zu können, spezialisieren sich die Unternehmen zusehends. Der hohe Grad an Flexibilität und Qualität insbesondere bei der Fertigung von Kleinserien und Einzelteilen ist dabei herausragendes Merkmal deutscher KMUs in der Produktionstechnik. Dabei leisten die direkten und indirekten Werkzeugkosten einen

signifikanten Beitrag zu den Produktionskosten. Ein annähernd optimales Ausnutzen der Werkzeugstandzeit und Prozessparametrierung kann nur durch intensives Erfahrungswissen erreicht werden.

Der vorgestellte Ansatz zur Optimierung der CAM-Bahnplanung in der Fräsbearbeitung durch Grey-Box-Simulation von Werkzeugverschleiß setzt daher auf eine wissensbasierte Ableitung von Entscheidungsregeln zur Auslegung von Fräsprozessen unter Berücksichtigung des Werkzeugverschleiß.

Die Arbeitspakete 1 und 3 sind als Vorarbeit notwendig, um den ganzheitlichen Ansatz innerhalb eines Demonstrators, der als Anwendungsgrundlage für KMU dient, zu aggregieren und umzusetzen. Insbesondere besteht dabei das Ziel, eine notwendige Datenbasis für die Modellentwicklung zu generieren, der die Fertigungsanforderungen und Fertigungsverfahren von KMU berücksichtigt.

Arbeitspaket 4 bis 5 sind notwendig, um das entwickelte Verschleißmodell anzuwenden und dadurch dem Planer und Maschinenbediener bei KMU Informationen und Handlungsempfehlungen zu geben, die eine erleichterte Prozessauslegung ermöglichen. Gleichzeitig konnte dabei mit einer demonstratorischen Anbindung die Einführung der erarbeiteten Lösung in bestehende IT-Infrastrukturen von CAD/CAM-Anbietern veranschaulicht werden.

Arbeitspaket 6 dient zur Überprüfung und Validierung des Ansatzes im Kontext des Fertigungsumfeldes von KMU. Dazu wurde die hauseigene Fertigung als Referenz zum Fertigungsumfeld bei KMU genutzt, um den Ansatz zu validieren. Der Ansatz kann dazu beitragen, Planungszeiten einzusparen und wirtschaftliche Fertigungsprozesse zu realisieren. Zudem ergeben sich für KMU folgende Vorteile:

- Reduzierte Abhängigkeit von Einzelpersonen
- Sensibilisierung für technologisches Wissensmanagement
- Schutz vor der Abwanderung von Know-How bzw. Wissen
- Übertragbarkeit der entwickelten Konzepte, Methoden und Algorithmen auf weitere Branchen und Einsatzbereiche sowie Werkzeugtypen

2. Verwendung der Zuwendung

▪ **Wiss.-techn. Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans):**

Die beantragten Zuwendungen (bZ) wurden zur Finanzierung des wissenschaftlich-technischen Personals verwendet. Die genaue Aufteilung nach Forschungseinrichtungen sind folgender Tabelle zu entnehmen.

Tabelle 1: Wissenschaftlich-technisches Personal nach Forschungseinrichtungen

Forschungseinrichtung	Zeitraum	Personalmonate
1 - FVP	01.02.2019 – 31.12.2019	HPA-A: 5,50 MM HPA-B: 6,30 MM
	01.01.2020 – 31.12.2020	HPA-A: 6,00 MM HPA-B: 5,90 MM
	01.01.2021 – 31.01.2021	HPA-A: 0,30 MM HPA-B: 0,00 MM
2 - IPT	01.02.2019 – 31.12.2019	HPA-A (EG 13): 8,02 MM
	01.01.2020 – 31.12.2020	HPA-A (EG 13): 8,83 MM
	01.01.2021 – 31.01.2021	HPA-A (EG 13): 1,99 MM

▪ **Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans):**

Keine Ausgaben

▪ **Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans):**

Keine Ausgaben

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die durchgeführten Arbeiten konnten und wurden streng an den geplanten Arbeiten aus dem Antragsdokument orientiert, siehe Kapitel 1 und erfüllen daher die Kriterien der Notwendigkeit und Angemessenheit. Alle durchgeführten Arbeiten entsprechen dem im Antrag dargestellten Arbeitsplan. Es werden keine Verzögerungen erwartet. Insgesamt entsprechen die geleisteten Arbeiten in vollem Umfang dem begutachteten und bewilligten Antrag und waren daher für die Durchführung des Forschungsvorhabens notwendig und angemessen.

4. Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

In den folgenden beiden Tabellen werden die bereits durchgeführten Maßnahmen sowie künftig geplante Maßnahmen zum Ergebnistransfer aufgeführt.

Tabelle 2: Transfermaßnahmen zur Projektlaufzeit

Transfermaßnahme	Status	Datum
Erstellung einer Projektwebsite	abgeschlossen	06/2019
Vorstellung der Projektinhalte auf der FVP Mitgliederversammlung	abgeschlossen	02/2019
1. Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses / Kick-Off	abgeschlossen	12.03.2019
2. Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses	abgeschlossen	25.07.2019
3. Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses	abgeschlossen	19.11.2019
Vorstellung der Projektinhalte auf der EXAPT Hausmesse	abgeschlossen	11/2019
Verbreitung der Ergebnisse über Netzwerke (Alumninetzwerk, Fraunhofer Gesellschaft) und das hauseigene Fachmagazin	abgeschlossen	11/2019
Vorstellung der aktuellen Arbeiten bei Mitgliedern der WBA	abgeschlossen	06.02.2020
Vorstellung der Projektinhalte auf der FVP Mitgliederversammlung	abgeschlossen	02/2020
4. Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses	abgeschlossen	28.01.2020
5. Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses	abgeschlossen	22.04.2020
Vorstellung der Projektinhalte auf der EXAPT Hausmesse	abgeschlossen	04/2020
6. Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses	abgeschlossen	15.07.2020
Wöchentliche Digital Showroom Events in Aachen (FVP)	abgeschlossen	17.09.2020 bis 31.12.2020
Eingereichtes und akzeptiertes wissenschaftliches Papier „Spatially Resolved Tool Wear Prediction in Finish Milling“ bei der “54th CIRP Conference on Manufacturing Systems”	abgeschlossen	11/2020 (VÖ 10/2021)

Tabelle 3: Geplante Transfermaßnahmen nach Projektlaufzeit

Transfermaßnahme	Status	Datum
Veröffentlichung des Projektbericht auf Websites von FVP und IPT	geplant	07/2021
Wöchentliche Digital Showroom Events in Aachen (FVP)	geplant	02/2021
Verwendung der Ergebnisse in Abschlussarbeiten (Azubi-Abschlussarbeiten)	geplant	02/2021
Integration der Ergebnisse in Lehrveranstaltungen von FVP und IPT	geplant	02/2021
Vorstellung des Projektes und der Projektergebnisse auf dem AWK 2021	geplant	06/2021
Vorstellung der Projektinhalte auf der FVP Mitgliederversammlung	geplant	02/2021
Vorstellung der Projektinhalte auf der EXAPT Hausmesse	geplant	04/2021
Vorstellung bei der CIRP CMS 2021 in Athen	geplant	09/2021
Ergebnisvorstellung auf dem CAD-CAM-NC-Seminar des WZL	geplant	11/2021

5. Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts

Die enge Abstimmung mit dem PA ermöglichte es bereits zur Laufzeit des Projekts Transfermaßnahmen durchzuführen. Dabei wurde insbesondere auf das Erreichen von KMUs und die dedizierte Erklärung des Nutzens für diese geachtet. Abschließend sollen die Ergebnisse einer breiten Öffentlichkeit auf dem AWK2021 auf Demonstratorebene vorgestellt werden. Das AWK ist die deutsche Leitmesse der Produktions- und Fertigungstechnik mit etwa 1.400 Teilnehmern. Hier werden auch zahlreiche OEMs anwesend sein, sodass ebenfalls ein „Pull-Effekt“ entstehen kann. Eine digitalisierte Prozesskette erhöht die Transparenz in der Fertigung und kann KMUs eine höhere Bindung an ihre Kunden (OEMs) durch eine durchgehende Dokumentation bieten.

Am Fraunhofer Institut für Produktionstechnik (IPT) findet zudem aktuell der Aufbau einer durchgängigen digitalen Prozesskette statt. In dieses Umfeld lässt sich der entwickelte Ansatz gut für die Prozessgrob- und Feinplanung der entsprechend eingesteuerten Aufträge als zusätzliche Planungsinformation integrieren und kann so weiter getestet und für Vorführungszwecke sowie Demonstrationen genutzt werden. KMU wird hierdurch im Anschluss langfristig die Möglichkeit bereitgestellt, eigene Anwendungsfälle entlang der in diesem Zusammenhang aufgebauten Demonstrator-Prozesskette zu evaluieren, um daraufhin die für das eigene Unternehmen relevanten Digitalisierungsaspekte zu etablieren.

Über die Demonstrationsebene hinaus gibt es bereits heute konkrete Zusagen des am begleitenden Ausschuss beteiligten CAM-Systemanbieters EXAPT, welcher Projektergebnisse in seine Systeme einfließen lassen will. Es wird derzeit davon ausgegangen, dass eine Umsetzung innerhalb von 12-18 Monaten, eine geeignete industrielle Anschlussförderung (bspw. ZIM oder KMU-Innovativ) vorausgesetzt, erfolgen wird. Für Endanwender werden die Forschungsergebnisse also zeitverzögert nach Projektende auch am Markt verfügbar sein.

Zusammenfassend wird somit die Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzeptes als hoch angesehen, zumal eine Realisierung der aufgebauten Konzepte 2021 als Demonstrator am IPT, sowie in ca. 1,5 Jahren auch kommerziell umgesetzt sein wird.

6. ANHANG

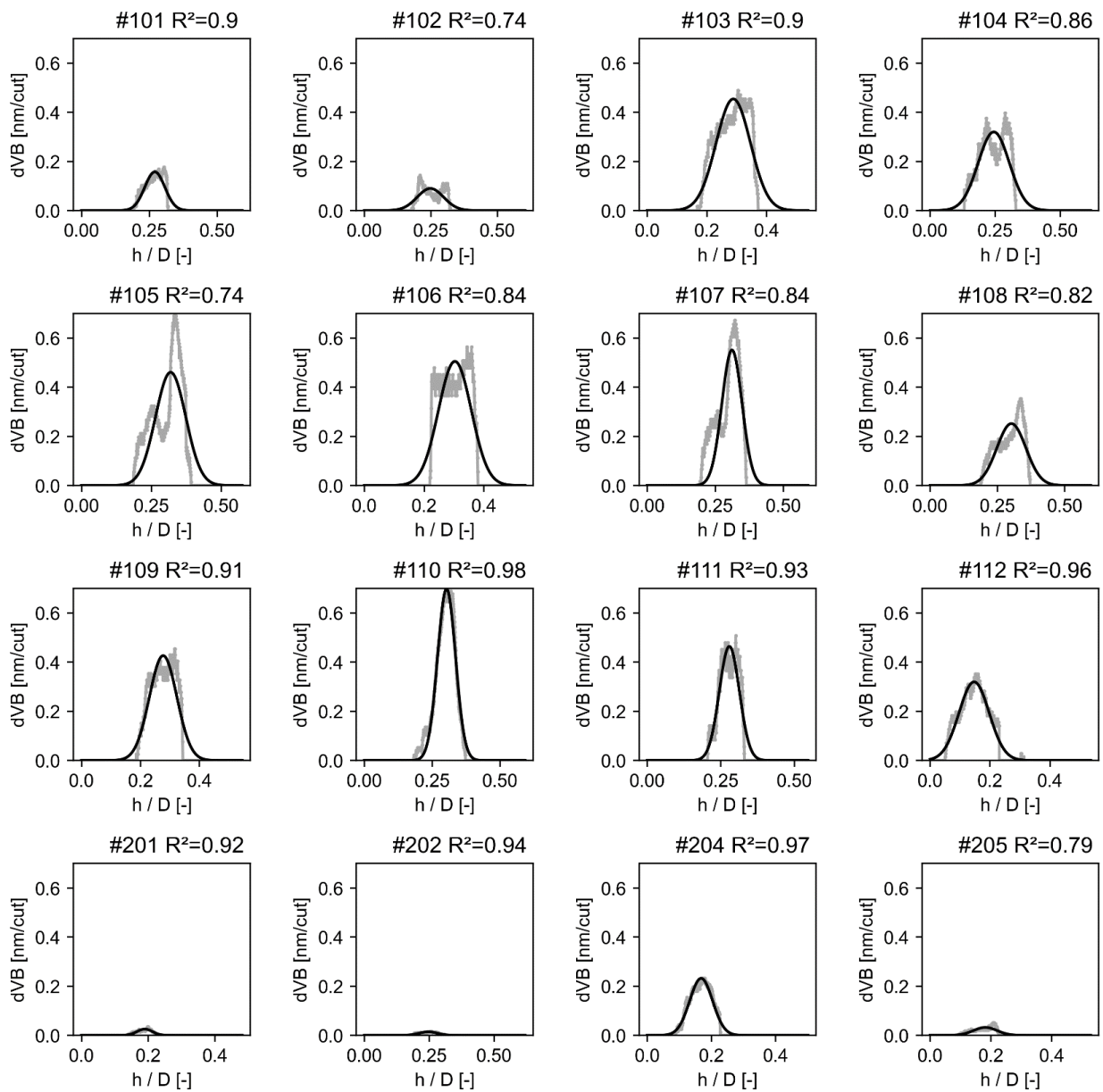


Abbildung 60: Durchmesser 12 mm Blockfräsuntersuchungen in 1.2343, Verteilung der Verschleißrate pro Schnitt, dVB, in Abhängigkeit der Werkzeughöhe, Gauss'sche Kurvenanpassung mit Bestimmtheitsmaß.

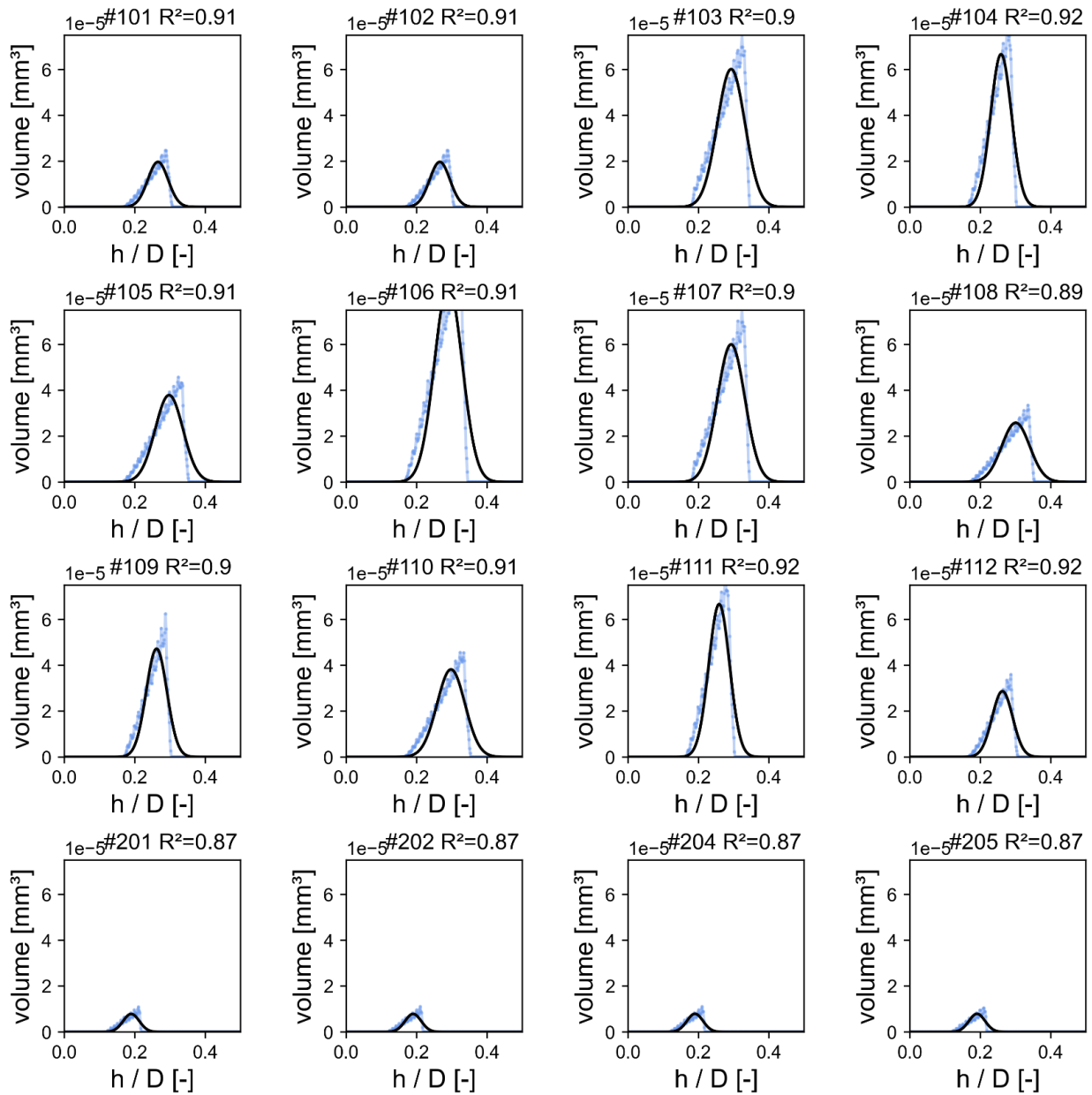


Abbildung 61: Durchmesser 12 mm Blockfräsuntersuchungen in 1.2343, Verteilung des Volumens pro Schnitt in Abhängigkeit der Werkzeughöhe, Gauss'sche Kurvenanpassung mit Bestimmtheitsmaß.

Tabelle 7: Eingesetzte Python Bibliotheken

Bibliothek	Zweck
Os	Betriebssystem Schnittstelle
Time, datetime	Zeitmessung, Zeitstempel
Math	Trigonometrie
Csv	Datenhandling
Numpy	Matrixkalkulation
Pandas	Datenanalyse
Scipy	Matrixkalkulation
Statistics	Statistik
Sklearn	Machine Learning
Matplotlib	Plotting
Seaborn	Plotting
Plotly	Plotting
Trimesh	Mesh Generierung aus CAD
Pickle	Datenspeicherung
Swifter	Parallelisierung

7. Literaturverzeichnis

- [1] Gesellschaft für Tribologie. Tribologie: Arbeitsblatt 7, 13 pp. <https://docplayer.org/23451843-Arbeitsblatt-7-tribologie-verschleiss-reibung-definitionen-begriffe-pruefung.html>.
- [2] Deutsche Norm. Begriffe der Zerspantechnik: Standbegriffe. Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 3 pp.
- [3] International Institution for Production Engineering Research, 2004. Wörterbuch der Fertigungstechnik: Trennende Verfahren. Springer Berlin Heidelberg, 298 pp.
- [4] Augspurger, T., 2018. Thermal Analysis of the Milling Process, 1st ed. ed. Apprimus Wissenschaftsverlag, Aachen, 176 pp.
- [5] Klocke, F., 2018. Fertigungsverfahren 1: Zerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide, 9.th ed. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 562 pp.
- [6] Li, B., 2012. A review of tool wear estimation using theoretical analysis and numerical simulation technologies. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials 35, 143–151.
- [7] Taylor F. W., 1906. On the art of cutting metals. Trans. Am. Soc. Mech. Eng. 1906 (28), 70–350.
- [8] Trigger, K.J., Chao, B.T., 1956. The mechanism of crater wear of cemented carbide tools. Transaction of ASME-Journal of Manufacturing 1956 (73), 1119–1126.
- [9] Takeyama, H., Murata, R., 1963. Basic Investigation of Tool Wear. J. Eng. for Industry 85 (1), 33.
- [10] Quinn, T.F.J., 1971. Oxidational wear. Wear 18 (5), 413–419.
- [11] Koren Y., 1978. Flank Wear Model of Cutting Tools Using Control Theory. Journal of Engineering for Industry 1978.
- [12] Hastings, W.F., Mathew, P., Oxley, P.L.B., Taylor, J., 1980. Estimated Cutting Temperatures—Their Use as a Predictor of Tool Performance When Machining Plain Carbon Steels, in: Tobias, S.A. (Ed.), Proceedings of the Twentieth International Machine Tool Design and Research Conference, vol. 20. Palgrave Macmillan UK, London, pp. 313–320.
- [13] Usui, E., Shirakashi, T., Kitagawa, T., 1984. Analytical prediction of cutting tool wear. Wear 100 (1-3), 129–151.
- [14] Yen, Y.-C., Söhner, J., Lilly, B., Altan, T., 2004. Estimation of tool wear in orthogonal cutting using the finite element analysis. Journal of Materials Processing Technology 146 (1), 82–91.

- [15] Attanasio, A., Ceretti, E., Rizzuti, S., Umbrello, D., Micari, F., 2008. 3D finite element analysis of tool wear in machining. *CIRP Annals* 57 (1), 61–64.
- [16] Molinari, J.-F., Aghababaei, R., Brink, T., Frérot, L., Milanese, E., 2018. Adhesive wear mechanisms uncovered by atomistic simulations. *Friction* 6 (3), 245–259.
- [17] Zhang, C., Zhou, L., 2013. Modeling of tool wear for ball end milling cutter based on shape mapping. *Int J Interact Des Manuf* 7 (3), 171–181.
- [18] Zhang, H., Zhang, C., Zhang, J., Zhou, L., 2014. Tool wear model based on least squares support vector machines and Kalman filter. *Prod. Eng. Res. Devel.* 8 (1-2), 101–109.
- [19] WZL, IPT, 2020. Excellence in Production: Wettbewerb 2020, Aachen.
- [20] TechnischesZeichnen.net. Rauheitswerte: Rautiefe. <https://www.technisches-zeichnen.net/technisches-zeichnen/diverses/rauheitswerte.php>. Accessed 20 January 2021.