

1.3 Individuelle Prozessketten im Werkzeugbau durch daten- und modellbasierte Prognosen

T. Bergs, K. Arntz, M. Prümmer, M. Wilms

Gliederung

1	Einleitung	59
1.1	Aktuelle Konjunkturlage.....	59
1.2	Produktivitätssteigerung durch Technologieoptimierung	60
2	Status quo	61
2.1	Herausforderungen zur Umsetzung von individuellen Prozessketten	62
2.2	Prognosefähigkeit in der mechanischen Fertigung	63
3	Implementierung von individuellen Prozessketten	65
3.1	Klassifizierung von Bauteil, Maschine und Technologie.....	65
3.2	Erhöhung der Prognosefähigkeit durch modellbasierte Methoden.....	67
3.3	Erhöhung der Prognosefähigkeit durch datenbasierte Methoden	71
3.4	Datenstruktur für Fertigungsdaten.....	72
3.5	Ausblick: Kopplung von modell- und datenbasierten Methoden.....	74
4	Zusammenfassung und Fazit	75
5	Literatur.....	77

Kurzfassung

Individuelle Prozessketten im Werkzeugbau durch daten- und modellbasierte Prognosen

Konnte sich der Werkzeugbau in der Vergangenheit durch die eigene Innovationskraft vom globalen Markt differenzieren, so muss er sich heutzutage durch die Effizienzsteigerung in der Fertigung und die Senkung der Produktionskosten vom Markt abgrenzen. Der heterogene Einsatz verschiedenster Fertigungstechnologien erzeugt einen hohen Planungsaufwand in der Unikatfertigung und erfordert technologieübergreifendes Prozessverständnis. Auf Basis dieser Komplexität resultieren starke Abweichungen der prognostizierten und tatsächlichen Bearbeitungszeiten, sowohl auf Einzeltechnologieebene als auch technologieübergreifend. Dies hat zur Folge, dass deutliche Potenziale in der Fertigung liegen gelassen werden. Ein möglicher Lösungsansatz diese Potenziale zu nutzen, liegt in der Implementierung von individuellen und adaptiven Prozessketten, sodass bei Störungen wie bspw. einem Maschinenausfall oder Eilaufträgen, auch technologieübergreifend umgeplant werden kann. Zur Integration von individuellen Prozessketten müssen jedoch einige Herausforderungen überwunden werden, wie bspw. die Erhöhung der Prognosefähigkeit und die Klassifizierung von Bauteilen in der Unikatfertigung. Durch die Kopplung von modell- und datenbasierten Methoden kann die Anzahl an benötigten Daten reduziert und die Prognosefähigkeit gesteigert werden. Darüber hinaus ist die Maschinendatenverfügbarkeit und -verarbeitung entscheidend um weiteres Prozesswissen für die Entscheidungsfindung und Arbeitsplanerstellung zu generieren.

Abstract

Individual manufacturing process chains in tooling by data driven and model based forecast methods

In the past, toolmaking was able to differentiate itself from the global market through its own innovative strength but today it must distinguish itself from the market by increasing efficiency in manufacturing and reducing production costs. The heterogeneous use of different manufacturing technologies generates a high planning effort in the one-off production and requires an understanding of processes across technologies. Based on this complexity, strong deviations of the predicted and actual processing times result, both on the individual technology level and across technologies. As a result, significant potentials are not exploited in manufacturing. One possible approach to exploit this potential lies in the implementation of individual and adaptive process chains, so that in the event of disturbances such as machine failure or rush orders, it is also possible to reschedule across technologies. To integrate individual process chains, however, a number of challenges must be overcome, such as increasing the ability to forecast and classify parts in one-off production. By interlinking data driven and model based methods, the amount of required data can be reduced and the forecasting ability will be increased. In addition, machine data availability and processing is crucial to generate further process knowledge for decision making and work plan generation.

1 Einleitung

1.1 Aktuelle Konjunkturlage

Im internationalen Vergleich hat der deutsche Werkzeugbau hinsichtlich der Qualität der Werkzeuge einen exzellenten Ruf. Gemessen an der Anzahl der Mitarbeiter und der Betriebe ist der deutsche Werkzeugbau im Vergleich zur produzierenden Industrie eine relativ kleine Branche. Laut dem VDMA gibt es rund 3.800 Werkzeugbaubetriebe in Deutschland, in denen rund 54.000 Mitarbeiter arbeiten. Von diesen Unternehmen beschäftigen 72 % weniger als 50 Mitarbeiter und nur 1 % Prozent mehr als 100 Mitarbeiter. Dies macht deutlich, dass die Branche weitgehend aus kleinen und mittelständischen Unternehmen besteht und sich durch eine starke Individualität auszeichnet. [1]

Die Branche Werkzeugbau ist schon immer charakterisiert durch geringe Losgrößen, hohe Qualitätsansprüche und permanentes agieren an der Grenze des technisch Machbaren. Schon vor den aktuellen wirtschaftlichen Unsicherheiten (Automobilkrise, Brexit, Handelsstreit zwischen den USA und China, ...) waren viele Werkzeugbauunternehmen mit dem ständig steigenden Preisdruck, dem Trend zu immer individuelleren Produkten sowie immer kürzeren Entwicklungs- und Fertigungszeiten konfrontiert. Die aktuelle wirtschaftliche Lage, vor allem in der Automobilindustrie, erschwert die Bedingungen zusätzlich. So stellen unter anderem der Diesel-Skandal, der das Vertrauen der Kunden erschüttert hat, oder die ambitionierten Ziele der europäischen Klimapolitik die Automobilbranche vor große Herausforderungen. [2]

Die Automobilbranche agiert momentan zögerlich bei Entwicklung und Einführung neuer Modelle, da eine gewisse Unsicherheit herrscht, in welche Richtung sich die Branche entwickeln wird. Dieses zögerliche Handeln in der Automobilbranche hat direkte Auswirkungen auf den Werkzeug- und Formenbau, da sich zunehmend auch andere Branchen in einer konjunkturellen Tiefphase befinden. Deutliche Rücksetzer bei der Umsatzentwicklung in der Branche sind allerdings nicht ungewöhnlich, wenn man historische Daten analysiert. Zuletzt 2009 musste die deutsche Werkzeugbaubranche, ausgelöst durch die weltweite Finanzkrise, einen starken Umsatzrückgang kompensieren (s. Bild 1). [3]

Neben der bereits angespannten wirtschaftlichen Lage aufgrund der Automobilkrise, ist durch die weltweite Pandemie des COVID-19 Virus eine ganze neue Dimension einer Wirtschaftskrise entstanden, dessen Ausmaß und Auswirkungen heute noch nicht abschätzbar sind.

Betrachtet man hingegen rückwirkend die Umsatzentwicklung der letzten zehn Jahre, ist festzustellen, dass der Werkzeugbau sich sehr gut von dieser Krise erholt hat. Es steht aber außer Zweifel, dass nur diejenigen Betriebe Aussicht auf eine nachhaltige Entwicklung haben, die auch in der aktuellen Situation Wandlungs- und Verbesserungsfähigkeit beweisen.

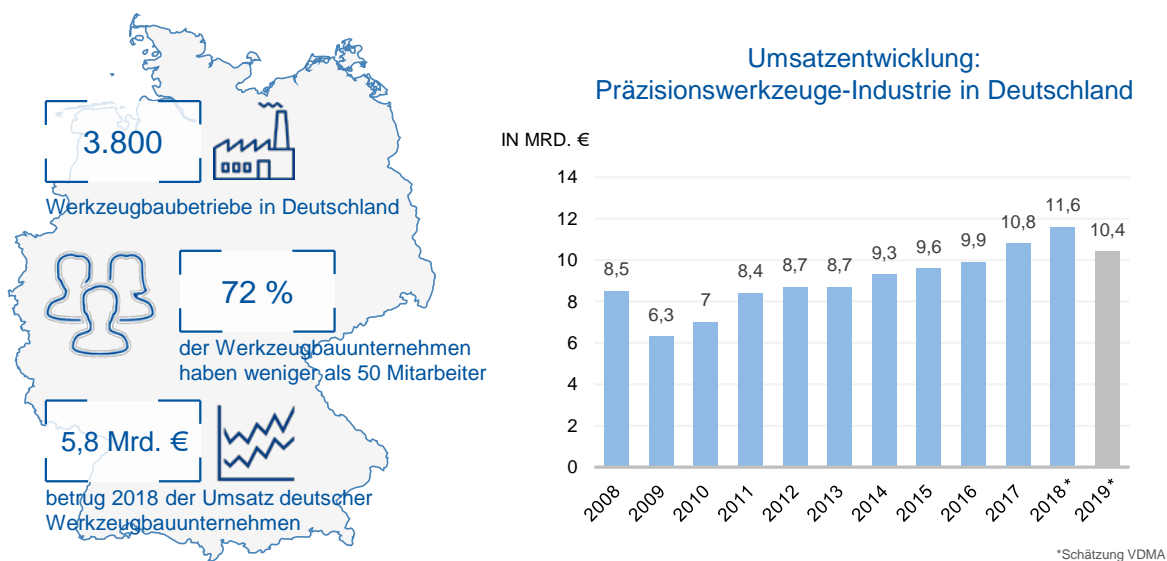


Bild 1: Der deutsche Werkzeugbau in Zahlen [1, 4, 5]

1.2 Produktivitätssteigerung durch Technologieoptimierung

In der Vergangenheit hat der Werkzeugbau mehrere Stufen durchlaufen, um den wirtschaftlichen Herausforderungen gerecht zu werden (s. Bild 2). Ausgehend vom traditionellen Werkzeugbau, wurden durch die Einführung von Fertigungsprinzipien wie bspw. der Prozess- und Produktstandardisierung die operative Exzellenz erhöht. Durch Automatisierungsmaßnahmen, die gerade bei Losgröße 1 eine besondere Herausforderung darstellen, konnten weitere Effizienzpotenziale in der Fertigung erschlossen werden. Aufgrund der aktuellen wirtschaftlichen Herausforderungen sind die Anforderungen an den deutschen Werkzeugbau, den Leistungserstellungsprozess so effizient wie möglich zu gestalten, höher denn je. Bei der Erhöhung der Effizienz der Leistungserstellung spielt die Planung und insbesondere die Steuerung in der Fertigung eine entscheidende Rolle, da innerhalb dieser die Abläufe der Wertschöpfung terminlich und kapazitiv festgelegt werden. In heutigen Fertigungsumgebungen ist es selbst für hochqualifizierte Fachleute in der Arbeitsvorbereitung kaum noch möglich, eine optimale Fertigungsstrategie festzulegen. Aufgrund der Unikatfertigung, der Vielzahl an Fertigungstechnologien und den hohen Qualitätsanforderungen werden Planung und Steuerung immer komplexer. Erschwerend kommt die auf dem Shopfloor herrschende Dynamik hinzu, die durch Maschinenstillstände, Eilaufträge oder Änderungswünsche und ein damit einhergehendes ständiges Umpriorisieren auslöst. Daraus folgt, dass ein Großteil der Ressourcen nicht optimal ausgelastet wird und im Werkzeugbau dadurch Potenziale zur Kostenreduzierung nicht vollständig genutzt werden.

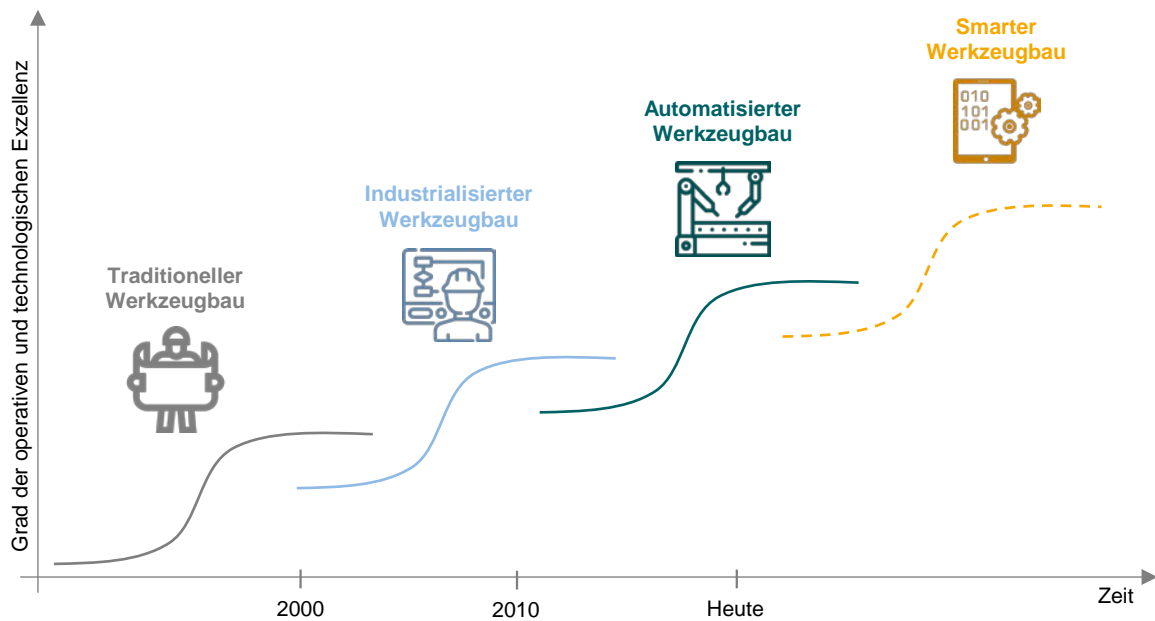


Bild 2: Der Weg zum smarten Werkzeugbau [i.A.a.6]

Ein mögliches Zielbild, um nachhaltige Produktivitätssteigerungen zu realisieren, sind hochflexible und individuelle Prozessketten in der mechanischen Fertigung. Das Prinzip der individuellen Prozessketten ähnelt der Funktion eines Routenplaners, um ein Ziel zu erreichen. Moderne Routenplaner können auf der Basis einer sehr hohen Datenverfügbarkeit Prognosen über die zu erwartende Ankunftszeit berechnen und auf auftretende Störungen (wie bspw. Staus oder Straßensperrungen) mit Alternativrouten reagieren. Je genauer das Kartenmaterial und je detaillierter die Datenbasis, umso genauer werden die Prognosen solcher Systeme.

Diese Idee dient als Vorbild für die Implementierung individueller Prozessketten. Hierzu muss eine Vielzahl von Herausforderungen überwunden werden. Zum einen muss eine Methode gefunden werden, um verschiedene Prozessalternativen schnell zu planen und miteinander vergleichen zu können. Zum anderen müssen diese Informationen ausreichend valide sein und in die Planung und Steuerung im Werkzeugbau integriert werden. Hier ist es besonders unter dem Gesichtspunkt der Unikatfertigung besonders schwierig, ausreichend präzise Prognosen abzuleiten. [2]

2 Status quo

Prozessketten im Werkzeugbau setzen sich aus unterschiedlichen Fertigungstechnologien zusammen. Über die Branche hinweg lassen sich jedoch – abhängig vom Produktspektrum – das Fräsen, die Senk- und Drahterosion sowie das Schleifen und Drehen als Kerntechnologien identifizieren. Die Fertigungstechnologien unterscheiden sich grundsätzlich in ihrem Fertigungsprinzip, in der erzielbaren Bauteilqualität sowie in ihrer Wirtschaftlichkeit. In den meisten Fällen ist eine Wärmebehandlung erforderlich, sodass sich die Prozesskette aus einer Weich- und Hartbearbeitung zusammensetzt. Nachfolgend zu diesen Prozessschritten erfolgt eine Oberflächenbearbeitung, bei der durch Schleifen, Läppen, Polieren, verschiedenen Strukturierverfahren, Beschichtungen etc. die Eigenschaften der Werkzeugoberfläche eingestellt werden. Hinzukommend entstehen durch additive Fertigungsverfahren (wie bspw. dem selektiven Laserschmelzen (L-PBF)) völlig neue Möglichkeiten der Geometrierstellung. Folglich ist die Anzahl an

verschieden möglichen Prozessketten im industriellen Werkzeugbau sehr hoch. Bei der Auswahl der Technologien muss somit auf die Wirtschaftlichkeit, die Agilität bei Maschinenausfall sowie eine möglichst aufwandsarme Planung geachtet werden.

2.1 Herausforderungen zur Umsetzung von individuellen Prozessketten

Aufgrund der komplexen Planung und der vielen Möglichkeiten eine Prozesskette zu gestalten, ist es ohne technische Unterstützung und die systematische Vernetzung aller Systeme entlang der Wertschöpfungskette selbst für hochqualifizierte Fachkräfte kaum noch möglich, die beste Fertigungsstrategie zu identifizieren.

Der im Werkzeugbau übliche Einsatz von verschiedenen Fertigungstechnologien, erfordert nicht nur einen sehr hohen Planungsaufwand, sondern auch ein sehr hohes, technologieübergreifendes Prozessverständnis in der Arbeitsvorbereitung. In diesem Zusammenhang stellt die Generierung der idealen Prozesskette eine große Herausforderung dar. Sie basiert zum heutigen Stand in der Regel auf dem langjährigen Erfahrungswissen des jeweiligen Mitarbeiters. Neben der Bildung der idealen Prozesskette, ist es aufgrund der hohen Dynamik im Werkzeugbau notwendig, reaktionsschnell auf Änderungen und Umpriorisierungen zu reagieren und die Prozesskette umzuplanen. Diese alternativen Prozessketten werden in der gängigen Praxis erst zum Zeitpunkt ihrer Notwendigkeit erstellt, was wiederum Kapazitäten bindet und die Durchlaufzeit verlangsamt. Sehr viele der Experten, die sich das notwendige Prozessverständnis durch jahrelange Erfahrung angeeignet haben, werden zusätzlich in absehbarer Zeit in den Ruhestand gehen und es fällt dem Werkzeugbau schwer, qualifizierten Nachwuchs für diese Aufgaben zu begeistern [1]. Daraus resultiert die Herausforderung das vorhandene Erfahrungswissen auch für zukünftige Generationen nutzbar zu machen und ein aktives Wissensmanagement zu betreiben.

Geringe Losgrößen, heterogene Fertigungstechnologien, neue Bearbeitungsaufgaben an der Grenze des technisch machbaren sowie inkompatible Schnittstellen führen heute bei einer mangelnden Transparenz der Prozesse sowie ungenauer Vorhersage von Fertigungszeiten, -kosten und -ergebnis immer wieder zu Problemen. Um die Abläufe zu verbessern besteht ein Ansatz darin, die bereits durchgeführten Fertigungsprozesse und die dabei gewonnenen Erkenntnisse und Daten zu analysieren und so aufzubereiten, dass sich die Erkenntnisse auf andere Bearbeitungsaufgaben übertragen lassen. Aufgrund der Unikatfertigung, ist dies nicht ohne weiteres möglich. Selbst die in den letzten Jahren vermehrt aufkommende Möglichkeiten durch KI-basierte Black-Box-Ansätze, sind aufgrund der geringen Losgröße nicht ohne Weiteres auf die Problemstellung in der Unikatfertigung übertragbar. Für datenbasierte KI-Ansätze steht einfach nicht die nötige Datenmenge zur Verfügung, die zur Verwendung von klassischen Big-Data-Ansätzen notwendig ist. Um dennoch individuelle Prozessketten zu implementieren und somit die Flexibilität auf dem Shopfloor zu steigern, können vier verschiedene Handlungsfelder identifiziert werden (s. Bild 3).

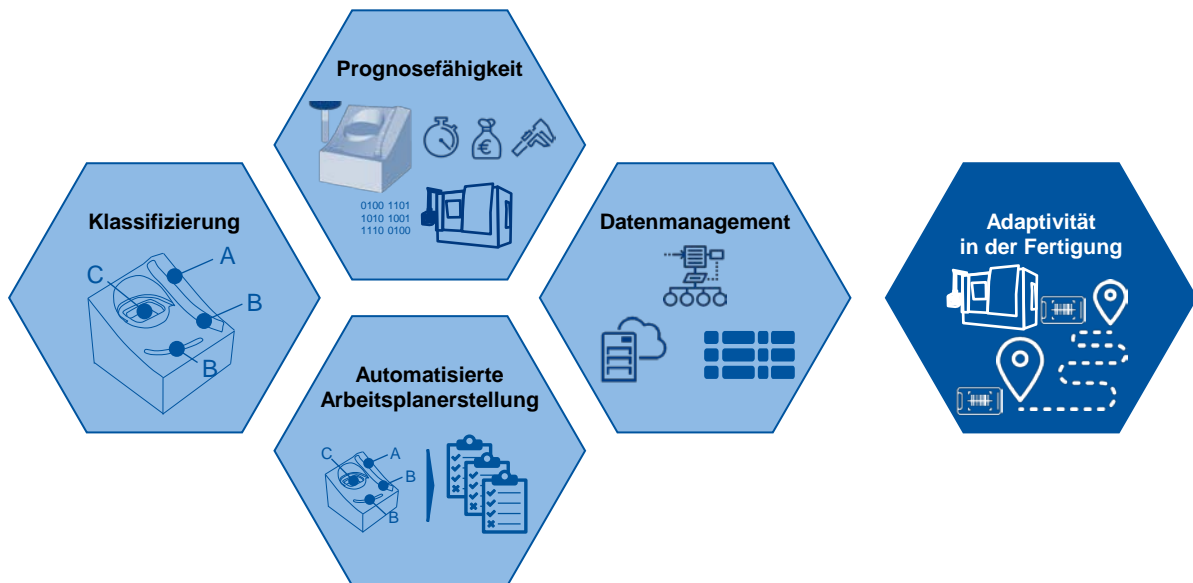


Bild 3: Implementierung von individuellen Prozessketten im Werkzeugbau

Eine einheitliche Beschreibung und *Klassifizierung* der Werkstücke helfen aus vergangenen Prozessen zu lernen und die Erkenntnisse auf neue Bearbeitungen zu übertragen. Im nächsten Schritt müssen diese Erkenntnisse in die Prozesskettenplanung mit einbezogen werden. Da neben der gewählten Prozesskette zusätzlich ggf. Alternativen erstellt werden müssen, ist es wichtig, dass die Generierung und Bewertung von *Arbeitsplänen möglichst automatisiert* durchgeführt wird. Folglich müssen die Algorithmen, die für die Routenplanung benötigt werden, entwickelt und in einem System (bspw. MES oder PPS) implementiert werden. Für die automatisierte Arbeitsplanerstellung ist eine ausreichende *Prognosefähigkeit* der Einzelprozess notwendig, die daten- oder modellbasiert optimiert werden muss. Als letztes Handlungsfeld müssen alle Informationen und Daten digitalisiert vorliegen, sodass ein strukturiertes *Datenmanagement* für den Werkzeugbau von hoher Bedeutung ist. Letzten Endes ist die Vision eine vollautomatische *adaptive Prozesskettenplanung und -regelung*, um die Effizienz in den Abläufen in der Fertigung sowie die Ressourcenauslastung deutlich zu steigern.

2.2 Prognosefähigkeit in der mechanischen Fertigung

Die Einzel- und Kleinserienfertigung unterscheidet sich deutlich hinsichtlich des Aufwands der Arbeitsumfänge in Konstruktion, Arbeitsvorbereitung, Fertigung und Montage von der klassischen Serienproduktion. Hinzu kommt, dass die Auftragslage nicht gleichmäßig über das Jahr verteilt ist. Dies führt zu stark schwankenden Auslastungen der vorhandenen Ressourcen. Das Resultat sind nicht ausgeschöpfte Kapazitäten der zur Verfügung stehenden Maschinen. Beispielsweise werden im Durchschnitt 64,5 % der möglichen Fertigungszeiten einer Fräsmaschine nicht genutzt. Die Folgen sind lange Durchlaufzeiten, eine niedrige Liefertermintreue sowie eine unzureichende Produktivität und Kosteneffizienz durch niedrige Auslastungsgrade. Als zusätzliche Störgröße für eine gezielte Planung im Werkzeugbau, kommen immer wieder neue Eilaufträge hinzu. 2018 betrug der durchschnittliche Anteil an Eilaufträgen unter den Teilnehmern des Wettbewerbs »Excellence in Production«, zum Werkzeugbau des Jahres 23,2 %, wobei die Finalisten einen Wert von 9,6 % erreichen. Manche Unternehmen erlauben sich den Luxus eines zweiten Maschinenparks, der ausschließlich für Eilaufträge genutzt wird. Da die Branche größtenteils aus kleinen und mittelständischen Werkzeugbaubetrieben besteht,

kann sich das nicht jeder Werkzeugbaubetrieb leisten und ob diese Lösung wirklich effizient ist, bleibt in Frage gestellt. [7]

Eine große Rolle bei der Verbesserung der dargestellten Problematik spielen Prognosesysteme. Diese ermöglichen bei optimierten Prognosen eine bessere Steuerung der Fertigungsstrategie und können somit die Gesamteffizienz der mechanischen Fertigung steigern. Ein Prognosesystem ist ein System, das zur Vorhersage von Ereignissen oder Zuständen in der Zukunft genutzt wird. Es ist auf Grundlage von formalisierten Methoden und Daten aufgebaut. Jegliche Prognose entspricht einer Voraussage unter einer gewissen Wahrscheinlichkeit, weshalb bei genauer Anwendung stets der Prognosefehler bekannt sein muss. In der heutigen Praxis werden CAD/CAM Systeme sowie ERP bzw. MES Systemen zur Datenaufnahme und -verarbeitung in der Fertigung eingesetzt. In manchen Fällen wird lediglich auf Erfahrungswissen zurückgegriffen, um eine Prognose zu treffen.

In Zusammenarbeit mit der Aachener Werkzeugbau Akademie und deren Mitgliedern wurden in den letzten Jahren Benchmark-Versuche in den Kerntechnologien Fräsen, Senkerodieren und Drahterodieren durchgeführt. Innerhalb der Technologien wurde von jedem teilnehmenden Unternehmen eine vorgegebene Demonstratorgeometrie (s. Bild 4) gefertigt. Vor der Bearbeitung mussten die teilnehmenden Unternehmen die zu erwartende Bearbeitungsdauer laut CAM-Planung (Fräsen und Drahterosion) oder auf Basis von Erfahrungswissen (Senkerosion) schätzen. Der Abgleich mit den tatsächlichen Bearbeitungszeiten verdeutlicht, dass die heutigen Prognosen in der mechanischen Fertigung nicht ausreichend sind. Es ist zu beachten, dass die Abweichungen statistisch verteilt sind, positiv oder negativ ausfallen können und sich keine allgemeingültigen Regeln zu ihrer Kompensation ableiten lassen. In allen Technologien wird deutlich, dass unter diesen Voraussetzungen eine exakte Planung, geschweige denn eine Feinplanung und Steuerung auf dem Shopfloor nahezu unmöglich erscheint. Heutzutage wird versucht, dies durch Pufferzeiten und eine sich permanent ändernde Feinsteuerung in der Fertigung zu kompensieren.

Vor allem die hohe Abweichung in der Senkerosion macht eine effiziente Planung heutzutage nahezu unmöglich. Der Grund für diese hohe Abweichung liegt zum einen in der bereits erwähnten hohen Komplexität der Unikaterfertigung im Werkzeugbau und zum anderen an der Technologie selber. Durch die heutzutage verfügbare Regelung der meist digitalen Generatoren ist der Fertigungsprozess eine reine „Black Box“. Die vergleichsweise unpräzisen Prognosen beschränken sich dabei nicht nur auf die Bearbeitungsdauer. Auch eine in der Studie vorgegebene Qualität konnte nur von einer Minderheit der teilnehmenden Unternehmen gezielt erreicht werden. Sie wurde von einigen Unternehmen sogar übertroffen, was letztendlich im Sinne einer optimalen Prognosefähigkeit und Wirtschaftlichkeit nicht sinnvoll ist – es ist davon auszugehen, dass die Bearbeitung in diesen Fällen hätte schneller sein können. Darüber hinaus haben die Bearbeitungsdauer und Bauteilqualität einen entscheidenden Einfluss auf die Fertigungskosten, deren Prognose ein entscheidender Faktor für die Wettbewerbsfähigkeit eines Werkzeugbauunternehmens ist. Neben den Hauptfaktoren Bearbeitungszeit, Bauteilqualität und Fertigungskosten, ist der Faktor Mensch entscheidend für die Prognosefähigkeit in der Fertigung, da er dessen Aufgaben, wie bspw. das Rüsten der Bauteile, höchst individuell ausführt.

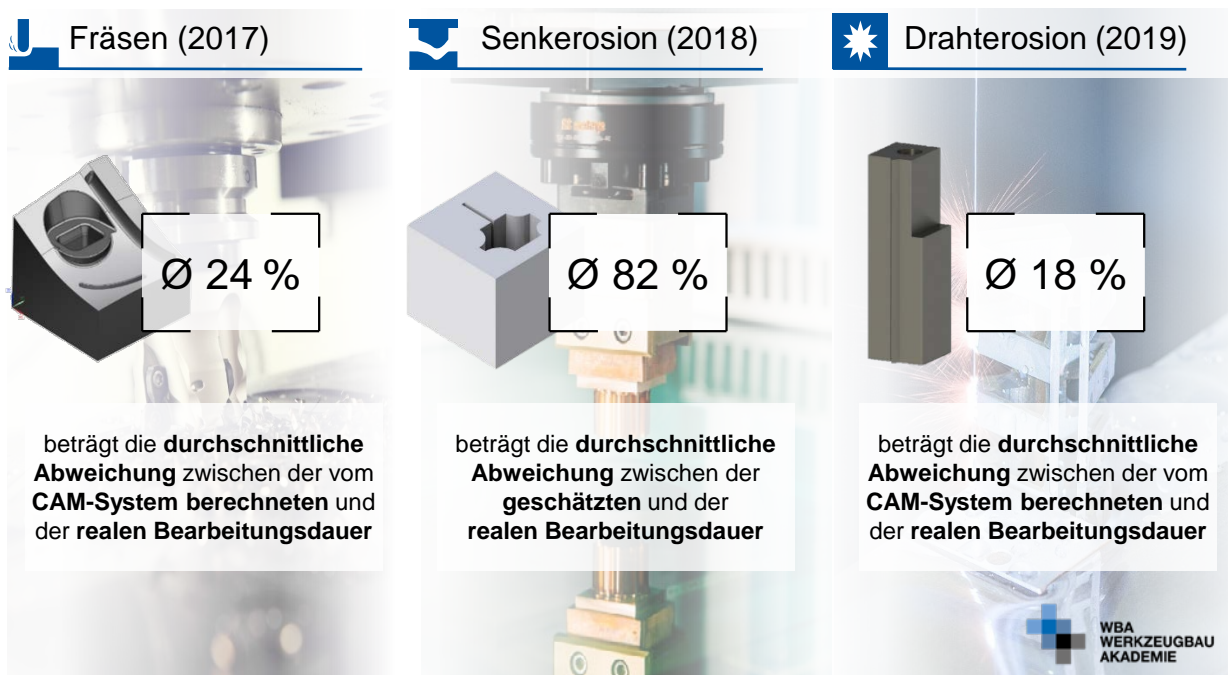


Bild 4: Durchschnittliche Abweichung zwischen prognostizierter und realer Bearbeitungsdauer [Quelle: WBA Aachener Werkzeugbau GmbH]

3 Implementierung von individuellen Prozessketten

Nachdem die Problemstellung ausführlich beschrieben wurde, stellt sich nun die Frage, wie die Herausforderungen in der Praxis gemeistert werden können. Hierzu stellen sich vier zentrale Leitfragen:

- Wie können in der Unikatfertigung Bauteil, Maschine und Prozess klassifiziert werden, sodass bei neuen Bearbeitungsaufgaben auf Erfahrungswissen zurückgegriffen werden kann?
- Wie können die heutigen Prognosen der Bearbeitungsdauer, Fertigungskosten und Bauteilqualität mit Hilfe von Technologienmodellen optimiert werden?
- Wie können die Prognosen aus bereits durchgeführten Fertigungsaufgaben datenbasiert aufgenommen werden?
- Wie müssen diese Daten und Datenbanken im Werkzeugbau strukturiert sein, um gezielt Daten aufzunehmen?

Die nachfolgenden Kapitel zeigen Lösungsansätze aus Forschung und Praxis, um diese Fragen zu beantworten. Hierbei sollen aktuelle Beispiele aus der industriellen Praxis ebenso beschrieben werden wie Forschungsansätze auf dem Weg zur Implementierung von individuellen Prozessketten.

3.1 Klassifizierung von Bauteil, Maschine und Technologie

In vielen Betrieben wird wertvolle Zeit und Expertenkapazität für die Prozesskettenplanung einfacher Bauteile verwendet, welche dann wiederum bei komplexen Bauteilen fehlt. Die vorhandenen Daten werden nicht durchgängig genutzt und Entscheidungen in der Fertigung oft „aus dem Bauch heraus“ und ohne feste Standards getroffen. Um die Fertigung zu optimieren ist es daher wichtig, die Aufträge und Bauteile zu ordnen und in

verschiedenen Klassen zusammenzufassen, sie mithin also zu klassifizieren. Nur so lassen sich Fertigungsaufträge schnell hinsichtlich ihrer Anforderungen beurteilen und davon ausgehend die Fertigung planen. Das Potential einer Klassifizierung von Bauteilen innerhalb eines Unternehmens wird häufig unterschätzt, da der Nutzen in der Regel erst auf lange Sicht erkennbar wird. Dazu kommt, dass der Nutzen in verschiedenen Unternehmensbereichen entsteht, wodurch es schwer ist, den Erfolg von Standardisierungsvorhaben auf Basis von Klassifizierungsansätzen zu messen.

Doch wie kann eine Klassifizierung in der Unikatfertigung aussehen? In der heutigen Praxis wird in der Regel dem Produkt/ dem Auftrag eine Identifikationsnummer zugeordnet, welche das Bauteil eindeutig identifiziert. ERP- und PLM-Systeme haben somit eine Referenz zum Auftrag. Im Alltag schleicht sich dennoch zumeist eine uneinheitliche und nicht systematische Benennung von Zukaufteilen, Dateinamen und Zeichnungsnummern ein, was sehr viel Potenzial beinhaltet um Duplikate und Redundanzen zu reduzieren.

Um eine wirkungsvolle Klassifizierung gewährleisten zu können, ergeben sich neben der Grundprämisse, dass alle Informationen zu Bauteil, Maschine und Technologie vernetzt sind, einige Anforderungen an das Klassifizierungssystem selbst. So muss das System bauteilbeschreibende Informationen aus einer heterogenen IT-Landschaft ermitteln können, wozu es Zugriff auf diverse IT-Systeme benötigt, welche derartige Informationen beinhalten. Eine Möglichkeit dies zu gewährleisten ist die Speicherung aller produktbeschreibenden Daten in einem einzigen, integrierten Modul, welches zu jedem Zeitpunkt der Produktentwicklung und Fertigung über alle Informationen in einem konsistenten, redundanzfreien Zustand verfügt.

In der Praxis ist es beispielsweise bereits möglich, Bauteile zu klassifizieren und eine Ähnlichkeitsanalyse durchzuführen. Das Modul classmate CAD der Firma simus systems ist in der Lage Bauteile automatisiert zu klassifizieren und dadurch mit bereits gefertigten Bauteilen aus einer Datenbank abzugleichen. Der Vergleich wird hierbei auf Basis der Bauteilgeometrie durchgeführt. Ausgehend von einem 3D-Modell und dazu gehörigen Metadaten werden mit Hilfe eines Interpretationsalgorithmus die Informationen zu den einzelnen Geometrieelementen analysiert und verarbeitet. Sind neben dem Bauteil auch die Maschinen und Werkzeuge klassifiziert und in einer Technologiedatenbank hinterlegt, so lässt sich eine automatisierte Arbeitsplanerstellung mit Hilfe des Moduls classmate PLAN für geometrisch einfache Bauteile, die oftmals den Großteil der Fertigung ausmachen, durchführen. So nutzt beispielsweise der Werkzeugbau der ZF Friedrichshafen AG am Standort Schweinfurt das System, um ca. 60 % seiner Arbeitspläne vollautomatisch zu generieren (s. Bild 5). Die restlichen Arbeitspläne werden aufgrund fehlender Informationen am Bauteil, die durch dessen Komplexität verursacht werden, manuell nachbearbeitet. Wichtig bei der Umsetzung ist, dass neben der Technologiedatenbank auch regelbasierte Arbeitsfolgen und Zusatzbedingungen mit bei der Arbeitsplanerstellung berücksichtigt werden.

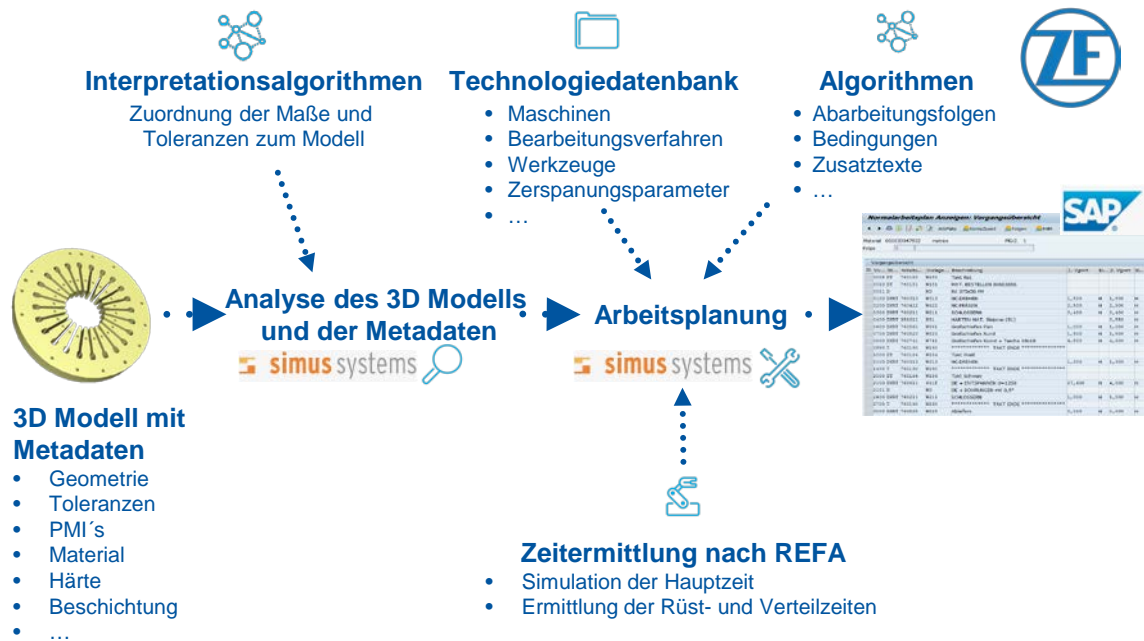


Bild 5: Automatisierte Arbeitsplanerstellung im Werkzeugbau der ZF Friedrichshafen AG

Da sich die oben beschriebene Methodik für Bauteile mit 2,5-D-Geometrien ausgelegt ist, bleibt die Frage, wie die für den Werkzeug- und Formenbau charakteristischen 3D-Oberflächen klassifiziert werden können. Diese Frage wird aktuell in der Forschung versucht zu beantworten. Vor allem die Möglichkeiten in der 3D-Bilderkennung mit Hilfe von Machine-Learning Algorithmen haben sich in den letzten Jahren stark weiterentwickelt. Nun gilt es diese auf die Fragestellungen im Werkzeugbau und der Klassifikation der Werkstücke zu übertragen.

3.2 Erhöhung der Prognosefähigkeit durch modellbasierte Methoden

Modellbasierte Methoden beschreiben die Möglichkeit mit Hilfe von analytischen Technologiemodellen einen Ursache-Wirkungszusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgröße zu beschreiben. Sie werden auch als White-Box-Modell Ansatz beschrieben, da alle nötigen Informationen innerhalb des Modells vorhanden sind. Problematisch beim Einsatz von modellbasierten Methoden ist, dass wie der Name Modell schon vorgibt, immer nur ein Teil der gesamten Realität betrachtet werden kann und somit Vereinfachungen getroffen werden müssen.

In der heutigen industriellen Praxis werden kaum oder nur wenige modellbasierte Methoden genutzt, um eine Prognose über die Bearbeitungsdauer, Fertigungskosten oder Bauteilqualität in der Planungsphase zu treffen. Die Bearbeitungsdauer und benötigte Kapazität wird in der Regel auf Basis von Erfahrungswissen in der Arbeitsvorbereitung geschätzt und durch die vom CAM-Programm berechneten Bearbeitungsdauer angepasst. Selbst diese Zeiten sind – wie bereits in Kapitel 2.2 beschrieben – meist sehr ungenau, und sind nicht in der Lage die Planung und Steuerung zu optimieren. Nachgehend sollen für die Kerntechnologien Fräsen und Senkerosion Möglichkeiten zur modellbasierten Erhöhung der Prognosefähigkeit vorgestellt werden (s. Bild 6).

Innerhalb der Technologie Fräsen beruhen modellbasierte Methoden zumeist auf Simulationen aus dem CAD-CAM Workflow. In der gängigen Praxis wird primär lediglich der Werkzeugpfad in der CAM-Programmierung simuliert, der eine Kollisionskontrolle durchführt. Die Maschinendynamik wird hierbei nicht berücksichtigt. Doch gerade die Eigenschaften der Maschine und ihr dynamisches Verhalten haben einen großen Einfluss auf

die Bearbeitungsdauer und Bauteilqualität. In der Praxis sind Simulationssysteme zur Maschinendynamiksimulation vorhanden, wie bspw. der am Fraunhofer IPT entwickelte NCProfiler. Die Integration der Maschinendynamiksimulation ist ein wichtiger Faktor, um die Vorhersage der CAM-Programmierung näher spezifizieren zu können. Bei einer solchen Analyse werden neben der Maschinenkinematik auch die dynamischen Grenzen der einzelnen Achsen sowie deren Steuerungseigenschaften berücksichtigt. Durch die an die Bearbeitungsmaschine angepasste Analyse können neben einer präziseren Vorhersage der Bearbeitungszeit, Defekte des NC-Codes schon vor der eigentlichen Bearbeitung erkannt und behoben werden, was einen positiven Einfluss auf die Bauteilqualität hat. Typische Fehler wie treppenförmige NC-Bahnen oder aus Flächenversätzen resultierende Sprünge werden zuverlässig aufgedeckt, auf dem Werkzeugweg markiert und im NC-Programm angezeigt. Der NCProfiler bildet für die Analyse die Kinematik der Werkzeugmaschine ab auf der die Bearbeitung stattfinden soll. Hierdurch können die durch das NC-Programm vorgegebenen Bewegungen der einzelnen Achsen auf eventuelle Überschreitungen dynamischer Grenzwerte wie bspw. Ruck und Beschleunigung sowie auf Achsumkehrpunkte hin untersucht werden. Neben der von der Kinematik abhängigen Analyse berechnet der NCProfiler eine Bahnvorschubgeschwindigkeit, in der die Begrenzungen der einzelnen Achsen sowie die geometrischen Randbedingungen berücksichtigt werden. Daraus resultiert eine Abschätzung der Bearbeitungsdauer sowie deren Aufschlüsselung in Haupt- und Nebenzeiten.

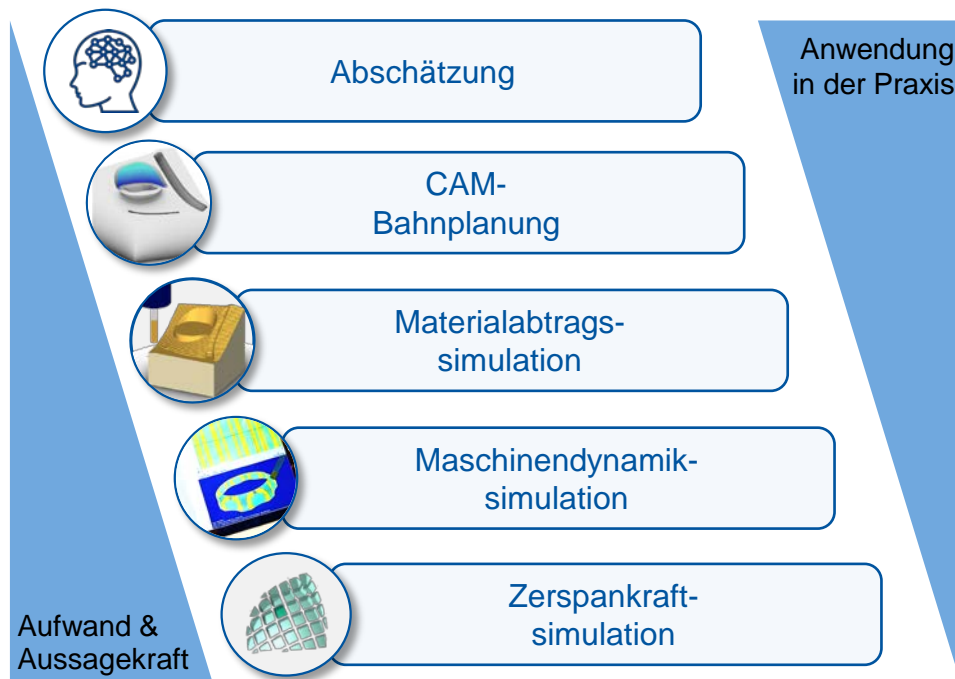


Bild 6: Modellbasierte Methoden im Fräsen

Darüber hinaus existiert eine Vielzahl von verschiedenen Simulationsoptionen, um die Prognosefähigkeit zu steigern. Im Folgenden werden einige kurz vorgestellt: Die Simulation des Eingriffswinkels des Fräswerkzeugs ermöglicht die Abschätzung der Zerspankraft. Mithilfe der simulierten Zerspankraft können geometrische Formabweichungen berechnet werden. Dazu werden Modelle genutzt, die die Nachgiebigkeit des Werkzeugs beschreiben. Durch die Zerspankraftsimulation wird nicht nur die Prognose der Bauteilqualität ermöglicht, sondern zusätzliches Potential zur Produktoptimierung freigesetzt.

Die zusätzliche Vorhersage des Werkzeugverschleißes ermöglicht die Abschätzung von Werkzeugwechsellpunkten und Werkzeugkosten.

Für eine weitere Erhöhung der Prognosefähigkeit sollten weitere Simulationen wie etwa die Zerspankraftsimulation zur Berechnung der Bearbeitungszeit hinzugezogen werden. Der daraus resultierende Modellierungs- und Rechenaufwand ist heutzutage noch viel zu groß, sodass es derzeit nicht möglich ist die umfangreichen Simulationen in der Industrie einzusetzen.

Für eine praktische Anwendung und zur Vermeidung von Schnittstellenverlusten müssen Simulationen allerdings im CAD – CAM Workflow integriert sein. Eine große Herausforderung neben der generellen Anwendung der Simulationen, stellt insbesondere die Kopplung der einzelnen Simulationen dar, weil hierdurch die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Modellgrößen berücksichtigt werden müssen.

Betrachtet man weitere Technologien wie beispielsweise die Senkerosion, ist es noch schwieriger eine Prognose über Bearbeitungsdauer, Bauteilqualität und Fertigungskosten abzugeben. Dies liegt zum einem am Fertigungsprinzip selbst und zum anderen an der komplexen Regelungstechnologie moderner Generatoren, die die für den Abtrag entscheidenden Parametern wie bspw. Pulsdauer, Pausendauer und Leerlaufspannung steuern. In der Literatur sind viele Modelle vorhanden, die den Materialabtrag zwischen Elektrode und Werkstück betrachten [8]. Aufgrund der sehr komplexen Wirkzusammenhänge ist aktuell kein Modell dazu in der Lage, den Materialabtrag ausreichend präzise vorherzusagen. Neben der Materialabtragsrate haben nach heutigem Kenntnistand die Spülbedingungen einen wesentlichen Einfluss auf die Materialabtragsrate und somit auf den Fertigungsprozess [9]. Die Spülbedingungen werden wiederum durch die Energiedichte, die Bearbeitungstiefe und die Frontfläche sowie Form der Elektrode beeinflusst. Aufgrund des Einflusses der Elektrodenform ist man im Werkzeug- und Formenbau wieder vor der Herausforderung der Unikatfertigung, sodass auch hier eine flächendeckende Modellierung nur mit der Hilfe von Klassifizierung möglich ist. Neben dem Einfluss auf die Qualität, hat die Spülbedingung beim Senkerodieren einen Einfluss auf die Bearbeitungszeit. Versucht man diesen Einfluss zu quantifizieren und mit in die Prognose für die Bearbeitungszeit zu integrieren, so muss zusätzlich zur Elektrodenform und -frontfläche, ein Korrekturfaktor für jede Maschine (bzw. Generator) individuell auf Basis von Referenzuntersuchungen ermittelt werden. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der Senkerosionsprozess sehr stark von Form und Geometrie der Elektrode abhängt und den dadurch entstehenden Spülbedingungen im Spalt zwischen Elektrode und Werkstück. Diese lassen sich nur bedingt modellieren und es ist kein ausreichend genaues Technologiemoell vorhanden, dass eine präzise Prognose von Bearbeitungszeit oder Bauteilqualität zulässt. Ein vorhandenes Modell zur Prognose der Bearbeitungszeit erfordert ebenfalls maschinenspezifische Korrekturwerte zur Berechnung der Bearbeitungszeit, die neben den verschiedenen Korrekturwerten für die Maschinen auch verschiedene weitere Korrekturwerte benötigen wie bspw. Elektrodenmaterial oder Kavitätentyp. Hier ist der Aufbau einer Wissensbasis sehr wichtig und trägt zum Erfolg der Prognose bei.

Im Gegensatz zur Senkerosion, liefern CAM-Programme in der Drahterosion verhältnismäßig gute Prognosen (s. Bild 4). Die für die Drahterosion charakteristische 2,5 D Bewegung und das Fehlen von komplexen Freiformflächen sowie der Fakt, dass durch das kontinuierliche Nachführen des Drahtes kein Werkzeugverschleiß entsteht, vereinfachen die Modellierung [10]. Dennoch kommen durch die Drahteigenschaften und die führungsbedingte Wölbung neue Einflussfaktoren auf die Prognose hinzu. Betrachtet man die

Prognose der Bearbeitungsdauer so kann diese über die CAM-Programmierung verhältnismäßig genau bestimmt werden, da der Vorschub der Achsen sowie die Anzahl der Nachschnitte durch das CAM-Programm eindeutig bestimmt ist. Dynamische Einflüsse der Maschinenachsen wie bspw. beim Fräsen sind durch das thermische Wirkprinzip des funkenerosiven Schneidens eher untergeordnet. Einen Einfluss auf die Bearbeitungsstrategie kann lediglich das Nachregeln der Maschine aufgrund von Fehlzündungen, Eckenstrategien oder Drahtissen haben. Wie bereits in der Senkerosion beschrieben, haben die Spülbedingungen auch in der Drahterosion einen großen Einfluss auf die Bearbeitungsqualität und -zeit. Der größte Einfluss geht hierbei vom Abstand zwischen Spüldüse und Werkstück aus (s. Bild 7). Ist der Abstand zu groß, so verschlechtert sich die Schnitt-rate um bis zu 37 %, was Einbußen in der Produktivität hat und faktisch gesehen mit in der Prognose der Bearbeitungszeit berücksichtigt werden müsste [11].

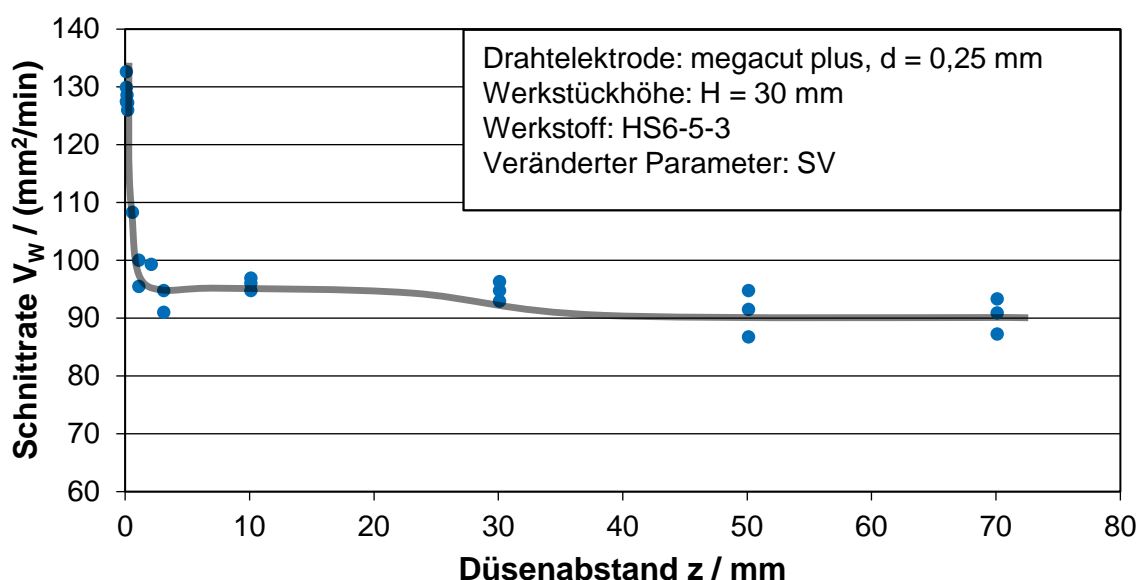


Bild 7: Versuchsreihe zur Modellierung des Einflusses des Düsenabstandes auf die Schnitt-rate [9]

Die bisher vorgestellten modellbasierten Zusammenhänge innerhalb der EDM-Verfahren basieren auf theoretischen Überlegungen, die experimentell belegt sind. Der Vorteil von analytisch ermittelten physikalischen Modellen ist die Gewinnung von Prozesswissen und die Identifikation von relevanten Prozessgrößen. Nachteilig ist, dass analytische Technologiemodelle lediglich spezifische Teilbereiche des Prozesses abbilden und größtenteils nicht miteinander kompatibel sind. Zudem haben alle physikalischen Modelle kritische Vereinfachungen treffen müssen, sodass der reale Prozessverlauf von dem der Technologiemodelle abweicht [8]. Dies führt dazu, dass die modellbasierten Methoden auf rein analytischer Basis nicht den gewünschten Effekt erzielen, in der Industrie die Prognosefähigkeit zu erhöhen. Neben den rein analytischen Modellen, wurde in Vergangenheit versucht mit Hilfe von künstlichen neuronalen Netzen die Oberflächengüte des EDM-Prozesses zu modellieren. Die neuronalen Netze werden als nichtlineare Funktionsapproximierer zur Regression genutzt, sodass ein Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsgrößen abgebildet werden kann. Adaptionsalgorithmen führen im Idealfall dazu, dass die neuronalen Netze versteckte und unbekannte Zusammenhänge, die in den Trainingsdaten verborgen sind, möglichst genau reproduzieren können. Hierzu ist wiederum

eine gewisse Menge an Felddaten notwendig, sodass auf diesen Ansatz innerhalb der datenbasierten Modelle eingegangen wird.

3.3 Erhöhung der Prognosefähigkeit durch datenbasierte Methoden

Neben der Möglichkeit die Prognosefähigkeit durch modellbasierte Methoden (White-Box-Ansatz) zu erhöhen, besteht die Möglichkeit aus (Fertigungs-) Daten zu lernen, um zukünftige Prognosen zu optimieren. Innerhalb der datenbasierten Methoden wird zusätzlich unterschieden auf welcher Ebene und aus welcher zeitlichen Perspektive Daten erhoben und analysiert werden. Zum einen besteht die Möglichkeit aus historischen Daten, bspw. Auftragsdaten, eine Prognose für zukünftige Ereignisse abzuleiten. Zum anderen besteht die Möglichkeit aus echtzeitnahen Daten, bspw. Maschinendaten, Erkenntnisse über das Bauteil selber oder eine Vorhersage für den nachgelagerten Prozessschritt zu erhalten.

Data Mining zählt zu den datenbasierten Methoden und beschreibt im Allgemeinen die Extraktion von impliziten, vormals unbekanntem und potenziell brauchbaren Informationen aus Daten. Dabei werden Verfahren aus der Statistik und Informatik eingesetzt. Verfahren aus der Informatik umfassen insbesondere Machine Learning Verfahren. Ziel ist es, Zusammenhänge und Muster innerhalb der Daten von verschiedenen Quellen zu erkennen. Prognosen über die Durchlaufzeit von Fertigungsaufträgen zu treffen ist auf Grundlage von gesammelten Prozessdaten vorangegangener Aufträge möglich. Mit den gesammelten Auftragsdaten können folglich die Durchlaufzeiten kommender Prozesse abgeschätzt werden. Dies wird auch als Black-Box-Ansatz bezeichnet, da keine konkrete Ursache-Wirkungsbeziehung vorliegt. Es wird auf Basis der Eingangs- und Ausgangsdaten eine Beziehung zwischen den Daten kalkuliert und auf neue Eingangsdaten angewendet. Um im Werkzeugbau und der dort herrschenden Unikatfertigung eine solche Vorhersage treffen zu können, muss eine große Datenmenge als Referenz für zukünftige Analysen aufgebaut und dann sinnvoll gespeichert und verwaltet werden. Wichtige, den Fertigungsprozess und -zeiten betreffende, Daten können aus ERP-, MES- und PPS-Systemen entnommen werden. Ein spezielles Verfahren zur Analyse der aufgenommenen Daten stellt das Process-Mining dar. Process-Mining wendet speziell geschaffene Algorithmen auf Ereignisdaten an, um reale Prozessabläufe zu erkennen, zu überwachen und zu optimieren. Im Vergleich zum allgemeineren Data-Mining konzentriert sich Process-Mining auf die automatische Erhebung von implizitem Prozesswissen, das in Ereignisdaten bereits enthalten ist. Basierend auf den aus der Realität abgeleiteten Prozessdiagrammen lassen sich die Performanz und die Übereinstimmung von Prozess Ist-Abläufen mit Soll-Abläufen auswerten und anhand von verschiedenen Kennzahlen optimieren. Ziel ist es mit Hilfe von Entscheidungspunkten (Knoten) das Prozessnetz zu optimieren und Regeln aus den Ereignisdaten für zukünftige Entscheidungen abzuleiten. [12]

In Bild 8 ist ein vereinfachtes Beispiel für die Fertigung dargestellt: Während der Fertigung eines Bauteils werden die Ereignislogs aufgenommen. Wichtig dabei ist, dass jeder Vorgang zeilenweise eine (Bauteil-) ID, einen Zeitstempel, eine (Prozess-) Aktivität sowie eine Ressource (Maschine) enthält. Im vorliegenden Fall werden verschiedene Bauteile entweder gefräst, gedreht, erodiert und/oder geschliffen. Es sind im Beispiel zwei Fräsmaschinen, eine Drehmaschine und eine Senkerosionsanlage sowie zwei Schleifmaschinen in der Fertigung abgebildet. Die Bauteile können mit verschiedenen Prozessketten hergestellt werden. Basierend auf den Ereignislogs lässt sich ein Prozessplan ableiten. Über die einzelnen Verbindungen lässt sich die Häufigkeit darstellen, wie oft bspw. ein Bauteil nach dem Fräsen auf Maschine 2 noch geschliffen werden muss. Für eine Konformitätsprüfung kann beispielsweise der Plan aus der Arbeitsvorbereitung mit den aus

den Ereignisdaten (Rückmeldung des ERP-, MES- oder PPS-Systems) erstellen Prozessplan abgeglichen werden und die Planung darauf aufbauend optimiert werden. In einem letzten Schritt können mithilfe einer Performanzanalyse Optimierungspotenziale hinsichtlich der Zeit und Ressourcenausnutzung aufgedeckt sowie ein Entscheidungsbaum aufgestellt werden. Anhand des Beispiels lässt sich bspw. ableiten, dass wenn ein Bauteil auf Maschine 1 gefräst wird, muss es in der Regel nicht nachgeschliffen werden, da es sich um eine HSC-Fräsmaschine handelt.

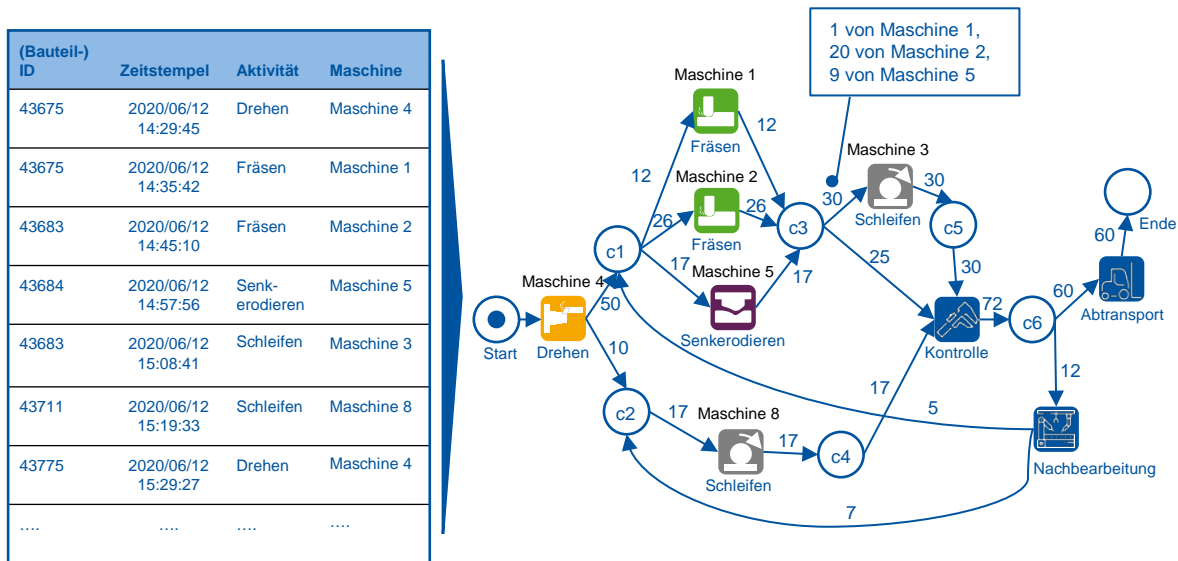


Bild 8: Process-Mining am Beispiel einer Bauteilfertigung

Betrachtet man in der industriellen Praxis alle Prozessschritte, Maschinen und Personen, die an der Fertigung eines Bauteils im Werkzeugbau beteiligt sind, wird schnell deutlich, dass in kurzer Zeit bereits eine große Masse und Komplexität an Daten aufkommt. Von daher ist es sehr wichtig, dass die Auftragsdaten in ausreichender Detaillierung dokumentiert werden und über einen größeren Zeitraum vorliegen. Sind diese Voraussetzungen jedoch alle erfüllt, bildet das Process-Mining eine verhältnismäßig einfache datenbasierte Methode die Prognosefähigkeit in der Fertigung zu erhöhen. Je mehr Daten zur Verfügung stehen, desto präziser kann der Algorithmus den Prozessplan erstellen.

Für den industriellen Werkzeugbau bedeutet das, dass die Analyse der Auftragsdaten einen ersten Schritt in Richtung Erhöhung der Prognosefähigkeit darstellt und somit die Flexibilität durch abgeleitete Entscheidungspunkte und -alternativen bildet. Jeder Werkzeugbau, der Auftragsdaten mit Hilfe von ERP-,MES- oder PPS-Systemen systematisch aufnimmt, ist mit Hilfe der richtigen Tools bereits in der Lage Process-Mining anzuwenden.

3.4 Datenstruktur für Fertigungsdaten

Mit zunehmender Digitalisierung ist eine Abkehr von der klassischen Automatisierungspyramide zu einem dezentralen Netzwerk zu beobachten. Die grundlegenden Begrifflichkeiten und Konzepte sowie die Struktur dieses neuen Paradigmas sind im „Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0“ (RAMI 4.0) unter der DIN SPEC 91345 genormt. Bildlich lässt sich RAMI 4.0 wie ein Würfel mit vielen integrierten Fächern vorstellen, welcher

verschiedene Assets nach Bekanntheit, Lebenszyklus und Kommunikationsfähigkeit einordnet. Betrachtet man aktuell die Aufnahme, das Speichern und Verwalten von Fertigungsdaten im Werkzeugbau sind dies primär Insellösungen, die nicht in einem Netzwerk oder einer Struktur integriert sind. In der Regel begrenzt sich die Aufnahme von Fertigungsdaten auf die Speicherung in csv-Dateien, die auf Servern abgelegt sind. Will man jedoch Daten auf längere Sicht aufnehmen und verwalten haben sich in der Vergangenheit die zwei Speicherprinzipien Data Warehouse und Data Lake durchgesetzt.

Das Data Warehouse stellt heterogene und verteilte Daten in einer einheitlichen (unternehmensweit) konsistenten Datenbasis bereit. Dabei wird die Datenstruktur zu Beginn definiert und die Daten werden somit in einer festen Struktur gebunden. Die Bereitstellung der Daten ermöglicht Anwendungen wie bspw. die Analyse von Zusammenhängen, die Prädiktion von Ereignissen und das Data- sowie Process-Mining [13]. Ein Data Warehouse bezieht Informationen aus operativen Datenquellen, die heterogene und möglicherweise inkompatible Daten bereitstellen. Die Informationen aus den operativen Datenquellen werden in einer für die Entscheidungsfindung optimierten Datenbank gesammelt, die in mehreren Dimensionen aufgebaut ist. Grafisch kann der Aufbau einer Datenbank in einem Data Warehouse als Data Cube dargestellt werden (s. Bild 9). Aus einem Data Cube können je nach Anwendung Zeilenweise Informationen extrahiert werden und bspw. mittels Process-Mining analysiert werden. Das übergeordnete Ziel des Data Warehousing ist es, große Datenbestände zu komprimieren und eine explorative Datenanalyse zu ermöglichen.

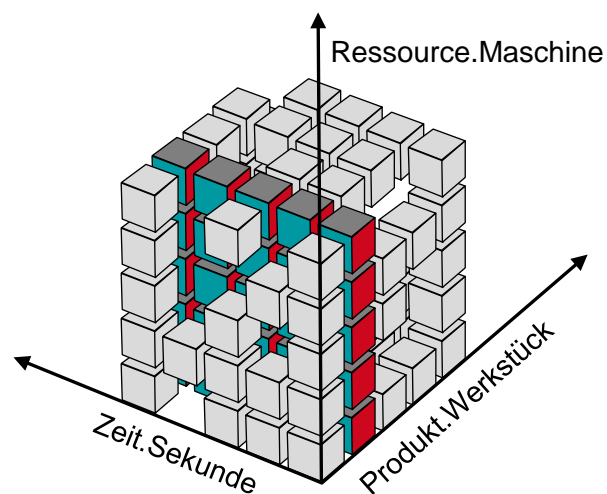


Bild 9: Data Cube

Ein „Data Lake“ beschreibt ein Speicher-Prinzip, welches sämtliche Rohdaten in den verschiedensten Formaten ohne konkrete Definierung in einer einzigen Datenbank sammelt. Anders als beim Data Warehouse wird nach dem Grundsatz: „Load the data and figure it out later“ vorgegangen. Im Zuge der Digitalisierung entstehen ständig neue Datentypen und das Datenvolumen nimmt weiterhin stark zu. Der Hauptanwendungsfall für Data Lakes ist die Vorverarbeitung und ETL-Transformation von Daten für die weitere Untersuchung durch andere Systeme. ETL-Transformation: Extract, Transform, Load ist ein Prozess, bei dem Daten aus mehreren gegebenenfalls unterschiedlich strukturierten Datenquellen in einer Zieldatenbank vereinigt werden. [14]

Im Vergleich beider Speicherprinzipien zeigen beide Vor- und Nachteile (s. Bild 10). Vorteile des Data Lake sind, dass die Daten im Rohdatenformat gespeichert werden, was im

Gegensatz zum Data Warehouse Ansatz eine vollständige Flexibilität bietet, die Daten zu einem späteren Zeitpunkt auf optimale Weise zu verarbeiten. Die Daten werden erst spät in einer festen Datenstruktur gebunden. Auf der anderen Seite besteht die Gefahr, dass der Data Lake sich zu einem sogenannten Datensumpf entwickelt, welcher voll von ungenutzten und miteinander inkompatiblen Datentypen ist. Ein strukturiertes und durchdachtes Metadatenmanagement wird deshalb zu einem kritischen Erfolgsfaktor [15]. Mit Hilfe des Metadatenmanagements kann somit eine Data Warehouse ähnliche Struktur in einem Data Lake implementiert werden, sodass ein hybrides System entsteht, welches die Vorteile von beiden Speicherprinzipien beinhaltet. Dies ermöglicht dem Werkzeugbau in einem zu Beginn definierten Pilotprojekt bereits Daten strukturiert aufzunehmen und zu analysieren. Falls sich der Anwendungsfall oder die Zielgröße ändert, besteht dennoch die Möglichkeit weitere Informationen zu integrieren.







	 Data Warehouse	 Data Lake
 Datenstruktur	Datentyp wird vor der Aufnahme und Speicherung von Daten definiert	Datentyp wird nach der Aufnahme und Speicherung von Daten definiert
 Datenanalyse	Einfach durchführbar, jedoch beschränkt auf die vordefinierten Möglichkeiten	Datenvorverarbeitung notwendig, beliebig skalier- und erweiterbar
 Zugänglichkeit	Datenzugang durch SQL; Daten werden gesucht	Datenzugang durch individuell programmierte Schnittstellen; Daten werden gescannt
 Datenspeicher	Hohes Datenvolumen von bereinigten Daten	Sehr hohes Datenvolumen von Rohdaten

Bild 10: Gegenüberstellung des Data Warehouse und Data Lake Speicherprinzips [i.A.a. 14]

3.5 Ausblick: Kopplung von modell- und datenbasierten Methoden

Die beiden vorgestellten Ansätze allein führen nur bedingt zu einer Erhöhung der Prognosefähigkeit, da zum einen die Masse an Daten nicht vorhanden ist, um präzise datenbasierte Prognosen zu treffen und zum anderen modellbasierte Methoden immer nur einen vereinfachten Ausschnitt aus der Realität widerspiegeln. Um KI-Methoden dennoch nutzen zu können, muss Prozesskompetenz mit in die datenbasierten Methoden integriert werden. Durch diesen Ansatz können Algorithmen schneller und gezielter angelernet werden und führen mit weniger Daten zum bestmöglichen Ergebnis. Um die KI-Systeme schneller anlernen zu können, sollen nicht nur große Datensätze, sondern auch Modelle genutzt werden. Dieser Ansatz wird als Grey-Box-Ansatz bezeichnet (s. Bild 11).

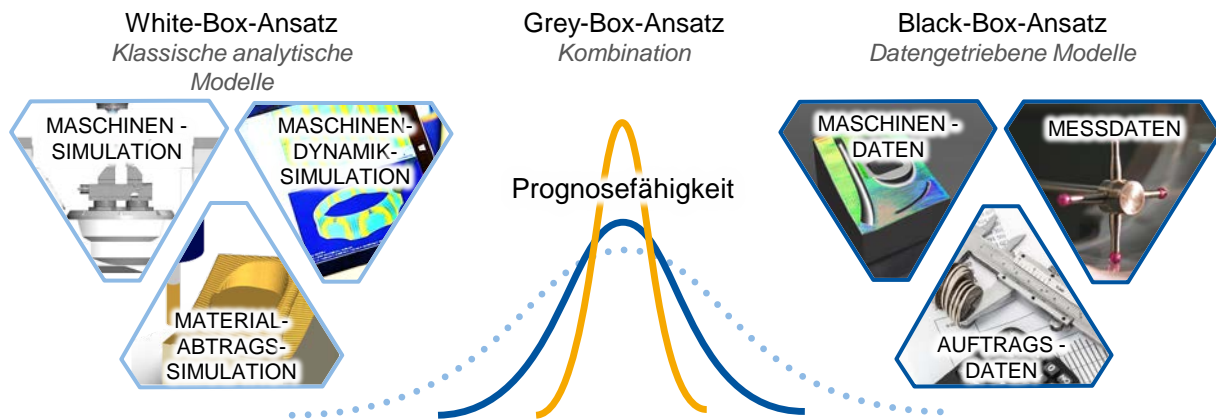


Bild 11: Grey-Box-Ansatz

Methodisch kommt zur Kopplung von Daten und Modellen beispielsweise das *Informed Machine Learning* zum Einsatz. Beim Informed Machine Learning wird innerhalb der Machine Learning Pipeline zusätzliches Wissen integriert. Dieses Wissen kann auf verschiedene Quellen wie z.B. physikalischen Zusammenhänge oder Expertenwissen beruhen. Repräsentiert wird dieses Wissen auf Basis verschiedener Funktionen wie bspw. algebraischen Funktionen, Simulationsergebnissen oder Wissensgraphen. Um Interferenzen zwischen den Daten und Modellen zu vermeiden ist es wichtig, dass das integrierte Wissen unabhängig von den aufgenommenen Daten ist. [16]

Für den Werkzeugbau könnte als einfaches Beispiel die Qualität eines Fräsprozesses durch die Aufnahme von Maschinendaten (z.B. den Achspositionen) und der Koordinatentransformation vom TCP (Tool Center Point) des Fräasers auf den Kontaktpunkt zwischen Fräuserschneide und Bauteil prognostiziert werden. Daraus resultiert die absolute Abweichung der Bauteil-Ist-Geometrie von der Soll-Geometrie. Im Zusammenhang mit der Prognose der Bearbeitungszeit ist ebenfalls die Kopplung eines datenbasierten Technologiemodells (s. Kap. 3.2) mit weiteren Technologiedaten denkbar. Dies reduziert die benötigten Eingangsdaten in einem klassischen Black-Box-Verfahren und führt, wie bereits erwähnt, zu besseren Ergebnissen mit weniger Trainingsdaten.

Die heute zur Verfügung stehenden Rechenleistungen würden diesen Ansatz zwar zulassen, doch oft scheitert die Umsetzung an der Bereitstellung von Prozessdaten und der mangelnden Interoperabilität von Maschinen, Sensorik und Software.

4 Zusammenfassung und Fazit

Im Zeitalter der Digitalisierung und dem stetig wachsenden Wettbewerbsdruck ist der Werkzeugbau dazu angehalten sich stets entlang der operativen und technologischen Exzellenz zu verbessern. Eine Möglichkeit besteht in der Auslegung von individuellen Prozessketten zur Erhöhung der Produktivität und Verkürzung der Durchlaufzeit in der mechanischen Fertigung im Werkzeugbau. Aktuell wird der Werkzeugbau aufgrund von unzureichender Prognosefähigkeit der Einzelprozesse jedoch an der Individualisierung der Prozessketten gehindert. Als Gründe sind zum einen die Herausforderungen der Unikatfertigung und zum anderen die hohe herrschende Dynamik in der Prozesssteuerung zu nennen. Versucht man zur Erhöhung der Prognosefähigkeit klassische Methoden des datenbasierten Lernens im Werkzeugbau anzuwenden, scheitert dies oft an der heterogenen IT-Landschaft und der hohen Komplexität der Fertigung. Aus diesen Gründen werden die wichtigsten Entscheidungen und Anpassungen innerhalb der Fertigung von

Menschen getroffen, die in der Regel auf der subjektiven Erfahrung oder dem Bauchgefühl beruhen.

Mit der Bildung von individuellen Prozessketten wurde ein Ansatz beschrieben, um den Mitarbeiter zukünftig verschiedene Handlungsalternativen aufzuzeigen und dadurch die genannten Potenziale in Form eines Routenplaners für die Fertigung zu nutzen. Neben kapazitiven Engpässen, sollen ebenfalls technologieübergreifende „Umfahrungen eines Staus“ möglich sein. Als Grundgerüst wurde ein System zur Klassifizierung von Aufträgen, Bauteilen, Maschinen und Fertigungstechnologie beschrieben, das dabei unterstützt die hohe Heterogenität in der Unikatfertigung zu reduzieren und somit sowohl ein Wissensmanagement aber auch eine automatisierte Arbeitsplanerstellung ermöglicht. Ausgehend von den aktuell unpräzisen Vorhersagen der einzelnen Prozessschritte, wurden daten- und modellbasierte Methoden aufgezeigt, um die Prognosefähigkeit im industriellen Werkzeugbau zu erhöhen. Das Process-Mining ist ein Analysetool mit dem sich verhältnismäßig einfach auf Basis von Auftragsdaten, Prozesspläne ableiten und Entscheidungspunkte aufdecken lassen. Innerhalb der modellbasierten Methoden fehlt es aktuell noch an einer flächendeckenden Integration, um Technologiemodelle und Simulationen bereits in der Planung nutzen zu können. Darüber hinaus ist es bis heute besonders in der Kerntechnologie Senkerosion schwierig, modellbasierte Prognosen für die zu erwartenden Bearbeitungszeit und Bauteilqualität zu treffen. Aufgrund des vergleichbar hohen Integrationsaufwand für modellbasierte Methoden (White-Box-Ansatz) zur Erhöhung der Prognosefähigkeit und der meist zu geringen Datenmenge für datenbasierte Methoden (Black-Box-Ansatz), wurde ein Grey-Box-Ansatz vorgestellt, der die Vorteile beider Methoden verbindet. Durch die Integration von Technologiemoellen in Form von bspw. Simulationen oder Wissensgraphen werden aufgenommene Daten innerhalb der Machine-Learning-Pipeline angereichert, sodass der Machine-Learning Ansatz weniger Trainingsdaten benötigt um valide Modelle zu erstellen. Erst wenn die Prognosefähigkeit ein ausreichendes Niveau erreicht hat und somit der Prognosefehler dementsprechend gering ist, lassen sich hochflexible und individuelle Prozessketten im Werkzeugbau implementieren und die aufgedeckten Potenziale nutzen. Im Thema Datenaufnahme und –nutzung steht der Werkzeugbau noch am Anfang. Um die Basis für ein strukturiertes Datenmanagement und zukünftige datenbasierte Prognosen und datengetriebene Prozessoptimierungen im Werkzeugbau zu schaffen, wurden zwei Speicherprinzipien (Data Warehouse und Data Lake) beschrieben und gegenübergestellt. Neben dem bereits erwähnten Datenmanagement, werden Möglichkeiten benötigt aus verschiedenen Datenquellen (Maschinen, IT-Systeme, CAx-Systeme) die notwendigen Daten zu extrahieren und Machine-Learning Methoden zur Verfügung zu stellen. Hierfür sind Stand heute keine Tools vorhanden, die den Anforderungen des Werkzeugbaus gerecht werden.

Wenn diese Hürden überwunden sind und sowohl die nötige Datenverfügbarkeit als auch das Zusammenführen von Maschinendaten, Technologiemoellen und Expertenwissen ermöglicht wurde, lässt sich die Vision von hochflexiblen und individuellen Prozessketten im Werkzeugbau realisieren (s. Bild 12).

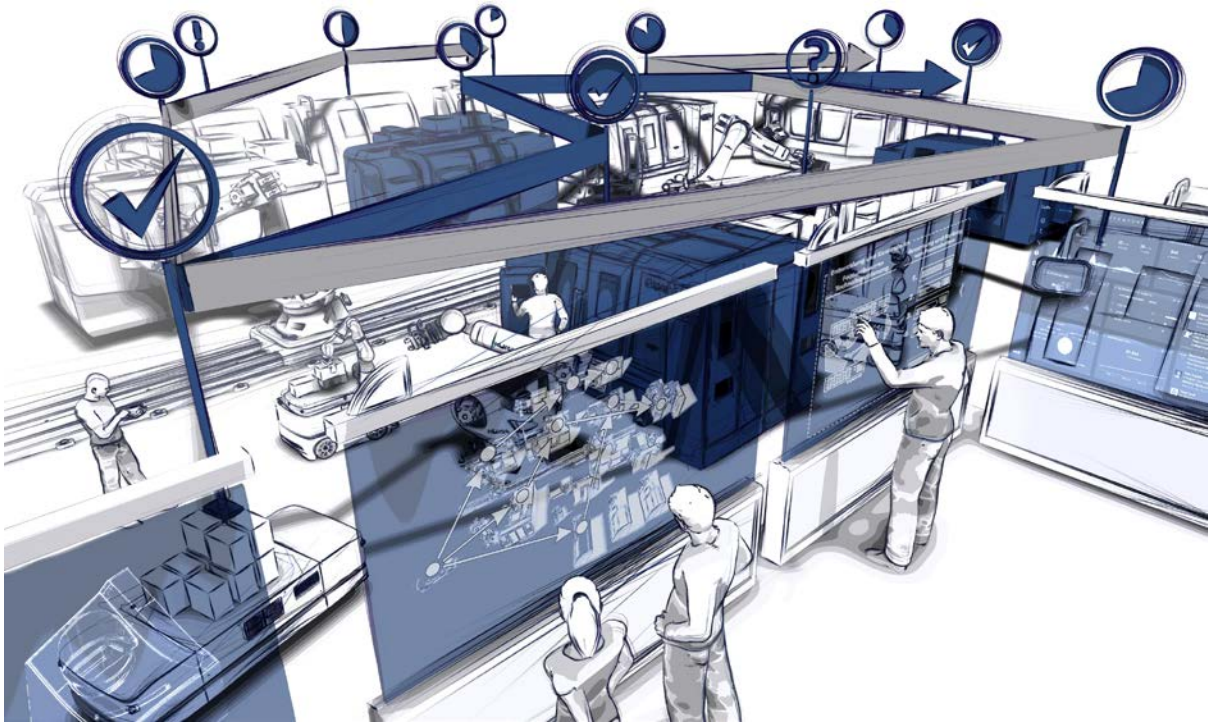


Bild 12: Vision – Smarter Werkzeugbau

Neben der erhöhten Produktivität in der mechanischen Fertigung ändern sich auch die Tätigkeitsfelder der Mitarbeiter, indem sie ihr werkzeugbauspezifisches Knowhow mehr in die vor- und nachgelagerten Prozessschritte miteinbringen. Durch die Integration von individuellen Prozessketten, lässt sich auf Knopfdruck auf Störungen reagieren und Stillstandszeiten werden vermieden. Entscheidender Faktor ist, dass dem Mitarbeiter Möglichkeiten aufgezeigt werden, die er ohne den hohen Grad an Datenverfügbarkeit und Prozessknowhow nicht in Betracht gezogen hätte. Neben der Optimierung der Planung und Steuerung und der damit verbundenen Optimierung der mechanischen Fertigung, lassen sich zusätzlich Synergien in der Kalkulation und auch in der Abbildung der eigenen Fähigkeiten finden. Durch die kontinuierliche Sammlung von Maschinen- und Fertigungsdaten lassen sich die eigenen Fähigkeiten weiter optimieren. Zusätzlich stehen im Sinne von digitalen Geschäftsmodellen dem Werkzeugbau noch weitere Möglichkeiten offen, sich vom Wettbewerb zu differenzieren.

Literatur

- [1] Boos, W.; Salmen, M.; Hensen, T.; Johannsen, L.; Kelzenberg, C.; Schippers, M.: Tooling in Germany. Aachen, 2016.
- [2] Willrett, M.: Forscher entwickeln System, das verschiedene Prozessketten vergleicht. URL: <https://industrieanzeiger.industrie.de/technik/fertigung/forscher-entwickeln-system-das-verschiedene-prozessketten-vergleicht/> [Stand: 24.01.2020].
- [3] Rüter, M.: Die Krise der Autoindustrie. Fragen und Antworten. URL: <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/autoindustrie144.html> [Stand: 21.01.2020].

- [4] VDMA Präzisionswerkzeuge: Konjunkturgrafiken zur Jahrespressekonferenz. URL: https://pwz.vdma.org/documents/105957/28593300/PK%202019-01-16_Grafiken_1548163439335.pdf/a47269c8-035b-540e-b9d8-cdaa4e76785a [Stand: 21.01.2020].
- [5] Zedtwitz, A.: 2019: Sieben Prozent Produktionsrückgang. URL: <https://pwz.vdma.org/viewer/-/v2article/render/46641815> [Stand: 18.04.2020].
- [6] Schuh, G.: Operative Exzellenz im Werkzeug- und Formenbau. 1. Aufl. Aachen: Apprimus, 2010.
- [7] Boos, W.; Kelzenberg, C.; Wiese, J.; Ebbecke, C.; Busch, M.; Haase, B.: Erfolgreich Planen und Steuern im Werkzeugbau. Aachen, 2019.
- [8] Yeo, S. H.; Kurnia, W.; Tan, P. C.: Critical assessment and numerical comparison of electro-thermal models in EDM. In: Journal of Materials Processing Technology. 203. Jg., 2008, Nr. 1, S. 241-251.
- [9] Vanderauwera, W.: Development of Process Planning Tools for EDM Operations. Diss. KU Leuven, 2017.
- [10] Klocke, F.; König, W.: Fertigungsverfahren 3. Abtragen, Generieren Lasermaterialbearbeitung. 4. Auflage. Berlin: Springer, 2007.
- [11] Hensgen, L.; Klink, A.: Projekt der WBA: Benchmark bestehender Drahtschnittstrategien für den Schnitt- und Stanzwerkzeugbau. In: Schuh, G.; Boos, W. (Hrsg.). In: Werkzeugbau Akademie - Forschungsbericht 2013/ 2014. Aachen, 2014.
- [12] Accorsi, R.; Ullrich, M.; van der Aalst, W. M. P.: Process Mining. In: Informatik-Spektrum. 35. Jg., 2012, Nr. 5, S. 354-359.
- [13] Han, J.; Kamber, M.; Pei, J.: Data mining. Concepts and techniques. 3. Aufl. Amsterdam: Elsevier, 2012.
- [14] Fang, H.: Managing Data Lakes in Big Data Era. What's a data lake and why has it became popular in data management ecosystem. In: 2015 IEEE International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER). Shenyang, China. 8.-12. June 2015. Piscataway: IEEE, 2015.
- [15] Gröger, C.; Hoos, E.: Ganzheitliches Metadatenmanagement im Data Lake. Anforderungen, IT-Werkzeuge und Herausforderungen in der Praxis. In: Datenbanksysteme für Business, Technologie und Web (BTW 2019). Bonn, 4.-8. März 2019, 2019.
- [16] Rueden, L. v.; Mayer, S.; Beckh, K.; Georgiev, B.; Giesselbach, S.; Heese, R.; Kirsch, B.; Pfrommer, J.; Pick, A.; Ramamurthy, R.; Walczak, M.; Garcke, J.; Bauckhage, C.; Schuecker, J.: Informed Machine Learning -- A Taxonomy and Survey of Integrating Knowledge into Learning Systems. URL: <http://arxiv.org/pdf/1903.12394v2> [Stand: 18.04.2020].

Mitarbeiter der Arbeitsgruppe für den Beitrag 1.3:

Prof. Dr.-Ing. Thomas Bergs MBA, WZL der RWTH Aachen und Fraunhofer IPT

Dr.-Ing. Kristian Arntz, Fraunhofer IPT

Dr.-Ing. Klaus Dieter Born, Tebis ProLeiS GmbH

Alfons Dunkes, Christian Karl Siebenwurst GmbH & Co. KG

Prof. Dr.-Ing. Ludwig Gansauge, TH Deggendorf

Markus Gräf, Werkzeugbau Siegfried Hofmann GmbH

Stefan Hofmann, Werkzeugbau Siegfried Hofmann GmbH

Sebastian Krell, SK Industriemodell GmbH

Lukas Linnepe, SK Industriemodell GmbH

Dr.-Ing. Markus Ohlenforst, IconPro GmbH

Marcel Prümmer, Fraunhofer IPT

Gerd Ringelmann, ZF Friedrichshafen AG

Dr.-Ing. Marc Stautner, ModuleWorks GmbH

Sebastian Stephan, TH Deggendorf

Sebastian Weber, Fraunhofer IPT

Steffen Wegner, Christian Karl Siebenwurst GmbH & Co. KG

Dr.-Ing. Jörg Weißkopf, simus systems GmbH

Marcel Wilms, Fraunhofer IPT

Patrick Wölfle, simus systems GmbH

Hans-Georg Zwicker, Hummingbird Systems GmbH