

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 19828 N

Thema

QUAPS – Qualitätsprädiktive CAM-Simulation für die spanende Fertigung

Berichtszeitraum

01.01.2018 bis 31.12.2019

Forschungsvereinigung

1 Forschungsvereinigung Programmiersprachen für Fertigungseinrichtungen e. V.

Forschungseinrichtung(en)

1 Forschungsvereinigung Programmiersprachen für Fertigungseinrichtungen e. V.

2 RWTH Aachen, WZL / Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen

Aachen, 30.06.2020

Dipl.-Inform. Michael Königs

Dr.-Ing. Marcel Fey

FVP


Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 19828 N

Thema

QUAPS – Qualitätsprädiktive CAM-Simulation für die spanende Fertigung

Berichtszeitraum

01.01.2018 bis 31.12.2019

Forschungsvereinigung

1 Forschungsvereinigung Programmiersprachen für Fertigungseinrichtungen e. V.

Forschungseinrichtung(en)

1 Forschungsvereinigung Programmiersprachen für Fertigungseinrichtungen e. V.

2 RWTH Aachen, WZL / Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen

Aachen, 30.06.2020

Dipl.-Inform. Michael Königs

Dr.-Ing. Marcel Fey

Werkzeugmaschinenlabor
IGFTH Aachen - D 52056 Aachen
Hausanschrift: Campus-Boulevard 30 - D 52074 Aachen

Gefördert durch:

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 19828 N

Thema

QUAPS – Qualitätsprädiktive CAM-Simulation für die spanende Fertigung

Berichtszeitraum

01.01.2018 bis 31.12.2019

Forschungsvereinigung

1 Forschungsvereinigung Programmiersprachen für Fertigungseinrichtungen e. V.

Forschungseinrichtung(en)

1 Forschungsvereinigung Programmiersprachen für Fertigungseinrichtungen e. V.

2 RWTH Aachen, WZL / Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen

Aachen, 30.06.2020

Dipl.-Inform. Michael Königs

Dr.-Ing. Marcel Fey

Gefördert durch:

Bezugsrahmen und Zielsetzung

Ein Großteil der in Deutschland produzierenden kleinen- und mittelständischen Unternehmen (KMU) sieht sich angesichts immer gesättigter Märkte und infolge der Globalisierung, einem hohen Kostendruck ausgesetzt. Die Folgen sind neben kürzeren Produktlebenszyklen eine immer feinere Aufteilung des Marktes und eine erhöhte Anzahl von Produktvarianten. Dies hat immer kleiner werdende Stückzahlen je Produktvariante zur Konsequenz. [KORE10] Um Kosten in der Produktion zu minimieren, muss daher eine fehlerfreie Herstellung des ersten Bauteils eine Zielgröße sein. In der Literatur wird dies auch als „First-Time-Right“-Prinzip bezeichnet. [SCHU12]

Ferner stehen KMU auf Grund des demografischen Wandels vor neuen Herausforderungen. Diese beinhalten neben der Alterung der Belegschaft auch ein Ringen um junge, hochqualifizierte Fachkräfte. Obwohl die damit verbundenen strukturellen Veränderungen in der Regel alle in Deutschland produzierenden Unternehmen betreffen, fehlen derzeit insbesondere kleinen- und mittelständischen Betrieben die notwendigen Ressourcen für eine langfristige Personalpolitik. Hinzukommt, dass technologische Kernkompetenzen in KMU überwiegend personengebunden sind. Scheidet ein Experte aus einem KMU aus, so können die über mehrere Jahre gewonnenen Kompetenzen verloren gehen. Hiervon betroffen sind vor allem die Arbeitsvorbereitung und die CAM-Planung, da hier häufig erfahrene Mitarbeiter eingesetzt werden müssen. Damit KMU in Deutschland auch zukünftig wettbewerbsfähig produzieren können, muss daher ein geeigneter Wissenstransfer zwischen den einzelnen Generationen stattfinden. [STAT11, VERW07, BENN10]

Um diesen Problemstellungen zu begegnen, sind deshalb die projektbegleitenden KMU-Industriepartner mit einer gemeinsamen Forschungsfrage an die FVP und das WZL herangetreten:

„Wie und mit welcher Präzision ist es bereits im Stadium der CAM-Planung möglich, die Bauteilqualität hinsichtlich einzelner Form- und Lagetoleranzen nach ISO 1101 vorherzusagen?“

Hierbei wurden nachträglich folgende Zusätze zur Forschungsfrage ergänzt:

- a) *„Wie lassen sich darüber hinaus systematische und zufällige Einflussfaktoren (z. B. durch Werkstück, Maschine, Spannmittel, Werkzeug, Umgebung) und deren Anteile am Erfüllungsgrad einzelner Toleranzvorgaben darstellen?“*
- b) *„Wie ist eine Lösung zu gestalten, damit sie intuitiv und ohne tiefgreifendes Expertenwissen von CAM-Planern eingerichtet und eingesetzt werden kann?“*

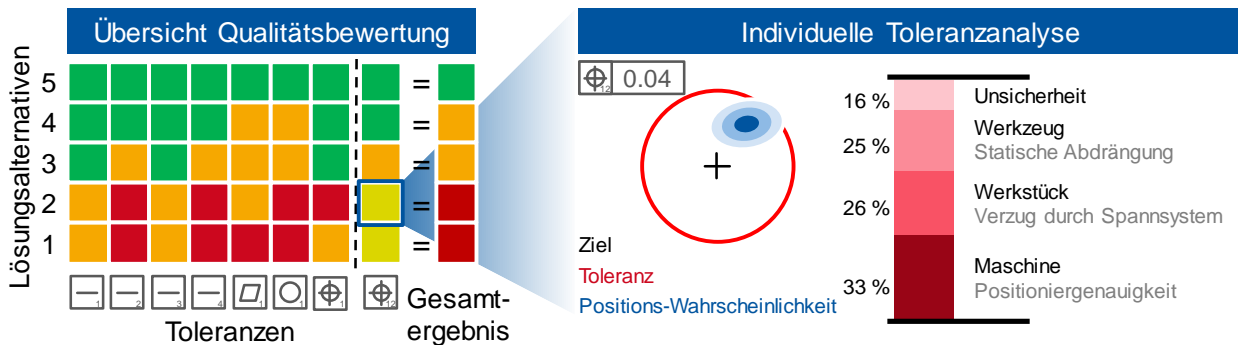
Im Rahmen der Grundlagenforschung sind bereits unzählige Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge der spanenden Bearbeitung untersucht und beschrieben worden (vgl. [DENK14]). Obwohl diese meist wertvolle Puzzleteile zur Beantwortung der gestellten Forschungsfrage darstellen, ist eine direkte und fallgerechte Übertragung auf den Erfüllungsgrad individueller Bauteiltoleranzen nach DIN ISO 1101 [DIN17b] kaum möglich.

Durch die Virtualisierung von Maschinen [ALTI05], Maschinenkomponenten [ABEL10, ALTI11] und Zerspanprozessen [ALTI14, ALTI16] wurden geeignete Puzzleteile erstmals identifiziert, generalisiert und kontextualisiert. So ist es hochqualifizierten Experten in der Maschinen- und Prozessauslegung aktuell möglich, maschinen- bzw. bauteilspezifische Kennwerte zu simulieren, die Aufschluss über Prozessstabilität [BREC15, SITT13, SURM08a], Oberflächenbeschaffenheit [KISS16, SIEB15, SURM08b] oder Zykluszeiten [ALTI15] geben.

Ein Rückschluss auf den Erfüllungsgrad von Bauteiltoleranzen nach DIN ISO 8015 und DIN ISO 1101 [DIN11a, DIN17b] ist nach derzeitigem Stand der Forschung und Entwicklung allerdings nicht möglich. Vor allem werden die Zusatzanforderungen a) und b) nicht erfüllt.

Die Kernidee des Forschungsvorhabens besteht daher darin – im Sinne der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) – eine Brücke zwischen den Erkenntnissen der Grundlagenforschung und der wirtschaftlichen Anwendung bei spanend fertigenden KMU am Standort Deutschland zu schlagen, um so eine vom Expertenwissen unabhängigere CAM-Planung zu schaffen. Insbesondere soll den Unternehmen ermöglicht werden, ihre Produktqualität entsprechend des Effectuation-Gedankens (vgl. [SARA01, BRET14]) im hochdynamischen Fertigungsumfeld zu beherrschen. Hierfür wird eine Lösungsvorschrift

erforscht, mit der sich die fallspezifische Wechselwirkung und der Einfluss von Werkstück, Maschine, Spannmittel, Werkzeug und Umgebung unter Berücksichtigung aktueller Randbedingungen abbilden lassen. Dem CAM-Planer soll so ermöglicht werden, bewusst einzelne Fehlerquellen zu minimieren, um so eine bestmögliche und fehlerfreie Fertigung des ersten Bauteils zu gewährleisten.



Zentrale Fragestellung

- „Ist es bereits **vor Fertigungsbeginn** (d. h. im CAM-System) möglich, die Bauteilqualität **toleranzbezogen** vorherzusagen?“
- „Welche systematischen und zufälligen **Einflussfaktoren** (Werkstück, Maschine, Spannmittel, Werkzeug, Umgebung) beeinflussen einzelne Toleranzen **in welchem Maße**?“



Zusammenfassend wird angestrebt, eine KMU-seitig eingebrachte wirtschaftlich-technologische Problemstellung aus dem Bereich der Metallbearbeitung zu lösen. Hierfür ist die zielgerichtete Erweiterung bestehender CAM-Simulationen notwendig. Der wissenschaftliche Schwerpunkt wird dabei vollständig auf der spanenden Fertigung liegen. Eine anschließende Übertragung erarbeiteter Methoden und Erkenntnisse auf andere Fertigungsverfahren (bspw. Umformen) unmittelbar nach Projektende ist jedoch grundsätzlich möglich. Dies gilt insbesondere für die Systematik zur getrennten Beschreibung systematischer und stochastischer Einflussgrößen auf die Produktqualität.

Inhaltsverzeichnis

Schlussbericht	1
Thema	1
Berichtszeitraum	1
Forschungsvereinigung	1
Forschungseinrichtung(en)	1
Bezugsrahmen und Zielsetzung	2
Inhaltsverzeichnis	5
1. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse im Berichtszeitraum	6
Arbeitspaket 1 – Unternehmensbesuche und Ermittlung Anforderungsprofil (FVP)	6
Arbeitspaket 2 – Systematische Einflussfaktoren – Experimentell gestützte Modellbildung (WZL)	10
Arbeitspaket 3 – Stochastische Einflussfaktoren – Experimentell gestützte Modellbildung (WZL)	18
Arbeitspaket 4 – Zusammenführung in ein gemeinsames Rahmenwerk (WZL)	23
Arbeitspaket 5 – Umsetzung in Form eines Softwaredemonstrators (WZL)	28
Arbeitspaket 6 – Evaluierung des erarbeiteten Konzepts (FVP)	31
Arbeitspaket 7 – Dokumentation der Projektergebnisse und Erstellung Leitfaden (WZL)	39
2. Verwendung der Zuwendung	41
3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten	42
4. Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftliche Nutzens insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten	42
5. Plan zum Ergebnistransfer	44
6. Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts	48
7. Forschungsstellen	49
8. Literaturverzeichnis	50

1. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse im Berichtszeitraum

Arbeitspaket 1 – Unternehmensbesuche und Ermittlung Anforderungsprofil (FVP)

Zielsetzung

Gemeinsam mit den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses (PA) werden Randbedingungen aus CAM-Planung, Maschinenpark und Qualitätssicherung erfasst. Zudem werden Musterbauteile und Anwendungsbeispiele herausgearbeitet, die später zur Evaluation und Verifikation des Lösungskonzeptes dienen (Arbeitspaket 6). Auch werden die fallspezifischen Aufwände und Kosten ermittelt, die ein industriell einsetzbares System maximal verursachen darf.

Vorgehen

Bei den Mitgliedern des PA wurden in einem ersten Schritt Unternehmensbesuche durchgeführt. Vorort fanden neben der Befragung von Mitarbeitern aus der CAM-Planung auch Befragungen von Mitarbeiter aus der Fertigung sowie der Qualitätssicherung statt. Hierbei wurden vor allem das typische Spektrum an Bauteilen (Werkstoff, Geometriemerkmale), die Ausgestaltung der CAD-CAM-NC-Verfahrenskette, die verwendeten Qualitätsmerkmale und Qualitätssicherungsmaßnahmen beleuchtet. Ferner erfolgte eine Erörterung der aktuellen Herausforderungen und der hierdurch resultierenden Iterationsschleifen beim Einfahren und Ausführen neuer Prozesse. Ziel war die Erfassung der relevanten Einflussgrößen für einzelne Toleranzen vom Stadium der CAM-Planung und der Ressourcenauswahl (Schritt 1) über das Rüsten der gewählten Maschine (Schritt 2) bis hin zur Fertigung des Bauteils (Schritt 3). Anschließend soll das virtuell gefertigte Bauteil – analog zur realen Koordinatenmessung – virtuell vermessen werden (Schritt 4). Die darauffolgende Ergebnisdarstellung soll dem CAM-Planer eine intuitive Aufschlüsselung der toleranzrelevanten Einflussfaktoren wiedergeben (Schritt 5). Das beschriebene Vorgehen ist in Abbildung 1 dargestellt.

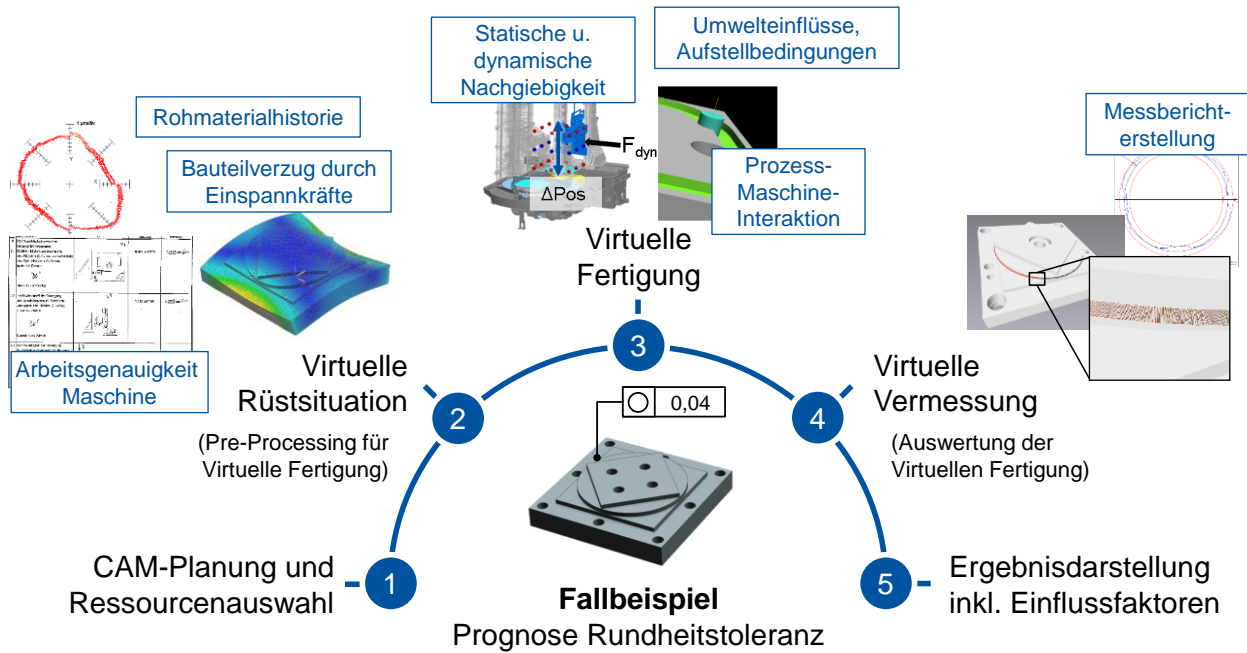


Abbildung 1 - Sequenzielle Simulationsvorschrift

Auf Grundlage dieser Erhebungen sind in einem nächsten Schritt Referenzbauteile, Referenzmerkmale und Referenzprozessketten abgeleitet worden, die der weiteren Konzeptentwicklung und späteren Evaluierung dienen.

Weiterhin wurde aus den genannten Herausforderungen eine Priorisierung von qualitätsrelevanten Effekten, die im Rahmen der CAM-Umgebung zur Verfügung gestellt werden müssen, abgeleitet. Die genannten Iterationsschleifen und die hierdurch hervorgerufenen Kosten (Zeit, Ressourcenbedarf) lassen sich weiterhin zur Abschätzung von Kosten und Aufwänden, die ein industriell einsetzbares System verursachen darf, heranziehen (Arbeitspaket 6). Im Folgenden werden die gewonnenen Erkenntnisse sowie die hieraus abgeleiteten Entscheidungen kurz zusammengefasst.

Bauteilspektrum und Qualitätsmerkmale

Bezogen auf das Spektrum an Bauteilen und Qualitätsmerkmalen steht bei den Endanwendern des PA vor allem die Herstellung von 3- bzw. 3+2-achsigen Fräsbauteilen im Fokus. Diese werden abschließend anhand von Qualitätsmerkmalen nach ISO 1101 bewertet. Auf Hinweis des PA sind dabei Geradheiten, Rundheiten und Winkligkeiten von einem besonderen Stellenwert. Auf Grundlage dieser Vorgaben und Erkenntnisse

wurden anschließend Referenzbauteile mit entsprechenden Geometrie- und Qualitätsmerkmalen erstellt.

Referenzprozesskette

Bei der Ausgestaltung der Referenzverfahrensketten wurde insbesondere darauf geachtet, dass Soft- und Hardware zum Einsatz kommt, die eine breite Verbreitung bei KMU-Endanwendern aufweist. Daher fand die Bearbeitungsplanung ausgehend von den CAM-Systemen der PA-Mitglieder CAMAIX (MasterCAM) und EXAPT (EXAPTplus) statt. Da bei den Endanwendern vorrangig 3-achsige und 3+2-achsige Bearbeitungen im Vordergrund stehen, wurden diese auf Werkzeugmaschinen vom Typ H2000 und HF3500 der Firma Heller (PA-Mitglied) ausgeführt. Im weiteren Verlauf wurde zudem zur Steigerung des Maschinenspektrums eine Vertikalfräsmaschine des Herstellers Chiron vom Typ FZ12S hinzugefügt. Durch den Fokus auf Toleranzvorgaben nach ISO 1101 finden abschließende Qualitätsbewertungen auf einer Koordinatenmessmaschine der Firma Zeiss statt (Zeiss Contura mit Calypso 2017 Mess-Software).

Qualitätsrelevante Effekte

Bei der Priorisierung der qualitätsrelevanten Effekte konnten aus den aufgenommenen Rückmeldungen insbesondere der Bauteilverzug infolge der Werkstückeinspannung, die Werkzeugabdrängung infolge von Bearbeitungskräften sowie das geometrisch-kinematische Maschinenverhalten identifiziert werden. Diese wurden daher im Rahmen des Projekts vorrangig adressiert. Auf thermische Effekte infolge äußerer Einflüsse soll explizit verzichtet werden.

Kostenabschätzungen zum Gesamtkonzept

Bei den zahlenmäßigen Betrachtungen wurde mit dem PA festgelegt, dass mit der Einführung des angestrebten, qualitätsprädiktiven CAM-Systems eine angenommene Reduktion der Iterationsschleifen um 50% einhergeht. Die hierdurch (fiktiv) eingesparten Kosten stellen damit eine Obergrenze für Kosten und Aufwände dar, die durch ein entsprechendes System entstehen dürfen.

Ergebnisse

Ergebnis ist die Aggregation erfasster technischer und wirtschaftlicher Anforderungen des beteiligten Projektkonsortiums. Ferner sind erste Musterbauteile durch die Mitglieder des PA zur Verfügung gestellt worden.

Personaleinsatz

Forschungsstelle 1 (FVP): 4,0 Personenmonat (PM)

Forschungsstelle 2 (WZL): 1,5 Personenmonate (PM)

Arbeitspaket 1 wurde im Jahr 2018 erfolgreich abgeschlossen.

Arbeitspaket 2 – Systematische Einflussfaktoren – Experimentell gestützte Modellbildung (WZL)

Zielsetzung

Aufbauend auf den Anforderungen sind neue Modellierungsmethoden für die Abbildung systematischer Einflussfaktoren innerhalb einer CAM-Umgebung zu erarbeiten.

Vorgehen

Auf Grundlage der priorisierten Einzeleffekte wurden in Arbeitspaket 2 Modellierungen zur Rüstsituation sowie virtueller Fertigung erarbeitet. Dazu wurden in einem ersten Schritt Messungen zum Bauteilverzug infolge der Einspannsituation sowie zum statischen und geometrisch-kinematischen Verhalten der betrachteten Werkzeugmaschinen durchgeführt. Auf Basis der Messergebnisse konnten im Anschluss Modellierungen erarbeitet werden, die sich zum einen durch eine Abbildung der jeweilig betrachteten Einzeleffekte und zum anderen durch die Integrierbarkeit in bestehende CAM-interne Bearbeitungssimulationen auszeichnen. Der Grundgedanke besteht hierbei im Aufschlagen der abgebildeten Effekte auf die CAM-internen erzeugten Werkstück-Werkzeug-Pfade, sodass bereits im Stadium der Bearbeitungsplanung eine realitätsnahe Bearbeitungssimulation durchgeführt werden kann. Anschließend sollen die entstehenden virtuellen Werkstücke anhand vorgegebener Qualitätsmerkmale vermessen werden (Arbeitspaket 5), um eine Prognose der erzielten Werkstückqualität zu erhalten.

Im Folgenden wird das Vorgehen (Messung, Modellbildung und CAM-Integration) für die betrachteten systematischen Einzeleinflüsse kurz erläutert.

Bauteilverzug

Zur Messung des Bauteilverzugs wurde eine Spannsituation mittels Rohteil und Spannmittel hergestellt. Im Anschluss wurde das Werkstück im entspannten und eingespannten Zustand mit einem Koordinatenmessgerät (Zeiss Contura) vermessen.

Auf Grundlage der gemessenen Unterschiede erfolgte daraufhin eine Parametrierung der FE-Simulation, die das Verzugsverhalten des Werkstücks nachbildet. Die simulierten Bauteilverzüge (Verschiebungen) wurden in einem nächsten Schritt aus der FE-Simulation exportiert und zur Deformierung des Materialabtragsmodells (MAM) im CAM-System verwendet. Nach Durchführung einer Bearbeitungssimulation fand anschließend eine inverse Deformation des Restmaterialmodells statt, um das Entspannen des Werkstücks nach der Bearbeitung zu simulieren.

Zur Validierung der Methodik erfolgte ein Vergleich der Oberflächengestalt des virtuell gefertigten Werkstücks mit dem Ergebnis einer real durchgeführten Fertigung. Hierzu wurde das Bauteil sowohl im eingespannten als auch im entspannten Zustand vermessen, um den Einfluss des Bauteilverzugs sichtbar zu machen.

Das gesamte Vorgehen und die resultierenden Ergebnisse sind in Abbildung 1 bis 3 zusammengefasst.

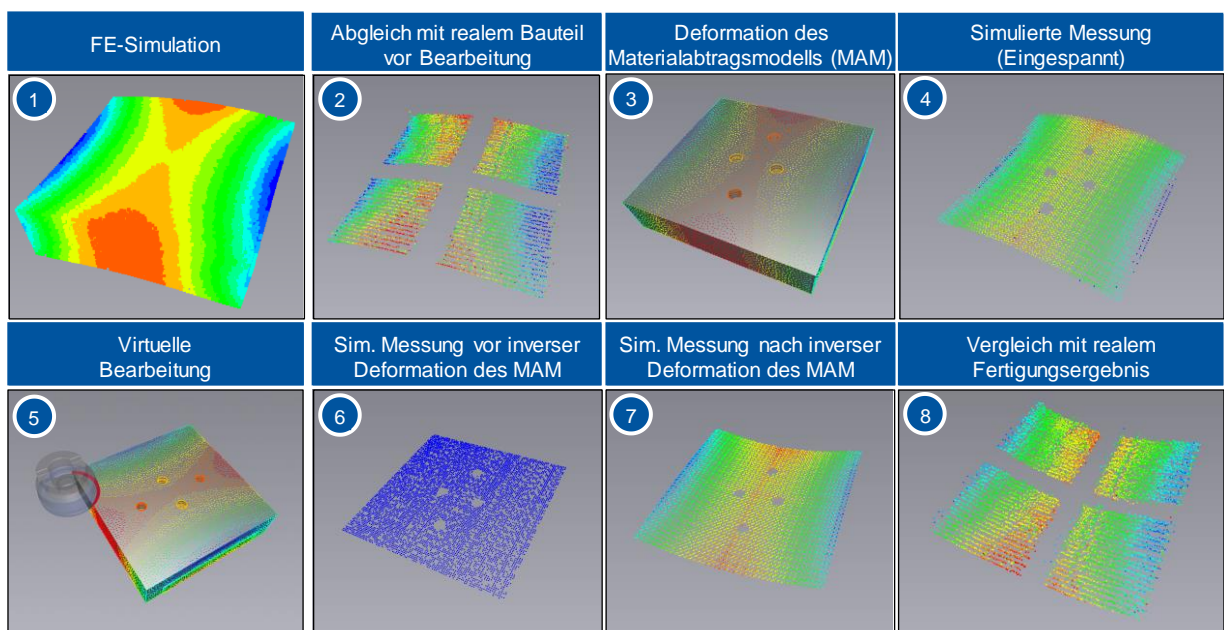


Abbildung 2 - Simulation des Bauteilverzugs

Die Validierung der Methode wurde für alle drei Raumrichtungen für die endkonturnahe Bearbeitung durchgeführt. Sowohl für Planfräsbearbeitungen (Verlagerung in Z-Richtung – vgl. Abbildung 1) als auch für Verlagerungen in der Bearbeitungsebene (Verlagerung in X- und Y-Richtung – vgl. Abbildung 2 und 3) ließen sich in erster Näherung gute Ergebnisse erzielen.

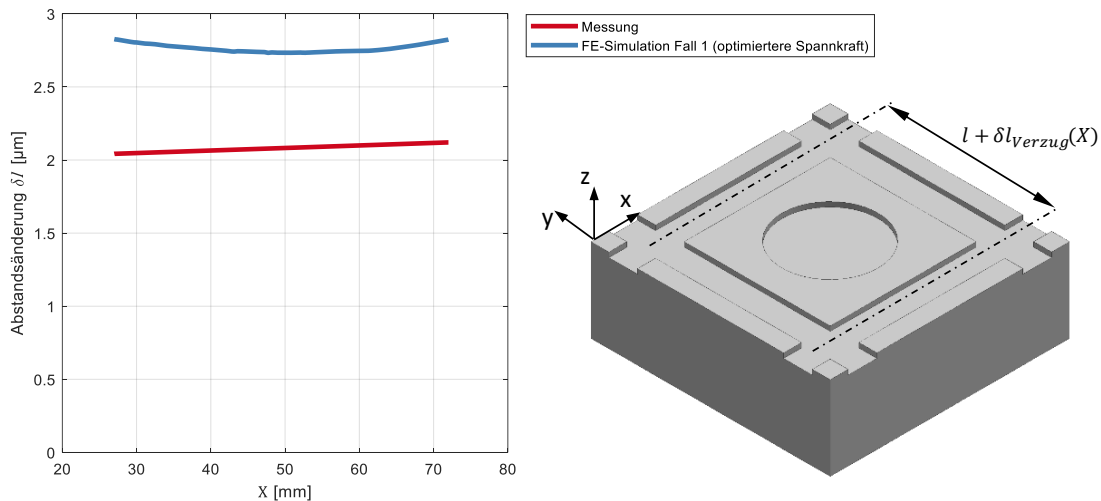


Abbildung 3 - Einfluss des Bauteilverzugs in Spannkraftrichtung

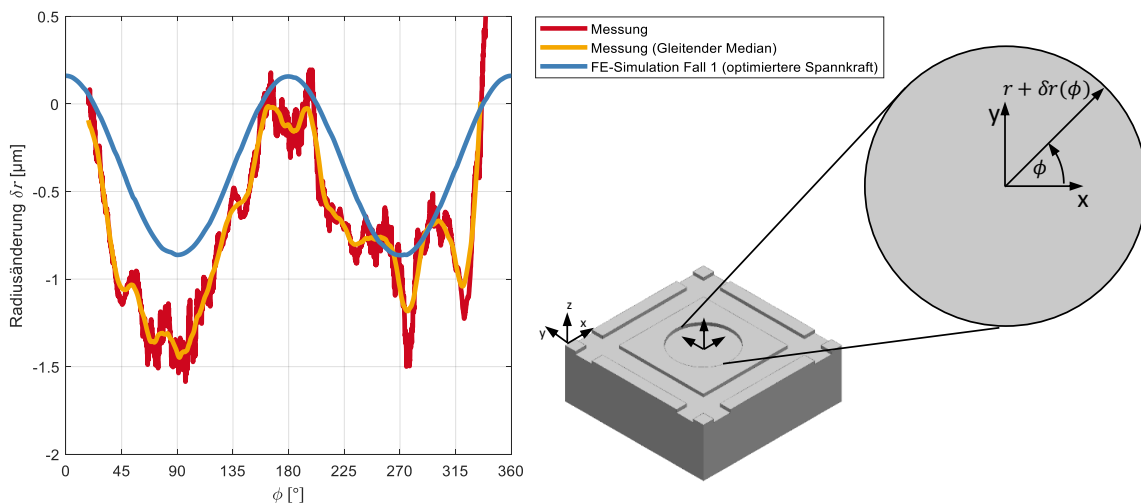


Abbildung 4 - Einfluss des Bauteilverzugs auf Rundheitstoleranzen

Es zeigt sich, dass mit dem durchgeführten Vorgehen das Verzugsverhalten des Werkstücks bereits gut nachgebildet werden kann. Einschränkungen bestehen jedoch durch die Annahme, dass Vorwärtsdeformation und inverse Deformation sich annähernd ähnlich verhalten. So eignet sich der Ansatz in erster Linie für endkonturrelevante Schichtbearbeitungen.

Statische Werkzeugabdrängung

Die Simulation der statischen Abdrängung setzt Modellierungen zur positionsabhängigen Nachgiebigkeit einer Werkzeugmaschine (inkl. Bearbeitungswerkzeug) sowie zur Berechnung von Zerspankräften voraus.

Zur Bestimmung der Nachgiebigkeit an den betrachteten Werkzeugmaschinen (Heller H2000 und HF3500, Chiron FZ12S) sind mehrere Positionen im Arbeitsraum angefahren und anschließend Last-Verformungskurven jeweils in Linearachsrichtung erzeugt worden. Mittels einer Stellschraube, an dessen Spitze sich ein piezoelektrischer Kraftsensor befindet, erfolgt die Einleitung einer Kraft über die Werkzeugspitze in die Maschinenstruktur. Zeitgleich zur Kraftmessung erfolgt eine Verlagerungsmessung an der Werkzeugspitze. Unter der Annahme eines linearen Kraft-Weg-Verhältnisses lässt sich die Nachgiebigkeit mithilfe einer linearen Regression bestimmen. Zur Koeffizientenschätzung wurde hierbei die Methode der kleinsten Fehlerquadrate verwendet.

Der Versuchsaufbau sowie eine Messauswertung sind in Abbildung 5 dargestellt.

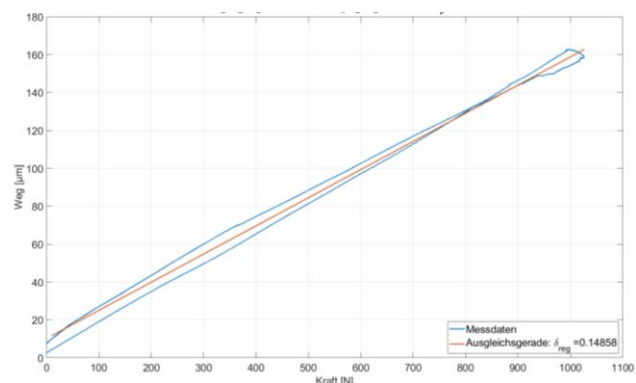


Abbildung 5 – Bestimmung der resultierenden Nachgiebigkeit

Auf Grundlage mehrerer Einzelmessungen an verschiedenen Positionen im Arbeitsraum entsteht ein dreidimensionales Vektorfeld, das bei Anfrage einer bestimmten Position die dort vorliegende Nachgiebigkeit in allen Raumrichtungen wiedergibt. Zur Bestimmung der Nachgiebigkeit an nicht eingemessenen Zwischenpositionen erfolgt eine trilineare Interpolation anhand umliegender Punkte.

Die bestimmten Nachgiebigkeiten besitzen aufgrund der Annahme eines linearen Kraft-Weg-Verhältnisses und der linearen Regression gewisse Abweichungen. Zudem ermöglichen sie nur eine statische Verschiebung des Werkzeugs. In der Realität findet

jedoch eine Durchbiegung statt, sodass weitere Abweichungen entstehen. In Arbeitspaket 3 sollen diese deshalb anhand stochastischer Modelle abgebildet werden.

Zur Berechnung der Zerspankraft wurden Zerspankraftmessungen bei Vollnutenschnitten durchgeführt, aus denen im Nachgang Schnittkraftkoeffizienten für die zu verwendenden Werkzeuge ermittelt wurden (Lineares Kraftmodell). Diese lassen sich in Kombination mit einem CAM-intern berechneten Werkzeugeingriff zur Ermittlung der aktuell vorherrschenden Zerspankraft verwenden. In Kombination mit dem erstellten Nachgiebigkeitsmodell lassen sich in einem nächsten Schritt Verlagerungen des Werkzeugs für jeden Simulationsschritt berechnen und auf den CAM-internen Soll-Pfad (Werkzeugbahn) aufschlagen. Hierbei wird jeweils der statische Anteil der berechneten Zerspankraft verwendet.

Werkzeuggeometrie

Zur Beschreibung von Form- und Lageabweichungen nach DIN ISO 1101 genügt in der Regel die Berücksichtigung der Gestaltabweichungen erster und zweiter Ordnung (vgl. DIN 4760 [DIN82]). Erst ab einer Gestaltabweichung dritter und vierter Ordnung (Rauheit) ist die Lage und genaue Form der Werkzeugschneide von Relevanz. Für das Forschungsvorhaben genügt deshalb eine Modellierung des Werkzeugs nach DIN 4300-1 [DIN17a] mit dem Detaillierungsgrad 1. Dieser beschreibt die Hüllkontur des Werkzeugs. [KRÜG14]

Die Onlineplattform ToolsUnited der Firma CIMSource GmbH bietet eine große Datenbank an Werkzeugen inklusive 3D-Modellen. Hierdurch können diese schnell in die Materialabtragssimulation integriert werden. Im Rahmen des Forschungsprojekts fand eine Schulung durch das Unternehmen CIMSource zur Nutzung der Datenbank statt. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Vermessung der Werkzeuge mithilfe des Einstell- und Messgeräts Zoller Venturio 450. Die hieraus exportierten DXF-Dateien können zur Erstellung der 3D-Modelle genutzt werden. Zusätzlich wurde ein Algorithmus entwickelt, der mithilfe einer Punktwolke, welche die Kontur des Werkzeugs beschreibt, einen Hüllkörper erzeugen und ins STL-Format überführen kann, sodass eine kostengünstige plattform-unabhängige Lösung geschaffen wurde. Der Algorithmus ermöglicht zudem

eine individuelle Vernetzung des Bauteils zur Minimierung des modellbedingten Sekantenfehlers. Abbildung 6 zeigt anhand eines Auszugs eines virtuellen Messberichts den geometriemodellbedingten Fehler, welcher bei einer ungenügenden Modellierung entstehen kann. Das dargestellte Beispiel stammt aus einem realen Prozess.

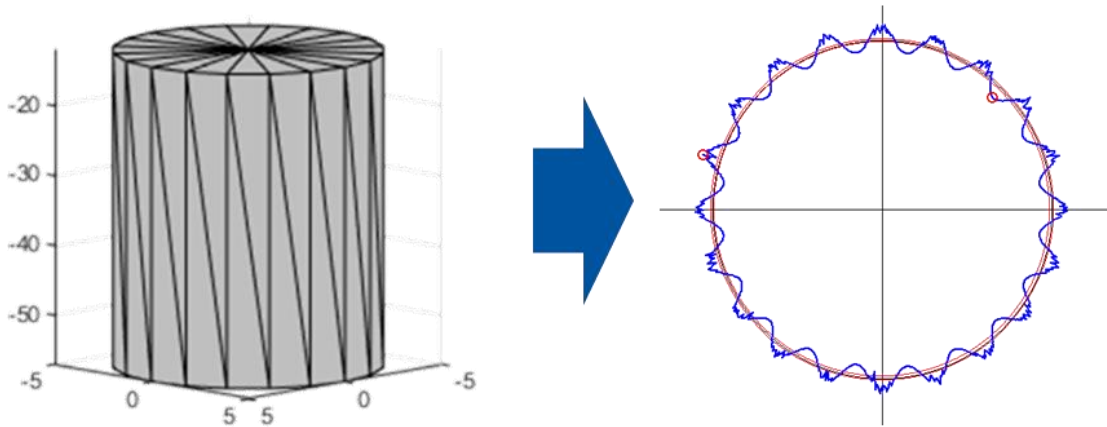


Abbildung 6 – Geometriemodellbedingter Fehler

Geometrisch-kinematische Abweichungen

In einem ersten Schritt wurden die geometrisch-kinematischen Einzelfehler (vgl. DIN ISO 230 [DIN11b]) der betrachteten Werkzeugmaschinen mittels einer Double-Ball-Bar und eines 6DOF-Laserinterferometers bestimmt.

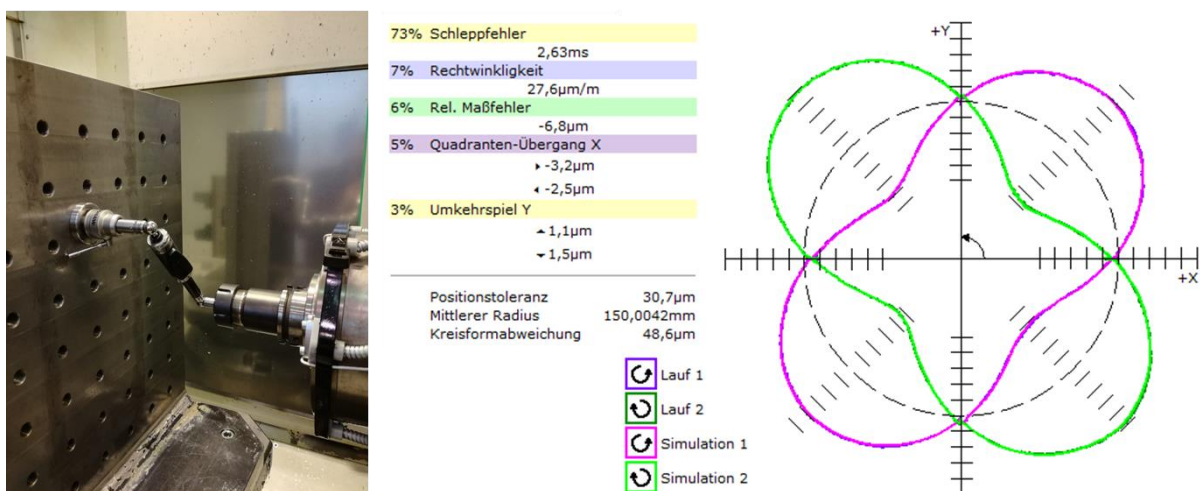
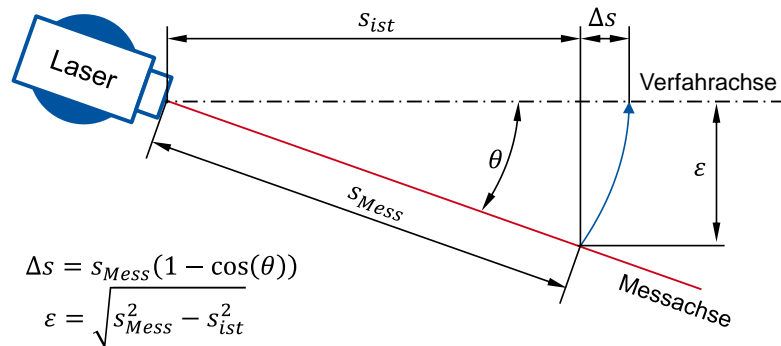
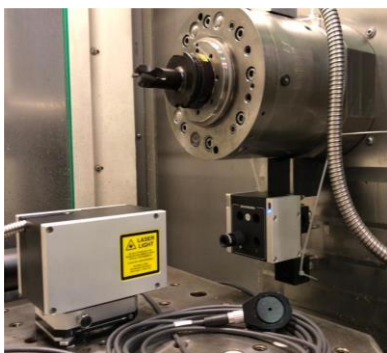


Abbildung 7 – Kreisformtest - Aufbau und Auswertung

Der Kreisformtest mithilfe der Double-Ball-Bar ermöglicht die Bestimmung des Lagefehlers der Einzelachsen zueinander in der jeweiligen Messebene. Zugleich lassen

sich neben dem Schleppfehler die Umkehrspiele sowie Fehler an den Quadrantenübergängen bestimmen. Der Messaufbau und eine beispielhafte Messauswertung sind in Abbildung 7 dargestellt. Zur Bestimmung der Rechtwinkligkeit muss ein Messverfahrwinkel von mindestens 180° gegeben sein. Dies erschwert in der Regel eine Bestimmung Rechtwinkligkeiten in der ZX- oder YZ-Ebene.

Neben den Lagefehlern existieren weitere sechs Fehler pro Maschinenverfahrachse. Diese lassen sich mithilfe eines 6DOF-Laserinterferometers bestimmen. Bei der Auswertung der Rohdaten muss vor allem bei den Geradheiten darauf geachtet werden, dass der Messfehler ε aufgrund einer fehlerhaften Ausrichtung korrigiert wird (Cosinusfehler). Der Messaufbau zur Vermessung der abhängigen Maschinenachsfehler sowie die Auswirkungen des Cosinusfehlers in der Ebene sind in Abbildung 8 dargestellt.



**Abbildung 8 – links: 6DOF-Laserinterferometermessung
rechts: Auswirkungen Cosinusfehler (nach [BREC17, S. 522])**

Auf Grundlage der ermittelten Fehler sowie der jeweiligen Maschinenkinematik erfolgt im Anschluss die Berechnung eines Vektorfelds, welches bei Anfrage einer bestimmten Position im Arbeitsraum einen Abweichungsvektor wiedergibt. Während der Simulation wird die geometrisch-kinematische Abweichung für jeden Simulationsschritt ermittelt und ebenfalls mit dem CAM-internen Soll-Pfad (Werkzeugbahn) verrechnet.

Ergebnisse

Zu den zu berücksichtigenden, systematischen Qualitätseinflüssen wurden geeignete Modellierungen erarbeitet, die im Rahmen der Prozessauslegung und Simulation (CAM) verwendet werden können. Allerdings weisen diese zum Teil Abweichungen auf. Mithilfe stochastischer Modelle soll eine Abbildung der existierenden Abweichungen im nächsten Arbeitsschritt (Arbeitspaket 3) erfolgen.

Personaleinsatz

Forschungsstelle 1 (FVP): 5,1 Personenmonate (PM)

Forschungsstelle 2 (WZL): 5,4 Personenmonate (PM)

Arbeitspaket 2 wurde im Jahr 2018 erfolgreich abgeschlossen.

Arbeitspaket 3 – Stochastische Einflussfaktoren – Experimentell gestützte Modellbildung (WZL)

Zielsetzung

Aufbauend auf den Anforderungen sind neue Modellierungsmethoden für die Abbildung von stochastischen Einflussfaktoren innerhalb einer CAM-Umgebung zu erarbeiten.

Vorgehen

Insbesondere beim geometrisch-kinematischen Maschinenverhalten, dem Bauteilverzug sowie der Zerspankraft ergeben sich stochastische Abweichungen, die aus dem Werkzeug- und Maschinenverschleiß, aus Reibungseffekten sowie dem Werkstoffverhalten entstehen. Diese lassen sich derzeit nicht exakt mit modellbasierten Ansätzen abbilden und führen daher zu Abweichungen zwischen realem und simuliertem Prozess. Zur Abschätzung der Unsicherheitsbereiche einzelner Modellparameter (z. B. bei der Zerspankraftberechnung oder Materialeigenschaften der FE-Simulation) werden analog zum Vorgehen in Arbeitspaket 2 Versuche und Messungen zu Einzeleffekten durchgeführt, wobei Ressourcen und Umgebungseinflüsse (Belastungszustand der Maschine, Verschleißzustand der Werkzeuge, Materialcharge usw.) gezielt variiert wurden. Auf Grundlage der Streuung einzelner Modellparameter (vgl. Arbeitspaket 2) lassen sich anschließend Konfidenzintervalle zu Auswirkungen einzelner Effekte definieren, die während der Simulation und der Auswertung der virtuellen Werkstückoberfläche berücksichtigt und angelehnt an die deskriptive Statistik (Schiefe, Interquartilsabstand) dargestellt werden sollen (Arbeitspaket 5). Weiterhin lassen sich hierdurch auch Parameter ermitteln, die ggf. kontinuierlich auf Fertigungsebene zu erfassen und zurückzuführen sind, um die CAM-integrierte Prognosegüte zu erhöhen. Im Folgenden wird das Vorgehen (Messung, Modellbildung und CAM-Integration) für die betrachteten stochastischen Einzeleinflüsse kurz erläutert.

Bauteilverzug

Aufgrund der Tatsache, dass Randbedingungen bei FE-Simulationen nur an Knoten definiert werden können und dass häufig nur begrenzte Rechenkapazitäten zur Verfügung stehen, sodass die Elementgröße nicht beliebig klein gewählt werden kann, kann die Spannfläche nicht ideal modelliert werden. Zusätzlich können weitere Unsicherheiten infolge von Abweichungen der idealen Rohteilgeometrie entstehen [QIN07]. Auswirkungen aufgrund sich wechselnder Materialchargen können hierbei vernachlässigt werden, da die existierenden Veränderungen des Elastizitätsmoduls vernachlässigbar sind.

Zur Definition der Unsicherheiten aufgrund des Bauteilverzugs wurde deshalb die in der Simulation verwendete Spannfläche in Bezug zur realen Spannfläche variiert. Hierzu wurden zwei Fälle definiert. Während im Fall 1 die ausgewählten FE-Knoten innerhalb der nächstkleineren Fläche liegen (simulative Spannfläche < reale Spannfläche), liegen im Fall 2 die Knoten innerhalb der nächstgrößeren Fläche (simulative Spannfläche > reale Spannfläche). Die real existierende Verformung muss innerhalb dieser beiden Verformungen liegen, sofern die restlichen Randbedingungen richtig gewählt wurden. Für die Simulation werden die Verschiebungen gemittelt. Die Unsicherheit aufgrund des Bauteilverzugs ergibt sich aus der Hälfte der Abweichung zwischen den beiden Fällen. In Abbildung 9 sind die Simulationsergebnisse der beiden Fälle sowie deren Mittelung und die Messung für den Ort der höchsten Durchbiegung dargestellt.

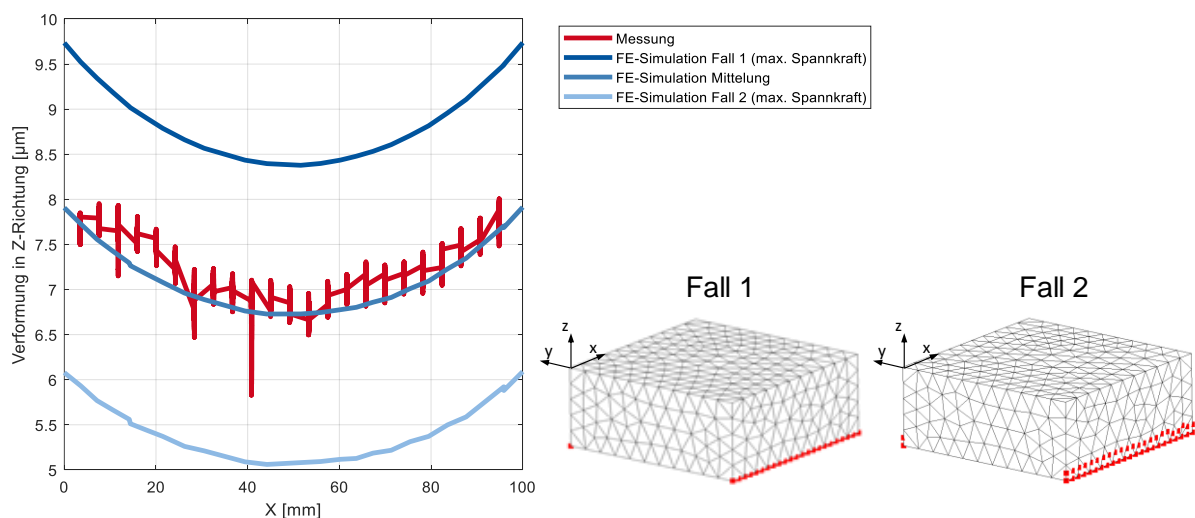


Abbildung 9 - Validierung Unsicherheiten Bauteilverzug

Nach der Bearbeitung zusätzlich zu der gemittelten Rückverlagerung, wie sie in Arbeitspaket 2 durchgeführt wird, die Abweichung infolge der statistischen Unsicherheit hinzugefügt. Die Richtung der statistischen Abweichung ist abhängig von Summe systematischen Abweichungen. Sind diese positiv/negativ (Aufmaß/Abmaß) so wird das Aufmaß/Abmaß entsprechend der statistischen Unsicherheit verstärkt.

Geometrisch-kinematische Abweichungen

Anhand der Heranziehung der Messergebnisse aus Arbeitspaket 2 zur Bestimmung der geometrisch-kinematischen Genauigkeit mittels 6 DOF-Laserinterferometer und Double-Ball-Bar (DBB) ist eine Vorschrift zur Klassifizierung von Fertigungsumgebungen und –anlagen erarbeitet worden. Diese dient der recheneffizienten Vorhersage von Vertrauensbereichen. Auf thermische Effekte aufgrund äußerer Einflüsse wird hierbei gemäß der Anforderungsanalyse in Arbeitspaket 1 zunächst verzichtet.

Infolge von ungeeigneten Reglerauslegungen kann es oftmals zu einer Einbringung stochastischer Störeinflüssen beim NC-Zerspanprozess kommen [WELL19]. Regelungstechnische Fehler äußern sich im lastfreien Fall (Luftschnitt) in Form einer Abweichung zwischen angesteuerter Soll- und erfasster Ist-Position (Schleppfehler). Sowohl die Soll- als auch die Ist-Positionsdaten lassen sich bei den in Arbeitspaket 1 ausgewählten Maschinen aus der Siemens Steuerung (Sinumerik 840D sl) über den internen Steuerungsclient Sinumerik Integrate und die Schnittstelle „Create my HMI“ auslesen.

Zur Bestimmung des stochastischen geometrischen-kinematischen Abweichungen sind deshalb zunächst mehrere Luftschnitte mit unterschiedlichen Vorschüben gefahren worden. Im Anschluss erfolgte eine Berechnung der resultierenden Schleppfehler. Mithilfe dieser Ergebnisse lassen sich Lage- und Streuungsmaße wie der Erwartungswert μ und die Standardabweichung s für den Schleppfehler mit der jeweiligen Verfahrensgeschwindigkeit bestimmen. Anhand dieser geschieht die Definition des Vertrauensbereichs und der Restunsicherheit. Die Berechnung von Zwischenwerten geschieht mittels einer Interpolation. Anschließend findet eine Heranziehung der Messergebnisse aus Arbeitspaket 2 zur Bestimmung der geometrisch-kinematischen Genauigkeit mittels 6 DOF-Laserinterferometer und Double-Ball-Bar (DBB). Anhand von

Kennwerten wie dem Umkehrspiel, der Positionsstreuung erfolgt dann die Klassifizierung der Fertigungsanlage für Achsumkehrpunkte während der Fertigung sowie einzelne Verfahrbewegungen (Schrägen, Kreise, etc.).

Statische Werkzeugabdrängung

Das in Arbeitspaket 2 erstellte Modell zur statischen Werkzeugabdrängung unterliegt stochastischen Unsicherheiten, vor allem aufgrund eines zunehmenden Werkzeugverschleißes sowie sich ändernden Materialchargen. Ferner entstehen weitere Abweichungen infolge der Vernachlässigung der Werkzeugdurchbiegung.

Um dennoch eine möglichst genaue Modellierung zu erzielen und die genannten Abweichungen abzubilden, wurden deshalb mehrere Versuche am WZL durchgeführt. Durch eine gezielte Variation von Materialchargen, Eingriffstiefen und Verschleißzuständen erfolgte eine Bestimmung der einzelnen Einflussfaktoren.

Die Folgen eines zunehmenden Werkzeugverschleißes sind neben einem Anstieg der resultierenden Prozesskraft auch eine Verringerung des effektiven Werkzeugdurchmessers. [CHUA18, OLIA16]. Während sich die Änderung des Werkzeugdurchmessers vergleichsweise schnell mithilfe eines Werkzeugeinstell- und Messgeräts erfassen und korrigieren lässt (vgl. Arbeitspaket 2), erfolgt die Ermittlung des Verschleißzustandes in der Praxis häufig anhand von Expertenwissen des jeweiligen Mitarbeiters in der Fertigung. Zur Erfassung des jeweiligen Verschleißzustands wurden deshalb mehrere Vollnutsche durchgeföhrt. Zugleich erfolgte eine Messung des Werkzeugdurchmessers vor und nach der Bearbeitung. Mittels einer relativen Betrachtung der Durchmesseränderung, des Zeitspanvolumens und der Klassifizierung des Verschleißzustands fand eine Bestimmung der Lage- und Streuungsmaße für die verschleißabhängigen Schnittkraftkoeffizienten statt. Die entstehende Abweichung erzeugt im Gegensatz zu den anderen erwähnten stochastischen Einflüssen immer einen positiven Versatz des Werkzeugs in Richtung der Prozesskraft, da der Werkzeugverschleiß als stetig wachsende Größe angenommen wird.

Die Bestimmung der Unsicherheit aufgrund wechselnder Materialchargen geschah ebenfalls anhand der Durchführung mehrerer Vollnutsche. Zur Elimination des Einflusses des Werkzeugverschleißes wurden die Ergebnisse aus dem vorherigen

Absatz verwendet. Anschließend konnten Lage- und Streuungsmaße für die materialabhängigen Schnittkraftkoeffizienten bestimmt werden. Die Verrechnung in der Simulation geschah, analog zu den geometrisch-kinematischen Unsicherheiten, zur sicheren Seite.

Zum Ausgleich der Effekte infolge der Werkzeugdurchbiegung sind alle Versuche zur Ermittlung der Schnittkraftkoeffizienten mehrmals mit unterschiedlichen Eingriffstiefen durchgeführt worden. Im Anschluss erfolgten mehrere Vermessungen mit unterschiedlichen Messhöhen entlang der Nuten. Mit Hilfe der Messergebnisse konnte eine Ermittlung der Lage- und Streuungsmaße für unterschiedliche Eingriffstiefen stattfinden. Zwischenwerte ließen sich mittels Interpolation bestimmen. Die Verrechnung in der Simulation geschah hierbei ebenfalls zur sicheren Seite hin.

Ergebnisse

Zu den zu berücksichtigenden, stochastischen Qualitätseinflüssen wurden geeignete Modellierungen erarbeitet, die im Rahmen der Prozessauslegung und Simulation (CAM) nun verwendet werden können.

Personaleinsatz

Forschungsstelle 1 (FVP): 4 Personenmonat (PM)

Forschungsstelle 2 (WZL): 7 Personenmonate (PM)

Arbeitspaket 3 wurde im Jahr 2019 erfolgreich abgeschlossen.

Arbeitspaket 4 – Zusammenführung in ein gemeinsames Rahmenwerk (WZL)

Zielsetzung

Die in Arbeitspaket 2 und Arbeitspaket 3 erarbeiteten Forschungsergebnisse werden in Arbeitspaket 4 in ein gemeinsames modellbasiertes Rahmenwerk überführt. Dieses ermöglicht eine fallabhängige Identifikation von Fehlereinflüssen auf einzelne Toleranzen und Toleranztypen.

Vorgehen

In Zusammenarbeit mit den produzierenden Endanwendern und den CAM-Systemanbietern des Projektbegleitenden Ausschusses wurde der in Abbildung 10 skizzierte Planungsablauf definiert (oben).

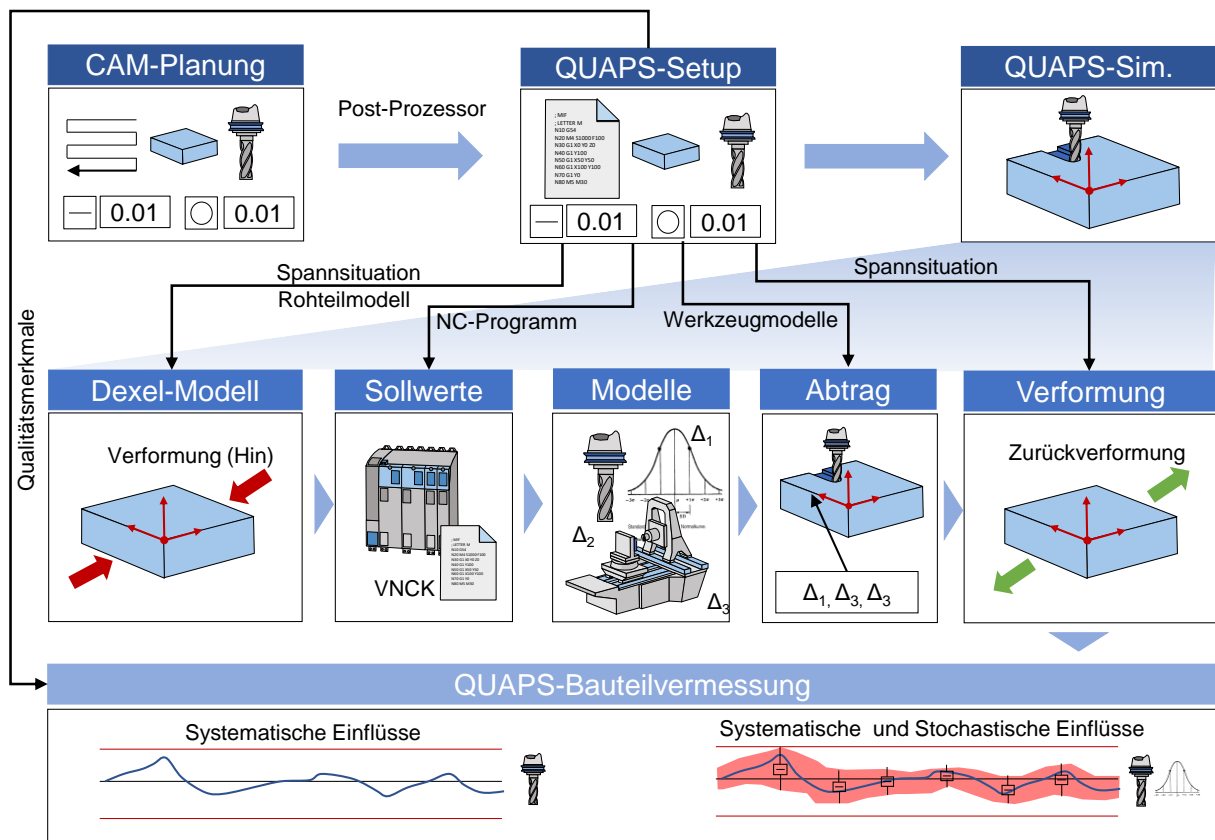


Abbildung 10 – Gesamtablauf der QUAPS-Simulationsumgebung

Im Rahmen einer CAM-Bearbeitungsplanung sollen darin wie gewohnt Spannplanung, Werkzeugauswahl und Operationsplanung erfolgen. Ergänzend hierzu sollen jedoch bereits während der Bearbeitungsplanung Qualitätsmerkmale sowie Toleranzen nach

ISO 1101 erstellt und im CAM-Planungssetup gespeichert werden können. Weiterhin sollen die zur Herstellung der realen Spannsituation verwendeten Spannkkräfte angegeben werden können.

Nach Fertigstellung der Planung soll durch einen erweiterten Post-Prozessor neben einem NC-Programm auch ein QUAPS-Setup erzeugt werden, welches die in Tabelle 1 angeführten Informationen enthält.

Tabelle 1: Inhalt eines QUAPS-Setups

Information	Zweck
NC-Programm (z.B. MPF)	Bewegungsführung während der QUAPS-Bearbeitungssimulation
Rohteilgeometrie und Rohteilmaterial (STEP)	Aufbau eines volumetrischen Dixel-Modells zur fortlaufenden Berechnung und Darstellung des Materialabtrags
Spannkraft und Rohteilbereiche, an denen das Spannmittel angreift (XML-Beschreibung)	Durchführung einer FEM-Simulation zu Beginn des Simulationsablaufs, um hierauf aufbauend eine Verformung des Rohteils vor Simulationsbeginn und eine Rückverformung des Fertigteils nach Simulationsablauf vornehmen zu können
Rotationskörper zu Bearbeitungswerkzeugen (STEP)	Durchführung der Bearbeitungssimulation
Qualitätsmerkmale und Toleranzen (ISO 1101, DMIS- oder XML-Beschreibung)	Durchführung von virtuellen Messvorgängen nach VDI 2631. Diese findet nach Durchführung der Bearbeitungssimulation statt

Das QUAPS-Setup dient dabei als Eingangsgröße für eine anschließende QUAPS-Bearbeitungssimulation. Hierbei handelt es sich um eine zweite Simulationsumgebung, die zwar in das CAM-System integriert ist, jedoch nicht den zur Planungsverifikation genutzten Werkzeugpfad- oder Maschinensimulationen entspricht.

In Zusammenarbeit mit den CAM-Komponenten- und Simulationsanbietern Moduleworks und MT Analytics wurde im Anschluss der Aufbau einer QUAPS-Bearbeitungssimulation festgelegt. Der entstandene Ablauf greift dabei einerseits auf bestehende Simulationskomponenten (FE-Simulation, Durchdringungsrechnung aus dem Vorprojekt „HisToolry“ 18729 N) zurück, enthält jedoch andererseits auch die in Arbeitspaket 2 und Arbeitspaket 3 entwickelten Modellierungen. Diese werden dabei in Form schnellrechnender

Einzelmodule gekapselt und eingebunden. Der Gesamtablauf einer Simulation erfolgt in sechs Schritten:

1. Den Ausgangspunkt der Simulation bilden FE-Simulationen auf Grundlage von Rohteilgeometrie, Spannkraft und Kraftangriffsbereichen. Hierbei werden anhand einer initial aufgebauten Vernetzung des Rohteils sowie Parametervariationen sowohl systematische als auch stochastische Verlagerungsparameter ermittelt, die anschließend in dreidimensionale Vektorfelder überführt werden.
2. Nach Aufbau der Vektorfelder erfolgt die Überführung des STEP-Rohteilmodells in eine volumetrische Darstellungsform, mit der sich Materialabträge berechnen und darstellen lassen. Hierbei kommt die im Vorgängerprojekt „HisToolry“ (18729 N) entstandene Dixel-Modellierung zur Anwendung. Diese wurde um die Abbildung von Eigenschaftswerten auf der Werkstückoberfläche erweitert und erlaubt nun die Speicherung von beliebig vielen Zahlwerten. Diese werden nachfolgend zur Abbildung systematischer und stochastischer Einzeleinflüsse verwendet.
3. Im Anschluss hieran erfolgt die Verformung des Dixel-Modells auf Grundlage des in Punkt 1 ermittelten Vektorfelds für systematische Einflüsse. Für jeden Dixel-Endpunkt wird dabei ein Verlagerungswert ermittelt. Der Endpunkt wird anschließend entsprechend seiner Darstellungsrichtung verlängert oder eingekürzt. Die vorgenommene Verlängerung wird ebenfalls als Eigenschaftswert auf der Oberfläche hinterlegt. Stochastische Verlagerungen werden der Oberfläche (Dixel-Endpunkte) ebenfalls als Eigenschaftswert zugeordnet, führen aber nicht zu einer Dixel-Verlängerung oder Dixel-Kürzung.
4. Im Anschluss startet die Bearbeitungssimulation. Mittels eines eingebundenen Virtuellen NC-Kerns (hier: Siemens 840D sl VNCK) erfolgt anhand des gegebenen NC-Programms die Generierung von Sollwerten, die zur Relativpositionierung von Rohteil- und Werkzeugdarstellung verwendet werden. Hiermit ist die Berechnung von Materialabtrag und Eingriffsgrößen in Einzelschritten möglich.
5. Auf Grundlage von Eingriffsgrößen und den Sollwertvorgaben werden anhand der gekapselten Einzelmodellierungen positionsabhängige systematische und stochastische Abweichungen ermittelt. Für die Prozesskraft werden dabei systematische Größen unmittelbar zur Verlagerung des Werkzeugs verwendet und gehen damit direkt in die Abtragsberechnung ein. Zusätzlich erfolgt ein Ablegen der Verlagerung auf der bearbeiteten Bauteiloberfläche. Auf vergleichbare Weise wird

bei geometrisch-kinematischen Abweichungen vorgegangen. Positionabhängige systematische Abweichung werden erneut auf die Werkzeugposition des Folgeschritts aufgeschlagen sowie auf der Oberfläche hinterlegt. Stochastische Positionierabweichungen, etwa bei Achsumkehrbewegungen, werden hingegen abhängig von erkannten Umkehrbewegungen ermittelt und im Bedarfsfall als Eigenschaftswert auf der Oberfläche aufgetragen.

6. Nach Beendigung eines Simulationslaufs erfolgt eine Rückverformung des virtuellen Fertigteils durch die inverse Anwendung des Vektorfelds aus Punkt 1. Hierbei werden nur systematische Verformungen zurücktransformiert.

Nach Abschluss der QUAPS-Bearbeitungssimulation soll das resultierende Dixel-Modell zur virtuellen Bauteilvermessung verwendet werden (Abbildung 10, unten). Hierbei soll eine Bewertung der Auswirkungen systematischer und stochastischer Einzeleinflüsse möglich sein. Der Ablauf von Bauteilvermessung und Ergebnisauswertung untergliedert sich dabei in zwei Schritte:

1. In einem ersten Schritt werden aus den Qualitätsmerkmalen des QUAPS-Setups Zwischenpunkte bestimmt, mit denen die virtuelle Oberfläche des Dixel-Modells abgetastet wird. Hieraus resultieren virtuelle Messpunkte.
2. Die Virtuellen Messpunkte werden anschließend nach einem Vorgehen nach VDI 2631 zu virtuellen Messplots und Toleranzwerten aufbereitet (Abbildung 10, unten). Hierbei erhält der Anwender die Möglichkeit, durch An- und Abwahl von Einzeleinflüssen deren Auswirkungen auf ein betrachtetes Qualitätsmerkmal zu bewerten. Systemintern wird dabei für systematische und stochastische Einflüsse unterschiedlich verfahren:
 - a. Soll eine systematische Einflussgröße von den Betrachtungen ausgeschlossen werden, werden die aufgenommenen virtuellen Messpunkt entsprechend der hinterlegten Einflusswerte der zugehörigen Dixel-Enden invers verlagert. Anschließend erfolgt eine Neuberechnung der Messplots und Abweichungswerte.
 - b. Soll eine stochastische Einflussgröße in Betrachtungen einbezogen werden, so werden die stochastischen Verlagerungen als Wahrscheinlichkeitsraum um den erfassten Messpunkt interpretiert und bei Berechnungen berücksichtigt. Diese werden dabei, wie in Abbildung 10 angedeutet, als

roter Schlauch um den „systematischen“ Messplot aufgetragen. Anstatt eines Abweichungswertes wird zudem ein Abweichungsraum berechnet und angezeigt.

Anhand dieses Gesamtaufbaus wurden alle Einzelkomponenten (FE-Simulation, VNCK, Bearbeitungssimulation, Einzelmodelle) demonstratorisch umgesetzt, in Betrieb genommen mit einander gekoppelt (vgl. Arbeitspaket 5).

Ergebnis

Das Ergebnis von Arbeitspaket bildet ein Rahmenwerk, mit dem systematische und stochastische Qualitätseinflüsse in einer virtuellen Umgebung simuliert und bewertet werden können. Ungefähr 20 % der Einflussfaktoren, die für 80 % der qualitätswirksamen Abweichungen verantwortlich sind (Pareto-Prinzip), werden dabei über systematische Modelle abgebildet. Die restlichen 80 % der Einflussfaktoren werden über die in Arbeitspaket 3 entwickelten stochastischen Modelle berücksichtigt. Qualitätsmerkmale nach ISO 1101 [DIN17b] können nun im CAM-System dargestellt werden.

Personaleinsatz

Forschungsstelle 1 (FVP): 3 Personenmonat (PM)

Forschungsstelle 2 (WZL): 3,5 Personenmonate (PM)

Arbeitspaket 4 wurde im Jahr 2019 erfolgreich abgeschlossen.

Arbeitspaket 5 – Umsetzung in Form eines Softwaredemonstrators (WZL)

Zielsetzung

Die in AP 2 bis AP 4 erarbeiteten Forschungsergebnisse werden in Arbeitspaket 5 zu einem Softwaredemonstrator zusammengeführt.

Vorgehen

Die Ergebnisse von Arbeitspaket 4 wurden in Zusammenarbeit mit EXAPT, CAMAIX, Moduleworks und der MTAnalytics zu einem Software-Demonstrator zusammengeführt. Das Ergebnis hiervon ist in Abbildung 11 dargestellt. Im oberen Bildbereich ist ein Ausschnitt der laufenden Bearbeitungssimulation zu sehen. Hierbei werden Solldaten eines Siemens 840D sl VNCK verwendet, um die Relativpositionierung zwischen Werkzeug und Werkstück durchzuführen (oben links). Weiterhin ist die Übertragung von Eigenschaftswerten auf die Bauteiloberfläche angedeutet (oben, mittig, links).

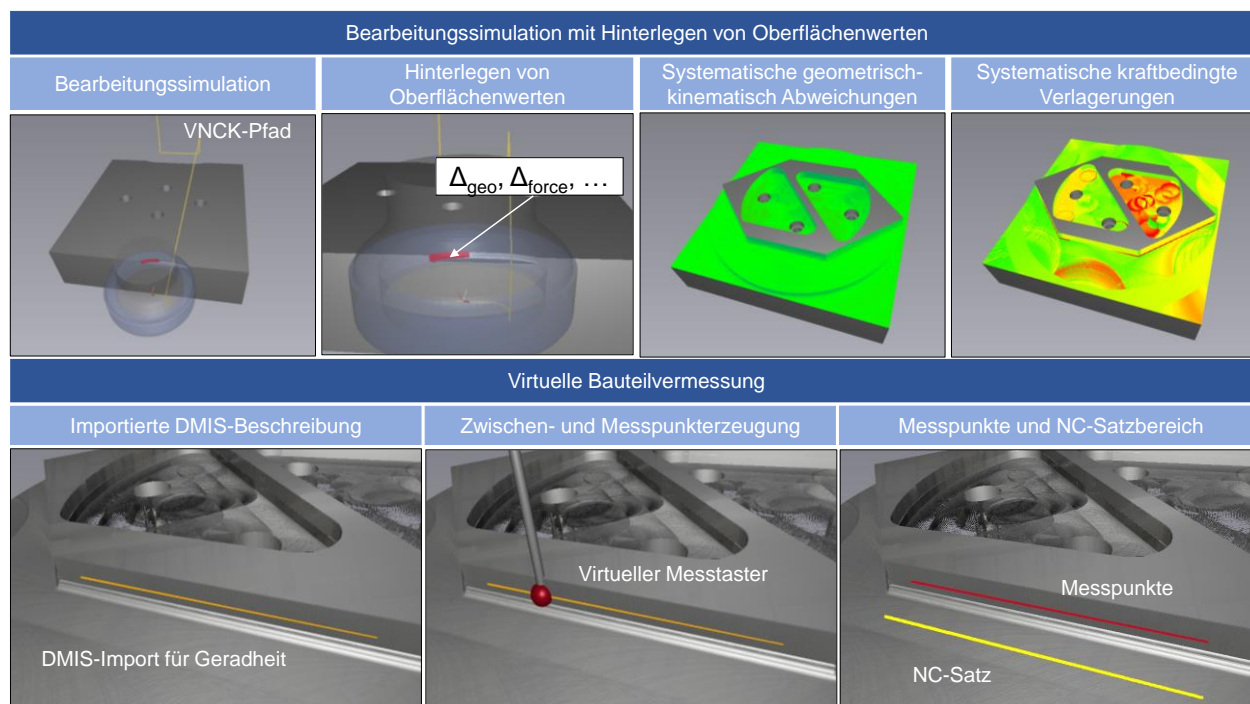


Abbildung 11 – QUAPS-Bearbeitungssimulation und -Bauteilvermessung

Während des Werkzeugeingriffs werden an der neu entstehenden Werkzeugoberfläche (rot) stochastische und systematische Eigenschaftswerte des letzten Simulationsschritts aufgetragen. Das Ergebnis dieses Prozesses ist rechts oben für die systematischen

Anteile von geometrisch-kinematischer Genauigkeit und statischer Werkzeugabdrängung zu sehen.

Im unteren Bereich ist der Prozess der virtuellen Werkzeugvermessung am Beispiel einer Geradheit aufgezeigt. Nach Laden einer DMIS-Beschreibung, die zuvor CAM-intern erzeugt wurde (links), erfolgt eine Ermittlung von Messpositionen nach VDI 2631. Anhand dieser findet im Anschluss eine Messwertaufnahme statt, indem ein virtueller Messtaster jeweils eine Position dieser Messpositionen einnimmt und für diese die nächste Berührung mit einem Dixel-Endpunkt bestimmt. Gleichzeitig kann dabei auch der Bezug zwischen Qualitätsmerkmal, Messpunkt, Bauteiloberfläche und erzeugendem NC-Satz hergestellt werden (rechts). Dies ist möglich, wenn bei der Erzeugung des Werkstücks in jedem Simulationsschritt ein Eigenschaftswert für den aktuell bearbeiteten NC-Satz auf der Bauteiloberfläche hinterlegt wird.

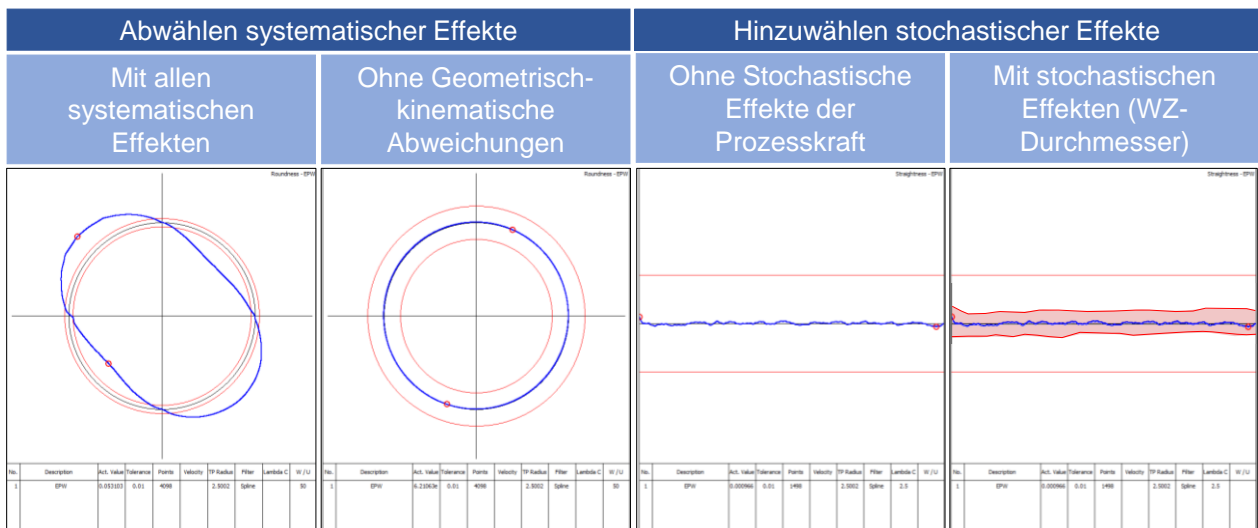


Abbildung 12 – Messplots für systematische und stochastische Einflüsse

Auf Grundlage der virtuellen Messwerte kann im Anschluss die Messploterstellung – ebenfalls nach VDI 2631 – erfolgen. Abbildung 12 zeigt hierzu zwei Beispiele für eine Geradheit und eine Rundheit. Weiterhin werden in der Abbildung das Abwählen und Hinzunehmen von systematischen bzw. stochastischen Faktoren bei der Auswertung demonstriert. Für die dargestellte Rundheit führt bspw. ein Abwählen der geometrisch-kinematischen Genauigkeit zu einer deutlichen Verbesserung der Rundheit. Somit kann diese als Haupteinfluss für entstehende Toleranzabweichungen ausgemacht werden. Für die gezeigte Geradheit wurde eine Hinzunahme der stochastischen Einflüsse auf die statische Werkzeugabdrängung (hier: Schwankungen Werkzeugdurchmesser)

durchgeführt. Hierbei wird ersichtlich, dass diese keinen erheblichen Einfluss auf das erzielbare Bearbeitungsergebnis hat. Dies liegt darin begründet, dass trotz der stochastischen Schwankungen die Belastung des Werkzeugs während der Bearbeitung weitestgehend konstant bleibt. Zwar wird aller Wahrscheinlichkeit nach die Positionstoleranz der entstehenden Fläche verletzt. Jedoch hat dies hier nur geringe bis keine Auswirkungen auf die erzielbare Geradheit.

Ergebnis

In Zusammenarbeit mit den PA-Mitglieder wurde ein Demonstrator zur qualitätsprädiktiven CAM-Planung aufgebaut. Dieser umfasst eine QUAPS-Setup-Erstellung, eine QUAPS-Bearbeitungssimulation sowie eine QUAPS-Bauteilvermessung.

Personaleinsatz

Forschungsstelle 1 (FVP): 5 Personenmonat (PM)

Forschungsstelle 2 (WZL): 6,5 Personenmonate (PM)

Arbeitspaket 5 wurde im Jahr 2019 erfolgreich abgeschlossen.

Arbeitspaket 6 – Evaluierung des erarbeiteten Konzepts (FVP)

Zielsetzung

Zwar erfolgen Validierungsschritte projektbegleitend durch den Einbezug des PA, eine demonstratorische Verifikation ermöglicht jedoch erst die praxisnahe Evaluation. Diese soll im Umfeld des WZL CNC-Kompetenzzentrums sowie bei mindestens vier Anwendern aus dem PA geschehen. Das Erreichen der beschriebenen Ziele wird in enger Abstimmung mit den Anwendern im PA bewertet. Anhand dieser Studie wird die Wirksamkeit der erarbeiteten Konzepte geprüft und unter realen Bedingungen validiert. Es muss sich zeigen, inwieweit das System den geforderten Mehrwert – auch wirtschaftlich – erreicht und die Integration in die sehr heterogene Landschaft deutscher KMUs möglich ist.

Vorgehen

Zur Evaluierung des erarbeiteten Konzepts sind mehrere Musterbauteile vom PA zur Verfügung gestellt worden, welche in Abbildung 13 dargestellt sind. Das Bauteilspektrum deckt Anwendungsfälle von der Luft- und Raumfahrtbranche (Bauteil unten links) über den Maschinen- und Anlagenbau (Bauteile in der oberen Bildhälfte) bis hin zum Werkzeug- und Formenbau (Bauteil unten rechts) ab. Während bei den dünnwandigen Bauteilen (linke Bildhälfte) die Mitglieder des PA vor allem Einflüsse des Bauteilverzugs infolge der Einspannkräfte beklagten, sind bei den dickwandigen Bauteilen (rechte Bildhälfte) vor allem Effekte aufgrund von einer zu hohen statischen Abdrängung des Werkzeugs oder einer unzureichenden Maschinengenauigkeit aufgeführt worden. Die Validierung erfolgte überwiegend im CNC-Kompetenzzentrum des WZLs. Zugleich fanden Validierungen beim PA-Mitgliedern Vorort statt.

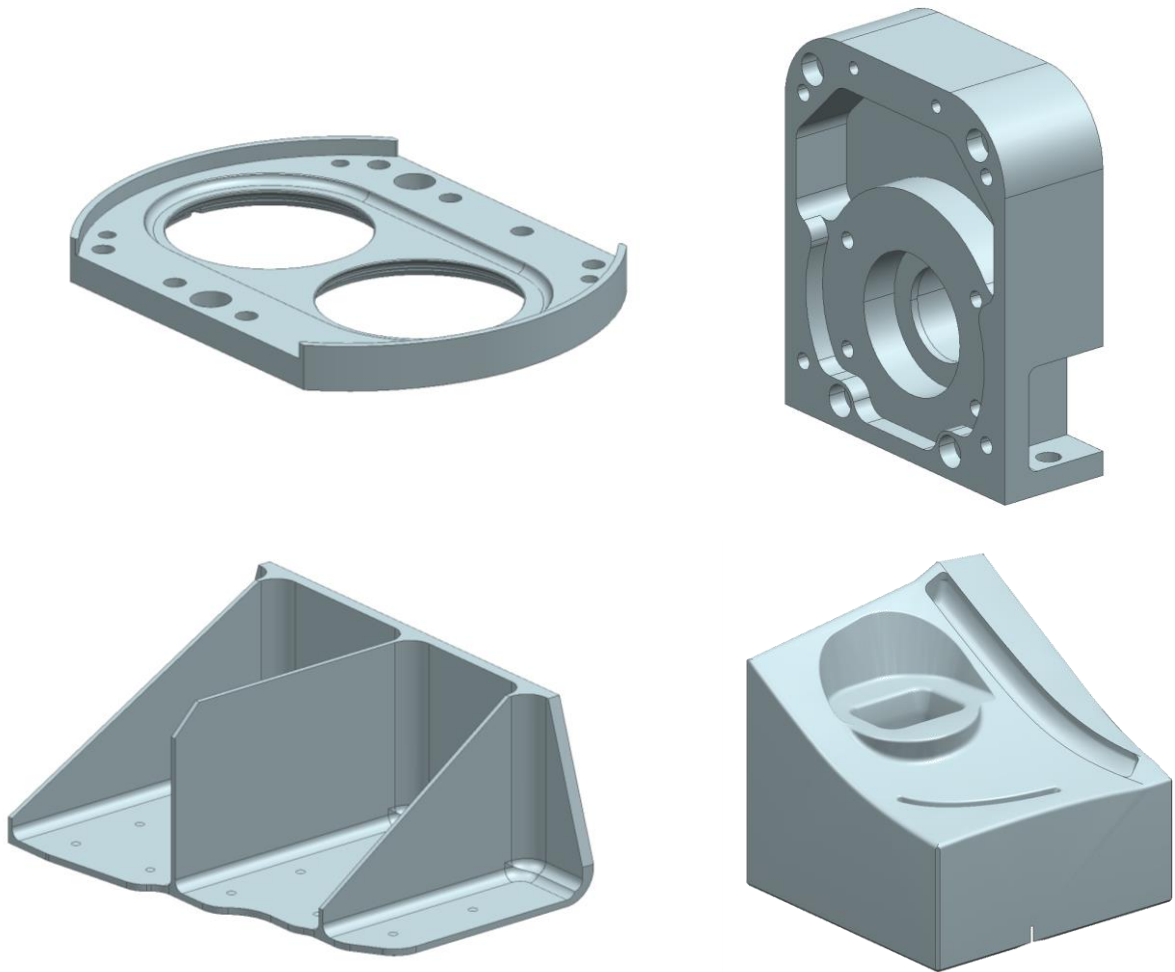


Abbildung 13 - Musterbauteile

Im Folgenden ist das Vorgehen der Evaluierung mittels der in Arbeitspaket 1 vorgestellten sequentiellen Simulationsvorschrift (vgl. Abbildung 1) anhand des Musterbauteils der Luft- und Raumfahrtbauteils dargelegt. Hierbei soll allerdings nicht mehr auf die in den vorherigen Arbeitspaketen Parametrierungs- und Messmethoden eingegangen werden. Stattdessen soll der Fokus auf der qualitätsprädiktiven Zerspansimulation als Erweiterung von CAM-Systemen liegen.

CAM-Planung und Ressourcenauswahl

Zu Beginn des in Arbeitspaket 1 beschriebenen Vorgehen wählt der CAM-Planer geeignete Werkzeuge sowie Werkzeugmaschinen aus. Auch eine geeignete Wahl der Aufspannsituation findet statt. Entsprechend der Ressourcenauswahl definiert der CAM-

Planer eine mögliche Bearbeitungsstrategie. Beides orientiert sich hierbei am zu fertigenden Bauteil, so muss die Fertigung aufgrund der vorliegenden Bauteilgeometrie des Bauteils mit mindestens zwei Bearbeitungsschritten/einem Umspannvorgang geschehen. Durch einbinden von Rundachsen zur Fertigung des Bauteils lässt sich die Anzahl der Bearbeitungsschritte/Umspannvorgänge reduzieren. Dieser Arbeitsschritt ist vor allem durch das Erfahrungswissen des einzelnen Mitarbeiters geprägt. Erfahrungswissen ist personengebunden und lässt sich häufig nur schwer externalisieren. Befragung beim PA zeigten vor allem, dass Mitarbeiter in der CAM-Planung häufig mehrjährige Erfahrung in der Fertigung besitzen und sich dieses Wissen zum Teil selbst angeeignet haben.

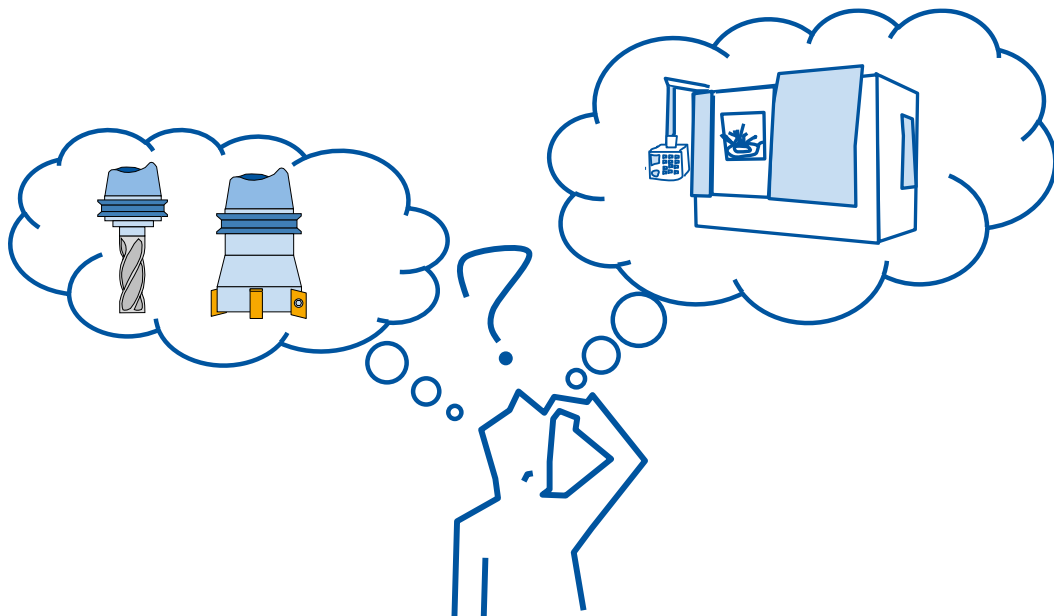


Abbildung 14 - CAM-Planung und Ressourcenauswahl

Zur Fertigung des Bauteils entschied sich der CAM-Planer für eine 3+2 Fräsbearbeitung mit einem Umspannvorgang. Das Einspannen des Bauteils für den ersten Bearbeitungsschritt geschieht mithilfe eines Zentrierspannsystems, welches durch das Vorprägen des Rohteils einen zusätzlichen Formschluss erzielt. Dies ermöglicht eine Senkung der Spannkraft. Im zweiten Bearbeitungsschritt erfolgt das Einspannen des Werkstücks mithilfe einer speziellen Vorrichtung. Hierbei treten vernachlässigbare Verformungen statt, sodass diese im Folgenden nicht berücksichtigt werden mussten.

Virtuelle Rüstsituation

Nachdem die Ressourcen und die Bearbeitungsstrategie definiert sind, erfolgt ein virtuelles Rüsten der Maschine statt. Hierzu wird das Bauteil zunächst unabhängig von der Maschine eingespannt, da der Bauteilverzug infolge der Einspannkräfte nur von der Einspannsituation und nicht jedoch von deren Position und Orientierung in der Maschine abhängig ist.

Die Bestimmung des Bauteilverzugs infolge von Einspannkräften geschieht mithilfe einer FE-Simulation. Hierzu wird die Endkontur des ersten Bearbeitungsschritts virtuell eingespannt. Bereits hier sind erste unzulässige Abweichungen erkennbar, sodass der CAM-Planer vor die Entscheidung gestellt wird entweder das Aufmaß der Bearbeitungsflächen, welche im zweiten Bearbeitungsschritt bearbeitet werden, zu erhöhen oder eine Änderung der Spannsituation durchzuführen (vgl. Abbildung 15).

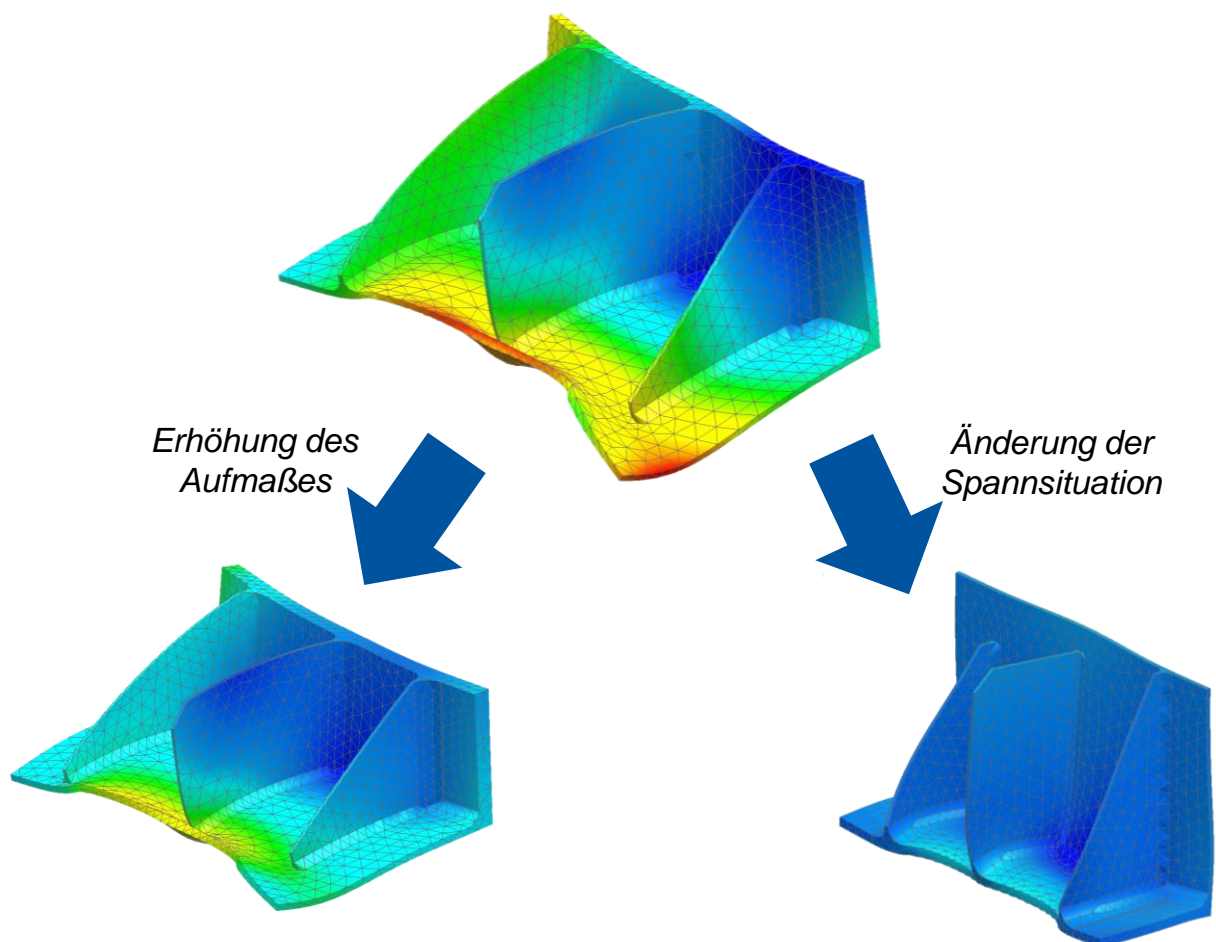


Abbildung 15 – Bestimmung des Bauteilverzugs infolge von Einspannkräften

Im Zuge des Forschungsvorhabens hat sich der CAM-Planer für eine Erhöhung des Aufmaßes entschieden, sodass in einem nächsten Schritt die Positionierung des Bauteils in der Maschine stattfinden kann (vgl. Abbildung 16).

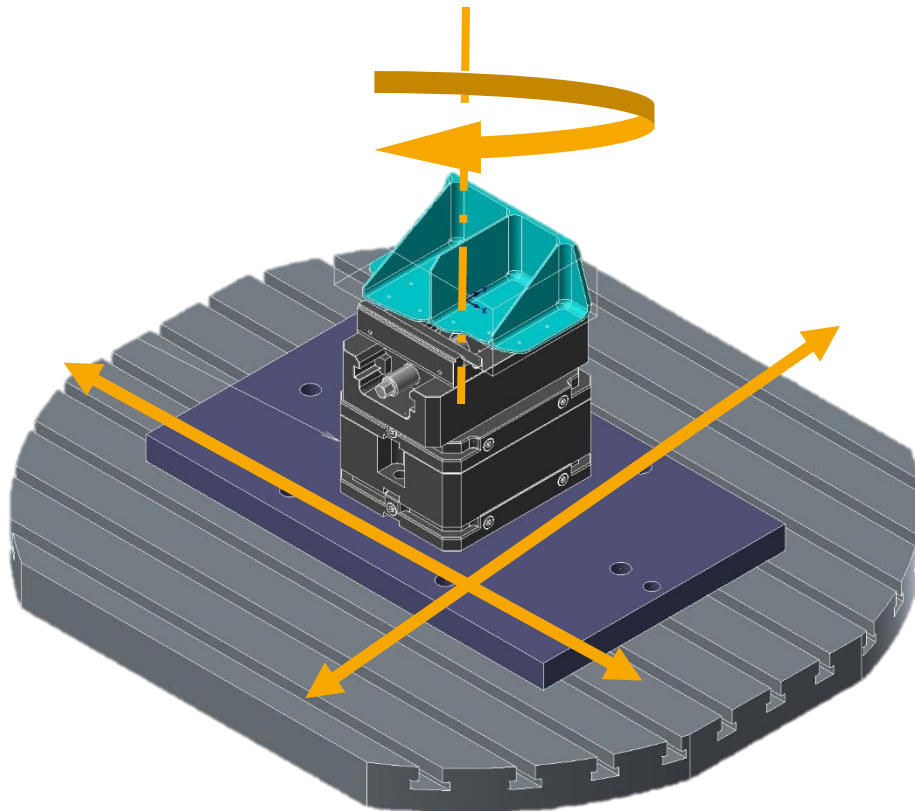


Abbildung 16 – Bauteilpositionierung

Nachdem dies abgeschlossen ist, werden mittels einer virtuellen Steuerung die Sollpositionen der Maschinenachsen für den Bearbeitungsprozess generiert. Anschließend erfolgt eine Verrechnung mit den bestimmten geometrisch-kinematischen Abweichungen. Die Anpassung der virtuellen Steuerung an die reale Steuerung geschieht mithilfe eines Maschinenarchivs. Steuerungshersteller wie Siemens, Heidenhain oder Fanuc bieten hierzu eigene Lösungen an. Zugleich existieren zahlreiche Emulatoren, wie z. B. Vericut und NCSIMUL, die eine Abbildung des Steuerungsverhaltens ermöglichen. [WELL19, S. 18f]

Durch eine kinematische Transformationsrechnung lassen sich die bestimmten geometrisch-kinematischen Abweichungen ins Werkstückkoordinatensystem transformieren. Dies ermöglicht eine direkte Fehlereinflussidentifikation am Bauteil.

Virtuelle Fertigung

Im Anschluss an die Bestimmung der Sollpfade inklusive der geometrisch-kinematischen Abweichungen und der Verlagerungen des Bauteils für die endkonturnahe Bearbeitung, erfolgt die virtuelle Fertigung des Bauteils. Hierbei findet während des Materialabtrags eine Durchdringungsrechnung zur Ermittlung des aktuellen Abtragszustands statt. Gemeinsam mit den bestimmten Zerspankoeffizienten erfolgt eine Berechnung der Prozesskraft. Anschließend wird diese zur Bestimmung der statischen Werkzeugabdrängung verwendet.

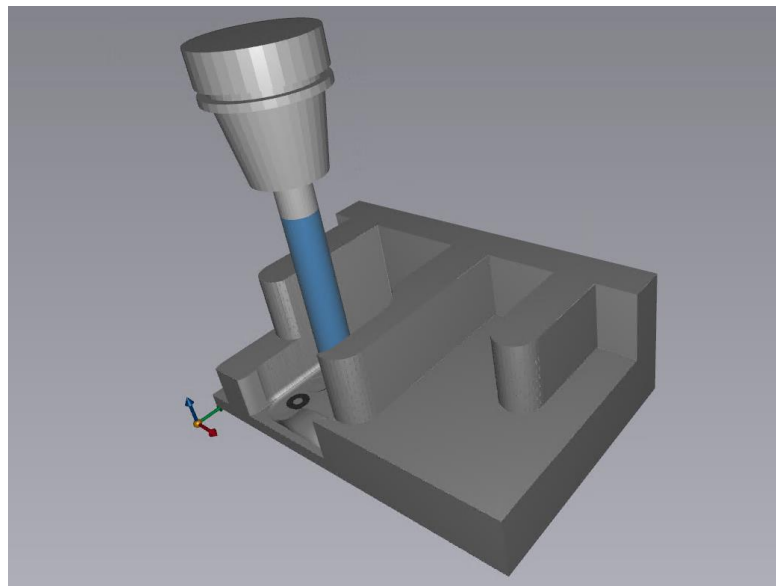


Abbildung 17 - Virtuelle Fertigung

Nach dem ersten Bearbeitungsschritt findet eine Entlastung des Bauteils statt, welcher sich in einer Rückverlagerung des Bauteils äußert. Danach erfolgt die restliche Bearbeitung des Bauteils.

Virtuelle Vermessung und Ergebnisdarstellung der Einflussfaktoren

Zur Vermessung des virtuell gefertigten Bauteils wird dieses in ein virtuelles Koordinatenmessgerät (KMG) geladen. Äquivalent zur realen Vermessung erfolgt die virtuelle Vermessung an den zumessenden Bauteiltoleranzen. Die virtuelle Messung gibt hierbei ein Messschrieb für die jeweilige Form- oder Lagetoleranz wieder. Dieser stellt neben dem Messschrieb auch die Anteile der einzelnen Einflussfaktoren und Unsicherheiten dar.

Validierung des erarbeiteten Konzepts

Während in Arbeitspaket 2 und 3 die Validierung einzelner Fehlereinflüsse separat erfolgte, ist ein direkter Rückschluss auf einzelne Fehlereinflüsse bei realen Prozessen häufig nicht möglich. Zur Validierung des Konzepts sind deshalb die resultierenden Messschriebe miteinander verglichen worden. Hierzu sind mehrere Bauteile im CNC-Kompetenzzentrum sowie bei Mitgliedern gefertigt worden. Der Vergleich zeigte, dass eine hinreichend genaue qualitätsprädiktive Simulation möglich ist. Abweichungen entstehen vor allem aufgrund dynamischer Effekte, welche allerdings nicht Teil des Forschungsvorhabens waren. Mithilfe eines Tiefpassfilters lassen sich diese herausfiltern.

Evaluierung des erarbeiteten Konzepts

Das Konzept wurde in seiner Wirksamkeit gemeinsam mit den Mitgliedern des PA bestätigt. Viele der Informationen, wie zum Beispiel die geometrisch-kinematischen Abweichungen, sind bereits bei Maschinenabnahme vorhanden sodass eine schnelle Integration möglich ist. Zugleich existieren viele, auch deutschsprachige, Softwarelösungen, die zum Teil frei verfügbar sind oder in der Industrie standartmäßig Verwendung finden. Als Beispiel sei hier die frei verfügbare FE-Software Z88Aurora der Universität Bayreuth. Ferner lassen sich alle Prozessschritte der vorgestellten Simulationsvorschrift (vgl. Abbildung 1) gut automatisieren, sodass eine schnelle Integration für den Nutzer möglich ist. Für den CAM-Planer entsteht somit kein erhöhter Mehraufwand. Gleichzeitig besteht für ihn die Möglichkeit einer direkten zielgerichteten Prozessanpassung zum Erreichen der geforderten Bauteiltoleranzen.

Ergebnisse

Das erarbeitete Konzept wurde in Form einer demonstratorischen Verifikation bestätigt. Das System erreicht – auch wirtschaftlich – den geforderten Mehrwert. Zudem ist eine Integration in die heterogene Landschaft deutscher KMU aufgrund der zuvor aufgeführten Punkte prinzipiell möglich. In Kapitel 3 ist die Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten zusammengefasst.

Personaleinsatz

Forschungsstelle 1 (FVP): 2,9 Personenmonat (PM)

Forschungsstelle 2 (WZL-WM): 2,1 Personenmonate (PM)

Arbeitspaket 6 wurde im Jahr 2019 erfolgreich abgeschlossen.

Arbeitspaket 7 – Dokumentation der Projektergebnisse und Erstellung Leitfaden (WZL)

Zielsetzung

Projektbegleitend erfolgt die Dokumentation der im Projekt erarbeiteten Ergebnisse. Zudem wird ein Leitfaden „Bewertung qualitätsbeeinflussender Faktoren bei der Fertigungsplanung von Fräs-, Bohr- und Drehprozessen“ erstellt, der mittels Entscheidungskurven und Ursache-Wirkungs-Diagrammen eine individuelle Verwertung und Implementierung der Ergebnisse zulässt.

Vorgehen:

Die erarbeiteten Projektergebnisse, Algorithmen und Lösungen wurden projektbegleitend dokumentiert, sodass sie interessierten KMU unter zusätzlicher Anleitung bereitgestellt werden können. Im Einzelnen existieren folgende Dokumente:

- Fragebögen aus Arbeitspaket 1
- Befragungsergebnisse
- Dokumentierter Quellcode des QUAPS-Demonstrators
- Schriftliche Dokumentation aller entwickelten Methoden und Algorithmen
- Ergebnisse der Tests aus den verschiedenen Arbeitspaketen
- Abschlussbericht

Zugleich wurde wird ein Leitfaden „Bewertung qualitätsbeeinflussender Faktoren bei der Fertigungsplanung von Fräs-, Bohr- und Drehprozessen“ erstellt. Dieser klassifiziert zunächst einzelne Form- und Lagetoleranzen nach ISO 1101 in ein-, zwei- und dreidimensionale Toleranzen. Anschließend bewertet dieser den Einfluss einzelner qualitätsbeeinflussender Faktoren. Während bei eindimensionalen Toleranzen – wie z. B. Geradheiten – vorwiegend Effekte aufgrund der statischen Werkzeugabdrängung dominieren, gewinnen bei mehrdimensionalen Toleranzen (z. B. Rundheiten) geometrisch-kinematische Abweichungen zunehmend an Bedeutung. Zudem wird die Bearbeitungsstrategie der einzelnen Bauteiltoleranz mitberücksichtigt. Hierbei liegt der

Fokus darauf ob mehr als eine Maschinenachse zur Fertigung des Features notwendig ist.

Ergebnisse:

Eine Dokumentation der Projektergebnisse sowie ein Leitfaden zur Bewertung qualitätsbeeinflussender Faktoren bei der Fertigungsplanung von Fräs-, Bohr- und Drehprozessen sind vorhanden.

Personaleinsatz:

Forschungsstelle 1 (FVP): 2 Personenmonat (PM)

Forschungsstelle 2 (WZL-WM): 1,2 Personenmonate (PM)

Arbeitspaket 7 wurde im Jahr 2019 abgeschlossen. Entsprechend Kapitel 4 werden nach Projektende weitere Maßnahmen zum Ergebnistransfer durchgeführt.

2. Verwendung der Zuwendung

In den folgenden Unterkapiteln werden die im Projektzeitraum (01.01.2018 – 31.12.2019) erarbeiteten Forschungsergebnisse nach Arbeitspaketen gegliedert zusammengefasst und den vorgegebenen Zielen gegenübergestellt.

Für die beschriebenen wissenschaftlichen Tätigkeiten wurden die in Tabelle 1 aufgeführten Bruttoentgelte für wissenschaftlich-technisches Personal der Stufe HPA-A und HPA-B aufgewendet.

Tabelle 1: Personaleinsatz wiss.-techn. Personal

Forschungseinrichtung	Zeitraum	Personenmonate
1 – FVP	01.01.2018 – 31.12.2018	6,0 PM HPA-A 6,0 PM HPA-B
	01.01.2019 – 31.12.2019	8,8 PM HPA-A 3,2 PM HPA-B
2 – WZL	01.01.2018 – 31.12.2018	7,4 PM HPA-A
	01.01.2019 – 31.12.2019	16,6 PM HPA-A

Die Ausgaben für die Beschäftigung der Stufen HPA-C und HPA-F lassen sich dem beiliegenden zahlenmäßigen Nachweis (bZ) entnehmen. Die im Rahmen des Projektes beschäftigten studentischen Hilfskräfte waren projektbegleitend mit Recherche-, Dokumentations- und einfachen Implementierungsaufgaben betraut. Auf eine zahlenmäßige Zuordnung zu den einzelnen Arbeitspaketen wird nachfolgend verzichtet.

Wie in den Einzelfinanzierungsplänen (EFP) der beiden Forschungsstellen beantragt, wurden keine Ausgaben für die Beschaffung von Geräten oder die Leistungen Dritter fällig.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten

Insgesamt entsprechen die geleisteten Arbeiten in vollem Umfang dem begutachteten und bewilligten Antrag und waren daher für die Durchführung des Forschungsvorhabens notwendig und angemessen. Es traten keine Verzögerungen auf. Die ausgeführten Arbeiten wurden im Rahmen der letzten PA-Sitzung mit den Mitgliedern des Ausschusses besprochen und für das Erreichen des Projektziels gemeinsam für notwendig und angemessen befunden.

4. Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftliche Nutzens insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten

Der potenzielle KMU-Nutzerkreis definiert sich heute immer noch stark über das Produkt. Im Zuge von Industrie 4.0 liegt der langfristige Wettbewerbsvorteil im Prozess- und Systemwissen zur wirtschaftlichen Erstellung von Produkten. Dieses Know-How lässt sich nicht nur schwerer imitieren als das Produkt, es befähigt zudem flexibel auf Änderungswünsche und variable Randbedingungen zu reagieren. Die zu erarbeiteten Lösungen tragen deshalb unmittelbar dazu bei, die Wettbewerbsfähigkeit spanender KMU zu steigern. Zusätzlich profitieren CAM-(Simulations-)Anbieter von den vorwettbewerblich erarbeiteten Ergebnissen.

In diesem Kontext weist der erarbeitete Ansatz folgende Vorteile auf:

1. First-Time-Right:

Durch die aufwandsarme und recheneffiziente Abbildung qualitätsbeeinflussender Einflussfaktoren ist nun bereits im Stadium der CAM-Planung eine hinreichend genaue, Toleranz-sensitive Prognose der Bauteilqualität (Toleranzen nach ISO 1101) möglich

2. Auslastung vorhandener Kapazitäten:

Die Eignung verschiedener Produktionsmittel (Maschine, Vorrichtung, Werkzeuge, ...) lässt sich vorab für eine bestimmte Bearbeitungsaufgabe prüfen und gezielt variieren.

3. Transparenz:

Durch den Aufbau einer kontinuierlich wachsenden Wissensbasis ist ein explizites Verständnis von Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen erreicht worden.

4. Unmittelbare Anwendbarkeit:

Im Rahmen des Projekts sind neue Erkenntnisse, insbesondere über die fallabhängige Sensitivität systematischer und stochastischer Einflussfaktoren entstanden. Diese sind zu Projektende u. a. in Form eines Leitfadens aufbereitet und können einer breiten Interessensgemeinschaft zur Verfügung gestellt werden.

5. Kein Expertensystem:

Die intuitive Darstellung der Prognoseergebnisse im CAM-Softwaredemonstrator ermöglicht ein schnelles Einlernen für geschultes und ungeschultes Fachpersonal. Dies ist u. a. bedeutend im Kontext des Demografischen Wandels oder der Land-Stadt-Migration potenzieller Nachwuchskräfte, die KMU in ländlichen Regionen zunehmend Probleme bereitet

Durch die enge Zusammenarbeit mit dem PA sind die aufgeführten Vorteile bestätigt worden. In Arbeitspaket 6 ist dies besonders dargelegt. Vor allem die Verwendung im Unternehmen bereits vorhandener Ressourcen und Informationen macht eine schnelle und einfache Umsetzung möglich. Nach einer einmaligen Parametrierung der Simulation ist es zudem zum Teil auch möglich weniger erfahrene Mitarbeiter in der CAM-Planung einzusetzen um ein hinreichend gute Bauteilfertigung zu erzielen. Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens leisten somit einen entscheidenden Beitrag zur Sicherung des Produktionsstandortes Deutschland. Zugleich wird durch das First-Time-Right-Prinzip die Ausschussrate deutlich verringert, was eine Steigerung der Ressourceneffizienz zur Folge hat. Da der Materialverbrauch mit einem Anteil von über 40 % des Bruttoproduktionswerts der höchste Kostenpunkt im verarbeitenden Gewerbe Deutschlands ist, ist dies nicht nur unter ökologischen, sondern auch unter ökonomischen Gesichtspunkten ein Gewinn für die Wettbewerbsfähigkeit deutscher KMU. [STAT18, SCHE17]

5. Plan zum Ergebnistransfer

Projektbezogene Veröffentlichungen

Die Projektergebnisse wurden in den folgenden Medien publiziert:

- Brecher, C.; Fey, M.; Loba, M.: Einfluss des Bauteilverzugs auf Form- und Lagetoleranzen. Anwendung eines neuartigen Ansatzes zur Berücksichtigung des Bauteilverzugs infolge von Einspannkräften bei Materialabtragssimulationen mithilfe von FE-Software. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 114. Jg., 2019, Nr. 11, S. 753–756
- Loba, M.: „Qualitätsprädiktive CAM-Simulation für die spanende Fertigung“ im Jahresbericht 2019 des Werkzeugmaschinenlabors WZL der RWTH Aachen

Durchgeführte Arbeiten zum Ergebnistransfer

Zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft fanden in regelmäßigen Abständen Sitzungen mit den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses statt. Die Sitzungstermine sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Während den Zusammenkünften sind die erzielten Ergebnisse vorgestellt und diskutiert worden. Zugleich erfolgte eine gemeinsame Planung zukünftiger Ziele und eine Setzung zukünftiger Forschungsschwerpunkte, angepasst an die jeweiligen Bedürfnisse der KMU. Die Diskussionsrunden setzten sich hierbei aus Softwareentwicklern im Bereich der CAM-Systeme sowie Entwicklungsleiter, CAM-Planern, Mitarbeitern aus der Fertigung und der Qualitätssicherung von in der Zerspanungstechnik tätigen Unternehmen.

Tabelle 2: Sitzungstermine des projektbetleitenden Ausschusses

Datum	Ort
03.05.2018	Aachen, Werkzeugmaschinenlabor (WZL)
11.06.2018	Aachen, Werkzeugmaschinenlabor (WZL)
13.09.2018	Aachen, Werkzeugmaschinenlabor (WZL)
13.12.2018	Aachen, Werkzeugmaschinenlabor (WZL)
14.03.2019	Aachen, Werkzeugmaschinenlabor (WZL)
18.09.2019	Aachen, Werkzeugmaschinenlabor (WZL)
19.12.2019	Aachen, Werkzeugmaschinenlabor (WZL)

Über die Treffen des projektbegleitenden Ausschusses hinaus wurden weitere Transfermaßnahmen durchgeführt. Im Folgenden werden einige Highlights herausgehoben, während in der nachfolgenden Tabelle alle Maßnahmen entnommen werden können.

Am 21. und 22. November 2018 wurden die Zwischenergebnisse des Projektes QUAPS auf der Veranstaltung „Potentiale und Trends im Bereich der CAD-CAM-NC-Verfahrenskette“ am Werkzeugmaschinenlabor (WZL) vorgestellt: Hieran nahmen über 50 Industrievertreter – sowohl Fach- als auch Führungskräfte – teil. Sowohl die Vision hinter dem Projekt als auch das ausgearbeitete wissensbasierte Konzept stießen auf reges Interesse und großen Zuspruch.

Bereits projektbegleitend wurde das QUAPS-Projekt interessierten Industriepartnern von WZL und FVP in Form einer Mappe vorgestellt, in der ausgewählte Referenzprojekte beschrieben sind.

Im Rahmen der an der RWTH stattfindenden Vorlesungs- und Übungsreihen „Mechatronik und Steuerungstechnik für Produktionsanlagen“, „NC-Programmierung von Werkzeugmaschinen“ und „Automatisierungstechnik für Produktionssysteme“ wurden im Jahr 2019 Inhalte und Vision des QUAPS-Projekts vorgestellt und mit den Studierenden diskutiert.

Zeitpunkt	Maßnahme
Januar 2018	Vorstellung des Projektes und der Ergebnisse in der Vorlesung „NC-Programmierung einer Werkzeugmaschine“ am WZL
Seit Februar 2018	Verwendung der Ergebnisse in Abschlussarbeiten (Azubi-Abschlussarbeiten)
Februar 2018	Vorstellung der Ergebnisse auf der METAV
Februar 2018	Auslegen einer Projektmappe an den Versuchsständen des Werkzeugmaschinenlabors
Februar 2018 April 2018	Vorstellung der Ergebnisse auf der Mitgliederversammlung FVP
Juni 2018	Teilnahme und Fachtagungen und -konferenzen (Hausmesse EXAPT)
September 2018	Vorstellung der Ergebnisse auf der AMB
September 2018	Vorstellung der Ergebnisse auf der EMO
November 2018	WZL Seminar: CAD/CAM/NC-Verfahrenskette
Januar - Dezember 2018	Vorstellung der Projektergebnisse in den Vorlesungen „Mechatronik und Steuerungstechnik für Produktionsanlagen“, „NC-Programmierung von Werkzeugmaschinen“ und „Automatisierungstechnik für Produktionssysteme“
Januar 2019	Vorstellung des Projektes und der Ergebnisse in der Vorlesung „NC-Programmierung einer Werkzeugmaschine“ am WZL
Februar 2019 April 2019	Vorstellung der Ergebnisse auf der Mitgliederversammlung FVP
Februar 2019 April 2019 Juni 2019	Teilnahme und Fachtagungen und -konferenzen (Hausmesse EXAPT)

Geplante Transfermaßnahmen

Am 10. und 11. Mai 2021 findet das Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium (AWK) statt. Unter dem Leitthema „Internet of Production – Turning Data into Value“ werden einem breiten Publikum u. a. die Inhalte und Ergebnisse des QUAPS-Projektes vorgestellt. Der enge fachliche Austausch und die Diskussion mit zahlreichen Anwendern sowie ausgewiesenen Experten anderer Forschungsinstitute werden dabei neue Impulse liefern.

Zudem werden seitens WZL und FVP künftig noch folgende Transfermaßnahmen durchgeführt:

Datum/ Zeitraum	Maßnahme
Januar 2020	Vorstellung des Projektes im WZL Jahresbericht 2019 (auch dauerhaft erreichbar unter https://www.wzl.rwth-aachen.de/cms/WZL/Das-WZL/Presse-und-Medien/~ssqp/Publikationen/)
Januar bis Dezember 2020	Vorstellung der Projektergebnisse in den Vorlesungen „Mechatronik und Steuerungstechnik für Produktionsanlagen“, „NC-Programmierung von Werkzeugmaschinen“ und „Automatisierungstechnik für Produktionssysteme“
Februar 2020	Erstellung und Präsentation eines Webauftrittes auf der Internetseite des Werkzeugmaschinenlabors (WZL)
Februar 2020	Erstellung und Präsentation von Postern sowie deren Ausstellung in den Versuchshallen (WZL)
Februar 2020 April 2020	Vorstellung der Ergebnisse auf der Mitgliederversammlung FVP
Juli 2020	Veröffentlichung des Schlussberichts auf den Websites von WZL und FVP
April 2020	Teilnahme und Fachtagungen und -konferenzen (Hausmesse EXAPT)
Juni 2020	Verwendung der Ergebnisse in Abschlussarbeiten (Azubi-Abschlussarbeiten)
November 2020	Teilnahme und Fachtagungen und -konferenzen (Hausmesse EXAPT)
Juni 2021	Vorstellung des Projekts im Rahmen des AWK's 2021
November 2021	Ergebnispräsentation beim Seminar: „Potentiale und Trends im Bereich der CAD-CAM-NC-Verfahrenskette“ 2020

6. 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 Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen 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.

7. Forschungsstellen

Forschungsstelle 1

Forschungsvereinigung Programmiersprachen für Fertigungseinrichtungen e.V.

Theaterstraße 12

52062 Aachen

Forschungsstelle 2

Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen University

Cluster Produktionstechnik

Campus-Boulevard 30

52074 Aachen

8. Literaturverzeichnis

- [ABEL10] Abele, E.; Altintas, Y.; Brecher, C.: Machine tool spindle units. In: CIRP Annals, 59. Jg., 2010, Nr. 2, S. 781–802
- [ALTI05] Altintas, Y.; Brecher, C.; Weck, M.; Witt, S.: Virtual Machine Tool. In: CIRP Annals, 54. Jg., 2005, Nr. 2, S. 115–138
- [ALTI11] Altintas, Y.; Verl, A.; Brecher, C.; Uriarte, L.; Pritschow, G.: Machine tool feed drives. In: CIRP Annals, 60. Jg., 2011, Nr. 2, S. 779–796
- [ALTI14] Altintas, Y.; Kersting, P.; Biermann, D.; Budak, E.; Denkena, B.; Lazoglu, I.: Virtual process systems for part machining operations. In: CIRP Annals, 63. Jg., 2014, Nr. 2, S. 585–605
- [ALTI15] Altintas, Y.; Tulsyan, S.: Prediction of part machining cycle times via virtual CNC. In: CIRP Annals, 64. Jg., 2015, Nr. 1, S. 361–364
- [ALTI16] Altintas, Y.: Virtual High Performance Machining. In: Procedia CIRP, 46. Jg., 2016, S. 372–378
- [BENN10] Benno Ackermann; Daniel C. Schmid: Optimierter Wissenstransfer: Methodik in Theorie und Praxis. Knowledge Management. In: KMU-Magazin, 2010, Nr. 6, 86-89
- [BREC15] Brecher, C.: Realisierung effizienter Zerspanprozesse. Ergebnisbericht des BMBF Verbundprojekts ReffiZ. (Reihe: Produktentwicklung). Aufl. Aachen: Shaker Verl., 2015
- [BREC17] Brecher, C.; Weck, M.: Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017
- [BRET14] Brettel, M.; Bendig, D.; Keller, M.; Friederichsen, N.; Rosenberg, M.: Effectuation in Manufacturing: How Entrepreneurial Decision-making Techniques can be used to Deal with Uncertainty in Manufacturing. In: Procedia CIRP, 17. Jg., 2014, S. 611–616
- [CHUA18] Chuangwen, X.; Jianming, D.; Yuzhen, C.; Huaiyuan, L.; Zhicheng, S.; Jing, X.: The relationships between cutting parameters, tool

- wear, cutting force and vibration. In: Advances in Mechanical Engineering, 10. Jg., 2018, Nr. 1, 168781401775043
- [DENK14] Denkena, B.: Ergebnisse des DFG-Schwerpunktprogramms SPP 1180: Prognose und Beeinflussung der Wechselwirkungen von Strukturen und Prozessen (2014)
- [DIN11a] DIN EN ISO 8015 (September 2011): DIN EN ISO 8015:2011-09, Geometrische Produktspezifikation (GPS)_- Grundlagen_- Konzepte, Prinzipien und Regeln (ISO_8015:2011); Deutsche Fassung EN_ISO_8015:2011
- [DIN11b] DIN ISO 230-2 (2011): Prüfregele für Werkzeugmaschinen – Teil 2: Bestimmung der Positioniergenauigkeit und Wiederholpräzision der Positionierung von numerisch gesteuerten Achsen (ISO 230-2:2006)
- [DIN17a] DIN 4003-1 (Oktober 2017): DIN 4003-1:2017-10, Konzept für den Aufbau von 3D-Modellen auf Grundlage von Merkmalen nach DIN_4000_- Teil_1: Übersicht und Grundlagen
- [DIN17b] DIN EN ISO 1101 (2017): Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Geometrische Tolerierung - Tolerierung von Form, Richtung, Ort und Lauf (ISO 1101:2017); Deutsche Fassung EN ISO 1101:2017
- [DIN82] DIN 4760 (Juni 1982): DIN 4760:1982-06, Gestaltabweichungen; Begriffe, Ordnungssystem
- [KISS16] Kiss, A. K.; Bachrathy, D.; Stepan, G.: Cumulative Surface Location Error for Milling Processes Based on Tool-tip Frequency Response Function. In: Procedia CIRP, 46. Jg., 2016, S. 323–326
- [KORE10] Koren, Y.: The global manufacturing revolution. Product-process-business integration and reconfigurable systems. (Reihe: Wiley series in systems engineering and management). Aufl. Hoboken, NJ: Wiley a John Wiley & Sons Inc, 2010

- [KRÜG14] Krüger, M.: Modellbasierte Online-Bewertung von Fräsprozessen. Dissertation. Hannover, 2014
- [OLIA16] Oliaei, S. N. B.; Karpát, Y.: Influence of tool wear on machining forces and tool deflections during micro milling. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 84. Jg., 2016, Nr. 9-12, S. 1963–1980
- [QIN07] Qin, G.; Zhang, W.; Wu, Z.; Wan, M.: Systematic Modeling of Workpiece-Fixture Geometric Default and Compliance for the Prediction of Workpiece Machining Error. In: Journal of Manufacturing Science and Engineering, 129. Jg., 2007, Nr. 4, S. 789–801
- [SARA01] Sarasvathy, S. D.: Causation and Effectuation: Toward a Theoretical Shift from Economic Inevitability to Entrepreneurial Contingency. In: Academy of Management Review, 26. Jg., 2001, Nr. 2, S. 243–263
- [SCHE17] Schebek, L.; Kannengießler, J.; Campitelli, A.; Fischer, J.; Abele, E.; Bauerdick, C.; Sauer, A.; Mandel, J.; Lucke, D.; Bogdanov, I.; Nuffer, A.-K.; Steinhilper, R.; Böhner, J.; Lothes, G.; Schock, C.; Zühlke, D.; Plociennik, C.; Bergweiler, S.: Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0 - Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes. Berlin (Juni 2017)
- [SCHU12] Schuh, G.: Innovationsmanagement. Handbuch Produktion und Management 3. (Reihe: VDI-Buch). 2., vollst. neu bearb. und erw. Aufl. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012
- [SIEB15] Siebrecht, T.; Kersting, P.; Biermann, D.; Odendahl, S.; Bergmann, J.: Modeling of Surface Location Errors in a Multi-scale Milling Simulation System Using a Tool Model Based on Triangle Meshes. In: Procedia CIRP, 37. Jg., 2015, S. 188–192
- [SITT13] Sitte, B.: Prozessstabilität als Bewertungskriterium im Entwicklungsprozess von Werkzeugmaschinen. Dissertation. Aachen, 2013

- [STAT11] Statistische Ämter des Bundes und der Länder: Demografischer Wandel in Deutschland. Statistische Ämter des Bundes und der Länder, Nr. 1. Wiesbaden (2011)
- [STAT18] Statistisches Bundesamt (Destatis): Produzierendes Gewerbe - Kostenstruktur der Unternehmen des Verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden - Fachserie 4 Reihe 4.3 - 2016. Statistisches Bundesamt (Destatis), Nr. 2040430167004 (April 2018)
- [SURM08a] Surmann, T.; Biermann, D.; Kehl, G.: Oscillator model of machine tools for the simulation of self excited vibrations in machining processes. In: The 1st International Conference on Process Machine Interactions, 2008, S. 23–29
- [SURM08b] Surmann, T.; Biermann, D. (Hrsg.): The effect of tool vibrations on the flank surface created by peripheral milling. (, 57). Aufl., 2008
- [VERW07] Verworn, B.: Auswirkungen des demografischen Wandels auf die Innovationsfähigkeit von KMU: Handlungsfelder für das Personalmanagement, Nr. 1. Cottbus (2007)
- [WELL19] Wellmann, F.: Datengetriebene, kontextadaptive Produktivitätssteigerung von NC-Zerspanprozessen. Aufl. Aachen: Apprimus Wissenschaftsverlag, 2019