Industrielle Gemeinschaftsforschung

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 18729 N

Thema

HisToolry - Auftragsübergreifende, historienbasierte Auswertung von Werkzeuglebenszyklen zur Unterstützung von Arbeitsvorbereitung und Fertigung

Berichtszeitraum

01.12.2016 - 30.11.2018

Forschungsvereinigung

1 Forschungsvereinigung Programmiersprachen für Fertigungseinrichtungen e.V.

Forschungseinrichtung(en)

1 Forschungsvereinigung Programmiersprachen für Fertigungseinrichtungen e.V.

2 RWTH Aachen, WZL / Lehrstuhl Technologie für Fertigungsverfahren

3 RWTH Aachen, WZL / Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen

31.05.2019	Michael Königs Daniel Schraknepper Alexander Epple
Ort, Datum	Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und Projektleiter der Forschungseinrichtung(en)

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

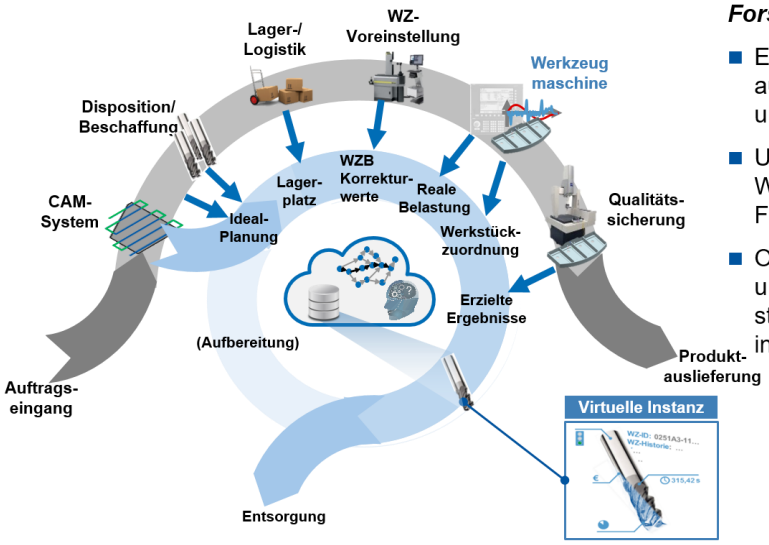
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Forschungsnetzwerk Mittelstand

Bezugsrahmen und Zielsetzung

Werkzeuge bestimmen maßgeblich die Kosten und die Qualität des Zerspanprozesses. Dabei unterliegen sie variierenden Belastungen – insbesondere in der Einzelteilfertigung, wie sie im deutschen Mittelstand dominiert. Die Flexibilität und die hohe Qualität der Fertigung ist das Alleinstellungsmerkmal der kleinen Unternehmen. Ob ein Werkzeug weiterhin für eine Bearbeitung einsetzt wird oder ausgetauscht werden muss.

Der flexible Einsatz der Werkzeuge erfordert eine durchgehende Nachverfolgung der Einsatzbedingungen, um den aktuellen Zustand des Werkzeugs zu bestimmen. Das kontinuierliche Verfolgen der Historie ermöglicht eine Bewertung des Werkzeugs zu jedem Zeitpunkt. Diese zusätzliche Information ermöglicht dem Bediener die Verwendung des Werkzeugs optimal zu planen und bis zu seinem Standzeitende einzusetzen.



Forschungsschwerpunkte

- Erkennung des Verschleißzustandes auf Basis steuerungsinterner Daten und Materialabtragsmodellen
- Untersuchung des Einflusses von Werkzeugverschleiß auf erzielbare Fertigungsqualität
- Optimierung von Werkzeugbestand und Angebotserstellung durch statistische Auswertung von individuellen Werkzeuglebenszyklen

ALLIANZ INDUSTRIE FORSCHUNG

[[FVP]]

Inhaltsverzeichnis

Nr.	Titel	Seite
1	Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse im Berichtszeitraum	4
1.1	Arbeitspaket 1 – Unternehmensbesuche und Ableitung von Referenzprozessen	4
1.2	Arbeitspaket 2 – Schnittstellen und Identifikationsmethodik für individuelle Werkzeuge	9
1.3	Arbeitspaket 3 – Messdatenerfassung und Modellbildung	17
1.4	Arbeitspaket 4 – Maschinen-, werkstück- und auftragsübergreifende Auswertungen	23
1.5	Arbeitspaket 5 – Zusammenführen der Einzelkomponenten	38
1.6	Arbeitspaket 6 – Evaluierung der Wirksamkeit des erarbeiteten Konzepts	41
1.7	Arbeitspaket 7 – Dokumentation der Projektergebnisse	42
2	Verwendung der Zuwendung	43
3	Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftliche Nutzens insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten	44
4	Plan zum Ergebnistransfer	46
5	Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts	50

1. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse im Berichtszeitraum

Arbeitspaket 1 – Unternehmensbesuche und Ableitung von Referenzprozessen

Zielsetzung

Erhebung des Stands der Industrie bezüglich Digitalisierung und Vernetzung, sowie drängender Probleme. Ableiten von Referenzprozessen zur Evaluation des zu entwickelnden Systems.

Um die Anforderungen verschiedener KMU im Bereich Zerspanungstechnik an die zu entwickelnde automatisierte und wissensbasierte auftragsübergreifende und historienbasierte Auswertung von Werkzeuglebenszyklen zu erfassen, wurden im Zuge dieser Arbeit Interviews bei insgesamt zehn besuchten Unternehmen bezüglich der Frage nach dem Umgang der Werkzeugauswahl in der Prozessplanung durchgeführt. Zur Erhebung der unternehmensspezifischen Anforderungsprofile wurde der qualitative Ansatz der Einzelfallanalyse gewählt. Da die Einzelfallanalyse grundsätzlich für alle Methoden der empirischen Forschung offen ist und den Einsatz einer einzelnen Erhebungsmethodik sogar ausdrücklich untersagt, eignet sie sich nach [1] vornehmlich für die – wie im betrachteten Fall vorliegende – geringe Stichprobengröße. Dennoch ermöglicht sie nach [2] den Einbezug aller relevanten Dimensionen und Variablen.

Als konkrete Erhebungsmethoden wurden für HisToolry das qualitative Experteninterview und der quantitative Fragebogen ausgewählt. Die vorgenommene, bewusste Verknüpfung unterschiedlicher Erhebungsverfahren zur multiperspektivischen Betrachtung der untersuchten Anwendungsfälle (Methodentriangulation) half dabei, potentiell einseitig erhobene Verzerrungen durch die Verwendung einer der beiden anderen Methoden aufzudecken und zu korrigieren. Das qualitative Experteninterview (vgl. [3]) wurde ausgewählt, da insbesondere die persönliche Sichtweise der befragten Experten auf den Werkzeugauswahlprozess in der Feinplanung berücksichtigt werden sollte. Die dabei identifizierten wirtschaftlich-technologischen Randbedingungen, Werkzeugauswahlkriterien und Entscheidungsmuster bilden das Fundament der in den folgenden Arbeitspaketen entwickelten auftragsübergreifenden und historienbasierten Auswertungen von Werkzeuglebenszyklen für die Arbeitsvorbereitung in der Fertigung.

Somit besteht ein wesentlicher Erkenntnisgewinn des Arbeitspakets 1 in bewerteten Aussagen darüber, welche Kenngrößen Werkzeugplanern in KMUs zu Beginn des Auswahlprozesses zur Verfügung stehen, wie sie diese gewichten, welche Informationen sie prozessbegleitend generieren und welche Ausgangsgrößen sie nach Abschluss der auftragsübergreifenden und historienbasierten Werkzeugauswahl an nachgelagerte Stellen übergeben.

Als Interviewpartner wurden dafür ausschließlich Mitarbeiter von KMU befragt, die unmittelbar am Werkzeugauswahlprozess ihres Unternehmens beteiligt waren oder diesen auf einer höheren Hierarchieebene verantworteten. In Abbildung 1 ist die Einordnung der Werkzeugauswahl in die Fertigungsplanungskette dargestellt.

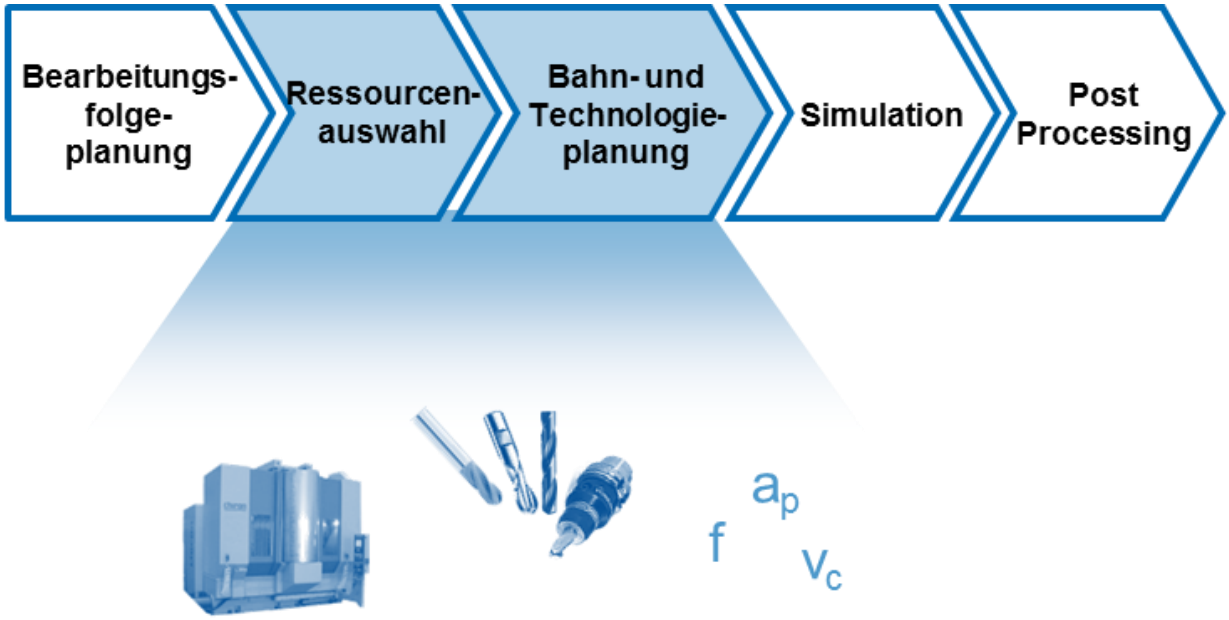


Abbildung 1: Einordnung des Werkzeugauswahlprozesses in die Fertigungsplanung

Personaleinsatz

Forschungsstelle 1 (FVP): 2 Personenmonat (PM)

Forschungsstelle 2 (WZL-TF): 2 Personenmonate (PM)

Forschungsstelle 3 (WZL-WM): 2 Personenmonate (PM)

Durchgeführte Arbeiten

Zu Beginn der Projektlaufzeit wurden zur Analyse der Ist-Situation in Hinblick auf die Verwendung von werkzeugspezifischen Informationen entlang der CAD-CAM-NC-Kette Unternehmensbesuche bei den im Projektausschuss (PA) vertretenden Mitgliedern durchgeführt. Dabei wurde erfasst, welche werkzeugspezifischen Informationen an jeder Station im Produktionsprozess und welche Stationen entlang der CAD-CAM-NC-Kette zur Aufgabenbewältigung herangezogen werden. Aus den gewonnenen Erkenntnissen sind Referenzstationen und -ereignisse, die im Lebenszyklus eines Werkzeugs abgebildet werden müssen, abgeleitet worden.

Charakteristisch für die durchgeführten Interviews war das Einräumen von viel Freiraum bei den Ausführungen der Interviewpartner, da eigene Impulse wichtige Bestandteile für die nachfolgenden Auswertungen darstellten und daher ausdrücklich erwünscht waren. Der Leitfaden des Experteninterviews wurde durch den Aufbau des Fragebogens sowie durch den strukturierten Ablauf der prozessbegleitenden Feldstudien vorgegeben. Der quantitative Fragebogen zeichnete sich durch überwiegend geschlossene Fragen aus. Dabei wurde ein verhältnismäßig hoher Anteil an metrischen und ordinalskalierten Antworten erwartet. Dies war zweckmäßig, da die Erhebung hauptsächlich dazu diente, die verschiedenen Ausprägungen eines bereits etablierten Prozesses – des Werkzeug-auswahlprozesses – zu erfassen und zusätzliche Hinweise in Form von Feldnotizen festzuhalten. Alle Interviews fanden vor Ort bei den befragten Unternehmen statt und wurden stets in Verbindung mit Führungen durch Arbeitsvorbereitung und Fertigung durchgeführt. In diesem Zusammenhang fanden die prozessbegleitenden Feldstudien statt, bei denen die befragten Experten anhand verschiedener Anwendungsfälle den Werkzeugauswahlprozess vorführten und erläuterten. Sowohl die Ausführungen des Experten als auch die beobachteten Handlungen und Handlungsgegenstände wurden schriftlich festgehalten. Identifizierte Kernpunkte und unklare Details wurden durch geschlossene Fragen konkretisiert. Aufgrund der Komplexität des gesamten Studiendesigns, wurde dieses vor Beginn der Unternehmensbesuche einem internen Testlauf in der institutseigenen Werkstatt unterzogen. Anschließend konnten die in diesem Zusammenhang ausgemachten Schwachstellen, bezüglich Vollständigkeit, Verständlichkeit und Eindeutigkeit der erarbeiteten Erhebungsmethodik, behoben werden. Dabei wurde der Anspruch überprüft, dass die untersuchte Stichprobe einen

Rückschluss auf einen Großteil der zerspanungstechnologisch fertigenden KMU am Standort Deutschland zulassen solle (induktives Schlussfolgern).

Vorbereitend zu den Untersuchungen fand eine umfassende Recherche über den verfügbaren Stand der Forschung und Technik statt. Hierbei wurden aktuelle wissenschaftliche Veröffentlichungen sowie etablierte Richtlinien und Normen untersucht.

Erzielte Ergebnisse

Die aktuelle Lage bei KMU zeigt folgende Arbeitsabläufe und Ist-Zustände: Das Produktportfolio bei den besichtigten KMU im Bereich der Zerspanungstechnik besteht vorwiegend aus Einzelteil- und Kleinserien. Hintergrund ist die zunehmende Flexibilisierung durch die gestiegenen Kundenanforderungen zum Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit. In dieser Produktionsumgebung sind Werkzeuge bis auf Aufnahmen noch nicht durchgängig digital dokumentiert. Die Wahl des Werkzeugs für die entsprechende Schneidstoff-/Werkstück-Materialkombination und die gewünschten Qualitätsanforderungen erfolgt über die Erfahrung der Mitarbeiter. Die Nutzung von unterstützender Software entlang der CAD-CAM-NC-Kette ist nicht bei allen Mitgliedern des PA vollständig gegeben. Es lässt sich jedoch ein deutlicher Trend hin zur Verwendung von unterstützender Software erkennen.

Die Einschätzung der Mitglieder im PA ist, dass auch bei durchgängiger CAD-CAM-NC-Kette eine individuelle Zustandsüberwachung des Werkzeugs, auf Basis der über die Kette generierten Datensätze, mit Unsicherheiten und Komplexitäten behaftet ist. Gründe hierfür sind:

- Werkzeuge sind verschiedenen Materialien (Aluminium, Stahl, Titan, usw.) und Bearbeitungssituationen ausgesetzt. Daher reicht eine einfache Betrachtung von Steuerungsvariablen wie die Spindelleistung nicht aus, um auf den aktuellen Werkzeugverschleiß zu schließen.
- Nachgeschliffene Werkzeuge besitzen eine deutlich geringere Standzeit bei gleichen Kraftbedingungen.
- Materialchargen sind inhomogen und haben daher Einfluss auf den Werkzeugverschleiß.

- Keine durchgängige Datenerfassung und -analyse in der Fertigung; Werkzeuge sind oft nur kurzzeitig im Einsatz. Ebenso herrscht keine Erfassung des aktuellen Ist-Zustandes vor.

Als Referenzsituation wird eine vollständig durchgängige CAD-CAM-NC-Kette als Stand der Technik vorausgesetzt. So kann die benötigte Software-Infrastruktur zur Datenverarbeitung entwickelt werden. Als Referenzmaterial wird Stahl, als Referenzwerkstück eine Bearbeitung mit verschiedenen Eingriffssituationen, Zustellungen, und Drehzahlen gewählt. Als Referenzwerkzeug wird ein Hartmetall-Schaftfräser gewählt.

Arbeitspaket 1 wurde im Jahr 2017 erfolgreich abgeschlossen.

Arbeitspaket 2 – Schnittstellen und Identifikationsmethodik für individuelle Werkzeuge

Zielsetzung und Ausgangspunkt

Unter Berücksichtigung der in Arbeitspaket aufgenommenen Anforderungen besteht das Ziel von Arbeitspaket 2 in der Erweiterung der in Vorhaben „CAMCloud“ (18086 N/1) erstellten Cloud-Umgebung um die Unterstützung und Verfolgung von individuellen Bearbeitungswerkzeugen. Den Ausgangspunkt bilden dabei insbesondere die im Rahmen des Projektes definierten Referenz-Workflows und -Datenquellen und -Datenübertragungen (Abbildung 1), die während der Auftragsbearbeitung durchlaufen werden bzw. anzutreffen sind, sowie die hierauf aufbauende Ereignis-Struktur (Abbildung 2), die der Bündelung von Auftragsdaten sowie der Verfolgung eines Auftrags entlang der Stationen Workflows dient. Im Folgenden werden daher Workflows, Datenquellen, Datenübertragungen und Ereignis-Struktur kurz erläutert. Die Ausführungen sind dabei anteilig dem Schlussbericht aus „CAMCloud“ entnommen.

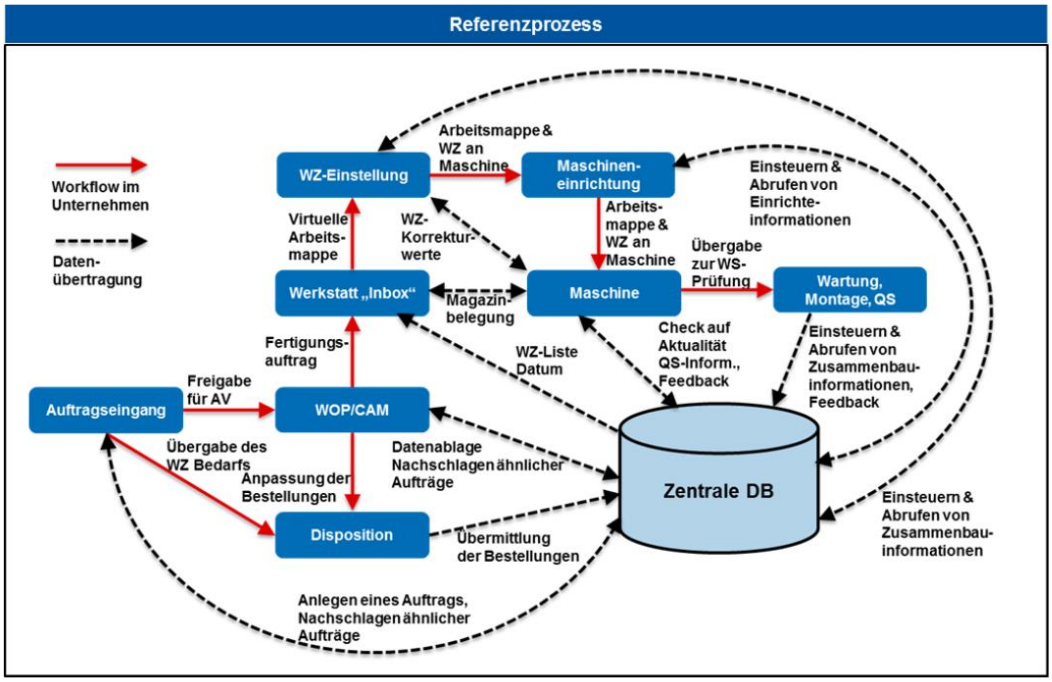


Abbildung 2: Betrachtete Prozesskette

Workflows, Datenquellen und Datenübertragungen

Nach Auftragseingang und Übermittlung von Konstruktionsdaten erfolgt eine Kostenkalkulation auf Basis bereits abgeschlossener ähnlicher Bearbeitungsfälle. Auch

eine Abschätzung des Werkzeugbedarfs lässt sich auf diesem Wege ebenfalls einsteuern. Nach Erhalt des Auftrags erfolgt die NC-Programmierung in der Arbeitsvorbereitung, bei welcher neben dem NC-Programm Dokumentationen über eingesetzte Werkzeugzusammenbauten und Spannmittel, Spannlagen, gesetzte Nullpunkte angefertigt und zentral abgelegt werden. Anpassungen der Bestellungen sowie Optimierungen der Bearbeitungsplanung erfolgen hier unter Rückgriff auf ähnliche Planungsaufträge bzw. auf bereits zurückgemeldete Probleme. Nach Abschluss der planerischen Tätigkeiten gelangt der Auftrag in einen „Inbox“-Bereich der Fertigung, wo durch Abruf der aktuellen Maschinenbelegungen und Einrichtungszustände der Maschinen sowie der Fälligkeiten der eingehenden Aufträge der nächste zu fertigende Auftrag ermittelt wird. Dieser nimmt seinen Weg über die Werkzeugvoreinstellung, wo die noch fehlenden Werkzeuge zusammengesetzt und vermessen werden, hin zur Maschineneinrichtung, an welcher die festgelegte Aufspannsituation im Arbeitsraum der Maschine hergestellt wird. An beiden Stationen erfolgt eine Unterstützung durch die während der Bearbeitungsplanung hergestellten Dokumentationen. Darüber hinaus erweitern die Stationen die Datenbasis mit zusätzlichen realen Abbildern des Herstellungszustands oder greifen auf bereits bestehende zurück. Anschließend kann nach erfolgreichem Aktualitäts-Check der verwendeten Daten die Ausführung des NC-Programms an der Maschine beginnen. Nach der Programmbearbeitung werden etwaige Probleme oder vorgenommene Änderungen am verwendeten Programm dokumentiert, um der Arbeitsvorbereitung für zukünftige Planungen und Optimierungen zur Verfügung zu stehen. Für die nachfolgende Qualitätssicherung gilt ein ähnlicher Ablauf im Hinblick auf festgestellte Kontur- oder Toleranzverletzungen.

Ereignis-Struktur

Über die in „CAMCloud“ entwickelte Ereignisstruktur lassen sich beim Durchlaufen der Workflows die stationsweise erzeugten Informationen zu einem Auftrag zuordnen. Gleichzeitig wird dabei eine Historie des Auftrags erzeugt. Der hierzu verwendete Formalismus für orientiert sich stark am Formalismus für „Nichtdeterministische endliche Automaten“ aus dem Bereich der Automatentheorie, welcher im Folgenden kurz erläutert wird. Ein endlicher Automat beschreibt ein Verhalten, bestehend aus Zuständen, Zustandsübergängen und Aktionen. Ein Zustand speichert die Informationen über die Vergangenheit, d.h. er reflektiert in gewissem Umfang die Änderungen der Eingabe seit dem Systemstart bis zum aktuellen Zeitpunkt. Ein Zustandsübergang zeigt eine

Änderung des Zustands des endlichen Automaten und wird durch logische Bedingungen beschrieben, die erfüllt sein müssen, um den Übergang zu ermöglichen. Diese Bedingungen auf Basis von Eigenschaften im aktuellen Zustand durchgeführt. Eine Aktion ist die Ausgabe des endlichen Automaten, die in einer bestimmten Situation erfolgt. Es gibt vier Typen von Aktionen:

1. Eingangsaktion: Ausgabe wird beim Eintreten in einen Zustand generiert.
2. Ausgangsaktion: Ausgabe wird beim Verlassen eines Zustands generiert.
3. Eingabeaktion: Ausgabe wird abhängig vom aktuellen Zustand und der Eingabe generiert.
4. Übergangsaktion: Ausgabe wird abhängig von einem Zustandsübergang generiert.

Ein nichtdeterministischer endlicher Automat ist ein endlicher Automat, bei dem es für den Zustandsübergang mehrere gleichwertige Möglichkeiten gibt. Im Unterschied zum deterministischen Automaten sind die Möglichkeiten damit nicht eindeutig. Dem Automaten ist also nicht vorgegeben, welchen Übergang er zu wählen hat.

Der Formalismus für „nichtdeterministische endliche Automaten“ wurde in „CAMCloud“ zur Abbildung des Verhaltens bei Bearbeitung von Fertigungsaufträgen angewendet. Zunächst wird dazu der unternehmensinterne Workflow abgebildet.

1. Die Menge aller Stationen bildet die Menge aller Zustände des Automaten. Unabhängig vom unternehmensinternen Workflow werden zwei gesonderte Stationen, welche den Start und Zielzustand des Automaten darstellen, definiert. Den Startzustand bildet die Station „Auftragseingang“. Neu angelegte Aufträge befinden sich zu Beginn immer in diesem Zustand. Der Zielzustand des Automaten wird durch den Zustand „Vertrieb“ beschrieben. Befindet sich ein Auftrag in Zustand „Vertrieb“, gilt dieser als abgearbeitet. Der Zustand des Auftrags wird also über die Station beschrieben, an der er aktuell verweilt.

2. Zur Abbildung der Reihenfolge, in welcher ein Auftrag die Menge der Stationen durchläuft, wird über die Zustandsübergänge abgebildet. Folgen zwei Stationen im unternehmensinternen Workflow aufeinander, werden diese durch einen Zustandsübergang unidirektional verbunden. Darüber hinaus werden alle Stationen paarweise mit sogenannten „Korrektur-Zustandsübergängen“

verbunden. Diese dienen dazu, einen Auftrag aus dem aktuellen in einen früheren Zustand zurückzuversetzen. Hierdurch werden Korrekturschleifen oder das Auftreten kurzfristiger Änderungen abgebildet.

3. Aus der Liste der im Vorfeld erläuterten Aktionen kommen Eingabe- und Übergangsaktionen zum Einsatz. Abhängig von der aktuellen Station, an der sich ein Auftrag befindet, können diesem nur bestimmte, über Eingabeaktionen festgelegte Informationen hinzugefügt bzw. nur bestimmte Informationen verändert werden. Bei Ausführung einer Eingabeaktion wird dazu ein entsprechender Event erzeugt, über welchen Informationen und Auftrag miteinander verknüpft werden. Muss ein Auftrag an eine vorherige Station zurückgeleitet werden oder sind Korrekturen an Informationen früherer Stationen notwendig, wird der entsprechende „Korrektur-Zustandsübergang“ verwendet. Mit diesem verbunden ist immer eine entsprechende Übergangsaktion, welche bei Verwendung ausgeführt wird. Über diese wird zum einen ein entsprechender Korrektur-Event angelegt (Definition folgt). Zum anderen wird den Mitarbeitern so die Notwendigkeit von Änderungen kommuniziert.

4. Zustandsübergänge werden durch logische Bedingungen erweitert werden. Die Auswertung erfolgt auf Basis der Events des aktuell betrachteten Fertigungsauftrags. So kann zum Beispiel ein Fertigungsauftrag erst zur nächsten Station weitergereicht werden, wenn ihm bestimmte, im Vorfeld festgelegte Informationen hinzugefügt wurden und somit ein entsprechender Event vorliegt.

5. Ein Event stellt eine Erweiterung des Formalismus für „nichtdeterministische endliche Automaten dar“ und ist die Verknüpfung zwischen Dokumenten oder Fertigungsressourcen und Fertigungsaufträgen. Jeder Event ist gekennzeichnet durch eine Klasse (z.B. „Zeichnung hinzugefügt“, „Stückzahl festgelegt“), eine Station, einen Mitarbeiter und einen Zeitstempel. Es ist nicht möglich, einmal erstellte Events wieder zu löschen. Auf diese Weise wird der vollständige Verlauf eines Auftrags dokumentiert.

Abbildung 3 enthält hierzu ein Zusammenspiel im Folgenden angeführten der Entitäten. Ein beispielhafter Durchlauf für die Stationen Auftragseingang und WOP/CAM wird zudem in Abbildung 4 gezeigt.

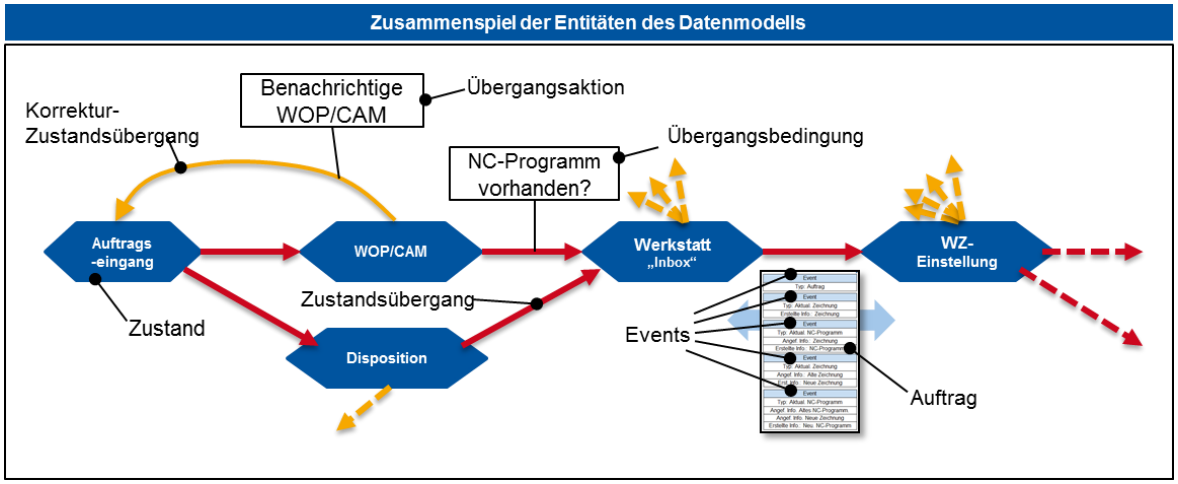


Abbildung 3: Zusammenspiel der Entitäten

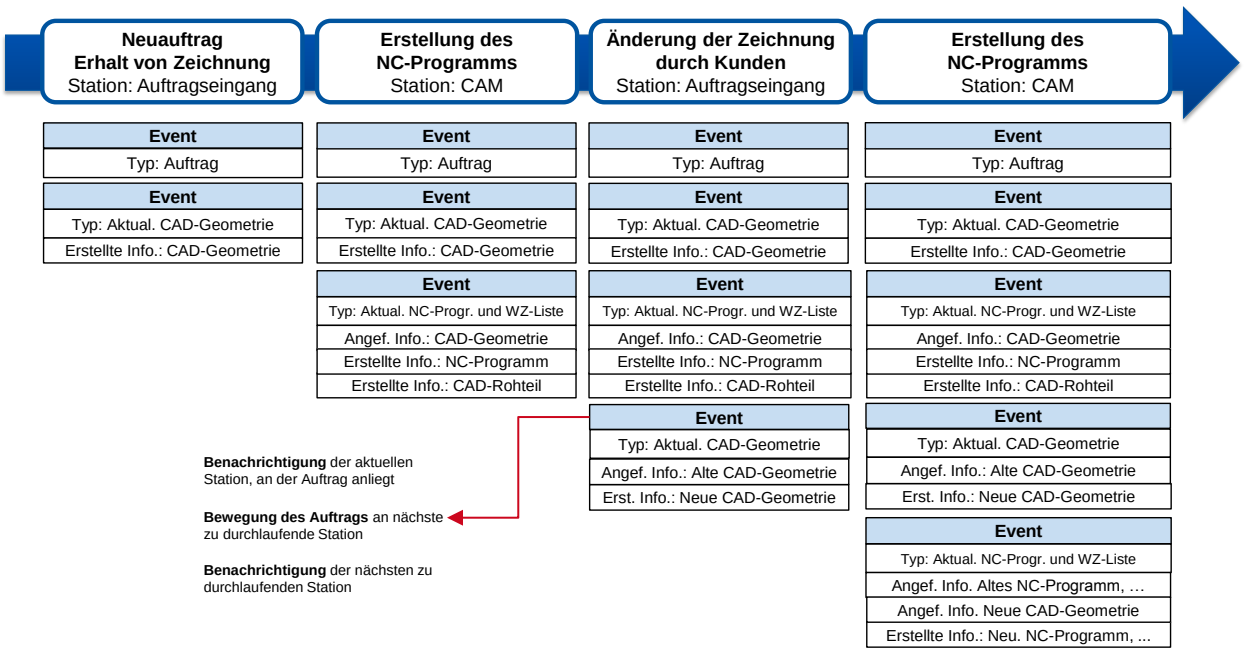


Abbildung 4: Beispielhafter Durchlauf für einen Bearbeitungsauftrag

Personaleinsatz

Forschungsstelle 1 (FVP): 8 Personenmonate (PM)

Forschungsstelle 2 (WZL-TF): 0 Personenmonate (PM)

Forschungsstelle 3 (WZL-WM): 1 Personenmonate (PM)

Durchgeführte Arbeiten

Im Rahmen von Arbeitspaket 2 wurde die Ereignisstruktur von der Abbildung von Auftragsdaten und Auftragshistorien auf die Abbildung von individuellen Werkzeughistorien ausgedehnt. Analog zum Fertigungsauftrag lassen sich zu einem individuellen Bearbeitungswerkzeug Events/Ereignisse erzeugen, die eine Zuordnung zwischen realen Abmaßen (Korrekturwerten), Belastungssituationen und erzielten Fertigungsergebnissen über den Lebenszyklus des Werkzeugs hinweg ermöglichen. Somit entsteht eine geeignete Grundlage für datengetrieben Analysen, die Zusammenhänge zwischen Werkzeughistorie, Werkzeugzustand und resultierenden Bearbeitungserzeugnissen aufdecken sollen (Arbeitspaket 4). Insgesamt wurden sieben Events definiert, die fortlaufend einer Werkzeuginstanz angehängt werden können:

1. **Neues Werkzeug:** Werkzeugwird erzeugt und erhält eine ID
2. **Zuordnung zu Auftrag:** Werkzeug wird einem Auftrag zugeordnet
3. **Vermessung:** Werkzeug wird um einen Datensatz zu Werkzeugkorrekturwerten erweitert
4. **Änderung des Werkzeugzustands:** Werkzeugzustand wird zugeordnet
5. **Werkzeugaufbereitung:** Werkzeugaufbereitung wird vermerkt
6. **Bearbeitung:** Werkzeug wird aufgenommene Belastungssituation zugeordnet
7. **Qualitätssicherung:** Erzielte Qualitätsergebnisse werden Werkzeug zugeordnet

Zur praktischen Anwendung der informationstechnischen Erweiterungen wurden die bestehenden CAMCloud-Workflows und CAMCloud-Datenstrukturen um die Identifikation von Werkzeuginstanzen sowie der gefertigten Werkstücken erweitert. Die neuen Abläufe sind nachfolgender Auflistung zu entnehmen.

1. **WOP/CAM:** CAM-intern erfolgt weiterhin eine Planung auf Grundlage von Soll-Daten. Hierbei werden Werkzeugklassen verwendet, die lediglich Auskunft über den Werkzeugtyp, jedoch nicht die Werkzeuginstanz geben. Bei Fertigstellung der Planungen erfolgt anschließend für jede Werkzeugklasse die Auswahl eines individuellen Werkzeugs (Event: Zuordnung zu Auftrag**)**, welches für die Bearbeitung verwendet werden soll. Im Falle eines Neuwerkzeugs wird eine entsprechende Instanz angelegt und mit einer ID ausgestattet (Event: Neues Werkzeug).
2. **Werkzeugvoreinstellung:** Für die Identifikation individueller Werkzeuge werden RFID-Chips am Werkzeughalter eingesetzt. Im Falle eines Neuwerkzeugs wird ein

neuer Chip mit der CAM-erzeugten ID verwendet und der neuen Werkzeuginstanz physisch zugeordnet. Der Chip dient im Falle der Werkzeugvermessung der Zuordnung zwischen Korrekturwerten und Werkzeuginstanz (Event: Vermessung).

3. **Bearbeitung:** Auf Grundlage steuerungsinterner Signale werden Belastungssituationen berechnet und dem individuellen Werkzeug zugeordnet (Event: Bearbeitung**)**. Die Zuordnung zwischen Instanz und Belastungen erfolgt mittels des RFID-Chips beim Einlegen des Werkzeugs in das Werkzeugmagazin. Weiterhin werden steuerungsinterne Signale zur Bewertung des Werkzeugzustands herangezogen. Bei Änderungen des Zustands wird dieser der Instanz angehängt (Event: Änderung des Werkzeugzustands**)**. Nach Fertigstellung des Werkstücks erfolgt dieses einen Barcode. Hierdurch erfolgt eine Zuordnung zwischen individuellem Werkstück und Werkzeuginstanz. Der Werkzeuginstanz wird dabei eine Referenz auf das individuelle Werkstück angehängt.
4. **Qualitätssicherung:** Mittels des Barcodes lassen sich erstellte Qualitätsberichte zu einem individuellen Werkstück einem individuellen Werkstück zuordnen (Event: Qualitätssicherung**)**.

In Abbildung 5 erfolgt eine beispielhafte Anwendung des Formalismus für die Stationen CAM, Werkzeugvoreinstellung, Bearbeitung und Qualitätssicherung. Hierbei wird der Lebenszyklus für ein individuelles Werkzeug aufgebaut.

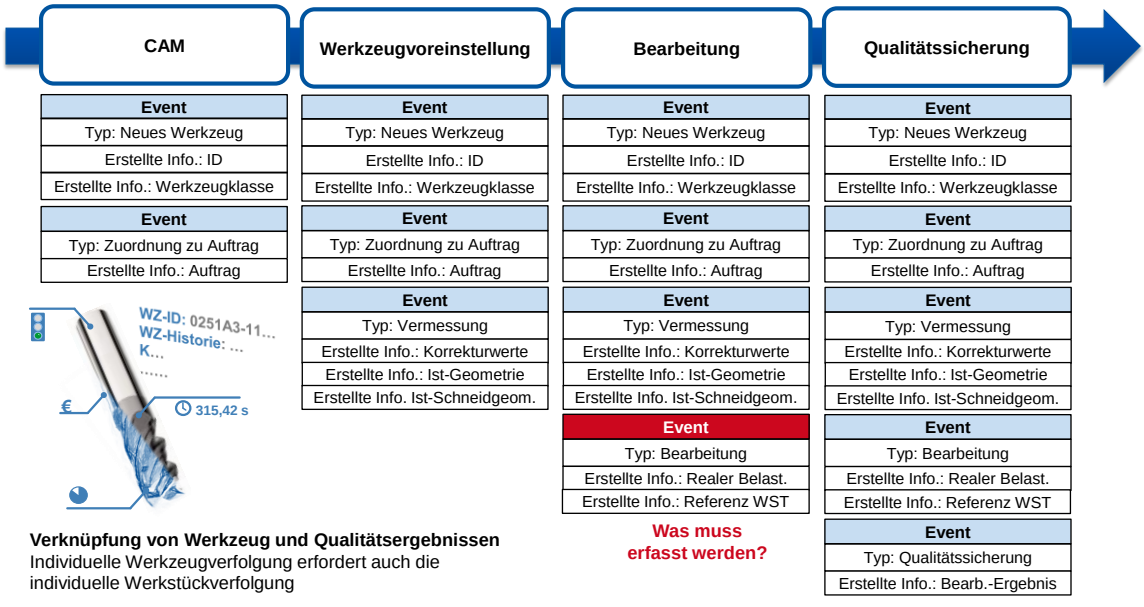


Abbildung 5: Beispielhafter Aufbau eines Werkzeuglebenszyklus

Abschließend wurden zu den vorgestellten Events und Identifikationstechniken geeignete Eingabemasken konzipiert und demonstratorisch umgesetzt bzw. hardwaretechnisch Aufgebaut (bspw. zur Identifikation mittels RFID-Chip).

Erzielte Ergebnisse

In Arbeitspaket 2 wurde ein Vorgehen zur Erweiterung einer existierenden Cloud-Umgebung um die individuelle Verfolgung von Werkzeughistorien aufgebaut. Dabei werden alle benötigten Informationsquellen sind an die Umgebung angebunden. Die Zuordnung von generierten Informationen zu individuellen Werkzeugen kann dadurch entlang der CAD-CAM-NC-Verfahrenskette gewährleistet werden.

Arbeitspaket 2 wurde erfolgreich im Jahr 2017 abgeschlossen.

Arbeitspaket 3 – Messdatenerfassung und Modellbildung

Zielsetzung

Ziel dieses Arbeitspakets ist es eine automatische Bewertung des Werkzeugzustandes zu entwickeln, die auf Messdaten aus dem Prozess basiert. Insbesondere soll untersucht werden, welche Signale eine hohe Korrelation mit dem Verschleißzustand aufweisen.

Personaleinsatz

Forschungsstelle 1 (FVP): 2 Personenmonat (PM)

Forschungsstelle 2 (WZL-TF): 12 Personenmonate (PM)

Forschungsstelle 3 (WZL-WM): 2 Personenmonate (PM)

Durchgeführte Arbeiten

Für die Versuche werden die Signale aus einer Siemens Steuerung (Sinumerik 840D sl) über den internen Steuerungsclient Sinumerik Integrate und die Schnittstelle „Create my HMI“ an einem Fräsbearbeitungszentrum (Heller H2000) ausgelesen. Dafür werden die Daten über eine TCP-Verbindung im IPO-Takt (Interpolationstakt) mit einer Übertragungsfrequenz von $f_s = 500\,Hz$ ausgelesen, vgl. Arbeitspaket 4. So werden Daten wie die Position, Geschwindigkeit, Beschleunigung, und Strom für alle Achsen (X, Y, Z, Spindel) aufgezeichnet. Die Flexibilität des Fräsprozesses führt dazu, dass sich die Signale schnell und stark verändert. Dies stellt eine systematische Datenauswertung vor Herausforderungen. Daher müssen Signale zunächst mit den Eingriffsbedingungen synchronisiert werden. Diese Durchdringungsrechnung erfolgt parallel zum Prozess und liefert so den aktuellen Materialabtrag und damit die (qualitative) Belastung jeder Schneide. Kombiniert man dies mit einem Kraftmodell (datengetrieben oder aus der Literatur), so kann man die tatsächliche Belastung schätzen. Da die Kraft vornehmlich den Werkzeugverschleiß beeinflusst, ist diese Weiterverarbeitung der Messsignale von essenzieller Bedeutung.

Die so aufbereiteten Messdaten können anschließend zu Bewertung des aktuellen Werkzeugzustandes herangezogen werden. Dafür sind jedoch nicht nur die aktuellen Daten wichtig, sondern auch die Belastungshistorie. Zwar spiegeln die aktuellen Signale theoretisch den aktuellen Werkzeugzustand wider, jedoch hängt der Signalverlauf auch

von dem aktuellen Eingriff und den lokalen Materialcharakteristika ab, dass eine Bereinigung dieser Einflüsse in der Praxis nicht möglich ist. Daher wird die gesamte Werkzeughistorie berücksichtigt. Es wurden erste, einfach Standzeitversuche (Planfräsen) durchgeführt um die prinzipielle Funktion der Prozess- und Messkette zu evaluieren.

Erzielte Ergebnisse

Die Prozesskraft steigt zwar tendenziell mit zunehmendem Werkzeugverschleiß, jedoch ist dieser Zusammenhang weder eindeutig, noch lässt sich eine definierte Schwelle für das Verschleißende setzen. Die Varianz in Geometrie, Beschichtung der Werkzeuge und der Materialcharakteristika des Werkstücks sind zu hoch. Darüber hinaus müsste eine solche Schwelle ebenfalls die Charakteristika der Maschine, der Sensoren und die Umgebungseinflüsse berücksichtigen. Um die Komplexität der Untersuchung zu reduzieren werden die Prozessgrößen zunächst mit einer Kraftmessplattform und externen Stromsensoren erfasst.

Anschließend werden aus den, mit den synchronisierten und mit der Durchdringungsrechnung „veredelten“, Daten Signalcharakteristika – sogenannte „Features“ – extrahiert. Diese dienen als Eingang für Algorithmen des maschinellen Lernens. Diese Algorithmen „erlernen“ Korrelationen durch iteratives Anpassen von Gewichten an Beispieldaten. Das Training erfolgt nach einer gewissenhaften Parametrierung automatisch und ist durch neue Beispieldaten einfach übertragbar. So können individualisierte Modelle für Maschinen und Werkzeug automatisch erstellt werden. Dies führt zu einer hohen Relevanz für die industrielle Anwendung, insbesondere auch für KMUs, die keine spezielle Datenabteilung haben.

Die hohe Robustheit und die Möglichkeit auch aus wenigen Daten zu lernen [4,5] prädestiniert die Support Vector Maschinen (SVMs) für den vorliegenden Anwendungsfall. Eine Klassifizierung des Verschleißzustandes eines Werkzeugs ist in der Regel ein schlecht konditioniertes Problem, da nur wenige Beispiele für verschlissene Werkzeuge vorliegen. Ein Satz Trainingsdaten weist daher einen massiven Überhang zu „guten“ bzw. „neuwertigen“ Werkzeugzuständen auf. SVMs lösen ein Optimierungsproblem – im Gegensatz zu Neuronalen Netzen (NN), die iterativ den

Durchschnitt approximieren [6]. Der Algorithmus maximiert den minimalen Abstand zwischen Gruppen und reduziert die Wahrscheinlichkeit einer falschen Klassifizierung [4].

Als Vergleich wird der Algorithmus Random Forest (RF) herangezogen, der sich ebenfalls durch eine hohe Robustheit auszeichnet. RF besteht aus einer Gruppe mehrerer individueller Entscheidungsbäumen, die jeweils nur einen zufälligen Teil der Features (das Signal beschreibende Charakteristika oder Informationen) benutzen. Die abschließende Bewertung ist die Mehrheitsentscheidung aller Entscheidungsbäume. Dadurch, dass jeweils nur ein Teil der Features verwendet wird, ist dieser Algorithmus sehr robust, insbesondere auch gegenüber „Overfitting“, einem Phänomen, das am besten mit Auswendiglernen der Trainingsbeispiele beschrieben wird.

Beide Algorithmen (SVM und RF) zeichnen sich dadurch aus, dass sie ein hohes Maß an Robustheit aufweisen und relativ wenig Beispiele benötigen, dies jedoch durch andere Prinzipien erreichen.

Um die industrielle Relevanz zu steigern und die Generalisierungsfähigkeit zu demonstrieren, wurden die Algorithmen an geraden Schnitten trainiert, Abbildung 6 und 7, und auf einer idealisierten Impellergeometrie validiert, Abbildung 6 (Material: X5CrNi-18-10, Werkzeug: Vollhartmetall, Durchmesser D = 10 mm Anzahl Schneiden z = 2, Drallwinkel β = 45°, Vorschub f_z = 0,1 mm). In regelmäßigen Abständen wurde die 2D Impellergeometrie gefertigt. Insgesamt wurden so etwa 88 m Standweg pro Werkzeug erreicht. Das Vorgehen wird auf ein Fünfachs-Bearbeitungszentrum vom Typ VARIAXIS i600 der Firma Mazak übertragen und verdeutlich so die Allgemeingültigkeit.

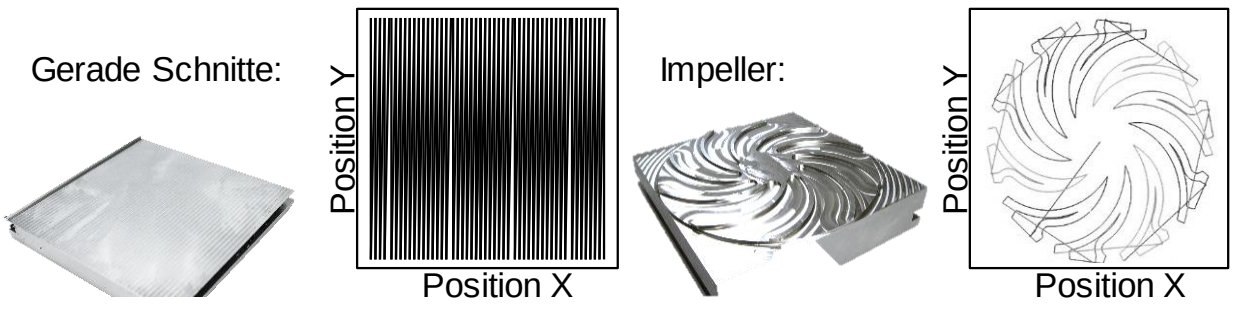


Abbildung 6: Überblick der zwei Bauteilgeometrien

Zur Datenvorbereitung wurden die Signale in das Koordinatensystem der Schneide(n) transformiert – so konnte das Wirken auf das Werkzeug bestimmt werden. Dazu ist der

exakte Drehwinkel des Werkzeugs und, über die Position des Werkzeugs im Bauteil, die Umschlingung des Werkzeugs bzw. der Schneide nötig.

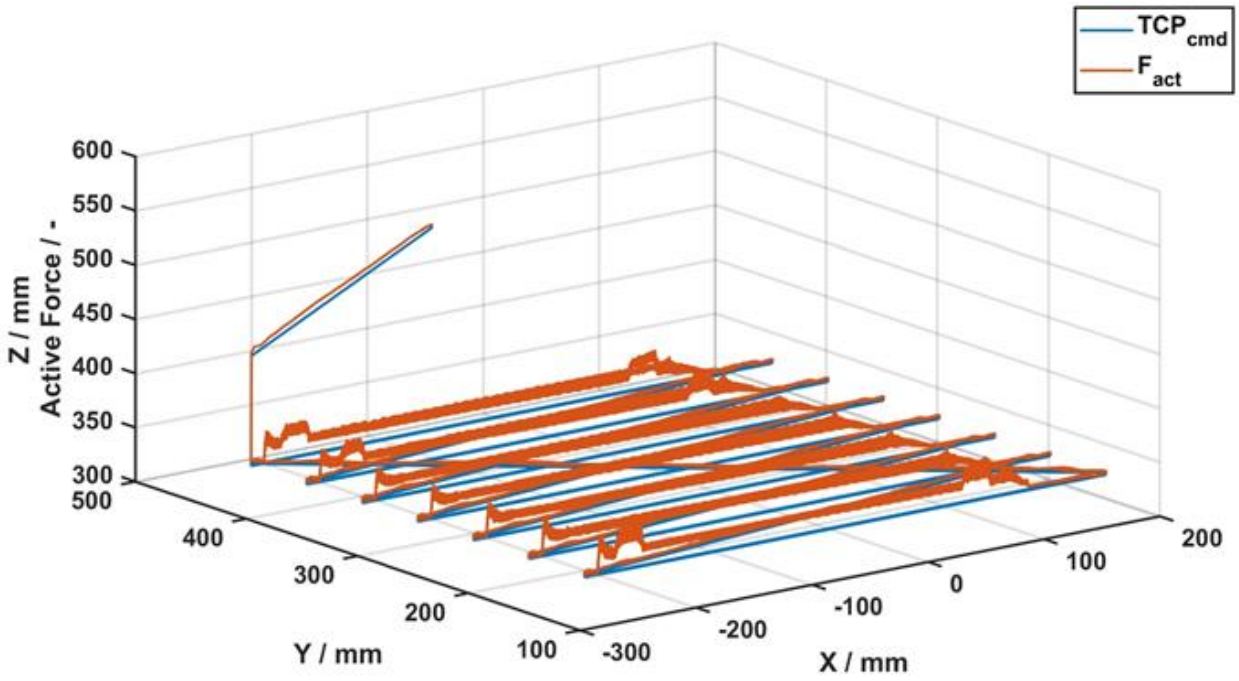


Abbildung 7: Kraftmessung beim Planfräsen

Anschließend werden insbesondere die Ströme und Kräfte betrachtet, welche die für die Bewertung der Werkzeugbelastung relevanten Daten darstellen. Als Features werden der Mittelwert, das Maximum und die Standardabweichung über fünf Werkzeugumdrehungen aus den Signalen in tangentialer und radialer Richtung zu Schneide bestimmt. Zur Bewertung der Algorithmen werden die Daten in drei Gruppen geteilt: zum Training, zum Testen und zur Validierung. Das Training und das Testen erfolgen an den geraden Schnitten und die Validierung an den Freiformflächen des Impellers. Die Ergebnisse zur Klassifikation des Standzeitendes werden als Konfusionsmatrizen dargestellt. Diese geben die geschätzte Klasse (Superskript ^) über der tatsächlichen Klasse (kein Superskript) an. Tabelle 2 zeigt die Ergebnisse für die Testdaten, Tabelle 3 für die Validierungsdaten. Klasse A entspricht einem neuwertigen Werkzeug, also vor dem Standzeitende vom Werkzeug, Klasse B bezeichnet ein Werkzeug mit erreichtem Standzeitende. Neben den zwei untersuchten Algorithmen SVM und RF, werden die Features hinsichtlich ihres Einflusses bewertet. Dazu werden die Signale getrennt nach

Kräften und Strömen der Antriebsachsen und nach internen Signalen (Geschwindigkeit, Beschleunigung, Drehmoment).

Tabelle 2: Ergebnisse der Werkzeugklassifizierung bei geraden Schnitten (Testdaten). Klasse A: Werkzeug vor Standzeitende, Klasse B: Werkzeug am Standzeitende

	Ohne Kräfte und Ströme			Nur Kräfte und Ströme			Alle Signale		
		A	*B*		*A*	*B*		*A*	*B*
SVM	$\hat{A}$	100 %	100 %	$\hat{A}$	99,8 %	2,7 %	$\hat{A}$	99,9 %	1,3 %
	$\hat{B}$	0 %	0 %	$\hat{B}$	0,2 %	97,3 %	$\hat{B}$	0,07 %	98,7 %
		A	*B*		*A*	*B*		*A*	*B*
RF	$\hat{A}$	98 %	21 %	$\hat{A}$	99,9 %	2,5 %	$\hat{A}$	99,9 %	1,2 %
	$\hat{B}$	2 %	79 %	$\hat{B}$	0,1 %	97,5 %	$\hat{B}$	0,03 %	98,8 %

Tabelle 3: Ergebnisse der Werkzeugklassifizierung bei Freiformgeometrien (Validierungsdaten). Klasse A: Werkzeug vor Standzeitende, Klasse B: Werkzeug am Standzeitende

	Ohne Kräfte und Ströme			Nur Kräfte und Ströme			Alle Signale		
		A	*B*		*A*	*B*		*A*	*B*
SVM	$\hat{A}$	100 %	100 %	$\hat{A}$	98 %	39 %	$\hat{A}$	100 %	42 %
	$\hat{B}$	0 %	0 %	$\hat{B}$	2 %	61 %	$\hat{B}$	0 %	58 %
		A	*B*		*A*	*B*		*A*	*B*
RF	$\hat{A}$	98,2 %	99 %	$\hat{A}$	87 %	69 %	$\hat{A}$	99 %	99 %
	$\hat{B}$	1,8 %	1 %	$\hat{B}$	13 %	31 %	$\hat{B}$	1 %	1 %

Es ist deutlich zu sehen, dass

- Die Testdaten von beiden Algorithmen und über fast alle Signalgruppen sehr zuverlässig klassifiziert werden.
- SVMs eine höhere Robustheit hinsichtlich der Validierungsdaten aufweisen als RF.

- Eine gute Signalqualität (Kräfte und Ströme) von essentieller Bedeutung ist. Daher ist eine veredelte Kraftschätzung zwingen erforderlich, um eine hohe Klassifikationsgüte zu erreichen.

Dass die größere Signalgruppe (alle Signale) zu einer schlechteren Genauigkeit führt, ist nur auf den ersten Blick verwunderlich. Die Dimension, in der die Algorithmen nach einer Entscheidung suchen ist erheblich größer, ohne dass deutlich mehr Information durch die internen Achs- und Spindeldaten hinzukommen. Das Problem ist in der Datenanalyse bekannt als „Fluch der hohen Dimensionen“ (Englisch: curse of dimensionality). Es unterstreicht die Notwendigkeit einer Veredelung der internen Daten vor der automatischen Klassifizierung. Die Ergebnisse wurden auf der industrienahen Konferenz „Hochgeschwindigkeitsfräsen HPC2018“ im Detail vorgestellt und diskutiert [7].

Arbeitspaket 3 wurde im Jahr 2018 erfolgreich abgeschlossen.

Arbeitspaket 4 – Maschinen-, werkstück- und auftragsübergreifende Auswertungen

Zielsetzung

Ausgehend von einer Station entlang der CAD-CAM-NC-Verfahrenskette besteht das Ziel von Arbeitspaket 4 in der Erstellung von Verfahren zur zuverlässigen Prognose der Ergebnisse nachfolgender Stationen. Diese sollen dann – aufbereitet – zur Unterstützung der Mitarbeiter der aktuellen Station bereitgestellt werden. Die Prognosen finden durch Auswertung von Lebenszyklen bereits eingesetzter Werkzeuge statt. Nach aktueller Einschätzung umfassen diese Prognosen zumindest:

- CAM- Planung: Vorschlag für geeignete Werkzeugen, Technologieparameter; Prognose erreichbarer Qualitätsklassen bei aktueller Auswahl;
- Disposition: Werkzeugbedarf für einen neuen Auftrag nach der CAM-Planung
- Maschine: Erreichbare Qualitätsklasse bei Verwendung eines individuellen Werkzeugs mit gegebenen Technologieparametern

Für die letztendlich vom PA festzulegenden hilfreichen Prognosen sind Ähnlichkeitsmaße zu ermitteln. Diese berücksichtigen die bis zur aktuellen Station bereits gesammelten Informationen des Fertigungsauftrags und bauen auf dem in Arbeitspaket 2 definierten Datenmodell auf. Aus den bereits existierenden Informationen werden dazu Indikatoren festgelegt, auf deren Basis sich die Ähnlichkeit verschiedener Aufträge, aber auch Werkzeughistorien ermitteln lässt. Auf Basis der Maße werden anschließend Suchalgorithmen erarbeitet und demonstratorisch verifiziert, die in einer Vielzahl von Aufträgen und Lebenszyklen effizient gleichartige Fälle auswählen soll. Durch anschließende statistische Auswertungen der gefundenen Auswahlmenge unter Berücksichtigung detaillierterer Suchkriterien wird abschließend die Prognose bestimmt und bereitgestellt. So sollen zum Beispiel – neben den bereits genannten Prognosen – bei Vorgabe von individuellem Werkzeug (mit Historie) und einer vorgegebenen Qualitätsklasse geeignete Technologieparameter ermittelt werden können.

Personaleinsatz

Forschungsstelle 1 (FVP): *2 Personenmonat (PM)*

Forschungsstelle 2 (WZL-TF): *4 Personenmonate (PM)*

Forschungsstelle 3 (WZL-WM): *11 Personenmonate (PM)*

Durchgeführte Arbeiten

Ausgehend von einer Station in der CAD-CAM-NC-Kette wurde innerhalb von Arbeitspaket 4 die Erstellung von Verfahren zur zuverlässigen Prognose der Ergebnisse nachfolgender Stationen umgesetzt. Diese werden zur Unterstützung der Mitarbeiter an der aktuellen Station bereitgestellt. Die Prognosen beinhalten:

- CAM-Planung: Vorschlag für geeignete Werkzeuge, Technologieparameter; Prognose erreichbarer Qualitätsklassen bei aktueller Auswahl
- Maschine: Erreichbare Qualitätsklasse bei Verwendung eines individuellen Werkzeugs mit gegebenen Technologieparametern

Die an den einzelnen Stationen ermittelten Informationen nutzen das Datenmodell und die Infrastruktur aus Arbeitspaket 2. Dazu wurden die einzelnen Stationen zu einer geschlossenen Informationskette zusammengefügt und die an den gewonnenen Informationen zur Prognose des aktuellen Qualitäts- und Bearbeitungsergebnis genutzt. Für die Werkzeugzustandsüberwachung und zur Ermittlung des aktuellen Bearbeitungsergebnisses sind folgende Tätigkeiten und Datenquellen an den einzelnen Stationen entwickelt und implementiert worden:

1. Inbetriebnahme eines Big-Data-Clients zum Aufzeichnen von maschineninternen Daten
2. Kraftmodell auf Basis von aufgezeichneten steuerungsinternen Daten zur Prognose der statischen Prozesskraft mit Hilfe von künstlichen neuronalen Netzen
3. Einbindung von Maschinenbedienern zur Erfassung von qualitätsrelevanten Informationen
4. Schnittstellen zur virtuellen Bauteilvermessung anhand von steuerungsinternen Daten
5. Werkzeugverschleißprädiktion zur Ermittlung des aktuellen Werkzeugverschleißes während der Fertigung

Erzielte Ergebnisse

Zur Vorhersage des Werkzeugverschleißes müssen Informationen über die aktuelle Prozesskraft vorliegen. Dazu wurde ein Kraftmodell entwickelt und implementiert, welches auf Basis steuerungsinterner Ist-Daten sowie eines Werkzeugeingriffsmodells über ein künstliches neuronales Netz die aktuelle statische Kraft in den 3-Koordinatenrichtungen berechnen kann.

Die bisherige prozessparallele Ermittlung von Prozesskräften bei Fräsanwendungen erfolgt hauptsächlich auf zwei Wege: Sensorbasiert oder auf Basis maschineninterner Daten aus der NC-Steuerung. Bei den sensorbasierten Ansätzen zur Abschätzung der Prozesskraft handelt es sich um externe zusätzliche Sensorik, die an verschiedenen Stellen in und an der Werkzeugmaschine installiert wird [8]. Ein Beispiel hierfür ist die Kraftmessplattform, die meist unterhalb des Werkstücks montiert wird und so die Kräfte misst, die das Werkzeug auf das Werkstück überträgt. Mit Hilfe von Dehnungsmessstreifen (DMS) [9] oder Piezosensoren [10] kann die Belastung in ein messbares elektrisches Signal umgewandelt werden. Ebenso existieren in die Spindel oder in den Werkzeughalter integrierte Lösungen, die mit Hilfe von Dehnungsmessstreifen (DMS), kapazitiven oder piezoelektrischen Sensoren eine Kraftschätzung auf Werkzeugseite ermöglichen. Das Messprinzip von Dehnungsmessstreifen liegt in der messbaren Widerstandsänderung, die durch die Verformung eines in einem Verformungskörper integrierten Widerstandsdrahtes hervorgerufen wird. Dazu wird der DMS an der Maschinenstruktur befestigt. Um die Verformungen besser messen zu können, wird die Steifigkeit des Gesamtbearbeitungssystems reduziert, wodurch die Bearbeitungsgenauigkeit und Dynamik negativ beeinträchtigt werden und schlechtere Bearbeitungsergebnisse zu erwarten sind. Piezosensoren liefern im Gegensatz dazu einen besseren Kompromiss zwischen Empfindlichkeit und Steifigkeit [8].

Als Alternative zu den externen Sensoren können maschineninterne Daten aus der NC-Steuerung (den sog. NC-Traces) zur Kraftabschätzung genutzt werden. Es werden keine weiteren zusätzlichen Sensoren benötigt. Parallel zur Prozesslaufzeit werden Daten für die Positionen der Achsen, die Beschleunigung, den Ruck, den Motorstrom der Achsen und der Spindel usw. direkt aus dem NC-Kern gelesen. Der NC-Kern sorgt einerseits für die Interpolation zwischen den einzelnen NC-Sätzen und stellt Sollwerte für die Position, die Geschwindigkeit, die Beschleunigung und den Ruck bereit. Ebenfalls nutzt der NC-Kern die über die maschineninternen Messsysteme generierten Istwerte für die Regelung der Maschinenachsen, sodass die Sollwerte aus dem Interpolator möglichst erreicht werden. Über herstellerspezifische Schnittstellen können die Daten aus der Kommunikation vom NC-Kern mit den Sensoren und Aktoren der Maschine ausgelesen und mit aufgezeichnet werden. Um die gewünschten physikalischen Ursachen aus maschineninternen Daten (z. B. Motorströmen) zu extrahieren, müssen diese

vorverarbeitet werden, da sie mehrere Effekte vereinen [11]. Eine direkte Ermittlung der Prozesskraft aus den Motorströmen der jeweiligen Achse kann nicht erfolgen, da diese Reibungs-, Trägheits- und Beschleunigungseffekte enthalten. Diese Effekte müssen im Vorfeld durch physikalische Modelle ermittelt bzw. extrahiert werden, sodass sich die identifizierten Effektanteile von den gemessenen NC-Signalen trennen lassen [12]. So bleibt der für die Aufbringung der Prozesskraft verantwortliche Anteil in den Motorsignalen übrig. Nachteil dieser Modelle ist, dass sie für verschiedene Kombinationen von Werkzeugmaschinen, Werkstücken und Werkzeugen immer wieder neu parametriert werden müssen, da sie nur für die spezifische Maschinenanwendung gelten. Die erforderliche Skalierbarkeit auf verschiedene Prozesstypen, Maschinentypen und Anwendungen erfordert daher unterschiedliche Parameteridentifikationsverfahren, neue Modelle und Ansätze für die Prozesskraftschätzung.

Implizite Regressionsansätze wie die Verwendung von künstlichen neuronalen Netzen liefern eine verallgemeinerte, aber sehr anpassungsfähige Betrachtung von Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen. Die Vorhersagegenauigkeit hängt jedoch auch hier von der Wahl der Eingangsgrößen ab. Die Übertragung auf eine neue Maschinenanwendung hängt von der Art des Trainings und der Stabilität sowie Größe der Datensätze ab, die für das „Fitting“ bzw. Training des Netzes genutzt werden. Das neuronale Netz liefert nur dann korrekte Aussagen, solange es Ähnlichkeiten zwischen dem aktuellen Bearbeitungsfall und dem bereits im Training gesehenen Referenzfall erkennt. Bei ähnlichen Fällen wird zumeist interpoliert, neue Fälle, die durch das künstliche neuronale Netz bislang noch nicht gesehen wurden, werden extrapoliert, wodurch die Aussagefähigkeit deutlich abnimmt [13].

Zur Übersicht ist in Abbildung 8 der Aufbau des hybriden Prozesskraftmodells dargestellt. Im ersten Schritt werden während des Prozesses Live-Daten aus der Maschine mit einer Taktrate von 500 Hz aufgezeichnet.

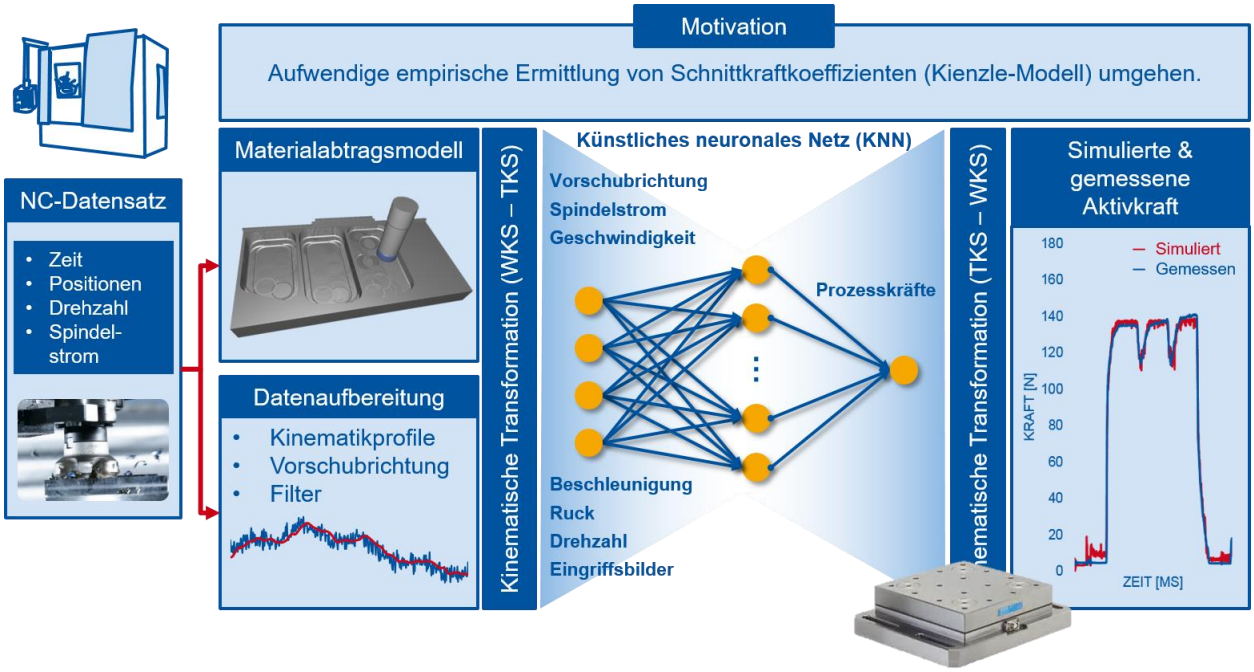


Abbildung 8: Aufbau des hybriden Prozesskraftmodells

Über herstellerspezifische Schnittstellen (z. B. Operate für Sinumerik 840D sl - Steuerungen) kann auf die intern mit der Steuerung kommunizierenden Messsysteme zugegriffen werden, wodurch sich die einzelnen Werte auslesen und aufzeichnen lassen. Für das hybride Prozesskraftmodell beinhaltet der NC-Datenstream die Encoder-Positionen der Vorschubachsen, die Spindeldrehzahl und die momentenbildenden Ströme der Hauptspindel. Direkt im Anschluss und ebenfalls parallel zum Prozess erfolgt die Eingriffssimulation über die Durchdringungsrechnung auf Basis der Positions- und Drehzahldaten sowie die Datenvorverarbeitung. Die Durchdringungsrechnung erfolgt über ein sog. Dexel-Modell. Mit Hilfe eines CAD-Modells des Schneidwerkzeugs und einer Darstellung des Werkzeugs anhand von Dexeln können der aktuelle Materialabtrag und Materialabtragsbereich parallel berechnet werden. In jedem Simulationsschritt schneidet die Werkzeuggeometrie das dexelbasierte Werkstück und eliminiert geschnittene Dexel aus der Werkstückgeometrie, wodurch der Materialabtrag simuliert wird. Jeder im Eingriff befindliche Flächenpunkt am Werkzeug wird binär dem zugehörigen Pixel im Bild zugeordnet. Der binäre Wert gibt an, ob der zugehörige Flächenpunkt am Werkzeug im Eingriff ist oder nicht, wodurch die wie in Abbildung 9 zu sehenden Eingriffsbilder entstehen. Die Datenvorverarbeitung generiert aus den Positionsdaten die kinematischen Profile (Geschwindigkeit, Beschleunigung und Ruck),

die später ebenfalls als Einflussgröße neben den Eingriffsbedingungen in die Kraftberechnung eingehen.

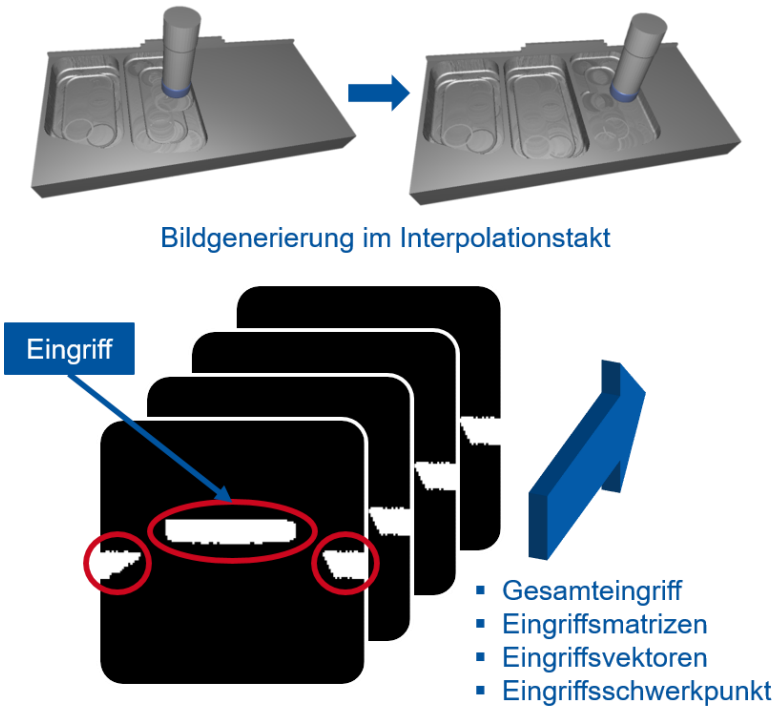


Abbildung 9: Generierung von Eingriffsbildern

Problematisch ist die Vergleichbarkeit der verschiedenen Eingriffssituationen in Abhängigkeit der Vorschubrichtung. Je nach Vorschubrichtung verändern sich die Eingriffsbilder der aktuellen Kontaktsituation in ihren Bereichen, während der Gesamteingriff unverändert bleibt. Eine ähnliche Prozesskraft ist zu erwarten. Da die Position bzw. der Eingriffsbereich für die Prozesskraftsimulation über das hybride Modell berücksichtigt werden, müssen verschiedene Vorschubrichtungen miteinander vergleichbar gemacht werden. Eine kinematische Transformation vom Werkstückkoordinatensystem (WKS mit X, Y, Z) in das Werkzeugkoordinatensystem (TKS mit U, V, W) sorgt für die Vergleichbarkeit. Das TKS wird bei der Transformation um die Z-Achse rotiert, sodass es stets in Vorschubrichtung gedreht ist.

Die Prozesskraftberechnung erfolgt innerhalb dieses neuen Koordinatensystems TKS, im Anschluss werden die Ergebnisse auf das Werkstückkoordinatensystem zurücktransformiert. Auf Basis der ausgewählten Größen zur Berechnung der Prozesskräfte über ein künstliches neuronales Netz, besteht das Modell als Feed-

Forward-Netz aus insgesamt 11 Inputgrößen, 3 Outputgrößen unter Verwendung einer Zwischenschicht mit 50 Neuronen.

Inputgrößen: Achsgeschwindigkeiten (v_u,v_v) Achsbeschleunigungen (a_u,a_v), Rücke (j_u,j_v), Spindelstrom (T_C), Drehzahl (S), Eingriffe (Materialabtragsrate & Materialabtragsschwerpunkt)

Outputgrößen: Prozesskräfte (F_u,F_v,$F_A \approx F_C$) mit F_A: Aktivkraft und F_C: Schnittkraft

Das künstliche neuronale Netz, das die Inputgrößen zur Berechnung der Prozesskräfte benutzt, wird im nächsten Schritt in der Trainingsphase parametriert und trainiert. Zu Validierungszwecken wird eine extern zugeschaltete Kraftmessplattform, die unterhalb des Werkstücks montiert wird, verwendet.

Auf Basis dieser Informationen wird für das hier implementierte künstliche neuronale Netz zur Vorhersage der Prozesskräfte der spezielle Fall für den Planschruppvorgang der Oberfläche an einem Aluminiumblock (EN AW-7075; Abmessungen: 150 mm x 300 mm x 100 mm) mit einem Eckfräser des Durchmessers 80 mm (4 Schneidzähne) trainiert. Als Trainingsdatensatz auf der Outputseite dient die Kraftmessplattform unterhalb des Aluminiumblocks. Mit einer Abtastrate von 10 kHz zeichnet diese Prozesskräfte in den 3 kartesischen Koordinaten (X, Y, Z) auf. Die Rohdaten der Kraftmessplattform werden im Anschluss gefiltert. Lediglich die statischen Kraftanteile werden für die spätere Kraftvorhersage herausgefiltert. Im Anschluss werden diese in einem ersten Schritt mit den maschineninternen Daten aus der Steuerung, die als Input in das Netz eingehen, auf Basis des Kreuzkorrelationsalgorithmus synchronisiert. Die Synchronisierung erfolgt zwischen der Aktivkraft ($F_A = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$) und dem momentenbildenden Spindelstrom (T_C). Die Lernmethode basiert auf dem sog. „Supervised Learning“, da bereits bekannte Relationen zwischen Input und Output vorliegen. Als Lernalgorithmus wird der Backpropagation-Algorithmus zur Anpassung der Gewichtungen der jeweiligen Verbindungen zwischen den Neuronen, den sog. Knoten, mit einer Lernrate von 0,01 genutzt. In der Zwischenschicht kommt als Übertragungsfunktion eines einzelnen Neurons die Sigmoid-Aktivierungsfunktion zum Einsatz, die Verbindungen mit einer großen Aktivität durchlässt, schwache Verbindungen im Gegensatz deaktiviert. Für die Outputschicht wird hingegen eine lineare Übertragungsfunktion genutzt, die alle ankommenden Verbindungen aus der Zwischenschicht mit ihren Gewichtungen zusammenknüpft, addiert und somit durchlässt.

Das parametrierte und angelernte Netz wird zur Überprüfung der Richtigkeit in einem ersten Schritt für einen ähnlichen Anwendungsfall verwendet. Dabei wird der Planschruppvorgang für die darauffolgenden Schichten am Aluminiumblock wiederholt. Parallel werden die NC-Daten aufgezeichnet und gehen in das künstliche neuronale Netz mit ein. Die Kraftmessplattform dient jetzt ausschließlich zur Verifizierung der Ergebnisse.

Der Trainingsbereich ist im schwarz markierten Fenster dargestellt, Abbildung 10 und Abbildung 11. Zum Vergleich läuft neben der hybriden Prozesskraftsimulation die konventionelle einfache Simulation ohne die Berücksichtigung der Eingriffsverhältnisse des Werkzeugs am Werkstück. Die Abbildung zeigt eine deutliche Verbesserung der Kraftsimulation unter Berücksichtigung der Materialabtragssimulation.

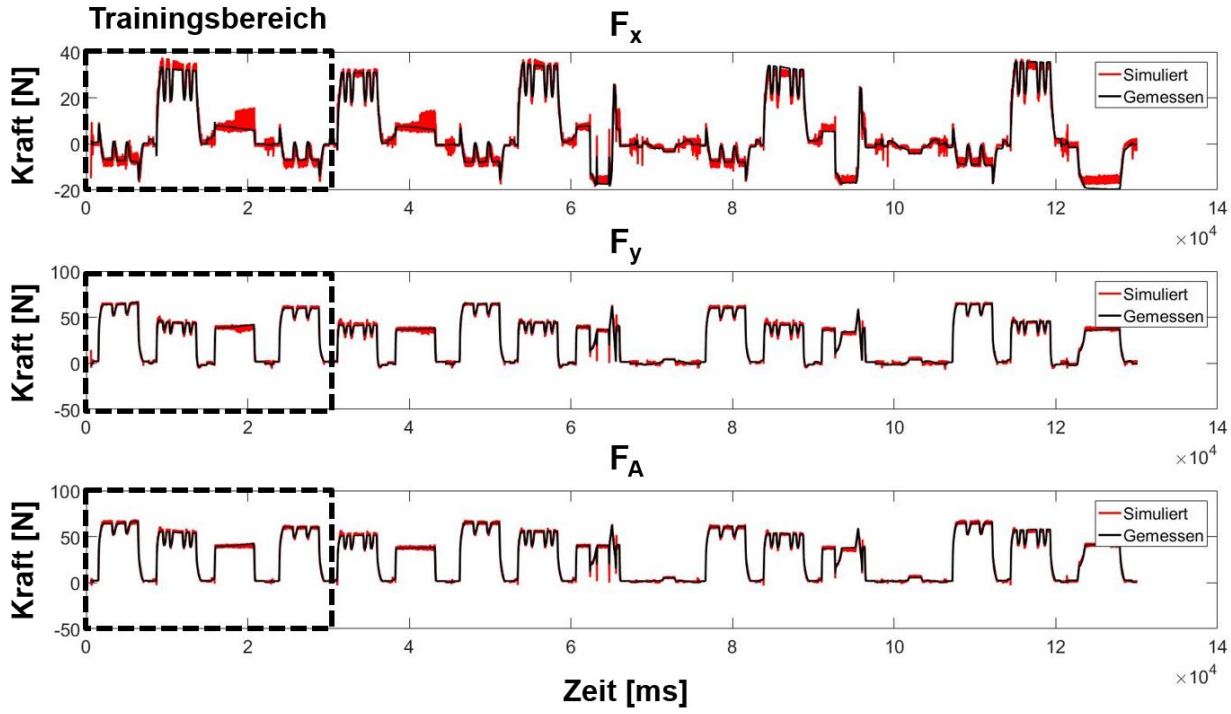


Abbildung 10: Ergebnisse der Kraftsimulation mit Werkzeugeingriffssimulation

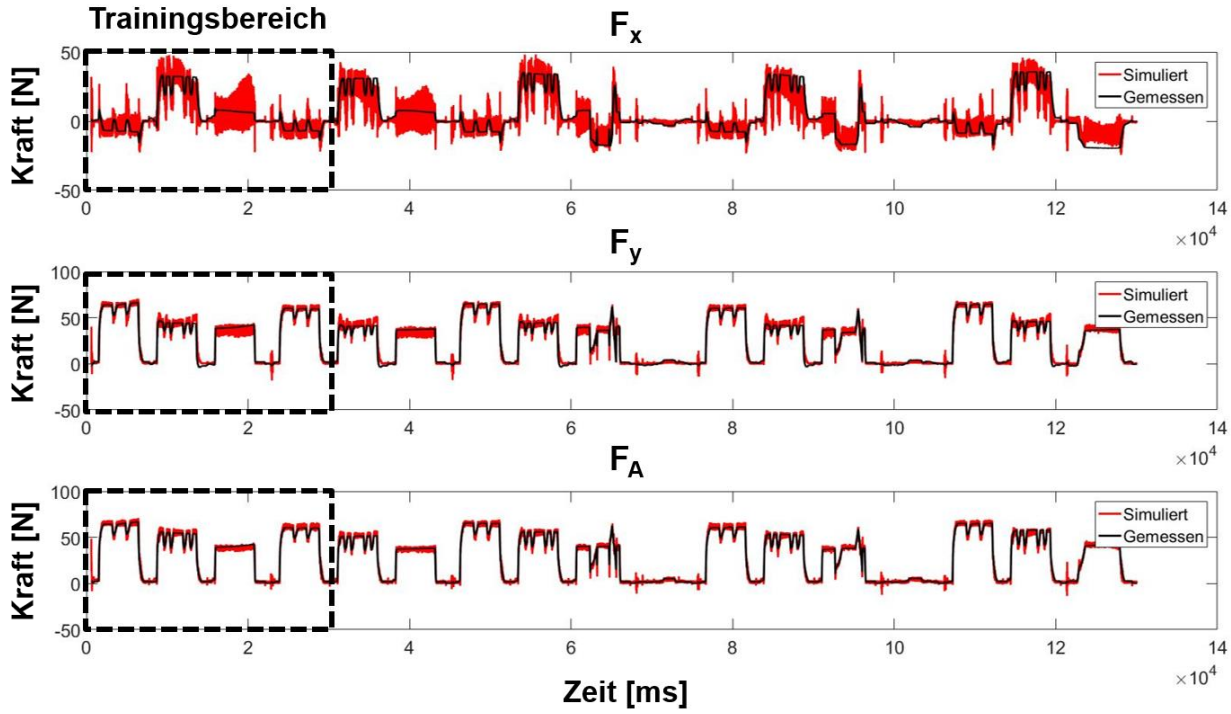


Abbildung 11: Ergebnisse der Kraftsimulation ohne Werkzeugeingriffssimulation

Ziel der Validierungsphase ist es, den Einsatzbereich des Prozesskraftmodells zu evaluieren und zu testen. Als Ergebnis soll dabei eine Aussage über die Skalierbarkeit des Modells in Bezug auf neue Anwendungsfälle gewonnen werden. Die Materialkombination aus Werkzeug und Werkstück wurde in der Trainingsphase einmalig festgelegt und nicht verändert. Daher ist es nicht sinnvoll, in diesem Validierungsansatz weitere Materialkombinationen zu testen, die vorher im Training nicht berücksichtigt worden sind. Zur Validierung wird ein neuer Bearbeitungsbereich am Werkstück definiert, Abbildung 12, der zwar eine gewisse Ähnlichkeit zu den Bearbeitungen aus dem Training aufweist, daher im mehrdimensionalen Arbeitsraum zu finden ist, allerdings in sich eine Eingriffssituation darstellt, die dem neuronalen Netz bisher unbekannt ist.

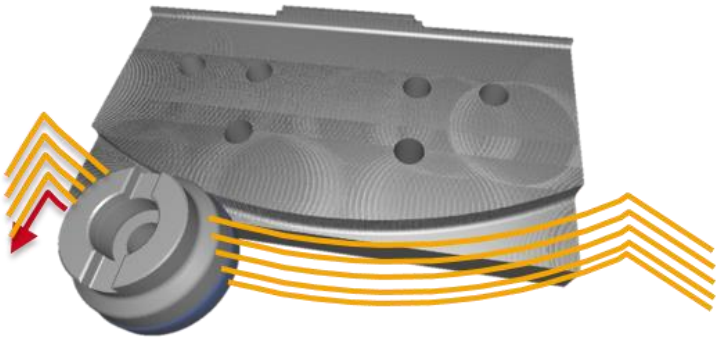


Abbildung 12: Bearbeitungsbereich zur Validierung

Im Detail wird das künstliche neuronale Netz für das genutzte Werkzeug beim Planfräsvorgang in mehreren Schichten trainiert. Dem Netz werden verschiedene Schnitttiefen, Gleich- und Gegenlaufbearbeitungen und verschiedene Eingriffssituationen antrainiert, sodass ähnliche Bearbeitungssituationen in der Validierungsphase vom Netz erkannt und entsprechend korrekt simuliert werden. Größen wie die Drehzahl und der Bahnvorschub werden in der Trainingsphase konstant gehalten, da keine Änderungen dieser Größen im Bearbeitungsprozess stattfinden. Insgesamt wird dadurch eine entsprechend hohe Aussagequalität erwartet und die Interpolations- und Extrapolationsfähigkeit bzw. -qualität im Arbeitsraum getestet. Die Ergebnisse werden in Abbildung 13 und Abbildung 14 gezeigt.

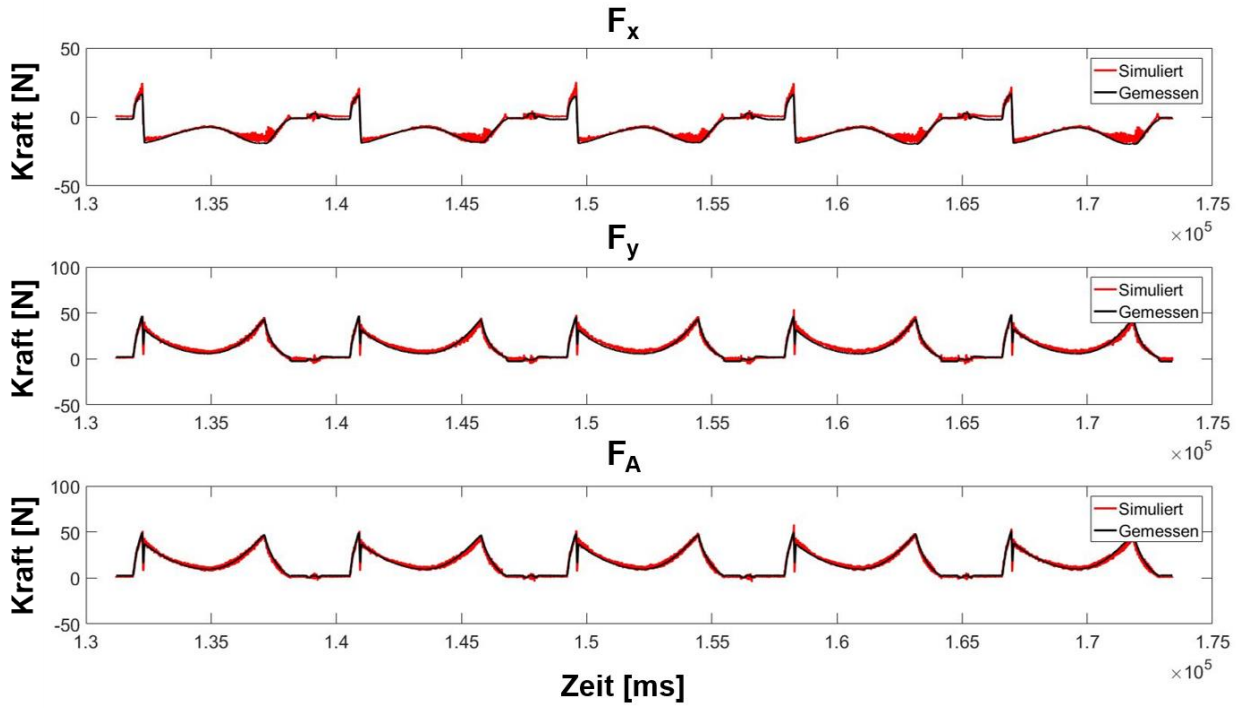


Abbildung 13: Ergebnisse der Validierungsphase mit Werkzeugeingriffssimulation

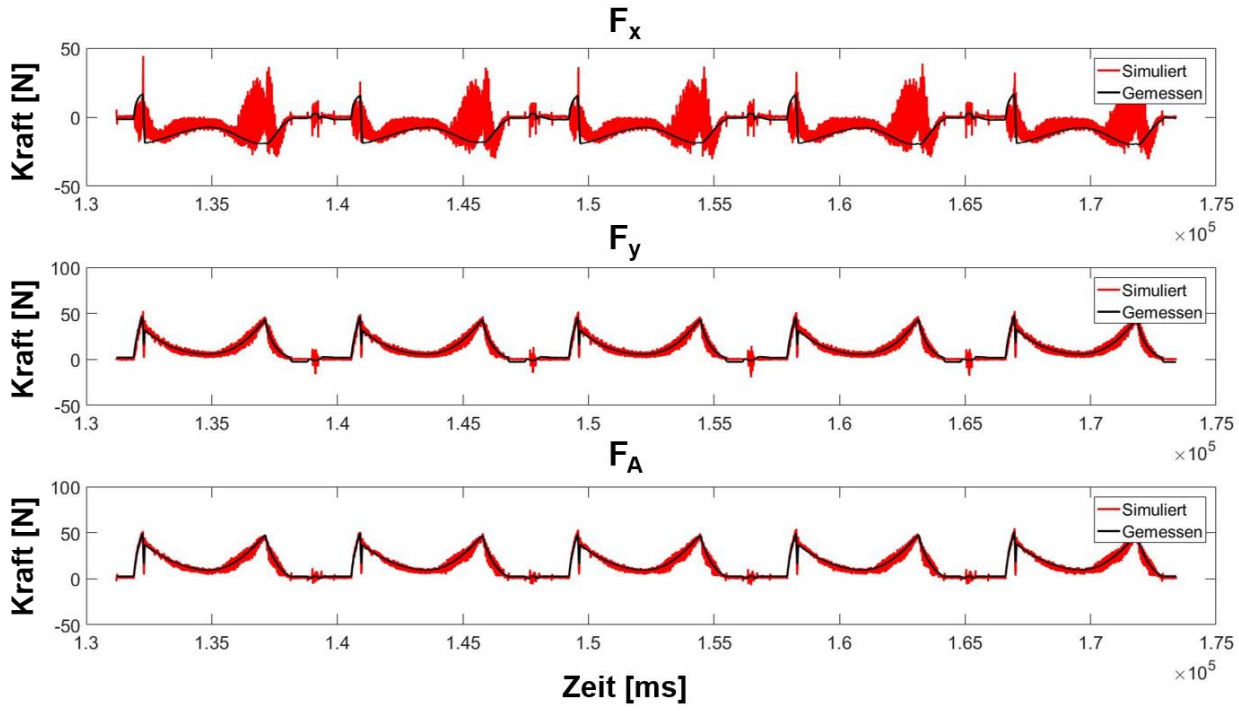


Abbildung 14: Ergebnisse der Validierungsphase ohne Werkzeugeingriffssimulation

Die Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung mit den real gemessenen Kräften aufgrund der prozessparallel laufenden Werkzeugeingriffssimulation, die die Modellqualität deutlich erhöht.

Die Kraftvorhersage aus den maschineninternen Daten wird genutzt und den realen TCP-Pfad des Werkzeugs entlang der programmierten NC-Bahn zu simulieren. Im Vorfeld der virtuellen Abtragssimulation wird die jeweils betrachtete Maschine geometrisch und statisch vermessen. Aus der geometrischen Vermessung wird ein entsprechendes Geometriemodell parametriert, welches die Positions- und Lagefehler der Werkzeugmaschine beschreibt und diese als zusätzliche Fehlerabweichungen dem jeweiligen TCP-Pfad zuschreibt. Daneben simuliert das eingemessene statische Verhalten der Maschine die kraftbedingte Werkzeugverlagerung während des Materialeingriffs. Da das betrachtete Positionsmesssystem der Maschine oberhalb des betrachteten TCP liegt, wird die Werkzeugdurchbiegung und die damit einhergehende Pfadabweichung nicht über die maschineninternen Rohdaten erfasst, sondern über das entsprechende Modell simuliert.

Die anschließende virtuelle Bauteilvermessung wird genutzt um das Qualitätsergebnisses des gefertigten Bauteils direkt zu ermitteln. Der Werkzeugverschleiß fließt implizit durch die erhöhte modellierte Abdrängung aufgrund der erhöhten Kraft mit in das Qualitätsergebnis ein. Die statische Abdrängung wird über ein Steifigkeitsmodell des Werkzeugs und der Maschine in Kombination mit der statischen Kraft berechnet, Abbildung 15. Mit Hilfe des aktuellen Werkzeugverschleiß und des aktuellen Qualitätsberichts kann ein geeignetes Technologieparametersetup für ähnliche Bearbeitungen mit demselben Werkzeug gefunden werden. Dies geschieht perspektivisch über eine Ähnlichkeitsanalyse.

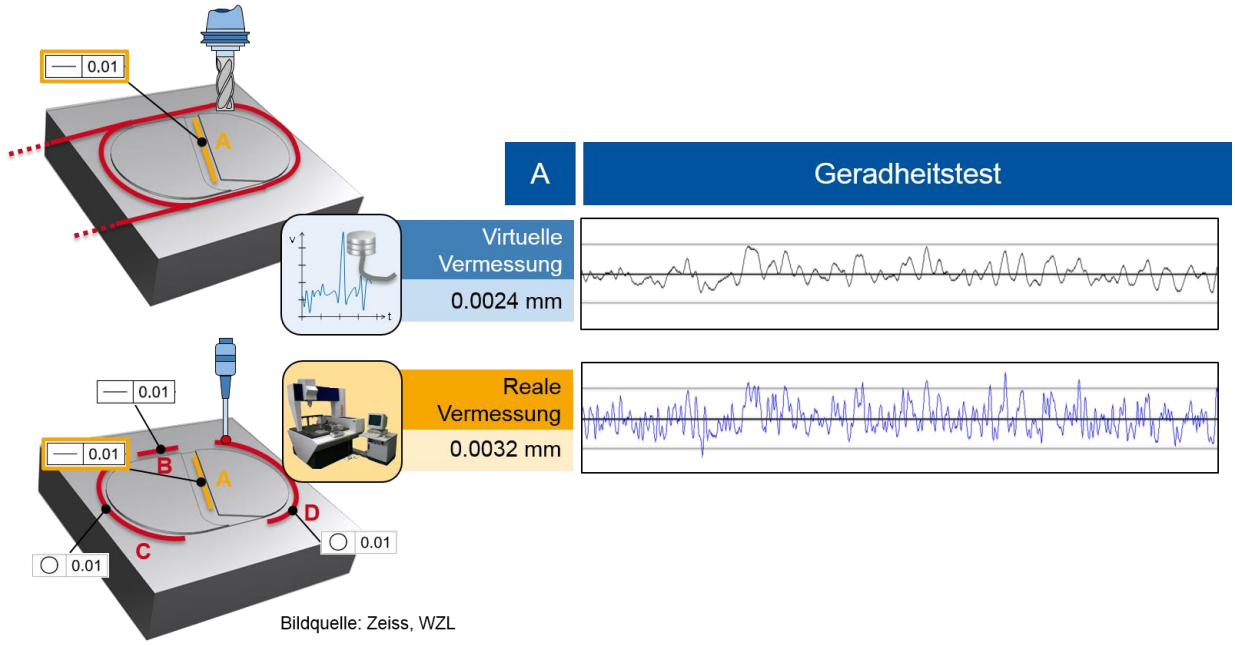


Abbildung 15: Vergleich zwischen virtueller und realer Vermessung

Die Werkzeugverschleißprädiktion zur Ermittlung des aktuellen Werkzeugverschleißes während der Fertigung nutzt den aktuellen Werkzeugeingriff über ein Scheibchenmodell, Abbildung 15, und berechnet anhand steuerungsinterner Daten die Kraft für ein Neuwerkzeug, Abbildung 14. Zum Vergleich wird die aktuell gemessene Kraft in einem ersten Versuch mit Hilfe einer Kraftmessplattform ermittelt. Durch die Gegenüberstellung können Effekte wie Trägheitseffekte durch Achsbeschleunigungen oder ein wechselnder Eingriff herausgefiltert werden, sodass lediglich der Kraftanstieg durch ein fortschreitendes Verschleißstadium detektiert wird. Eine Übersicht der Modellergebnisse aus Abbildung 16 zeigen die folgenden Abbildung 17 und 18. Dort ist der simulierte Motorstrom für ein Neuwerkzeug desselben Typs im Vergleich zum real gemessenen Motorstrom dargestellt.

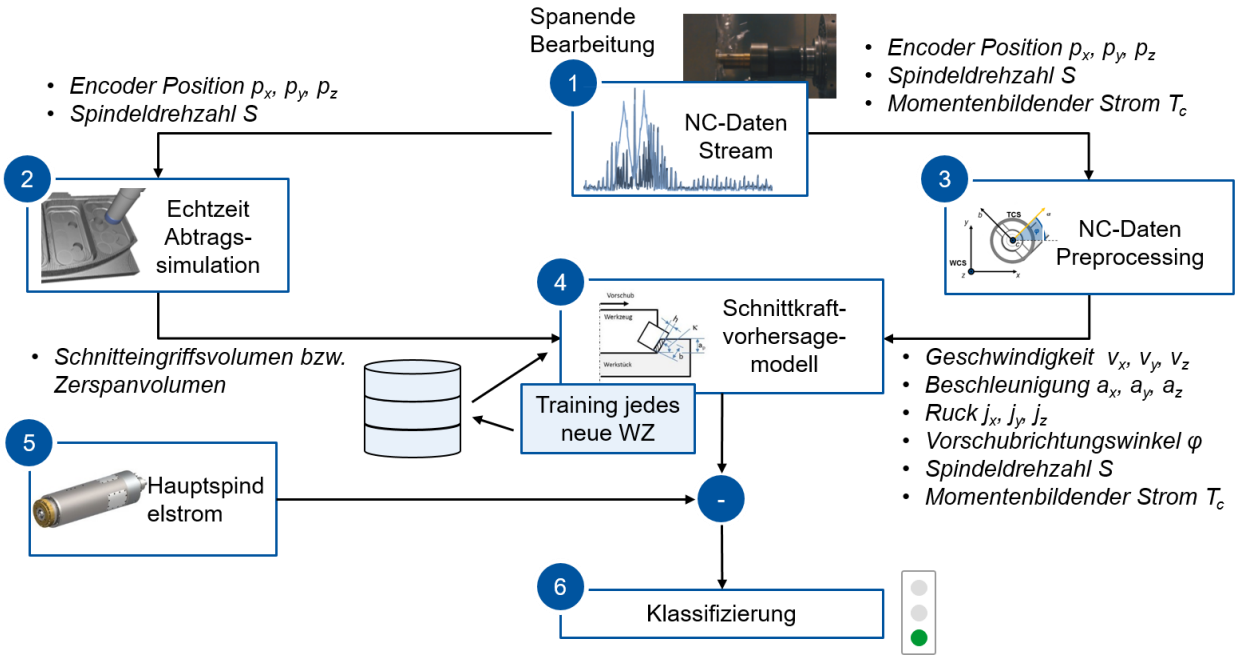


Abbildung 16: Vergleich zwischen virtueller und realer Vermessung

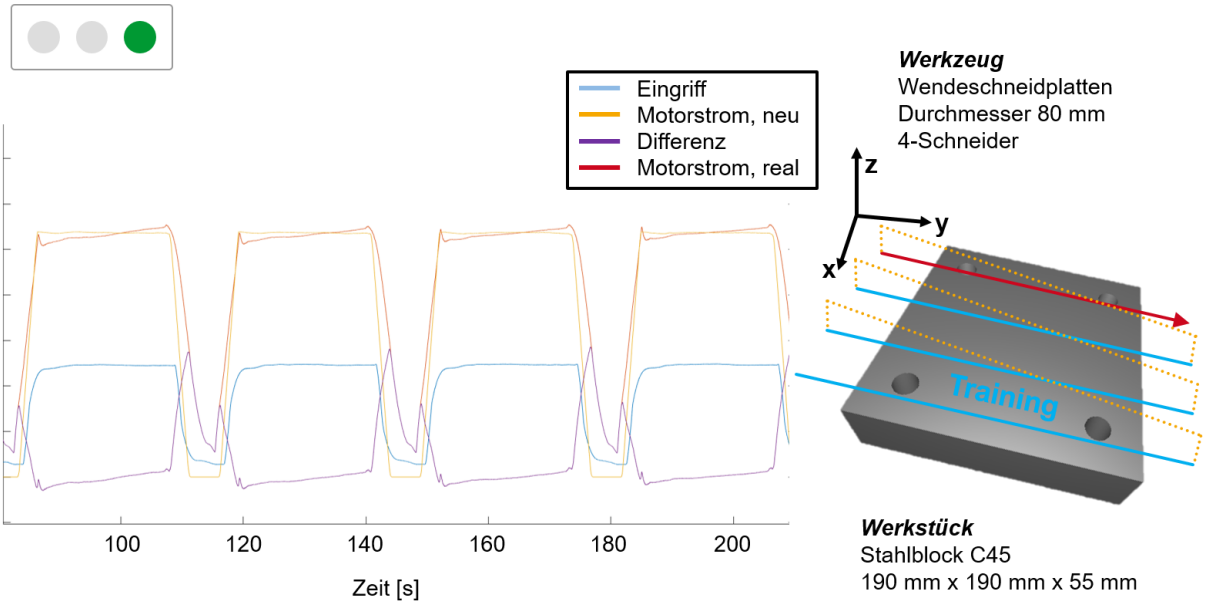


Abbildung 17: Ergebnisse der Werzeughistorienerkennung (Neuwerkzeug)

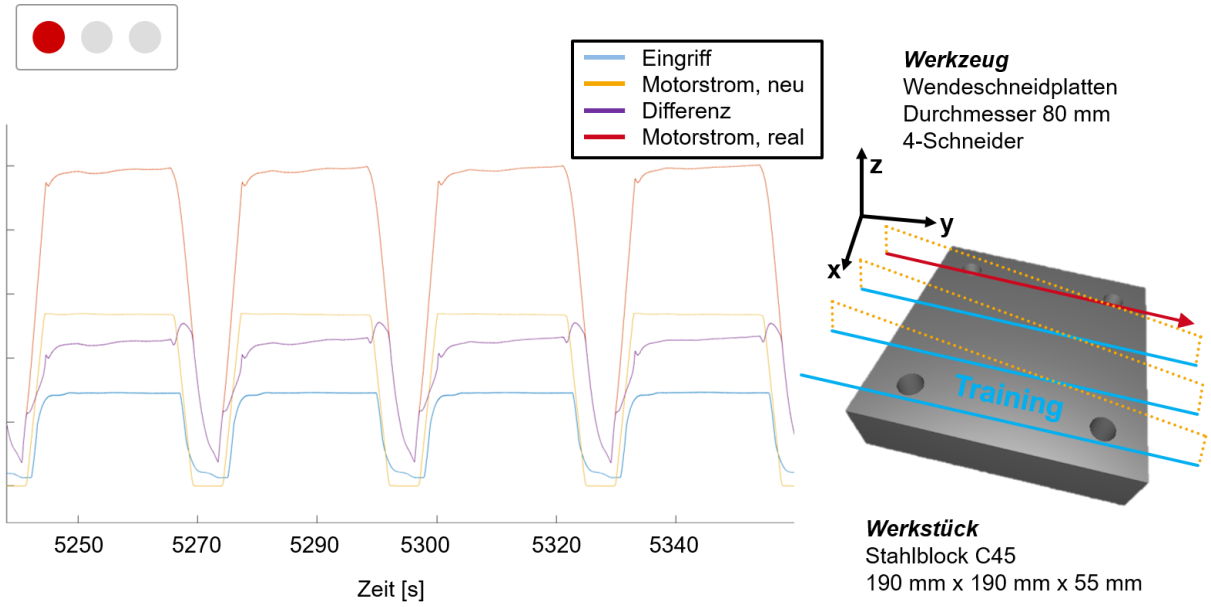


Abbildung 18: Ergebnisse der Werzeughistorienerkennung (verschlissenes Werkzeug)

Weiteres zum Verschleißmodell ist ausführlich im Arbeitspaket 3 erwähnt. Zusätzlich wurde die Lösung in den Softwaredemonstrator im CNC-Kompetenzzentrum (Abbildung 19). des WZL Integriert. Näheres dazu wird im Arbeitspaket 5 beschrieben.

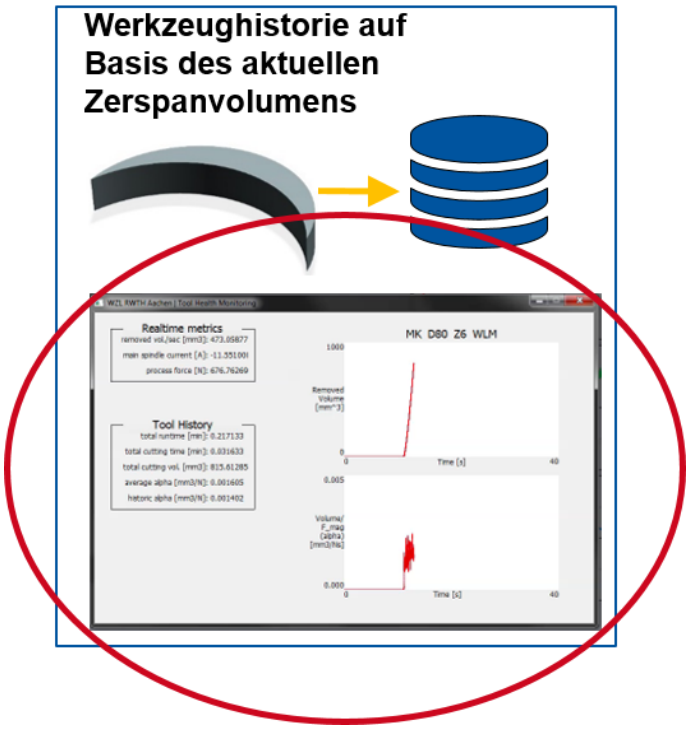


Abbildung 19: Integration ins Softwareframework im CNC-Kompetenzzentrum

Arbeitspaket 4 wurde im Jahr 2018 erfolgreich abgeschlossen.

Arbeitspaket 5 – Zusammenführen der Einzelkomponenten

Zielsetzung

Die in den Arbeitspunkten 3 und 4 entwickelten Modelle werden nun innerhalb eines Demonstrators integriert. Die aufbereiteten Ergebnisse müssen an den einzelnen Stationen geeignet bereitgestellt werden. Sie unterstützen den Mitarbeiter bspw. bei der Auswahl der Werkzeuge, der Wahl der Prozessparameter, bis hin zur Kostenkalkulation für einen Auftrag. Durch das Wissen über die aktuellen Verschleißklassen der (vorhandenen) Werkzeuge können die erreichbaren Toleranzen für einen Fertigungsprozess im Vorhinein abgeschätzt werden. Dabei kann auch der Verschleißzustand nach der Fertigung durch das Verschleißmodell (AP 3 und AP 4) prädiziert werden. So können die minimal erreichbaren Toleranzen mit einem bestimmten Werkzeug für einen definierten Fertigungsprozess abgeschätzt werden. Die Mitarbeiterunterstützung erfolgt über alle Stationen: Von der Angebotserstellung über die Disposition bis hin zur Parametereinstellung an der Fertigungsmaschine.

Personaleinsatz

Forschungsstelle 1 (FVP): *4 Personenmonat (PM)*

Forschungsstelle 2 (WZL-TF): *4 Personenmonate (PM)*

Forschungsstelle 3 (WZL-WM): *7 Personenmonate (PM)*

Durchgeführte Arbeiten

Als Standort des Demonstrators wurde das CNC-Kompetenzzentrum des WZL ausgewählt. Das CNC-Kompetenzzentrum ist ein Teil der hauseigenen Werkstatt mit dem Ziel, die Forschungsergebnisse aus dem Institut in einem industriellen Umfeld zu testen und somit eine mögliche Übertragbarkeit der Lösung in eine etwaige industrielle Anwendung zu gewährleisten. Dabei spezialisiert sich das CNC-Kompetenzzentrum in seiner Struktur besonders auf das typische Fertigungsspektrum von KMU.

In diesem Zusammenhang wurde die im CNC-Kompetenzzentrum im Aufbau befindliche durchgängige digitale Prozesskette (CAD-CAM-NC-Kette) genutzt, um die fertigungsrelevanten Information, insbesondere die Werkzeugauswahl und -verfolgung,

mit den Ergebnissen zur historienbasierten und auftragsübergreifenden Auswertung zu koppeln.

Sobald ein Fertigungsauftrag innerhalb des CNC-Kompetenzzentrums eingeht, wird die Grob- und im Anschluss die Feinplanung angestoßen, in der die notwendigen Fertigungsschritte grob- und feingeplant und die dafür benötigten Fertigungsmittel (Maschine, Werkzeuge, Messmittel, Spannmittel etc.) ausgewählt und auf Verfügbarkeit geprüft werden. Bezogen auf die Werkzeugauswahl werden die benötigten Werkzeuge festgelegt und auf die jeweilige Maschine gebucht, sodass hier eine eindeutige Rückverfolgbarkeit gewährleistet ist.

Innerhalb dieses Arbeitspakets ist im Rahmen des Demonstratoraufbaus die Möglichkeit geschaffen worden, die Information über die aktuelle Werkzeughistorie an das jeweilige Werkzeug anzuheften und datenbanktechnisch nachzuhalten.

Erzielte Ergebnisse

Das während des Prozesses genutzte Werkzeug ist datenbanktechnisch auf die jeweilige Maschine gebucht und liegt entsprechend dort ab. Wird innerhalb der Steuerung ein Werkzeug aufgerufen, wird es als aktives Werkzeug im Demonstrator hinterlegt. Zusätzlich bekommt der Demonstrator die zusätzlichen Informationen aus der Fertigungsplanungsdatenbank, z. B. den zugehörigen Auftrag und die genutzte Maschine. Während des Prozesses wird das Modell aus Arbeitspaket 4 zur Kumulierung der Werkzeuglasten genutzt und somit wird beim Werkzeugwechsel die aktuelle Lasthistorie kontextadaptiv gespeichert. Diese Information geht zurück in die Datenbank und wird an das entsprechende Werkzeug angehängt. Falls der Prozess ein erneutes Aufrufen des Werkzeugs verlangt, wird die zuletzt gespeicherte Information über den aktuellen Lastzustand des Werkzeugs erneut aufgerufen und die weiteren Lasten werden auf dieser Basis weiter aufkumuliert. Bei einem neuen Auftrag werden dem Fertigungsplaner jetzt alle zur Verfügung stehenden Werkzeuge mit ihrer Lasthistorie angezeigt. Zusätzlich hat er über eine Cloudanwendung die Möglichkeit, die virtuell und real gemessenen Qualitätsmerkmale eines einzelnen Bauteils in der Fertigungsübersicht im Kontext mit dem jeweilig genutzten Werkzeug inklusive Lasthistorie zu überprüfen, Abbildung 20 und 21. Für das jeweilig gefertigte Bauteil werden der zugehörige Auftrag, die genutzten Fertigungsmittel, die Maschine und die zugehörigen Qualitätsergebnisse angezeigt mit Bezug zu den geforderten Toleranzen.

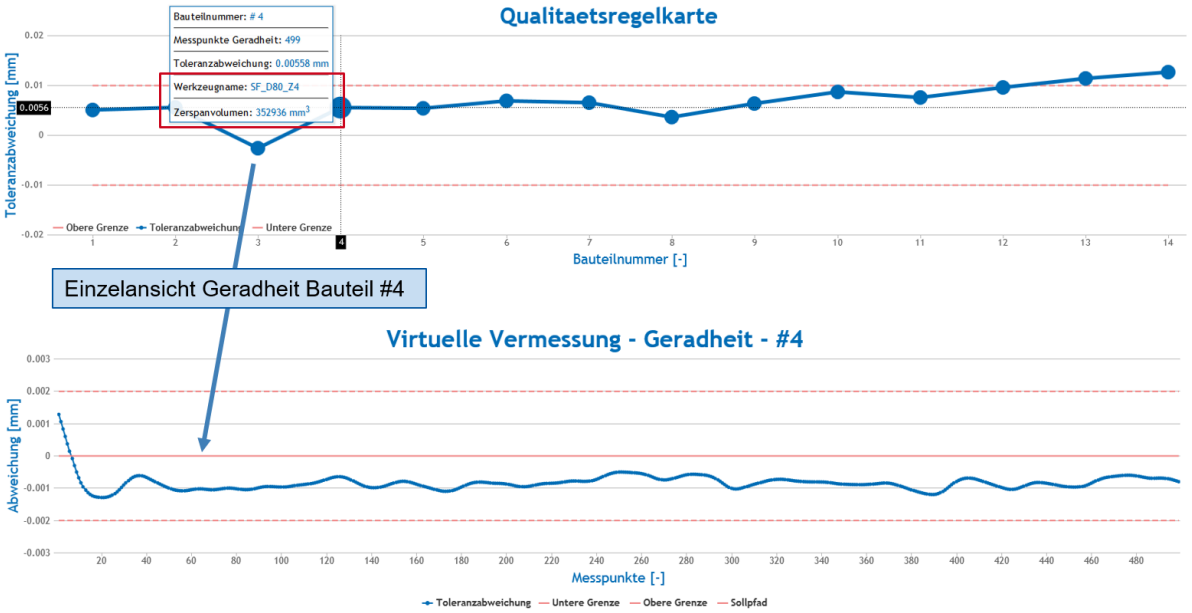


Abbildung 20: Rückverfolgung von Qualitäten mit dem entsprechenden Werkzeug

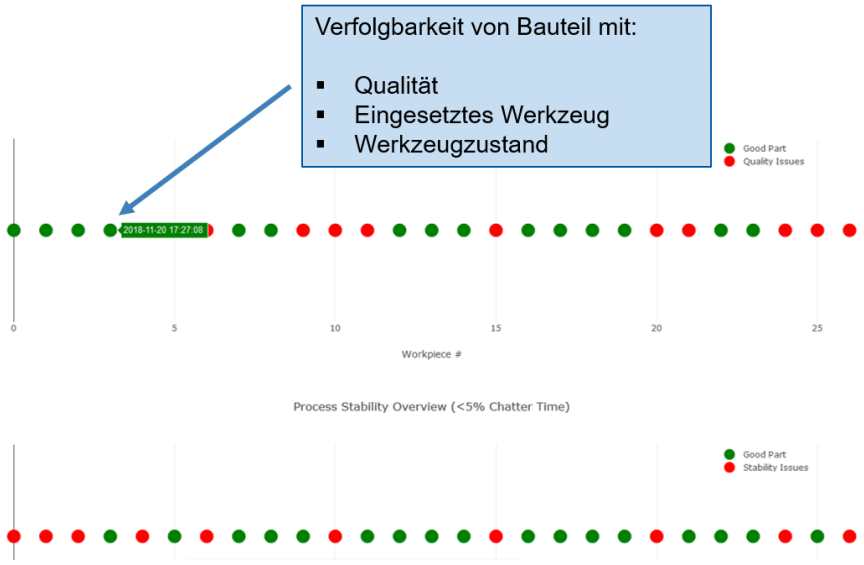


Abbildung 17: Integration in eine Cloud-Applikation

Dadurch entsteht ein erheblicher Planungsvorteil bezüglich der nachgehaltenen Zustände der jeweiligen Werkzeuge und der damit zu erreichenden Qualitäten in der Prozessplanung. Zusätzlich können diese Informationen zur Nachbestellung von Werkzeugen genutzt werden, wodurch nicht nur der aktuelle Lagerbestand, sondern auch der aktuelle Zustand der Lagerbestände als Informationsgrundlage hinzugezogen wird.

Arbeitspaket 5 wurde im Jahr 2018 erfolgreich abgeschlossen.

Arbeitspaket 6 – Evaluierung der Wirksamkeit des erarbeiteten Konzepts

Zielsetzung

Zwar erfolgen Validierungsschritte projektbegleitend durch Einbezug des PA, doch ermöglicht erst eine demonstratorische Verifikation die praxisnahe Evaluation. 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.

Personaleinsatz

Forschungsstelle 1 (FVP): *4 Personenmonat (PM)*

Forschungsstelle 2 (WZL-TF): *1 Personenmonat (PM)*

Forschungsstelle 3 (WZL-WM): *1 Personenmonat (PM)*

Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse

Zur Validierung ist sowohl bei einem Mitglied des PA, der 3Win Maschinenbau GmbH, und einem industriellen Anwender, der HF Mixing Group, jeweils ein Zerspanungsprozess geplant und auftragsübergreifend zurückverfolgt worden. Die Prozesse wurden aufgezeichnet, wodurch die Werkzeuge über mehrere Bauteile lasttechnisch erfasst wurden. Deren Zustand wurde im Anschluss zurück an die Arbeitsvorbereitung gemeldet, wodurch anschließende Prozesse besser geplant werden konnten.

Arbeitspaket 6 wurde im Jahr 2018 erfolgreich abgeschlossen.

Arbeitspaket 7 – Dokumentation der Projektergebnisse

Zielsetzung

Projektbegleitend erfolgt die Dokumentation der im Projekt erarbeiteten Ergebnisse.

Personaleinsatz

Forschungsstelle 1 (FVP): *2 Personenmonat (PM)*

Forschungsstelle 2 (WZL-TF): *2,8 Personenmonate (PM)*

Forschungsstelle 3 (WZL-WM): *1,2 Personenmonate (PM)*

Durchgeführte Arbeiten

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

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

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

2. Verwendung der Zuwendung

In den folgenden Unterkapiteln werden die im Projektzeitraum (01.12.2016 – 30.11.2018) 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

Forschungsstelle		Personenmonate (PM) HPA-A		
Haushaltsjahr:		**2016**	**2017**	**2018**
1	FVP	0	6	6
2	WZL-TF	1	11,4	9,6
3	WZL-WM	0	8,8	12,4

Forschungsstelle		Personenmonate (PM) HPA-B		
Haushaltsjahr:		**2016**	**2017**	**2018**
1	FVP	0	5,5	5,5
2	WZL-TF	0	0	0
3	WZL-WM	0	0	0

Die Ausgaben für die Beschäftigung von Technikern (HPA-C) und studentischer Hilfskräfte (Stufe HPA-F) durch die Forschungsstellen 2 (WZL-TF) und 3 (WZL-WM) 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.

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.

3. Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftliche Nutzens insbesondere 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 [14]. 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 HisToolry wurde daher eine Lösung zur nachhaltigen Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit kleiner und mittelständischer Unternehmen erforscht.

Um als Teilnehmer eines Hochlohnlandes wie Deutschland im internationalen Wettbewerb mitzuhalten, 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 auftragsübergreifenden und historienbasierten Auswahl von Werkzeugen stellt daher das Wissen erfahrener Mitarbeiter in der Arbeitsvorbereitung in den Mittelpunkt. Dabei sind die Arbeiten aus Arbeitspaket 1 dazu genutzt worden, die aktuelle Vorgehensweise des Werkzeugauswahl, -bestell und –verfolgungsprozesses bei KMU zu verstehen und daraus ein Pflichtenheft für den hier vorgestellten Ansatz abzuleiten, sodass ein späterer möglicher Nutzen für KMU geschaffen werden kann. Die Arbeitspakete 2 und 3 sind als Vorarbeit notwendig, um den ganzheitlichen Ansatz innerhalb eines Demonstrators, der als Anwendungsgrundlage für KMU dient, zu aggregieren und umzusetzen. Insbesondere ist es das Ziel von Arbeitspaket 2, eine notwendige Datenbasis für die Modellentwicklung zu generieren, der die Fertigungsanforderungen und Fertigungsverfahren von KMU berücksichtigt. Arbeitspaket 4 und 5 sind notwendig, das entwickelte historienbasierte Werkzeugzustandsmodell auftragsübergreifend anzuwenden und dadurch dem Planer und Maschinenbediener bei KMU Informationen und Handlungsempfehlungen zu geben, die eine erleichterte Werkzeugauswahl inklusive Werkzeugübersicht vorgeben sollen und so den Prozessplanungsprozess in einem hochflexiblen Fertigungsumfeld bei sich häufig ändernden Bauteilen zu vereinfachen. Arbeitspaket 6 dient zur Überprüfung und Validierung des Ansatzes im Kontext des Fertigungsumfeldes von KMU. Dazu wurde die hauseigene Werkstattfertigung als gute 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:

- Direkte Werkzeugverfolgbarkeit sowie Zustandsanalyse in einem System (Kapitel 2 – Arbeitspaket 4 & 5)
- Reduzierte Abhängigkeit von Einzelpersonen

- Schutz vor dem Abwandern von Know-How bzw. Wissen
- Sensibilisierung für technologisches Wissensmanagement
- Übertragbarkeit der entwickelten Konzepte, Methoden und Algorithmen auf weitere Branchen und Einsatzbereiche

4. Plan zum Ergebnistransfer

Projektbezogene Veröffentlichungen

Die Projektzwischenergebnisse wurden in den folgenden Medien publiziert:

- Wiesch, M.; Epple, A.; Brecher, C.: „Tool Monitoring – A scalable learning approach to estimate cutting tool condition with machine internal data in job shop production of a milling process“, Advances in Production Research - Proceedings of the 8th Congress of the German Academic Association for Production Technology (WGP), Aachen, November 19-20, 2018.

- Königs, M.; Wellmann, F.; Wiesch, M.; Epple, A.; Brecher, C.: „A scalable, hybrid learning approach to process-parallel estimation of cutting forces in milling applications“, Advances in Production Research - Proceedings of the 7th Congress of the German Academic Association for Production Technology (WGP), Aachen, October 05-06, 2017.

- Brecher, C.; Königs, M.; Wiesch, M.: „Anwendung eines modernen, hybriden Lernansatzes auf Basis künstlicher neuronaler Netze zur prozessparallelen Ermittlung der Prozesskraft anhand maschineninterner Daten als Vorarbeit zur Bestimmung des Verschleißzustandes bei Werkzeugen“, Jahresbericht 2017 des Werkzeugmaschinenlabors WZL der RWTH AachenSchwenzer, M.: „Big Data Magic – Revolutioniert das maschinelle Lernen die Zerspantechnik?“, 7. Aachener High-Performance-Cutting (HPC) Konferenz, Aachen, 23.-24. Oktober, 2018

Durchgeführte Arbeiten zum Ergebnistransfer

Als begleitendes Instrumentarium für den Ergebnistransfer in die Wirtschaft werden die Projektergebnisse auf den regelmäßigen Zusammenkünften des projektbegleitenden Ausschusses diskutiert. Dabei sind, wie der Zusammensetzung des projektbegleitenden Ausschusses zu entnehmen ist, Softwareentwickler im Bereich CAM-Systeme,

Lohnfertiger in der Frästechnik und Werkzeughersteller Mitglieder des Ausschusses. Alle am Ausschuss beteiligten Personen können sich als äußerst fachkundig auf dem Gebiet der Zerspanung ausweisen und die Interessen der Wirtschaft bei der Projektdurchführung aufzeigen, sodass die Voraussetzungen zum Generieren praxisrelevanter Ergebnisse gegeben sind.

Die Sitzungen des Projektbegleitenden Ausschusses (PA) fanden statt an folgenden Daten:

Datum	Ort
13.12.2016	Aachen, Werkzeugmaschinenlabor (WZL)
01.06.2017	Aachen, Werkzeugmaschinenlabor (WZL)
27.11.2017	Aachen, Werkzeugmaschinenlabor (WZL)
04.04.2018	Aachen, Werkzeugmaschinenlabor (WZL)
29.11.2018	Aachen, Werkzeugmaschinenlabor (WZL)

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

2018 wurde – im Anschluss an die PA-Sitzung – ein HisToolry-Workshop bei Walter und bei der RegioIT veranstaltet. Hierbei wurde das Histoolry-Projekt vorgestellt. Die Teilnehmer bei Walter waren Fachkräfte aus den Bereichen Werkzeugfertigung, CAM-Planung und CNC-Zerspanung sowie bei der RegioIT Experten für Datensicherheit und Cloudanwendungen. Ihnen wurde auch eine Vorversion des entwickelten HisToolry-Demonstrators vorgeführt.

Dieser Nachfrage nehmen sich derzeit die im Projektbegleitenden Ausschuss (PA) vertretenen Softwarehäuser, EXAPT Systemtechnik GmbH, an. Die EXAPT Systemtechnik GmbH wird Erkenntnisse des Forschungsprojektes bei der Weiterentwicklung der Produktionsdatenorganisationslösung EXAPTpdo berücksichtigen.

Am 21. und 22. November 2018 wurden die Ergebnisse des Projektes HisToolry auf der Veranstaltung „Potentiale und Trends im Bereich der CAD-CAM-NC-Verfahrenskette“ am Werkzeugmaschinenlabor (WZL) vorgestellt, dem über 50 Industrievertreter – sowohl

Fach- als auch Führungskräfte – beiwohnten. Sowohl die Vision hinter dem Projekt als auch das ausgearbeitete wissensbasierte Konzept stießen auf reges Interesse und großen Zuspruch.

Bereits projektbegleitend wurde das HisToolry-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 2018 Inhalte und Vision des HisToolry-Projekts vorgestellt und mit den Studierenden diskutiert.

Zeitpunkt	Maßnahme
Turning Days 2017 InTec 2017 EMO 2017	Vorstellung der Ergebnisse auf Messen/Kongressen
Februar 2017 April 2017 Februar 2018 April 2018	Vorstellung der Ergebnisse auf der Mitgliederversammlung FVP
Mai 2017	Vorstellung des Projektes und aktueller Ergebnisse auf dem Aachener Werkzeugmaschinenkolloquium 2017
Januar bis Dezember 2018	Vorstellung der Projektergebnisse in den Vorlesungen „Mechatronik und Steuerungstechnik für Produktionsanlagen“, „NC-Programmierung von Werkzeugmaschinen“ und „Automatisierungstechnik für Produktionssysteme“
Seit Mai 2017	Auslegen einer Projektmappe an den Versuchsständen des Werkzeugmaschinenlabors
Mai 2018	Workshop und Vorstellung der Ergebnisse bei Walter und bei der RegioIT.
Februar 2018 April 2018 Juni 2018	Teilnahme und Fachtagungen und -konferenzen (Hausmesse EXAPT)

November 2018	WZL Seminar: CAD/CAM/NC-Verfahrenskette
Metav 2018 AMB 2018	Vorstellung der Ergebnisse auf Messen/Kongressen (Metav, AMB)

Geplante Transfermaßnahmen

Am 14. und 15. Mai 2020 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 HisToolry-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 2019	Projektergebnisvorstellung im WZL-Jahresbericht 2018
Februar 2019	Erstellung und Präsentation eines Webauftrittes auf der Internetseite des Werkzeugmaschinenlabors (WZL)
Februar 2019	Erstellung und Präsentation von Postern sowie deren Ausstellung in den Versuchshallen (WZL)
Mai 2020	Vorstellung des Projekts im Rahmen des AWK’s 2020 sowie langfristige Bereitstellung innerhalb einer demonstratorischen Prozesskette
Mai 2020	Unterstützung von Systemanbietern bei der Umsetzung der erarbeiteten Konzepte (derzeit EXAPT)
November 2020	Ergebnispräsentation beim Seminar: „Potentiale und Trends im Bereich der CAD-CAM-NC-Verfahrenskette“ 2020
Juli 2019	Veröffentlichung des Schlussberichtes auf den Websites vom FVP und WZL
Januar bis Dezember 2019	Vorstellung der Projektergebnisse in den Vorlesungen „Mechatronik und Steuerungstechnik für Produktionsanlagen“, „NC-Programmierung von Werkzeugmaschinen“ und „Automatisierungstechnik für Produktionssysteme“

Februar 2019 April 2019	Vorstellung der Ergebnisse auf der Mitgliederversammlung FVP
April 2019 November 2019	Teilnahme und Fachtagungen und -konferenzen (Hausmesse EXAPT)
Juni 2019	Verwendung der Ergebnisse in Abschlussarbeiten (Azubi-Abschlussarbeiten)

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 AWK2020 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. 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 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 2020 als Demonstrator am WZL, sowie in ca. 1,5 Jahren auch kommerziell umgesetzt sein wird.

Literaturverzeichnis

[1] Mayring, P.: Qualitative Inhaltsanalyse – Grundlagen und Techniken, 11. Auflage. Weinheim: Beltz Verlag, 2010

[2] Lamnek, S.: Qualitative Sozialforschung, 5. Auflage. Weinheim: Beltz Verlag, 2010, S. 272 ff.

[3] Liebold, R.; Trinczek, R.: Experteninterview. In: Handbuch Methoden der Organisationsforschung – Quantitative und Qualitative Methoden. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, S. 32-56

[4] Boser B E, Guyon I and Vapnik V 1992 A training algorithm for optimal margin classifiers *Proceedings of the 5th annual ACM workshop on computational learning theory* (ACM Press) pp 144–152

[5] Vapnik V, Golowich S E and Smola A J 1996 Support Vector Method for Function Approximation, Regression Estimation and Signal Processing *NIPS*

[6] Smola A J and Schölkopf B 2003 A Tutorial on Support Vector Regression

[7] Bergs, T., Klocke, F., Döbbeler, B., 2018. 7. Aachener High-Performance-Cutting (HPC) Konferenz: 23.-24. Oktober 2018.

[8] Totis, G.; Adams, O.; Sortino, M.; Veselovac, D.; Klocke, F.: Development of an innovative plate dynamometer for advanced milling and drilling applications. In: Measurement. 49. Jg., 2014, S. 164–181

[9] Yaldız, S.; Ünsaçar, F.; Sağlam, H.; Işık, H.: Design, development and testing of a four-component milling dynamometer for the measurement of cutting force and

torque. In: Mechanical Systems and Signal Processing. 21. Jg., 2007, Nr. 3, S. 1499–1511

[10] Schrüfer, E.; Reindl, L. M.: Elektrische Messtechnik. [Elektronische Ressource], 9., aktualisierte Aufl. Aufl. München: Hanser, 2007

[11] Altintas, Y.: Prediction of Cutting Forces and Tool Breakage in Milling from Feed Drive Current Measurements. In: Journal of Engineering for Industry. 114. Jg., 1992, Nr. 4, S. 386

[12] Rudolf, T. M.: Adaptierbare Parametrierung von Diagnosesystemen durch Verwendung digitaler Antriebssignale in der Prozessüberwachung. (Reihe: Ergebnisse aus der Produktionstechnik. Bd. 18). Aachen: Hochschulbibliothek der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 2014

[13] Rey, G. D.; Wender, K. F.: Neuronale Netze. (Reihe: Programm Verlag Hans Huber Psychologie Lehrbuch). 1. Aufl. Aufl. Bern: Huber, 2008

[14] Statistische Ämter des Bundes und der Länder: Demographischer Wandel in Deutschland – Bevölkerungs- und Haushaltsentwicklung im Bund und in den Ländern. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt, 2011

Forschungsstelle 1

Forschungsvereinigung Programmiersprachen für Fertigungseinrichtungen e.V.

Theaterstraße 12

52062 Aachen

Forschungsstelle 2 & 3
Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen University
Cluster Produktionstechnik
Campus-Boulevard 30
52074 Aachen