

Der Digitale Schatten der Produktion

Obwohl in der modernen Produktionstechnik große Mengen an Daten vorhanden sind, sind diese häufig weder einfach zugänglich, interpretierbar, noch so vernetzt, dass daraus Wissen generiert werden kann. Die Vernetzung und die Extraktion von Information sind damit auch weiterhin die zentralen Herausforderungen in der Produktionstechnik.

Die Produktion zeichnet sich durch eine breite Palette hochspezialisierter Technologien aus. Für die einzelnen Produktionstechnologien existiert umfassendes Expertenwissen, in komplexen Fertigungskontexten sind Details und Wechselwirkungen jedoch weiterhin Bestandteil der Forschung. Diese Bandbreite wird auch in dieser Ausgabe der *wt Werkstattstechnik online* wieder sehr gut abgebildet. Eine leistungsfähige Infrastruktur ist die Basis für die Aggregation der Daten und eine belastbare Extraktion von Information. Das Internet of Production IOP schafft den Rahmen für diese durchgängige, sichere und effiziente Architektur, die auf der Souveränität der erhobenen Daten fußt. Durch die Summe der generierten und aggregierten Daten – dem volumenstarken „Digitalen Schatten“ der Produktion – entsteht Prognosefähigkeit. Angefangen von der gesamten Produktentwicklung, bis hin zur schnellen, fehlerfreien Umsetzung von schnell erforderlichen Veränderungen in der Serienproduktion wird domänenübergreifendes Wissen generiert und genutzt. Dieser Ansatz der bedarfsgerechten Datenanalyse und der Anwendung von Algorithmen des maschinellen Lernens birgt großes Potenzial und wichtige Impulse für die Produktionstechnik mit den verschiedenen hochspezialisierten Disziplinen.

Der Begriff der Digitalisierung steht dabei für eine neue Generation technischer Entwicklungen, die vermehrt in unternehmerische Kern- und Supportprozesse eingeführt werden. Die Digitalisierung und der Wandel der Kundenbedürfnisse verändern das Nutzerverhalten sowie das Nutzenverständnis der Kunden und erfordern eine Anpassung oder Neugestaltung von Geschäftsmodellen. Die Entwicklungen im Bereich der Automatisierung vor dem Hintergrund steigender Datendurchgängigkeit in Kombination mit der Verfügbarkeit frei zugänglicher Datenanalyseplattformen und -algorithmen erweitern insbesondere auch die Möglichkeiten der Methoden im Qualitätsmanagement. Im unternehmerischen Umfeld zeigen sich bereits heute zahlreiche erprobte Anwendungsbeispiele neuer Data Mining Methoden und neuer Einsatzfelder des maschinellen Lernens als Baustein des Überbegriffs der Künstlichen Intelligenz zur Beantwortung unternehmerischer Fragestellungen. Damit entwickeln sich zahlreiche Ansätze, aber auch bereits konkrete Anwendungsfälle dieser neuen Technologien. Diese besitzen das Potenzial, wesentliche Bereiche der Domäne nachhaltig zu verändern – Begriffe wie Qualität 4.0, Predictive Quality oder Quality Analytics sind einige der Metaphern der aktuellen Entwicklung und Forschung.

Die Beiträge dieser Ausgabe greifen diese Herausforderungen auf und stellen innovative neue Ansätze aus den verschiedenen Bereichen der Produktionstechnik vor. Unser Dank gilt daher den Autoren für das Einreichen der Beiträge und den Reviewern, die die Bewertung der Beiträge vorgenommen haben.

Wir wünschen Ihnen viel Freude beim Lesen und hoffen, dass Sie sich von den Beiträgen inspirieren lassen.



Prof. Dr.-Ing. **Robert H. Schmitt**
Bild: WZL der RWTH Aachen

Professor im Laboratorium für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre (WZL) der RWTH Aachen; Mitglied des Direktoriums von Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie und WZL



Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. **Martin Peterik**
Bild: WZL der RWTH Aachen

Geschäftsführender Oberingenieur am WZL der RWTH Aachen

Strategien zur datenbasierten Qualitätsregelung kollaborativer Wertschöpfungsnetzwerke

Qualitätsregelstrategien in Wertschöpfungsnetzwerken

R. Silbernagel, R. Wagner, B. Häfner, G. Lanza

In Zeiten der Globalisierung und Digitalisierung führen Silodenken und Protektionismus zu Wettbewerbsnachteilen aller Partner eines Wertschöpfungsnetzwerkes. Ineffizienzen zeigen sich zum Beispiel durch hohen Ausschuss und geringe Margen der Zulieferer für die Produktion hochpräziser Produkte. Der Beitrag zeigt auf, wie Kollaboration in der Supply Chain mit unternehmensübergreifenden Qualitätsregelstrategien zur Steigerung der Qualität und Senkung der Qualitätskosten beiträgt.

STICHWÖRTER

Qualitätsmanagement, Industrie 4.0, Produktionstechnik

Quality control loops in production networks – Strategies for data-based quality control in collaborative production networks

In times of globalization and digitalization, silo thinking and protectionism lead to competitive disadvantages for all partners of the production network. Inefficiencies can be seen, for example, in high reject rates and low supplier margins for the production of high precision products. This article shows how collaboration in the supply chain with cross-company quality control loops contributes to increasing quality and reducing quality costs.

1 Einleitung

Die Globalisierung hat der deutschen Industrie in den letzten Jahren zu großem Wohlstand verholfen [1]. Dabei zeichnen sich deutsche Produkte durch ihre hohe Qualität und Präzision aus. Diese Qualität kann oft nur aufrechterhalten werden, indem für die einzelnen Komponenten und Vorprodukte sehr enge Toleranzen festgelegt werden [1, 2]. Die Verantwortung zur Einhaltung dieser Toleranzen wird in globalen Wertschöpfungsnetzwerken (WSN) oft an die Zulieferer weitergegeben. Bei der Produktion hochpräziser Komponenten kommen Produktionsprozesse oft an ihre technologischen Grenzen [2–4]. So kann es bei Zulieferern für hochpräzise Produkte zu hohem Ausschuss kommen, der sich als erhöhte Kosten bei den Zulieferern und in Form von Ineffizienzen in der gesamten Lieferkette zeigt. Um auch künftig im globalen Wettbewerb zu bestehen, müssen solche Verschwendungen innerhalb des eigenen WSN vermieden werden. [5–7]

Der Beitrag liefert einen Ansatz, wie durch Kollaboration im Wertschöpfungsnetzwerk unternehmensübergreifende Qualitätsregelstrategien für die Herstellung hochpräziser Produkte aufgebaut werden können, die eine Win-Win-Situation für Zulieferer und Endproduzenten beschreiben und somit die Wettbewerbsfähigkeit des gemeinsamen globalen WSN stärken. Die durch Digitalisierung erreichte notwendige Transparenz dient dabei als zentraler Befähiger für die Kollaboration [8].

2 Stand der Technik

Die Vorteile von Transparenz und Kollaboration in WSN wurden in der Theorie bereits an vielen Stellen untersucht und

aufgezeigt, vor allem für den „Bullwhip-Effekt“, aber auch für die Verbesserung der Qualität und die wertschöpfungskettenweite Umsetzung von Produktänderungen im Serienbetrieb [8–11]. Gleichzeitig wächst die Bedeutung von Daten in der Produktion enorm. Dies hat etwa zur Folge, dass Unternehmen die Datenverfügbarkeit bei Make-or-Buy-Entscheidungen als zusätzlichen Faktor hinzuziehen. Jedoch ist in der Industrie nach wie vor ein geringer Umsetzungsgrad von operativer Kollaboration in Lieferbeziehungen zu beobachten und es herrscht ein Silodenken vor. Gründe können einerseits mangelndes Vertrauen und die Angst vor Daten- und Kontrollverlust sein. Andererseits verhindern auch Faktoren wie mangelnde Standardisierung der IT-Architektur, zu hohe Investitionskosten (besonders für kleine und mittlere Unternehmen KMU) und fehlende Anreize einen höheren Grad an Kollaboration in globalen WSN. [8, 10–14]

Die zunehmende Vernetzung im Industrial Internet of Things (IIOT) und die Standardisierung der IT-Infrastruktur, welche im Rahmen von Industrie 4.0 vorangetrieben wird, bieten die Möglichkeit, diese Herausforderungen zu bewältigen [13, 14]. Das Forschungsvorhaben „Datenbasierte Regelung kollaborativer Wertschöpfungsnetze mittels geschützter Transparenz“ (ReKo-NeT) untersucht in diesem Zusammenhang vor allem die Auswirkung der Digitalisierung auf die Kollaboration in globalen WSN. Dabei stehen ein geschützter Austausch der Daten und die Gestaltung der Anreize zur besseren Umsetzbarkeit, besonders für KMU, im Vordergrund. [11]

Bei der Produktion hochpräziser Produkte kommt es durch die ungünstige Kombination einzelner Komponenten oft zu einer Funktionsnichterfüllung des Endproduktes, obwohl die einzelnen Komponenten innerhalb der Toleranz sind. Diese Funktions-

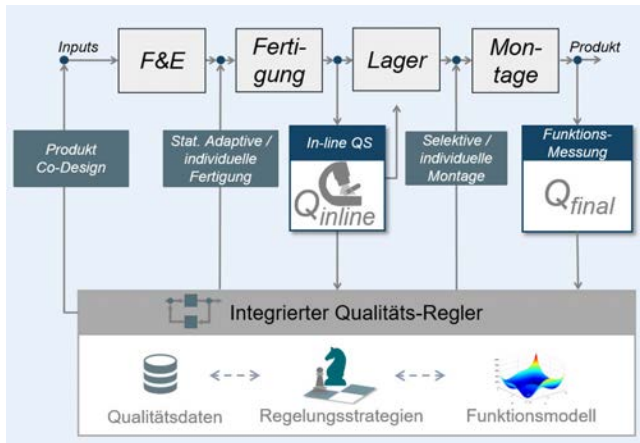


Bild 1. Qualitätsregelstrategien für Produktion und Produktentwicklung auf Basis eines integrierten Qualitätsreglers [3]. Bild: wbk KIT

nichterfüllung wird in der Regel erst im End-of-Line-Test (EOL) festgestellt, der meist bei 100 % der Baugruppen durchgeführt wird. Die bereits sehr engen Fertigungstoleranzen können nur unter erhöhtem, unwirtschaftlichem Aufwand noch enger gesetzt werden, da die korrespondierenden Fertigungsprozesse an die Grenze des technologisch Möglichen kommen. Beispiele hierfür sind vielfältige Ventile, Injektoren oder Getriebe, welche in unterschiedlichen Industrien wie der Automobilindustrie oder Medizintechnik zum Einsatz kommen. In der Literatur existieren zahlreiche Ansätze zur Steuerung der Qualität und Senkung des Ausschusses mit sogenannten Qualitätsregelstrategien. Die Grundidee dieser Qualitätsregelstrategien ist die gezielte Vermeidung ungünstiger Kombinationen grenzlagiger Bauteile. Dies wird ermöglicht durch eine Paarung von Bauteilen, die tendenziell zu einer Funktionsuntererfüllung führen, mit kompensierenden Bauteilen, die andernfalls zu einer Funktionsübererfüllung führen würden. [2–4, 15–17]

Eine Übersicht über mögliche Qualitätsregelstrategien ist in [2] und [4] zu finden und wird von [3] erweitert (**Bild 1**).

Dabei kann sowohl für die Fertigung als auch für die Montage nach dem Grad der Individualisierung unterschieden werden. Durch die vorhandene Inline-Messtechnik kann die Montage entweder selektiv oder individuell erfolgen. Bei der selektiven Montage werden die Bauteile anhand ihrer Zugehörigkeit zu zuvor definierten Merkmalsklassen gepaart. Für eine individuelle Montage werden die jeweils am besten zueinander passenden Bauteile anhand ihrer spezifischen Merkmalsausprägungen miteinander gepaart. Letzteres bietet eine deutlich genauere Kompensation eventueller Funktionsüber- oder untererfüllungen, jedoch sind die Anforderungen an den integrierten Qualitätsregler und die Datenrückverfolgbarkeit entsprechend höher. [2–4]

Weitet man diesen Regelkreis auf die Fertigung der Komponenten aus, so kann wiederum nach dem Grad der Individualisierung auf zwei Arten in die Fertigung eingegriffen werden: statistisch adaptiv oder individuell. Bei der statistisch adaptiven Fertigung werden die Prozessparameter derart manipuliert, dass sich der Mittelwert der statistischen Gesamtheit einer spezifischen Charge verschiebt, etwa zur Nachproduktion einer spezifischen Merkmalsklasse zur Funktionsübererfüllung für die selektive

Montage. Bei der individuellen Fertigung hingegen wird ein Bauteil passend zu seinem zuvor vermessenen individuellen Gegenstück angefertigt. [2–4]

Grundvoraussetzung für alle zuvor genannten Qualitätsregelstrategien ist zum einen das Vorhandensein der notwendigen Qualitätsdaten und eine vollständige Datenrückverfolgbarkeit. Zum anderen ist die Integration von Produktwissen in die Produktion von zentraler Bedeutung. Es muss bekannt sein, wie sich die Kombination spezifischer Merkmale auf die Funktionserfüllung des Produktes auswirkt. Im Ansatz von [3] geschieht dies beispielsweise auf Basis eines spezifischen Funktionsmodells, die Paarung kann allerdings auch auf Basis geometrischer Merkmale durchgeführt werden. [2–4, 15, 17]

Durch die Integration des Produktwissens in die Produktion kann der Regelkreis abermals hinsichtlich des Co-Designs des Produktes, insbesondere der Anpassung der Toleranzen, erweitert werden. Durch den Rückfluss des Wissens aus der Produktion in die Entwicklung und die Möglichkeit der Kompensation grenzlagiger Teile durch den integrierten Qualitätsregler können die engen Toleranzen bei gleichbleibender Produktqualität zum Beispiel aufgeweitet werden. [3]

3 Einsatz von Qualitätsregelstrategien in kollaborativen Wertschöpfungsnetzwerken

Wie zuvor dargelegt, betrachten die bisherigen Ansätze zur Qualitätsregelung maximal die Qualitätsregelung innerhalb eines Werkes zwischen Fertigung und Montage [2–4]. Der vorliegende Ansatz erweitert diese Regelkreise auf kollaborative WSN aus Sicht des fokalen Unternehmens. Dabei ist das Ziel, durch die horizontale Integration einzelner, qualitätskritischer Lieferanten einen global integrierten Qualitätsregler zu implementieren, der im operativen Betrieb die Prozesse im gemeinsamen WSN regelt und dadurch Ineffizienzen in der gesamten Lieferkette reduziert. Als zentrales Werk im WSN wird das Werk betrachtet, welches die Endmontage des Produktes durchführt. Es wird als interner Kunde bezeichnet, während Werke innerhalb des eigenen Produktionsnetzwerkes, die Komponenten des Produktes fertigen, als interne Zulieferer bezeichnet werden.

Bild 2 stellt basierend auf dem Ansatz von [3] aus Bild 1 einen Ansatz für einen derartigen global integrierten Qualitätsregler dar. In Anlehnung an den integrierten Qualitätsregler aus [3] wird innerhalb jedes Werks die Qualität zwischen Fertigung und Montage dezentral in Echtzeit mithilfe der Qualitätsdaten, eines Funktionsmodells und den hinterlegten Regelstrategien geregelt. Im Rahmen des Industrial Internet of Things (IIOT) dient Edge Computing als zentraler Befähiger für die dezentrale, werksinterne Qualitätsregelung in Echtzeit [14]. Erweitert wird der Ansatz von [3] um die Betrachtung mehrerer Werke und die Integration der Logistik. Handelt es sich um ein sensorisiertes Endprodukt, besteht zusätzlich die Möglichkeit, Daten aus dem Feld zu erheben und diese zurück in die Produktion und Entwicklung zu spielen.

Basierend auf den Qualitäts- und Felddaten regelt der global integrierte Qualitätsregler mit einem mittelfristigen Zeithorizont die Qualität auf zentraler Ebene. Dies kann etwa als kollaborativer Service auf einer gemeinsamen Plattform geschehen, aber auch zentral beim Kunden. Für die Möglichkeiten der Datenüber-

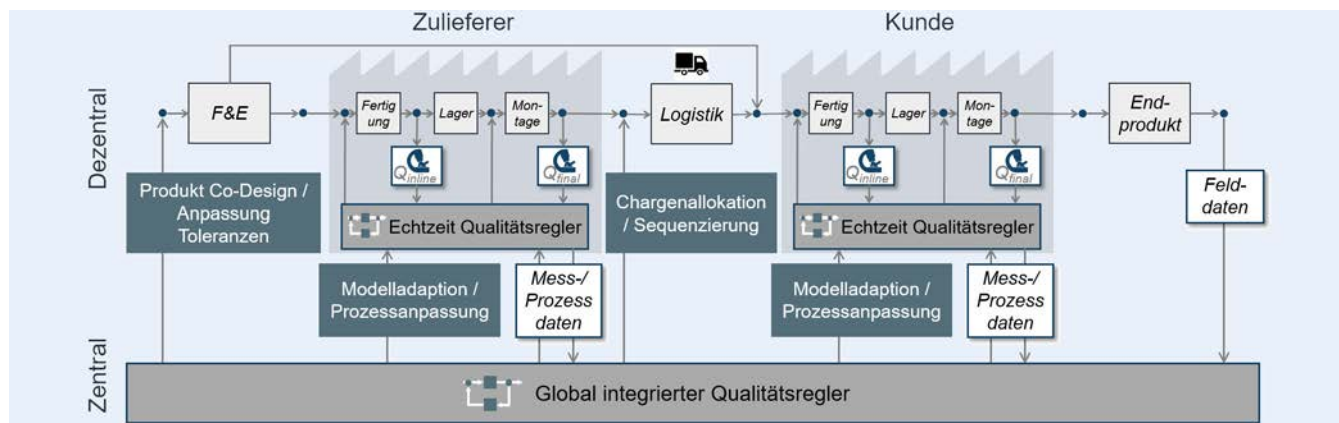


Bild 2. Global integrierter Qualitätsregler in kollaborativen Wertschöpfungsnetzwerken. Bild: wbk KIT

tragung zwischen Unternehmen sei auf das Referenzmodell für die industrielle Cloud Federation nach DIN SPEC 92222 verwiesen [18]. Durch das Vorhandensein von Qualitätsdaten aus mehreren Werken können logistische Qualitätsregelstrategien angewendet werden. Wie bei [3] können auch hier verschiedene Strategien nach dem Grad der Individualisierung abgeleitet werden: Chargenallokation und Sequenzierung. Auf Chargenebene kann anhand der statistischen Verteilungen der qualitätskritischen Merkmale in einer Charge durch geschicktes Paaren der einzelnen Komponentenchargen die Streuung in der Endmontage reduziert werden. Die Sequenzierung kann als individuelle Montage verstanden werden, jedoch wird direkt nach der Produktion der Komponenten festgelegt, welche individuellen Bauteile anhand ihrer individuellen Merkmalsausprägung gepaart werden und die entsprechenden Bauteile im Rahmen einer Just-in-sequence-Logistik zum richtigen Zeitpunkt in der vorbestimmten Reihenfolge in der Endmontage bereitgestellt.

Der global integrierte Qualitätsregler steuert zusätzlich die dezentralen Echtzeitregler. Durch die Verknüpfung der Daten zwischen den Werken wird eine werksübergreifende statistisch adaptive beziehungsweise individuelle Fertigung ermöglicht. Die Vorgabe zur Anpassung der Prozessparameter wird vom zentralen Regler eingesteuert und vom dezentralen Regler in Echtzeit ausgeführt. Zudem verwaltet der global integrierte Qualitätsregler die Funktionsmodelle der dezentralen Regler und passt diese regelmäßig auf Basis der Daten aus der Produktion und dem Feld an.

Den Kern des Ansatzes zur Senkung des Ausschusses beim Zulieferer bildet das Produkt-Co-Design. Durch die Preisgabe der Informationen kann die Verantwortung über den Ausschuss an den Kunden beziehungsweise die Endmontage weitergegeben werden und somit im Rahmen des Produkt-Co-Designs die Toleranzen beim Zulieferer sowie in der internen Fertigung aufgeweitet werden. Komponenten, die vorher außerhalb der Toleranz waren, können mit dem Qualitätsregler noch zu funktionsfähigen Produkten verarbeitet werden. Zudem kann durch den Rückfluss der Felddaten in die Entwicklung eine applikationsgerechte Bauteildimensionierung und -tolerierung ermöglicht werden.

Aktuell bestehen verschiedene Herausforderungen, die zur Erweiterung des Systems auf interne und externe Zulieferer überwunden werden müssen. Sie ergeben sich aufgrund der existierenden physischen und informatorischen Unternehmensgrenzen:

- keine gemeinsame (IT)-Infrastruktur,
- erschwerte Sicherstellung einer vollständigen Rückverfolgbarkeit und Zuordnung der übermittelten Daten zu Chargen und den individuellen Komponenten,
- Ausschuss des Zulieferers nicht direkt beobachtbar,
- kein vollständiger Zugriff auf Mess- und Prozessdaten (vor allem Prozessfähigkeiten und Messunsicherheiten) des Zulieferers,
- Validierung der übermittelten Daten des Zulieferers nicht oder nur schwer möglich,
- Verantwortung über Produktion der Komponente (inklusive Entscheidung über Ausschuss) liegt bei Zulieferer
- daher erschwerter oder kein Eingriff auf Prozessparameter des Zulieferers,
- logistische Herausforderungen,
- erschwerte Integration und Regelung logistischer Prozesse vom Lieferanten zur Sicherstellung der Lieferfähigkeit,
- erschwerte Durchführung von Produktänderungen in der Wertschöpfungskette beim Lieferanten,
- fehlende Informationen zu Kostenstruktur des Zulieferers,
- unterschiedliche strategische Interessen der Partner.

Als Befähiger im Umgang mit diesen Freiheitsgraden dient die operative Kollaboration zwischen Zulieferern und Kunden im gemeinsamen WSN (siehe [11]). Kollaboration wird in diesem Zusammenhang definiert als die Zusammenarbeit zwischen zwei oder mehreren Akteuren, welche normalerweise unabhängig voneinander tätig sind, über einen bestimmten Zeitraum und für ein bestimmtes Ziel [12]. Die Herausforderungen und Freiheitsgrade des global integrierten Reglers unterscheiden sich je nach Grad der Kollaboration. Der Grad der Kollaboration kann in einem Kollaborationsreifegradmodell in 5 Stufen unterteilt werden (Bild 3). Diese gliedern sich anhand der Möglichkeit des Datenaustausches und des Eingriffs in Prozessparameter innerhalb eines Werkes und mit internen und externen Lieferanten.

Je nach Stufe müssen unterschiedliche Annahmen für die zugrunde liegenden Entscheidungsunterstützungssysteme zur Bewertung der möglichen Qualitätsregelstrategien getroffen und Anreize für die Freigabe von Informationen entwickelt werden, um auf eine höhere Stufe der Kollaboration zu gelangen [3, 11].

Stufe 1 zeichnet sich durch den Datenaustausch innerhalb des Werkes aus. Durch die Zuordnung von Mess- und Prozessdaten aus vorangegangenen Prozessen innerhalb des gleichen Werkes über

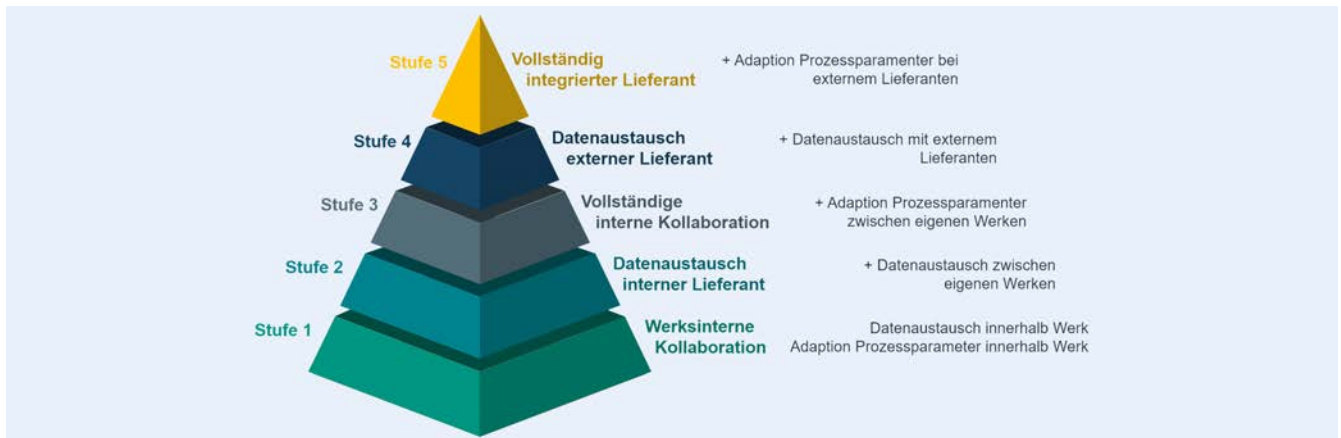


Bild 3. Kollaborationsreifegradmodell zur Qualitätsregelung in globalen Wertschöpfungsnetzwerken. Bild: wbk KIT

individuelle Identifier ist eine Qualitätsregelung zwischen Fertigung und Montage möglich. Die bisherigen Ansätze des Stands der Technik lassen sich in dieser Stufe verorten. Interne und externe Lieferanten werden als Black Box betrachtet und es ist keine Regelung der Logistik möglich. Merkmale interner und externer Zulieferteile müssen im Vorfeld als Verteilung angenommen werden und werden nach den vorgegebenen Spezifikationen des Datenblatts auf Mittelwert gefertigt. Ein Produkt-Co-Design im Sinne der Anpassung von Toleranzen ist nur für die werksinterne Fertigung möglich.

Stufe 2 beschreibt den ersten Grad einer werksübergreifenden Kollaboration durch den Datenaustausch zwischen verschiedenen Werken im Produktionsnetzwerk. Durch die Zuordnung von Mess- und Prozessdaten aus vorangegangenen Prozessen im gleichen Werk und aus Werken interner Lieferanten herrscht eine vollständige interne Traceability. Es ist jedoch kein steuernder Eingriff in Prozesse des Werks des internen Lieferanten möglich. Die Entscheidung über den Ausschuss des internen Lieferanten kann aber fortan auf den internen Kunden beziehungsweise den Qualitätsregler übertragen werden, wodurch potenziell Toleranzen beim internen Kunden aufgeweitet werden können. Die möglichen Qualitätsregelstrategien können auf die Logistik erweitert werden. Chargenallokation und Vorsequenzierung sind zwischen Werken des internen WSN möglich.

Stufe 3 stellt die vollständige Kollaboration mit dem internen Lieferanten dar. Zusätzlich zu Stufe 2 kann der Qualitätsregler Prozesse innerhalb des Werks des internen Lieferanten an Daten und Prozesse des internen Kunden anpassen. In Stufe 2 und 3 werden externe Lieferanten weiterhin als Blackbox betrachtet und liefern ausschließlich nach Spezifikation des Datenblatts.

Stufe 4 und 5 verhalten sich wie Stufe 2 und 3, allerdings bezogen auf den externen Lieferanten. Es besteht eine vollständige Traceability zwischen Kunde, internen und externen Lieferanten. Die Entscheidung über den Ausschuss bei internen und externen Lieferanten kann auf den Kunden beziehungsweise den Qualitätsregler übergehen und die Toleranzen können sowohl intern als auch extern aufgeweitet werden. Die Regelung kann auf die Logistik zwischen internen und externen Werken erweitert werden. Während Stufe 4 sich nur durch den Datenaustausch mit

dem externen Lieferanten auszeichnet, zeichnet sich Stufe 5 durch die Möglichkeit der Adaption der Prozessparameter intern sowie extern aus. Stufe 5 kann als Grundlage für die Vision einer toleranz- und ausschussfreien Serienfertigung gesehen werden.

4 Industrieller Anwendungsfall

Die vorliegende Forschungsarbeit wird anhand des WSN zur Herstellung von Injektoren eines 1-Tier Automobilzulieferers bearbeitet (im Weiteren als Kunde bezeichnet). Aufgrund der hohen Anforderungen an Injektoren unterliegt die Produktion sehr engen Fertigungstoleranzen im Bereich weniger Mikrometer. Bereits kleine Änderungen qualitätskritischer Merkmale könnten andernfalls dazu führen, dass die vorgegebenen Emissionsvorgaben nicht eingehalten werden. [19]

Konkret kann im Use Case beobachtet werden, dass bei einem Zulieferer Komponenten nach dem EOL-Test aufgrund der engen Fertigungstoleranzen als Ausschuss deklariert werden. Der zu beobachtende Ausschuss befindet sich bei mehr als 10 %, ist aber aus Sicht des Kunden nicht beobachtbar. Aus Sicht des Zulieferers bedeutet dies sehr hohe Kosten und eine niedrige Liefertreue, welche sich wiederum auf Seiten des Kunden in Kosten durch Produktionsausfälle widerspiegeln kann. Es besteht somit großes Potenzial durch Aufweiten der Toleranzen für diese Komponente einen großen Teil der Ausschussteile ohne Funktionseinbußen des Injektors weiterverwenden zu können. Da der Zulieferer somit in die Lage versetzt werden kann, diese Teile ohne Nachteil zu einem geringeren Preis anzubieten, würde dies zu einer Win-Win Situation für Zulieferer und Kunde führen. Zudem kann auf Basis der Informationen des Zulieferers die Qualität aller Bauteile geregelt werden, wodurch auch beim Kunden die Gutausbringung gesteigert werden kann und Qualitätskosten gesenkt werden können.

Neben den genannten finanziellen Anreizen, kann zum Beispiel auch die Aussicht auf langfristige Geschäftsbeziehungen ein Anreiz zur Kollaboration des Lieferanten mit dem Kunden und somit zur Beseitigung der Ineffizienz und zur nachhaltigen Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit sein.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Der von [3] entwickelte Ansatz konnte mit Blick auf die Sicherstellung der Wettbewerbsfähigkeit der gesamten Lieferkette um den Einsatz von Qualitätsregelstrategien in kollaborierenden Wertschöpfungsnetzwerken erweitert werden. Ein Kollaborationsreifegradmodell zur Strukturierung der sich aus der gestiegenen Komplexität ergebenden Freiheitsgrade wurde vorgestellt.

In den anknüpfenden Forschungsarbeiten wird ein konkretes Entscheidungsunterstützungsmodell zur technischen und wirtschaftlichen Bewertung der Qualitätsregelstrategien auf Basis der je nach Kollaborationsreifegrad auszutauschenden Daten entwickelt werden, das mögliche Anreize zur Steigerung der Kollaboration generiert. Zudem sollte die Integration des Konzepts der Verwaltungsschale als Befähiger für eine durchgängige individuelle Datenrückverfolgbarkeit erforscht werden.

DANKSAGUNG

Das Forschungs- und Entwicklungsprojekt „ReKoNeT“ wird durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Programm „Innovationen für die Produktion, Dienstleistung und Arbeit von morgen“ gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut.

Literatur

- [1] Lanza, G.; Ferdows, K.; Kara, S. et al.: Global production networks: Design and operation. CIRP Annals 68 (2019) 2, pp. 823–841
- [2] Lanza, G.; Haefner, B.; Kraemer, A.: Optimization of selective assembly and adaptive manufacturing by means of cyber-physical system based matching. CIRP Annals 64 (2015) 1, pp. 399–402
- [3] Wagner, R.; Haefner, B.; Lanza, G.: Function-Oriented Quality Control Strategies for High Precision Products. Procedia CIRP 75 (2018), pp. 57–62
- [4] Wagner, R.; Haefner, B.; Lanza, G.: Paarungsstrategien für hochpräzise Produkte. Industrie 4.0 bietet Potenziale bei steigenden Präzisionsanforderungen kostengünstig zu produzieren. wt Werkstatttechnik online 106 (2016) 11/12, S. 804–808. Internet: www.werkstatttechnik.de. Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag
- [5] Sydow, J.; Möllering, G.: Produktion in Netzwerken. Make, buy & cooperate. München: Verlag Vahlen 2009
- [6] Wiendahl, H.-P.; Lutz, S.: Production in Networks. CIRP Annals 51 (2002) 2, pp. 573–586
- [7] Lee, H. L.; Padmanabhan, V.; Whang, S.: Information distortion in a supply chain: The bullwhip effect. Management science 43 (1997) 4, pp. 546–558
- [8] Treber, S.; Lanza, G.: Transparency in Global Production Networks: Improving Disruption Management by Increased Information Exchange. Procedia CIRP 72 (2018), pp. 898–903
- [9] Wang, X.: Research on the construction of supply chain collaboration system based on information sharing. International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering (ICII), Sanya/China, 2012, pp. 469–472
- [10] Völker, R.; Neu, J.: Supply Chain Collaboration. Heidelberg: Physica-Verlag HD 2008
- [11] Silbernagel, R.; Stamer, F.; Häfner, B. et al.: Kollaboration in globalen Wertschöpfungsnetzwerken. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 114 (2019) 5, S. 314–317
- [12] Cao, M.; Vonderembse, M. A.; Zhang, Q. et al.: Supply chain collaboration: conceptualisation and instrument development. International Journal of Production Research 48 (2010) 22, pp. 6613–6635
- [13] BMWi (Hrsg.): Erschließung der Potenziale der Anwendung von Industrie 4.0 im Mittelstand. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 2015
- [14] BMWi (Hrsg.): Technischer Überblick: Sichere unternehmensübergreifende Kommunikation. Stand: 2016. Internet: https://www.plattform-i40.de/I40/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/sichere-unternehmensuebergreifende-kommunikation.pdf?__blob=publicationFile&v=10. Zugriff am 26.11.2019
- [15] Colledani, M.; Ebrahimi, D.; Tolio, T.: Integrated quality and production logistics modelling for the design of selective and adaptive assembly systems. CIRP Annals 63 (2014) 1, pp. 453–456
- [16] Zhang, P.; Renken, V.; Goch, G.: Cross-plane quality control concept of the bearing ring production. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 43 (2012) 1–2, pp. 37–41
- [17] Colledani, M.; Tolio, T.; Fischer, A. et al.: Design and management of manufacturing systems for production quality. CIRP Annals 63 (2014) 2, pp. 773–796
- [18] DIN SPEC 92222. Reference Model for Industrial Cloud Federation. Ausgabe 2019
- [19] Reif, K. (Hrsg.): Diesel-Speichereinspritzsystem Common Rail. Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag 2015



Rainer Silbernagel, M.Sc.,
Bild: wbk KIT

Raphael Wagner, M.Sc.,
Dr.-Ing. **Benjamin Häfner**,
Prof. Dr.-Ing. **Gisela Lanza**

wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe
Tel. +49 (0)1523 / 950-2616
rainer.silbernagel@kit.edu
www.wbk.kit.edu

Transformationsansatz bezüglich der Integration von Vorhersagemethoden zur Prozessverbesserung

Der Weg von Descriptive zu Predictive Six Sigma

F. Schäfer, E. Schwulera, H. Otten, J. Franke

Die Entwicklungen im Bereich der Automatisierung hin zu steigender Datendurchgängigkeit in Kombination mit der Verfügbarkeit frei zugänglicher Datenanalyseplattformen und -algorithmen erlauben neue Ansätze zur kontinuierlichen Verbesserung von Produktionsprozessen. Auch etablierte Vorgehensweisen wie Six Sigma können und müssen in diesem Rahmen weitergedacht und angereichert werden. Folglich gilt es, die klassische, hauptsächlich deskriptive Herangehensweise von Six Sigma um relevante Methoden und Algorithmen aus den Bereichen Data Mining, Machine Learning und künstliche Intelligenz zu erweitern. Die klassische Six Sigma Ausbildung bietet für diesen Wandel gute Voraussetzungen, die es auszubauen und anzupassen gilt.

STICHWÖRTER

Six Sigma, Predictive Maintenance, Qualitätsmanagement

The path from descriptive to predictive Six Sigma

The increasing data availability in combination with open source data analysis platforms and algorithms pave the way for new ways of operationalizing continuous improvement tasks in the field of production processes. Even established approaches like Six Sigma need to be enhanced and enriched in this context. Consequently, the classical and more descriptive nature of Six Sigma should consider relevant methods and algorithms out of the field of data mining, machine learning and artificial intelligence. The classical Six Sigma training provides a good basis for this change to broaden the Six Sigma scope and its toolbox.

1 Einleitung

Datenvernetzung und -verfügbarkeit prägen die Produktionslandschaft im Zeitalter von Industrie 4.0. Zusammen mit dem steigenden Bekanntheitsgrad von Modellen und Algorithmen aus den Bereichen Data Mining (DM), Machine Learning (ML) und künstliche Intelligenz (KI) und den dazu verfügbaren offenen Programmierungsumgebungen und Bibliotheken ergeben sich neue Möglichkeiten zur kontinuierlichen Verbesserung von Produktionsprozessen. Diese Ansätze erlauben auch neue Blickwinkel von einer rein deskriptiven Analyse hin zu Vorhersagemechanismen, um beispielsweise Ausfälle direkt vorzubeugen. Für Six Sigma als etablierte Vorgehensweise zur Prozessverbesserung gilt es, Schnittstellen bezüglich dieser neuen Methoden zu definieren und die klassischen Ansätze im Hinblick auf die neuen Potenziale zu eruieren und weiterzuentwickeln. Hierzu wird in einem ersten Schritt die Notwendigkeit der Weiterentwicklung von Descriptive zu Predictive Six Sigma konkretisiert und beide Vorgehensweisen gegenübergestellt. Darauf aufbauend wird ein Transformationsansatz vorgestellt, um die Potenziale zu heben und gleichzeitig vorhandene Kompetenzen und Wissen zu nutzen. Anhand von zwei praktischen Use Cases zur vorausschauenden Wartung in der Elektronikproduktion wird dieser validiert.

2 Predictive Six Sigma als Weiterentwicklung von Descriptive Six Sigma

Six Sigma gilt als etablierte Vorgehensweise und relevante Schlüsselmethode zur Prozessverbesserung und Kosteneinsparung im Rahmen des Null-Fehler-Managements [1]. Klassische Six Sigma Projekte unterstützen hier beispielsweise auftretende Ist-Soll-Differenzen für definierte Key Performance Indicator zu untersuchen und Verbesserungspotenziale zu heben. Diese reaktive Herangehensweise hat in der Vergangenheit und auch heute noch durchaus Relevanz im Hinblick auf die Frage, was in der Vergangenheit passiert ist und warum. Allerdings stößt sie gerade in hochautomatisierten, sehr gut analysierten und stark von Wiederholung geprägten Prozessen an die Grenzen möglicher Verbesserungen. Um hier die nächste Stufe zu erreichen, ist ein Perspektivwechsel von reaktiven zu proaktiven Fragestellungen bezüglich „Was wird im nächsten Schritt passieren?“ notwendig. Der steigende Digitalisierungsgrad und die damit einhergehende Datenverfügbarkeit in Kombination mit nun anwendbaren Vorhersagealgorithmen erlauben diesen Transformationsschritt und unterstützen die weitere Konvergenz hin zu null Fehlern. Die strukturierte Vorgehensweise von Six Sigma zusammen mit der Ausbildungsstruktur der Belts bietet auch für Vorhersageprojekte eine passende Basis, auf der aufgebaut werden kann. Nichtsdestotrotz ist hier eine Weiterentwicklung und sinnvolle Integration der neuen DM-, ML- und KI-Methoden notwendig.

Für eine erfolgreiche Transformation von Descriptive zu Predictive Six Sigma ist es wichtig, die Gemeinsamkeiten und Unterschiede der beiden Blickwinkel zu erkennen, welche zusammengefasst in der **Tabelle** dargestellt sind. Beide Perspektiven unterscheiden sich in Ihrem Blickwinkel auf die Vergangenheit respektive auf die Zukunft, verfolgen jedoch gemeinsam das Ziel der Qualitäts- und Prozessverbesserung. Hierfür werden allerdings unterschiedliche Methoden eingesetzt. Besonders für die Vorhersage kommen Algorithmen aus dem Bereich des DM oder ML zum Einsatz im Gegensatz zu den klassischen Methoden im deskriptivem Six Sigma. Im nächsten Schritt soll ein Transformationsansatz vorgestellt werden, um den Schritt von Descriptive zu Predictive Six Sigma zu gehen.

3 Transformationsansatz von Descriptive zu Predictive Six Sigma

Erkenntnisse aus klassischen Six Sigma Projekten können eine sehr gute Basis zur Vorbereitung und Modellierung von Vorhersagemodellen und den dazu notwendigen Datensätzen sein. Aus diesem Grund ist ein Hand in Hand beider Herangehensweisen und eine Transformation zur Integration von Vorhersagealgorithmen sinnvoll. In Orientierung an etablierte Change Management Konzepte [2] wird in **Bild 1** eine mögliche Vorgehensweise zur unternehmensorientierten Einführung von Vorhersagemodellen vorgestellt. In einem ersten Schritt werden hierzu anhand bekannter Probleme und Herausforderungen Vorhersage Use Cases mit Business Impact definiert, priorisiert und ausgewählt. Besonders der erste Use Case sollte dabei hohe Erfolgsaussichten bei vertretbarem Aufwand aufweisen. Dies geht gleichzeitig einher mit einer Einschätzung, inwiefern die notwendigen Ressourcen vorhanden sind beziehungsweise welche noch benötigt werden. Mithilfe dieser fundierten Analysen wird nun im zweiten Schritt das Management überzeugt, um die notwendigen Ressourcen bereitgestellt zu bekommen. Dies kann im Rahmen eines reinen Initialprojekts oder innerhalb einer bereits bestehenden Digitalisierungsstrategie oder Ähnlichem geschehen. Nun kann das Pro-

Tabelle. Vergleich Descriptive und Predictive Six Sigma.

Merkmal	Descriptive Six Sigma	Predictive Six Sigma
Fokus	Qualitäts- und Prozessverbesserung	
Perspektive	Reaktiv: Analyse der Vergangenheit	Proaktiv: Blick in die Zukunft
Fragestellung	Was ist passiert? Warum ist es passiert?	Was wird passieren? Was passiert als nächstes?
Daten	Small und Big Data	
Aufgaben	- Visualisierung von Prozessparametern - Charakterisierung von Daten - Ursache-Wirkungs-Analysen - Mustererkennung Ursache-Wirkung - Steuerung relevanter Prozessparameter	- Vorhersage von Prozessverhalten - Predictive Maintenance - Predictive Quality
Methoden	- KPI reports - Scorecards - Visualisierung - Ursache-Wirkungs-Diagramme - Statistische Methoden	- Data Mining - Machine Learning - Mathematische Optimierung - Statistische Methoden - Simulation
Prozessverständnis	Absolut notwendig	Nicht immer zwingend notwendig

jekt strukturiert und iterativ realisiert werden. Die Verwendung bereits bestehender Vorgehensweisen wie des Define-Measure-Analyze-Improve-Control (DMAIC) Zyklus [3], erweitert und angepasst um notwendige Schritte des DM oder ML aus beispielsweise dem Cross Industry Standard Process for Data Mining (CRISP-DM, [4]) wie *Schäfer et al.* vorschlagen [5], kann hier eine sehr gute Strategie für ein erfolgreiches Predictive Six Sigma Projekt sein. Im letzten Schritt gilt es dann, die gewonnenen Erkenntnisse zu kommunizieren und zu dokumentieren, um Best Practices zu teilen und gemeinsam weiter kontinuierlich besser zu werden – im Produktionsprozess und in der Durchführung von weiteren Vorhersageprojekten.

4 Beispiel der vorausschauenden Wartung in der Elektronikproduktion

Das vorgeschlagene Transformationsvorgehen wird am Beispiel für Fehlvorhersagesysteme in der Elektronikproduktion

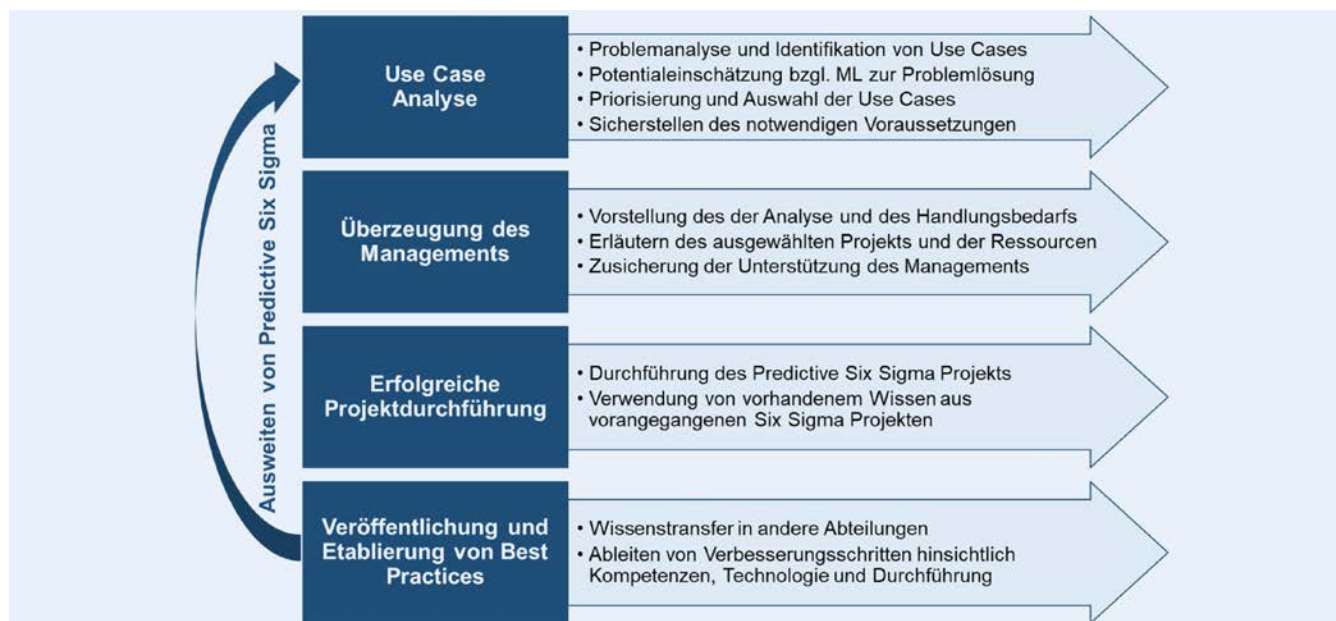


Bild 1. Transformationsvorgehen von Descriptive zu Predictive Six Sigma. Bild: FAPS

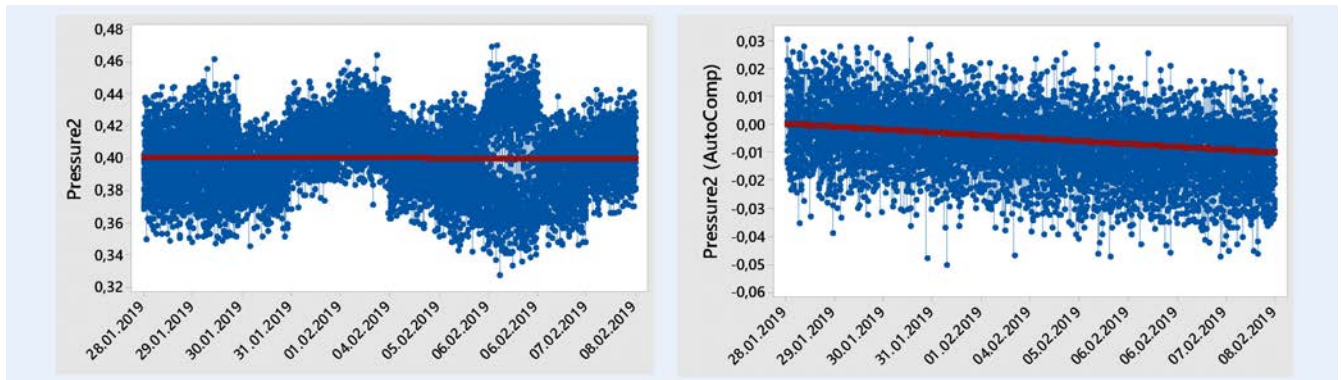


Bild 2. Zeitreihendiagramm bezüglich des Druckverlaufs vor (links) und nach (rechts) der Kompensation. Bild: FAPS

erläutert, die aufgrund des hohen Automatisierungsgrades in der Produktion sehr gute Voraussetzungen liefert [6]. Hierbei liegt der Fokus speziell auf Schritt drei des Transformationsvorgehens, in dem Erkenntnisse und Methoden aus der Descriptive Six Sigma Perspektive als Basis für die Entwicklung der Vorhersagemodelle verwendet werden. Die Use Cases hierfür stammen aus einem umfangreichen Use Case Katalog, der zur Auswahl der ersten Anwendungsfälle verwendet wurde. Es mussten keine zusätzlichen Ressourcen angeschafft werden, da der Rahmen zur Durchführung der Use Cases bereits vorhanden war und vom Management gestützt wurde. Der erste Use Case fokussiert sich auf die Fehlervorhersage von einem Greifer für Printed Circuit Boards (PCB), welche erfolgreich modelliert und implementiert wurde. Der daraufhin initiierte zweite Use Case betrachtet die Entwicklung eines Prototyps zur Fehlervorhersage für ein automatisiertes Testsystem als letzte Station in der Endmontage und Prüfung von Steuerungsprodukten.

4.1 Use Case 1: Druckvorhersage für einen PCB-Greifer

Bei der Handhabung von Elektronikbauteilen durch Roboter kommt es durch den Verschleiß von im Greifer verbauten Plastikteilen zu ungeplanten Stillständen in der Produktion. Grund dafür ist, dass der Druck, der am Greifer vorherrscht, nicht mehr ausreicht, um die Bauteile zu heben. Im entsprechenden Predictive Six Sigma Projekt war deshalb das Ziel, ein zweiwöchiges Vorhersagemodell mit 90 %iger Vorhersagesicherheit zu entwickeln, um ungeplante Stillstände vorzubeugen. Im übergeordneten Geschäftsziel sollte damit die Overall Equipment Effectiveness (OEE) der gesamten Produktionslinie verbessert werden.

Für das Prozessverständnis wurde ein Ishikawa-Diagramm [7] verwendet, um mögliche Stillstandursachen zu sammeln. Als Zielparameter wurde anhand dessen der Druck an der Greiferspitze in Abhängigkeit von der PCB-Bezeichnung, der Produktcharge und der jeweiligen PCB-Variante identifiziert. Zur Untersuchung des Prozesses wurden die Datensätze mit 10 000 Werten pro Roboter in einem ersten Schritt mittels Zeitreihenplots visualisiert. Es zeigte sich eine hohe Varianz bezüglich der PCB-Varianten und der Produktchargen.

In einem ersten Anlauf wurde ein „Arima“-Modell für die Vorhersage eingesetzt, welche allerdings keinen Druckabfall prognostizieren konnte (Bild 2, links). In einer zweiten Iteration der Data Understanding und Preparation Phase wurden die

Daten nochmals genauer untersucht. Durch die Einführung eines neuen Attributs konnten durch eine mathematische Nivellierung die Einflüsse des PCB und die Einflüsse des Greifers so separiert werden, dass die Chargen-bedingte Varianz in der Zeitreihe kompensiert wurde. Dieses Mal konnte mittels Arima ein Muster erkannt und der Trend rechtzeitig vorhergesagt werden. Das so entstandene Vorhersagemodell wurde mittels verschiedener Test- und Trainingsdatensets verifiziert und danach in den Prozess implementiert. Innerhalb von sechs Monaten konnten die ungeplanten Stillstandzeiten bedingt durch Druckprobleme im Greifer um 90 % reduziert werden.

Das erfolgreiche Ergebnis wurde im Unternehmen kommuniziert und Best Practices bezüglich der Vorgehensweise und Erkenntnissen im Umgang mit den Daten und Modellen gesammelt und dokumentiert.

4.2 Use Case 2: Fehlervorhersage für ein automatisiertes Testsystem

In der Endmontage von elektronischen Steuerungsprodukten durchlaufen diese am Ende eine von drei automatisierten Teststationen. Während des Prüfvorgangs werden die Steuerungen kontaktiert und hinsichtlich ihrer Funktionalität überprüft. Bei diesem kommt es häufig zu sogenannten Pseudofehlern beim Testen, das heißt Steuerungen, die eigentlich funktionsfähig und in Ordnung sind, werden als fehlerhaft geprüft und müssen den Test erneut, manchmal auch mehrfach durchlaufen, was die Durchlaufzeit erhöht. Grund hierfür sind beispielsweise Kontaktierungsprobleme infolge von Verschleiß am Testsystem. Dieser Verschleiß kann im schwerwiegendsten Fall zu einem Ausfall der kompletten Testanlage führen. Für dieses Predictive Six Sigma Projekt war somit das Ziel, den Prozess mittels Vorhersage effizienter zu machen, das heißt die Anzahl der Pseudofehler und Komplettausfälle durch rechtzeitige Wartung zu minimieren. Übergeordnet sollte dies wieder einen positiven Effekt auf die OEE haben.

Eine Sipoc-Analyse [8] brachte hier die notwendigen Einsichten in den Prozess und die damit notwendigen Analyse-Daten. Es wurden hierfür 50 000 Testprotokolle für die drei Testsysteme identifiziert, die im Zeitraum von Mitte 2016 bis Anfang 2018 aufgenommen wurden. Mittels klassischer beschreibender Six Sigma Werkzeuge wie Zeitreihendiagramme, Boxplots und Multi-Vari-Charts wurden die Daten untersucht. Es zeigte sich eine

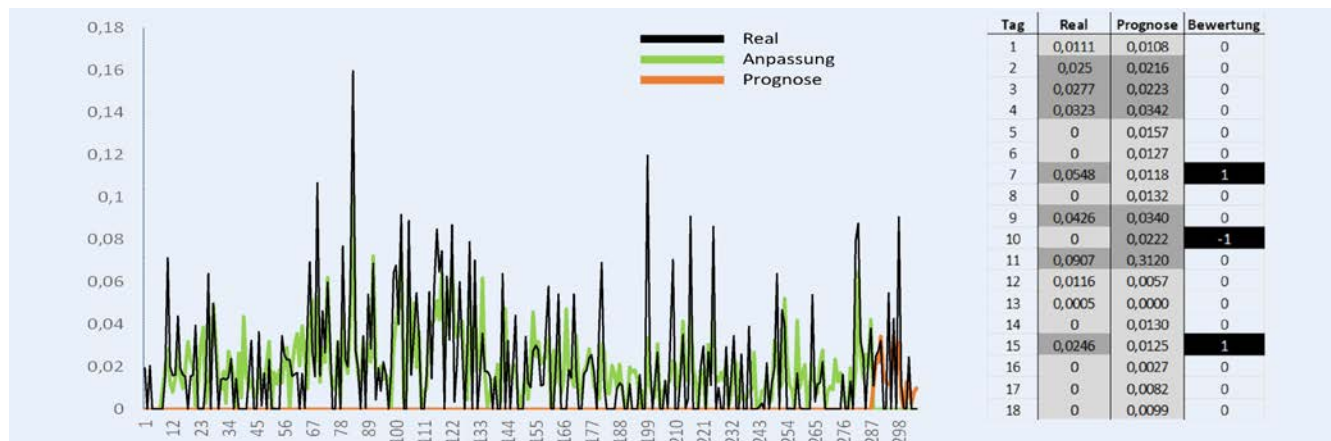


Bild 3. Vergleich zwischen realen und vorhergesagten Fehlerraten. Bild: FAPS

hohe Varianz der Daten unter der Woche. Auch zeigte sich, dass Testsystem drei im Vergleich schlechtere Werte aufwies als die beiden anderen Teststationen, weshalb auf dieser im Folgenden der Fokus für die Modellentwicklung gelegt wurde. Nach der Bereinigung der Daten wies der Datensatz einen Umfang von 300 Daten auf. Für die Modellauswahl wurden ein Arima-Modell wie im ersten Use Case und die binäre logistische Regression ausgewählt. Beide Modelle zeigten allerdings keine zufriedenstellenden Ergebnisse. Aufgrund der vermuteten Nichtlinearität der Zeitreihe wurde diese deshalb mittels eines Feedforward Netzes modelliert. Mit einer Vorhersagesicherheit von 83 % bezogen auf vorhergesagte kritische oder unkritische Tage konnten mit dem neuronalen Netz bereits gute Ergebnisse erzielt werden (siehe Bild 3). Dieses muss nun weiter trainiert und mit realen Daten verifiziert werden. Hierzu wurde ein Kontrollprozess zur weiteren Optimierung bis hin zur Einführung und Integration in den realen Prozess definiert.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die steigende Digitalisierung im Rahmen der Industrie 4.0 geht einher mit einer übergreifenden Datenvernetzung und -verfügbarkeit in der Produktion. Dies beeinflusst die Vorgehensweisen und Möglichkeiten zur kontinuierlichen Verbesserung, von denen auch Six Sigma als etablierte Null-Fehler-Management-Methode betroffen ist. So eröffnen die Methoden im Bereich Data Mining, Machine Learning und künstliche Intelligenz neue Sichtweisen, die über die rein deskriptive Beschreibung und Ursachen-Analyse hinausgehen und auch Vorhersagemechanismen mit einbeziehen. Entsprechend gilt es, das klassische deskriptive Six Sigma hin zu Predictive Six Sigma weiterzuentwickeln, um potenzielle Projekte ebenso strukturiert und fundiert durchführen zu können. Hierzu wurde ein Transformationsansatz vorgestellt, der sowohl Schnittstellen und Kompetenzen des klassischen Six Sigmas als auch die neuen Ansätze und Methoden aus dem Bereich Data Mining, Machine Learning und künstliche Intelligenz berücksichtigt. Beispielhaft wird dieser aus Praxissicht in der Elektronikproduktion mit Fokus auf die vorausschauende Wartung erläutert. Zukünftig gilt es, den klassischen DMAIC-Zyklus konkret anzupassen und auf die neuen Anwendungsfälle ausulegen. Damit verbunden ist ebenso die konkretisierte Abstimmung der Ausbildungsinhalte der Belts, um auch hier einheitliche Zertifizierungsrichtlinien zu schaffen.

DANKSAGUNG

Dieses Forschungsprojekt wird vom Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie mit Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) im Rahmen der Förderung des „Kompetenz- und Analyseprojekt für die datengetriebene Prozess- und Produktionsoptimierung mittels Data Mining und Big Data“ (EJASY-Opt) mit dem Ziel „Investitionen in Wachstum und Beschäftigung“ finanziert (Laufzeit 2014–2020). Unterstützt wird das Projekt vom European Six Sigma Club (ESSC) und dessen Arbeitskreis „Vision 2020“. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Literatur

- [1] Montgomery, D. C. (Hrsg.): Design and analysis of experiments. Hoboken, NJ: Wiley 2013
- [2] Kotter, J. P.: Leading Change. Wie Sie Ihr Unternehmen in acht Schritten erfolgreich verändern. München: Verlag Franz Vahlen 2013
- [3] Melzer: Six Sigma – kompakt und praxisnah. Springer Fachmedien Wiesbaden 2019
- [4] Chapman, P.; Clinton, J.; Kerber, R. et al.: CRISP-DM 1.0 Step-by-step data mining guide, 2000
- [5] Schäfer, F.; Zeiselmaier, C.; Becker, J. et al.: Synthesizing CRISP-DM and Quality Management: A Data Mining Approach for Production Processes. In: 2018 IEEE International Conference on Technology Management, Operations and Decisions (ICTMOD). Marrakech/Morocco
- [6] Seidel, R.; Mayr, A.; Schäfer, F. et al.: Towards a Smart Electronics Production Using Machine Learning Techniques. In: 42nd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), Wrocław/Poland, 2019
- [7] Kern, J.: Ishikawa Diagramme – Ursache-Wirkungs-Diagramme. München: Grin Verlag GmbH 2009
- [8] Lunau, S. (Hrsg.): Six Sigma+Lean Toolset. Mindset zur erfolgreichen Umsetzung von Verbesserungsprojekten. Berlin: Springer Verlag 2014



Dipl.-Math. **Franziska Schäfer**
Bild: FAPS

Dipl.-Ing. **Erik Schwulera**
Prof. Dr.-Ing. **Heiner Otten**
Prof. Dr.-Ing. **Jörg Franke**

FAPS – Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
Egerlandstr. 7
91058 Erlangen
Tel. +49 (0)9131 / 85-28783
franziska.schaefer@fau.de
www.faps.de

Barkhausenrauschenmessung zur Detektion variierender Werkstoffeigenschaften

Schadens Erfassung auf Radsatzlaufflächen

B. Denkena, B. Bergmann, H. Blech

Unterschiedliche Belastungshistorien von Eisenbahnradern führen zu Werkstoffveränderungen in der Lauffläche. Diese verursachen sporadisches Werkzeugversagen und verringern so die Prozesssicherheit. Die Messung der Material- und Prozesseigenschaften mit Barkhausenrauschen und Körperschall erlauben, individuelle Bearbeitungsparameter für jedes Exemplar festzulegen. Gezeigt werden die Herausforderungen in der Radsatzbearbeitung, und welche Informationen sich durch die Messtechniken gewinnen lassen.

STICHWÖRTER

Messtechnik, Materialprüfung, Sensoren

Defect detection on wheelset treads – Measurement of Magnetic Barkhausen Noise to detect varying workpiece conditions

Different load histories of train wheels lead to high variance of material properties on the running tread. Those cause unpredictable tool break and reduce process reliability. The measurement of magnetic Barkhausen noise and acoustic emission allow to gain information of the workpiece and the running process, to find optimal process parameters for the reconditioning of every individual wheel. Typical issues in train wheel machining and results of measurements are presented.

1 Radsatzverschleiß

Räder von Eisenbahnwagons sind im Betrieb durch die Abrollbewegung auf den Schienen einer permanenten Dauerbelastung ausgesetzt. Infolgedessen kommt es mit fortschreitender Einsatzdauer zu einer schleichenden Konturveränderung des Laufflächenprofils. Dieser Radverschleiß ist Folge der strategischen Entscheidung, den Werkstoff der Eisenbahnräder weicher als den der Schienen auszuführen. So wird eine hohe Lebensdauer der Schienen erreicht, deren Instandsetzung wesentlich aufwandsintensiver ist und mit Streckensperrungen einhergeht. Allerdings bedingt dies eine regelmäßige Wartung der Räder [1]. Diese ist nötig, um die außen verjüngende Form der Räder wiederherzustellen, die von entscheidender Bedeutung für das Fahrverhalten des Radsatzes auf dem Schienenpaar ist. Durch den sogenannten Sinuslauf kann sowohl auf gerader Strecke als auch in Kurven ohne Verschleiß verursachenden Spurkranzanlauf gefahren werden [2].

Neben einem regulären gleichmäßigen Verschleiß entstehen durch außergewöhnliche Lastfälle im Betrieb (zum Beispiel starke Bremsvorgänge) zusätzlich markante Schadensbilder wie Ausbrüche, Flachstellen oder Aufschweißungen auf den Laufflächen der Räder.

2 Schadensbilder auf Radlaufflächen

Der Zustand der Eisenbahnräder kann abhängig von der konkreten Belastungshistorie seit der letzten Instandsetzung stark variieren, dargestellt in **Bild 1**. Aus **Bild 1 a** ist ersichtlich, dass die Laufflächen einiger Räder bei der optischen Kontrolle, außer einer durch Oxidation hervorgerufenen oberflächlichen Farbän-

derung, keine weiteren Auffälligkeiten aufweisen. Andere Exemplare hingegen zeigen signifikante Verschleißerscheinungen. Typische Fehler sind kaltverschweißte Materialaufwerfungen (**Bild 1 b**) oder Ausbrüche aus der Oberfläche (**Bild 1 c**). Besonders im mittleren Bereich der Radlauffläche, bei der während der Geradeausfahrt des Zuges die Last auf der Schiene aufliegt, treten lokale Schadensbilder vermehrt auf. Neben diesen Defekten, die meist auf einem großen Teil des Laufflächenumfangs vorkommen, gibt es auch punktuell vorkommende Schadenstypen. Dazu zählen insbesondere die Flachstellen, die durch starkes Bremsen und daraus folgendem Abrieb auf der flachen Schiene entstehen. Abgeriebener Werkstoff kann sich außerdem in Form von bis zu circa 2 cm dicken Materialaufhäufungen auf der Oberfläche ansammeln und so besonders markante Aufschweißungen bilden (**Bild 1 d**). Eine weitere Verschleißerscheinung, die sich nicht nur durch Oberflächenfehler auszeichnet, sind die sogenannten Spitzläufer, bei denen der seitliche Spurkranz durch kriechende Werkstoffverdrängung eine Vergrößerung in spitzer Form erfährt.

3 Radsatzdrehen

Im Gegensatz zu Schnellzügen, bei denen die Räder üblicherweise im montierten Zustand durch Unterflurmaschinen abgespannt werden, erfolgt die Wartung von Radsätzen von Güterzügen nach dem Ausbau aus dem Fahrwerk. Nachdem die Lagersätze von den Achsenden zur Reinigung und Überholung demontriert sind, erfolgt die spanende Rekonturierung. Zur Bearbeitung dienen spezielle Portalradsatzdrehmaschinen, die für die besonderen Eigenschaften der Radsatzbearbeitung ausgelegt sind. **Bild 2** zeigt eine solche Anlage vom Typ „PN 190“ von Hegenscheidt,

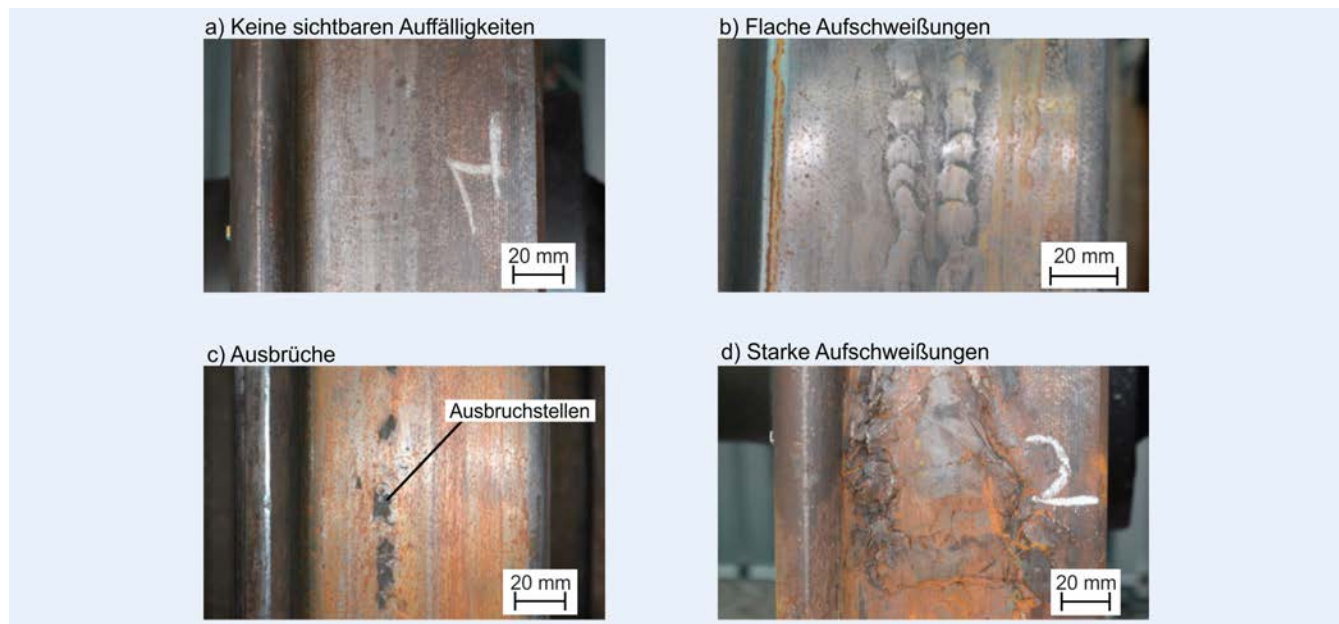


Bild 1. Schadensbilder auf Radlauflächen Bild: IFW

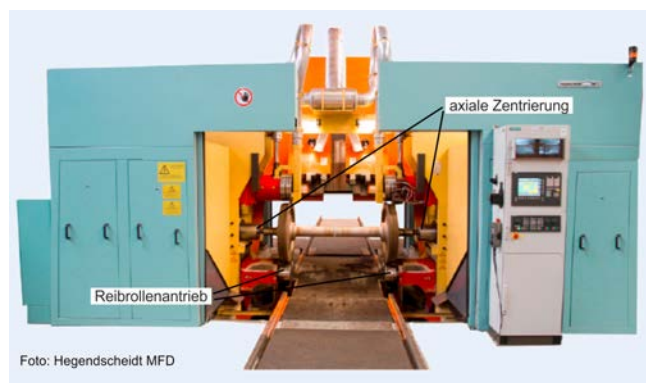


Bild 2. Portalradsatzdrehmaschine „PN 1904“ Bild: IFW

auf der auch die Umsetzung des entwickelten Systems im Rahmen des Forschungsprojektes „ProRad“ stattfindet. Charakteristisch für Drehmaschinen zur Radsatzbearbeitung sind kraftschlüssige Reibrollen, mit deren Hilfe das zur Zerspanung benötigte Drehmoment auf das Werkstück aufgebracht wird. Eine axiale Aufnahme dient dabei ausschließlich der präzisen Ausrichtung des Radsatzes. Auf diese Weise wird Beschädigungen im Bereich des Lagersitzes am Achsende vorgebeugt, bedingt durch die hohen Kräfte bei der Klemmung [3].

Während des Rekonturierungsprozesses wird vom Radius der Räder zwischen 5 mm und 8 mm Werkstoff spanend abgetragen. Auf diese Weise wird sowohl das definierte Formprofil wiederhergestellt, als auch die, durch Kaltverfestigung und eingedrungene Fremdkörper veränderte äußere Materialschicht, entfernt [4]. Der Drehprozess erfolgt dabei üblicherweise mit einer Schnittgeschwindigkeit von 50–100 m/min und einem Vorschub von 1–2 mm. Welche Prozesseinstellgrößen für das zu bearbeitende Rad gewählt werden, entscheidet bisher der Maschinenbediener basierend auf seinem Erfahrungswissen nach Sichtkontrolle des Rades. Bei Flachstellen ist es üblich die Schnitttiefe zu erhöhen, um einen ungünstigen Eingriffsbereich des Werkzeugs zu vermeiden. Grund hierfür ist neben der Vermeidung einer Schnittunter-

brechung auch die Berücksichtigung der erhöhten Härte durch Kaltverfestigung, die im Bereich des mechanisch abgeriebenen Materials entsteht. Durch die höhere Schnitttiefe wird vermieden, dass kritische Werkstoffbereiche der Oberfläche mit dem empfindlichen Eckenradius der Wendeschneidplatte im Kontakt kommen. So kann die Wahrscheinlichkeit eines Werkzeugbruchs deutlich reduziert werden. Bei Unregelmäßigkeiten während der Materialabnahme, zum Beispiel verursacht durch außergewöhnlich tiefe Flachstellen oder hoher Aufschweißungen, kann der Bediener außerdem entscheiden einen weiteren Drehvorgang durchzuführen. Hierdurch wird sichergestellt, dass die neu gebildete Laufläche frei von Werkstoffanomalien ist. Verbleiben diese Fehler allerdings im Rad, kann von ihnen eine Rissausbildung ausgehen. Daraus folgt ein erhöhtes Risiko für Folgeschäden bis hin zum kompletten Radbruch [5]. Während der spanenden Bearbeitung dienen bisher Kameras im Arbeitsraum der Kontrolle des Prozesszustandes. Deren Livebild wird vom Maschinenbediener überwacht.

4 Motivation

Das bisherige Vorgehen zur Bestimmung der Prozesseinstellgrößen ist personalintensiv und abhängig vom Ausbildungs- und Erfahrungsstand des eingesetzten Maschinenbedieners. Besonders kritisch ist dabei, dass nur optische und deutlich sichtbare Schadensfälle zur Anpassung der Bearbeitungsstrategie berücksichtigt werden. Folglich wird auch das Potenzial zur Produktivitätssteigerung nicht optimal ausgenutzt, wenn beispielsweise die Schnittgeschwindigkeit nicht maximiert wird, obwohl der Zustand des Rades eine Prozesssichere Erhöhung zuließe. Das Forschungsprojekt ProRad entwickelt deshalb ein System, das eine objektive Evaluierung jedes individuellen Radsatzes auf Basis moderner Messtechnik ermöglicht. Anschließend erfolgt mit diesen Erkenntnissen eine Anpassung der Bearbeitungsstrategie für jedes einzelne Rad. Die verwendete Sensorik umfasst dabei als primäre Datenquelle einen Barkhausenrauschensensor. Dieses magnetische Messverfahren erlaubt eine zerstörungsfreie Detektion von Ände-

rungen der Werkstoffhärte und -zusammensetzung von Eisenwerkstoffen [6]. Damit eignet es sich insbesondere zur Erfassung der verschleißinduzierten Veränderungen auf den Laufflächen der Radsätze, wo die Zerspanung zur Rekonturierung stattfindet. Mithilfe dieser Informationen können optimierte Prozesseinstellgrößen definiert werden. Um die Bearbeitung nicht nur vorsteuern zu können, sondern auch Informationen über Ereignisse während der Zerspanung zu erhalten, wird das Konzept durch die Messung von Körperschall (Acoustic Emission AE) am Zerspanwerkzeug ergänzt [7]. Basierend auf dem Sensorkonzept wird eine aktive Regelung für Schnittgeschwindigkeit v_c und Vorschub f entwickelt, die die Produktivität des Prozesses maximiert ohne die Prozesssicherheit zu gefährden. Durch die überwachte Entfernung aller Fehlstellen, soll außerdem die Rücklaufquote in der Endkontrolle reduziert und dadurch die Effizienz der Prozesskette weiter gesteigert werden. **Bild 3** zeigt den angestrebten Aufbau des Gesamtsystems.

5 Messungen

Grundlage für die angestrebte Prozesseinstellgrößenanpassung ist eine genaue Kenntnis über den vorherrschenden Zustand des Werkstücks. Die Messung mittels Barkhausenrauschen und Körperschall erfolgt mit einem „Optimizer 4D“ von QASS. Besonderes Merkmal der verwendeten Messtechnik ist die hochfrequente Signalabtastung mit einer Abtastrate bis zu 100 MHz. Die Hardware erlaubt dabei außerdem eine Echtzeit Fast Fourier Transformation zur Zerlegung des Signals in seine Frequenzanteile. So ist es möglich das gemessene Barkhausenrauschen und den Körperschall sowohl im Zeit- als auch im Frequenzbereich in Echtzeit auf charakteristische Muster zu untersuchen. Mit der beschriebenen Messtechnik wurden verschiedene Untersuchungen sowohl an Analogiebauteilen im Labor als auch an verschlissenen Eisenbahnradrädern im Realbetrieb durchgeführt.

5.1 Analogieuntersuchungen

Zur Durchführung von Versuchen wurden Wellenabschnitte aus 42CrMo4+QT durch Carbonitrieren mit Ammoniak partiell ausgehärtet. Durch diese Präparation stellen die Werkstücke eine Analogie zu Eisenbahnradrädern dar, auf deren Lauffläche sich aufgrund von Kaltverfestigung durch mechanische Einwirkungen ebenfalls unterschiedliche Werkstoffhärten resultieren. Zur präzisen und programmgesteuerten Bewegung des Sensors über das Messobjekt wurde der gesamte Aufbau in einem Drehfräszentrum von Typ „NTX 1000“ von DMG Mori eingerichtet. Der Bark-

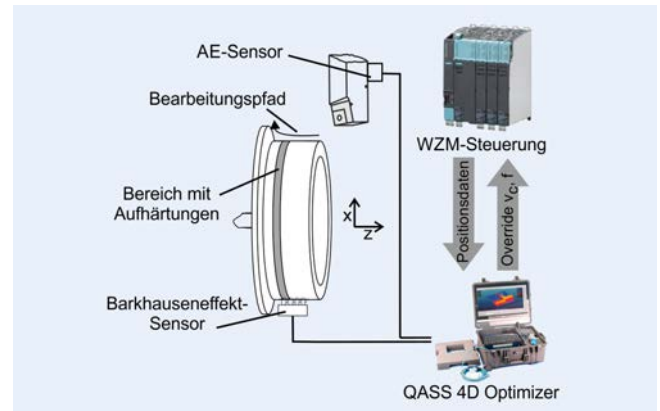


Bild 3. Angestrebter Systemaufbau Bild: IFW

hausensensor wurde dazu in die geklemmte Frässpindel eingespannt. Aufgrund der hohen Präzision und Steifigkeit der Werkzeugmaschine konnten, trotz der Anziehungskraft zwischen Erregerspule des Barkhausensensors und Messobjekt, statische und dynamische Messungen mit hochpräziser Sensorpositionierung durchgeführt werden. Zur Erfassung der Messposition war dabei ein Beckhoff Industrie PC an die Maschinensteuerung gekoppelt, der in der Lage ist, die Bewegung der Maschinenachsen aufzuzeichnen. Die Vermessung erfolgte mit einer Drehzahl von 120 1/min und einem Vorschub von 0,1 mm. Der Abstand des Sensors zur Oberfläche betrug 0,5 mm. Der Sensorkopf überdeckt dabei eine Fläche von 5 mm x 15 mm.

Nach der Vermessung mit dem Barkhausensensor wurde mit identischen Drehzahl und Vorschub sowie einer Zustellung von 0,1 mm experimentelle Zerspanuntersuchungen durchgeführt. Während der Zerspanung wurden Körperschallsignale am Werkzeughalter gemessen. Durch die Verbindung von Messsystem und Beckhoff PC mittels einer analogen Triggersignalleitung wurden die erfassten Messdaten hinsichtlich der Position verglichen. **Bild 4** zeigt den Versuchsaufbau für die Barkhausensensor a) und Außenlängsdrehen mit Akustikmessung b) am selben Werkstück.

Die Messdaten des Barkhausensensors und Körperschallsensors, die mit dem oben beschriebenen Aufbau aufgezeichnet wurden, sind in **Bild 5** dargestellt. Bei den Darstellungen handelt es sich jeweils um die zeitlichen Verläufe der Frequenzspektren vom Barkhausen- und Körperschallsignal. Es wird deutlich, dass die Intensität des Barkhausensensors in den gehärteten Bereichen im Vergleich zum unbehandelten Bereich abnimmt. Diese phasenweise Intensitätsänderung zeigt sich dabei über das

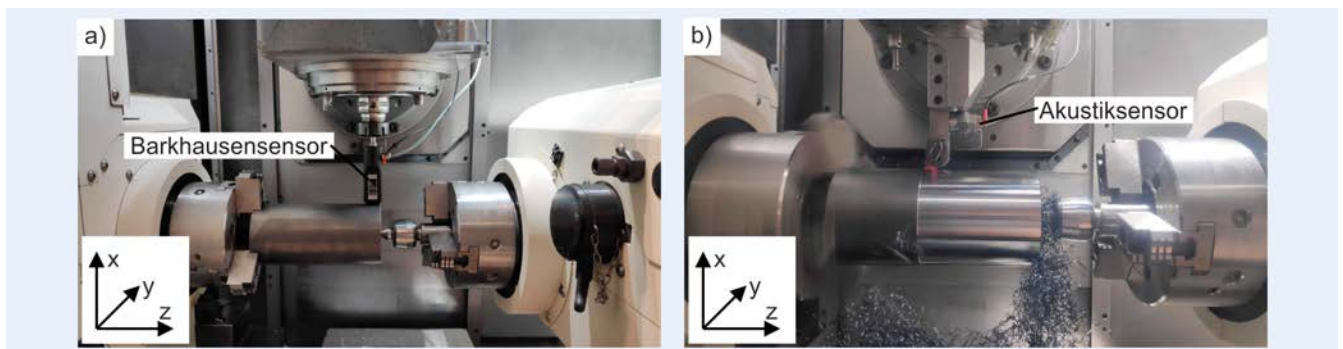


Bild 4. Messaufbauten der „NTX 1000“: a) Barkhausenrauschen, b) Körperschall Bild: IFW

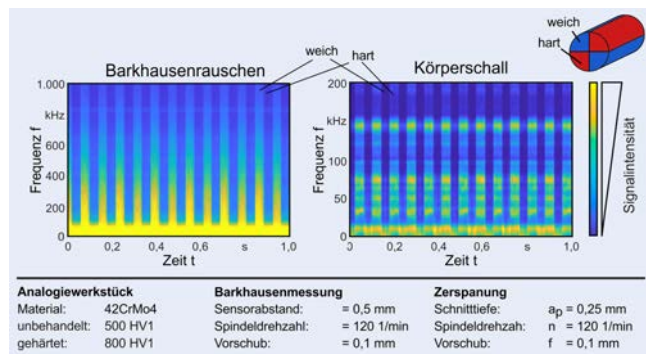


Bild 5. Korrelation von Barkhausenrauschen und Körperschall Bild: IFW

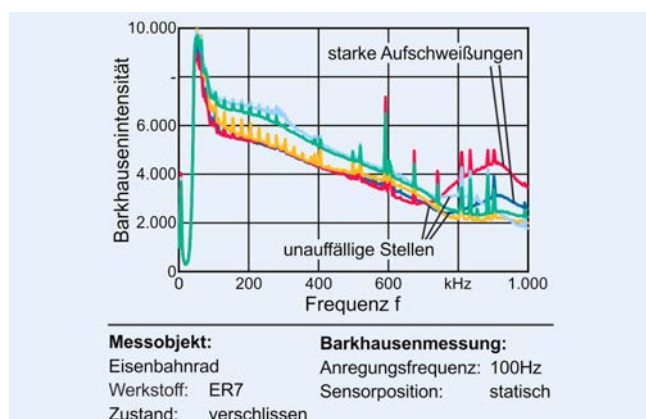


Bild 6. Barkhausenspektren punktueller Messungen Bild: IFW

gesamte Signalspektrum, wobei im niedrigen Frequenzbereich besonders deutliche Signalunterschiede zu beobachten sind. Dabei ist zu beachten, dass sich der Frequenzbereich unterhalb von 100 kHz nicht zum Rückschluss auf Werkstoffveränderungen eignet, da hier ein permanentes Grundrauschen vorliegt. Die Körperschallsignale aus der Zerspanung zeigen korrelierend zur Barkhausenmessung ebenfalls ein wechselndes Verhalten beim Zerspanen der unterschiedlichen Härtezonen. Hierbei kommt es zur Zunahme der Signalintensität in härteren Bereichen, bedingt durch die erhöhten mechanischen Spannungen, die sich in der Spanbildungszone beim Abscheren des Spans entladen. Das Spektrum der Spanbildungsfrequenzen weist neben einer grundsätzlichen Verstärkung aller Frequenzanteile, verschiedene markante Frequenzen in den Bereichen 150 kHz, 75 kHz, 50 kHz und 30 kHz auf. Die Frequenzanteile unterhalb von 20 kHz verhalten sich dabei weitaus weniger trennscharf in Bezug auf die Härtezonen und werden daher als nicht nutzbares Grundrauschen eingestuft.

5.2 Feldversuche

Um zu untersuchen, inwiefern sich Materialveränderungen auf Laufflächen verschlissener Eisenbahnräder durch Barkhausenrau-

schenanalyse detektieren lassen, wurden im Ausbesserungswerk der Deutschen Bahn am Standort Paderborn experimentelle Messungen durchgeführt. Dabei wurden Radsätze ausgewählt auf denen sich verschiedene Verschleißerscheinungen, wie in Bild 1 beschrieben, befanden.

5.2.1 Statische Messungen

Auf optisch unauffälligen Stellen sowie in Bereichen mit deutlich sichtbaren Oberflächenveränderungen wurden punktuelle Messungen vorgenommen. Aufgrund des statischen Messaufbaues wurde so ein zeitlich stationäres Signal aufgezeichnet. Die über die Zeit gemittelten Frequenzspektren verschiedener Messpunkte sind in Bild 6 dargestellt.

Im niederfrequenten Signalbereich bis 100 kHz verlaufen die Spektren von unauffälligen und stark verschlissenen Messpunkten weitgehend identisch. Dieser Effekt konnte bereits im Analogieversuch beobachtet werden. Auch zwischen 100 kHz und 700 kHz ist der Signalverlauf ähnlich. Im hochfrequenten Bereich über 700 kHz zeigen die Frequenzanteile jedoch voneinander abweichende Verläufe. An Messpunkten ohne Auffälligkeiten nimmt die Intensität der Signalanteile mit höheren Frequenzen weiter ab. Das Material in den Aufschweißungen hingegen zeigt eine deutlich gesteigerte Intensität der hochfrequenten Signalanteile im Barkhausenrauschen. Bei 900 kHz ist die Unterscheidung der Messpunkte am signifikantesten. Die im Bild 6 rot und blau dargestellten Verläufe der Aufschweißungen zeigen hier die größte Erhöhung gegenüber den Messpunkten ohne offensichtliche Schäden.

6 Zusammenfassung

Die durchgeführten Messungen haben gezeigt, dass sich die Spektralanalyse von Barkhausenrauschen als Messverfahren eignet, um Materialveränderungen in Laufflächen verschlissener Eisenbahnräder zu detektieren. Dabei wurde aufgezeigt, dass hohe Frequenzanteile besonders sensitiv auf die vorhandenen Werkstoffanomalien reagieren. In Analogieuntersuchungen konnte zudem gezeigt werden, wie vor dem Prozess mit Barkhausenrauschen erfasste Werkstoffeigenschaften mit der Körperschall-emission während des Zerspannungsvorgangs korrelieren. Sowohl die Messung mittels Barkhausenrauschen als auch die Verwendung von Körperschallsensorik zeigen aufgrund der hohen Abtastfrequenz eine hohe zeitliche Auflösung, wodurch eine trennscharfe Erkennung von Werkstoffveränderungen möglich ist. Basierend auf den Erkenntnissen wird die Entwicklung einer automatisierten Sensorführung zur Messdatenerfassung auf dem gesamten Laufflächenumfang angestrebt. Darauf aufbauend wird anschließend die Optimierung des Zerspanprozesses durch eine autonome Anpassung der Prozesseinstellgrößen auf Grundlage der gewonnenen Informationen umgesetzt.

L i t e r a t u r

- [1] Lewis, R.; Wang, W.J.; Burstow, M.; Lewis, S. R.: Investigations of the Influence of Rail Hardness on the Wear of Rail and Wheel Materials under dry conditions. Third International Conference on Railway Technology: Research Development and Maintenance, Railways 2016, Stirlingshire/UK, 2016, Paper 151
- [2] Janicki, J.: Systemwissen Eisenbahn. Bahn Fachverlag, Berlin 2011
- [3] Heisel, U.; Klocke F.; Uhlmann, E. et al.: Handbuch Spanen. Carl Hanser Verlag, München 2014
- [4] Wild, E.: Beanspruchungsbedingte Gefügeänderungen von ferritisch-perlitischen Stählen am Beispiel des Rad-Schiene-Kontaktes. Dissertation, Technischen Universität Berlin, 2007
- [5] Edel, K.: Einführung in die bruchmechanische Schadensbeurteilung. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2015
- [6] Blitz, J.: Electrical and Magnetical Methods of Non-destructive Testing. Springer Science+Business Media, Dordrecht 1997
- [7] Hase, A.; Wada, M.; Koga, T.: The relationship between acoustic emission signals and cutting phenomena in turning process. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 70 (2014) pp. 947–955



Prof. Dr.-Ing. **Berend Denkena**,
Bild: IFW

Dr.-Ing. **Benjamin Bergmann**,
Heiko Blech, M. Sc.

Institut für Fertigungstechnik
und Werkzeugmaschinen IFW
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
An der Universität 2, 30823 Garbsen
Tel. +49 (0)511 / 762-2533
info@ifw.uni-hannover.de
www.ifw.uni-hannover.de

Integration von Messergebnissen in FE-Simulationen zur Inline-Funktionsbewertung von Faserverbunden

Funktionsorientierte Inline-Messtechnik von Faserverbunden

L. Bretz, B. Häfner, G. Lanza

Hybride faserverstärkte Kunststoffe kombinieren die Vorteile ihrer unterschiedlichen Fasertypen und -materialien. Während des teuren Herstellungsprozesses kann es zu Fertigungsabweichungen kommen, deren Auswirkung auf die Bauteilfunktionalität unbekannt ist. Die Integration von Inline-Messtechnik zur quantitativen Erfassung der Abweichungen sowie die simulative Bewertung der Messergebnisse auf Funktionsebene während des Produktionsprozesses können den Ausschuss reduzieren und Kosten senken.

STICHWÖRTER

Leichtbau, Messtechnik, Qualitätssicherung

Function-oriented measurement technology of fibre composites – Integration of measurement results in FE simulations for functional evaluation of produced components

Hybrid fiber-reinforced plastics combine the advantages of their different fiber types and materials. During the expensive manufacturing process, production deviations with unknown influence on the part's performance may occur. The integration of inline measurement technology for quantitative measurement of the deviations and simulative evaluation of the measurement results at the functional level during the production process can reduce scrap and costs.

1 Einleitung und Stand der Technik

Faserverstärkte Kunststoffe können einen wesentlichen Beitrag zur Gewichtsreduktion in Luftfahrt und Automobilindustrie leisten. Im internationalen Graduiertenkolleg DFG-GRK 2078 wird eine neue, hybride Materialklasse entwickelt und untersucht. Bestandteile der Materialkombination sind diskontinuierliche Glasfasern in Sheet Molding Compound (SMC) sowie unidirektionale Endlosfaser-Tapes aus Kohlenstoff (CF). Das SMC kennzeichnet sich durch günstige Herstellkosten und eine einfachere Verarbeitbarkeit durch höhere Fließfähigkeit aus, wohingegen die teurere und aufwendiger zu verarbeitende Kohlenstofffaser hervorragende mechanische Eigenschaften zum Hybridverbund beiträgt.

Zur Herstellung werden SMC- und Tape-Halbzeuge benötigt. Die Fasern in beiden Halbzeugen sind in ein gereiftes, aber noch nicht vernetztes Duomer (Unsaturiertes Polyester Polyurethan Hybrid, UPPH) getränkt. Diese Phase wird auch „b-stage“ genannt. Die CF-Tapes werden auf den aus SMC bestehenden Grundkörper aufgebracht. Die finale Formgebung und Aushärtung durch chemische Vernetzung erfolgt unter Druck und erhöhter Temperatur (circa 150 °C) in einer hydraulischen Presse. Dieser Prozess, auch Co-Molding genannt, macht den größten Wertschöpfungsanteil in der Produktion aus. Aufgrund der chemischen Vernetzung der Werkstoffe ist Nacharbeit zur Korrektur von Defekten ausgeschlossen.

Aufgabe der Qualitätssicherung ist es, spezifizierte Qualitätsanforderungen zu gewährleisten. Diese Qualitätsanforderungen werden meist durch statische Toleranzgrenzen beschrieben [1]. Schwankungen in Fertigungsprozessen können dazu führen, dass gefertigte Produkte außerhalb ihrer statisch spezifizierten Toleranzgrenzen liegen. Dies impliziert, dass potenziell funktionsfähige Bauteile als Ausschuss deklariert werden können, ohne dass eine Funktionsprüfung erfolgt. Ziel sollte daher sein, in der Produktionslinie aussagekräftige Messwerte über den individuellen Bauteilzustand eines jeden gefertigten Produkts zu erhalten. Diese Inline-Messwerte sollen für eine Aussage über die Funktionsfähigkeit des Bauteils genutzt werden. Die Bewertung muss innerhalb eines vertretbaren Zeitrahmens, in Abhängigkeit der Taktzeit, erfolgen.

Weiterhin führt die Kombination der vorgestellten Materialien im Co-Molding zu Defekten und Defektkombinationen unterschiedlicher Art. Faserverstärkte Polymere sind noch immer durch hohe Herstellkosten im Vergleich zu klassischen Werkstoffen gekennzeichnet, sodass die Minderung von Ausschuss durch den Nachweis der Funktionsfähigkeit, auch bei Abweichung vom intendierten Design, ein hohes Kosteneinsparpotenzial aufweist.

In dieser Arbeit werden Faserfehlerorientierungen des Tapes, Delaminationen, Lufteinschlüssen und abweichende Faservolumenanteilen im SMC betrachtet. Die Reduktion der mechanischen Bauteileigenschaften von Delaminationen, Fehlerorientierungen des Tapes und Lufteinschlüssen wurde bereits in [2–4]

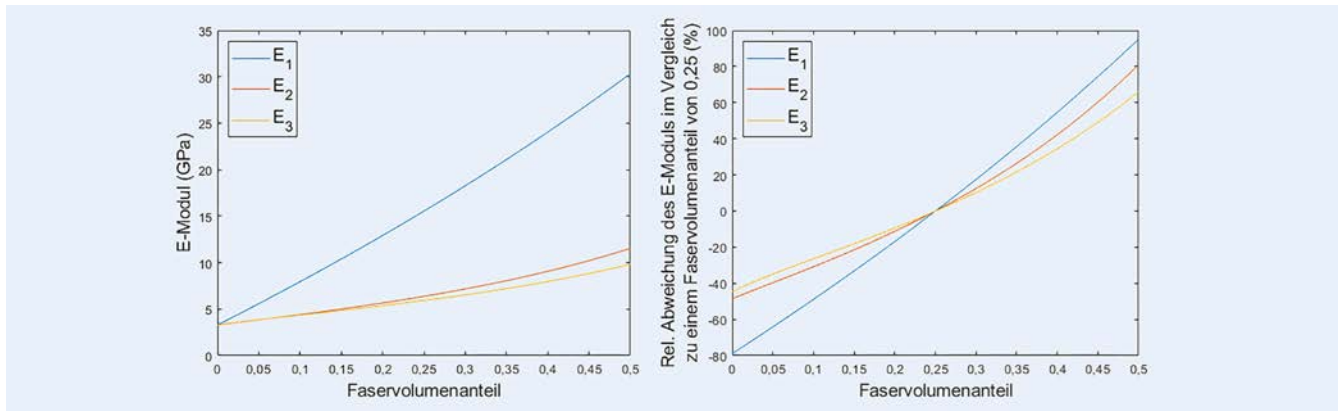


Bild 1. Absoluter und relativer Einfluss des Faservolumenanteils auf die Steifigkeit des Sheet Molding Compounds (SMC). Bild: KIT, wbk

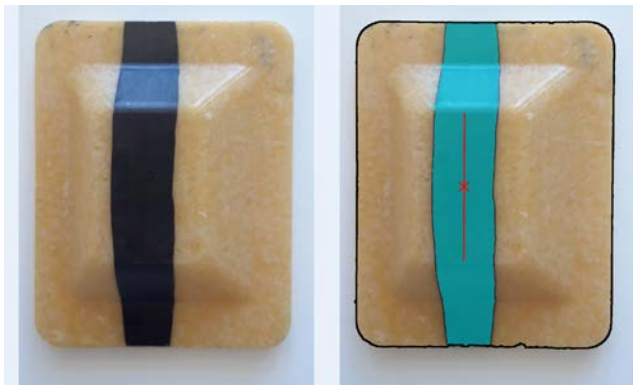


Bild 2. a) Demonstrator des DFG GRK2078 in Form eines Hutprofils bestehend aus SMC (gelb) und CF (Kohlenstoff)-Tape (schwarz) b) SMC- und Tape-Umriss, Tape-Mittelpunkt und -Orientierung. Bild: KIT, wbk

beschrieben. **Bild 1** illustriert den Einfluss eines sich ändernden Faservolumenanteils c_f auf den Elastizitätsmodul in den drei Hauptachsen. Die Steifigkeiten wurden mit dem Mori-Tanaka-Modell berechnet. Für die Glasfasern wurden ein E-Modul von 73 GPa, eine Querkontraktionszahl von 0,22 und ein Aspektverhältnis von 800 angenommen. Das Harz wurde mit einem E-Modul von 3,28 GPa und einer Querkontraktionszahl von 0,38 modelliert. Für die Berechnung wurde eine mit einem Computertomografen gemessene Faserorientierung herangezogen [5, 6].

Robuste Positionierungen von CF-Tapes auf SMC gegenüber Fertigungsabweichungen unter Berücksichtigung der Zielgrößen Materialausnutzung und Steifigkeit wurden in [7] bestimmt. Das vorgestellte Hybridmaterial wurde mechanisch in Zug-, Kompressions- und Biegeversuchen charakterisiert und die Ergebnisse mit Modellierungen verglichen. Der Faservolumenanteil würde aber nur zerstörend bestimmt und die Messergebnisse über die Probe gemittelt [8, 9]. In Extrusionsprozessen konnte der Faservolumenanteil sowie die -orientierung mithilfe von THz-Strahlung ermittelt werden [10–12]. Die Thermografie wird erfolgreich zur 3D-Defektdetektion und -lokalisierung eingesetzt [13–16]. Franz et al. identifizieren simulativ relevante Fertigungstoleranzen in Laminaten auf Funktionsebene [17].

Metamodellierungen werden oft zur Reduktion des Rechenaufwands von Simulationen eingesetzt [18], vor allem während der Designphase im Produktentstehungsprozess [19–21]. Die Streuung einer Messgröße wird mit der Messunsicherheit ange-

geben. Die Unsicherheitsbeträge von Finite-Elemente-Simulationen (FE-Simulationen) und Metamodellierungen zur Messunsicherheit einer Messgröße entsprechend des „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“ (GUM) wurden in [22] untersucht. Bisher werden Messergebnisse im Anschluss an den Produktionsprozess von hybriden Faserverbundwerkstoffen nicht für eine echtzeitfähige Funktionsaussage unter Angabe einer Messunsicherheit genutzt. Daher ist das Ziel dieses Forschungsansatzes die messtechnische Quantifizierung und simulative Bewertung der gemessenen, bauteilindividuellen Defekte in einem adaptiven FE-Modell. Um eine Funktionsaussage innerhalb des Produktionstakts zu gewährleisten, werden die Lösungen durch ein Metamodell, unter Berücksichtigung der Messunsicherheit, approximiert.

2 Messtechnische Erfassung von Fertigungsabweichungen und Defekten

Keine auf dem Markt verfügbare Inline-Messtechnik eignet sich zur Detektion aller aufgeführten Defekte, sodass ein multisensorieller Ansatz verfolgt wird. Industriekameras erfüllen alle Anforderungen, um die Lage und Orientierung der sich auf der Oberfläche befindenden CF-Tapes auf dem SMC-Grundkörper zu vermessen. Das SMC und das CF-Tape unterscheiden sich deutlich durch ihre Farbe (**Bild 2 a**).

Das Tape wird auf dem SMC-Grundkörper durch Parameter für Lage und Orientierung beschrieben [7]. Zusätzlich können nach Bedarf Länge und Breite des Tapes vermessen werden. Neben dem Demonstrator des „DFG GRK2078“ in Form eines Hutprofils ist in Bild 2 b) die erfolgte Extraktion der Tape-Lage und -Orientierung illustriert.

Delaminationen, als eine Art interner Defekte, können durch Thermografie und Ultraschall detektiert werden [23]. Teflonfolien sind ein weit verbreiteter Ansatz zur Repräsentation von Delaminationen in Faserverbunden. Insbesondere mit der aktiven Thermografie konnten am wbk Institut für Produktionstechnik bereits sehr gute Erfolge auch an repräsentativen Geometrien erzielt werden, sodass dieser Ansatz weiter verfolgt wird [24, 25]. Bei der aktiven Thermografie wird das Bauteil mit einem Lichtblitzes thermisch angeregt und so ein Wärmefluss im Bauteil induziert. Delaminationen sind Grenzflächen, die den Wärmefluss hemmen und daher als Anomalie im Thermogramm hervortreten. Ein Post-Processing mit der Diskreten Fourier-Transformation ermöglicht eine Kontraststeigerung gegenüber dem Thermo-

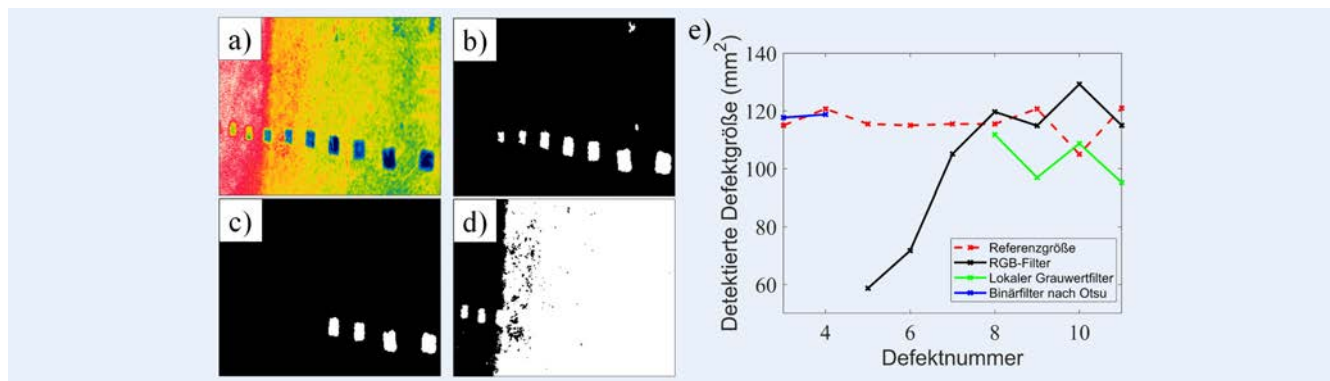


Bild 3. a) Thermografieaufnahme einer geneigten Ebene mit Delaminationen b) Detektierte Defekte mittels RGB-Filter c) Detektierte Defekte mittels lokalem Grauwertfilter d) Detektierte Defekte mittels Binärfilter e) Vergleich der detektierten Defektgrößen, Defektnummerierung von links nach rechts [10].

Bild: KIT, wbk

gramm sowie die Extraktion von Tiefeninformationen aus dem Phasen- beziehungsweise Amplitudenbild [26]. Die notwendigen Informationen zur Defektbeschreibung der Delamination (dreidimensionale Lage und Größe) können mit Methoden der Bildverarbeitung aus den thermografischen Messergebnissen extrahiert werden. Es konnte gezeigt werden, dass ein Mapping in den RGB (Rot-Grün-Blau)-Farbraum und eine Bildverarbeitung in den drei Farbkanälen einen Mehrwert im Vergleich zur Auswertung als Grauwertbild bietet. So können auch Delaminationen an geneigten Ebenen detektiert werden, die sich außerhalb der Fokusebene der Thermografiekamera befinden und einen herausfordernden Hintergrund aufweisen. [25].

Der Mehrwert der entwickelten Methode zur Defektdetektion und -quantifizierung ist an einer beispielhaften Thermografieaufnahme in **Bild 3** gezeigt.

Lufteinschlüsse sollen ebenfalls mit der aktiven Thermografie quantifiziert werden, da auch sie im Bauteil den Wärmefluss hemmen. Durch die Verwendung von Ammoniumhydrogencarbonat im Pressvorgang sollen künstlich erzeugte, eingeschlossene Gasblasen (CO_2) im SMC provoziert werden. Ammoniumhydrogencarbonat ist ein Treibmittel und zersetzt sich bei 60°C . Da sowohl Luftporen als auch Delaminationen als Anomalien aus den Thermografie-Aufnahmen hervorgehen, muss ein geeigneter Deskriptor gefunden werden, der die Unterscheidung erlaubt. Aufgrund der mehr als zehnmal größeren Wärmeleitfähigkeit von Teflon im Vergleich zu CO_2 wird ein unterschiedlicher Einfluss der Defekte auf das Thermogramm, Amplituden- und Phasenbild in Abhängigkeit ihrer Größe vermutet.

Für die inline-fähige, kontaktlose Messung des Faservolumenanteils stehen zwei Messtechniken – akustisch und mittels Terahertz-Strahlung – in der näheren Auswahl. Das vorgeschlagene akustische Verfahren basiert auf dem physikalischen Zusammenhang zwischen dem Elastizitätsmodul und der Schallgeschwindigkeit in einem Festkörper. Der aus Matrix- und Glasfasereigenschaften homogenisierte Elastizitätsmodul ist weiterhin eine Funktion des Faservolumenanteils, sodass ein Zusammenhang zwischen Elastizitätsmodul und Schallgeschwindigkeit nahe liegt. Die Herausforderung ist hier die Messbarkeit der Schallgeschwindigkeit sowie die Sensitivität bezüglich Variationen im Faservolumenanteil. Voruntersuchungen mithilfe einer laserinduzierten, thermoakustischen, breitbandigen Anregung und der Messung der Körperschallwelle mit einem optischen Mikrofon [27] zeigen vielversprechende Ergebnisse. Das optische Mikrofon ist hierbei

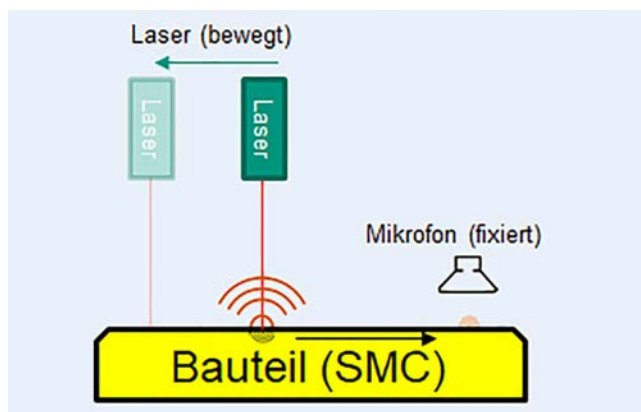


Bild 4. Versuchsaufbau zur kontaktfreien Anregung und Messung von Körperschallwellen. Bild: KIT, wbk

fest positioniert, die Laserquelle verfährt inkrementell in Schritten von $0,2\text{ mm}$ und entfernt sich vom Mikrofon (**Bild 4**). Zwei Schallamplituden erreichen hierbei den Empfänger zeitverzögert. Das schnellere Signal mit einer geringen Amplitude ist die Körperschallwelle. Aufgrund der geringeren Schallgeschwindigkeit tritt mit Zeitverzug ein Luftschallsignal mit starker Amplitude auf.

Über die längere Laufzeit der Schallsignale bei größerem Abstand zwischen Laser und Mikrofon lässt sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit bestimmen. **Bild 5** stellt für unterschiedliche Distanzen zwischen Anregungsquelle und Mikrofon den Zeitbereich heraus, in dem die Körperschallwelle das Mikrofon erreicht. Die Amplituden des Empfängersignals sind farbig dargestellt. Die Analogie zu [28] lässt vermuten, dass es sich hierbei um symmetrische (S_0) und asymmetrische Moden (A_0) der sich ausbreitenden Plattenschwingungen, auch Lambwellen genannt, handelt. Die gemessenen Schallgeschwindigkeiten betragen 3950 beziehungsweise 1900 m/s .

Der Terahertz-Bereich des elektromagnetischen Spektrums umfasst Frequenzen von 100 GHz und 10 THz . Er liegt zwischen dem Mikrowellen- und Infrarotspektrum. Nichtmetallische und nichtpolare Materialien werden zerstörungsfrei durchdrungen. Terahertz-Strahlung wird in [29] als Spektroskopie-Verfahren im Zeitbereich zur zerstörungsfreien Prüfung von mehrlagigen Glasfaserbauteilen verwendet. Zusätzlich wird die Sensitivität bei Änderungen des Brechungsindex festgestellt. In durchgeführten

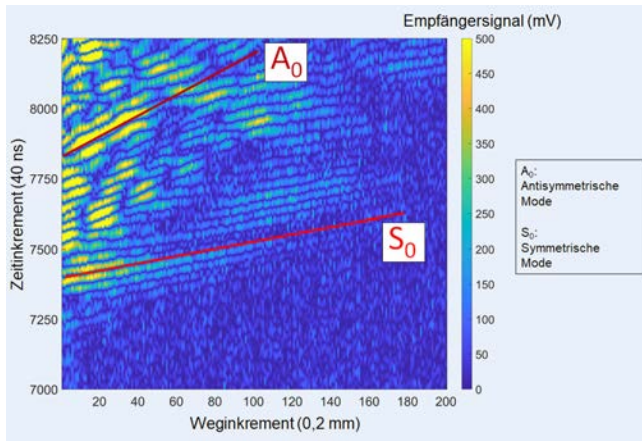


Bild 5. Detektierte Lambwellen in einer SMC-Platte mit 41 Masseprozent Faservolumenanteil. Bild: KIT, wbk

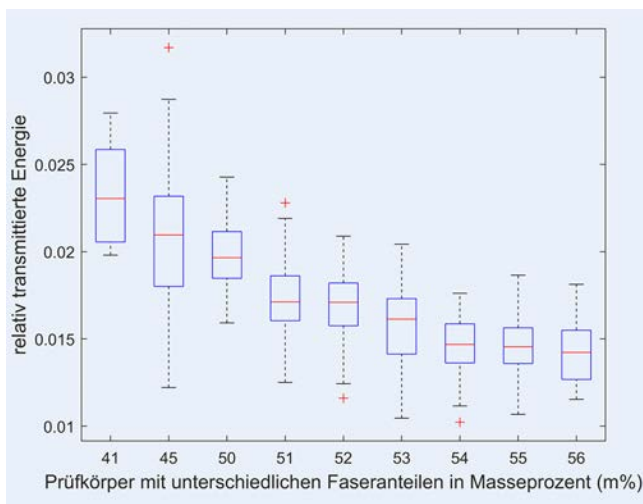


Bild 6. Veränderung der relativ transmittierten THz-Energie in Abhängigkeit des Glasfaseranteils. Bild: KIT, wbk

Voruntersuchungen mit Platten unterschiedlicher Faservolumenanteile zeigt sich ein vielversprechender Trend sowohl bei der Betrachtung der transmittierten Energie als auch bei der Veränderung des Brechungsindex. Der zu vermessende Prüfkörper befindet sich während der Messungen außerhalb des Fokus des Strahlengangs, sodass der Strahlengang mit einem Durchmesser von 8 mm auf die Oberfläche auftrifft. Dies führt dazu, dass ein für die Region repräsentativer Faseranteil im Messbereich liegt. Die Veränderung der relativ transmittierten Energie im Vergleich zu Luft ist in **Bild 6** für neun verschiedene Faservolumenanteile gezeigt. In weiteren Schritten wird die thermogravimetrische Analyse als Referenzmesstechnik eingesetzt, um die Faservolumenanteile in den gemessenen Regionen genauer zu quantifizieren.

3 Funktionsbewertung durch Integration von Messergebnissen in ein Simulationsmodell

Zur Bewertung der Einflüsse einzelner Defekte und Interaktionen wird ein Finite-Elemente-Simulationsmodell aufgebaut. Zur Beschreibung des Materialverhaltens von Faserverbundwerk-

stoffen werden Faserorientierungstensen und Homogenisierungsmethoden herangezogen. Dies erlaubt die Berechnung eines mathematischen Ersatzmaterials in Abhängigkeit der Faserorientierung in einem Matrixmaterial. Der Umformprozess des SMC führt zu einem Fließen des Materials und somit zu einer Reorientierung der Fasern im Vergleich zum Prepreg-Zustand. In Folge der Prepreg-Herstellung sind diese zunächst zufällig in der Ebene orientiert [30]. Die aus dem Umformprozess resultierende Faserorientierung wird einmalig mit einer Fließsimulation simuliert, sodass jedem finiten Element (FE) ein Faserorientierungstensor zugeordnet werden kann. Die Gesamtanzahl der Faserorientierungen wird durch ein Clustering anhand ihrer Eigenwerte limitiert, sodass im weiteren Verlauf die Anzahl der anisotropen Ersatzmaterialien ebenfalls reduziert wird.

Zur Bestimmung der Materialeigenschaften des SMC-Grundkörpers fließen die Materialeigenschaften von Harz, Glasfasern sowie potenziell gemessene Lufteinschlüssen mit ein. In einer ersten Homogenisierungsroutine werden die gemessenen Lufteinschlüsse und das Harz auf Basis ihres volumetrischen Verhältnisses homogenisiert. Dies bietet den Vorteil, dass anschließend weiterhin ein isotropes Ersatzmaterial vorliegt, da sowohl Harz als auch Luft isotrop modelliert werden. Die im Weltkoordinatensystem gemessenen Lufteinschlüsse müssen zur Verrechnung auf das FE-Netz gemappt werden.

In einer zweiten Routine werden dann die Faserorientierungstensen, die gemessenen Faservolumenanteile sowie die isotropen Materialeigenschaften der Glasfasern berücksichtigt. Auch hier muss eine Transformation der im Weltkoordinatensystem durchgeführten Messungen des Faservolumenanteils auf das FE-Netz erfolgen. Die Homogenisierung wird in beiden Routinen nach dem Mori-Tanaka-Verfahren durchgeführt [31]. Nach den beiden Homogenisierungsmethoden wird jedes Element durch ein anisotropes Ersatzmaterial beschrieben, welches Lufteinschlüsse, den Faservolumenanteil und die Faserorientierung des SMC berücksichtigt.

Weiterhin sollen Delaminationen in unterschiedlichen Tiefen im SMC auch simulativ betrachtet werden. Das SMC wird hierfür mit einem vierlagigen Aufbau aus Continuum Shell Elementen modelliert. Es befinden sich folglich im 2 mm dicken SMC-Grundkörper drei interne Grenzschichten. Da nur eine Betrachtung im linear-elastischen Bereich ohne Schädigungswachstum erfolgt, werden die Delaminationen als fehlender „tie constraint“ in der entsprechenden Tiefe modelliert. Die Größe der gemessenen Delamination bestimmt die Anzahl der fehlenden „tie constraints“. Lokale Durchdringungen der Schichten werden an den Stellen der Delamination durch einen Penalty-Parameter verhindert.

Zur Betrachtung der hybriden Materialkombination wird anschließend das 0,1 mm dicke, transversalisotrope CF-Tape auf den SMC-Grundkörper aufgebracht. Mithilfe der optisch erfassten Messergebnisse (Mittelpunkt, Länge, Breite und Orientierung) kann adaptiv die Modellierung der Tape-Geometrie, die der Oberflächenkontur des Grundkörpers folgt, durchgeführt werden. Die Anbindung zwischen CF-Tape und SMC-Grundkörper wird analog zu der schichtweisen Modellierung des SMC durchgeführt. Die gleiche Modellierung ist durch die Verwendung des gleichen Matrixmaterials und der Einschränkung auf den linear-elastischen Bereich begründet. Die Integration der verschiedenen Messergebnisse in einem digitalen Zwilling des produzierten Bauteils wird in **Bild 7** illustriert. Grau hinterlegt sind

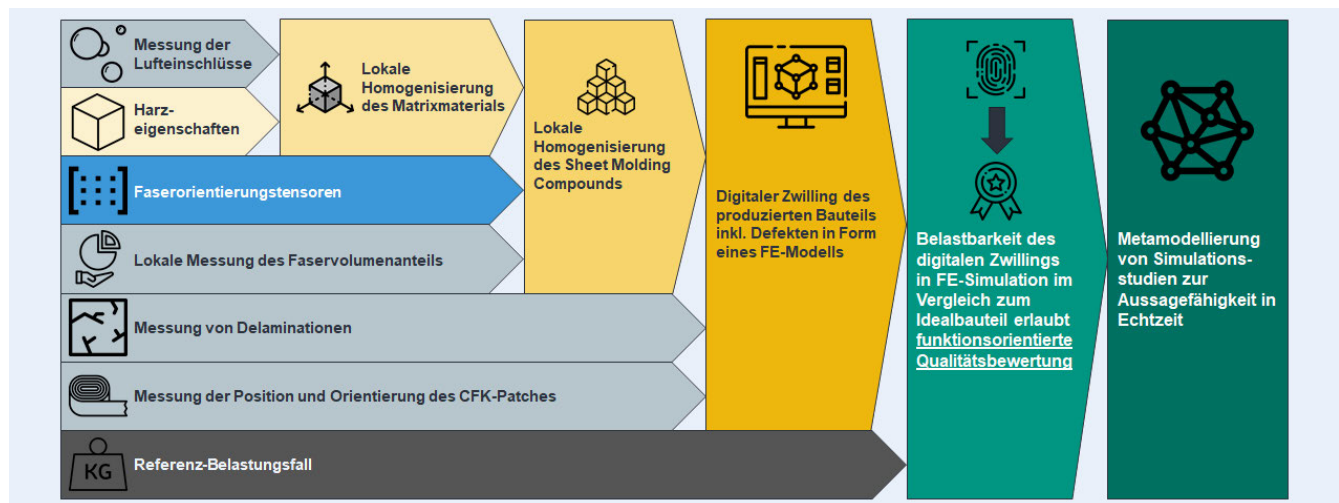


Bild 7. Zusammenspiel von Mess- und Simulationsergebnissen zur Ableitung einer echtzeitfähigen funktionsorientierten Qualitätsbewertung des produzierten Bauteils. Bild: KIT, wbk

die Messergebnisse, welche in die Simulation integriert werden. Gelb hinterlegt sind die zunehmend spezifischer werdenden Materialeigenschaften.

Trotz der einfachen Modellierung von Delaminationen führt die Berücksichtigung der vielen Kontakte zu sehr hohen Rechenzeiten (30 Minuten bis zu 2 Stunden, Prozessor: Intel Core i5–4200U) im Vergleich zu einem angestrebten Produktionstakt von 90 Sekunden. Um trotzdem eine Inline-Qualitätssicherung zu ermöglichen, wird im weiteren Verlauf eine Metamodellierung umgesetzt. Als Eingangsgrößen sollen die Inline-Messgrößen Lufteinschlüsse, Faservolumenanteil, Delamination sowie Lage und Orientierung des CF-Patches dienen. Diese werden für einen gegebenen, repräsentativen Lastfall auf eine Ausgangsgröße abgebildet. Hierfür kommen etwa die globale Formänderungsenergie oder die Verletzung des Tsai-Wu-Kriteriums, als anerkanntes Schadenskriterium für Faserverbundwerkstoffe, in Frage. Die Metamodellierung kann nach der Erzeugung von ausreichend vielen Trainingsdaten durch eine systematische Defektvariation und -kombination umgesetzt werden (beispielsweise mit einem Kriging-Ansatz oder einem künstlichen neuronalen Netz).

Die Messungen der Fertigungsabweichungen unterliegen einer zu bestimmenden Messunsicherheit. Diese dienen als Eingangsparameter in Simulationsstudien und tragen so neben der Diskretisierung des Bauteils ebenso im FE-Modell zum Unsicherheitsbudget bei. Um das vollständige Unsicherheitsbudget aufzustellen, muss abschließend die Messunsicherheit der Metamodellierung bestimmt werden.

4 Fazit und Ausblick

Ein multisensorieller Ansatz ermöglicht die Detektion von verschiedenen Fertigungsabweichungen von hybriden Faserverbunden. Der Nachweis der Messbarkeit der Tape-Positionierung sowie der quantitativen Detektion von Delaminationen ist erfolgt.

Im weiteren Verlauf muss der Nachweis der Unterscheidbarkeit von Delaminationen und Lufteinschlüssen in Thermografieaufnahmen noch erbracht werden. Zudem werden beide Ansätze zur Inline-Messung des Faservolumenanteils verfolgt. Die Integration der Messgrößen in ein Simulationsmodell soll zu einer funktionsorientierten Qualitätsbewertung des Bauteils führen.

Nach Aufbau eines vollständig modularen Simulationsmodells zur adaptiven Implementierung von vorhanden Defekten können Trainingsdatensätze aus Simulationen zur Metamodellierung generiert werden. Die Validierung kann in Form von defektbehafteten Zugproben erfolgen. An diesen können die Defekte gemessen, ihre Auswirkung simulativ bestimmt und mit experimentellen Steifigkeitsergebnissen verglichen werden.

DANKSAGUNG

Die in diesem Beitrag dokumentierte Forschung wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Internationalen Graduiertenkollegs „Integrated Engineering of continuous discontinuous long fibre reinforced polymer structures“ (GRK 2078) gefördert. Wir danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Unterstützung.

Literatur

- [1] Brüggemann, H.; Bremer, P.: Grundlagen Qualitätsmanagement. Von den Werkzeugen über Methoden zum TQM. Lehrbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag 2015
- [2] Kia, H. G. (Hrsg): Sheet molding compounds. Science and technology. München: Carl Hanser Verlag 1993
- [3] Schürmann, H.: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden. VDI-Buch. Heidelberg: Springer-Verlag 2007
- [4] Böhlke, T.; Henning, T.; Hrymak, A. et al.: Integrated Engineering of Continuous-Discontinuous Long Fiber Reinforced Polymer Structures. München: Carl Hanser Verlag 2019
- [5] Pinter, P.; Dietrich, S.; Bertram, B. et al.: Comparison and error estimation of 3D fibre orientation analysis of computed tomography image data for fibre reinforced composites. NDT & E International 95 (2018), pp. 26–35
- [6] Göthofer, J.; Meyer, N.; Pallicity, T. D. et al.: Virtual process chain of sheet molding compound: Development, validation and perspectives. Composites Part B: Engineering 169 (2019), pp. 133–147
- [7] Fengler, B.; Schäferling, M.; Schäfer, B. et al.: Manufacturing uncertainties and resulting robustness of optimized patch positions on continuous-discontinuous fiber reinforced polymer structures. Composite Structures 213 (2019), pp. 47–57

- [8] Trauth, A.: Characterisation and Modelling of Continuous-Discontinuous Sheet Moulding Compound Composites for Structural Applications. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, 2019
- [9] Trauth, A.; Weidenmann, K. A. Continuous-discontinuous sheet moulding compounds – Effect of hybridisation on mechanical material properties. *Composite Structures* 202 (2018), pp.1087–1098
- [10] Jördens, C.; Scheller, M.; Wietzke, S. et al.: Terahertz spectroscopy to study the orientation of glass fibres in reinforced plastics. *Composites Science and Technology* 70 (2010) 3, pp. 472–477
- [11] Jördens, C.; Scheller, M.; Wichmann, M. et al.: Terahertz birefringence for orientation analysis. *Applied Optics* 48 (2009) 11, pp. 2037–2044
- [12] Krumbholz, N.; Hochrein, T.; Vieweg, N. et al.: Monitoring polymeric compounding processes inline with THz time-domain spectroscopy. *Polymer Testing* 28 (2009) 1, pp. 30–35
- [13] Ibarra-Castaneda, C.; Maldague, X. P.: Review of pulse phase thermography. In: Hsieh S.-J.; Zalameda J. N. (Hrsg.): *Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXVII*. Proceedings SPIE 2015
- [14] Dutta, S.; Keller, P.: Automatisierte 3D-Thermografie und -Defektlokalisierung an Großbauteilen. DGZfp Thermographie-Kolloquium, Berlin, 2017
- [15] Ekanayake, S.; Isenberg, C.; Schmitt, R. H.: Method for Quantitative 3D Evaluation of Defects in CFRP Using Active Lock-in Thermography. *Procedia CIRP* 66 (2017), pp. 254–258
- [16] Schäferling, M.: Development of a Data Fusion-Based Multi-Sensor System for Hybrid Sheet Molding Compound. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, 2019
- [17] Franz, M.; Schleich, B.; Wartzack, S.: Variation Analysis of Design Parameters of Fibre-Reinforced Plastic Parts. *Proceedings International Conference on Engineering Design* 1 (2019) 1, pp. 2725–2734.
- [18] Freitag, S.; Cao, B. T.; Ninic, J.; Meschke, G.: Recurrent neural networks and proper orthogonal decomposition with interval data for real-time predictions of mechanised tunnelling processes. *Computers & Structures* 207 (2018), pp. 258–273
- [19] Zimmerling, C.; Trippe, D.; Fengler, B.; Kärger, L.: An approach for rapid prediction of textile draping results for variable composite component geometries using deep neural networks *Proceedings of the 22nd International Esaform Conference on Material Forming: Esaform 2019, Vitoria/Spain*. AIP Conference Proceedings 2113 (2019) 1
- [20] Arian Nik, M.; Fayazbakhsh, K.; Pasini, D.; Lessard, L. A. comparative study of metamodeling methods for the design optimization of variable stiffness composites. *Composite Structures* 107 (2014), pp. 494–501
- [21] Wang, G. G.; Shan, S. Review of Metamodeling Techniques in Support of Engineering Design Optimization. *Journal of Mechanical Design* 129 (2007) 4, pp. 370–380
- [22] Häfner, B.; Biehler, M.; Wagner, R.; Lanza, G.: Meta-Model Based on Artificial Neural Networks for Tooth Root Stress Analysis of Micro-Gears. *Procedia CIRP* 75 (2018), pp. 155–160
- [23] Zaiß, M.; Jank, M.-H.; Netzelmann, U. et al.: Use of Thermography and Ultrasound for the Quality Control of SMC Lightweight Material Reinforced by Carbon Fiber Tapes. *Procedia CIRP* 62 (2017), pp. 33–38
- [24] Schäferling, M.; Berger, D.; Häfner, B.; Lanza, G.: Data Fusion for Quality Assurance of Fibre-Reinforced Plastics. *International Symposium on Structural Health Monitoring and Nondestructive Testing*, Saarbrücken, 2018. Internet: www.ndt.net/article/shmndt2018/papers/SHM-NDT-2018_paper_9.pdf. Zugriff am 09.12.2019
- [25] Bretz, L.; Hinze, T.; Häfner, B.; Lanza, G.: Evaluation of anomaly detection capabilities using a non-orthogonal camera angle in pulse-phase thermography. *2nd CIRP Conference on Composite Material Parts Manufacturing*, 2019 [im Druck]
- [26] Maldague, X. P.V.: *Theory and practice of infrared technology for non-destructive testing*. Wiley series in microwave and optical engineering. New York: Wiley 2001
- [27] Fischer, B.: Optical microphone hears ultrasound. *Nature Photonics* 10 (2016), pp. 356–358
- [28] Schmidt, D.: *Modenselektive Übertragung von Lambwellen in Faserverbundstrukturen*. Dissertation, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Braunschweig, 2014
- [29] Chady, T.; Lopato, P.: Testing of glass-fiber reinforced composite materials using terahertz technique. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics* 33 (2010) 3/4, pp. 1599–1605
- [30] Meyer, N.; Schöttl, L.; Bretz, L. et al.: A Direct Bundle Simulation approach for the compression molding process of Sheet Molding. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 2019 [eingereicht]
- [31] Gross, D.; Seelig, T.: *Bruchmechanik*. Heidelberg: Springer-Verlag 2016



Lucas Bretz, M.Sc.

Bild: Autor

Dr.-Ing. **Benjamin Häfner**
Prof. Dr.-Ing. **Gisela Lanza**

wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe
Tel. +49 (0)1523 / 9502567
lucas.bretz@kit.edu
www.wbk.kit.edu

KI erlaubt automatisierte Erkennung und Einteilung von geometrischen komplexen Schmiedebauteilen

Klassifizierung von Schmiedeteilen mittels KNN

Y. Hedicke-Claus, J. Langner, M. Stonis, B.-A. Behrens

Im Beitrag wird eine Methode auf Basis Künstlicher Neuronaler Netze vorgestellt, die es erlaubt, schmiedetechnisch hergestellte Bauteile automatisiert zur Einordnung in Formenklassen zu klassifizieren. Dadurch ist es möglich, direkt aus der CAD-Datei des Schmiedeteils eine Formenklasse und für die Auslegung des Prozesses relevante Charakteristika zu ermitteln, die in einem übergeordneten Ziel dazu genutzt werden, eine automatisierte Stadienplanung durchzuführen.

STICHWÖRTER

Schmieden, CAD, Software

AI enables automated recognition and classification of geometrically complex forged parts

This paper presents a method for the automated classification of forged parts for classification into the Spies order of shapes by artificial neural networks. The aim is to develop a recognition program within the framework of automated forging sequence planning, which can directly identify a shape class from the CAD file of the forged part and characteristics of the forged part relevant for the design of the process.

1 Einleitung

Schmiedeteile zeichnen sich durch hervorragende mechanische Eigenschaften aus und werden in hochbelasteten Bereichen wie Motoren oder Fahrwerken im Automobilbau oder auch in Triebwerken in der Luftfahrtindustrie eingesetzt [1, 2]. Aufgrund ihrer unterschiedlichsten Einsatzgebiete weisen Schmiedeteile eine hohe Formenvielfalt und teils eine sehr hohe geometrische Komplexität auf. Deshalb können sie nicht in einem Schritt hergestellt werden, sondern werden in mehreren Schritten (Stadienfolge) produziert [3]. Je komplexer ein Schmiedeteil ist, beispielsweise durch eine ausgeprägte Massenverteilung im 3D-Raum, desto aufwendiger ist der Auslegungsprozess für eine effiziente und wirtschaftliche Stadienfolge. Der Auslegeprozess der einzelnen Zwischenformen ist rückwärtsgerichtet vom fertigen Schmiedeteil zum Halbzeug. Die häufig als Hilfsmittel eingesetzte FEM geht allerdings vorwärtsgerichtet vom Halbzeug zum fertigen Schmiedeteil vor. Aus dieser Gegenläufigkeit ergibt sich ein hoher Entwicklungsaufwand. Der Auslegeprozess der Stadienfolge ist dabei stark geprägt vom Erfahrungswissen des Konstrukteurs beziehungsweise Referenzprozessen von ähnlichen Schmiedeteilen [3, 4].

Im Rahmen des IGF-Forschungsprojekts „Effiziente Stadienplanung“ wird eine Methode entwickelt, die rückwärtsgerichtet auf Basis der CAD-Datei der fertigen Schmiedeteilgeometrie automatisiert eine Stadienfolge ohne den Einsatz der zeitaufwändigen FEM generiert [5]. Durch eine Automatisierung des Auslegeprozesses können so Kosten und Zeit in der Entwicklung eingespart werden.

Für die automatisierte Generierung einer Stadienfolge müssen zuerst Charakteristiken des Schmiedeteils, die Einfluss auf den

Auslegeprozess einer Stadienfolge haben zu Beginn des Auslegeprozesses automatisiert identifiziert werden. Die Formenordnung nach Spies [6] gibt eine geeignete Ordnung zur Klassifizierung von Schmiedeteilen auf Basis der Bauteilgeometrie vor. Um Objekte automatisiert zu klassifizieren sind Künstliche Neuronale Netze (KNN) sehr gut geeignet [7, 8]. In der Produktionstechnik finden KNN häufig Anwendung zur Auswertung und Analyse von Messdaten. Beispielsweise wird in [9] ein KNN verwendet, um anhand von Messdaten direkt nach der Fertigung die Schmiedeteilqualität zu beurteilen. Eine Eigenschaft von KNN ist, dass diese zunächst angelernt werden müssen, nach erfolgreichem Training dann jedoch in der Lage sind erlernte und ähnliche Muster zu erkennen [10]. Daher sind KNN auch für den Anwendungsfall einer automatisierten Stadienplanung hervorragend geeignet, da auf der Datenbasis von verschiedenen Schmiedeteilen das KNN angelernt werden kann, um ähnliche Schmiedeteile zu erkennen und auf Basis der erkannten Mustern automatisiert zu klassifizieren. Im Folgenden werden theoretische Grundlagen zu KNN vorgestellt. Anschließend wird das entwickelte Programm zur Klassifikation der Schmiedeteile, die Generierung der Eingangsdaten sowie die Trainings- und Testphase der entwickelten KNN beschrieben.

2 Aufbau und Funktion eines Künstlichen Neuronalen Netzes

Ein neuronales Netz ist ein informationsverarbeitendes System, das aus einfachen Recheneinheiten, den Neuronen und gewichteten Verbindungen zwischen diesen besteht [11]. Die Neuronen tauschen Informationen in Form von Aktivierung der Neuronen aus [7, 8]. **Bild 1** (a) zeigt den schematischen Aufbau

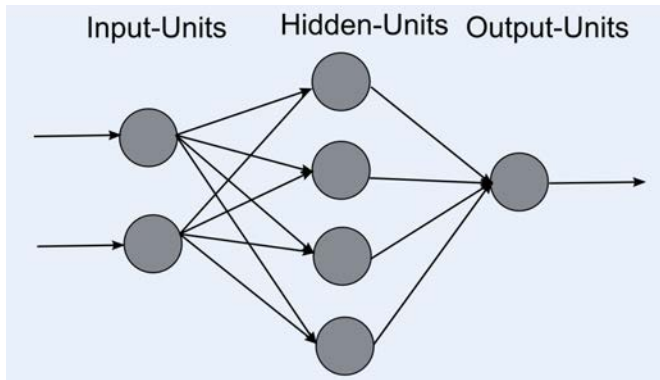


Bild 1. a) Vorwärtsgerichtetes KNN b) Aufbau eines Neurons Bild: IPH

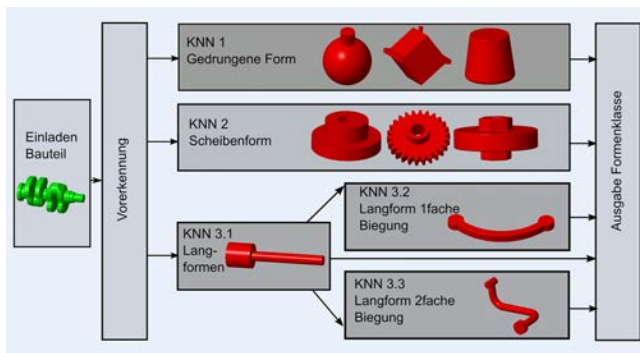
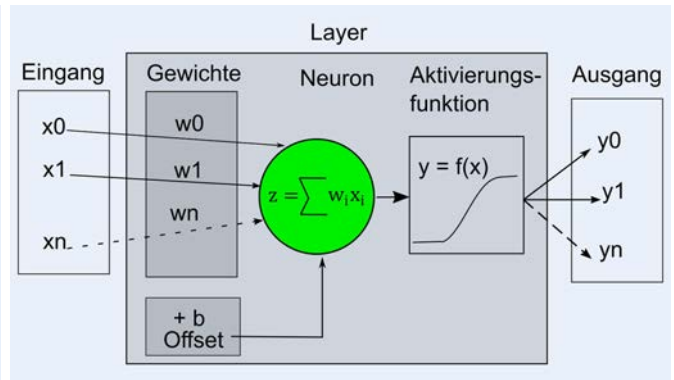


Bild 2. Topologie des Programms zur Erkennung der KNN Bild: IPH

eines KNN. Eingabeneuronen (Input-Units) nehmen Signale auf und geben die Eingaben an das Netz weiter. Über die Ausgabe-neuronen (Output-Units) wird die Ausgabe aus dem Netz zurück nach außen gegeben. Die eigentliche Informationsverarbeitung des KNN erfolgt durch die verdeckten Neuronen (Hidden-Units). Das Gewicht einer Verbindung von Neuron i zu Neuron j wird als w_{ij} bezeichnet. Das Verbindungsgewicht wirkt hemmend oder verstärkend. In den Verbindungsgewichten ist das Wissen des KNN gespeichert. Bild 1 (b) stellt den Aufbau eines künstlichen Neurons dar.

Der Eingang in die Aktivierungsfunktion f eines Neurons ergibt sich aus der Summe der Multiplikation aller Eingangswerte x_i mit den dazugehörigen Gewichten w_i und dem addierten Offset b . Das Ergebnis ist der Ausgang beziehungsweise die Aktivierung des Neurons:

$$out = f\left(\sum w_i x_i + b\right).$$

3 Topologie des Programms zur Klassifizierung von Schmiedeteilen

Für die automatisierte Klassifizierung von Schmiedeteilen in Formenklassen nach SPIES wird eine hybride Struktur aus Vorerkennung und KNN eingesetzt. Mittels einer Vorerkennung werden die Objekte aus der CAD-Datei anhand von geometrischen Merkmalen in die drei verschiedenen Grundformen der Formenordnung nach SPIES (Gedrungene Form $l = b = h$, Scheibenform $l = b > h$ und Langform $l \gg h, b$) kategorisiert. Aus der Grundform können für die Auslegung der Stadienfolge signifikante Charakteristika abgeleitet werden wie die Schnittachse zur Bestimmung der Massenverteilung um die Schwerpunktklinie. Bei

Scheibenformen ist der Stauchprozess ein elementarer Bestandteil der Stadienfolge und es ist ein maximales Stauchverhältnis pro Stadien einzuhalten.

Der erste untersuchte Ansatz bestand darin, nach der Vorerkennung die Schmiedeteile an eines von drei auf die einzelnen Formenklassen spezialisierten KNN zu übergeben, um eine zuverlässige Klassifizierung der Schmiedeteile in den Subformklassen zu erreichen. Es wurde eine eigene Methode programmiert, um die Klassifizierung der Schmiedeteile durchzuführen. Die Methode wurde in „Matlab“ entwickelt und umgesetzt. Mit dem Ansatz von drei spezialisierten KNN konnten allerdings nur Erkennungsraten von etwa 60 % erzielt werden. Die größte Schwierigkeit lag bei der zuverlässigen Erkennung von gekrümmten Langteilen. Gerade für gekrümmte Schmiedeteile wird im Rahmen einer automatisierten Stadienplanung eine hohe Erkennungsrate gefordert, da gekrümmte Schmiedeteile in der Stadienfolge eine Biegeoperation benötigen. Daher wurden zwei weitere KNN in das Programm implementiert, die spezialisiert auf die Erkennung von einfach beziehungsweise zweifach gekrümmten Schmiedeteilen innerhalb der Langformen sind. Daraus ergibt sich die Struktur des Erkennungsprogramms zur Klassifizierung von Schmiedeteilen mit fünf KNN wie in Bild 2 dargestellt. Wird im Rahmen der Vorerkennung das Schmiedeteil als Langform identifiziert, erfolgt eine weitere Prüfung ob das Schmiedeteil einfach oder mehrfach gekrümmt ist und das Schmiedeteil wird an das entsprechende Netz übergeben. Für die KNN werden Backpropagation-Netze mit Resilienz verwendet. Als Aktivierungsfunktion für die Neuronen wurde aufgrund der einfachen Differenzierbarkeit die Sigmoid-Funktion $\psi(x)$ verwendet:

$$f(x) = \psi(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}.$$

Backpropagation beschreibt ein überwachtes Lernverfahren zum Einlernen von KNN mittels des Gradientenabstiegsverfahrens [10]. Zu Beginn wird ein beliebiger Eingangsvektor aus der Trainingsmenge eingegeben und vorwärts durch das Netz propagiert. Die Ausgabe des KNN wird mit dem Zielwert der Ausgabe verglichen.

Die Differenz aus Ausgabe- und Zielwert wird als Fehler bezeichnet. Der Fehler wird über die Ausgabeschicht zurück an das Netz propagiert, dabei werden die Gewichtungen der Neuronenverbindungen durch eine vorgegeben Lernregel abhängig von ihrem Einfluss auf den Fehler geändert. Dadurch wird bei einem weiteren Anlegen der Eingabe eine Annäherung an die gewünschte Ausgabe erreicht [7]. Zunächst wurde ein Backpropagation-Netz mit Momentumterm verwendet, um die Lernrate zu be-

Tabelle 1. Zuordnung der Formenklassen nach Spies [6] zu den KNN

Hauptformgruppe	Subformenklassen					KNN	Anzahl Output-Neuronen	Anzahl Hidden-Neuronen
Gedrungene Formen (3 Achsen)	101	102	103	104	105	KNN 1	15	15
Scheibenformen (2 Achsen)	211	212	213	214	215	KNN 2	18	18
		222	223	224	225			
Langformen (1 Achse)	311	312	313	314	315	KNN 3.1	8	5
	321	322	323	324	325	KNN 3.2	8	5

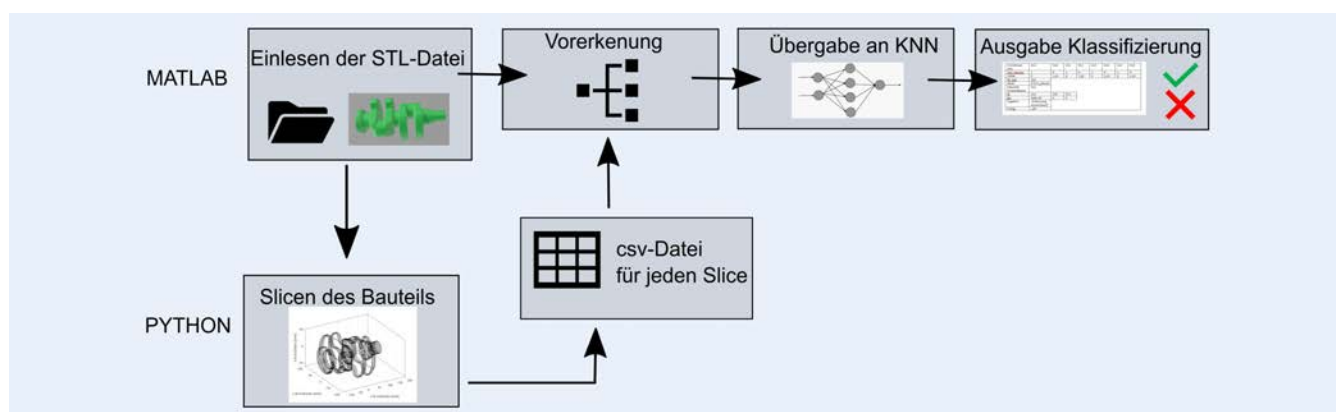
schleunigen. Während der Trainingsphase hat sich gezeigt, dass das Konvergenzverhalten mit dem Momentumterm nicht zufriedenstellend war. Teilweise wurde für die KNN einzelner Formenklassen keine Konvergenz erreicht. Daher wurde das Backpropagation-Netz mit Resilienz gewählt. Ein Vorteil ist, dass dadurch jedem einzelnen Gewicht eine eigene Lernrate zugewiesen werden kann und mit allen Trainingsdatensätzen gleichzeitig gelernt wird [10]. Bei der Betrachtung des Konvergenzverhaltens konnten deutlich bessere Ergebnisse (250 Epochen bis Konvergenz statt 9000 Epochen) erzielt werden als mit den KNN mit Momentumterm und somit die Zeit eines Trainingsdurchlaufs deutlich reduziert werden. Im folgenden Abschnitt wird die allgemeine Struktur der entwickelten KNN vorgestellt. Die Anzahl der Output-Neuronen steht in direktem Zusammenhang mit der Anzahl der Formenklassen nach Spies. Die **Tabelle 1** zeigt die Formenklassen nach Spies in vereinfachter Darstellung. Die Anzahl der Output-Neuronen ergibt sich für das entsprechende KNN aus der Multiplikation der Anzahl an Subformklassen mit den jeweiligen bestimmenden geometrischen (Schnitt)-Achsen. Jedes der fünf KNN verfügt über 2000 Input-Neuronen. Die Erzeugung der Eingangsdaten wird im folgenden Kapitel vorgestellt.

4 Erzeugung der Eingangsdaten für die Eingangsneuronen

Die Grundlage für eine möglichst zuverlässige und richtige Klassifizierung der Schmiedeteile mittels der KNN sind Eingangsdaten, die es ermöglichen die geometrischen Charakteristika der Schmiedeteile aus der CAD-Datei zu beschreiben. **Bild 3** zeigt das Vorgehen zur Erzeugung der Eingangsdaten und der an-

schließenden Klassifizierung der Schmiedeteile. Im ersten Schritt wird das Schmiedeteil als STL-Datei in das entwickelte Programm in Matlab importiert. Vor der Übergabe an den Slicer-Algorithmus in „Python“ wird jedes Objekt in Größe und Position normiert, um eine Unabhängigkeit der Orientierung im Raum des Objekts zu erhalten und eine einheitliche Datenstruktur zu gewährleisten.

Die normierten Objekte werden durch den Slicer-Algorithmus in 100 Schnittebenen eingeteilt. In jeder Schnittebene werden die Koordinaten des Polygonzugs, die Flächeninhalte der Querschnitte sowie die Schwerpunkte bestimmt. Zur Klassifizierung der Schmiedeteile ist die Schwerpunktklinie essentiell, da über die Schwerpunktklinien beziehungsweise anhand der zweiten Ableitung der Schwerpunktklinie die Krümmung von Objekten identifiziert wird. Für jedes Objekt werden die einzelnen Querschnitte in eine linke und rechte Fläche unterteilt (**Bild 4**) und es wird jeweils der linke und rechte Flächenschwerpunkt bestimmt. Diese Hilfsparameter dienen der Erkennung von Nebenformelementen. Der Slicer-Algorithmus speichert alle Analysedaten einer Schnittebene in einer csv-Datei für jedes geschlossene Polygon in der jeweiligen Schnittebene ab. Mit einer Deep-Funktion werden, für den Fall das mehr als eine abgeschlossene Fläche in einer Schnittebene vorliegt, überprüft ob die einzelnen Polygone ineinander liegen. Dadurch wird gewährleistet, dass die Flächen der Polygone je nach Schmiedeteil addiert und subtrahiert werden, um den Flächeninhalt der Schnittebene korrekt zu berechnen. Zunächst liegen alle Polygone einer Schnittebene ungeordnet in einer Ebene E_0 vor. Anschließend erfolgt eine Abfrage ob für Polygon P_i gilt $P_i \in P_j$. Ist das der Fall erfolgt eine Umsortierung des Polygons P_i in die tiefere Ebene E_n unter P_j . Aufgrund der rekursiven

**Bild 3.** Ablaufplan zu Klassifizierung der Schmiedeteile Bild: IPH

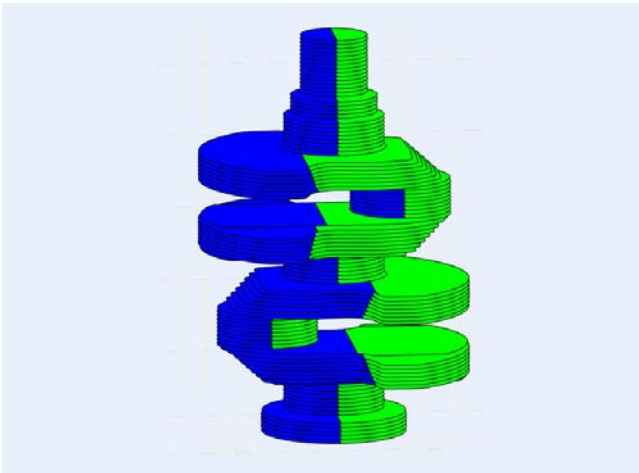


Bild 4. Geschnittenes Schmiedeteil mit markierten linken (blau) und rechten (grün) Flächen Bild: IPH

Programmierung erfolgt der Rückgabewert der untersten Stelle. Zur Berechnung des Flächeninhalts der Schnitteben ergibt sich daraus folgende Rechenvorschrift:

$$A_{ges, slice} = A_{EO} - \sum_{i=\{1,3,5\}}^n A_i + \sum_{j=\{2,4\}}^n A_j.$$

Diese Tiefenstruktur wird für jedes Schmiedeteil bestimmt und stellt einen wichtigen Parameter zur erfolgreichen Klassifizierung dar, denn so kann überprüft werden ob beispielsweise ein Loch

bzw. eine Bohrung vorliegt oder ob es sich um ein gegabeltes Schmiedeteil handelt. Insgesamt ergibt sich für jedes Objekt aus der geometrischen Analyse der Schnittebenen ein Datensatz aus 2000 Informationen. **Tabelle 2** enthält eine Erläuterung des Datensatzes. Die Datensätze werden in Matlab importiert und nach der Vorerkennung, an die auf die einzelnen Hauptformenklassen spezialisierten KNN übergeben. Abschließend erfolgt die Ausgabe des Ergebnisses der Klassifizierung des Schmiedeteils.

5 Training und Ergebnisse der Klassifizierung von Schmiedeteilen mittels KNN

Damit die KNN die unterschiedlichen Schmiedeteile richtig klassifizieren, müssen zunächst Trainingsdatensätze zum Lernen generiert werden. Für das Training der KNN wurden insgesamt 161 verschiedene Schmiedeteile verwendet. Die Großzahl der verwendeten Schmiedeteile wurde entsprechend nach den Charakteristika der einzelnen Formenklasse als CAD-Modelle nach *Spies* konstruiert. Neben den eigenständig konstruierten Schmiedeteilen wurde auch Schmiedeteile aus dem Produktportfolio der Projektpartner aus der Industrie in die Trainingsdaten implementiert. Zum Testen der Netze wurden 42 Schmiedeteile, ebenfalls eine Mischung aus Eigenkonstruktionen und industriellen Schmiedeteilen, verwendet. **Bild 5** visualisiert die Erkennungsrate der entwickelten KNN zur Klassifizierung von Schmiedeteilen. Für 10 Trainingsdurchläufe ergibt sich eine mittlere Erkennungsrate der Testdaten von 83,3 %. Ein Trainingsdurchlauf entspricht

Tabelle 2. Eingangsparameter für die KNN

Eingangsneuronen	Beschreibung
1–100	Volumen jedes einzelnen Schnittes
101–200	Schwerpunkt jedes Schnittes in X-Achse
201–300	Schwerpunkt jedes Schnittes in der Y-Achse
301–400	Fläche der linken Hälfte eines jeden Schnittes
401–500	Schwerpunkt der linken Hälfte von jedem Schnitt in der X-Achse
501–600	Schwerpunkt der linken Hälfte von jedem Schnitt in der Y-Achse
601–700	Fläche der rechten Hälfte eines jeden Schnittes
701–800	Schwerpunkt der rechten Hälfte von jedem Schnitt in der X-Achse
801–900	Schwerpunkt der rechten Hälfte von jedem Schnitt in der Y-Achse
901–1000	höchster geometrischer Punkt von jedem Schnitt in der Z-Achse
1001–1100	niedrigster geometrischer Punkt von jedem Schnitt in der Z-Achse
1101–1200	höchster geometrischer Punkt von jedem Schnitt in der X-Achse
1201–1300	niedrigster geometrischer Punkt von jedem Schnitt in der X-Achse
1301–1400	höchster geometrischer Punkt von jedem Schnitt in der Y-Achse
1401–1500	niedrigster geometrischer Punkt von jedem Schnitt in der Y-Achse
1501–1600	Erkennung der Grundform und Angaben ob Krümmung vorhanden ist
1601–1700	Fünf Schnittebenen in Folge mehr als ein Polygon im Querschnitt (Beispiel Gabel)
1701–1800	Feingliedrigkeitsfaktor des Objektes [6]
1801–1900	Geben an wie viele Objekte sich in dem jeweiligen Schnitt befinden
1901–2000	Maximale Anzahl der verschachtelten Objekte in einem Schnitt (Beispiel Löcher)

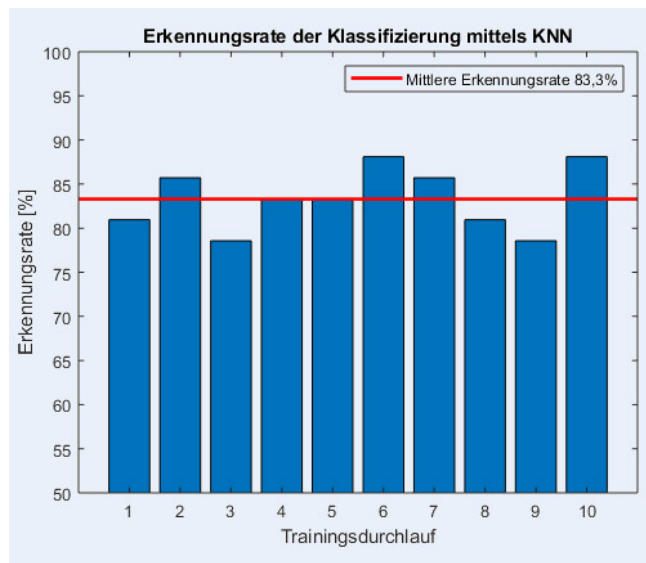


Bild 5. Mittlere Erkennungsrate des KNN über 10 Trainingsdurchläufe
Bild: IPH

dem Lernprozess der KNN auf Basis der vorgegebenen Trainingsdaten. Von 42 als Testdaten betrachteten Schmiedeteilen werden im Durchschnitt 35 Schmiedeteile richtig klassifiziert. Die richtige Klassifizierung entspricht hierbei der vorher vom Anwender festgelegten Formenklasse der einzelnen Schmiedeteile. Die höchste Erkennungsrate, die erzielt werden konnte liegt bei 88,1 %, die niedrigste Erkennungsrate liegt bei 78,1 %. Diese Erkennungsraten zur Klassifizierung von Schmiedeteilen nach der Formenordnung nach *Spies* können als sehr gut angesehen werden. Bei vielen Schmiedeteilen lässt sich auch in der Praxis keine eindeutige Klassifizierung vornehmen und es kommt zu unterschiedlichen Ergebnissen bei der Einteilung der Schmiedeteile durch erfahrene Konstrukteure. Daher wird in der Ergebnisausgabe auch immer noch die Klassifizierungen mit der zweit- beziehungsweise dritthöchsten Gewichtung angegeben. Denn gerade zwischen Subformenklassen sind die Übergänge zwischen den Schmiedeteilen fließend. Wichtig ist, dass signifikante Charakteristika für die Auslegung einer Stadienfolge zuverlässig und re-

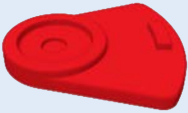
produzierbar erkannt werden. Bei der Auswertung der Klassifizierungen wird deutlich, dass die KNN die Hauptformklassen immer richtig erkennen. Beispielhafte fehlerhafte Klassifizierungen sind in **Tabelle 3** dargestellt. Gerade bei den Langformen (3xx) zeigen die Klassifizierungen nur sehr geringe Abweichungen des Ausgabewerts vom Zielwert. Für die Kurbelwelle werden beispielsweise keine symmetrischen (322) Nebenformelemente erkannt, sondern unsymmetrische Nebenformelemente (321). Diese Abweichungen besitzen für eine prozesssichere und effiziente Auslegung der Stadienfolge keine Relevanz und können somit vernachlässigt werden. Auch bei den anderen fehlerhaft klassifizierten Schmiedeteilen ist die fehlerhafte Erkennung nicht signifikant für die Auslegung der Stadienfolge.

Bild 6 zeigt das Konvergenzverhalten der auf die einzelnen Formenklassen spezialisierten KNN. Links ist das Konvergenzverhalten bei einer hohen Erkennungsrate von 88,1 % dargestellt. Rechts ist das Konvergenzverhalten bei einer niedrigen Erkennungsrate von 78,1 % dargestellt. Auffällig ist der Unterschied des Konvergenzverhaltens von KNN 3.1. Bei hoher Erkennungsrate ist Konvergenz bereits nach 150 Epochen erreicht, bei schlechter Erkennungsrate erst nach 250 Epochen. Somit kann das Konvergenzverhalten während der Lernphase von KNN 3.1 direkt als Indikator für eine die Qualität Klassifizierung beziehungsweise die Erkennungsrate angesehen werden. Konvergiert KNN 3.1 schnell, dann ist auch die Erkennungsrate der Schmiedeteile höher. Die KNN 3.2 und 3.3 konvergieren in beiden Fällen am schnellsten. Die KNN 1 und 2 benötigen in beiden eine vergleichbare Anzahl an Epochen bis zur Konvergenz. Nur der Verlauf des Maximums der Norm über die Epochen unterscheidet sich.

6 Zusammenfassung

Im Rahmen der Entwicklung einer Methode zur automatisierten Auslegung von Stadienfolgen ist die Identifikationen der Formenklasse des Schmiedeteils elementar. Mittels einer klassifizierten Formenklasse können für die Auslegung relevante Charakteristika wie beispielsweise Biegung oder Löcher eines Schmiedeteiles erkannt werden. Für eine automatisierte Erkennung der Formenklasse eines Schmiedeteils wurden fünf mit einander ver-

Tabelle 3. Fehlerhafte Klassifizierung der Testdaten bei insgesamt 88,1 %-Erkennungsrate

Schmiedeteil	Zielwert	Ausgabewert	Fehleranalyse
	212	224	KNN hat den einen Rand und ein zweiseitiges Nebenformelement erkannt statt einem einseitigen Nebenformelement
	222	212	KNN hat das untere Nebenformelemente nicht als Merkmal identifiziert
	315	313	KNN hat die Gabelung richtig erkannt, aber hat das kleine Nebenformelemente in der Mitte nicht erkannt
	322	321	KNN hat für das Schmiedeteil keine Nebenformelemente erkannt

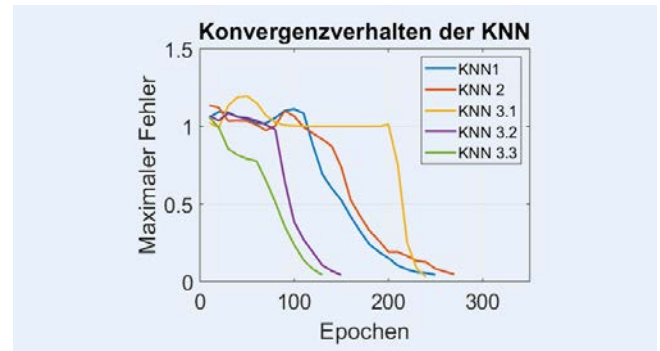
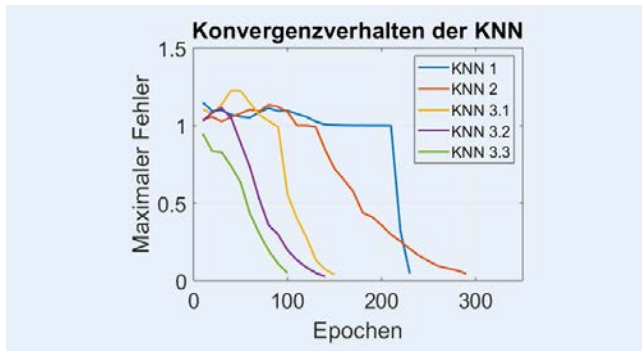


Bild 6. Darstellung des Konvergenzverhaltens der KNN für die einzelnen Formenklasse bei hoher Erkennungsrate 88,1 % (links) und niedriger Erkennungsrate 78,1 % (rechts) Bild: IPH

knüpfte KNN mit 2000 Inputneuronen entwickelt, die auf Basis der CAD-Datei eines Schmiedeteils die Formenklasse identifizieren können. Das entwickelte Programm zur Klassifizierung von Schmiedeteilen nach der Formenordnung von SPIES liefert sehr gute Ergebnisse und hat gezeigt, dass KNN sehr gut geeignet sind, um Schmiedeteile auf Basis einer CAD-Datei zu klassifizieren. Gerade bei den Subklassen der Formenordnung ist eine eindeutige Unterscheidung der Schmiedeteile auch für erfahrene Konstrukteure nicht mehr eindeutig. Daher entspricht eine mittlere Erkennungsrate von 83,3 % zum jetzigen Stand der Forschung einer absolut hinreichenden Genauigkeit. Die Hauptformklassen (Scheibenform, gedrungene Form und Langform) können durch die KNN sicher erkannt werden. Im nächsten Entwicklungsschritt der Methode zur effizienten Stadienplanung sollen die Algorithmen zur Erzeugung der Zwischenformen mit dem vorgestellten Programm zur Klassifizierung der Schmiedeteile miteinander verknüpft werden. Durch die Zuweisung des Schmiedeteils in eine Formenklasse können in der Methode zu effizienten Stadienplanung verschiedene von der Formenklassen abhängige Algorithmen für entsprechende Sonderoperationen (Beispiel Biegung des Schmiedeteils) aufgerufen werden.

- [5] Hedicke-Claus, Y.; Langner, J.; Stonis, M.; Behrens, B. A.: Innovativer Ansatz zur effizienten Stadienplanung. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 113 (2018) 10, S. 668–672
- [6] Spies, K.: Eine Formenordnung für Gesenkschmiedestücke. Werkstattstechnik und Maschinenbau 47 (1957) 4, S. 201–205
- [7] Lippe, W. M.: Softcomputing: Mit neuronalen Netzen, Fuzzy-logic und evolutionären Algorithmen. Springer-Verlag, 2006
- [8] Behrens, B. A.; Kosch, K. G.; Schmidt, H.: Qualitätsüberwachung beim Gesenkschmieden durch den Einsatz Künstlicher Neuronaler Netze. utfscience.de 4, 2010
- [9] Kruse, R.; Borgelt, C.; Klawonn, F.; Moewes, C.; Ruß, G.; Steinbrecher, M.: Computational intelligence. Vieweg+Teubner 2011
- [10] Kriesel, D.: Ein kleiner Überblick über Neuronale Netze 2008. Download unter Internet: <http://www.dkriesel.com/index.php>. Zugriff am 31.05.2019
- [11] Schnerr, O.: Automatisierung der Online-Qualitätsüberwachung beim Kunststoffspritzgießen, Dissertation RWTH Aachen, 2000



Yorck Hedicke-Claus, M.Sc.,
Bild: IPH

Dr. Jan Langner, Dr. Malte Stonis
IPH – Institut für Integrierte Produktion
Hannover gemeinnützige GmbH
Hollerithallee 6
30419 Hannover
Tel. +49 (0)511 / 27976-110
hedicke-claus@iph-hannover.de
www.iph-hannover.de

Prof. Dr. Bernd-Arno Behrens
Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen
Leibniz Universität Hannover
An der Universität 2
30823 Garbsen
Tel. +49 (0)511 / 762-2164
behrens@ifum.uni-hannover.de

Literatur

- [1] Herbertz, R.; Hermanns, H.; Labs, R.: IMU – Massivumformung kurz und bündig (2013). Online: http://passthrough.fw-notify.net/download/299942/http://www.massivumformung.de/fileadmin/user_upload/8_Karriere/IMU_Fachbuch_2013.pdf. Zugriff am 31.05.2019
- [2] van Basshuysen, R.; Schäfer, F.: Handbuch Verbrennungsmotor, 8 (2017), S. 101–405, S. 1350–1358. Wiesbaden: Springer-Vieweg-Verlag
- [3] Behrens, B. A.; Nickel, R.; Müller, S.: Flashless precision forging of a two-cylinder-crankshaft. Production Engineering, 3 (2009) 4/5, S. 381–389
- [4] Knust, J.; Stonis, M.; Behrens, B. A.: Preform optimization for hot forging processes using an adaptive amount of flash based on the cross section shape complexity. Production Engineering, 10 (2016) 6, S. 587–598

Möglichkeiten und Grenzen

Detektion von Bauteilfehlern aus Maschinendaten

M. Weigold, A. Fertig, C. Bauerdick

Durch zunehmende Vernetzung und Digitalisierung von Werkzeugmaschinen und Automatisierungskomponenten ergibt sich die Möglichkeit, Signale mit hohen Datenraten und großer Vielfalt aufzuzeichnen. Der vorliegende Beitrag beschreibt erste Untersuchungen zur Realisierbarkeit einer prozessparallelen Detektion von Bauteilfehlern auf Basis interner Werkzeugmaschinendaten. Dabei werden Potenziale und Grenzen für diesen neuartigen Ansatz zur hauptzeitparallelen Qualitätssicherung aufgezeigt.

STICHWÖRTER

Industrie 4.0, Qualitätssicherung, Werkzeugmaschinen

Detection of workpiece flaws out of machine tool data – possibilities and limits

The increasing networking and digitization of machine tools and automation components provides the opportunity to record signals with high data rates and great diversity. This paper describes first investigations on the feasibility of a process-parallel detection of component defects on the basis of internal machine tool data. Potentials and limits for this novel approach to quality assurance parallel to machining time are presented.

1 Methoden zur Qualitätssicherung spanender Fertigungsverfahren

In der Produktion lassen sich unter anderem die End-of-Line- und die In-line-Qualitätssicherung für die Gewährleistung der Qualität der gefertigten Werkstücke unterscheiden. Wie der Name bereits suggeriert, werden im Rahmen der End-of-Line-Prüfung die Werkstücke am Ende der Produktionslinien auf Qualitätsmängel geprüft. Hieraus können infolge von Fehlern in den ersten Schritten vermeidbare Kosten durch die weitere Bearbeitung der fehlerhaften Bauteile in den darauffolgenden Produktionsschritten entstehen. Damit verbunden sind Zeitverluste in der Produktion sowie unnötige Maschinenbelegungen, welche ebenfalls in erhöhten Kosten resultieren. Durch die In-Line-Qualitätssicherung lassen sich diese Nachteile vermeiden, indem mithilfe von geeigneten Messmitteln und Prüfvorrichtungen eine Beurteilung der Qualität nach jedem einzelnen Schritt in der Linie durchgeführt wird [1]. Damit sind auf der einen Seite Kosten für potenzielle Nacharbeit oder gar Ausschuss vermeidbar, jedoch steigen die Kosten der Qualitätssicherung, sowie die Durchlaufzeit um ein Vielfaches. Zur Minimierung dieser Aufwände sowohl bei der End-of-Line- als auch bei der In-Line-Kontrolle, wird oftmals nur noch stichprobenartig geprüft [2–4]. Mithilfe von neuartigen Aufzeichnungslösungen für Werkzeugmaschinendaten können Informationen über den Prozess und das Werkstück extrahiert und für prozessparallele Qualitätssicherungsstrategien eingesetzt werden. Damit ergibt sich die Möglichkeit einer (nach anfänglichen Investitionskosten und Initialaufwänden) kosten-

neutralen 100 %-Prüfung der Werkstücke. Im Beitrag werden die Möglichkeiten untersucht, Werkstückfehler basierend auf Maschinendaten während der Bearbeitung am Beispiel einer Drehbearbeitung zu detektieren. Die Überwachung der gesamten Fertigungsprozesskette auf Basis von Maschinendaten soll bereits während der Bearbeitung mögliche Fehler und Probleme aufzeigen und so eine In-Process-Qualitätsbeurteilung ermöglichen. Schlussendlich soll diese Vorgehensweise durch Analyse der vorhandenen Maschinendaten zur Senkung von Produktionskosten durch frühe Erkennung von Bauteilfehlern führen und andererseits die Kosten der Qualitätssicherung bei gleichzeitiger 100 %-Prüfung der Werkstücke minimieren. Um die Potenziale von internen Antriebsdaten aus Werkzeugmaschinen in Bezug auf prozessparallele Qualitätsüberwachungen in zerspanenden Fertigungsverfahren aufzuzeigen, wurden am Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) der Technischen Universität Darmstadt Versuchsreihen durchgeführt, in denen untersucht wurde, wie sich die relevanten Daten aus dem Serienprozess automatisiert extrahieren lassen und ob sich vorhandene Rohteilfehler auf maschineninterne Antriebsdaten auswirken.

Im ersten Schritt wird auf die Versuchsumgebung mit den damit verbundenen Randbedingungen eingegangen. Darauf aufbauend erfolgt die Vorstellung der künstlichen Fehlernachbildung in Versuchswerkstücken, welche zerspanend bearbeitet wurden. Während des Prozesses diente die parallele Aufzeichnung von maschineninternen Parametern als Grundlage für die Detektion der eingebrachten Fehlstellen.

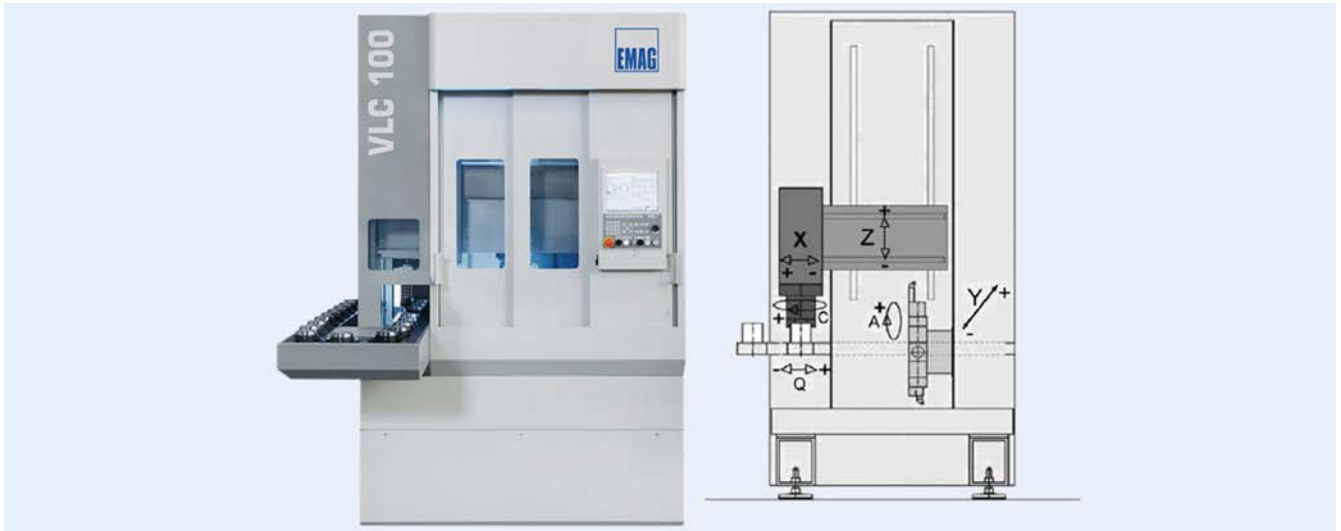


Bild 1. Versuchsmaschine Emag (links) mit ihren Maschinenachsen (rechts). Bild: Emag

2 Bauteilfehlerdetektion auf Basis interner Werkzeugmaschinenendaten

2.1 Versuchsumgebung und Randbedingungen

Für die Analysen wurde der in der ETA-Fabrik am Institut für PTW nachgebildete Produktionsprozess einer Steuerscheibe für Koaxialpumpen untersucht. Die zerspanende Bearbeitung erfolgt dabei über mehrere unterschiedliche Fertigungsprozesse mit geometrisch bestimmter Schneide. Angefangen vom Runddrehen und Plandrehen hin zum Fräsen und Bohren. Dabei wird sich in dieser Arbeit auf die Plandrehprozesse fokussiert. Als Versuchsmaschine diente das in **Bild 1** gezeigte Drehbearbeitungszentrum vom Typ Emag VLC 100Y.

Bild 2 (a) zeigt die genutzte und von Bosch Rexroth entwickelte Aufzeichnungslösung Efficiency Workbench (EWB) zur Aufzeichnung von maschineninternen Sercos-Parametern [5]. Dabei greift die auf einem Industrie-PC (IPC) installierte Software direkt auf die maschineninternen Signale zu, zeichnet diese auf und speichert die Daten nach interner Weiterverarbeitung ab. Zu jedem aufgezeichneten Signal werden so jeweils einzelne

Dateien erzeugt. Die Abtastrate beträgt je Sensor 4 ms. Insgesamt wurden 20 Sercos-Parameter aus der Steuerung ausgelesen. Darüber hinaus wird der Programmcode (NC/G-Code) mit Zeitstempel aufgezeichnet.

2.2 Vorbereitung – Nachbildung von Bauteilfehlern

Die verwendeten Halbzeuge bestehen aus dem Stahlwerkstoff 8CrMo16 und weisen einen Außendurchmesser von 94 mm bei einer Höhe von 16 mm auf. Für die Untersuchung wurden vier Fehlerklassen in den Versuchskörpern nachgebildet. **Bild 3** zeigt die nachgebildeten Hohlräume, Risse in Form von Materialspalten, Einschlüsse und lokalen Festigkeitsänderungen. Hohlräume sind durch Bohrungen mit verschiedenen Durchmessern nachgebildet worden. Einschlüsse wurden durch Einpressungen von unterschiedlichen Stiften realisiert, wodurch Härteunterschiede -50 % bis +100 % zum Werkstoff der Versuchsrohlinge resultieren [6–8]. Die Festigkeitsänderungen innerhalb eines Rohlings wurden durch lokale Wärmebehandlungen des Rohlings erzielt [9, 10].

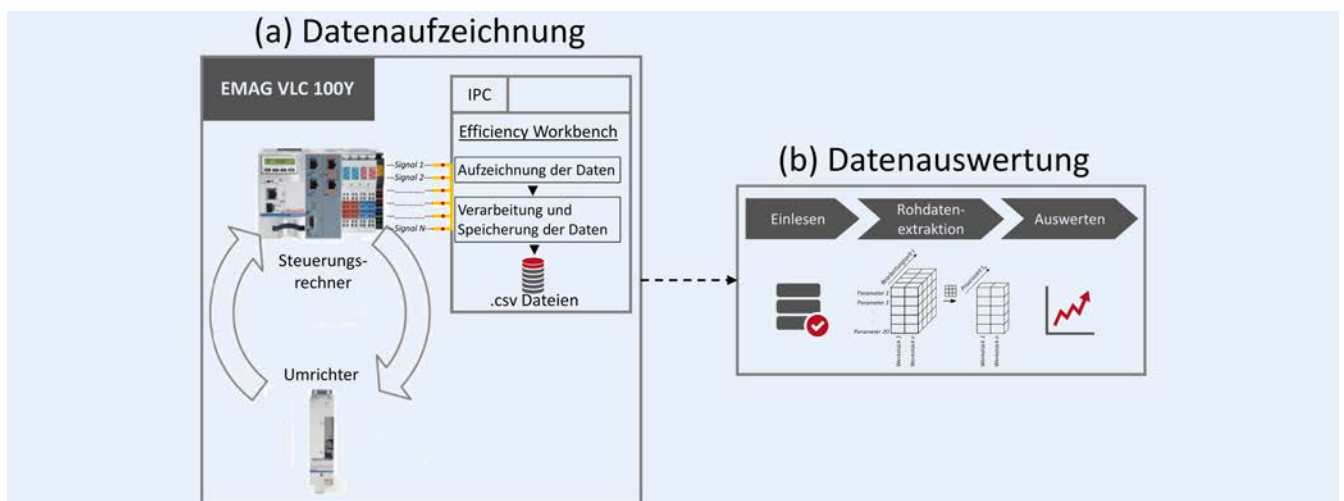


Bild 2. Datenaufzeichnung mittels Efficiency Workbench (EWB) mit anschließender Auswertung. Bild: Institut für PTW

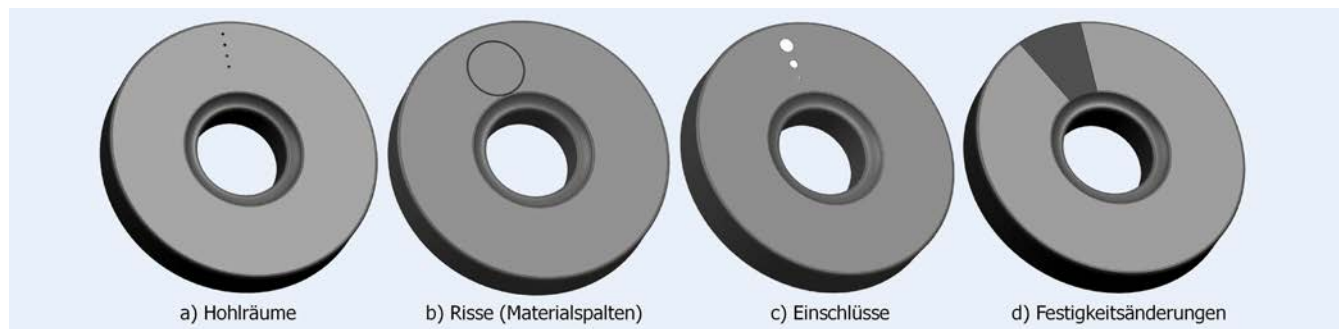


Bild 3. Versuchsrohlinge mit künstlich eingebrachten Bauteilfehlern. Bild: Institut für PTW

2.3 Versuchsdurchführung

Neben der genannten Abfolge an Bearbeitungsschritten beschränkte sich diese Untersuchung auf die beiden Plandrehprozesse der Oberseite. Während dieser Prozesse überfährt die Schneide im Eingriff die zuvor eingebrachten Fehler. Im ersten Plandrehprozess wird die Oberseite mit einer Zustellung von 1,3 mm bei einer Schnittgeschwindigkeit von 180 m/min und einem Vorschub von 0,3 mm/U bearbeitet. Das zweite Plandrehen erfolgte unter gleichen Schnitt- und Vorschubgeschwindigkeiten mit einer Zustellung von 1,5 mm (Tabelle 1) [11]. Diese sind im Rahmen des vorgesehenen NC-Programms zur Herstellung der Steuerscheibengeometrie vorgegeben. Die während der zerspanenden Bearbeitung aufgezeichneten maschineninternen Daten wurden mithilfe von Matlab aufbereitet und ausgewertet.

2.4 Aufbereitung der Rohdaten und Fehlerdetektion

2.4.1 Rohdatenextraktion

Nach zunächst kompletter und kontinuierlicher Aufzeichnung der Daten über die gesamte Bearbeitungsfolge wurden die für die Analyse relevanten Informationen der untersuchten Plandrehprozesse extrahiert (Bild 2b). Mithilfe der G-Code-Zeilen (Programmiersprache für numerische Steuerungen) und den zugehörigen Zeitstempeln konnte die Extraktion der Daten automatisiert durchgeführt werden. Somit konnten Start- und Endzeitpunkt für jedes Bauteil und jeden Plandrehprozess exakt bestimmt werden, und der exakte Vergleich über alle produzierte Bauteile konnte

Tabelle 1. Technologieparameter in den betrachteten Prozessen mit a_p als Schnitttiefe, V_c als Schnittgeschwindigkeit und V_f als Vorschubgeschwindigkeit.

	a_p in mm	V_c in m/min	V_f in mm/U	Bearbeitung
Plandrehen 1	1,3	180	0,3	
Plandrehen 2	1,5	180	0,3	

erfolgen. Dieser Ansatz ermöglicht es auch, für einen späteren Serienbetrieb im Rahmen der Rohdatenaufbereitung die relevanten Prozessdaten automatisiert zu extrahieren.

2.4.2 Detektion vorhandener Bauteilfehler aus extrahierten Prozessdaten

Das Ziel im nächsten Schritt war es, die künstlich eingebrachten Fehlstellen in den Rohlingen anhand der zuvor extrahierten Prozessdaten zu detektieren. Dabei wurde jeder aufgezeichnete Parameter einzeln betrachtet, um das jeweilige Potenzial zur Detektion von Bauteilfehlern herauszuarbeiten. Weiterhin wurden bei ersten Auswertungen die Potenziale statischer Schwellwertüberschreitungen analysiert, wenn diese basierend auf lokalen Ausschnitten der Zeitreihen mit eindeutiger NC-Kontextualisierung und einheitlicher Zeitbasis zur Verfügung stehen. Berechnet wurden die Schwellwertkurven mithilfe von gleitenden Mittelwerten und den mittleren Schwankungsbreiten der Rohdaten. Bild 4 zeigt den Verlauf der aufgezeichneten Kraftwerte für die X-Achse für ein Bauteil mit eingebrachten Bohrungen vom 1 mm

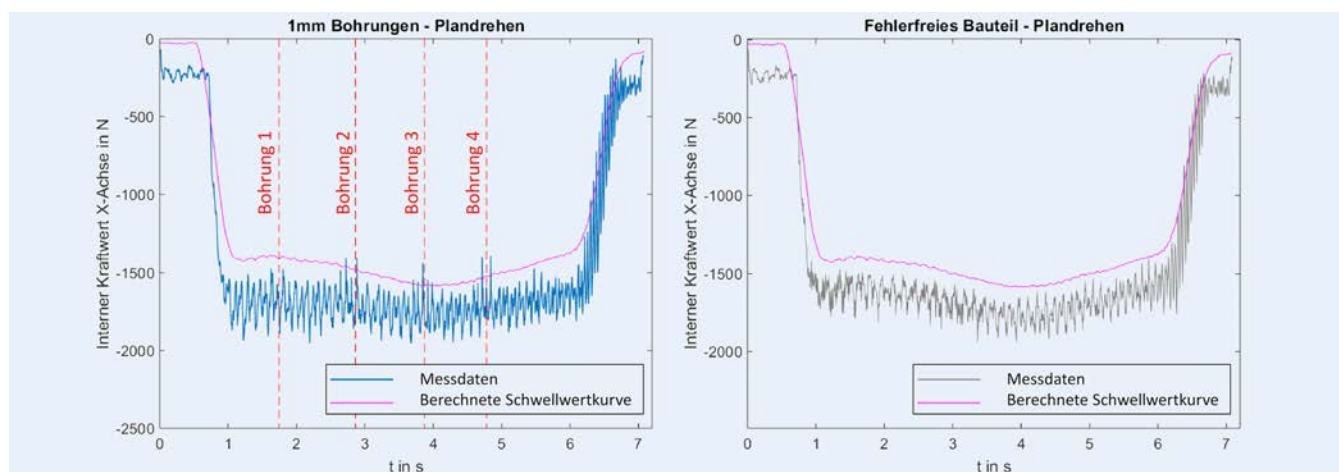


Bild 4. Hohlraumprobe mit Bohrungen mit einem Durchmesser von 1 mm im Vergleich mit fehlerfreiem Bauteil. Bild: Institut für PTW

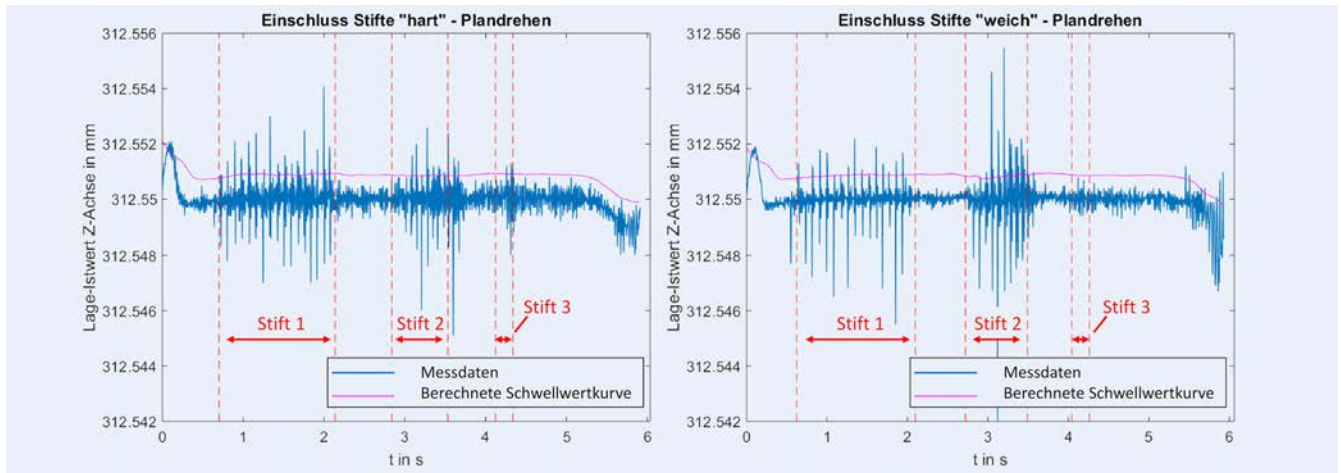


Bild 5. Ergebnisse in Bezug auf den Lage-Istwert bei der Drehbearbeitung von Versuchsrohlingsen mit Stiften aus gehärtetem Stahl (links) und Stiften aus ungehärtetem Stahl (rechts). Bild: Institut für PTW

Tabelle 2. Detektion der künstlich erzeugten Fehler aus den aufgezeichneten Signalen.

Aufgezeichnete Sensorwerte	Hohlräume	Risse	Einschlüsse	Festigkeitsänderungen
Intern berechnete Kraftwerte in den Achsen	x	-	x	x
Lage-Istwerte der Achsen	x	-	x	x
Ströme der Antriebsmotoren	x	-	x	x
Zwischenkreisleistung Spindel	-	-	x	x

Durchmesser im Vergleich mit einem fehlerfreien Bauteil. Zu erkennen sind die im Bereich der roten senkrechten Linien entstandenen Ausreißer, welche jeweils in den Mittelpunkten der Bohrungen liegen. Im fehlerfreien Fall sind keine Ausreißer entstanden, woraus sich schließen lässt, dass diese aufgrund des Einflusses der Bohrungen auf den Zerspanprozess entstehen. Mithilfe der numerischen Ableitung der Zeitreihe konnten diese Ergebnisse nochmals bestätigt werden. In Bauteilen mit Bohrungen kleinerer Durchmesser konnte dieses Verhalten nicht gefunden werden. Die zuvor erwähnten nachgebildeten Risse haben sich nicht eindeutig in den Sensorsignalen widerspiegelt. Dies ist auf die zu kleinen Abmaße der modellierten Rissbreiten im Bereich von 0,1 mm mit den damit verbundenen zeitlich und technologisch bedingten geringen Einflüssen auf den Zerspanungsprozess zurückzuführen. Wie bereits bei den Bohrungen gezeigt, gibt es Grenzen für ausreichende Einflüsse zu kleiner Fehler auf maschineninterne Signale. Im Gegensatz dazu beeinflussen die eingepressten Stifte den Prozess ausreichend, um entsprechende Verläufe zu erkennen. **Bild 5** zeigt den angesprochenen Einfluss am Beispiel des Lage-Istwertes der Z-Achse. Deutlich zu erkennen sind die resultierenden Ausreißer zwischen jeweils zwei roten Linien, welche die Grenze der jeweiligen Stifte darstellen. Jedoch induziert der letzte Stift (Stift 3: 1 mm Durchmesser) nicht mehr so eindeutige Ausreißer wie die beiden größeren mit 3 mm (Stift 2) und 5 mm (Stift 1) Durchmesser. Generell lassen sich die Stifte sowohl in den Kraft- und Stromsignalen, als auch im gezeigten Lage-Istwert detektieren. In Betrachtung der gezeigten Ergebnisse scheint eine Grenze in der minimalen Fehlerdi-

mension mit ausreichendem Einfluss abzuzeichnen, welche den Bereich von 1 mm nicht unterschreitet.

Bei der Bearbeitung der Werkstücke mit unterschiedlichen wärmebehandelten Bereichen sind sehr deutliche und zahlreiche Ausreißer beziehungsweise das deutlich höhere Rauschen in allen Signalen zu erkennen. Durch die periodisch auftretenden Schwankungen in den Härteeigenschaften innerhalb eines Werkstücks ergeben sich beim Übergang deutliche Unterschiede in der resultierenden Zerspankraft. Diese immer wiederkehrenden Schwankungen finden sich in den Messdaten wieder. Als Zwischenergebnis lässt sich aus der ersten Analyse festhalten, dass die nachgebildeten Hohlräume, Einschlüsse und lokalen Festigkeitsänderungen genügend Einflüsse auf den Prozess und die aufzeichneten Signale ausüben, um eine Detektion der Fehler zu implementieren. Diese Resultate führten zur Implementierung der Detektion von Bauteilfehlern mithilfe von einfachen lokalen Schwellüberschreitungen auf Basis von gleitenden Mittelwerten und Standardabweichungen. **Tabelle 2** fasst die Parameter des verwendeten Ansatzes zusammen. Die künstlich erzeugten Hohlräume lassen sich lediglich mithilfe der internen Kraftwerte und Lage-Istwerte detektieren. Die eingepressten Einschlüsse konnten zusätzlich zu den bereits erwähnten Parametern aus den Antriebsströmen und der Zwischenkreisleistung richtig erkannt werden. Festigkeitsänderungen schlagen in jedem Signal positiv aus. Die simulierten Risse haben aufgrund ihrer kleinen Rissbreiten keine Detektion aus den aufgezeichneten Daten mit dem gewählten Ansatz zugelassen. Mithilfe der genutzten Aufzeichnungsfrequenz von 4 ms, ist es möglich, im betrachteten Prozess

Fehlstellen mit einer Dimension, welche 1 mm nicht wesentlich unterschreitet, zu detektieren. Je größer die Fehlstelle in den Rohlingen, desto eindeutiger ist der Unterschied zu nicht fehlerhaften Bauteilen. Dabei wird nicht jeder der maschineninternen Datenpunkte vom Zerspanungsprozess gleichmäßig beeinflusst, wodurch sich nicht jedes der aufgezeichneten Signale zur Detektion von Bauteilfehlern gleichermaßen gut eignet. Die Analyse der aufgezeichneten maschineninternen Signale zeigt, dass vor allem die im direkten Zusammenhang mit dem Zerspanungsprozess stehenden Sensorsignale, wie Lage-Istwerte und die aktuellen Stromsignale, die größte Fähigkeit haben, Einflüsse durch Fehlstellen in Bauteilen widerzuspiegeln. Mithilfe dieser Signale konnten im Rahmen dieser Untersuchung die genannten Fehler nachbildungen zuverlässig erkannt werden. Über die reine Detektion hinaus können die Dimensionen und Positionen der Fehlstellen in gewissen Grenzen abgeschätzt werden.

3 Fazit und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war es, Potenziale und Grenzen bei der hauptzeitparallelen Qualitätssicherung mittels Maschinendaten zu untersuchen. Hierzu wurde die Auswirkung von unterschiedlichen Bauteilfehlern auf die internen Maschinendaten untersucht, beziehungsweise Möglichkeiten zur automatisierten Detektion entwickelt. Dabei stand zunächst die automatisierte Extraktion der relevanten Daten aus dem Serienprozess im Mittelpunkt. Die entwickelte Methode ermöglicht es, zuverlässig und automatisiert die zu untersuchenden Prozesse zu isolieren. Dies schafft die Grundlage für einen exakten Vergleich von nacheinander gefertigten Bauteilen aus der Serienproduktion und der manuelle Aufwand der Datenextraktion entfällt. Die darauf aufbauende Untersuchung der extrahierten Prozessdaten zeigt, dass Fehler in Werkstückrohlingen in gewissen Grenzen mithilfe einfacher Schwellwertüberschreitungen bereits detektiert und lokalisiert werden können. Aufgrund der teilweise sehr kleinen auftretenden Fehler und des damit verbundenen niedrigen Einflusses auf den Zerspanungsprozess spielen die Zuverlässigkeit und die maximal erreichbaren Abstraten der genutzten Datenaufzeichnungslösung die entscheidende Rolle für die Umsetzung der Fehlerdetektion in Bauteilen während des Zerspanungsprozesses. Die Ergebnisse lassen darauf schließen, dass Bauteilfehler vor allem die im direkten Bezug mit dem Zerspanungsprozess stehenden Signale wie Lagegeber und Stromistwerte beeinflussen. In darauf aufbauenden Untersuchungen werden am PTW die Potenziale durch die Datenakquise noch höhere Abstraten untersucht. Weiterhin liegt der Schwerpunkt auf tiefergehenden analytischen Untersuchungen mit statistischen Methoden und Methoden der künstlichen Intelligenz.

Literatur

- [1] Schmitt, R.; Pfeiffer, T.: Qualitätsmanagement. Strategien – Methoden – Techniken. München: Hanser Verlag 2015, S. 409–414
- [2] Verein Deutscher Maschinen- und Anlagenbau: VDMA-Einheitsblatt 24470–2: Maschinen zum Verarbeiten von Kunststoffen und Kautschuk. Fähigkeitsnachweis bei Spritzgießmaschinen. Berlin: Beuth Verlag 2002, S. 2
- [3] Böge, A. (Hrsg.): Handbuch Maschinenbau. Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik. Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag 2015, S. 76
- [4] Dietz, P. (Hrsg.): Mitteilungen aus dem Institut für Maschinenwesen der Technischen Universität Clausthal 30 (2011), S. 113–115
- [5] Bauerdick, C. J. H. et al.: A Common Software Framework for Energy Data Based Monitoring and Controlling for Machine Power Peak Reduction and Workpiece Quality Improvements. The 24th CIRP Conference on Life Cycle Engineering, LCE 2017, Kamakura/Japan, 2017, pp. 359–364
- [6] Deutsche Edelstahlwerke GmbH: Werkstoffdatenblatt 8CrMo16. Nitrodur 8524. Stand 2019. Internet: https://www.dew-stahl.com/fileadmin/files/dew-stahl.com/documents/Publikationen/Werkstoffdatenblaetter/Baustahl/1.8524_de.pdf. Zugriff am 05. August 2019
- [7] DIN EN ISO 2338: Zylinderstifte aus ungehärtetem Stahl und austenitischem nichtrostendem Stahl. Deutsche Fassung, Ausgabe Februar 1998. Berlin: Beuth-Verlag 1998
- [8] DIN EN ISO 8794: Zylinderstifte aus gehärtetem Stahl und martensitischem nichtrostendem Stahl. Deutsche Fassung, Ausgabe Mai 2019. Berlin: Beuth-Verlag 2019
- [9] Bauerdick, C. J. H. et al.: Charakterisierung und Modellierung von Bauteilfehlern – Qualitätsüberwachung. TUprints (2018), S. 34–36. Internet: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/8160/>. Zugriff am 21.11.2019
- [10] Bauerdick, C. J. H. et al.: Untersuchung der Möglichkeiten einer Online-Qualitätsüberwachung (Quality Monitoring) basierend auf Maschinendaten. TUprints (2018), S. 39–44. Internet: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/8160/>. Zugriff am 21.11.2019
- [11] Bauerdick, C. J. H. et al.: An automated procedure for workpiece quality monitoring based on machine drive-based signals in machine tools. The 51st CIRP Conference on Manufacturing Systems, CMS 2018, Stockholm/Sweden, 2018, pp. 357–362



Alexander Fertig, M. Sc.,
Bild: Institut für PTW

Prof. Dr.-Ing. **Matthias Weigold**,
Christoph Bauerdick, M. Sc. M. Eng.
Institut für Produktionsmanagement, Technologie
und Werkzeugmaschinen (PTW)
Technische Universität Darmstadt
Otto-Berndt-Str. 2, 64287 Darmstadt
Tel. +49 (0)6151 / 16-29973
a.fertig@ptw.tu-darmstadt.de
www.ptw.tu-darmstadt.de



Bild 1. Wesentliche Arbeitswerkzeuge in der Mikrozerspanung [4]. Bild: Paul Horn GmbH

Optimierung des Einsatzverhaltens von Mikrotorusfräsern beim Hartfräsen durch Hochpräzisionsbürsten

Flakkotieren von Fräsern zum Mikro-Hartfräsen

P. Frank, A. Otto

Die nachfolgende Studie ist an der Technischen Hochschule Georg Agricola zu Bochum entstanden. Sie gibt einen Überblick über die Grundlagen, Anwendungen und Möglichkeiten der Werkzeugoptimierung und somit der Standzeiterhöhung mithilfe des Hochpräzisionsbürstens (Flakkotieren) an Mikrotorusfräsern. Ein Abgleich von verschiedenen präparierten und sich im Ausgangszustand befindlichen Mikrofräsern sollen hierbei die Möglichkeiten und Grenzen der Schneidkantenpräparation aufzeigen.

STICHWÖRTER

Mikrotechnik, Werkzeugschleifen, Feinbearbeitung

Flakkoting of milling tools for hard milling- Improvement of the performance of micro milling tools in hard milling by high precision brushing

The following study was carried out at the Technical University Georg Agricola in Bochum. It provides an overview of the basics, applications and opportunities for improving tools and thus for increasing tool life with the aid of high-precision brushing (flakkoting) on milling tools for hard milling. Comparing a number of prepared micro milling cutters in their initial state, it demonstrates the opportunities and limits of cutting edge preparation.

1 Einleitung

In Deutschland zählt das Spanen mit geometrisch bestimmter Schneide durch den häufigen Einsatz zu einer der wichtigsten Gruppe der Fertigungsverfahren. Durch die Forderung der Indus-

trie nach immer kleineren Bauteilen mit zugleich mehreren Funktionen entwickelt sich der Bereich der Mikrobearbeitung stetig weiter [1]. Im Gegensatz zu anderen Verfahren der Mikro-technologie, etwa dem Ätzen, zeichnet sich die Mikrozerspanung durch hohe Abtragsraten, hohe Geometriefreiheiten, geringe

Prozesszeiten, gleichbleibend hohe Oberflächengüten und ein breites Werkstoffspektrum aus [2, 3]. **Bild 1** zeigt die gängigsten Zerspanwerkzeuge der Mikrozerspanung [4].

Heutige Mikrofräser müssen eine enorme Leistungsfähigkeit aufweisen, welche nicht nur durch die Optimierung ihrer Makrogeometrie erreicht werden kann, sondern auch eine der Bearbeitungssituation angepasste Mikrogeometrie der Schneidkanten erfordert, um die entstehenden Prozesskräfte ideal im Werkzeug zu verteilen. Gerade bei der Hartzerspanung im Formen- und Gesenkbau stehen hohe Prozesssicherheiten sowie Standzeiten der eingesetzten Werkzeuge im Vordergrund. Dies resultiert aus den oft sehr langen Prozesszeiten und den hohen Genauigkeiten, mit denen die Werkstücke gefertigt werden müssen. Aufgrund der hohen Härte der Werkstücke (> 50 HRC), entstehen schon im Makrobereich Standzeitprobleme, die die Prozesssicherheit der Werkzeuge beeinträchtigen.

Gerade beim Mikrofräsen bestimmen die Werkzeuggeometrie, die Maschinengenauigkeit und die Maschinenkinematik die mögliche Makrogeometrie des Bauteils. Die Bauteilmikrostruktur beziehungsweise Oberflächenstruktur ist unter anderem abhängig von der Schneidkantengeometrie sowie den Bearbeitungsparametern und -strategien. Aufgrund dieser Komplexität variieren die Parameterangaben in der Literatur und sind bis heute nicht wissenschaftlich begründet. Zudem können aufgrund von Größeneffekten die Prozessgrößen und die Schnittparameter nicht linear mit dem Werkzeugdurchmesser D skaliert werden [5, 6].

Im Mikrobereich hingegen hält die Verfahrenssubstitution zusätzlich Einzug, bei der das Mikroerodieren durch das Mikrofräsen ersetzt wird. Auch werden heutige Bauteile immer diffiziler und erfordern immer kleinere Fräser, um deren Geometrie in der Kavität darzustellen. Zur Beherrschung des Prozesses und zur Erlangung einer adäquaten Prozesssicherheit, ist es deshalb unumgänglich, die vorliegenden Zerspanungsbedingungen und Bearbeitungsstrategien der jeweiligen Bearbeitungsaufgabe zu kennen und zu verstehen.

2 Motivation der Schneidkantenpräparation in der Mikrozerspanung

Eine Vielzahl von Forschungsarbeiten belegen das Potenzial, durch eine gezielte Präparation der Schneidkante von Zerspanwerkzeugen das Einsatzverhalten von Werkzeugen deutlich zu verbessern [7–12]. Einerseits führt die Verrundung zu einer Stabilisierung der Schneidkante und zum anderen wird die Schneidenschaftigkeit deutlich reduziert. Material kann sich nicht weiter an der Schneidkante ablagern und Schneidpartikel beim Herauslösen mitnehmen. Eine reduzierte Schneidenschaftigkeit wirkt sich auch positiv auf die erzeugbare Oberflächenqualität aus.

Bisher war die Erforschung des Einflusses der Schneidkantengeometrie stark auf die Makro- und Mesozerspanung fokussiert. Die Mikrozerspanung grenzt sich von der Mesozerspanung durch reduzierte Aspektverhältnisse von 1 mm bis $0,1\text{ }\mu\text{m}$ Strukturgröße [13] und durch den Durchmesserbereich der Fräswerkzeuge von $0,02\text{ mm}$ bis 1 mm ab [14, 15]. Weiterhin wird die Zuordnung der Werkzeuge zum Mikrofräsen aufgrund der geometrischen Merkmale der Schneide, der nötigen Rundlaufgenauigkeit des Werkzeuges sowie der angewandten Spannungsdicken h , welche sich im Mikrometerbereich befinden, getroffen [13]. Typische Spannungsdicken h des Mikrofräsens liegen im Bereich von

$1\text{ }\mu\text{m}$ bis $100\text{ }\mu\text{m}$ [14]. Besonders vor dem Hintergrund der geringen Spannungsdicken erscheint die Möglichkeit einer Schneidkantenpräparation und der damit einhergehenden Verrundung der Schneidkante zunächst eher kontraproduktiv. Zahlreiche Arbeiten belegen, dass die Mindestspannungsdicke $h_{\min}$ primär von der Schneidkantenverrundung abhängt. Wird die minimale Spannungsdicke unterschritten, so findet keine Spanbildung statt und der Werkstückstoff wird zwischen Schneidkante und Werkstück hindurchgequetscht (Ploughing-Effect) [15]. Die erreichbare Oberflächengüte wird dadurch stark herabgesetzt [16].

Erste Forschungsarbeiten von Löwenstein [14] zeigen jedoch auf, dass durch eine gezielte Verrundung der Werkzeugschneiden von Mikrofräsern eine gesteigerte Prozesssicherheit erzielt werden kann. Neben einer höheren Verschleißbeständigkeit der Mikrofräser konnte im Vergleich zu unpräparierten Mikrofräsern eine konstantere Oberflächenrauheit bei gleichzeitig geringeren Kraftschwankungen über den Fräsweg erzeugt werden. Als Verfahren zur Schneidkantenpräparation setzte Löwenstein [14] das Tauchgleitlappen ein. Ziel war es, einen idealen Radius an der Schneidkante in der Größe von $r = 8\text{ }\mu\text{m}$ zu erzeugen. Aktuelle Erkenntnisse zeigen jedoch auf, dass asymmetrische Geometrien ein besseres Einsatzverhalten aufweisen als der ideale Radius. Ziel der vorliegenden Arbeit war es daher, Mikrofräser so zu präparieren, dass die stirnseitigen Schneiden eine Trompetenform mit $K > 1,2$ aufwiesen.

Für die Verrundung von Schneidkanten stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung. Zu diesen gehören das Bürsten, das Schleppschleifen/-lappen, die magnetabrasive Bearbeitung (Magnetfinishing), das Nass- und Trockenstrahlen sowie das Flakkotieren. Zur reproduzierbaren Erzeugung eines Korbbogens (Trompete oder Wasserfall) an der Schneidkante, einer asymmetrischen Schneidkantengeometrie, sind nicht alle Verfahren im gleichen Maße geeignet. Besonders eignet sich das Flakkotieren, da durch entsprechende Wahl der Prozess- und Werkzeugparameter, wie Filamentart und -stellung, die Einbringung von symmetrischen (Radius) als auch asymmetrischen Radien (Wasserfall oder Trompete) prozesssicher und reproduzierbar möglich sind. Außerdem können durch den Einsatz von Mehrfachaufnahmen mehrere Werkzeuge oder Werkstücke gleichzeitig bearbeitet werden, was eine extrem wirtschaftliche Bearbeitung ermöglicht. Das Verfahren Flakkotieren bietet weiter die Möglichkeit Oberflächen zu polieren und Bauteile zu entgraten. Aufgrund der hohen Flexibilität, des großen Anwendungsbereichs und der Möglichkeit selbst komplexe Kantenformen an Zerspanwerkzeugen erzeugen zu können, wurde zur Präparation der Mikrofräser das Flakkotieren eingesetzt.

3 Untersuchungsdesign und experimentelle Methodik

Die folgende Studie ist im Fachbereich für Fertigungstechnik an der Technischen Hochschule Georg Agricola zu Bochum und der Firma Continental als Industriepartner entstanden. Sie gibt einen Überblick über die Grundlagen, Anwendungen und Wirkweisen der Schneidkantenpräparation in der Mikrozerspanung. Hierbei soll die Schneidkantengeometrie eines unbeschichteten Vollhartmetall-Mikrotorusfräses für die Hartzerspanung im Mikrometerbereich optimiert werden, um eine höhere Prozesssicherheit respektive Standzeit zu erzielen. Herstellungsbedingte Defekte wie Grate, Ausbrüche oder die Schartigkeit der Schneid-

kante sollen mit der Schneidkantenpräparation reduziert und das Einsatzverhalten der Fräser optimiert werden. Zudem wird untersucht, welche Bearbeitungsart (Gleich- oder Gegenlaufräsen) für die Hartzerspannung am geeignetsten ist und welchen Einfluss die Schneidkantenverrundung dabei hat, ferner welche Bearbeitungsart die besten Ergebnisse beim Einsatzverhalten erzielt. Um die oben genannten Punkte zu erreichen, sollen die Schneidkanten der Fräser durch Flakkotieren bearbeitet werden.

Für die Untersuchungen wurden insgesamt zwölf Fräser verwendet. Die erste Werkzeuggruppe bestand aus sechs unpräparierten, arbeitsscharfen Werkzeugen, die als Referenz zu den präparierten Fräsern dienten. Jeweils drei der unpräparierten Fräser wurden für das Gleich- und Gegenlaufräsen verwendet. Bei der zweiten Werkzeuggruppe handelt es sich um sechs präparierte Fräser, die ebenfalls für das Gleich- und Gegenlaufräsen verwendet wurden. Als Zielgeometrie der präparierten Fräser sollen Umfangs- und Stirnschneide einen Radius von $r = 10 \pm 2 \mu\text{m}$ und einen K-Faktor von $K > 1,2$ (Trompetenform) aufweisen. Vor und nach der Präparation wurden die Schneidkanten der Fräser auf einem „IF-EdgeMaster“-Mikroskop der Firma Alicona Imaging GmbH vermessen. Das Mikroskop arbeitet nach dem Prinzip der flächenhaften Verfahren der Fokusvariation und erlaubt eine Auflösung von Radien bis $2 \mu\text{m}$. Das Messgerät wurde ausgewählt, da in einer vergleichenden Untersuchung von mehreren Messgeräten zur Schneidkantenvermessung aufgezeigt werden konnte, dass das Messgerät die geringste Streuung und systematische Abweichung besitzt [14]. Für die korrekte Positionierung des Werkzeuges unter dem Messgerät sorgt sowohl der auf **Bild 2** erkennbare Messringanschlag, der auf eine auf dem Messtisch befestigte schwarzfolierte Aluminiumplatte geschraubt ist, sowie die Spannvorrichtung „IF-RotationGrip“. Dieses um 360° drehbare Dreibackenfutter ist zusätzlich um die horizontale Achse schwenkbar, sodass sowohl die Stirn- wie die Umfangsschneiden ohne Werkzeugausspannung vermessen werden können.

In der Arbeit wurden zweischneidige Mikrotorusfräser aus VHM (Vollhartmetall) mit einem Durchmesser von $D = 1 \text{ mm}$ und einem Eckenradius von $R = 0,30 \text{ mm}$ der Firma Garant eingesetzt. Die Werkzeuge wurden vor dem Einsatz auf ihre Schneidkantenbeschaffenheit sowie mögliche Fertigungsfehler, wie zum Beispiel Ausbrüche, kontrolliert.

Für die Schneidkantenpräparation wurde die Flakkotieranlage „HFM R1/2“ der Firma Profin eingesetzt, siehe **Bild 3** rechts.

Versuchsaufbau:

1. Flakkotier-Spindel
2. Flakkotierwerkzeug
3. Fräseinspannung in Schleifspindel
4. Absaugung
5. Rundtisch

Als Werkzeug wurde ein Tellerbürstwerkzeug der Firma Profin verwendet. Als Besatzmaterial kam ein Diamant durchsetztes Kunststofffilament mit einer Körnung von K4000 zum Einsatz. Die genauen Werkzeug- und Flakkotierparameter können der **Tabelle** entnommen werden. Die Stirnschneiden der Fräser wurden senkrecht zum Tisch in einer Rundsleifmaschine der Firma Engel bearbeitet (**Bild 3**). Dabei wird der Fräser in einer Spannvorrichtung fest eingespannt und läuft gegen den Uhrzeigersinn mit einer konstanten Drehzahl von $n = 600 \text{ min}^{-1}$. Bei der Bearbeitung schwenkt die Bürste von links nach rechts und sorgt so für den

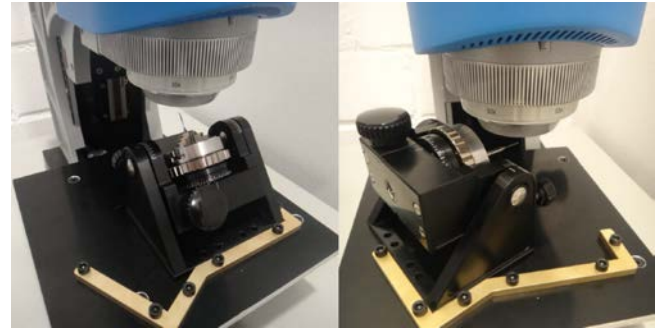


Bild 2. Links: Einspannung des Mikrotorusfräfers im „IF-RotationGrip“ zur Vermessung der Stirnschneide. Rechts: Einspannung des Mikrotorusfräfers im IF-RotationGrip zur Vermessung der Umfangsschneiden. Bild: THGA

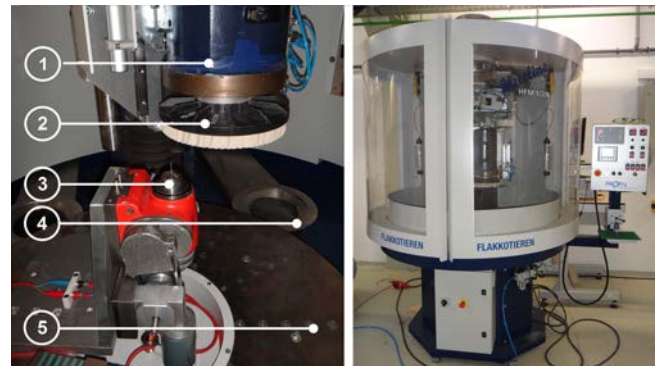


Bild 3. Links: Vertikale Einspannung des Mikrotorusfräfers zur Verrundung der Stirnschneide. Rechts: Flakkotieranlage „HFM R1/2“ der Firma Profin. Bild: THGA

Materialabtrag an den Schneidkanten, wobei die Rundsleifmaschine inklusive Fräser ortsfest ist. Die Umfangsschneiden werden entsprechend in horizontaler Einspannung auf dem Maschinentisch in der Schleifmaschine bei konstanter Drehzahl ($n = 600 \text{ min}^{-1}$) gegen den Uhrzeigersinn ortsfest bearbeitet.

Nach der Aufbringung der Präparation wurden der Schneidkantenradius und die Schneidkantenschärftigkeit der Stirn- und Umfangsschneiden gemessen. Die Größe des Schneidkantenradius wurde dabei über die Variation der Bearbeitungszeit umgesetzt.

Aufgrund der geringen Verrundung, die die Schneidkanten erfahren, und weil der Ausgangs-K-Faktor der Umfangsschneiden im Mittel bei $K = 0,75$ lag, konnte für die Umfangsschneiden nur ein idealer Radius erzeugt werden, siehe **Bild 4**. Durch die geringe Zustellung von $a_p = 0,02 \text{ mm}$ in den nachfolgenden Standzeitversuchen befindet sich nur der Eckenradius des Torusfräfers im Eingriff. Die Umfangsschneiden selbst tragen nichts zum Abtragsprozess bei und sind folglich auch nur untergeordnet relevant. Bei den Stirnschneiden der Torusfräser konnten erfolgreich mithilfe des Flakkotierens der Zielradius von $r = 10 \pm 2 \mu\text{m}$ und ein K-Faktor im Mittel von circa 1,3 realisiert werden, siehe **Bild 4**.

Die Standzeituntersuchungen wurden auf einem Fräszentrum vom Typ „C600U“ der Firma Hermle durchgeführt. Als Versuchswerkstück wurde der Werkzeugstahl X37CrMoV5-1 im vakuumgehärteten Zustand gewählt, der aufgrund seiner hohen Härte ($55,5 - 56 \text{ HRC}$) und dem häufigen industriellen Einsatz eine Vielzahl von wissenschaftlichen Anwendungen findet. Die Tabelle stellt die Parameterkombination für die Standzeitver-

Tabelle. Versuchsprogramm zur Präparation und für die Standzeitversuche. Bild: THGA

Werkzeuggeometrie	
Schneidstoff	VHM
Typ	Mikrotorusfräser
Hersteller	Garant
Werkzeugdurchmesser D / mm	1,00
Schaftdurchmesser D_{Schaft} / mm	4,00
Zähnezahl z	2
Schneidkantenradius Stirnseite / μm	4,00
Schneidkantenradius Umfangsschneide / μm	2,50
Parameter der Schneidkantenpräparation	
Versuchsmaschine	Profin HFM R1/2
Filamenttyp	Kunststoff mit Diamant
Korn	4000
Drehrichtung Fräser	GUZS
Fräserdrehzahl n / 1/min	600
Schneidkantenradius Stirnseite / μm	10 ± 2
Schneidkantenradius Umfangsschneide / μm	10 ± 2
Technologieparameter Flakkotieren	
Stirnschneide	Umfangsschneide
Bürstendrehzahl: 800 / 1/min	Bürstendrehzahl: 1100 / 1/min
Zustellung a_B : 0,50 / mm	Zustellung a_B : 0,70 / mm
Spannart: vertikal	Spannart: horizontal
Besatzlänge: 29 / mm	Besatzlänge: 29 / mm
Parameter der Standzeitversuche und Werkstoff	
Versuchsmaschine	Hermle C600U
Schnittgeschwindigkeit v_c / m/min	50,3
Zustellung a_p / mm	0,02
Vorschub je Zahn / mm	0,006
Vorschubgeschwindigkeit v_f / mm/min	196
Drehzahl n / 1/min	16000
Kühlung	Keine
Werkstoff	X37CrMoV5-1
Härte / HRC	55,5 - 56,0
Zugfestigkeit R_m / N/mm ²	770

suche dar sowie die Werkstoffeigenschaften und das Versuchsprogramm.

Die Versuche wurden mit je drei Fräsern für den Gleichlauf und drei für den Gegenlauf am Werkstück im unpräparierten und präparierten Zustand durchgeführt. Für beide Bearbeitungsarten erfolgt der Werkstoffabtrag durch parallel nebeneinanderliegende Zeilen. Die spanende Bearbeitung wurde in regelmäßigen Abständen unterbrochen, so dass das Werkzeug ausgewechselt werden konnte, um den jeweils aktuellen Verschleißfortschritt der Freifläche an beiden Stirn-Schneiden mit einem „Keyence“ Mikroskop mit VH-Z100UR-Objektiv zu dokumentieren. Damit die Messergebnisse nicht durch Spannungseigenheiten verfälscht werden, wurde der Fräser bei der Vermessung der Verschleißmarkenbreite nicht aus dem Hydrodehn-Spannfutter ausgespannt. Nach der Messung wurde die Bearbeitung am letzten Punkt fortgeführt. Als Versuchsfräsweglänge wird ein Fräsweg von 1,0 m angesetzt. Um die Genauigkeit der Fräslängen und der Untersu-

chungen sicherzustellen, wurden die Außenmaße der Versuchswerkstücke mit der aufgeführten Toleranz von $\pm 0,005$ mm gefertigt. Die Beurteilung der Oberflächengüte der gefrästen Flächen erfolgte rein visuell.

4 Darstellung der Ergebnisse

Bild 5 zeigt im Vergleich die Mittelwerte sowie die Standardabweichung der entstandenen Verschleißmarkenbreite (VB) der Stirn-Schneiden für die untersuchten Fräser nach einem Vorschubweg von $l_{FZ} = 1,0$ m. Die Ergebnisse basieren auf den Standzeitversuchen, in denen jeweils drei unpräparierte und präparierte, zweischneidige Mikrotorusfräser im Gegen- und Gleichlauf fräsen eingesetzt worden sind.

Die Ergebnisse der Verschleißmarkenbreitenmessung der Stirn-Schneiden zeigen eine deutlich reduzierte Verschleißentwicklung in Folge der Schneidkantenpräparation. Unabhängig

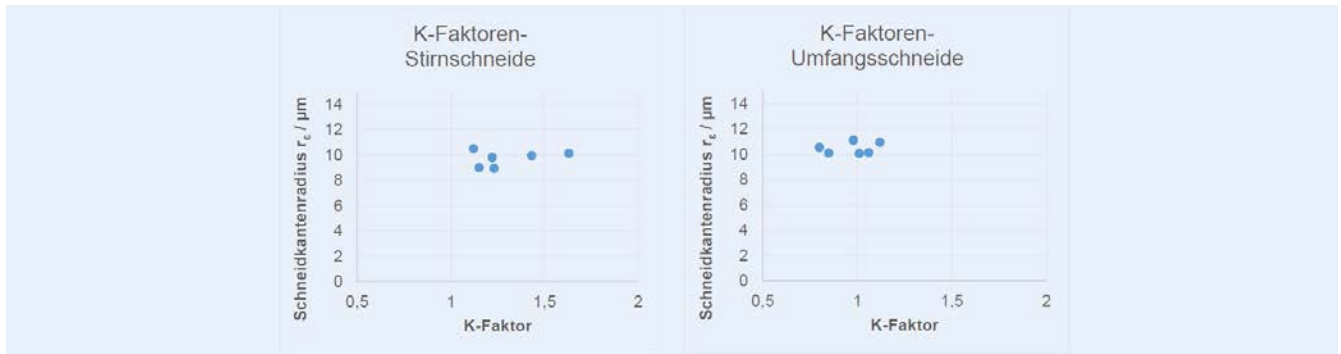


Bild 4. Präparationsausbildung der Stirn- und Umfangsschneiden. Bild: THGA

von der Frässtrategie ermöglichen die präparierten Fräser eine Reduzierung der Verschleißmarkenbreite um bis zu 36 % bei gegebenen Randbedingungen.

In Bild 6 sind die in Abhängigkeit des Vorschubwegs gemessenen Verschleißmarkenbreiten der stirnseitigen Schneiden für das Fräsen im Gegenlauf dargestellt. Die dargestellten Werte basieren auf den Mittelwerten der gemessenen Verschleißmarkenbreiten von beiden Schneiden des jeweils untersuchten Fräasers. Bei der Betrachtung der Kurvenverläufe fällt auf, dass vor allem zu Beginn des Schnittes bei den unpräparierten, schleifscharfen Fräsern starke initiale Verschleißvorgänge auftreten, die durch Ausbrüche und Ausbröckelungen an der Schneidkante gekennzeichnet sind. Die Einlaufphase der präparierten Torusfräser weist einen deutlich geringeren Anstieg der Verschleißmarkenbreite auf und der Gesamtverlauf ist durch einen gleichmäßigen, fast linearen Verschleiß der Schneiden mit wenig Ausbrüchen gekennzeichnet.

Um den Einfluss der Frässtrategie auf das Einsatzverhalten der Torusfräser zu untersuchen, wurden die Standzeitversuche ebenfalls im Gleichlauf durchgeführt. Die zeitliche Entwicklung des Freiflächenverschleißes ist exemplarisch für einen schleifscharfen und einen präparierten Fräser Bild 7 zu entnehmen, das die Mikroskopaufnahmen der Freiflächen in Abhängigkeit des Vorschubwegs zeigt.

Bereits nach einem Vorschubweg von $l_{FZ} = 0,05$ m ist ein erster Ausbruch der Schneidkante beim schleifscharfen Fräser zu erkennen. Die Schneidkante des präparierten Fräasers weist keine erkennbaren Ausbrüche und Abplatzungen zu diesem Zeitpunkt auf. Auch im weiteren Verlauf treten keine Aufbrüche auf und der Verschleiß ist wesentlich geringer und gleichmäßiger. In Bild 8 sind die Verschleißmarkenbreiten der eingesetzten Fräser in Abhängigkeit des Vorschubwegs für das Gleichlaufräsen dargestellt. Dabei wird deutlich, dass die präparierten Fräser im Gleichlauf ebenfalls weniger stark verschleifen als die unpräparierten Fräser. Die gefräste Fläche konnte zudem subjektiv durch eine höhere Oberflächengüte überzeugen. Das Verschleißverhalten bei den drei eingesetzten Fräsern im schleifscharfen Zustand war durch Ausbrüche und Abplatzungen an der Schneidkante bereits in der Einlaufphase gekennzeichnet. Lediglich bei einem der drei präparierten Fräser traten beim Gleichlaufräsen Ausbrüche auf, allerdings zu einem deutlich späteren Zeitpunkt.

Der Vergleich der Frässtrategien Gegenlauf/Gleichlauf zeigt, dass die präparierten Fräser im Gleichlauf etwas geringfügiger als die im Gegenlauf eingesetzten Fräser verschleifen. Die Mittelwerte der auf Basis der Versuche gemessenen Verschleißmarkenbreiten sind zwar nahezu identisch (siehe Bild 5), allerdings führt

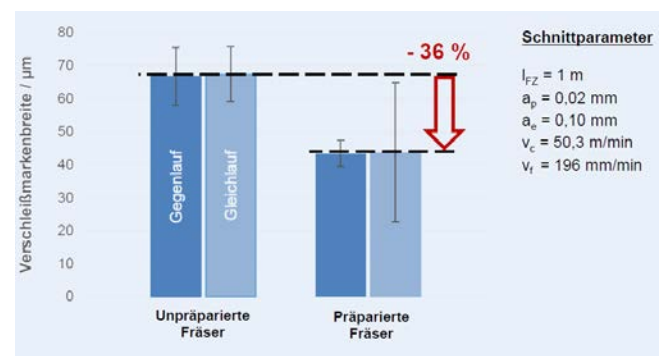


Bild 5. Gegen- und Gleichlaufrästrategie im Vergleich. Bild: THGA

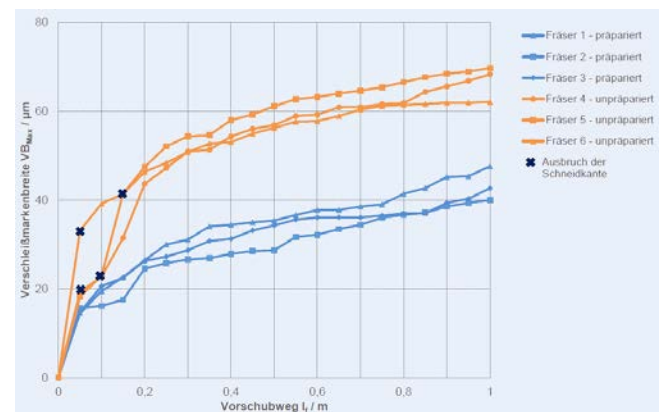


Bild 6. Präparierte gegen unpräparierte Fräser in der Gegenlauf-Frässtrategie. Bild: THGA

der Ausbruch einer einzelnen Schneide der präparierten Torusfräser in der Versuchsreihe zum Gleichlaufräsen zu einem deutlichen Anstieg des Mittelwerts. Die Gegenlaufräser zeigten grundsätzlich ein etwas erhöhtes Verschleißbild als die Gleichlaufräser. Dies ist zum einen auf eine erhöhte Aktivkraft [5], zum anderen auf einen verstärkten Ploughing-Effect beim Gegenlaufräsen zurückzuführen. Die Versuchsreihe lässt die Schlussfolgerung zu, dass die Fräser mit einem definierten Schneidkantenradius von $r_\beta \approx 10 \mu\text{m}$, einer geringen Schneidkantenschartigkeit R_K und mit einer ausgeprägten Trompetenform ($K > 1,2$) in der Mikro-Hartbearbeitung die besten Ergebnisse im Gleichlauf erzielen.

Die Auswertung der Versuchsergebnisse zeigt, dass eine gezielte Schneidkantenverrundung und eine ausgeprägte Trompetenform im Vergleich zur scharfen Schneide zu einer deutlichen

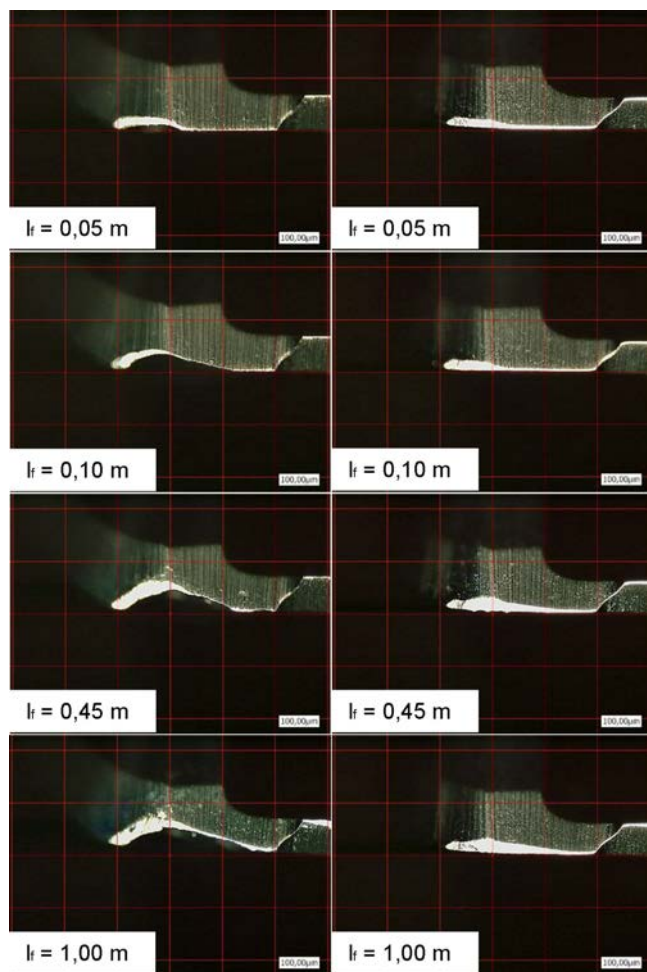


Bild 7. Gegenüberstellung eines unpräparierten (links) und eines präparierten Fräasers (rechts) im Gleichlaufräsen; Vergrößerung = 500-fach.
Bild: THGA

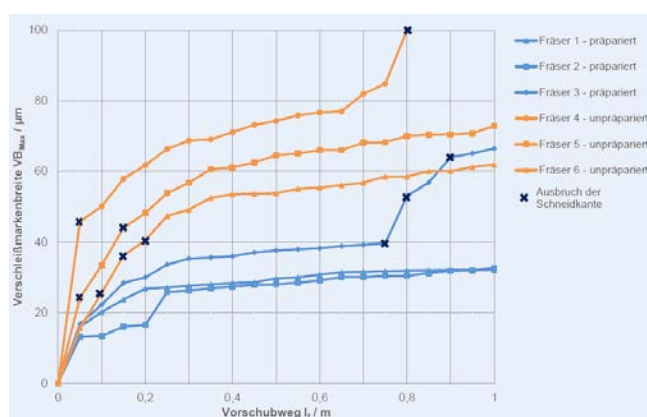


Bild 8. Präparierte gegen unpräparierte Fräser in der Gleichlauf-Frässtrategie. Bild: THGA

Standzeiterhöhung führt. An den Schneidkanten der präparierten Mikrofräser ist über den dargestellten Fräsweg ein gleichmäßiger Verschleiß zu erkennen. Bei der Bearbeitung mit präparierten Fräsern ist, im Gegensatz zu den unpräparierten Werkzeugen,

nicht mit einem Ausbröckeln der Schneidkante zu rechnen. Eine Ursache für die Reduzierung des Verschleißverhaltens kann die Verrundung der Schneidkante sein, welche die Schneidkantenmikrogeometrie stabilisiert sowie Schneidkantenausbrüche infolge initialer Verschleißvorgänge minimiert. Material lagert sich während des Zerspanprozesses nicht weiter an der Schneidkante ab und die Gefahr des Herauslösen von Schneidpartikeln im Falle einer Abscherung der abgelagerten Materialaufschmierungen kann deutlich reduziert werden. Ebenso wirkt sich eine geringe Schneidenschartigkeit positiv auf die erzeugbare Oberflächenqualität aus. Hierbei sei zu erwähnen, dass die Auswahl der einzusetzenden Geometrie abhängig von der jeweiligen Anwendung ist. Bisher liegen nur vereinzelte Erkenntnisse vor, welche Schneidenform und Verrundungsgröße sinnvoll ist, da die Untersuchungen mittels Standzeituntersuchungen extrem zeit- und kostenintensiv sind.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In der Untersuchung wurde gezeigt, dass es durch Flakktieren möglich ist, unbeschichtete Mikrotorusfräser mit einem Werkzeugdurchmesser von $D_{WZ} = 1 \text{ mm}$ und einem Aspektverhältnis von $l/D = 12$ einer gezielten Schneidkantenpräparation zu unterziehen, wodurch die Schneidkantenschartigkeit R_K gegenüber der unpräparierten Ausgangswerkzeuge deutlich verringert und ein definierter, wenig differierender, Schneidkantenradius von $r_f = 10 + 2 \text{ µm}$ erzeugt werden konnte. Zudem wurde durch eine gesteuerte Prozessführung beim Flakktieren die Schneidkantenform „Trompete“ an den Stirnschneiden der Mikrotorusfräser erzeugt.

Durch das exakte Präparieren der Schneidkantenkontur der Fräser wurde ein deutlich kontinuierlicheres und gleichzeitig geringeres Verschleißverhalten in der Mikrohartbearbeitung erreicht. Im Gegensatz zu den schleifscharfen Torusfräsern fanden nahezu keine Ausbrüche und Ausbröckelungen entlang der im Eingriff befindlichen Schneidkanten der präparierten Fräser statt. Zurückzuführen war dies zum einen auf die vorweggenommene, nicht im Prozess stattfindende Verrundung der Schneidkanten und der damit einhergehenden Stabilisierung des Schneidkeils, zum anderen durch die Reduzierung der Schneidkantenschartigkeit R_K , wodurch die Ausbruchs- und Abplatzneigung der Schneiden deutlich herabgesetzt wurde.

Vorteilhaft beim Einsatzverhalten der präparierten Torusfräser zeigte sich das Fräsen im Gleichlauf. Bei verrundeter Schneide kommt es zwangsläufig zu einer Vergrößerung der Mindestspanungsdicke. Das Fräsen im Gleichlauf begünstigt den Spanbildungsvorgang und sollte daher für verrundete Mikrofräser verwendet werden. Im Gegensatz hierzu standen die Ergebnisse der unpräparierten, unbeschichteten Fräser. Diese erzielten beim Gleichlaufräsen das schlechteste Verschleißverhalten sowie die geringsten Oberflächenqualitäten.

Eine weitere Verbesserung des Einsatzverhaltens der präparierten Fräser war mit einem speziell abgestimmten Schichtsystem für die Mikrohartbearbeitung zu erreichen, das gezielt auf die geringen Spannungsdicken der Mikrohartbearbeitung abgestimmt ist und nur eine geringe Vergrößerung der vorhandenen Schneidkantenradien r_f verursacht sowie die Schneidkantenschartigkeit R_K , respektive die Oberflächengüte der Schneiden, verbessert.

L i t e r a t u r

- [1] Quito, F.: Fertigung von Strukturen durch Mikrofräsen. Fraunhofer IPT, Dissertation Universität Aachen, Aachen, 2013
- [2] Dietrich, J.: Praxis der Zerspantechnik. 12. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag 2016
- [3] Baschin, A.: Analyse und Simulation der Prozessdynamik und -stabilität beim NC-Mikrofräsen. Dissertation, Universität Dortmund, 2012. Schriftenreihe des ISF, Band 69. Essen: Vulkan Verlag 2012
- [4] Horn, P.: Mikrofräser für vielfältige Anwendungen. Stand: 2105. Internet: www.zerspanungstechnik.de/2015/05/12/mikrofraeser-fuer-vielfaeltige-anwendungen/. Zugriff am 24.10.2019
- [5] Fritz, A.; Schulze, G.: Fertigungstechnik. 7. Auflage. Heidelberg: Springer Verlag 2006
- [6] Kotschenreuther, J.: Empirische Erweiterung von Modellen der Makrozerspantung auf den Bereich der Mikrobearbeitung. Dissertation, Universität Karlsruhe, 2008
- [7] Tikal, F. (Hrsg.): Schneidkantenpräparation – Ziele Verfahren und Messmethoden. Kassel: Kassel University Press 2009
- [8] Denkena, B. et al.: Surface Preparation, Coating and Wear Performance of Geometrically defined Cutting Edges. Proceedings of the 5th International Conference "The Coatings" in Manufacturing Engineering, Chalkidiki/Greece, 2005
- [9] Biermann, D.; Baschin, A.: Influence of Cutting Edge Geometry and Cutting Edge Radius on the Stability of Micromilling Processes. Production Engineering 3 (2009) 4–5, pp. 375–380
- [10] Jivishov, V.: Mikrogeometrische Einflüsse beim Weich- und Hartspanen. Dissertation, Leibniz Universität Hannover, 2008
- [11] Denkena, B.; Lucas, A.; Bassett, E.: Effects of the cutting edge microgeometry on tool wear and its thermomechanical load. CIRP Annals – Manufacturing Technology 60 (2011) pp. 73–76
- [12] Uhlmann, E.; Löwenstein, A.; Mahr, F.; Oberschmidt, D.: Schneidkantenpräparation von Mikrofräsern. wt Werkstattstechnik online 101 (2011) 1/2, S. 73–80. Internet: www.werkstattstechnik.de. Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag
- [13] Thomas, D.: Nanotechnologie in der Zerspantung am Beispiel Mikrofräsen. Stand: 2004. Internet: mav.industrie.de/allgemein/nanotechnologie-in-der-zerspantung-am-beispiel-mikrofraesen. Zugriff am 24.10.2019
- [14] Löwenstein, A.: Steigerung der Wirtschaftlichkeit beim Mikrofräsen durch Schneidkantenpräparation mittels Tauchgleitlappen. Dissertation, Technische Universität Berlin, 2013
- [15] Schubert, A. et al.: Höhere Prozesssicherheit beim Mikrofräsen von gehärtetem Stahl. Stand: 2011. Internet: www.maschinenmarkt.vogel.de/hoehere-prozesssicherheit-beim-mikrofraesen-von-gehaertetem-stahl-a-340051/. Zugriff am 24.10.2019
- [16] Gründling, J.: ADI – Leichtbau mit Gusseisen. Konstruktion (2003) 6, S. IW10-IW12



Prof. Dr.-Ing. **Peter Frank**,
Bild: Autor

Alexander Otto, M.Eng.
Technische Hochschule Georg Agricola
Staatlich anerkannte Hochschule der DMT-Gesellschaft
für Lehre und Bildung (DMT-LB)
Herner Str. 45, 44787 Bochum
Tel. +49 (0)234 / 968-3406
peter.frank@thga.de, alexander.otto@thga.de
www.thga.de

Effizientes Verfahren zum Vereinzeln und Positionieren im Hochdurchsatz

Adhäsive Vereinzeln von Mikrokugeln

F. Meiners, A. Geppert, K. Tracht

Die Handhabung von sphärischen Mikroproben stellt besondere Anforderungen an die Handhabung, aufgrund von Geometrie und Größe der Proben. Die Nutzung der Adhäsionskräfte, welche die Handhabung kleiner Teile in vielen Fällen erschweren, lassen sich hier vorteilhaft einsetzen. Eine Möglichkeit diesen Effekt zur gezielten Nutzung zu verstärken, beruht auf einer biomimetischen Nachbildung eines Gecko- oder Insektenfußes. In diesem Beitrag wird gezeigt, wie sich durch den Einsatz biomimetischer Strukturen sphärische Mikroproben vereinzeln und positionieren lassen. Ein geeigneter Aufbau wird vorgestellt und seine Möglichkeiten und Limitationen aufgezeigt.

STICHWÖRTER

Handhabungstechnik, Mikrotechnik, Bionik

Adhesive singling of micro spheres – Efficient procedure for singling and positioning for high throughput systems

The handling of spherical micro samples places special demands on the handling system, which result from the geometry and size of the samples. The adhesion forces, which often complicate the handling of small parts, can also be used advantageously. One way of enhancing this effect for targeted use is based on a biomimetic replica of gecko or insect feet. This paper shows how spherical microsamples can be separated and positioned by using biomimetic structures. A suitable design is presented and its possibilities and limitations are shown.

1 Einleitung

In der Mikroproduktion, zum Beispiel bei der Herstellung miniaturisierter Elektronikprodukte, gibt es einen hohen Bedarf an Handhabungsmechanismen zum Bewegen und Vereinzeln von Kleinteilen. Ein weiteres Anwendungsgebiet mit ähnlichen Anforderungen ist die Untersuchung von Mikroproben im Hochdurchsatzverfahren. In der Pharmazie werden Entwicklungsprozesse angewandt, welche durch eine schnelle Prüfung großer Probenmengen neue, zuvor unbekannte Wirkstoffe entdecken. Voraussetzung für die Entwicklung dieser Systeme waren effiziente Analysemethoden, automatisierte Handhabungstechniken flüssiger Proben sowie eine angepasste Prozesssteuerung. [1] Um analog ein System zur Prüfung von metallischen Konstruktionswerkstoffen zu etablieren, wie es im Sonderforschungsbereich SFB 1232 geschieht, werden effiziente Handhabungsverfahren benötigt. [2] Unter anderem aus wirtschaftlichen und prozessbedingten Gründen werden als Materialproben Mikrokugeln eingesetzt. Diese Mikrokugeln müssen zu Beginn des Handhabungsprozesses, nachdem sie aus einer Schmelze zertropft wurden, vereinzelt werden, um den verschiedenen eigenschaftsgenerierenden und prüfenden Prozessen zugeführt zu werden. [3]

Skalierungseffekte führen bei Mikroteilen zu einer Verschiebung der Gewichte der Einflussfaktoren, so erhalten Adhäsions-

kräfte bei der Handhabung der Mikroteile eine besondere Bedeutung. Diese Effekte beruhen darauf, dass bei einer Skalierung der Objektgröße das Volumen mit der dritten Potenz skaliert, die Oberfläche jedoch nur mit der zweiten Potenz. Infolgedessen nimmt bei einer Verkleinerung die volumenabhängige Schwerkraft schneller ab als die adhäsiven Oberflächenkräfte. Hierdurch steigt der Einfluss der Oberflächenkräfte; sie können die Gewichtskraft überschreiten [4]. Dies ist in der Handhabung oft hinderlich, da sich die Handhabungsobjekte nicht mehr allein durch die Schwerkraft von zum Beispiel Greiffingern lösen. Andererseits werden spezielle Handhabungsverfahren durch die Verwendung dieser Skalierungseffekte und durch die Ausnutzung der Adhäsionskräfte ermöglicht. In dieser Arbeit soll die Fragestellung untersucht werden, ob Mikrokugeln mittels adhäsiver Mikrostrukturen vereinzelt werden können.

2 Mikrohandhabung

Um Mikrokugeln aus einem Haufwerk in automatisierte Prozesse zu übergeben, ist es notwendig, sie zu vereinzeln und zu positionieren, so dass sie fixiert beziehungsweise von einem Greifsystem übernommen werden können. Eine rein mechanische Methode, Mikrokugeln zu vereinzeln, wurde von Shimokawa et al. entwickelt. Bei den Kugeln handelt es sich um Löt-kugeln

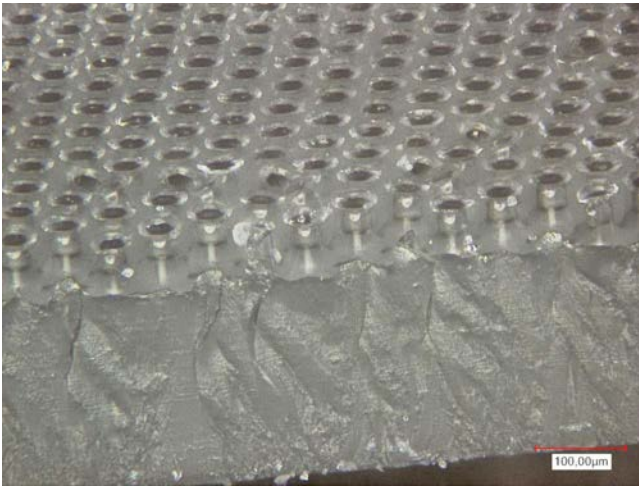


Bild 1. Mikroskopie einer kommerziell erhältlichen Geckofolie *Bild: bime*

mit einem Durchmesser von etwa 100 μm . Diese werden in eine Schale gegeben, welche die Kugeln mit Vibration in einen Bewegungszustand versetzt. Daraufhin wird ein Vakuumgreifer mit mehreren Ausgängen über die Kugeln verfahren. Bei Unterdruckerzeugung werden die Kugeln dann an den Ausgängen des Greifers vereinzelt. [5]

Eine weitere Möglichkeit zur Vereinzelung von Mikrokugeln zeigen Brecher et al. mit der Verwendung von Hilfsstrukturen, in welche die Mikrokugeln mit Unterdruck in eine passive Vereinzelungsstruktur gesaugt werden [6].

Ein Beispiel für nicht mechanisch wirkende Vereinzelungsmethoden von Burgard et al. ist das Sortieren basierend auf der Oberflächenkraft von Flüssigkeiten [7].

Bohringer et al. zeigen eine Vereinzelung von Mikroteilen basierend auf einer Kombination aus Elektrostatik und Vibration. Die Teile werden auf einer Glasplatte platziert und anschließend durch ein elektrostatisches Feld in darin enthaltene Löcher geleitet. Unterstützt wird dies durch Ultraschall, welcher durch ein Piezoelement eingeleitet wird. Elektrostatische Vereinzelungssysteme sind von der Form und den Abmessungen der Bauteile unabhängig und benötigen kein zusätzliches Fluid. Nachteilig ist hierbei, dass ladungsempfindliche Bauteile beschädigt werden können. [8]

Ein elektrostatisches Vereinzelungssystem, welches keine unterstützende mechanische Anregung durch Ultraschall benötigt, zeigen Fantoni et al. Die Hochspannung wird an der Grundfläche sowie an mehrere, in gleichen Abständen darüber liegende, Elektroden spitzen angelegt. Dies ermöglicht, dass das elektrostatische Potenzial exakt unter den Elektroden spitzen Minima ausbildet, welche die bewegten Kugeln auf der Vibrationsplattform einfangen. [9] Den auf Vakuum basierenden Vereinzelungssystemen wie den elektrostatischen Systemen ist gemein, dass sie zur Aufrechterhaltung der Ordnung eine stetige Energieversorgung benötigen.

3 Der Geckoeffekt

Um die Adhäsionseffekte kontrolliert zur Handhabung einsetzen zu können, müssen die Kräfte groß genug sein. Die Adhäsionskräfte, welche zwischen zwei Objekten herrschen, können vergrößert werden, indem die reale Kontaktfläche erhöht wird.

Ein Vorbild hierzu lässt sich in der Natur bei verschiedenen Tieren finden. Die für den Effekt namensgebenden Geckos können wie Spinnen und Insekten an glatten, vertikalen Flächen oder kopfüber laufen. Durch die Verbesserung der Mikroskopie wurde dies bereits früh auf eine Mikrostruktur zurückgeführt, welche die Tiere an ihren Extremitäten besitzen. Diese winzigen Elemente können sich gut an verschiedene Oberflächen anlegen und damit hohe Kontaktflächen erzeugen. Die Haftung beruht hauptsächlich auf Van-Der-Waals Kräften [10].

Die Mikrostruktur ist bei dem Gecko in drei hierarchische Ebenen eingeteilt. Auf der obersten Ebene teilt sich ein Geckofuß in (auch mit dem Auge sichtbare) Lamellen mit einer Größe von 400–600 μm . Diese Lamellen wiederum bestehen aus den Härchen, den Setae, an deren Enden sich die nur noch circa 200 nm großen Spatulae befinden. [11] Durch die Verzweigung in die kleinen Strukturen erhöht sich die reale Kontaktfläche zwischen dem Gecko und dem Untergrund. Während die reale Kontaktfläche zwischen zwei starren Oberflächen dadurch verringert wird, dass lediglich die hervorstehenden Spitzen miteinander in Kontakt stehen, kann sich die flexible Mikrostruktur auch an (auf mehreren Skalen) unebene Oberflächen anpassen. Mit der damit erhöhten Kontaktfläche erhöhen sich auch die Oberflächenkräfte.

In der Vergangenheit gab es bereits verschiedene Ansätze, diese Strukturen nachzuempfinden und künstlich herzustellen. Neben Ansätzen, die mehrstufige Hierarchie nachzubilden, setzen einige Forscher auf einfachere Strukturen [12]. Sie verwenden MSAMS (Mushroom Shaped Adhesive Micro Structure), welche dem Aufbau von Füßen eines Käfers nachgebildet sind, Siehe **Bild 1**. Diese Strukturen sind leichter künstlich herzustellen und bereits auf dem Markt erhältlich als „Geckofolie“. Damit werden sie auch interessant für den Einsatz in industriellen Anwendungen. Ein Nachteil ist, dass sie anders als die gerichtete Struktur des Geckos keine tangential Vorspannkraft zum Aufbau der Haltekraft benötigen, und deswegen eine zusätzliche Methode zur Aufhebung der Haftung benötigen.

Ein bereits am Markt erhältliches Greifsystem ist der „Gecko-Gripper“ von onRobot zum Greifen großer, flächiger Objekte. Eine ähnliche Anwendung zeigte Festo mit dem „NanoForce Gripper“ [13]. Ein weiteres Beispiel für den Einsatz als Greifsystem ist der Geckogripper von Song et. al., welcher Greifobjekte löst, indem er von innen aufgeblasen und damit die ebene Anlagefläche gewölbt wird. [14]

4 Funktionsstruktur Aufbau

4.1 Anforderungen

Die Anforderungen an ein Vereinzelungs- und Positioniersystem im Kontext eines Hochdurchsatzsystems zur Materialerforschung setzen sich aus drei verschiedenen Kategorien zusammen. Sie ergeben sich aus den Eigenschaften der Handhabungsobjekte, den sich anschließenden und vorausgehenden Prozessen sowie dem hohen Durchsatz des Systems. Aus den Eigenschaften der Mikroproben ergibt sich die Anforderung einer ausreichenden Toleranz gegen wechselnde Kugelgrößen, da für die Prüfung unterschiedlich große Kugeln verwendet werden. Aus der zweiten Kategorie ergeben sich Anforderungen an die Positioniergenauigkeit sowie die Bedingung, dass die Kugeln durch die Handhabung nicht verschmutzt, beschädigt oder anderweitig verändert werden dürfen. Dies schließt mechanische und thermische Beanspruchung ein, da diese, wenn auch nicht von außen sichtbar, das Ge-

füge des Materials und damit grundlegende Werkstoffeigenschaften verändern können.

Aus der dritten Kategorie ergeben sich Anforderungen an die Durchlaufzeit. Diese sollte so gering sein, dass der Vereinzelungsprozess keinen Engpass im System darstellt. Der Durchsatz in einem Hochdurchsatzsystem liegt üblicherweise in der Größenordnung von bis zu 100 000 Proben pro Tag.

4.2 Konzept

Das System soll neben dem Vereinzeln aus dem Haufwerk auch die Funktionen des Positionierens und des anschließenden Haltens erfüllen. Zum Vereinzeln kommt ein Luftstrom zum Einsatz, welcher die Kugeln mitreißt und stochastisch verteilt. Das Positionieren wird durch eine Schablone erwirkt, welche Löcher in der Größe der Kugeln dort enthält, wo die Kugeln positioniert werden sollen. Gehalten werden die Kugeln anschließend mithilfe der Geckofolie. Das System begegnet den Anforderungen an die Beschädigungsfreiheit dadurch, dass die Kugeln nicht durch einen Greifer mechanisch geklemmt werden sondern die Haltekraft über eine größere Fläche durch die weiche Mikrostruktur übertragen wird. Da die Adhäsion auf Van-der-Waals-Kräften beruht, wird eine Verschmutzung durch ein flüssiges Adhäsiv vermieden.

4.3 Aufbau und Funktion

Der Aufbau besteht aus drei Hauptkomponenten, welche zusammen die oben genannten Funktionen erfüllen. Der Aufbau ist in **Bild 2** dargestellt. Die erste Komponente ist eine Grundplatte, welche in einer schalenartigen Vertiefung die Kugeln aufnimmt. In dem Boden dieser Schale befinden sich Lufteinlässe, durch welchen von unten Druckluft in das Haufwerk gegeben werden kann. Durch den Luftstrom werden die Kugeln mitgenommen und steigen auf, bis sie auf die zweite Komponente treffen.

Die zweite Komponente ist die Schablone. Diese besteht aus einer Platte mit im gewünschten Positionierungsmuster angeordneten Löchern, welche größer als die Kugeln sind. Diese Schablone führt die im Luftstrom bewegten Kugeln auf beschränkte vorbestimmte Positionen und sorgt damit dafür, dass an jeder Position nur eine Kugel aufgenommen wird. Um eine vollständige Bedeckung aller Positionen zu beschleunigen, laufen die Räume zwischen den Löchern konisch auf diese zu und leiten den Luftstrom und die Kugeln damit auf die Löcher. Falls die Kugeln kleiner sind als der halbe Durchmesser der Löcher in der Schablone, könnten mehrere Kugeln nebeneinander positioniert werden. In diesem Fall muss die Schablone gegen eine mit kleineren Löchern getauscht werden. Sind die Kugeln hingegen größer als der Durchmesser der Schablone können gar keine Kugeln positioniert werden. Die Bandbreite der möglichen Durchmesser innerhalb einer Charge ist also begrenzt.

Oberhalb der Schablone ist der Objektträger positioniert. Dabei handelt es sich um eine Platte, welche einseitig mit Geckofolie versehen ist. Damit sich ein Luftstrom einstellt, muss die Luft aus dem System entweichen können. Dazu befindet sich ein Spalt, kleiner als der halbe Kugeldurchmesser zwischen dem Objektträger und der Schablone.

Um die Kugeln zu vereinzeln werden sie zunächst in die Vertiefung auf der Grundplatte gefüllt. Anschließend wird das System mit dem Luftstrom beaufschlagt, welcher die Kugeln mitreißt und zu der Geckofolie trägt. Der Impuls der auftreffenden Kugeln

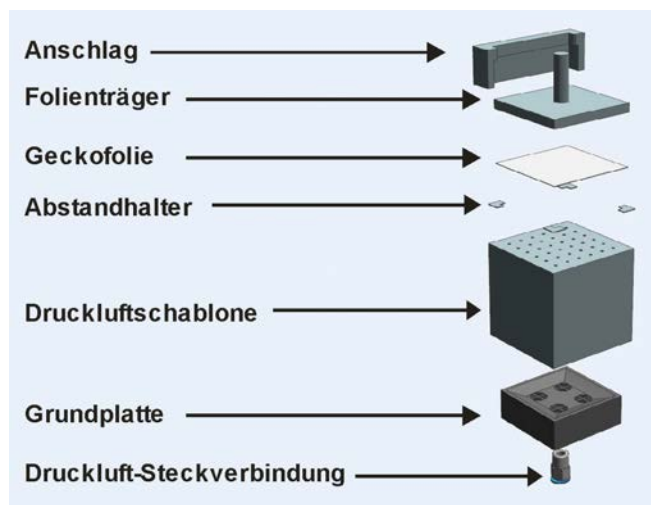


Bild 2. Aufbau der Vereinzelungseinheit Bild: bime

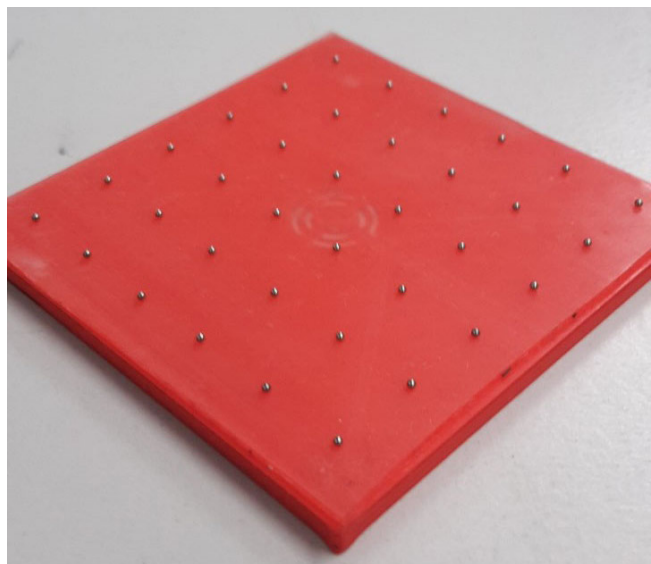


Bild 3. Mikrokugeln auf Adhäsionsfolie vereinzelt Bild: bime

ist durch die hohe Bewegungsgeschwindigkeit ausreichend, um die Kugeln mit mehreren MSAMS in Kontakt zu bringen, siehe **Bild 3**. An den MSAMs werden die Kugeln fixiert. Nach abschalten des Luftstroms wird der Objektträger, auf welchem die Kugeln positioniert sind, nach oben entfernt. Die Kugeln stehen anschließend zur weiteren Handhabung oder Bearbeitung bereit. Dabei bleiben die Kugeln auf dem Objektträger in ihrer Position, ohne dass weiterhin Energie zugeführt werden muss. Es handelt sich daher ab diesem Zeitpunkt um ein passives System.

5 Validierung

Aufgrund der freien Bewegung der Kugeln erfolgt die Verteilung auf die freien Positionen zufällig. Um eine vollständige Belegung aller Positionen zu erreichen, sind mehrere Faktoren einflussgebend. Einige dieser Faktoren sind für ein bestehendes System nicht veränderbar, wie zum Beispiel die Geometrie der Vereinzelungsschablone. Im Rahmen der Prozessführung variabel sind die Anzahl der sich im Prozess befindenden Kugeln sowie die Zeit und die Abfolge, in der die Kugeln im System durch den

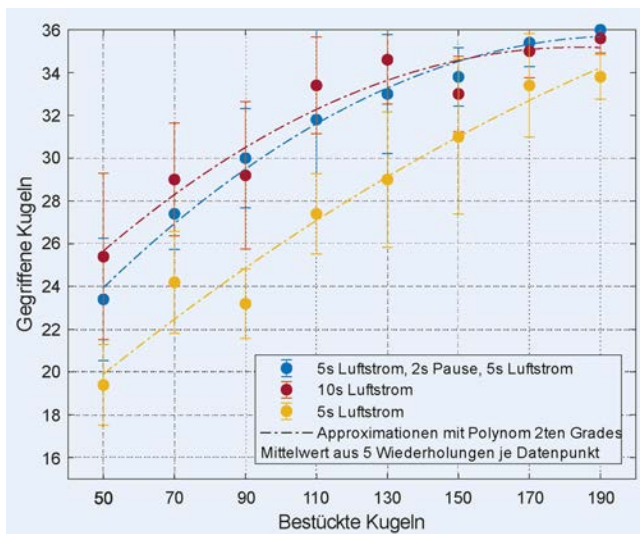


Bild 4. Darstellung der Auswirkung verschiedener Prozessführungen und Bestückungen *Bild: bime*

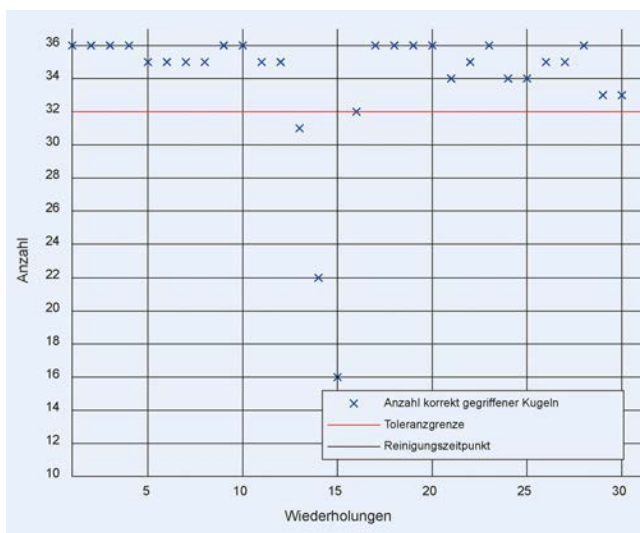


Bild 5. Unvollständige Vereinzelung durch Verschmutzung *Bild: bime*

Luftstrom bewegt werden. Der Einfluss dieser Größen wird im Folgenden gezeigt.

Für die Untersuchung werden in das System in 20er Schritten zunehmend mehr Kugeln gegeben. Der Prozess wird hierbei mit verschiedenen Parametervariationen gefahren, einerseits mit einem kontinuierlichen Luftstrom für 5 s beziehungsweise 10 s und andererseits mit einer Folge von 5 s Luftstrom, 2 s Pause und wieder 5 s Luftstrom. Die Ergebnisse sind in **Bild 4** dargestellt.

Aus den Messergebnissen können folgende Schlüsse gezogen werden: Eine längere kontinuierliche Prozesszeit erhöht die Anzahl erfolgreich vereinzelter Kugeln. Außerdem erhöht bei gleicher Zeit ein unterbrochener Luftstrom die Anzahl erfolgreich vereinzelter Kugeln. Zuletzt erhöht sich bei allen Luftstromfolgen die Anzahl erfolgreich vereinzelter Kugeln mit zunehmender Anzahl der Kugeln im System.

Aus den Ergebnissen kann gefolgert werden, dass für ein optimales und effizientes Ergebnis zu Beginn des Vereinzelungsprozesses ausreichend Kugeln im System vorhanden sein sollten. Um bei abnehmender Anzahl an Kugeln im System immer noch zuverlässig vereinzeln zu können, muss die Prozesszeit zunehmend verlängert werden. Letzten Endes verbleibt eine Restmenge im System, welche entweder unvollständig bestückt vereinzelt, oder dem System ohne Vereinzelung wieder entnommen wird.

5.1 Störfaktoren

In den Versuchen konnte gezeigt werden, wie wichtig die Einhaltung einiger notwendiger Bedingungen ist. Im Zuge der experimentellen Validierung konnte in wenigen Fällen ein aneinanderhaften der Kugeln nach der Trennung des Objektträgers von der Schablone beobachtet werden. Dies kann unterschiedliche adhäsive Effekte zur Ursache haben, wie zum Beispiel den Kapillareffekt durch Benetzung mit Flüssigkeiten. Ursache für die Verschmutzung ist hier feuchte oder ölhaltige Druckluft. So zeigte sich nach dem wiederholten Vereinzeln derselben Kugeln ohne zwischenzeitliche Reinigung mit geringfügig geölter Druckluft eine Abnahme der erfolgreich positionierten Kugeln pro Träger, siehe **Bild 5**. Dies entspricht den Beobachtungen von Kovalov et al. [15], welche zeigten, dass ein Ölfilm je nach Dicke die Adhäsion zwischen adhäsiver Mikrostruktur und Haftobjekt verstärken oder verringern kann. Eine kurzfristige Gegenmaßnahme ist das Reinigen der Kugeln, welches wie in **Bild 5** gezeigt die Vereinzelung wieder ermöglicht. Für die Verwendung im Hochdurchsatzsystem ist die Verwendung sauberer und trockener Luft sicherzustellen. Falls dennoch mit den Kugeln oder der Luft Schmutz in das System eingetragen wird, muss die Geckofolie periodisch gereinigt werden. Dies kann, je nach Art der Verschmutzung, mit Wasser oder anderen Reinigungsflüssigkeiten geschehen.

5.2 Beschädigungen

Im Anschluss an die Greifversuche, nach mehr als 300 Wiederholungen, wurden die Proben mit einem Mikroskop auf Beschädigungen überprüft. Wie erwartet sind an den Kugeln keine sichtbaren Beschädigungen festzustellen. Um zu ermitteln, ob die künstliche Geckofolie langfristig für die Vereinzelungsaufgabe geeignet ist, wurde sie mit einem Laserscanningmikroskop untersucht. Die Mikrostruktur weist hierbei keine sichtbaren Beschädigungen durch Greifvorgänge auf. Dies entspricht der Erwartung, dass, dass sie auch für lange Einsatzszenarien geeignet ist.

6 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde untersucht, ob adhäsive Mikrostrukturen dazu geeignet sind, sphärische Mikroproben zu vereinzeln. Die durchgeführten Experimente haben gezeigt, dass eine Vereinzelung der Kugeln ohne Beschädigung und Verschmutzung möglich ist. Im Gegensatz zu adhäsiven Vereinzelungssystemen, welche auf einem Gel- oder Flüssigklebstoff basieren, beruht die Adhäsion vollständig auf der im festen Aggregatzustand vorliegenden Mikrostruktur, welche keine Rückstände auf den Handhabungsobjekten hinterlässt. Dadurch ist das Verfahren gut für die Handhabung in Analyseprozessen geeignet.

DANKSAGUNG

Die Autoren danken der Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Finanzierung der Forschungsarbeiten im Rahmen des Teilprojektes P04 „Hochdurchsatzhandhabung von Mikrokugeln“ des Sonderforschungsbereiches 1232 „Farbige Zustände“ Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – Projekt Nummer 276397488 – SFB 1232.

Literatur

- [1] Hertzberg, R. P.; Pope, A. J.: High-throughput screening: new technology for the 21st century. *Current Opinion in Chemical Biology* 4 (2000) 4, S. 445–451
- [2] Bader, A.; Meiners, F.; Tracht, K.: Accelerating High-throughput Screening for Structural Materials with Productions Management Methods. *Materials*, Vol. 11, 8 2018, 1330
- [3] Ellendt, N.; Mädler, L.: High-Throughput Exploration of Evolutionary Structural Materials. *HTM Journal of Heat Treatment and Materials* 73 (2018) 1, S. 3–12
- [4] Fearing, R. S.: Survey of sticking effects for micro parts handling. 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Human Robot Interaction and Cooperative Robots, Pittsburgh, PA, USA, 1995, S. 212–217
- [5] Shimokawa, K.; Hashino, E.; Ohzeki, Y. et al.: Micro-ball bump for flip chip interconnections. 1998 Proceedings. 48th Electronic Components and Technology Conference (Cat. No.98CH36206), Seattle, WA, USA, 1998, S. 1472–1476
- [6] Brecher, C.; Weinzierl, M.: Passive Justagestrukturen zur parallelen Handhabung von Mikrokomponenten. In: Vollertsen, F.; Büttgenbach, S. (Hrsg.): 4. Kolloquium Mikroproduktion. Fachbeiträge der vier SFB der Mikrotechnik ; Bremen, 28.-29. Oktober 2009. Bremen: BIAS Verlag 2009, S. 31–41
- [7] Burgard, M.; Othman, N.; Mai, U. et al.: Feeding of Small Components Using the Surface Tension of Fluids. In: Sarkar, P. (Hrsg.): Advances in cryptology – ASIACRYPT 2014. 20th International Conference on the Theory and Application of Cryptology and Information Security, Kaoshiung, Taiwan, December 7–11, 2014 ; proceedings. Heidelberg: Springer 2014, S. 47–51
- [8] Bohringer, K.-F.; Goldberg, K.; Cohn, M. et al.: Parallel microassembly with electrostatic force fields. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Leuven/Belgium, 1998, S. 1204–1211
- [9] Fantoni, G.; Porta, M.; Santochi, M.: An Electrostatic Sorting Device For Microparts. *CIRP Annals* 56 (2007) 1, S. 21–24
- [10] Autumn, K.; Sitti, M.; Liang, Y. A. et al.: Evidence for van der Waals adhesion in gecko setae. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 99 (2002) 19, pp. 12252–12256
- [11] Arzt, E.; Gorb, S.; Huber, G. et al.: Mikro-/Nanomechanik von biologischen Materialien und Systemen *Micro-/nanomechanics of biological materials and systems* (2003)
- [12] Heepe, L.; Kovalev, A. E.; Varenberg, M. et al.: First mushroom-shaped adhesive microstructure: A review. *Theoretical and Applied Mechanics Letters* 2 (2012) 1, S. 14008
- [13] Festo: Die Natur hat's in sich. Internet: https://www.festo.com/cms/lv_corp/13077.htm. Zugriff am 05.08.2019
- [14] Song, S.; Majidi, C.; Sitti, M.: GeckoGripper: A soft, inflatable robotic gripper using gecko-inspired elastomer micro-fiber adhesives. 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2014), Chicago, IL, USA, 2014 – 2014, S. 4624–4629
- [15] Kovalev, A. E.; Varenberg, M.; Gorb, S. N.: Wet versus dry adhesion of biomimetic mushroom-shaped microstructures. *Soft Matter* 8 (2012) 29, S. 7560



Finn Meiners, M.Sc.,
Bild: bime / Podolski

Arne Geppert, B.Sc.,
Prof. Dr.-Ing. **Kirsten Tracht**
Bremer Institut für Strukturmechanik
und Produktionsanlagen | bime
Badgasteiner Str. 1, 28359 Bremen
Tel. +49 (0)421 / 218-64836
meiners@bime.de
www.bime.de

Das Fraunhofer IMS erforscht Künstliche Intelligenz für Mikrocontroller und eingebettete Systeme

Machine Learning für Sensoren

P. Gembaczka

Von der Waschmaschine über Blutdruckmessgeräte bis hin zu Wearables – Mikrocontroller sind in fast jedem technischen Gerät verbaut. Mit „AlfES“ ist Forscherinnen und Forschern am Fraunhofer-Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme IMS in Duisburg jetzt die Entwicklung einer sensornahen Künstlichen Intelligenz für Mikrocontroller und eingebettete Systeme gelungen, die ein voll konfigurierbares künstliches neuronales Netz umfasst. AlfES soll die Möglichkeit bieten, kleine intelligente Mikroelektroniken und Sensoren zu entwickeln, die keine Verbindung zu einer Cloud oder zu leistungsfähigeren Computern benötigen und sogar in der Lage sind, selbst zu lernen.

STICHWÖRTER

Sensoren, Mikrotechnik

Es gibt eine Vielzahl von Softwarelösungen für das maschinelle Lernen – in der Regel sind diese jedoch nur für den PC verfügbar. Eine Lösung, die das Ausführen und Trainieren von neuronalen Netzen auf eingebetteten Systemen erlaubt, gab es bisher nicht. Die Vision war daher, eine sensornahе Künstliche Intelligenz (KI) zu entwickeln, die direkt in ein Sensorsystem integriert werden kann. Mit AlfES (Artificial Intelligence for Embedded Systems) hat ein Forscherteam am Fraunhofer IMS diese Vision nun umgesetzt. Die entwickelte Machine-Learning-Bibliothek ist auf Mikrocontrollern lauffähig und unterstützt auch andere Plattformen wie PC, Raspberry PI oder Android. AlfES wurde speziell für eingebettete Systeme optimiert und umfasst ein voll konfigurierbares künstliches neuronales Netz (KNN). Der Quellcode wurde auf ein Minimum reduziert, dadurch lässt sich das KNN direkt auf dem Mikrocontroller oder auf dem Sensor trainieren. Außerdem ist der Quellcode universal gültig und für nahezu jede Plattform kompilierbar. Mit kommerziell erhältli-



Bild 1. „AlfES“-Demonstrator zur Handschriften-erkennung. Alle Funktionen sind auf dem Arduino UNO integriert. Dieser liest die Sensorwerte des Touchpads ein, führt die Ziffernerkennung durch und gibt das Resultat über den Display aus. Bild: Fraunhofer IMS

chen Softwarelösungen war das bisher nicht möglich.

Schutz der Daten und Reduzierung der Datenmengen

Bislang werden Künstliche Intelligenz und neuronale Netze vor allem im Bereich der Bildverarbeitung sowie Spracherkennung eingesetzt. Da die Rechenleistung lokaler Systeme jedoch oft nicht ausreicht, werden die Daten dabei häufig in der Cloud verarbeitet. So werden jedoch Unmengen von Daten übertragen und der Schutz der Daten gestaltet sich schwierig. Daher wurde ein anderer Ansatz gewählt – weg von maschinellen Lernverfahren in der Cloud, hin zu maschinellen Lernverfahren direkt auf dem eingebetteten System. So verlassen keine sensiblen Daten das System – die Wahrung der Privatsphäre kann garantiert und die zu übertragene Datenmenge deutlich reduziert werden. Hinzu kommt, dass beispielsweise kleine eingebettete Systeme die Daten vor der Verarbeitung übernehmen und die Ergebnisse einem höher geordneten System zur Verfügung stellen können. Auf diese Weise lässt sich die Rechenleistung dezentralisieren und damit die zu übertra-



Bild 2. Artificial Intelligence for Embedded Systems – AlfES. Bild: Fraunhofer IMS

gende Datenmenge nochmals beträchtlich reduzieren.

Kleine neuronale Netze statt Big Data

AlfES fokussiert sich nicht auf die Verarbeitung großer Datenmengen – es werden nur erforderliche Daten übertragen und sehr kleine neuronale Netze aufgebaut. Es wurde Mikrointelligenz auf dem eingebetteten System etabliert, welche die jeweiligen Aufgaben lösen kann. Für jedes Problem werden neue Datenvorverarbeitungsstrategien und Merkmalsextraktionen erarbeitet, um möglichst kleine KNN realisieren zu können. So ist auch ein nachträgliches Lernen auf dem Controller selbst möglich.

In mehreren Demonstratoren wurde diese Vorgehensweise bereits praktisch umgesetzt. So entwickelte das IMS-Forscherteam mittels einer innovativen Merkmalsextraktion eine Erkennung von handgeschriebenen Ziffern auf einem 8-Bit-Mikrocontroller. Ein weiterer Demonstrator kann komplexe Gesten erkennen, die in die Luft geschrieben werden. Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler haben dafür ein System, bestehend aus einem Mikrocontroller und einem absoluten Orientierungssensor entwickelt. Damit könnten beispielsweise Wearables bedient werden. Das Gerät ließe sich mit einer Geste steuern – die Spracherkennung wäre hinfällig.

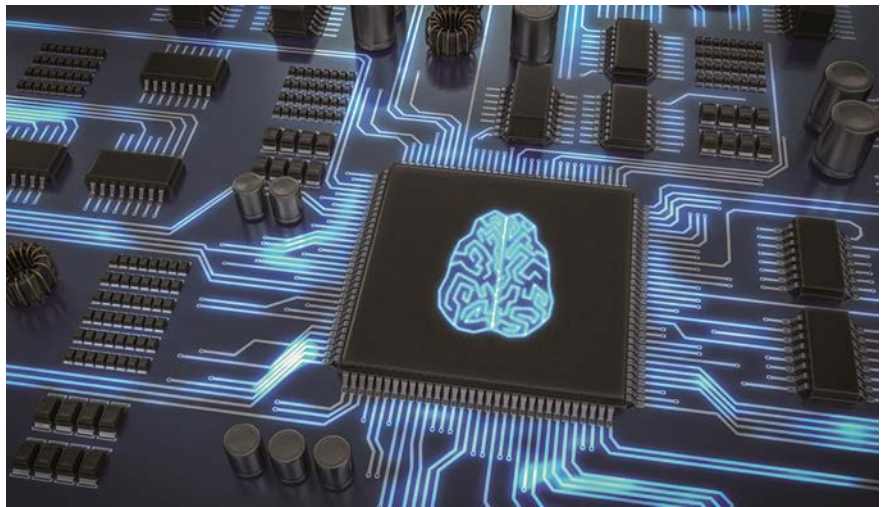


Bild 3. Embedded KI. Bild: vchalup - stock.adobe.com

Weitere Anwendungsmöglichkeiten

Den Anwendungsmöglichkeiten von AlfES sind kaum Grenzen gesetzt: So könnte ein Armband mit integrierter Gestenerkennung etwa zur Beleuchtungssteuerung in Gebäuden genutzt werden. Doch nicht nur das Erkennen einer Geste ist möglich, sondern auch die Überwachung, wie gut eine Geste ausgeführt wurde. Im Reha- oder Fitnessbereich könnten so beispielsweise Übungen und Bewegungsabläufe bewertet werden, auch wenn kein Trainer anwesend ist. Weitere mögliche Einsatzgebiete von AlfES sind beispielsweise Automotive, Medizin, Smart Home oder Industrie 4.0.

Die Entwicklung geht weiter

AlfES enthält aktuell ein neuronales Netz mit einer sogenannten Feedforward-Struktur, das auch tiefe neuronale Netze erlaubt. Die Lösung ist dabei so programmiert, dass mit einer einzigen Funktion ein komplettes Netz beschrieben werden kann. Die Integration weiterer Netzformen und Strukturen ist aktuell in der Entwicklung. Außerdem arbeiten die Forscherinnen und Forscher in Duisburg im Moment an der Entwicklung von Hardwarekomponenten für neuronale Netze.



Bild 4. AlfES-Demonstrator zur Handschriftenerkennung. Auf diesem PS/2-Touchpad werden die Ziffern mit der Hand gezeichnet und dann vom Mikrocontroller erkannt und ausgegeben.

Bild: Fraunhofer IMS



Dr.-Ing. Pierre Gembaczka
Bild: Autor

Fraunhofer-Institut für
Mikroelektronische
Schaltungen und Systeme
IMS, Finkenstr. 61
47057 Duisburg
Tel. +49 (0)203 / 3783-220
pierre.gembaczka@ims.
fraunhofer.de
www.aifes.de

Bestimmung der Einflussgrößen zum Profilieren beim Doppelseitenplanschleifen mit Planetenkinematik

Profilverschleißreduzierung beim Planschleifen*

L. Lichtschlag, E. Uhlmann

Ein ebenes Schleifscheibenprofil ist Voraussetzung für die Fertigung ebener Oberflächen beim Doppelseitenplanschleifen mit Planetenkinematik. Das zuverlässige Bestimmen des Profilverschleißes und die Kenntnis der Wirkzusammenhänge beim Profilieren sind die Grundlage zur Auslegung von Profilierprozessen. Die Entwicklung eines Messsystems zur Bestimmung des Profilverschleißes und die Eingrenzung der Einflussgrößen auf den Abrichtprozess sind die Basis detaillierter Untersuchungen zum Konditionieren der Werkzeuge.

STICHWÖRTER

Fertigungstechnik, Schleifen, Forschung

Profile wear reduction during face grinding - Determination of the influences for profiling in double face grinding with planetary kinematics

A flat grinding wheel profile is precondition for machining flat surfaces in double face grinding with planetary kinematics. Reliably determining profile wear and knowing the effects during profiling are the basis for designing profiling processes. The development of a measuring system to determine the profile wear and the identification of variables influencing the dressing process are requirements for a detailed investigation of the conditioning process.

1 Einleitung

Im Gegensatz zu anderen Schleifverfahren liegen beim Doppelseitenplanschleifen mit Planetenkinematik (DPMP) bisher unzureichende systematische Untersuchungen zum Abrichten und dessen Einflüsse auf das Arbeitsergebnis vor. Der Abrichtprozess ist beim Schleifen ein entscheidender Faktor für das Prozessverhalten und die erzielbare Oberflächenqualität der Werkstücke. Daher erfordert dieser eine zielgerichtete Auslegung. Vor allem ist ein ebenes Schleifscheibenprofil zuverlässig zu erzeugen oder aufgrund von Verschleiß wiederherzustellen. Die Auslegung der Abrichtwerkzeuge und -prozesse basiert dabei auf dem Erfahrungswissen der Hersteller und Anwender. In technologischen Untersuchungen soll daher systematisch analysiert werden, welche Einflussgrößen auf den Profilierprozess maßgeblich sind, um eine wissenschaftliche Grundlage zur Analyse der Abrichtprozesse zu bilden.

2 Verfahrensgrundlagen

Das DPMP ist ein Fertigungsverfahren, welches bei der Bearbeitung planparalleler Flächen zum Einsatz kommt. Anwendung findet es in der Fertigung von metallischen Werkstücken, wie Lagersringen, und keramischen Werkstücken, wie Dicht- und Regelscheiben, sowie Elementen optischer Systeme. Die Vorteile des Verfahrens liegen in den hohen Oberflächenqualitäten und geringen erzielbaren Ebenheitsfehlern, die sich aus der speziellen Kinematik in Form von sich überlagernden Bearbeitungsspuren ergeben. Die Umweltbelastung fällt dabei im Vergleich zum

Läppen, aufgrund der in der Schleifscheibe gebundenen Körner und der Wiederverwendbarkeit des Kühlschmierstoffs (KSS) durch Filtration, geringer aus. Zudem resultiert ein niedrigerer Reinigungsaufwand der Werkstücke nach der Bearbeitung. Charakteristisch für das Verfahren ist die doppelseitige, nicht stetige Losfertigung der Werkstücke. Bei der Kinematik und Anordnung der Werkzeuge besteht Ähnlichkeit zum Doppelseitenplanläppen mit Zwangsführung, aus welchem das DPMP hervorgegangen ist. Der Maschinenaufbau besteht aus zwei horizontal angeordneten Schleifscheiben, zwischen denen die Werkstücke ungespannt in außenverzahnte Werkstückhalter eingelegt werden (**Bild 1**).

Die Werkstückhalter werden über einen angetriebenen Innenstiftkranz und meist stillstehenden Außenstiftkranz geführt. Während der Bearbeitung führen die Werkstücke zyklonale Bewegungen in Bezug zur Schleifscheibenoberfläche aus, welche aus der Überlagerung der angetriebenen Schleifscheiben, der Rotation des Innenstiftkranzes und der daraus resultierenden Werkstückhalterdrehung entstehen. Durch den flächenhaften Eingriff der Schleifscheiben werden die Flächen eines Werkstücks dabei gleichmäßig belastet. Die Kinematik ähnelt der eines Planetengetriebes, woher sich die Bezeichnung des Verfahrens ableitet [1–6].

Zum Erreichen hoher Werkstückebenheiten sind neben der parallelen Anordnung der Schleifscheiben die Ebenheiten deren Schleifbeläge entscheidend. Abhängig von den Werkstoffen des Wirkpaares „Werkzeug – Werkstück“ und den gewählten Prozessparametern resultieren jedoch unterschiedliche Verschleißformen. Diese sind durch die Reduzierung der Schneidfähigkeit und das Abweichen vom ebenen Schleifscheibenprofil gekennzeichnet. Die

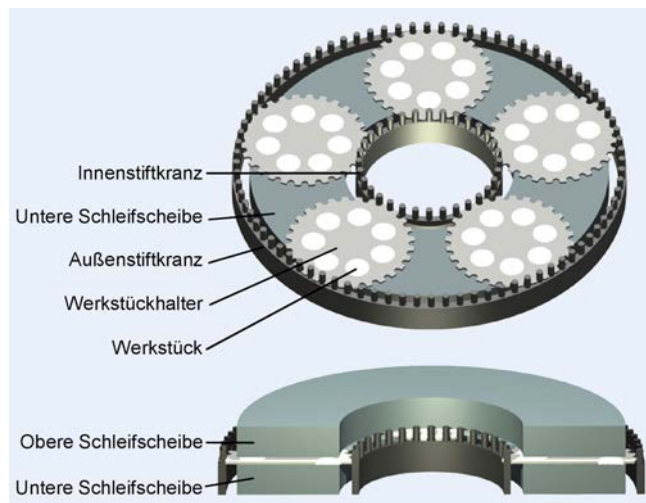


Bild 1. Maschinenanordnung beim Doppelseitenplanschleifen mit Planetenkinematik [5]. Bild: IWF

Fehler- ordnung	axiale Richtung	Scheibenform
0.	+	
	-	
1.	+	
	-	

Bild 2. Radiale Verschleißausprägung an Läppscheiben [7]. Bild: IWF

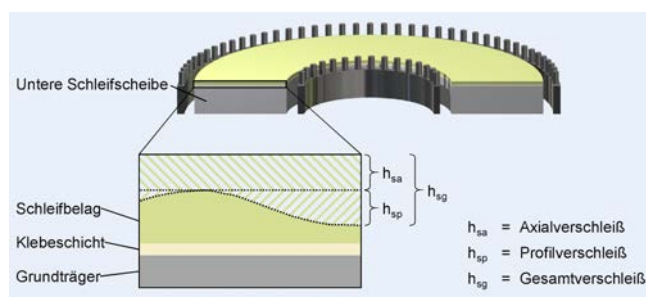


Bild 3. Verschleißausprägung beim Doppelseitenplanschleifen mit Planetenkinematik [6]. Bild: IWF

aus der verfahrenstypischen Kinematik entstehende Relativbewegung zwischen den Werkstücken und Schleifscheiben resultiert in unterschiedlichen Schnittgeschwindigkeiten v_c im Innen- und Außenbereich der Schleifbeläge. Weiterhin legen die Werkstücke im Innen- und Außenbereich der Schleifbelagsoberfläche unterschiedliche Weglängen zurück. Diese Kombination aus radialabhängiger Schnittgeschwindigkeit v_c und Kontaktlänge der Werkstücke mit der Schleifscheibe resultiert in einem inhomogenen Verschleiß der Schleifscheibe. Rückgekoppelt folgen für die Kontaktzone zwischen den Werkstücken und Schleifwerkzeuge heterogene Zerspanbedingungen. Diese können im Arbeitsergeb-

nis zu verminderter Ebenheit und schlechterer Rauheit führen [1, 4–6].

Aufgrund der kinematischen Verwandtschaft des DPMP mit dem Doppelseitenplanlappen mit Zwangsführung treten beim Verschleiß dieselben makroskopischen Ausprägungen im Innen- und Außenbereich der Schleifscheiben auf [1]. *Simpfendörfer* [7] gliedert die auftretenden Verschleißformen in 0. und 1. Ordnung (**Bild 2**). Die Scheibenform bei Fehlern 0. Ordnung ist durch konkave oder konvexe Ausprägung des Schleifbelages über die gesamte Werkzeugoberfläche charakterisiert. Fehler 1. Ordnung weisen hingegen eine konvexe oder konkave Ausprägung innerhalb des für die Bearbeitung verwendeten Bereichs zwischen Innen- und Außenrand des Werkzeuges auf.

Auf Grundlage der Arbeiten von *Sabotka* [8], *Funk* [9], *Ardelt* [1] und *Stähli* [10, 11] definieren *Uhlmann et. al.* [6] für den auftretenden Gesamtverschleiß h_{sg} , dass sich dieser aus dem Axialverschleiß h_{sa} und dem Profilverschleiß h_{sp} zusammensetzt (**Bild 3**). Der Profilverschleiß h_{sp} ist somit die zu minimierende Zielgröße bei Profilierprozessen beim DPMP.

3 Bestimmung des Profilverschleißes

Die Bestimmung des Verschleißes, besonders des sich einstellenden Schleifbelagsprofils, lässt sich aufgrund der Verfahrenskinematik und der doppelseitigen Bearbeitung nur als Post-Prozess-Messung verwirklichen. In der industriellen Anwendung entspricht die Verwendung eines Lineals nach DIN 8741 [12] und eines mechanischen Fühlhebelmessgerätes nach DIN 2270 [13] weitgehend dem Standard. Dabei werden zwei Zylinder identischer Höhe auf dem Außenradius der Schleifscheibe und das Lineal auf diesen platziert. Mit dem Fühlhebelmessgerät wird das Schleifscheibenprofil als Abweichung von der idealen Ebene, verkörpert durch die Unterseite des Lineals, manuell bestimmt. Die Präzision ist dabei von den verwendeten Messinstrumenten und der Positioniergenauigkeit der Zylinder abhängig. Auch unter Vernachlässigung der Positioniergenauigkeit ist der Profilverschleiß nicht genauer als auf $10\ \mu\text{m}$ bestimmbar [12–14].

Ein am Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb (IWF) der Technischen Universität Berlin entwickeltes Messsystem verwendet hingegen taktile Wegsensoren mit integriertem optischen Linearmaßstab zur diskreten Bestimmung des Schleifscheibenprofils. Dazu werden sechs Sensoren an einer Nutschiene montiert und auf der Schleifscheibe platziert. Fünf Sensoren werden zwischen Innen- und Außenrand der Schleifscheibe zur Profilbestimmung und ein sechster auf den gegenüberliegenden Außenrand zum horizontalen Ausgleich der Messwerte ausgerichtet (**Bild 4**).

Dies erfolgt unter der Annahme, dass die Verschleißausprägung rein radiusabhängig ist und demzufolge die Profilhöhen entlang des Umfanges denselben Wert annehmen. Bei einer Verkipfung des Messsystems wird eine Differenz zwischen den beiden Sensoren auf dem Außenrand festgestellt. Durch die Bestimmung einer Ausgleichsgeraden können anschließend die Messwerte korrigiert und das gemessene Schleifscheibenprofil horizontal ausgerichtet werden. Das Verschleißprofil wird anschließend mit einem polynomischen Ansatz aus den Messwerten berechnet. Der beschriebene Aufbau erlaubt die Detektion von Schleifscheibenprofilen bis zu Polynomen 4. Grades und gilt unter Beachtung bisher bekannter Schleifscheibenprofile bis 2. Grades als ausreichend genaue Messung. Durch die Messung in

unterschiedlichen Winkellagen auf der Schleifscheibe können vom Umfang abhängige Verschleißausprägungen bestimmt werden [10]. Vor der Messung erfolgt jeweils die Offsetkompensation der Messbrücke auf einer Prüfplatte nach DIN 876 [15] mit einer Ebenheitstoleranz von $4 \mu\text{m}/1000 \text{ mm}$. Die Messunsicherheit kann bei der Verwendung von Sensoren mit einer Wiederholpräzision von $p_{ws} < 1 \mu\text{m}$ somit auf $p_{wm} = 5 \mu\text{m}$ abgeschätzt werden [14, 15].

4 Technologische Untersuchungen

Im Rahmen technologischer Untersuchungen sollen die Einflussgrößen bestimmt werden, die den größten Einfluss auf den Profilierprozess haben. Zur Bestimmung dieser Einflussgrößen auf die Zielgröße Profilverschleiß h_{sp} werden Screeningversuche durchgeführt. Diese dienen der Eingrenzung von Einflussgrößen mit deutlich weniger Versuchen als bei einem vollfaktoriellen Versuchsplan [16, 17]. Die Analyse der Einflussgrößen erfolgt durch Bestimmung ihrer Effekte auf die Zielgröße nach *Kleppmann* [16]. Die gewählten Einflussgrößen und Werte der zweistufigen Untersuchung basieren auf Erkenntnissen vorausgegangener Forschungsprojekte und dem Erfahrungswissen industrieller Anwender, siehe **Tabelle**.

Zur Vorbereitung wird bei jedem Versuch ein Standardschleifprozess durchgeführt, um die Schleifscheiben in einen wiederholbaren Verschleißzustand zu überführen. Dieser ist nach *Simpfendorfer* [7] durch eine 0. Fehlerordnung in negativer axialer Richtung gekennzeichnet. Anschließend werden die Screeningversuche sukzessiv durchgeführt. Zur Bewertung der Einflussgrößen wird das Verschleißprofil der Schleifscheiben und damit die Zielgröße Profilverschleiß h_{sp} mit dem beschriebenen Messsystem erfasst. Dazu werden jeweils vor und nach einem Profilversuch die Schleifscheibenprofile bestimmt. Die Differenz gibt Aufschluss über eine Verbesserung oder Verschlechterung der Schleifbelagebenheit. Zudem werden die Ebenheitsfehler f_e und Rauheitskennwerte R_a , R_z und R_t an der Werkstückober- und unterseite bestimmt.

Die Analyse der Ergebnisse zeigt eine Abhängigkeit des Ebenheitsfehlers f_e vom Profilverschleiß h_{sp} (**Bild 5**).

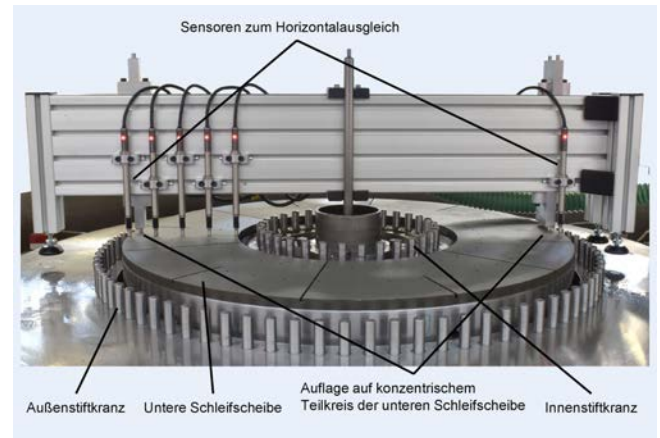


Bild 4. Messsystem zur Bestimmung des Profilverschleißes beim Doppelseitenplanschleifen mit Planetenkinematik im Arbeitsraum einer Stähli „DLM 505 HS“ [14]. Bild: IWF

Tabelle. Gewählte Einflussgrößen und Werte der zweistufigen Screeningversuche zum Profilieren

Einflussgröße	Einheit	Unterer Wert	Oberer Wert
Schleifscheibendrehzahl n_s	1/min	30	60
Drehzahlverhältnis n_l	-	-0,75	0,75
Kühlschmierstoffvolumenstrom $\dot{V}_{kss}$	l/min	0	45
Prozesskraft F_p	daN	30	90
Zerspante Abrichterhöhe Δh_a	μm	500	2000
Abrichterkorngröße d_{ga}	μm	69	154

Es resultiert sowohl für die Werkstückoberseite sowie die Werkstückunterseite ein stärkerer Profilverschleiß in verminderter Werkstückebenheit. Der Verlauf der Messwerte deutet auf einen kritischen Profilverschleiß hin, ab dem die Ebenheitsfehler f_e überproportional ansteigen. Eine detaillierte Untersuchung des ursächlichen Zusammenhangs zwischen Ebenheitsfehler, Profil-

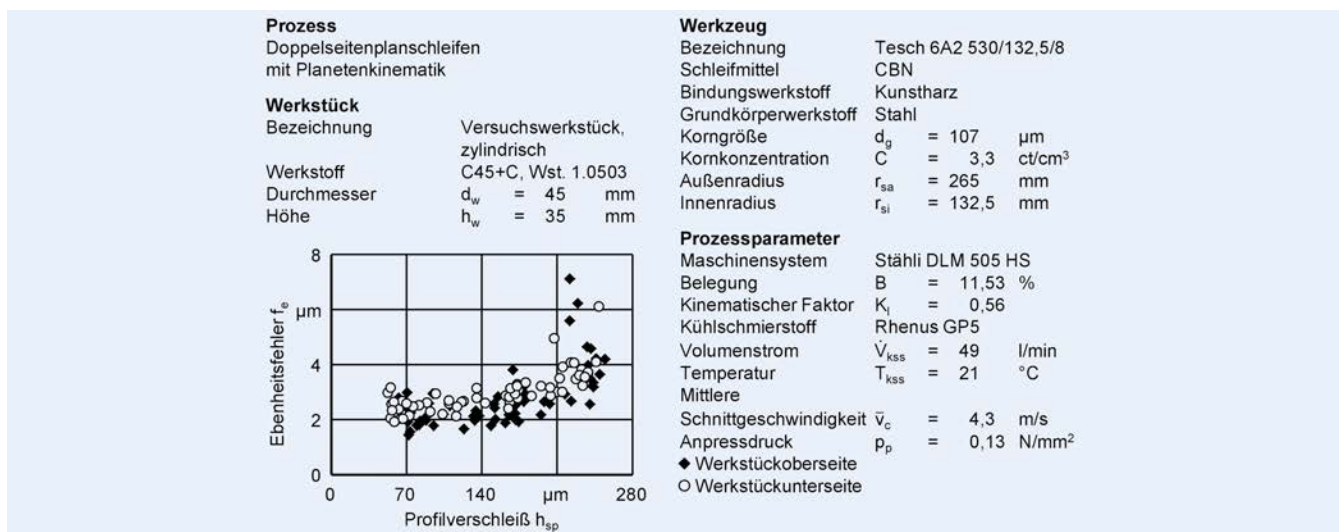


Bild 5. Ebenheitsfehler f_e an der Werkstückober- und -unterseite in Abhängigkeit des Profilverschleißes h_{sp} der korrespondierenden Schleifscheibe. Bild: IWF

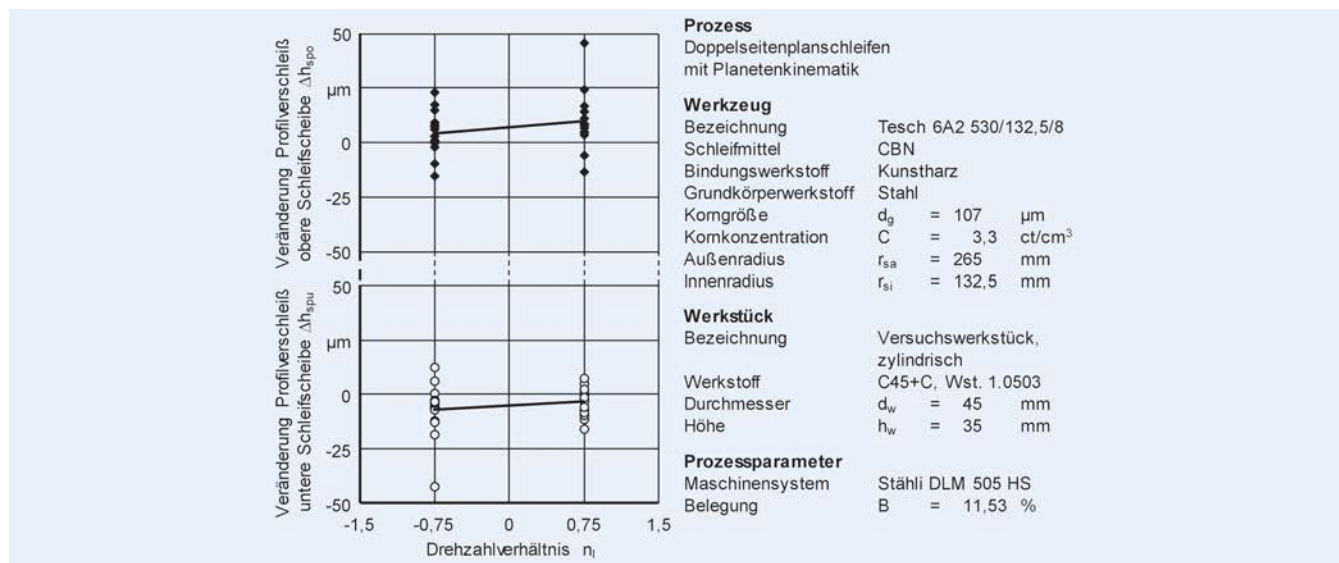


Bild 6. Effekt des Drehzahlverhältnisses n_1 auf die Veränderung des Profilverschleißes Δh_{sp} an der oberen und unteren Schleifscheibe beim Profilieren.
Bild: IWF

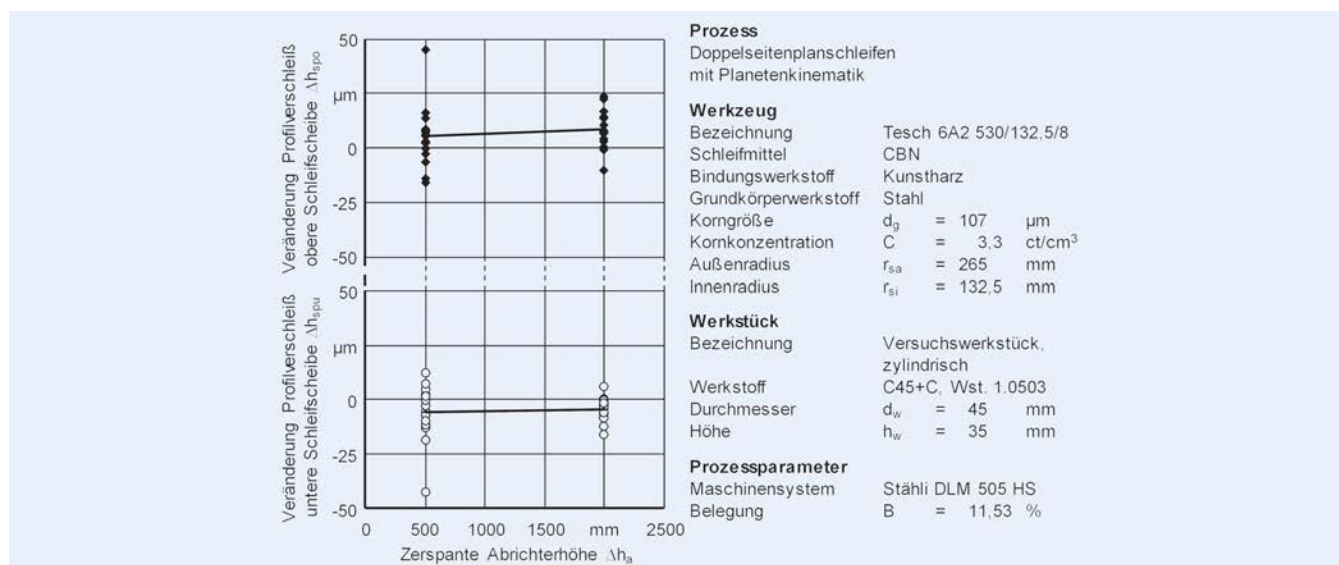


Bild 7. Effekt der zerspannten Abrichterhöhe Δh_a auf die Veränderung des Profilverschleißes Δh_{sp} an der oberen und unteren Schleifscheibe beim Profilieren.
Bild: IWF

verschleiß und Werkstück- sowie Schleifscheibendurchmesser ist Gegenstand zukünftiger Versuche. Die erfassten Rauheitskenngrößen weisen hingegen keine Abhängigkeit vom Schleifscheibenprofil auf.

Die Analyse der Effekte der untersuchten Einflussgrößen auf die Veränderung des Profilverschleißes Δh_{sp} an der oberen und unteren Schleifscheibe zeigt, dass das Drehzahlverhältnis n_1 zwischen Innenstiftkranz und der jeweiligen Schleifscheibe den größten Effekt auf den Profilierprozess hat (**Bild 6**).

Der beobachtete Effekt korrespondiert mit bisherigen Erkenntnissen, wonach das Verschleißprofil der Schleifscheiben maßgeblich von den kinematischen Prozessparametern beeinflusst wird [1, 5, 18]. Diese bestimmen die Aufenthaltshäufigkeit der Werkstücke in den radialen Bereichen der Schleifscheiben, die dortigen Schnittgeschwindigkeiten v_c und damit die Beanspruchung des Schleifbelages. Das gezielte Einstellen des Dreh-

zahlverhältnisses n_1 beim Profilieren kann somit durch eine entsprechende Beanspruchung des Verschleißprofils zum ebenen Schleifbelag führen.

Die zerspannte Abrichterhöhe Δh_a zeigt einen geringeren Effekt auf das Profilierungsergebnis (**Bild 7**).

Ein größeres zerspanntes Maß führt hierbei zu einer stärkeren Einebnung des Schleifscheibenprofils. Vor dem Hintergrund, dass mindestens die Profilspitzen eines Verschleißprofils im Schleifbelag abgetrennt werden müssen, um einen ebenen Zustand zu erreichen, ist diese Einflussgröße jedoch als relevant zu betrachten. Unter Beachtung der Wirtschaftlichkeit des Profilierens ist sowohl die abgetrennte Abrichterhöhe als auch das abgerichtete Volumen des Schleifbelages zu minimieren. Die Abrichterkorngröße d_{ga} zeigt einen differenten Effekt auf die Schleifscheiben. Eine größere Korngröße führt am oberen Schleifbelag zu einer Reduzierung der Profilabweichung. Auf der Unterseite führt diese

aber zu einer Verschlechterung. Da die Korngröße beim Schärfen eine bekannte Einflussgröße ist und Profilier- und Schärfprozess beim DPMP kombiniert durchgeführt werden, sind weitere Untersuchungen zu deren Einfluss notwendig [1].

Die Steigerung der Prozesskraft F_p zeigt einen negativen Effekt auf die obere und einen positiven Effekt auf die untere Schleifscheibe. Bei Versuchen mit der Prozesskraft $F_p = 90$ daN wurde ein Rattern der Maschine beobachtet, sodass hier eine obere Grenze für die Prozessstabilität des Abrichtens vermutet wird. Weitere Untersuchungen sollten sich demnach am unteren getesteten Wert $F_p = 30$ daN orientieren. Die Variation des Kühlschmierstoffvolumenstromes $\dot{V}_{kss}$ zeigt keinen Effekt auf den Profilverschleiß an der oberen Schleifscheibe. An der unteren führte hingegen ein höherer Volumenstrom zu einer geringfügigen Verschlechterung. Es wird vermutet, dass die beobachtete, stärkere Ansammlung von KSS auf dem unteren Schleifbelag bei einem größeren Volumenstrom zu einem übermäßigen Abfluss der zum Abrichten nötigen Slurry aus KSS und Abrichterkörnern führt. Hierdurch wäre der Profilierprozess gestört und das Ergebnis, wie beobachtet, vergleichsweise schlechter. Die Versuchsauswertung ergibt, dass eine höhere Schleifscheibendrehzahl n_s auf die untere Schleifscheibe keine Auswirkung hat. Hingegen führt diese auf der Oberseite zu einer Verschlechterung des Schleifscheibenprofils. Vermutet wird, dass aufgrund der höheren Umfangsgeschwindigkeit der Slurryfilm abreißt und somit kein Abtrennen vom Schleifbelag mehr stattfindet. Hingegen sorgt die stärkere Ansammlung von KSS auf der unteren Schleifscheibe für einen nicht abreißen Slurryfilm.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem beschriebenen Messsystem ist die verlässliche Bestimmung und Analyse des Schleifscheibenprofils beim DPMP möglich. Dies ist Voraussetzung zur Untersuchung der Einflussgrößen auf Profilierprozesse. Ziel ist, das ebene Schleifscheibenprofil zur Fertigung planer Werkstückoberflächen herzustellen. Die durchgeführten Screeningversuche ermöglichen die Bestimmung der Effekte ausgewählter Einflussgrößen. Hierbei übt das Drehzahlverhältnis den größten Effekt auf die Veränderung des Profilverschleißes aus. Diese Feststellung deckt sich mit bisherigen Erkenntnissen, wonach das Verschleißprofil maßgeblich von den kinematischen Prozessparametern der Bearbeitung abhängt. Eine größere zerspannte Abrichterhöhe führt zu einem verbesserten Schleifscheibenprofil.

Zusätzlich ist sie eine zu beachtende Einflussgröße für die wirtschaftliche Auslegung von Konditionierprozessen. Der Kühlschmierstoffvolumenstrom und die Schleifscheibendrehzahl zeigen für die obere und untere Schleifscheibe unterschiedliche Effekte. Als Ursache wird hier das Wegspülen der zum Abrichten nötigen Slurry bei hohem Kühlschmierstoffvolumenstrom und das Abreißen des Slurryfilms bei hohen Drehzahlen vermutet.

Eine hohe Prozesskraft führt ebenfalls zu unterschiedlichen Effekten am oberen und unteren Schleifbelag. Die Neigung zum Rattern bei einer hohen Prozesskraft legt jedoch eine Auslegung der Abrichtprozesse mit dem unteren getesteten Wert nahe. Zur Auslegung von Konditionierprozessen, die neben dem Profilieren auch das Schärfen umfassen, sind weitere Versuche mit den Effekten auf die Schärfe der Schleifscheiben nötig. Weiterhin ist die detaillierte Analyse der Wirkzusammenhänge bei der Prozesse Gegenstand aktueller und zukünftiger Forschungsvorhaben.

DANKSAGUNG

Diese Veröffentlichung basiert auf erzielten Ergebnissen im Rahmen des Forschungsvorhaben DFG Uh 100/223, welches durch die Deutsche Forschungsgesellschaft DFG gefördert wird.

Literatur

- [1] Ardel, T.: Einfluss der Relativbewegung auf den Prozess und das Arbeitsergebnis beim Planschleifen mit Planetenkinematik. In: Uhlmann, E. (Hrsg.): Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2000
- [2] Egger, R.: Planschleifen von Keramik mit zyklodischer Wirkbewegung. In: VDI (Hrsg.): Fortschritt-Berichte VDI, Ausgabe 588. Düsseldorf: VDI-Verlag 2001
- [3] Rußner, C.: Präzisionsplanschleifen von Al₂O₃-Keramik unter Produktionsbedingungen. Dissertation, Technische Universität Dresden, 2006
- [4] Uhlmann, E.; List, M.; Lichtschlag, L.: Stellgrößen beim Doppelseitenplanschleifen mit Planetenkinematik. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb ZWF 111 (2016) 7/8, S. 399–402
- [5] Uhlmann, E.; Hoghé, T.: Wear reduction at double face grinding with planetary kinematics. Production Engineering 6 (2012) 3, pp. 237–242
- [6] Uhlmann, E.; Kleinschmitzer, M.; Hoghé, T.: Optimierungspotentiale beim Doppelseitenplanschleifen mit Planetenkinematik. In: Hoffmeister, H.-W.; Denkena, B. (Hrsg.): Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren. Verfahren und Maschinen. Essen: Vulkan Verlag 2016, S. 67–77
- [7] Simpfendörfer, D.: Entwicklung und Verifizierung eines Prozessmodells beim Planläppen mit Zwangsführung. In: Spur, G. (Hrsg.): Forschungsberichte für die Praxis. München: Carl Hanser Verlag 1988
- [8] Sabotka, I. A. W.: Planläppen Technischer Keramiken. In: Spur, G. (Hrsg.): Forschungsberichte für die Praxis. München: Carl Hanser Verlag 1991
- [9] Funck, A.: Planschleifen mit Läppkinematik. In: Spur, G. (Hrsg.): Forschungsberichte für die Praxis. München: Carl Hanser Verlag 1995
- [10] Stähli, A. W.: Die Läpp-Technik. Firmenschrift A.W. Stähli AG, Pieterlen/Biel, Schweiz, 2004
- [11] Stähli, A. W.; Stähli, B.: Flachhonen und Läppen mit Zweiseiben-Maschinen. Firmenschrift A.W. Stähli AG, Pieterlen/Biel 2005
- [12] DIN 874-1: Lineale. Berlin: Beuth Verlag 2003
- [13] DIN 2270: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Fühlhebelmessgeräte – Grenzwerte für Messabweichungen. Berlin: Beuth Verlag 2017
- [14] Lichtschlag, L.; List, M.; Uhlmann, E.: Entwicklung eines Systems zur Bestimmung des Profilverschleißes beim Doppelseitenplanschleifen mit Planetenkinematik. Ingenieurspiegel (2019) 3, S. 39–42
- [15] DIN 876-1: Prüfplatten; Prüfplatten aus Naturhartstein; Anforderungen; Prüfung. Berlin: Beuth Verlag 1984
- [16] Kleppmann, W.: Taschenbuch Versuchsplanung. Produkte und Prozesse optimieren. München: Carl Hanser Verlag 2013
- [17] Siebertz, K.; van Bebber, D.; Hochkirchen, T.: Statistische Versuchsplanung. Design of Experiments (DoE). Heidelberg: Springer-Verlag 2010
- [18] Uhlmann, E.; Hoghé, T.; Kleinschmitzer, M.: Grinding wheel wear prediction at double face grinding with planetary kinematics using analytic simulation. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 69 (2013) 9–12, pp. 2315–2321



Linus Lichtschlag, M.Sc.
Bild: IWF



Prof. Dr. h. c. Dr.-Ing. Eckart Uhlmann
Bild: IWF

Technische Universität Berlin
Institut für Werkzeugmaschinen
und Fabrikbetrieb (IWF)
Pascalstr. 8–9, 10587 Berlin
Tel. +49 (0)30 / 314-23998
linus.lichtschlag@iwf.tu-berlin.de
www.iwf.tu-berlin.de



Entwicklung einer Anlage zur automatisierten laserbasierten Reparatur strukturierter Formeinsätze

ToolRep

C. Kreisel

Texturierte Spritzgusswerkzeuge sind aus der Kunststoffverarbeitung nicht mehr wegzudenken. Auf die Beschädigung einer Textur folgen Ausfallzeiten, teure Reparaturen bis hin zum Totalausfall des Werkzeugs. Ziel des vom BMBF geförderten Projektes „ToolRep“ war es, die gesamte Reparaturkette in einer prototypischen Anlage abzubilden. Texturfehler werden automatisch erkannt und selektiert, mittels additivem Laserauftrag gefüllt und mittels spezieller Reparaturalgorithmen und Lasergravur wiederhergestellt.

STICHWÖRTER

Laserbearbeitung, CAM (Computer-Aided Manufacturing), Werkzeug-/Formenbau

Toolrep. Development of a system for the automated laser-based repair of structured mould inserts

Textured injection moulding tools have become indispensable in plastics processing. Damage to a texture is followed by downtimes, expensive repairs and even total tool failure. The aim of the BMBF-funded „Toolrep“ project was to map the entire repair chain in a single system. Texture errors are automatically detected and selected, filled by means of additive laser application and restored by means of special repair algorithms and laser engraving.

1 Industrielle Rahmenbedingungen

Kunststoffspritzgießen ist eines der wichtigsten Verfahren zur Serienherstellung von Kunststoffprodukten und stellt weltweit einen hoch-dynamischen Wachstumsmarkt dar, unter anderem wegen der werkzeugseitig stetig verbesserten Möglichkeiten, immer komplexere Oberflächentexturen und Bauteilkonstruktionen abzubilden. Wird jedoch eine Spritzgießform während des Einsatzes beschädigt, hat dies bei einer Just-in-time-Produktion weitreichende Folgen. Die schnelle Reparatur einer beschädigten Form ist daher zwingend erforderlich. Bestehende Reparaturlösungen, die überwiegend auf manuellen Arbeitsschritten beruhen, erreichen oftmals nicht die geforderten Qualitäten und Zeiten. Die Reparatur von oberflächenstrukturierten Spritzgießformen stellt daher eine besondere Herausforderung dar. Es existiert bislang kein Maschinensystem, das eine vollständige Prozesskette zur automatisierten Reparatur solcher Spritzgießformen abbildet und auf dieser Basis die geforderten Bearbeitungszeiten und hohe, versatzfreie Strukturqualitäten erlaubt.

2 Das Projekt „ToolRep“

Bisherige manuelle Arbeitsschritte zur Reparatur eines Spritzgusswerkzeuges beruhen auf der visuellen Inspektion der Werkzeugoberfläche, der Detektion der Schadstelle, dem Ausschleifen und anschließendem Verschließen der Oberfläche sowie, wenn

möglich, dem händischen Neutexturieren. Diese Prozesskette (**Bild 1**) sollte im Ergebnis des Projekts ToolRep vollautomatisiert innerhalb einer Anlage erfolgen. So wurde eine Messtechnik benötigt, welche hochaufgelöst Oberflächendaten des Werkzeugs und der Textur erfassen kann. Außerdem war ein Softwarealgorithmus notwendig, welcher Anomalien in der Oberflächenbeschaffenheit detektiert. Der schadhafte Bereich sollte dann mittels Lasertiefgravur abgetragen werden, um eine definierte Ebene Grundfläche zu schaffen. Im Anschluss sollte die Kavität mittels additivem Laserauftrag geschlossen und über die Texturebene hinaus aufgefüllt werden. Ein Erfassen der entstandenen Oberflächengeometrie sowie spezielle Rechenalgorithmik ermöglichen die Bestimmung einer neuen Texturoberfläche, welche folgend mittels Lasergravur erzeugt werden kann. Auf Basis der umliegenden Textur erzeugt dann eine Software Daten, mit denen mittels Laserabtrag eine reparierte Textur erzeugt werden kann.

Für diesen neuen Prozessablauf wurden der Forschungs- und Entwicklungsbedarf in den Bereichen Messtechnik, Maschinenbau, Laserprozessregelung, additiver Fertigung und 3D-Bahnplanung identifiziert und entsprechende Lösungsansätze formuliert. Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten erfolgten in den Jahren 2015 bis 2019 im Verbundvorhaben ToolRep, welches im Rahmen des BMBF-Wettbewerbs „Produktionsanlagen für Wachstumsmärkte – intelligent einfach und effizient“ gefördert wurde.

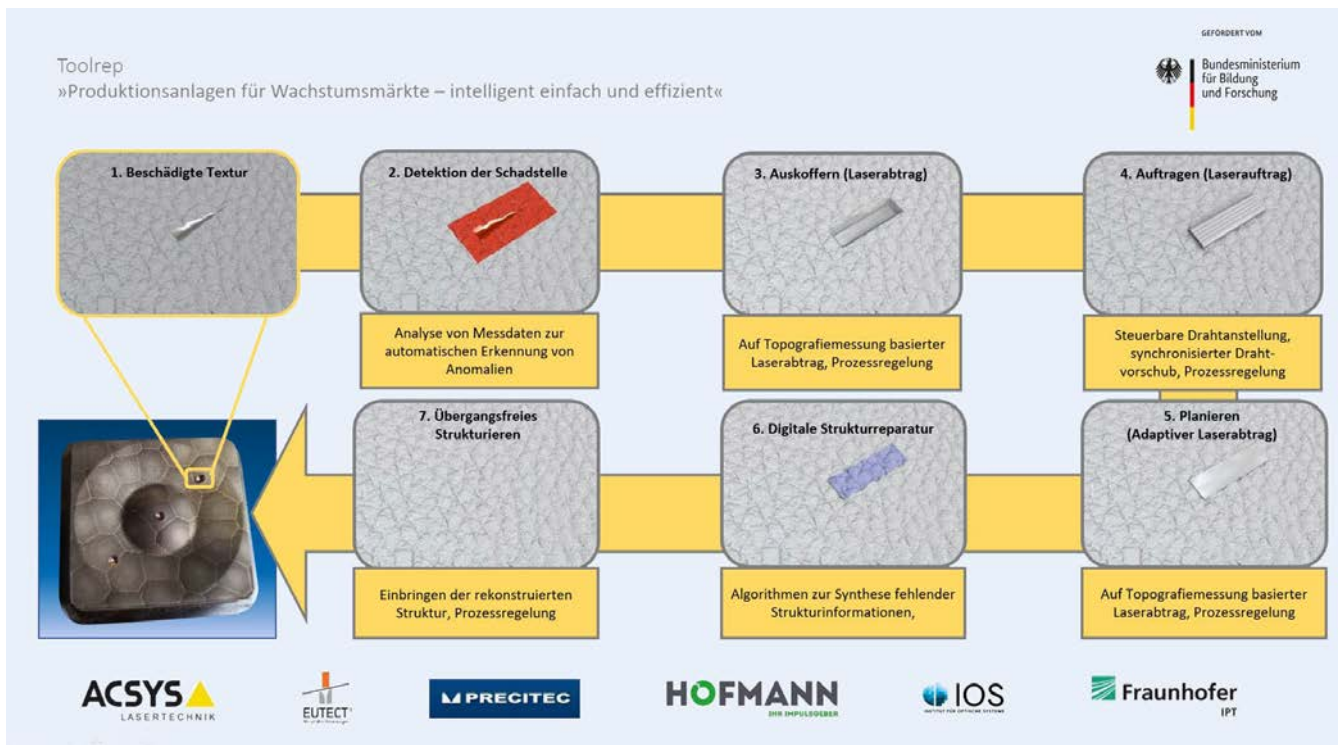


Bild 1. Darstellung der maschinellen Einzelprozesse in der automatisierten laserbasierten Reparatur texturierter Werkzeugeinsätze. Bild: Acsys Lasertechnik

2.1 Das Projektteam

Das Konsortium des Verbundprojekts ToolRep bestand aus sechs Partnern aus Industrie und Forschung. Jeder Partner konnte in seinem Fachbereich langjährige Expertise vorweisen. Die Acsys Lasertechnik GmbH ist auf dem Markt ein etablierter, in verschiedenen Anwendungsbereichen technologisch führender Hersteller von Laserbearbeitungsanlagen und brachte eine breite anlagen- und laserprozesstechnische Expertise in dieses Vorhaben ein. Daher besetzte das Unternehmen die Funktion des Technologieintegrators und Projektleiters. Darüber hinaus boten die umfangreichen Erfahrungen aus den Bereichen Lasergravur, Laserschweißen und Oberflächenerfassung sehr gute Voraussetzungen für die qualitativ optimale Parametrierung und Abstimmung der Bearbeitungs- und Messprozesse in einer hybriden Laseranlage. Das Unternehmen Euctect GmbH ist spezialisiert auf dem Gebiet der Drahtfördertechnik und brachte eine über 20-jährige Erfahrung im Maschinenbau ein. Seit 1998 werden von Euctect Löt- und Verbindungssysteme entwickelt, gefertigt, montiert, programmiert und bei Kunden weltweit in Betrieb genommen. Das „SWF-AS“-Modul von Euctect dient der kraftgeregelten Drahtzufuhr mit integrierter Begasung für Auftragsschweißanwendungen. Die Precitec Optronik GmbH stellt Sensorik und Komplettsysteme zur Abstands-, Topografie- und Schichtdickenmessung her. Die Messtechnik wird außer in medizintechnischen Anwendungen als integriertes Gesamtsystem auch in vielen produzierenden Unternehmensbereichen verwendet. Die Erfahrung der Werkzeugbau Siegfried Hofmann GmbH bezüglich der Anforderungen an Formeinsatzoberflächen und -qualitäten sowie der Kunststoffprodukte, die mit diesen Formeinsätzen produziert werden, bildet die für die Evaluierung des Reparaturergebnisses erforderliche Basis. Das Institut für optische Systeme der HTWG Konstanz (IOS) hat sich vor allem auf die Bereiche kognitive Systeme,

geometrisches Modellieren sowie Bildverarbeitung spezialisiert. Die gleichnamigen Arbeitsgruppen unter der Leitung von Prof. Dr. Matthias Franz und Prof. Dr. Georg Umlauf haben in allen für die Textursynthese wichtigen Teilbereichen bereits wissenschaftliche Vorarbeiten geleistet. Im Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie (IPT) entwickeln die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter neue Fertigungsverfahren, innovative Fertigungsmesstechnik sowie entsprechende Anlagen- und Maschinenkonzepte. Die im Vorhaben adressierten Themen Maschinenbau, Messtechnik, die Lasertechnologien „Laserstrukturieren“ und „Laserauftragsschweißen“ sowie Softwareentwicklung mit Schwerpunkt CAM-Entwicklung sind Kompetenzfelder des Fraunhofer IPT.

2.2 Wesentliche Projektergebnisse

Ausgangspunkt für alle Schritte des automatisierten Reparaturprozesses ist die Inspektion der Werkzeugoberfläche. Während sie beim manuellen Prozess klassisch visuell erfolgt, wurde im Projekt eine Möglichkeit geschaffen, die Oberfläche hochaufgelöst zu digitalisieren und die erzeugten Daten für die weitere Bearbeitung zur Verfügung zu stellen.

In diesem Zusammenhang konnte die Precitec Optronik GmbH gemeinsam mit dem Fraunhofer IPT ein Messgerät auf Basis eines interferometrischen Sensors entwickeln, welches sich mithilfe einer Lichtleitfaser in den Strahlweg des Gravurlasers einkoppeln lässt (Bild 2) und somit durch den Laserbearbeitungskopf die gleiche Oberfläche sieht wie der fokussierte Laserstrahl. Dies erlaubt eine Oberflächenerfassung an der und um die Defektstelle sowie eine In-situ-Messung der beim Auskoffern und Planieren abgetragenen Oberfläche mit Validierung des Reparaturergebnisses. Aufgrund der Faserkopplung kann der eigentliche Sensor weit entfernt vom geschädigten Werkzeug und der Materialbearbeitung positioniert werden. Somit gibt es kaum geome-

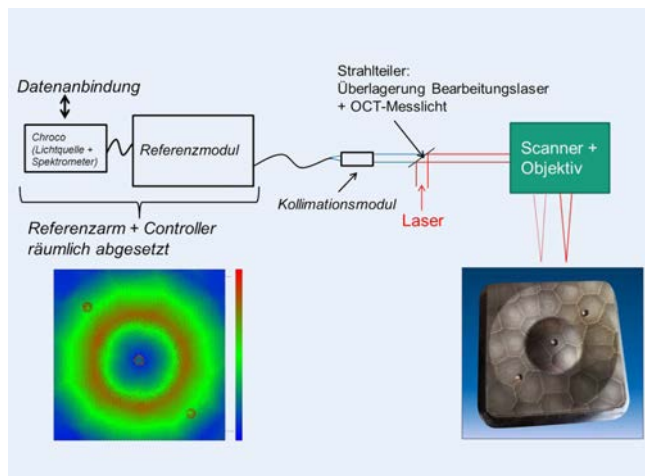


Bild 2. Darstellung des optischen Messaufbaus durch den Lasergravurkopf.
Bild: Acsys Lasertechnik

trische Einschränkungen am Laserbearbeitungskopf sowie keine Bauteil- oder Achsbewegungen zwischen den Gravur- und Messschritten.

Basierend auf den gesammelten Daten kann die Analyse der Oberflächentextur stattfinden. Diese ist Ausgangspunkt für die Defektdetektion und die spätere Textursynthese. Die Textur unterscheidet sich in ihrer Tiefe stark vom eigentlichen Spritzgusswerkzeug. Im Gegensatz zu dessen eher dreidimensional makroskopischen Form, welche sich auf Basisgeometrien, beispielsweise Quadern oder Kugeloberflächen [1] reduzieren lässt, kann die Textur eher als Mikrostruktur betrachtet werden und muss für die weitere digitale Datenverarbeitung von der Makrogeometrie getrennt werden. Während die Makrogeometrie für die spätere Berechnung der Bearbeitungsposition bei der Lasergravur oder der Werkzeugbahnvektoren beim späteren additiven Schweißprozess relevant ist, wird die Mikrostruktur anhand ihrer Strukturmerkmale und deren Anordnung an der Oberfläche analysiert. Diese Strukturmerkmale können geometrisch absolut identisch und künstlichen Ursprungs mit absolut periodischer Anordnung sein oder natürlich mit individuellen Merkmalen gewachsen und absolut zufällig angeordnet sein. Zudem existieren Mischformen. Klassische Beispiele sind Bienenwaben, Ziegelmauern, gewebte Stoffe oder Ledernarbenungen (**Bild 3**). Die am IOS entwickelte intelligente und selbstlernende Software bewertet die genannten Merkmale sowie deren Ausprägung und erkennt Abweichungen als möglichen Defekt. Bei der Reparatur des Werkzeugeinsatzes werden dann diese Merkmale im defekten Bereich in gleicher Form und Ausprägung wie im gesunden Bereich weitergeführt und in die Oberfläche integriert [2]. Ausgabegrößen sind also final die Defektgeometrie sowie die Zieltextur.

Nachdem die Defektgeometrie bekannt ist, kann eine entsprechende Tasche in die Werkzeugoberfläche graviert werden. Es wird ein Volumenmodell generiert, welches mithilfe eines „Slicers“ in einzelne Schichten zerlegt und nacheinander abgetragen wird. Die Schichtdicken sind abhängig von den verwendeten Laserparametern. Während beim Auskoffern und Planieren das Augenmerk auf maximalem Materialaustrag liegt, werden beim Texturieren deutlich sanftere und damit weniger produktive Laserparameter verwendet. Folglich kann eine deutlich glattere Oberfläche erzeugt werden. Hierfür und auch für die spätere Einbringung der Textur kommt ein klassischer ns-Faserlaser mit

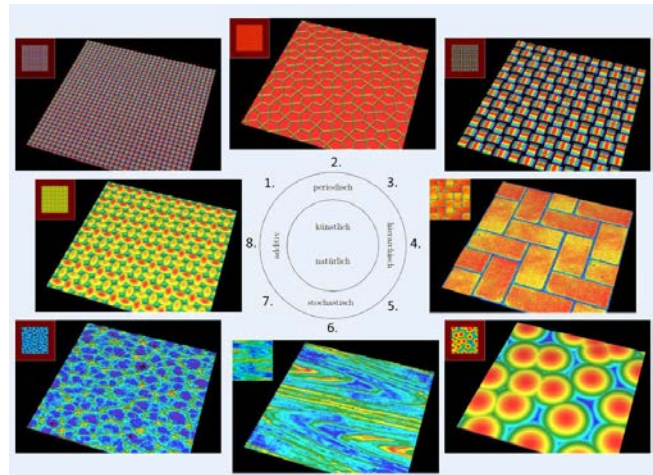


Bild 3. Kategorisierung unterschiedlicher Texturen. Bild: Acsys Lasertechnik

einer Leistung von 70 Watt zum Einsatz, welcher mittels Galvanometerscanner über das Material gelenkt wird. Während im Bereich der Gravur auf die jahrelange Erfahrung der Firma Acsys zurückgegriffen werden konnte, musste Acsys zusammen mit der Firma Euctect den kraftgeregelten Drahtvorschub, der für Lötunkte und Laserschweißungen in der Ebene entwickelt wurde, in die 3D-Fähigkeit überführen und den Laserschweißprozess im Raum etablieren. Um eine fehlerfreie Kraftmessung und gleichbleibende Schweißergebnisse auch auf gewölbten Oberflächen zu gewährleisten, wurde die Vorschubachse mit einem hochauflösenden Lagemesssystem und mit coggingarmen Lineardirektantrieben ausgestattet, der Drahtvorschub vom Drahtlager entkoppelt und eine zyklische Abtastung der Lage der Vorschubeinheit implementiert. Zur Steigerung der Dynamik und Sensitivität war es möglich, das SWF-Modul kompakter und leichter zu gestalten sowie die Ab-tastrate des Kraftsensors deutlich zu erhöhen. Des Weiteren konnte von Acsys ein Modul zur pulssynchronen Laserleistungsregelung entwickelt werden und damit der Wärmeeinfluss und die Spritzerbildung sowie die Schädigung und Umschmelzung der „gesunden“ Textur minimiert werden.

Zum Ende des Projektes wurden die entstandenen Baugruppen in einem Systemdemonstrator (**Bild 4**) zusammengeführt. Auf einem massiven Granitbett wurden die getrennten Prozesse Lasergravur zusammen mit der optischen Messtechnik und das additive Laserschweißen mit kraft geregelter Dünn Drahtzufuhr in einer 3D-fähigen Präzisionsanlage vereint. Da sich beide Laserprozesse sowohl in der Laserquelle als auch in den Bearbeitungsköpfen unterscheiden, wurden diese Systeme an getrennten Z-Achsen aufgehängt und können unabhängig voneinander über der Bauteiloberfläche positioniert und entlang der Bearbeitungsbahnen interpoliert werden. Alle Linear- und Drehachsen wurden mit hochauflösenden Lagemesssystemen ausgestattet und haben eine Positioniergenauigkeit von wenigen Mikrometern. Es können Werkzeugeinsätze mit einer Dimension von bis zu 400 x 400 x 300 mm³ und einem Gewicht von bis zu 500 kg bearbeitet werden.

Gesteuert wird die Anlage vom am IPT entwickelten „Calm“-Modul (Computer-aided Laser Manufacturing). Dieses besitzt eine Schnittstelle zur Messtechnik sowie zur Steuerung des Gravurlasers mit Bearbeitungskopf und zur CNC-Achssteuerung sowie zum Schweißlaser mit kraftgeregeltem SWF-Modul.



Bild 4. Anlagendemonstrator mit integrierter Messtechnik, Lasergravursystem, Laserschweißsystem und kraft geregelter Drahtvorschub.
Bild: Acsys Lasertechnik

Des Weiteren sind die Defektdetektionsalgorithmen, die Textursynthese und die Kinematik des Demonstrators implementiert. So ist es möglich, auf Basis der Werkzeuggeometrie und der gemessenen Oberfläche die zur Reparatur notwendigen Bahnvektoren zu berechnen und über die Achsen oder den Bearbeitungskopf auszugeben. Zur Sicherstellung der korrekten Abtragtiefe wurde

eine Prozessregelung entwickelt, die sich auf Basis der gemessenen Oberflächentopologie Prozessparameter anpasst [3]. Ebenso können zyklische Zwischenmessungen der abgetragenen Oberfläche durchgeführt werden und eventuelle Fehlabbträge durch Anpassung der Laser- oder Slicingparameter korrigiert werden. Softwareseitig können also alle Prozesseinzelschritte (**Bild 5**) abgebildet werden.

3 Fazit und Ausblick

Im Verbundprojekt ToolRep konnte das Konsortium nachweisen, dass die ganzheitlich laserbasierte Reparatur von texturierten Werkzeugeinsätzen in einem komplexen Anlagensystem in seinen einzelnen Prozessschritten abgebildet werden kann. Vor allem die Erzeugung einer neuen Textur in einem geschädigten Oberflächenbereich auf Basis der umgebenden Strukturen mittels intelligenter und selbstlernender Softwarealgorithmen sowie die maschinelle Einbringung in ein Werkzeug bietet in Zeiten von Fachkräftemangel und immer weniger werdenden händischen Prozessen ungeahnte Möglichkeiten. Auch die automatische Erzeugung bionisch funktionaler Oberflächen nach Vorbild „gescannter“ natürlicher Texturen sind denkbar. Die vollständige Automatisierung konnte im Rahmen der Laufzeit des geförderten Vorhabens noch nicht umgesetzt werden. Auf der Basis der vorhandenen Projektergebnisse arbeitet das Konsortium weiter an einer Steigerung der Zuverlässigkeit der gesamten Prozesskette. Hierfür sind umfangreiche Tests an unterschiedlichen Werkzeuggeometrien und Oberflächenstrukturen notwendig. Außerdem soll der Funktionsumfang der Anlage weiter erhöht werden. Weitere realistische Ziele sind zum Beispiel die zusammenhängende Texturierung großformatiger Werkzeugoberflächen oder die Reparatur polierter Werkzeuge. Hier sind aktuell noch Grenzen durch Übersteuerung des optischen Sensors gesetzt sowie die ansatzfreie Laserpolitur limitierend.

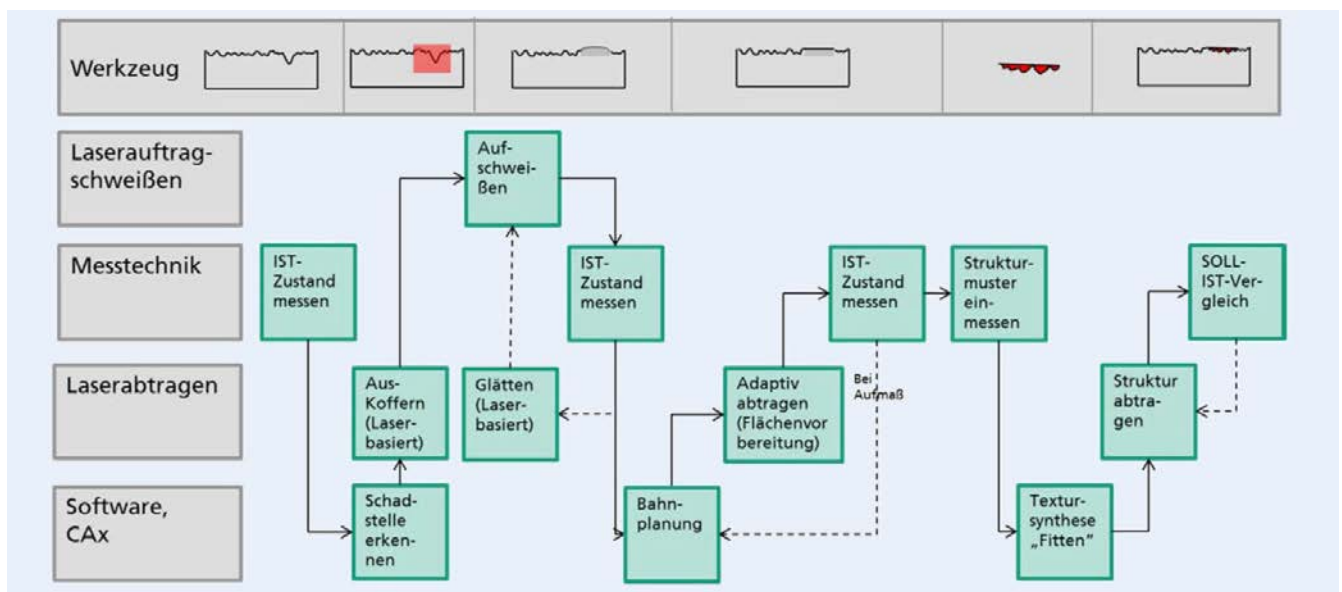


Bild 5. Struktureller Ablauf der automatisierten Werkzeugreparatur innerhalb der „Calm“-Software vom Fraunhofer IPT. Bild: Acsys Lasertechnik GmbH

DANKSAGUNG

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Programm „Innovationen für die Produktion, Dienstleistung und Arbeit von morgen“ (Förderkennzeichen 02P14A030 bis 02P14A035) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Literatur

- [1] Laube, P.; Franz, O.; Umlauf, G.: Evaluation of features for SVM-based classification of geometric primitives in point clouds, Machine Vision Applications (MVA), 2017 15th IAPR International Conference on: IEEE, pp. 59–62

- [2] Laube, P.; Grunwald, M.; Franz, O. et.al.: Image Inpainting for High-Resolution Textures using CNN Texture Synthesis, Computer Graphics and Visual Computing (CGVC), Swansea UK, Eurographics Association, 2018
- [3] Pothen, M.; Henrichs, O.: Integration of a Smart Measurement Device in the Laser Structuring Process Chain to Ensure High Quality; ICALEO Conference Proceedings; 2017

Dipl. Ing. (FH) **Christian Kreisel***Bild: Autor*

Acsys Lasertechnik GmbH
 Leipziger Str. 37, 09648 Mittweida
 Tel. +49 (0) 3727 / 996909-24
 c.kreisel@acsys.de
 www.acsys.de

Potenzial von SiC-Zwischenschichten zur Erhöhung des Co-Gehalts in Hartmetallwerkzeugen bis 12 wt%

CVD-Diamantwerkzeuge mit SiC-Zwischenschicht

E. Uhlmann, E. Barth, J. Gäbler, M. Höfer

Der Cobalt-(Co)-Anteil in Hartmetallen diffundiert während des Diamantbeschichtungsprozesses in die Diamantschicht und mindert deren Haftfähigkeit. Siliciumcarbid-(SiC)-Zwischenschichten können als Diffusionsbarriere für Cobalt dienen und die konventionelle Ätzbearbeitung der Substrate ersetzen. Im Rahmen einer Forschungsarbeit werden Beschichtungsprozesse mit SiC-Zwischenschicht entwickelt, diese Schichtsysteme auf verschiedene Substrate aufgebracht und durch Zerspanungsuntersuchungen bewertet.

STICHWÖRTER

Drehen, Beschichtungen, Werkzeuge

CVD-Diamond coated tools with SiC-interlayer

The cobalt (Co) content in cemented carbide tools diffuses into the diamond layer during the coating process and reduces its adhesive strength. Siliciumcarbid-(SiC)-interlayers can serve as a diffusion barrier for cobalt and replace the conventional etching pre-treatment of blanks. In a research project different coating processes with SiC-interlayer are developed, the coating systems are applied to different substrates and evaluated in cutting experiments.

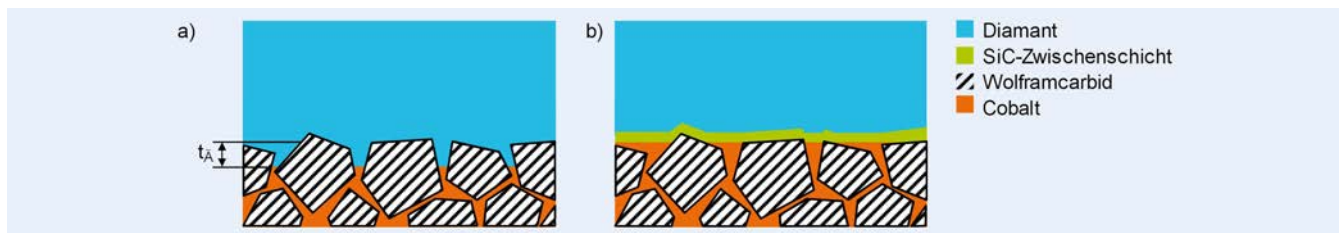


Bild 1. Schematische Querschnitte von verschiedenen Diamantbeschichtungssystemen auf Hartmetall; a) Cobalt aus der Randzone geätzt; b) mit SiC-Zwischenschicht als Diffusionsbarriere. Bild: Fraunhofer IST Braunschweig

1 Einleitung

Um die Lebensdauer von Zerspanungswerkzeugen auf Basis von Wolframcarbid-Cobalt-(WC-Co)-Hartmetallen zu erhöhen, werden diese für Anwendungen mit abrasiv wirkenden Werkstückstoffen mit Diamant beschichtet. Durch die Härte von Diamantschichten kann beispielsweise bei der Zerspanung von über-eutektischen Aluminium-Silizium-Legierungen der abrasive Verschleiß, welcher vorwiegend durch die Silicium-Partikel hervorgerufen wird, reduziert werden [1–4]. Während des Chemical-Vapor-Deposition-(CVD)-Beschichtungsprozesses bewirkt der Cobalt-Anteil im Substrat jedoch die Bildung von Graphit statt Diamant an der Grenzfläche, was eine drastisch reduzierte Schichthaftung zur Folge hat. Um der Bildung einer haftmindernden graphitischen Zwischenschicht entgegenzuwirken, wird Cobalt aus der Hartmetallrandzone nasschemisch herausgeätzt [1]. In **Bild 1 a** ist dieses Beschichtungssystem schematisch dargestellt. Ist die Tiefe der Ätzung t_A zu tief, hat dies eine Lockerung der WC-Partikel und damit eine Reduzierung der

Randzonenfestigkeit des Substrates zur Folge. Bei zu niedriger Ätztiefe t_A wird der Kontakt des Cobalts mit der Schichtbildungszone nicht ausreichend verhindert [1]. Zurzeit können daher nur Hartmetallsorten bis zu einem Cobalt-Gehalt von $w_{Co} > 10$ wt% industriell mit CVD-Diamant beschichtet werden. Höhere Cobalt-Gehalte sind allerdings wünschenswert, um zähere Hartmetallsorten einsetzen zu können.

Alternativ können SiC-Zwischenschichten als Diffusionsbarriere zwischen dem Hartmetall und der Diamantschicht wirken und somit den Graphitisierungsprozess verhindern [5–8]. Das **Bild 1 b** zeigt den Aufbau eines solchen Beschichtungssystems. Eine SiC-Zwischenschicht hat somit das Potenzial die ätztechnische Vorbehandlung zu ersetzen und Substrate mit Cobalt-Gehalten von $w_{Co} > 10$ wt% beschichtbar zu machen. Die technische Umsetzung wird dadurch begrenzt, dass CVD-Diamantbeschichtungsprozesse in der Regel bei Substrattemperaturen deutlich über $T_{Sub} \geq 700$ °C stattfinden, bei denen die zuvor aufgetragene SiC-Zwischenschicht in die mechanisch instabilen

Tabelle 1. Parameter der eingesetzten Beschichtungsprozesse

	Symbol	Einheit	SiC	Diamant 1	Diamant 2
Aktivierungsfläche	A	mm ²	265 * 252	595 * 990	595 * 990
Heizleistung	P	kW	4	37	25
Drahtanzahl	n _W	1	10	34	28
Drahtdurchmesser	d _W	mm	0,53	0,175	0,165
Drahttemperatur	T _W	°C	2000	2100	2060
Druck	p	hPa	5	20	20
Gasfluss H ₂	$\dot{V}_{H_2}$	sccm	1800	4000	4000
Gasfluss CH ₄	$\dot{V}_{CH_4}$	sccm	-	75	40
Gasfluss TMS	$\dot{V}_{TSM}$	sccm	200	-	-
Beschichtungszeit	t	h	2	66	290
Schichtdicke	h	µm	1	11	11
Substrattemperatur	T _{Sub}	°C	580	740	640

Phasen Cobaltsilicid (CoSi) und Dicobaltsilicid (Co₂Si) umgewandelt wird.

In der dem Beitrag zugrundeliegenden Forschungsarbeit werden verschiedene SiC-Diamant-Beschichtungssysteme entwickelt und die Leistungsfähigkeit mittels Zerspanungsversuchen mit der übereutektischen Aluminiumlegierung AlSi17Cu4Mg (AlSi17) bewertet. Damit eine Umwandlung der SiC-Zwischenschicht verhindert werden kann, ist ein Kern der Entwicklung die Reduzierung der Substrattemperatur T_{Sub} im Diamantbeschichtungsprozess. Um das Potenzial einer SiC-Zwischenschicht aufzuzeigen, werden verschiedene Hartmetalle mit unterschiedlichen Cobalt-Gehalt verwendet.

2 Entwicklung eines SiC-Diamant-Schichtsystems auf Hartmetallsubstraten

Die Erzeugung eines SiC-Diamant-Schichtsystems auf Hartmetall erfolgt in zwei Stufen. Zunächst wird die SiC-Zwischenschicht mit einem Hot-Filament-CVD-(HFCVD)-Beschichtungsprozess abgeschieden. Eine HFCVD-Laboranlage mit einer Aktivierungsfläche von A₁ = 265 mm² * 252 mm² und insgesamt n_W = 10 Aktivierungsdrähten aus Wolfram wird am Fraunhofer Institut für Schicht- und Oberflächentechnik (IST) eingesetzt. Die Abscheidung erfolgt aus einem Gasgemisch bestehend aus Wasserstoff (H₂) mit einem Gasfluss von $\dot{V}_{H_2}$ = 1800 sccm sowie Tetramethylsilan (TMS) mit $\dot{V}_{TSM}$ = 200 sccm bei einem Druck von p = 5 hPa. Die verwendeten Beschichtungsparameter richten sich nach dem von S. Erbas [9] entwickelten Prozess und sind in der vierten Spalte der **Tabelle 1** aufgelistet. Unter diesen Bedingungen wird nach einer Beschichtungszeit von t_{SiC} = 2 h die erforderliche SiC-Schicht mit einer Dicke von h_{SiC} ≈ 1 µm abgeschieden. Dabei kann eine maximale Substrattemperatur von T_{Sub} = 580 °C mit in die Hartmetallrohlinge eingeführten Thermoelementen gemessen werden.

In einem zweiten Schritt werden die Diamantschichten auf der SiC-Zwischenschicht mittels der von L. Schäfer et al. [10] beschriebenen Großflächen-HFCVD-Anlage abgeschieden. Der wesentliche Teilprozessschritt bei der HFCVD-Diamantabschei-

dung ist das Erzeugen von Wasserstoffatomen durch Dissoziation von Wasserstoffmolekülen an heißglühenden Oberflächen von Wolframdrähten bei Drahttemperaturen T_W > 2000 °C. Bei Versuchen mit einem Standard-Diamantbeschichtungsprozess mit n_W = 34 Aktivierungsdrähten mit einem Durchmesser von jeweils d_W = 0,5 mm und einer Heizleistung von P ≥ 80 kW sind Temperaturen am Substrat von T_{Sub} ≥ 980 °C gemessen worden. Diese liegen über der SiC-Reaktionstemperatur von T_{Rea, SiC} ≈ 700 °C bis 750 °C, weshalb sich das SiC-Diamant-schichtsystem nach dem Standard-Diamantbeschichtungsprozess vom Hartmetall ablöst. Um das Potenzial einer SiC-Zwischenschicht ausnutzen zu können, ist die Entwicklung angepasster Diamantabscheidungsprozesse mit signifikant reduzierten Substrattemperaturen notwendig.

Das Kernziel der Forschungsarbeit ist daher die Entwicklung von Niedertemperaturbeschichtungsprozessen für die HFCVD-Diamantbeschichtung, bei denen die Substrattemperaturen unterhalb von T_{Sub} ≤ 700 °C liegen und zugleich die erforderlichen Temperaturen an den Aktivierungsdrähten von T_W > 2000 °C erreicht werden. Dafür wird der Ansatz verfolgt, dass dünnere Querschnitte der Aktivierungsdrähte weniger Heizleistung P benötigen, um die erforderlichen Drahttemperaturen zu erreichen, wodurch weniger Wärme in das System eingebracht wird. Dazu werden die zwei HFCVD-Diamantbeschichtungsprozesse Diamant 1 und Diamant 2, welche sich in der Heizleistung P, den Drahtdurchmessern d_W, der Anzahl der Aktivierungsdrähte n_W sowie der Gaszusammensetzung unterscheiden, angewendet. In der Tabelle 1 sind in den Spalten fünf und sechs die Beschichtungsparameter aufgelistet.

Die Reduzierung der Heizleistung um ΔP_{Diamant1} = 43 kW beziehungsweise ΔP_{Diamant2} = 55 kW im Vergleich zum Standardprozess hat eine Reduzierung der Substrattemperaturen auf T_{Sub, Diamant1} = 740 °C beziehungsweise T_{Sub, Diamant2} = 640 °C zur Folge. Im Vergleich zum Standardprozess werden die Substrattemperaturen um ΔT_{Sub, Diamant1} = 240 °C beziehungsweise ΔT_{Sub, Diamant2} = 340 °C gesenkt. Der Prozess Diamant 2 generiert im Unterschied zu Diamant 1 Substrattemperaturen, welche deutlich unterhalb der Reaktionstemperatur von SiC liegen.

Durch die reduzierten Heizleistungen werden für die Abscheidung einer Diamantschichtdicke von $h = 11 \mu\text{m}$ Beschichtungszeiten von circa $t_{\text{Diamant1}} \approx 66 \text{ h}$ beziehungsweise $t_{\text{Diamant2}} \approx 290 \text{ h}$ benötigt. Bei beiden Prozessen entsteht eine mikrokristalline Morphologie der Diamantschicht mit hoher Phasenreinheit, wie im **Bild 2** gezeigt.

3 Zerspanungsuntersuchungen mit dem entwickelten Beschichtungssystem

3.1 Versuchsaufbau

Um die Wirksamkeit einer SiC-Zwischenschicht zu qualifizieren, werden Hartmetallwerkzeuge mit SiC-Diamant-Schichtsystemen sowie konventioneller Ätzbearbeitung mit anschließender Diamantbeschichtung in der ISO-Geometrie SPUN120308 angefertigt und in Zerspanungsversuchen untersucht. Zur Erzeugung der Diamantschichten sowohl auf SiC als auch auf dem geätzten Hartmetall werden die beiden zuvor beschriebenen HFCVD-Diamantbeschichtungsprozesse Diamant 1 und Diamant 2 eingesetzt. Das Erzeugen der SiC-Zwischenschicht erfolgt nach dem in Kapitel 2 beschriebenen Verfahren. Die Hartmetalle EMT100, EMT210 und EMT612 der Firma Extramet AG aus Plaffeien in der Schweiz, mit den dazugehörigen Cobalt-Gehalten von $w_{\text{Co,EMT100}} = 6 \text{ wt\%}$, $w_{\text{Co,EMT210}} = 10 \text{ wt\%}$ und $w_{\text{Co,EMT612}} = 12 \text{ wt\%}$ werden als Substrat verwendet. Wesentliche Eigenschaften der verwendeten Hartmetallsorten sind in der **Tabelle 2** zusammengefasst. Die übereutektische Aluminiumlegierung AlSi17Cu4Mg (AlSi17) wird mit einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 200 \text{ m/min}$, einem Vorschub von $f = 0,05 \text{ mm}$ und einer Schnitttiefe von $a_p = 0,20 \text{ mm}$ in einem trockenen Drehprozess bearbeitet. Als Standzeitkriterium wird eine maximale Verschleißmarkenbreite von $VB_{\text{max}} = 0,3 \text{ mm}$ sowie eine maximale Bearbeitungszeit von $t_{c,\text{max}} = 900 \text{ s}$ definiert. Zur statistischen Absicherung werden pro Variante drei Wiederholungsversuche durchgeführt.

3.2 Zerspanungsergebnisse für Diamantbeschichtungsprozess Diamant 1

Bild 3 a zeigt die erzielten Standzeiten t_c der Werkzeuge mit SiC-Zwischenschicht im Vergleich zu Werkzeugen mit konventioneller Ätzbearbeitung ohne Zwischenschicht, bei denen die Diamantschichten mit dem Prozess Diamant 1 hergestellt sind. Im Diagramm veranschaulichen die Balken die Mittelwerte der Standzeiten $t_{c,\text{Mittel}}$ und die Fehlerbalken repräsentieren die minimalen $t_{c,\text{Min}}$ beziehungsweise maximalen $t_{c,\text{Max}}$ Standzeiten. Im **Bild 3** und den folgenden Bildern sind die Werkzeuge mit SiC-Zwischenschicht als SiC-Diamantbeschichtung und die konventionell geätzten Werkzeuge ohne SiC-Zwischenschicht als Diamantbeschichtung gekennzeichnet.

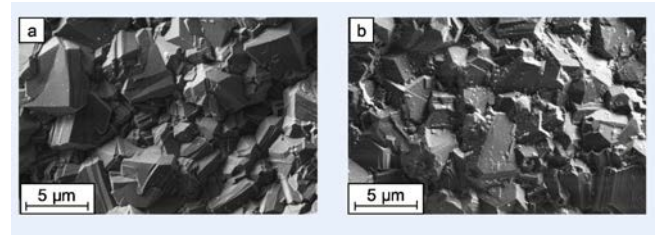


Bild 2. Morphologie von zwei abgeschiedenen Diamantschichtvarianten aufgenommen mit einem Rasterelektronenmikroskop; a) Diamant 1; b) Diamant 2. Bild: IFW, TU Berlin

Die SiC-diamantbeschichteten Werkzeuge können im Mittel die Standzeiten der konventionell geätzten und diamantbeschichteten Werkzeuge bei keinem der verwendeten Hartmetallen erreichen. Mit $t_{c,\text{Mittel}} = 860 \text{ s}$ erreicht die Diamantbeschichtung ohne SiC-Zwischenschicht auf dem Substrat EMT100 die höchste mittlere Standzeit. Bei den Werkzeugen mit SiC-Zwischenschichten auf EMT100 hat ein Werkzeug das definierte Standzeitkriterium von $t_{c,\text{max}} = 900 \text{ s}$ erreicht. Aufgrund der zum Teil deutlich verkürzten Standzeiten einzelner Werkzeuge dieser Spezifikation ist die Prozesssicherheit jedoch insgesamt nicht gegeben. Die Werkzeuge mit SiC-Zwischenschicht auf EMT100 erreichen eine mittlere Standzeit von $t_{c,\text{Mittel}} = 590 \text{ s}$. Mit zunehmenden Cobalt-Gehalt nehmen die mittleren Standzeiten deutlich ab. Bei $w_{\text{Co,EMT612}} = 12 \text{ wt\%}$ liegen die mittleren Standzeiten der Werkzeuge ohne SiC-Zwischenschicht bei $t_{c,\text{Mittel}} = 170 \text{ s}$ und bei denen mit SiC-Zwischenschicht nur noch bei $t_{c,\text{Mittel}} = 30 \text{ s}$. Die Schwankung der Standzeiten der konventionell geätzten und diamantbeschichteten Werkzeuge ist ab einem Cobalt-Gehalt von $w_{\text{Co,EMT210}} = 10 \text{ wt\%}$ deutlich erhöht.

Im **Bild 4** sind die Werkzeuge mit den jeweils kürzesten Standzeiten $t_{c,\text{Min}}$ für jede Spezifikation des Diamantbeschichtungsprozesses Diamant 1 nach den Zerspanungsuntersuchungen dargestellt. Anhand von Mikroskopaufnahmen mit dem Digitalmikroskop „VHX 5000“ der Firma Keyence, Osaka/Japan, können Verschleißmerkmale identifiziert werden. Abplatzungen der Beschichtung sind durch Farbveränderungen und den scharfen Kanten auf Frei- und Spanfläche erkennbar. Bei dem Hartmetall EMT100 mit dem Cobalt-Gehalt von $w_{\text{Co,EMT100}} = 6 \text{ wt\%}$ ist die Charakteristik der Abplatzungen des SiC-diamantbeschichteten Werkzeugs mit den konventionell geätzten und diamantbeschichteten Werkzeugen vergleichbar, wenn auch geringfügig großflächiger. Mit zunehmenden Cobalt-Gehalt werden die Flächen der Abplatzungen der konventionell geätzten und diamantbeschichteten Werkzeuge größer. Für EMT210 und EMT612 traten großflächige Abplatzungen auf den Freiflächen der SiC-diamantbeschichteten Werkzeuge auf. Zu den Werkzeugen

Tabelle 2. Eigenschaften der verwendeten Hartmetallsorten (Extramet)

	Cobaltgehalt w_{Co}	Korngröße d_k	Dichte ISO 3369	Härte ISO 3878	Biegefestigkeit σ_{BB}	Oberflächenrauheit Ra
Hartmetall	wt%	μm	g/cm^3	HV 30	N/mm^2	μm
EMT 100	6	> 0,5 ... 0,8	14,80	1790	3900	0,94
EMT 210	10	> 0,5 ... 0,8	14,45	1600	4300	1,10
EMT 612	12	> 0,2 ... 0,5	14,10	1720	4200	1,21

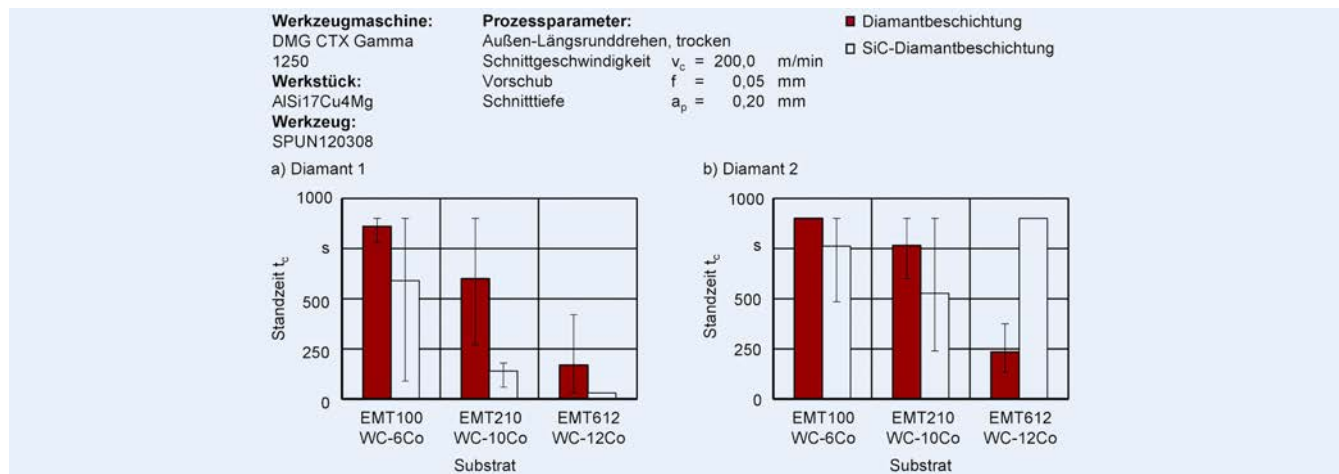


Bild 3. Erzielte Standzeiten für konventionell geätzte und diamantbeschichtete Werkzeuge sowie SiC-diamantbeschichtete Werkzeuge; a) Diamantabscheidungsprozess Diamant 1; b) Diamantabscheidungsprozess Diamant 2. Bild: IFW, TU Berlin

ohne SiC-Zwischenschicht ist bei den freigelegten Flächen ein Farbunterschied zu erkennen.

3.3 Zerspanungsergebnisse für Diamantbeschichtungsprozess Diamant 2

Die erzielten Standzeiten der Werkzeuge des zweiten Diamantbeschichtungsprozesses Diamant 2 sind im Bild 3 b dargestellt. Sowohl bei den konventionell als auch bei den mit SiC-Zwischenschichten beschichteten Werkzeugen können Verbesserungen im Vergleich zu Diamant 1 im Hinblick auf Standzeiten und Prozesssicherheiten erzielt werden. Alle rein diamantbeschichteten Werkzeuge auf EMT100 erreichen die maximale Bearbeitungszeit. Äquivalent zu Diamant 1 nehmen die Standzeiten von geätzten Hartmetallen mit steigendem Cobalt-Gehalt ab. Die mittlere Standzeiten $t_{c,Mittel}$ der SiC-diamantbeschichteten Hartmetalle verbessern sich für EMT100 auf $t_{c,Mittel} = 762$ s und für EMT210 auf $t_{c,Mittel} = 527$ s. Hervorzuheben sind die mit SiC-Zwischenschichten beschichteten Werkzeuge der Hartmetallsorte EMT612 mit einem Cobalt-Gehalt von $w_{Co} = 12$ wt%. Alle getesteten Werkzeuge dieser Spezifikation erreichen das definierte Standzeitkriterium von $t_{c,max} = 900$ s. Bei dieser Hartmetallsorte sind die SiC-diamantbeschichteten Werkzeuge den konventionell geätzten und diamantbeschichteten Werkzeugen trotz des erhöhten Cobalt-Gehaltes im Mittel um $t_{c,Mittel} = 665$ s überlegen.

Die Mikroskopaufnahmen aus **Bild 5** veranschaulichen den Verschleiß der Werkzeuge in den jeweiligen Spezifikationen des Diamantbeschichtungsprozesses Diamant 2 mit den kürzesten Standzeiten, soweit es frühzeitige Werkzeugausfälle gab. Im Unterschied zu den Aufnahmen von Bild 4 sind Abplatzungen für die Hartmetallsorten EMT210 und EMT612 deutlich kleinflächiger. Auf dem dargestellten Werkzeug auf EMT612 mit SiC-Zwischenschicht sind in der gewählten Vergrößerung keine Verschleißmarken erkennbar.

4 Diskussion und Ausblick

Die Standzeiten und Prozesssicherheiten der Werkzeuge mit SiC-Zwischenschicht aus dem Beschichtungsprozess Diamant 1, bei welchem Substrattemperaturen von $T_{Sub,Diamant1} = 740$ °C ge-

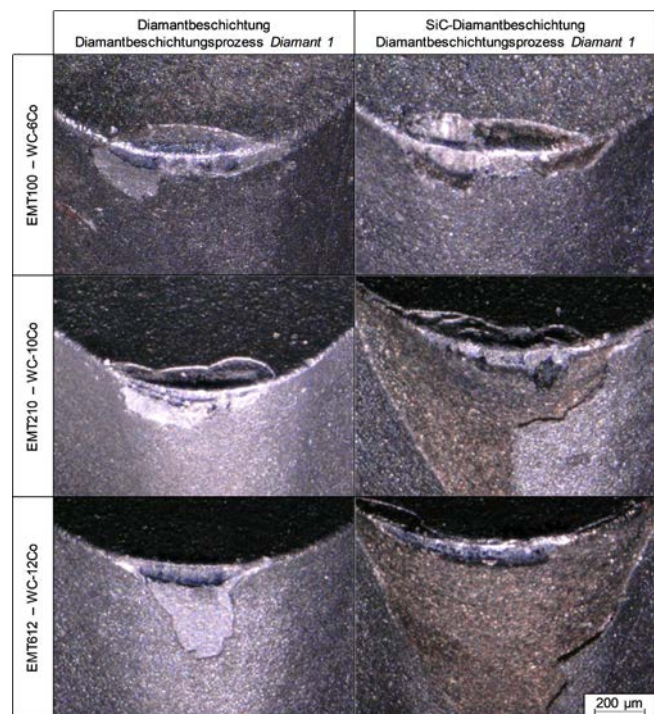


Bild 4. Mikroskopaufnahmen der Werkzeuge des Diamantbeschichtungsprozesses Diamant 1 mit den kürzesten Standzeiten für die drei eingesetzten Hartmetalle. Bild: IFW, TU Berlin

messen werden, sind deutlich niedriger als die von konventionell geätzten Hartmetallwerkzeugen und nehmen mit zunehmenden Cobalt-Gehalt kontinuierlich ab. Offensichtlich wird die eingesetzte SiC-Zwischenschicht bei diesen Substrattemperaturen in Silicide umgewandelt und ist nicht mehr stabil. Im Vergleich dazu wirken die SiC-Zwischenschichten beim Beschichtungsprozess Diamant 2, bei dem die Substrattemperaturen um weitere 100 °C auf $T_{Sub,Diamant2} = 640$ °C gesenkt sind, als effizientere Co-Diffusionsbarriere und verhelfen dem Schichtsystem zu höheren Standzeiten. Die höchste mittlere Standzeit und Prozesssicherheit im Zerspanstest zeigt sogar das SiC-Diamant-Schichtsystem auf dem Hartmetall EMT612 mit dem höchsten Cobalt-Gehalt von $w_{Co,EMT612} = 12$ wt%. Bei ausreichend niedrigen Substrattem-

peraturen sind mit der SiC-Zwischenschicht somit Hartmetallklassen beschichtbar, die für die konventionelle chemische Ätzung bisher nicht möglich sind.

Für die Diamantbeschichtung mit dem Diamantbeschichtungsprozess Diamant 2 ist momentan noch eine Beschichtungszeit von $t_{\text{Diamant 2}} = 290 \text{ h}$ anstatt $t_{\text{Diamant 1}} = 66 \text{ h}$ für Diamant 1 erforderlich. Durch die reduzierte Beschichtungsrate ist die Wirtschaftlichkeit der Prozessvariante Diamant 2 trotz der gesteigerten Standzeiten für viele Anwendungen noch nicht gegeben. Zur genauen Abschätzung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses müssen weiterführende Untersuchungen durchgeführt werden. Um ausgehend vom Prozess Diamant 2 die Beschichtungsrate signifikant zu erhöhen, wird in weiteren Arbeiten der Ansatz verfolgt, die Substrate aktiv zu kühlen und so die Oberflächentemperatur der Aktivierungsdrähte T_w und damit die Aktivierung der Gasphase bei gleichbleibender Substrattemperatur T_{Sub} wieder erhöhen zu können.

Die durchgeführten Untersuchungen untermauern das hohe Potenzial einer SiC-Zwischenschicht auf Hartmetallen mit Cobalt-Gehalten von bis zu $w_{\text{Co}} = 12 \text{ wt\%}$. Besonders bei wechselnden Beanspruchungen, wie zum Beispiel in einem Fräsprozess, ist die erhöhte Duktilität der hochcobalthaltigen Hartmetalle vorteilhaft. Zukünftige Arbeiten fokussieren sich daher auf die Analyse von Fräsprozessen.

DANKSAGUNG

Die Autoren bedanken sich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung im Projekt „Diamant-Siliciumcarbid-Schichtsysteme für Zerspanungswerkzeuge“ (UH 100/1333 / GA 1517/2-3), welche die dem Beitrag zugrundeliegende Forschungsarbeit ermöglicht hat.

Literatur

- [1] Sammler, F.: Steigerung der Nutzungspotenziale von CVD-diamantbeschichteten Werkzeugen. Technische Universität Berlin, Dissertation, Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2015
- [2] Santos Jr., M. C.; Machado, AR.; Wisley, F. et al.: Machining of aluminum alloys: a review. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Stand: 2012. Internet: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00170-016-8431-9>. Zugriff am 13. November 2019
- [3] Uhlmann, E.; Flögel, K.; Sammler, F. et al.: Machining of hypereutectic Aluminum Silicon Alloys. Procedia CIRP 14 (2014), S. 223–228
- [4] Hinzmann, D.; Uhlmann, E.: Einsatzverhalten von CVD-Diamantdünnschichtwerkzeugen – Einfluss des Hartmetallsubstrats auf die Zerspanung einer übereutektischen Aluminiumsiliziumlegierung. wt Werkstattstechnik online 7/8 (2019), S. 563–569
- [5] Cabral, G.; Gäbler, J.; Lindner, J.; Grácio, J.; Polini, R.: A study of diamond film deposition on WC-Co inserts for graphite machining: Effectiveness of SiC interlayers prepared by HFCVD. Diamond & Related Materials (2008) 17, S. 1008–1014
- [6] Wang, T.; Xiang, L.; Shi, W.; Jiang, X.: Deposition of diamond/ β -SiC/cobalt silicide composite interlayers to improve adhesion of diamond coating on WC-Co substrates by DC-Plasma Assisted HFCVD. Surface and Coatings Technology 205 (2011) 8–9, S. 3027–3034
- [7] Wang, G.; Lu, X.; Ding, M.; Liu, Y.; Tang, W.; Zhang, B.: Diamond coatings deposited on cemented carbide substrates with SiC as interlayers: Preparation and erosion resistance tests. Diamond and Related Materials 73 (2017), S. 105–113

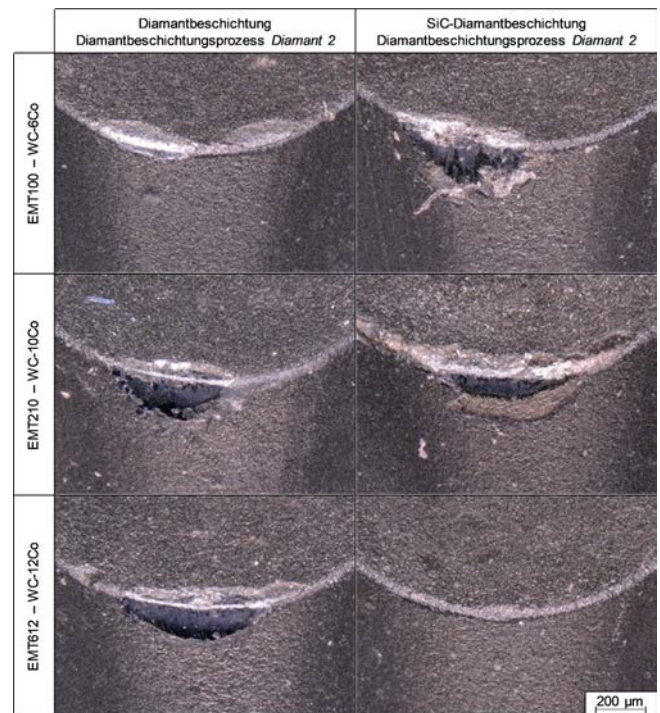


Bild 5. Mikroskopaufnahmen der Werkzeuge des Beschichtungsprozesses Diamant 2 mit den kürzesten Standzeiten innerhalb der jeweiligen Spezifikation nach den Zerspanungsversuchen. Bild: IFW, TU Berlin

- [8] Ren, Y.; Yu, X.; Liu, F.; Wang, Y.-H.: Low-temperature β -SiC interlayer for diamond film on cemented carbide. Surface Engineering 35 (2019) 6, S. 483–490
- [9] Erbas, S.: The development of 3C-SiC interlayers for diamond deposition on cemented carbide cutting tools. Berichte aus Forschung und Entwicklung IST. Dissertation, Technische Universität Braunschweig. Stuttgart: Fraunhofer IRB, 2014
- [10] Schäfer, L.; Höfer, M.; Kröger, R.: The versatility of hot-filament activated chemical vapor deposition. Thin Solid Films 515 (2006) 3, S. 1017–1024



Univ.-Prof. Dr. h. c. Dr.-Ing. **Eckart Uhlmann**,
Bild: Fraunhofer IPK

Enrico Barth, M.Sc.

Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb (IWf), Technische Universität Berlin
Pascalstr. 8–9, 10587 Berlin
Tel. +49 (0)30 / 314-23568
enrico.barth@iwf.tu-berlin.de
www.iwf.tu-berlin.de

Dr.-Ing. **Jan Gäbler**,
Dr. rer. nat. **Markus Höfer**

Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik (IST)
Bienroder Weg 54 e
38108 Braunschweig
Tel. +49 (0)531 / 2155-625
jan.gaebler@ist.fraunhofer.de
www.ist.fraunhofer.de

Alternativer Schneidstoff in der Drehbearbeitung

Niobcarbid statt Wolframcarbid

K. Kropidlowski, E. Uhlmann, M. Woydt, G. Theiler, T. Gradt

Als mögliche Substitution des konventionellen Hartmetalls Wolframcarbid (WC), wird Niobcarbid (NbC) für den Einsatz in Zerspanwerkzeugen getestet. Es werden verschiedene NbC-Spezifikationen verwendet, die sich in der chemischen Zusammensetzung und den mechanischen Eigenschaften unterscheiden. Trockene Außenrunddrehversuche an Kohlenstoffstahl C45E, Zahnradstahl 42CrMo4+QT und der Aluminiumlegierung AlSi9Cu4Mg werden durchgeführt, um verschiedene NbC-Schneidstoffe mit handelsüblichen WC-Werkzeugen zu vergleichen. Um die Auswirkung einer höheren thermomechanischen Belastung während der Bearbeitung aufzuzeigen, wird die Schnittgeschwindigkeit variiert. Die Zerspanungsleistung aller untersuchten Versuchswerkstoffe wird hinsichtlich Spanvolumen V_w , Kolkverschleiß KT sowie der erreichbaren Oberflächenrauheit Ra und Rz des Werkstücks beurteilt. Im Rahmen der Untersuchungen wird bei erhöhten Schnittgeschwindigkeiten v_c eine verbesserte Werkzeugleistung der verschiedenen NbC-Schneidwerkzeuge im Vergleich zum WC-Referenzmaterial aufgezeigt. Der Vergleich der Oberflächenqualität der Werkstoffe nach der Zerspanung zeigt, dass NbC, trotz sporadisch höherer Verschleißraten, vergleichbare Oberflächenqualitäten liefert. Die prototypischen NbC-Schneidstoffe erreichen bei der Zerspanung von C45E ein höheres Spanvolumen V_w als das WC-Referenzsubstrat. Für die Bearbeitung von 42CrMo4+QT und AlSi9Cu4Mg sind Weiterentwicklungen notwendig, um höhere Standzeiten zu erzielen.

STICHWÖRTER

Drehen, Entwicklung, Schneidstoffe

1 Einleitung

Schneidstoffe auf der Basis von Wolframcarbid (WC) dominieren derzeit den Markt für Hartmetallwerkzeuge. Nach jahrelanger Entwicklung und Verbesserung des Werkzeugmaterials gilt WC mit Kobaltbinder (WC-Co) als Stand der Technik in einem breiten Anwendungsspektrum. Im Vergleich zu Schnellarbeitsstahl (HSS) können WC-Werkzeuge die Bearbeitungsprozesse in der industriellen Produktion durch höhere Schnittgeschwindigkeiten v_c und eine höhere Effizienz verbessern. Darüber hinaus kann eine bessere Verschleißfestigkeit durch Werkzeugbeschichtungen zu höheren Standzeiten der WC-Werkzeuge führen [1].

Da rund 80 % des Rohstoffs Wolfram in China abgebaut werden, ist der globale Konsum stark von der chinesischen Wirtschaftspolitik abhängig, was zu volatilen Preisentwicklungen führt [2]. Bisher wurde Kobalt (Co) im Rahmen des europäischen Pro-

Niobium carbide (NbC) instead of tungsten carbide (WC). Potential as an alternative cutting material in turning of C45E, 42CrMo4+QT and AlSi9Cu4Mg

In order to investigate a possible substitution of the conventional substrate material tungsten carbide (WC), niobium carbide (NbC) is tested for the use as a cutting tool in turning processes. Different straight NbC materials are applied, differing in chemical composition and mechanical properties. Dry external cylindrical turning tests on carbon steel C45E, gear steel 42CrMo4+QT and aluminium alloy AlSi9Cu4Mg are carried out comparing various NbC based cutting materials with commercially available WC-based tools. Cutting speed is varied to show the impact of higher thermomechanical load during machining. The cutting performance of all investigated cutting tool materials is assessed regarding material removal V_w , crater wear KT as well as surface roughness Ra und Rz of the workpiece. Improved tool performance of different NbC cutting tool grades compared to commonly applied WC tool material at increased cutting speeds v_c is demonstrated within the investigation. The comparison of the surface quality of the workpiece materials after the cutting process shows that NbC produces comparable surface qualities despite occasional higher wear rates. Prototypical NbC cutting materials achieve a higher material removal V_w during the machining of C45E than the WC reference substrate. For the machining of 42CrMo4+QT and AlSi9Cu4Mg, further developments are necessary to achieve longer tool life.

gramms „Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (Reach)“ als sehr giftig für die menschliche Gesundheit eingestuft. In-vitro-Studien des U.S. National Toxicology Program (NTP) besagen, dass WC- und Co-Staub in Kombination toxischer sind als reines Co und WC selbst [3]. Vor allem in den letzten Jahren hat dies zusammen mit den Rohstoffpreisen die Forschungsaktivitäten intensiviert, um eine Alternative für WC-Co zu finden. Als leistungsfähiger Schneidstoff in Zerspanprozessen bieten sich Alternativen auf der Basis von Niobcarbid (NbC) an [4–6].

Für Schneidwerkzeuganwendungen zeigt NbC vielversprechende Materialeigenschaften (Tabelle 1). Neben dem Potenzial als Schneidstoff zeigt die biotechnologische Klassifizierung die Vielfalt für andere Anwendungen. Die Preise für NbC-Produkte haben in den letzten Jahren einen langsamen Abwärtstrend gezeigt, der sich in Zukunft mit zunehmendem Wettbewerb um

Tabelle 1. Vergleich der Materialeigenschaften von WC und NbC [8].

Eigenschaft	WC	NbC	Auswirkung
Dichte ρ [g/cm ³]	15,63	7,78	Reduzierung von Zentrifugalkräften bei rotierenden und dynamischen Werkzeugen
Schmelzpunkt T_m [°C]	2870	3520	Höhere thermische Stabilität der Schneide
Oxidschicht	WO ₃	Nb ₂ O ₅	Keine Sublimation von tribochemisch stabilem Nb ₂ O ₅ mit hohem Schmelzpunkt bei $T_{m,Nb_2O_5} = 1522$ °C Sublimation von WO ₃ bei circa $T_{m,WO_3} \approx 700$ °C
Wärmeleitfähigkeit λ [W/m·K]	84	14	Geringeres Aufheizen von NbC während der Zerspanung führt zu einem geringeren thermisch induzierten Verschleiß
Mikrohärte [GPa]	20 – 28	15 – 20	Höhere Warmhärte von NbC bei erhöhten Temperaturen ab circa $T_H \approx 900$ °C
Löslichkeit in festem Nickel, Kobalt und Eisen bei $T = 1250$ °C [Gew.-%]	12 22 7	3 5 1	Reduzierung von chemischem (Kolk-)Verschleiß bei der Bearbeitung von Werkstoffen mit den Legierungselementen Nickel, Kobalt, Eisen

Tabelle 2. Eigenschaften der verwendeten WC- und NbC-basierten Schneidstoffe.

Eigenschaften	Sinterprozess	Sintertemperatur TS [°C]	Bruchzähigkeit KIC [MPa√m]	Biegefestigkeit σ_{4pb} [MPa]	Mikrohärte
Temperatur T [°C]			RT	RT	RT
Methode			ISO 28079 HV30	DIN EN 843-1	EN ISO 6507-1 HV10 HV30
WC-6Co	Sinter-HIP	N/A	9,29 ± 0,15	N/A	1.844 ± 88 1.829 ± 69
NbC _{0,88} -12Co H1	SPS	1.285 (6 min, 30 MPa)	5,78 ± 0,12	1.005 ± 158	1.532 ± 5 1.499 ± 16
NbC _{1,0} -12Ni5VC S3	CS	1.420 (1 h, Vakuum)	11,7 ± 0,5	1.176 ± 102	1.207 ± 18 1.197 ± 30
NbC _{1,0} -12Ni4Mo-4VC S3	CS	1.420 (1 h, Vakuum)	10,03 ± 0,1	1.00 ± 220	1.299 ± 81 1.280 ± 5
NbC _{1,0} -12Ni4Mo ₂ C-4VC S3	CS	1.480 (1 h, Vakuum)	9,78	1.103 ± 242	1.297 ± 8 1.276 ± 9
(NbC _{1,0} -10TiC)-6Ni7,5VC S3	CS	1.420 (1 h, Vakuum)	7,58 ± 0,15	626 ± 105	1.450 ± 50 1.360 ± 30
(NbC _{1,0} -15TiC)-5Ni7,5WC-2,5Mo ₂ C S8	CS	1.450 (90 min, Vakuum)	6,6 ± 0,1	1.222	1.622 ± 30 1.616 ± 20

einen potenziellen Marktanteil bei Schneidstoffen fortsetzen dürfte.

Da Hartmetallwerkzeuge in der industriellen Anwendung hauptsächlich mit Werkzeugbeschichtungen eingesetzt werden, gibt es bereits Studien zur Beschichtung von NbC [7]. In der vorliegenden Untersuchung wird jedoch der Fokus auf die grundlegenden Wechselwirkungen zwischen Werkzeug und Werkstück gelegt, so dass alle Werkzeuge im unbeschichteten Zustand eingesetzt werden.

Schneidstoffe müssen im Allgemeinen geeignete mechanische und thermische Eigenschaften aufweisen, um den dynamischen, mechanischen sowie thermischen Belastungen bei der Bearbeitung standhalten zu können. Aufgrund des im Vergleich zu WC höheren Schmelzpunktes und der geringeren Löslichkeit von binderlosem NbC in festem Chrom (Cr), Nickel (Ni), Co oder Eisen (Fe) weist NbC ausgezeichnete Eigenschaften als Werk-

zeugssubstrat auf. Es wird erwartet, dass diese Vorteile eine reduzierte Neigung zu Adhäsions- und Diffusionsverschleiß bewirken, was sich auf die Lebensdauer des Schneidwerkzeugs und die Prozessstabilität auswirkt [8, 9]. Darüber hinaus wurde in früheren Arbeiten über eine geringere Verschleißrate durch Reibung bei höheren Drehzahlen und eine höhere Warmhärte bei Temperaturen $T > 800$ °C bei unterstöchiometrischem und stöchiometrischem NbC im Vergleich zu WC-6Co berichtet [10, 11]. Daher verfügt NbC über Eigenschaften, die zu einer verbesserten Bearbeitung von Fe-basierten Materialien führen sollten.

2 Schneidstoffe

Die bei den Zerspanversuchen verwendeten NbC-Werkzeuge wurden von der Katholieke Universiteit Leuven, Belgien, im Labormaßstab hergestellt. Die häufig in Zerspanprozessen einge-

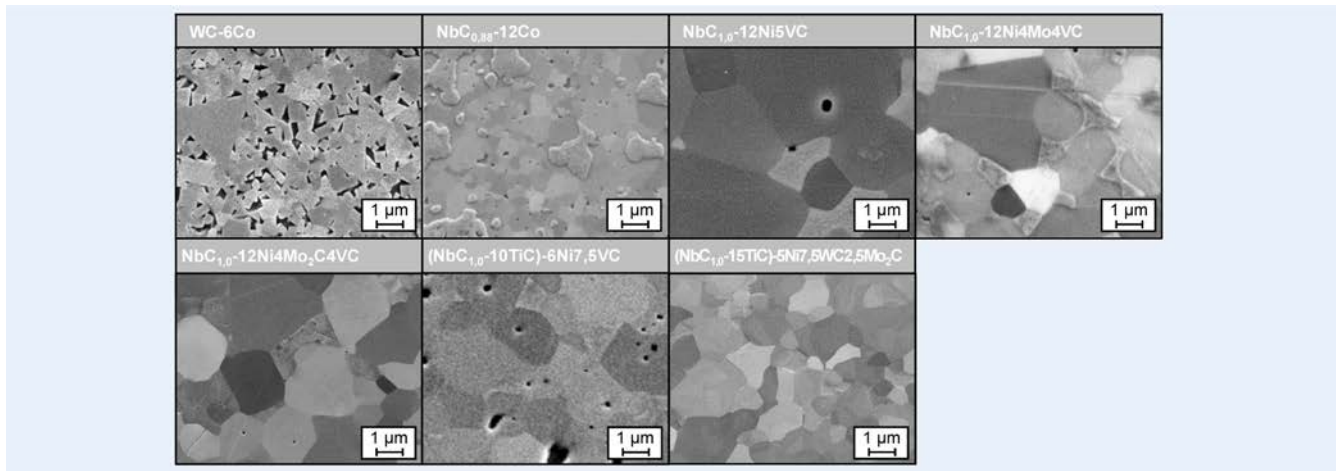


Bild 1. Mikrostruktur der WC- und NbC-basierten Schneidstoffe. Bild: BAM

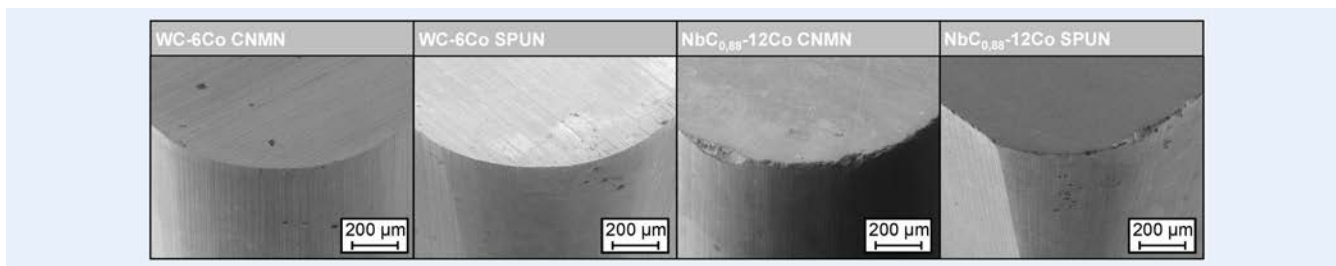


Bild 2. Vergleich der Ausgangsqualität der Schneidkanten von WC-6Co und NbC_{0,88}-12Co. Bild: IWF

setzten WC-Werkzeuge mit einem Co-Bindergehalt $w_{WC} = 6\%$ der Extramet AG, Plaffeien/Schweiz, bezeichnet als WC-6Co (Feinstkorn), wurden als industrielle Referenz für NbC eingesetzt. Aufgrund der um 50 % geringeren Dichte von NbC enthält WC-6Co einen gleichen Volumenanteil an Binder wie NbC mit einem Bindergehalt von $w_{NbC} = 12\%$.

Das Co-gebundene und unterstöchiometrische NbC_{0,88} wurde durch Spark Plasma Sintern (SPS) mit einer anfänglichen Primärkorngröße von $d_{NbC_{0,88}} = 150\text{ nm}$ (H1) hergestellt. Um toxisches Co zu ersetzen, kam zusätzlich NbC mit Ni-Binder zum Einsatz. Für den Herstellungsprozess des Ni-gebundenen NbC mit Vanadiumcarbid (VC) wurde stöchiometrisches NbC_{1,0}-Pulver mit einer anfänglichen Primärkorngröße von $d_{NbC_{1,0},VC} = 350\text{ nm}$ (S3) mittels konventionellem Sinter (CS) verarbeitet.

(NbC_{1,0}-15TiC)-5Ni_{7,5}WC_{2,5}Mo₂C wurde unter Verwendung von stöchiometrischem NbC_{1,0}-Pulvermaterial mit einer anfänglichen primären Korngröße von $d_{NbC_{1,0},15TiC} = 300\text{ nm}$ (S8) im CS-Prozess hergestellt. WC-basierte Referenzwerkzeuge werden durch heißisostatisches Pressen (HIP) unter industriellen Bedingungen hergestellt. Details zu den Sinterbedingungen und Materialeigenschaften der verwendeten Schneidstoffe sind in **Tabelle 2** dargestellt.

Die Mikrostrukturen der einzelnen Werkzeugschubstrats sind in **Bild 1** dargestellt. Es zeigt sich, dass die Korngrößen der prototypischen NbC-Schneidstoffe je nach Sinterprozess und Sekundärkarbiden variieren und das Feinstkornniveau von WC nicht erreichen. Die auf NbC basierenden Schneidstoffe weisen darüber hinaus gelegentlich Lunker auf. Die Homogenität kann beispielsweise durch eine gleichmäßigere Verteilung des Binders verbes-

sert werden. Die festgestellten Defekte der prototypischen NbC-Zusammensetzungen wirken sich negativ auf die mechanischen Eigenschaften aus und vermindern somit die Standzeiten der Werkzeuge.

3 Schneidkanten-Vorbehandlung

Neben den mechanischen und chemischen Eigenschaften eines Schneidstoffs wird der erfolgreiche Einsatz eines Schneidwerkzeugs maßgeblich von der Geometrie und Qualität der Schneide beeinflusst [12]. Die Verschleißfestigkeit und Effizienz der Schneidwerkzeuge kann durch geometrische Modifikation der Schneidenform positiv beeinflusst werden [13]. Aufgrund der höheren Schartigkeit der NbC-Schneidkanten im Vergleich zu den WC-Werkzeugen (**Bild 2**), wurden die NbC-Schneiden durch einen Bürstprozess vorbehandelt, um die Qualität an die der WC-Werkzeuge anzupassen. Die Bearbeitungszeiten für die NbC-Werkzeuge wurde zwischen $t_p = 0,5\text{ s}$ und $5,0\text{ s}$ variiert, um einen Sollkantenradius von $r_{NbC,C45E} = 15\text{ µm}$ bis 25 µm zur Bearbeitung von C45E, $r_{NbC,42CrMo4} = 20\text{ µm}$ bis 30 µm für 42CrMo4+QT und $r_{NbC,AlSi9} = 5\text{ µm}$ bis 15 µm zur Zerspanung von AlSi9Cu4Mg zu erreichen. Damit waren eine gezielte Beeinflussung des K-Faktors und die Kompensation von Abplatzungen nicht möglich.

4 Versuchsaufbau

Die Außenrunddrehversuche wurden auf einem Bearbeitungszentrum „CTX gamma 1250 TC“ von DMG Mori, Bielefeld, durchgeführt. Zur Beurteilung des Verschleißverhaltens unter ho-

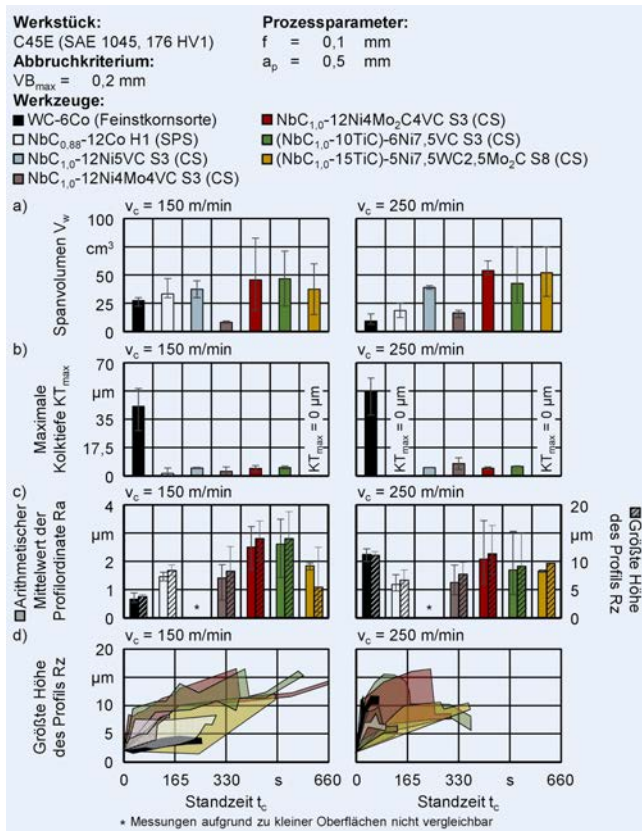


Bild 3. Vergleich von Spanvolumen V_W , arithmetischem Mittelwert der Profilordinate Ra des Werkstückes und maximaler Kolktaiefe $KT_{\max}$ beim Trockendreifen von Kohlenstoffstahl C45E. Bild: IWF

her Reibung und hohen Temperaturen sowie im Zuge des wachsenden Nachhaltigkeitsbewusstseins wurden die Versuche im Trockenschnitt durchgeführt. Für die Bearbeitung von C45E und AlSi9Cu4Mg wurde die ISO-Werkzeuggeometrie SPUN120408 unter Einsatz eines Spanwinkels von $\gamma_0 = 6^\circ$, eines Eintrittswinkels von $\kappa = 75^\circ$ sowie eines Neigungswinkels von $\lambda_s = 0^\circ$ verwendet. Zur Zerspaltung von 42CrMo4+QT wurde die ISO-Geometrie CNMN120408 und, aufgrund des begrenzten Sinterrohmaterials für einzelne NbC-Substrate, die kleinere ISO-Geometrie CNMN090308 verwendet. Beide ISO-Werkzeuggeometrien wurden mit einem Spanwinkel von $\gamma_0 = -6^\circ$, einem Eintrittswinkel von $\kappa = 95^\circ$ sowie einem Neigungswinkel von $\lambda_s = -6^\circ$ eingesetzt. Um die Zerspanungsleistung von NbC- und WC-basierten Werkzeugen zu vergleichen, wurden die Verschleißmarkenbreite an der Freifläche VB und die Kolktaiefe KT für Kohlenstoffstahl C45E als Kriterien nach ISO 3685 bestimmt [14]. Die Messung des Freiflächenverschleißes VB erfolgte durch Unterbrechung des Zerspanprozesses in festen Zeitabständen von $t_{ci} = 5, 10, 15, 30, 45, 60, 90 \text{ s}$. Das Abbruchkriterium wurde mit $VB_{\max} = 0,2 \text{ mm}$ definiert. Zur statistischen Absicherung wurden für jede Kombination aus Schneidstoff, Werkstückmaterial und Schnittgeschwindigkeit v_c drei Versuche ($n = 3$) durchgeführt. Bei jeder Unterbrechung des Zerspanprozesses sowie nach Erreichen des Abbruchkriteriums wurde die erzielte Oberflächenqualität des Werkstückes anhand des arithmetischen Mittelwertes der Profilordinate Ra sowie der größten Höhe des Profils Rz , definiert durch DIN EN ISO 4287, taktil mit einer Auflösung von $\delta = 5 \text{ nm}$ auf einer Taststrecke von $x = 4,8 \text{ mm}$ bestimmt.

5 Ergebnisse

Unbeschichtete WC- und NbC-Schneidwerkzeuge wurden im Trockenschnitt auf Kohlenstoffstahl C45E (SAE 1045, 176 HV 1), Zahnradstahl 42CrMo4+QT (AISI 4140, 53 HRC) und der untereutektischen Aluminiumlegierung AlSi9Cu4Mg eingesetzt. Die NbC-basierten Schneidstoffe zeigen ein hohes Potenzial als Schneidwerkzeugmaterial.

5.1 Kohlenstoffstahl C45E

Bei der Bearbeitung von hochfestem Stahl C45E erreichen alle NbC-basierten Schneidstoffe, mit Ausnahme eines Substrats, ein höheres Spanvolumen V_W im Vergleich zu WC-6Co, (Bild 3 a). Aufgrund der ungleichmäßigeren Materialverteilung von $NbC_{1,0}-12Ni4Mo4VC$ beträgt der Weibull-Parameter $m = 4,3$ im Vergleich zu den anderen NbC-Materialien mit Werten zwischen $m = 4,7$ und $m = 12,55$. Dies könnte der Grund für das geringere Spanvolumen V_W dieses Substrates sein, da somit höhere Schwankungen in den Materialeigenschaften auftreten.

Die insgesamt bessere Leistung der NbC-basierten Schneidwerkzeugen auf Fe-basiertem Kohlenstoffstahl C45E insbesondere bei hoher Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 250 \text{ m/min}$ ist auf den geringeren Kolkverschleiß zurückzuführen (Bild 3 b). Es ist deutlich zu erkennen, dass die maximale Kolktaiefe $KT_{\max}$ von WC-6Co-Werkzeugen viel höher ist als die der NbC-Substrate. Nach Erreichen des Abbruchkriteriums $VB_{\max} = 0,2 \text{ mm}$ betragen die maximalen Kolkverschleißwerte von NbC bei niedriger Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 150 \text{ m/min}$ höchstens 14 % im Vergleich zur Kolktaiefe von WC-6Co. Bei Einsatz der höheren Schnittgeschwindigkeit $v_c = 250 \text{ m/min}$ erreicht das Substratmaterial $NbC_{1,0}-12Ni4Mo4VC$ etwa 15 % und alle anderen NbC-Materialien zwischen 0 % und 11 % der Kolktaiefe $KT_{\max}$ von WC-6Co.

Die Oberflächenqualität des Werkstückes schwankt nach Bearbeitung mit NbC-Werkzeugen stark, jedoch ist der Durchschnittswert der arithmetischen Mittelwerte der Profilordinate Ra und der größten Höhe des Profils Rz bei einer hohen Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 250 \text{ m/min}$ geringer oder ähnlich wie bei WC-6Co, trotz längerer Standzeiten t_c der NbC-Werkzeuge (Bild 3 c). Aus dem Werteverlauf der größten Höhe des Profils Rz über die Einsatzzeit der Werkzeuge (Bild 3 d), sind die höheren Schwankungen bei NbC-basierten Werkzeugen im Vergleich zu WC-6Co ebenfalls deutlich erkennbar.

5.2 Zahnradstahl 42CrMo4+QT

Bei der Bearbeitung von gehärtetem Stahl 42CrMo4+QT zeigte das unterstöchiometrische $NbC_{0,88}-12Co$ das höchste Spanvolumen mit $V_W = 10 \text{ cm}^3$ bei geringer Schnittgeschwindigkeit $v_c = 70 \text{ m/min}$ und $V_W = 7 \text{ cm}^3$ bei $v_c = 100 \text{ m/min}$ (Bild 4 a). Lediglich bei einer hohen Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 100 \text{ m/min}$ erreichten die NbC-Schneidstoffe $NbC_{1,0}-12Ni4Mo_2C4VC$ und $(NbC_{1,0}-10TiC)-6Ni7,5VC$ ein höheres Spanvolumen von $V_W = 6 \text{ cm}^3$ und 4 cm^3 im Vergleich zu WC-6Co mit $V_W = 3,5 \text{ cm}^3$, wobei die große Schwankungsbreite eine geringe Prozesssicherheit aufzeigt. Dies ist auf unzureichende Zähigkeits- und/oder Härtewerte und eine schlechtere Materialqualität der NbC-Substrate im Vergleich zu WC-6Co zurückzuführen. Häufig kommt es zu spontanen Werkzeugausschlägen durch

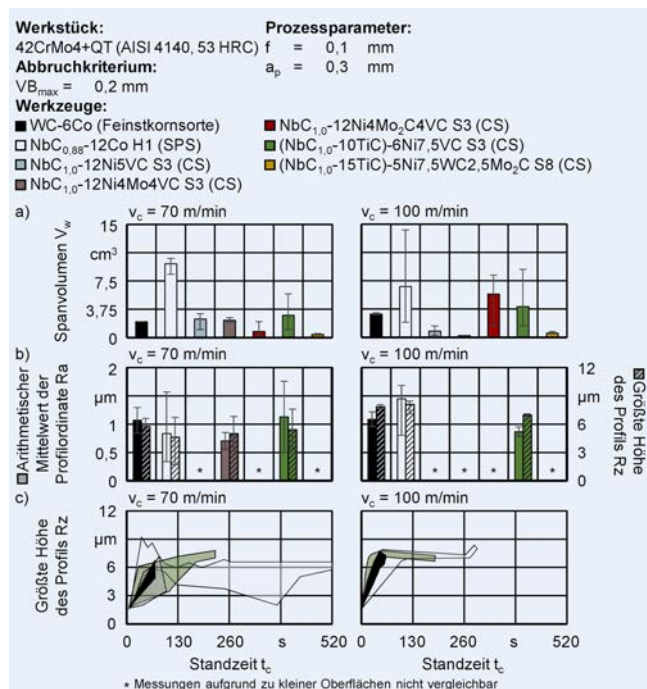


Bild 4. Vergleich des Spanvolumens V_W und arithmetischem Mittelwert der Profilordinate R_a des Werkstückes beim Trockendrehen von Zahnradstahl 42CrMo4+QT. Bild: IWF

Schneidkantenabbruch, die auf die mechanischen Eigenschaften der NbC-Materialien zurückgeführt werden können. Die Oberflächenqualitäten der Werkstücke nach der Bearbeitung mit NbC-Schneidstoffen sind im Durchschnitt denen der WC-Referenzwerkzeuge ähnlich, wobei erneut die geringe Prozesssicherheit von NbC-Werkzeugen durch große Schwankungen des arithmetischen Mittelwerts der Profilordinate R_a und der größten Höhe des Profils R_z deutlich wird (Bild 4 b und 4 c).

5.3 Aluminiumlegierung AlSi9Cu4Mg

NbC-basierte Schneidstoffe können bei der Zerspanung der Aluminiumlegierung AlSi9Cu4Mg im Vergleich zu WC-6Co-Werkzeugen bei niedriger Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 400 \text{ m/min}$ nur zwischen 14 % und 64 % und bei hoher Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 650 \text{ m/min}$ lediglich zwischen 16,5 % und 80 % der Spanvolumenwerte V_W von WC erreichen (Bild 5 a). Bei der Zerspanung der untereutektischen Aluminiumlegierung tritt hauptsächlich der Verschleißmechanismus Adhäsion auf. Die geringere Qualität der NbC-Werkzeugschneiden, aufgrund von Grobkornbildung, ungleichmäßiger Binderverteilung und dadurch verursachter kleiner Ausbrüche an der Schneidkante, bewirken einen höheren Adhäsionsverschleiß im Vergleich zu WC. Dies begründet auch höhere Werte sowie größere Schwankungen der Werte des arithmetischen Mittelwerts der Profilordinate R_a sowie der größten Höhe des Profils R_z für NbC-basierte Schneidstoffe (Bild 5 b und 5 c).

6 Diskussion

Der beschriebene abnehmende Reibungskoeffizient bei erhöhten Reibgeschwindigkeiten und die hohe Warmhärte von NbC kann mit zunehmender Schnittgeschwindigkeit v_c bei der Zerspan-

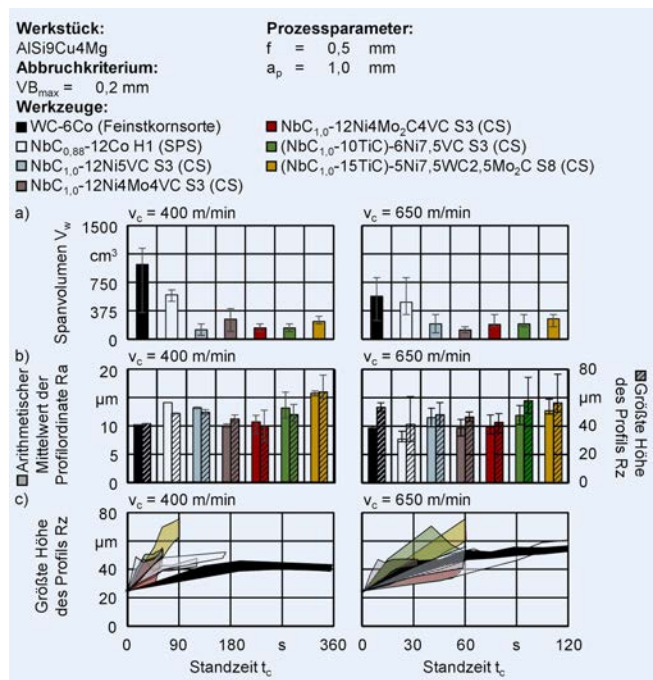


Bild 5. Vergleich des Spanvolumens V_W und arithmetischem Mittelwert der Profilordinate R_a des Werkstückes beim Trockendrehen der Aluminiumlegierung AlSi9Cu4Mg. Bild: IWF

nung vorteilhaft ausgenutzt werden. Bei der Trockenbearbeitung von Kohlenstoffstahl C45E erreichen NbC-Werkzeuge ein höheres Spanvolumen V_W , da die chemische Reaktivität von NbC-basierten Schneidstoffen mit dem Werkstückmaterial und damit der Kolkverschleiß geringer sind. Die Spanausbildung wird durch die geringere Wärmeleitfähigkeit von NbC und den damit verbundenen, höheren thermischen Einfluss auf den Span sowie den fehlenden Kolkverschleiß beeinflusst. Spontaner Werkzeugbruch entsteht, weil der lange Span den Zerspanprozess negativ beeinflusst. Für die Bearbeitung von C45E mit NbC-Werkzeugen sind daher Spanbrecher nützlich. Ebenso können bei der Bearbeitung von Zahnradstahl 42CrMo4+QT verschiedene Schneidengeometrien zu einer Stabilisierung der Schneide und einem besseren Spanbruch führen, um noch längere Standzeiten zu erreichen. Bei der spanenden Bearbeitung von AlSi9Cu4Mg tritt aufgrund geringerer Schneidkantenqualität ein höherer Adhäsionsverschleiß auf, der zu früherem Werkzeugversagen führt.

Eine höhere Zerspanleistung der NbC-Substrate wird durch eine hohe Härte bei gleichzeitig hohen Zähigkeitswerten sowie einer besseren Werkzeugqualität mit gleichmäßigen Schneidkantenradien $r_{\beta 0}$ und geringerer Schneidkantenrauheit erreicht. Dies kann durch eine feinere Partikelgröße des NbC-Ausgangsmaterials, also Anpassungen in der Pulveraufbereitung für eine gleichmäßige Verteilung des Binders und Anpassungen in Sinter- und Schleifprozessen, erreicht werden. Auch die Zusammensetzung der neuartigen Schneidstoffe bewirkt eine Veränderung der mechanischen Eigenschaften und kann zur Verringerung von Grobkornbildung im Sinterprozess führen.

Um die Akzeptanz in den Produktionsbetrieben zu erhöhen und die Einführung des neuen Schneidstoffs in bestehende Produktionsprozesse zu beschleunigen, sollten neben Studien über die Eignung für verschiedene Anwendungen gleichzeitig auch die Möglichkeiten der Wiederverwertung untersucht werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

In den Untersuchungen werden verschiedene prototypische Schneidstoffe auf NbC-Basis im Vergleich zu konventionellem WC-6Co im unbeschichteten Zustand bei der trockenen Drehbearbeitung von Fe-basiertem Kohlenstoffstahl C45E, gehärtetem Stahl 42CrMo4+QT und der Aluminium-Silizium-Legierung AlSi9Cu4Mg getestet. Im gegenwärtigen Entwicklungsstadium können die folgenden Schlussfolgerungen für die Zerspanungsleistung von NbC im Trockendrehprozess gezogen werden:

1. NbC-basierte Schneidstoffe erreichen ein höheres Spanvolumen V_W im Vergleich zu WC-6Co-Werkzeugen bei der Bearbeitung von Fe-basiertem Kohlenstoffstahl C45E, insbesondere bei hohen Schnittgeschwindigkeiten v_c , was mit einer geringeren Löslichkeit in Legierungen und damit wesentlich geringerem Kolkverschleiß KT_{max} verbunden ist.
2. Beim Trockendrehen von Zahnradstahl 42CrMo4+QT (53 HRC) können NbC-basierte Werkzeuge kein vergleichbares Spanvolumen V_W zu WC-6Co erreichen, was auf niedrigere Härte- und Zähigkeitswerte sowie eine geringere Materialqualität durch Lunker, eine verbesserungswürdige Binderverteilung, Grobkornbildung und damit einhergehende spontane Werkzeugausfälle zurückgeführt werden kann.
3. Im Vergleich zu WC- wurden bei der Zerspanung mit NbC-Substraten Rauheitskennwerte R_a und R_z der Werkstücke mit starken Schwankungen ermittelt, was auf eine geringe Prozesssicherheit hindeutet.
4. Die Qualität und Homogenität der prototypischen NbC-Schneidwerkzeugmaterialien ist weiterhin verbesserungswürdig. Diesbezüglich gibt es Optimierungspotenzial.

Die Weiterentwicklung innovativer NbC-Schneidstoffe erfordert weiterführende Untersuchungen in Bereichen wie Zusammensetzung, Pulveraufbereitung, Sinterbedingungen, Werkzeugschleifen und Werkzeuggeometrie. Um die Prozesssicherheit von NbC in Zerspanprozessen zu verbessern, ist es langfristig notwendig, die derzeit noch prototypischen Produktionsbedingungen in die industrielle Großproduktion zu überführen.

DANKSAGUNG

Die Autoren bedanken sich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung des Projekts „Entwicklung niobcarbidgebasierter Zerspanwerkzeuge sowie Untersuchung des Einsatzverhaltens im Zerspanprozess“.

Literatur

- [1] Schedler, W.: Hartmetall für den Praktiker, Aufbau, Herstellung, Eigenschaften und industrielle Anwendung einer modernen Werkstoffgruppe. Düsseldorf: VDI-Verlag 1988
- [2] International Tungsten Industry Association: Information on tungsten: pricing, 2017. Internet: <http://www.itia.info/tungsten-prices.html>. Zugriff am 19.06.2019
- [3] Norgren, S.; García, J.; Blomqvist, A.; et al.: Trends in the P/M hard metal industry. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials 48 (2015) pp. 31–45
- [4] Montenegro P.; Gomes J.; Rego R., et al.: Potential of niobium carbide application as the hard phase in cutting tool substrate. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials 70 (2018) pp. 116–123
- [5] Genga, R.M.; Cornish, L.A.; Woydt, M.; et al.: NbC: A Machining Alternative for Dry and MQL Face-Milling of Grey Cast Iron (GCI). In: European Powder Metallurgy Association (EPMA) WORLD PM 2016, Hamburg (2016) pp. 1–6, ISBN 978-1-899072-47-7
- [6] Uhlmann, E.; Hinzmann, D.; Kropidlowski, K.; et al.: Increased tool performance with niobium carbide based cutting materials in dry cylindrical turning. Procedia CIRP 77 (2018) pp. 541–544
- [7] Uhlmann, E.; Hinzmann, D.; Kropidlowski, K.; et al.: Substitution of commercially coated tungsten carbide tools in dry cylindrical turning process by HiPIMS coated niobium carbide cutting inserts. Surface & Coatings Technology 354 (2018) pp. 112–118
- [8] Woydt, M.; Mohrbacher, H.; Vleugels, J.; et al.: Niobium carbide for wear protection – tailoring its properties by processing and stoichiometry. Metal Powder Report 71 (2016) 4, pp. 265–272
- [9] Kieffer, R.; Benesovsky, F.: Hartmetalle. Wien, New York: Springer-Verlag 1965
- [10] Uhlmann, E.; Kropidlowski, K.; Woydt, M.; et al.: Cutting tools made from Niobium Carbide. Proceedings of 17th Plansee-Seminar, 29.05.–02.06.2017, Reutte/Österreich, HM105/1–11
- [11] Guha, J.P.; Kolar, D.: Systems of Niobium Monocarbide with Transition Metals. Journal of the Less Common Metals 29 (1972), pp. 33–40
- [12] Biermann, D.; Terwey, I.: Spanbildungsprozess beim Bohren – Einfluss der Kantenpräparation. Diamant Hochleistungswerkzeuge dihw 11 (2009) S. 32–35
- [13] Klocke, F.: Fertigungsverfahren 1, Zerspanen mit geometrisch bestimmter Schneide. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2018, S. 229–249
- [14] ISO 3685 (11.1993): Tool-life testing with single-point turning tools. Geneva: International Organization for Standardization



Kristin Kropidlowski,
Bild: IWF

Prof. Dr. h. c. Dr.-Ing. **Eckart Uhlmann**
Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb
(IWF), Technische Universität Berlin
Pascalstr. 8-9, 10587 Berlin
Tel. +49 (0)30 / 314-21235
kropidlowski@iwf.tu-berlin.de
uhlmann@iwf.tu-berlin.de
www.iwf.tu-berlin.de

Dr. **Mathias Woydt**
Matrilub Materials, Tribology, Lubrication
Limonenstr. 16b, 12203 Berlin
Tel. +49 172 395 95 94
m.woydt@matrilub.de

Dr.-Ing. **Géraldine Theiler**,
Dr. **Thomas Gradt**
Bundesanstalt für Materialforschung
und -prüfung (BAM), Fachbereich 6.3
Makrotribologie und Verschleißschutz
Unter den Eichen 44–46, 12203 Berlin
Tel. +49 (0)30 / 8104-3540
geraldine.theiler@bam.de
thomas.gradt@bam.de
www.bam.de

Heißgepresste faserverstärkte Duroplastbauteile für den Einsatz in Motorspindeln

Hochpräzise Faserkunststoffbauteile für den Einsatz in Werkzeugmaschinen

F. Birk, F. Ali, M. Schneider, M. Weigold

Das Heißpressverfahren zur Herstellung faserverstärkter Duroplastbauteile ist eine geeignete Methode um Bauteile mit komplexer Geometrie herzustellen. Bei der Verwendung von Halbzeugen mit mittlerer Faserlänge sind mit heutigen Auslegungsmethoden und Presswerkzeugaufbauten die erreichbaren Toleranzen für den Einsatz in hochpräzisen Anwendungen für den Werkzeugmaschinenbau noch nicht ausreichend, so dass eine aufwendige spanende Nachbearbeitung folgt. Eine Untersuchung und Optimierung des Verfahrens hinsichtlich der erreichbaren Genauigkeiten bietet daher ein großes Potenzial zur Einsparung der aufwendigen Nachbearbeitung.

STICHWÖRTER

Fertigungstechnik, Maschinenelemente

1 Einleitung

Der Einsatz von faserverstärkten Kunststoffen bietet besonders im Bereich hochdynamisch beanspruchter Bauteile zum Beispiel Motorspindeln eine Reihe von Vorteilen. Aufgrund der geringen Dichte in Kombination mit der hohen Steifigkeit sowie Dämpfung lassen sich höhere Biegeeigenfrequenzen erreichen und die Verformungen verringern [1–3]. Für dünnwandige rotationssymmetrische Bauteile hat sich das Wickelverfahren aufgrund seiner Wirtschaftlichkeit bei großen Stückzahlen etabliert. Für Komponenten mit großem Anteil an Verschnitt sowie hohem Zerspanvolumen ist das Wickelverfahren ungeeignet [4]. Im Gegensatz dazu eignet sich das Pressverfahren für dickwandige Rohre mit Absätzen [5]. Ein Beispiel für ein solches Bauteil sind Lagerschilde oder -sitze für Motorspindeln (**Bild 1**).

Beim derzeitigen Herstellungsprozess werden die Lagerschilde für eine Motorspindel im Heißpressverfahren aus HexMC gefertigt. Dies ist ein duroplastisches Prepreg mit 50 mm langen wirr orientierten Kohlenstofffaserstücken und einem Faservolumenanteil von circa 60 %. Die mechanischen Eigenschaften liegen somit zwischen der klassischen SMC- (sheet moulding compound)-Verarbeitung mit Wirrfasern und der Verarbeitung von Prepregs mit vorgegebener Faserorientierung [6].

Allerdings erfüllen die gepressten Bauteile die Anforderungen an die Form- und Lagetoleranzen, welche seitens der Lagerhersteller vorgegeben, nicht sondern müssen spanend nachbearbeitet werden. Dies macht nach Angabe der Carbon-Drive GmbH etwa

High-precision fiber plastic components for use in machine tools – Hot-pressed fibre-reinforced thermoset components for use in motor spindles

The hot pressing process for the production of fibre-reinforced thermoset components is a suitable method for producing components with complex geometries. When using a semi-finished product with a fibre length of 5 cm it is currently not possible to design a tool according to the desired final geometry and to estimate the achievable tolerances. The components manufactured in this way have to be elaborately reworked in order to comply with the shape and position tolerances. An investigation and optimization of the process with regard to the achievable accuracies therefore it offers great potential for saving the costly post-processing.

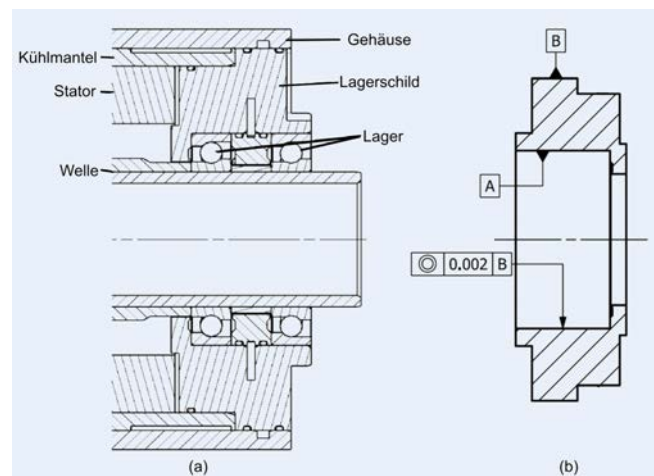


Bild 1. (a) Ansicht der Motorspindel mit hinterem Lagerschild. (b) Darstellung des Lagerschildes. Absatz A ist der Lagersitz und über Absatz B wird das Lagerschild im Gehäuse der Motorspindel positioniert. Bild: PTW, TU Darmstadt

80 % der Herstellungskosten aus. Durch eine Untersuchung und Optimierung des Herstellungsverfahrens hinsichtlich der erreichbaren Form- und Lagetoleranzen könnten somit die Fertigungskosten durch Entfall der Nachbearbeitung oder Reduzierung des Schleifaufmaßes (aktuell bis zu 90 µm) stark reduziert werden.

Tabelle 1. Anforderungen an den Lagersitz für Hochpräzisionslagerungen von

Fläche	Symbol	Zulässige Abweichung	To
Zylindrischer Sitz	Rundlauf	IT1/2	
Plananlage	Planlauf	IT0/1	
Passungsmaß		K4	
Oberflächenrauigkeit	radial	-	



Bild 2. Darstellung der Vorformlinge und der Faserorientierung im gepressten Bauteil. Die Vorformlinge werden händisch um ein Rohr (Durchmesser circa 60 mm) gewickelt (a) Vorformling mit radialem Aufbau. Die Fasern orientieren sich in axialer und tangentialer Richtung; (b) Vorformling mit axialem Aufbau. Die Fasern orientieren sich in radialer und tangentialer Richtung; (c) HexMC-Halbzeug. Bild: PTW, TU Darmstadt

2 Anforderungen an die Lagerschilde

Das Lagerschild bildet das Verbindungselement zwischen dem Spindelgehäuse und den Lagern der Spindelwelle. Die Genauigkeiten im Lagerschild bestimmen maßgeblich die Position der Welle in der Spindel und haben somit direkten Einfluss auf die Bearbeitungsqualität, da sie zum Beispiel die erreichbaren Laufgenauigkeiten des Spindelsystems beeinflussen [7]. Zusätzlich wird über die Lagerschilde die im Lager entstehende Wärme abgeführt. Des Weiteren ist ein Fettdepot zur Lagerschmierung integriert. Aus den genannten Gründen stellen Lagerhersteller hohe Anforderungen an den Lagersitz von Präzisionsspindellagern. Die Toleranzanforderungen an den Lagersitz für Hochpräzisionslager des Herstellers SKF sind in **Tabelle 1** aufgelistet. Im Rahmen des Beitrags werden sowohl der Gesamtrundlauf beziehungsweise die Rundheit als auch die Koaxialität des Lagersitzes zur Bezugsfläche B betrachtet Bild 1 (b), da diese den größten Einfluss auf die Funktion der Lagerung und somit auch das Spindel-Lager-System haben.

Die geometrischen Abweichungen des Lagersitzes beeinflussen direkt die Form des Lageraußenrings. Zum einen führt ein unrunder Lagersitz zu einer Verformung des Rings, wodurch die Lagerlaufbahn ungleichmäßig belastet wird. Dies resultiert in einem erhöhten Rollwiderstand, verringerter Lebensdauer und einer größeren Wärmeentwicklung [8]. Zum anderen kommt es durch einen zu großen Versatz in der Koaxialität zwischen Lagerfläche und Gehäuse zu einer Schrägstellung der Welle. Dies

beeinflusst direkt den Tool-Center-Point (TCP) und somit auch die Bearbeitungsqualität. Bei einem Lagerabstand der Spindel von 120 mm und einem Abstand des TCP0 von 100 mm zum vorderen Lager führt eine Abweichung in der Koaxialität von 10 μm zu einer TCP-Abweichung von 8 μm .

Nachfolgend wird untersucht mit welchen Formabweichungen und Maßtoleranzen die Fertigung der Lagerschilde möglich ist. Das Vorgehen gestaltet sich dabei wie folgt. Zunächst werden in Vorversuchen mittels einer DoE (Design of Experiment) verbesserte Prozessparameter an dem bestehenden Presswerkzeug ermittelt. Anschließend wird das Presswerkzeug überarbeitet und wiederholte Pressversuche mit den zuvor ermittelten Parametern durchgeführt und ausgewertet, um bestmögliche Erzeugnisse hinsichtlich der Toleranzerfüllung zu erhalten.

3 Untersuchungen der Prozessparameter in Vorversuchen

Bei der bisherigen Herstellung der Lagerschilde wurde festgestellt, dass die Parameter Presstemperatur, Pressdruck und der Aufbau des Vorformlings großen Einfluss auf den Prozess und die Bauteilqualität haben. Darüber hinaus wurden in [10] die Pressdauer und der zeitliche Verlauf des Pressdrucks als Parameter identifiziert. In den Untersuchungen zeigte sich, dass diese im Vergleich einen geringeren Einfluss haben. Im Folgenden werden die Effekte der Parameter Temperatur, Druck und der Aufbau des Vorformlings auf den Prozess erläutert.

Die Temperatur des Pressprozesses dient im ersten Schritt der Verringerung der Viskosität des Epoxidharzes damit die Formmasse fließfähig wird und die Kavität besser ausfüllen kann. Im zweiten Schritt initiiert die erhöhte Temperatur die Aushärtereaktion und Verfestigung des Harzes in der Formmasse [11]. Die Höhe der Temperatur beeinflusst dabei die Geschwindigkeit der Aushärtereaktion sowie die notwendige Haltedauer des Pressdrucks und somit die gesamte Zyklusdauer. Höhere Temperaturen führen zu kürzeren Aushärtevorgängen, resultieren allerdings auch in größeren thermischen Eigenspannungen im Bauteil und können somit zu Formabweichungen beitragen. Zusätzlich muss die größere thermische Dehnung von Werkzeug und Werkstück bei der Werkzeugauslegung berücksichtigt werden.

Der aufgebrachte Pressdruck ist entscheidend für die komplette Ausfüllung der Kavität mit der Formmasse. Je höher die Viskosität der Formmasse oder je länger die Fließwege im Werkzeug sind, desto höher muss der aufgebrachte Pressdruck gewählt werden. Ein erhöhter Pressdruck kann zudem die Menge an eingeschlossener Luft im Bauteil reduzieren.

Zum Pressen der Bauteile müssen aus dem mattenförmigen Halbzeug Zuschnitte erstellt und ein Vorformling erstellt werden. Durch den Aufbau des Vorformlings kann die Faserorientierung im Bauteil maßgeblich beeinflusst werden. Diese hängt neben der Geometrie und Faserorientierung des Vorformlings ebenso von der Bauteilgeometrie ab. Je ähnlicher sich diese beiden Geometrien sind, desto stärker wird die Faserorientierung des Vorformlings beibehalten. Unterscheidet sich diese stark, kann sich je nach Länge der nötigen Fließwege und Gestaltung des Werkzeugs eine neue Faserorientierung ausbilden. Dieser Effekt ist in **Bild 2** dargestellt. Während des Pressprozesses werden beide Vorformlinge axial stark gestaucht. Bei der ersten Variante bildet sich dadurch eine nahezu isotrope Faserorientierung aus. Die Fasern

Tabelle 2. Faktorieller 2^3 -Versuchsplan mit einem Zentralpunkt. Parameter Temperatur (A), Pressdruck (B) und Lagenaufbau. 0 (T = 130°C; p = 100 bar; radialer Aufbau des Vorformlings); + (T = 150°C; p = 120 bar; axialer Aufbau des Vorformlings); - (T = 110°C; p = 80 bar; radialer Aufbau des Vorformlings).

Versuch	Faktoren und Wechselwirkungen						
	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
1	0	0	0	-	-	-	-
2	+	+	+	+	+	+	+
3	-	-	-	+	+	+	-
4	-	+	-	-	+	-	+
5	-	-	+	+	-	-	+
6	-	+	+	-	-	+	-
7	+	-	-	-	-	+	+
8	+	-	+	-	+	-	-
9	+	+	-	+	-	-	-

werden in Längsrichtung gestaucht und fließen zur Seite weg oder verwinden sich ineinander. Bei der zweiten Variante hingegen fließen die Fasern größtenteils in ihrer Ebene. Hier wird eine stark anisotrope Faserorientierung erwartet, da die Fasern sich nur in radialer und tangentialer Richtung ausbreiten, jedoch nicht in die axiale Richtung.

Zur Beurteilung des Einflusses der drei genannten Prozessparameter auf die Maßhaltigkeit und Formtoleranzen der Bauteile wird ein DoE durchgeführt. Hierbei werden die drei Parameter in zwei Stufen variiert. Zur Festlegung der Schrittweite wird auf Empfehlungen aus [12] zurückgegriffen. Dabei wird für einen großen Versuchsraum mit weitgehend unbekannten Einstellungen eine Schrittweite von 30 % empfohlen, bei einem eingegrenzten Versuchsfeld eine Schrittweite von 10 %. Aufgrund der bereits erfolgten Herstellung einiger Lagerschilde, konnten geeignete Prozessparameter ermittelt werden, welche den Versuchsraum einschränken. Damit die Effekte einer Variation jedoch stärker auftreten, wird die Schrittweite auf 20 % festgelegt. Der Versuchsraum ist in **Tabelle 2** aufgelistet und erläutert. Nach [13] kann so die Hauptwirkung der drei Parameter berechnet werden.

In einem ersten Schritt wird nur die Rundheit der Lagersitze betrachtet und nicht der Gesamtlauflauf. Der Gesamtrundlauf der Zylinderfläche hängt neben der Rundheit des Zylinders zusätzlich noch von der Koaxialität zu seiner Bezugsfläche ab. Sobald die Rundheit der Fläche nicht die Toleranzen erfüllt, ist dies für den Gesamtrundlauf auch nicht gegeben.

Neben dem Lagersitz wurden auch die Toleranzen an allen anderen Funktionsflächen untersucht, zum Beispiel Absatz B. Trotz unterschiedlicher Fließwege an den einzelnen Absätzen und dadurch resultierende lokal abweichende Faserorientierungen zeigen sich ähnliche Ergebnisse wie beim Lagersitz. Deswegen wird der Einfluss der Parameter beispielhaft am Lagersitz dargestellt.

Die Auswertung der DoE zeigt, dass die Rundheit der verschiedenen Probekörper maßgeblich von der Presstemperatur abhängt. In **Bild 3** ist der Effekt der unterschiedlichen Prozessparameter auf die Rundheit des Lagersitzes aufgetragen.

Entsprechend der vermessenen Probekörper kann die Rundheit von 143 μm bei vier Versuchen mit 160 °C (Versuche 2, 7, 8, 9 nach **Tabelle 2**) durch eine Verringerung der Temperatur auf

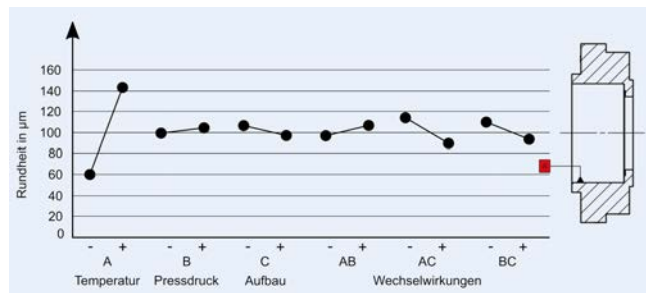


Bild 3. Aufgetragen sind die Effekte der Parameter Temperatur, Kraft beziehungsweise Pressdruck und Aufbau des Vorformlings sowie deren Wechselwirkungen auf die Rundheit des Lagersitzes. Effekt bezeichnet dabei die Änderung der Ausgangsgröße Rundheit hervorgerufen durch die Änderung der Einflussgrößen beziehungsweise Parameter.

Bild: PTW, TU Darmstadt

110 °C (Versuche 3, 4, 5, 6 nach **Tabelle 2**) auf 60 μm gesenkt werden. Eine Erklärung hierfür liegt in der unterschiedlichen Wärmedehnung zwischen Faser und Matrix. Je höher die Temperatur ist, bei der das HexMC aushärtet, desto größer ist der absolute Längenunterschied zwischen den beiden Komponenten beim Abkühlen. Dies führt zu größeren Eigenspannungen und kann so zu Geometrieabweichungen an der Bauteiloberfläche führen. Die Faserorientierung hingegen hat mit einem Effekt von -10 μm über den Aufbau des Vorformlings nur einen geringen Einfluss auf die Rundheit der Versuchskörper. In Verbindung mit der Temperatur zeigt sich bei der Kreuzkorrelation von Temperatur und Faserorientierung allerdings ein erhöhter Einfluss von -24 μm . Dies lässt sich, wie beim Temperatureinfluss, ebenfalls durch die unterschiedliche Wärmedehnung zwischen Faser und Matrix begründen. Stehen die Fasern alle senkrecht zur Oberfläche (radiale Richtung), ergibt sich eine bessere Rundheit und Oberflächengüte, als wenn die Fasern in der Oberflächenebene (axiale und tangentiale Richtung) orientiert liegen (siehe **Bild 2 a** und **b**). Liegen die Fasern an der Oberfläche orientiert, können diese lokal Eigenspannungen einbringen. Verstärkt wird dieser Effekt durch den Aufbau des HexMC, bei welchem große Flächen mit derselben Faserorientierung vorhanden sind, siehe **Bild 2**. Enden die Fasern senkrecht an der Oberfläche, haben die Eigenspannungen der Fasern nur einen geringen Wirkungsbereich.

Der Einfluss der Presskraft ist gegenüber dem Einfluss der Temperatur und des Lagenaufbaus am geringsten, da dieser nur die Größe der inneren Eigenspannungen beeinflusst. Der Pressdruck steht jedoch in starker Wechselwirkung mit der Temperatur und dem Lagenaufbau. Bei niedrigen Temperaturen besitzt das HexMC eine höhere Viskosität und benötigt für die Umformung und Verarbeitung im Werkzeug höhere Kräfte, damit die Kavität komplett abgeformt wird. Die Fließfähigkeit des Materials wird auch durch die Faserorientierung des Vorformlings beeinflusst. Dies folgt aus der Korrelation zwischen Presskraft und Aufbau des Vorformlings. Bei einem axialen Aufbau können die Fasern in ihrer Ebene nach außen fließen. Bei einem radialen Aufbau werden die Fasern zunächst gestaucht und orientieren sich während des Fließvorgangs von einer vorwiegend vertikalen Orientierung zu einer vorwiegend horizontalen Orientierung. Hierfür sind aufgrund der Fließbehinderung größere Kräfte notwendig. Zum Vergleich sind in Bild 2 die Schlibfbilder dargestellt.

4 Iteratives Überarbeiten des Presswerkzeugs und Präzisionspressversuche

Das Werkzeug wurde so konzipiert, dass die Innenmaße zunächst zu groß und die Außenmaße zu klein hergestellt werden. So kann, anhand mit dem Werkzeug hergestellter Teile, abgeschätzt werden, wie die Maße des Werkzeugs nachbearbeitet werden müssen, um die gewünschten Endmaße zu erhalten. Die Iterationsschleife des Nachbearbeitens des Werkzeugs und der Vermessung hergestellter Probekörper wird so lange durchlaufen, bis die Probekörper mit den gewünschten Endmaßen gefertigt werden können. Zur Verbesserung der Koaxialität wurde das Werkzeug überarbeitet (siehe Bild 4). Durch die Verwendung eines Kugelkäfigs zur Zentrierung der Patrize in der Matrize und der Nutzung von Zentrierkonen konnte die Genauigkeit beim Zusammenbau des Werkzeugs gesteigert werden. Dadurch wurde Koaxialität des Lagersitzes um 37 % auf 61 μm verbessert.

Im Folgenden wird die Iterationsschleife zum Einstellen des Bauteilendmaßes erläutert. Der Lagersitz soll ein Endmaß von $55 + 0,003 \text{ mm}$ bis $+0,011 \text{ mm}$ besitzen. Im Ausgangszustand des Werkzeugs wurde der Absatz A am Dorn bei vier Versuchen durchschnittlich 0,13 mm (vgl. Bild 4) zu groß gefertigt. Diese Maßdifferenz wird vom Werkzeug abgeschliffen, wodurch im nächsten Iterationsschritt Bauteile mit einem Maß von 55,03 mm gefertigt wurden (drei Versuche). In einem zweiten Iterationsschritt mit ebenfalls drei Versuchen konnten durch eine erneute Nachbearbeitung des Dorns schließlich Bauteile im Toleranzfeld gefertigt werden. Eine weitere Versuchsreihe (drei Versuche) hat gezeigt, dass der Lagersitz der Probekörper bis auf 25 μm reproduzierbar gefertigt werden kann. Bei einer Toleranzgröße der Bauteile von 8 μm kann somit nicht garantiert werden, dass alle Bauteile die Toleranzanforderungen erfüllen.

Aus den Erkenntnissen der Vorversuche kann abgeleitet werden, dass die Toleranzen aufgrund der thermischen Ausdehnung des Probekörpers nicht eingehalten werden. Diese Schwankungen sind wiederum auf die lokal unterschiedliche Faserorientierung zurückzuführen. Um dies zu bestätigen wurde der thermische Ausdehnungskoeffizient von HexMC aus den bekannten Maßen des Werkzeugs und Vermessungen der Probekörper während der zuvor beschriebenen Iterationsschritte gemäß [14] rechnerisch bestimmt. Die Ergebnisse sind in Bild 5 dargestellt. Die am

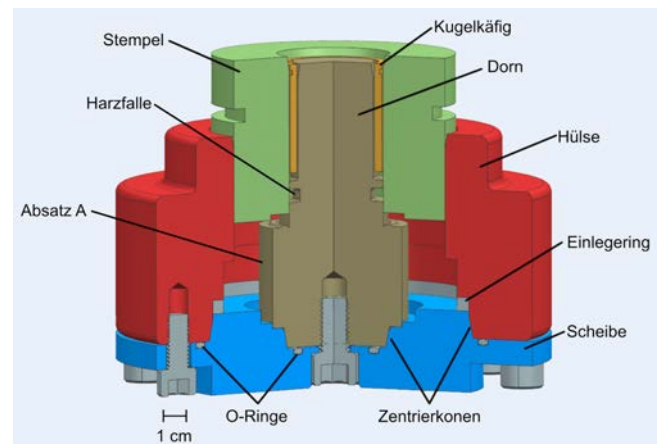


Bild 4. Verbessertes Presswerkzeug zur Durchführung der Präzisionspressversuche. Bild: PTW, TU Darmstadt

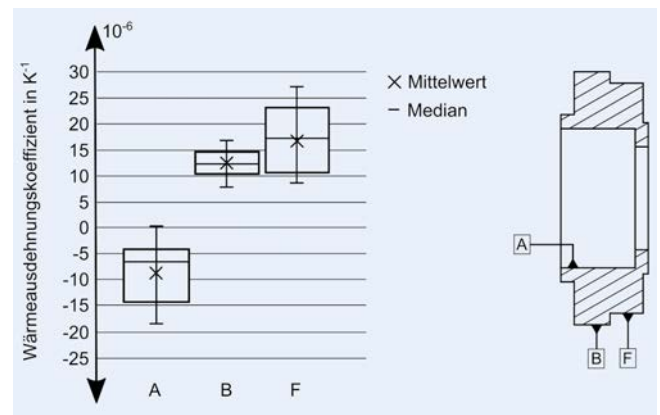


Bild 5. Box-plot der ermittelten Wärmeausdehnungskoeffizienten an den unterschiedlichen Absätzen von sieben Probekörper. Bild: PTW, TU Darmstadt

Lagersitz ermittelten thermischen Ausdehnungskoeffizienten liegen zwischen $-18 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ und $0,3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Im Vergleich dazu liegen die Koeffizienten an den Absätzen B und F durchweg im positiven Bereich und unterliegen insbesondere am Absatz F ähnlich hohen Abweichungen. Aufgrund der großen Schwankung dieser Werte kann kein Gestaltungskriterium für die Auslegung neuer Presswerkzeuge gegeben werden. Ursprüngliches Ziel war die Ermittlung der Werkzeugmaße aus den Bauteilsollmaßen.

5 Tempern der Bauteile

Durch das Tempern von Bauteilen aus FKV werden Relaxations- und Kriechvorgänge im Material beschleunigt und Eigenspannungen abgebaut [11]. Um die Rundheit der Bauteile zu verbessern wurden verschiedene Temperstrategien untersucht. Eine Temperung des Bauteils im Werkzeug für fünf Stunden bei 125 °C zeigte keine signifikante Verbesserung der Rundheiten. Wird das Bauteil zunächst entformt und dann für drei Stunden bei 125 °C getempert, zeigt sich eine Verbesserung der Rundheit von 20 μm . Zuletzt wurde nach dem Entformen des Bauteils aus dem Werkzeug ein Kalibrierdorn in den Lagersitz eingepresst. Hierdurch erhöht sich der auf das Bauteil ausgeübte Druck, wodurch nicht nur Relaxations- sondern auch Kriechvorgänge im

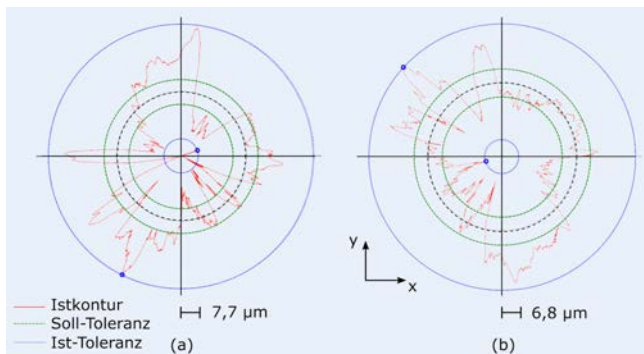


Bild 6. Kreismessung des Lagersitzes vor (a) und nach (b) dem Tempern.
Bild: PTW, TU Darmstadt

Bauteil ausgelöst werden. Eine Temperung für drei Stunden und bei 140 °C verbesserte die Rundheit um 20 µm auf 47 µm. Hier konnte besonders die Welligkeit des Bauteils verbessert werden, mit niedrigeren Spitzen, wie die Messung in **Bild 6** zeigt.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Das Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) der Technischen Universität Darmstadt optimiert den Fertigungsprozess von duroplastischen Faserkunststoffbauteilen im Heißpressverfahren zum Einsatz für hochpräzise Anwendungen im Werkzeugmaschinenbau. Durch die systematische Entwicklung optimierter Prozessparameter lassen sich gegenüber heutigem Stand der Technik Bauteilqualität und Herstellungstoleranzen deutlich verbessern. So konnte die Rundheit durch die optimierten Prozessparameter um 40 % verbessert werden. Das Tempern der Bauteile verbesserte die Rundheit um weitere 8 %. Insgesamt konnte die Rundheit so von 81 µm auf 42 µm gesenkt werden. Ebenso konnte die Koaxialität des Lagersitzes durch die Anpassung des Presswerkzeuges um 37 % verbessert werden. Trotzdem liegen die Koaxialität und der Gesamtrundlauf am Lagersitz außerhalb der geforderten Toleranz und die Bauteile lassen sich lediglich auf 20 µm genau reproduzieren.

Für Motoren und Lager mit geringeren Anforderungen an die Laufgenauigkeit ist die Heißpresstechnik jedoch vorteilhaft. SKF gibt für seine Standardrollenkugellager den Toleranzgrad IT5 für den Gesamtlauf und die Plananlage an. Mithilfe eines CFK-Rohrs als Einleger können diese Anforderungen erfüllt werden. Weiteres Forschungspotenzial liegt in verbesserten Oberflächen durch das nachträgliche Umspritzen mit einem isotropen Kunststoff in einem Spritzgieß- oder -prägeprozess sein. Besonders beim Spritzprägen sind sehr gute Oberflächen mit geringen Formabweichungen erreichbar.

DANKSAGUNG

Das Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen der Technischen Universität Darmstadt dankt der Carbon-Drive GmbH für die Unterstützung bei der Herstellung der Probekörper.

Literatur

- [1] Klimach, M.: Beitrag zur Gestaltung funktionsintegrierender, leichtbau-optimierter Faser-Kunststoff-Verbund-Wellen für den Maschinenbau. Aachen: Shaker Verlag 2015
- [2] Landmann, A.: Zur Gestaltung von Maschinenkomponenten aus Faser-Kunststoff-Verbund-Halbzeugen. Aachen: Shaker Verlag 2018
- [3] Möhring H.-C. et al.: Composites in Production Machines. In: Procedia CIRP 2017, Bd. 66, pp. 2–9
- [4] Lässig, R. et al.: Studie: Serienproduktion von hochfesten Faserverbundbauteilen: Perspektiven für den deutschen Maschinen- und Anlagenbau. Roland Berger, 2012
- [5] AVK Handbuch Faserverbundkunststoffe/Composites: Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen. Wiesbaden: Springer Fachmedien 2014
- [6] Data sheet: HexMC i Moulding Compound C2000 M77. Stand: 2019. Internet: https://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/HexMCi_C_2000_M77_DataSheet.pdf. Zugriff am 04.02.2019
- [7] Brecher, C.; Weck, M.: Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme 2: Konstruktion, Berechnung und messtechnische Beurteilung. Wiesbaden: Springer Vieweg 2017
- [8] SKF Service Handbuch. Internet: www.gebr-barth.de/wp-content/Produktinformationen/SKF%20Service%20Handbuch.pdf. Zugriff am 19.07.2019
- [9] SKF Hochgenauigkeitslager der Reihe „Super-precision bearings“. Stand: 2019. Internet: https://www.skf.com/binary/49-129877/0901d19680363d4d-13383_1-D-E-Super-precision-bearings.pdf. Zugriff am 24.01.2019
- [10] Heßner S.: Spritzprägen sphärischer und asphärischer Kunststofflinsen. In: IKV-Berichte aus der Kunststoffverarbeitung 2010, Bd. 207
- [11] Schürmann, H.: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden. Berlin Heidelberg: Springer Verlag 2007
- [12] Bourdon, R. et al.: Standardisierte Prozess- und Qualitätsoptimierung mit DOE-Methoden: Eine Kurzanleitung für die Praxis beim Spritzgießen. In: Kunststofftechnik, S. 525–549, 2012
- [13] Schiefer, H.; Schiefer, F.: Statistik für Ingenieure: Eine Einführung mit Beispielen aus der Praxis. Wiesbaden: Springer Vieweg 2018
- [14] Schwarz, M.: Gezielte Steifigkeits- und Festigkeitssteigerung von Maschinenbauteilen durch vorgespannte Ringarmierungen aus Faser-Kunststoff-Verbunden. Aachen: Shaker 2008



Frederik Birk, M. Sc.
Bild: PTW

Fares Ali, M. Sc.
Michael Schneider, M.Sc.
Prof. Dr.-Ing. **Matthias Weigold**

Institut für Produktionsmanagement,
Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW)
Technische Universität Darmstadt
Otto-Bernd-Str. 2, L1 | 01 Raum 27, 64287 Darmstadt
Tel. +49 (0)6151 / 16-20093
f.birk@ptw.tu-darmstadt.de
www.ptw.tu-darmstadt.de

Wettbewerbsfähige Wertangebote durch Business Ecosystems

Veränderung der Industrielogik im Maschinenbau – Teil 1

R. E. Geitner, O. Schöllhammer, T. Bauernhansl

Die Digitalisierung und der Wandel der Kundenbedürfnisse verändern das Nutzerverhalten sowie das Nutzenverständnis der Kunden und erfordern neue Wertangebote (Produkte und Dienstleistungen), auch im B2B-Bereich. Deshalb werden bisher getrennte oder vollständig neue Wertangebote zunehmend in gemeinsamen Geschäftsmodellen von einer Gruppe interagierender Akteure innerhalb von sogenannten Business Ecosystems gebündelt. Die Relevanz dieses Sachverhalts und die einhergehende Veränderung der Kooperationsart und Interaktionsintensität zwischen den Unternehmen (Industrielogik) wurde in einer Studie untersucht, bei der 16 Maschinenbauunternehmen teilnahmen. In diesem Beitrag werden die Ausgangssituation der Branche, der Stand der Forschung und die Zielsetzung der Studie beschrieben. In einem zweiten Teil, der in einer späteren wt Werkstattstechnik online-Ausgabe veröffentlicht wird, werden die wesentlichen Erkenntnisse der Studie diskutiert und ein zusammenfassender Ausblick gegeben.

STICHWÖRTER

Digitalisierung, Strategie, Management

Change of industrial logic in mechanical engineering sector – Part 1. Competitive value propositions offered by Business Ecosystems

Digitization and changes in customer needs affect both user behaviour and understanding and require new value propositions (products and services), also in the B2B sector. For this reason, previously separate or completely new value propositions are increasingly bundled in common business models by a group of interacting actors within so-called business ecosystems. The relevance of this issue and the associated change in the type of cooperation and interaction intensity between companies (industry logic) was investigated in a study with 16 mechanical engineering companies. This article describes the initial situation of the industry, the state of research and the objectives of the study. In a separate second part that is being published in a later issue of wt online the main findings of the study are discussed and a summarizing outlook is given.

1 Einleitung

Die Digitalisierung ermöglicht grundsätzlich neue, leistungsfähige Wertangebote durch die Vernetzung von Produkten und (Dienst-)Leistungsangeboten (**Bild, ①**). Auch können Prozesse deutlich effizienter gestaltet und die Transaktionskosten [1,2] reduziert werden (**Bild, ②**). In Verbindung mit neuen Wertangeboten wandeln sich die Bedürfnisse (**Bild, ③**) und in der Folge verändert sich die Bedarfsseite. „Mit der Zeit verändern sich das Konsumentenwissen und die Präferenzen der Kunden“ [3]. Ein typisches Beispiel ist die Zusammenführung von Funktionen des Telefons, Radios, Videos sowie Streaming- und anderer Dienstleistungen auf einer Smartphone-Plattform.

Die Fähigkeit, flexibel und reaktionsschnell traditionelle oder neue physische und digitale (Dienst-) Leistungen zu individuellen neuen Wertangeboten zu verbinden, wird daher zunehmend wettbewerbsentscheidend [4,5]. Da in diesem Zusammenhang

vermehrt Wertangebote aus unterschiedlichen Branchen zusammengeführt werden, verschwimmen die Branchengrenzen [6,7]. Die Unternehmen benötigen dementsprechend einen schnellen Zugriff, auch auf branchenfremde Kompetenzen und Ressourcen. Da ein Großteil der Firmen entsprechende Kompetenzen und Ressourcen nicht, beziehungsweise nicht schnell und flexibel genug aufbauen kann oder gar nicht aufbauen möchte, werden neue Formen der Zusammenarbeit erforderlich [8,9].

Im B2C gibt es erste Ansätze, dass Unternehmen in Form von sogenannten Business Ecosystems – verstanden als eine Gruppe von Akteuren, die gemeinsam agieren [10] – bisher getrennte oder vollständig neue Wertangebote in Geschäftsmodellen gemeinsam bündeln. Zum Beispiel baut die Helvetia-Versicherung im Rahmen einer strategischen Initiative das Ecosystem „Home“ auf. Das Ziel ist, über die klassischen Hausrat- und Haftpflichtversicherungen hinaus, mit von ihr orchestrierten Partnern Lösungsbausteine für alle Aspekte des Wohnens anzubieten. Dazu

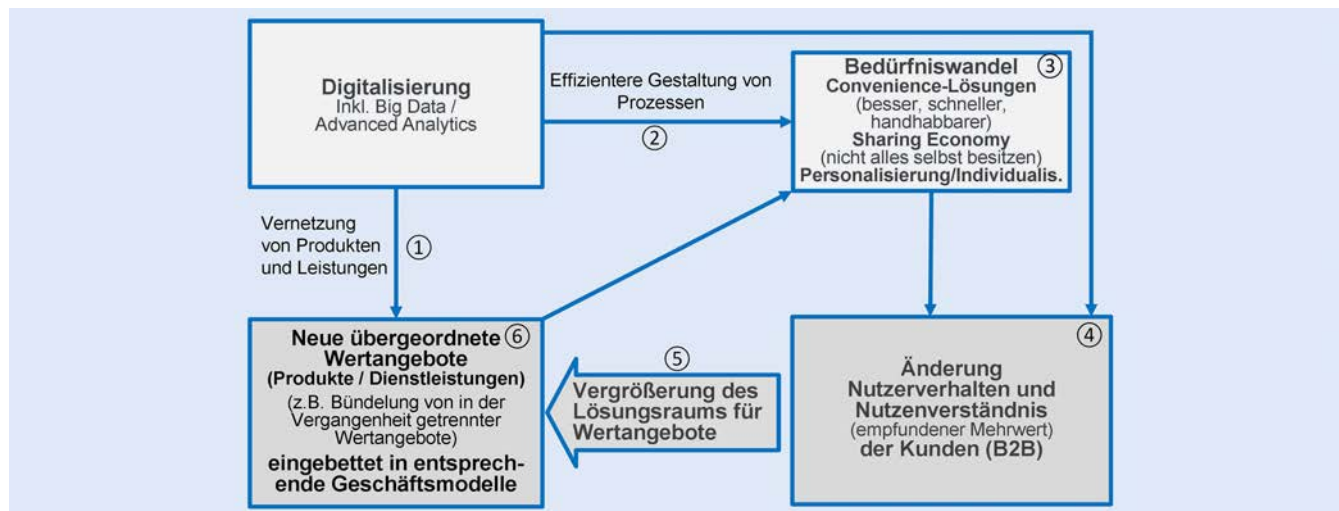


Bild. Nutzerverhalten und Nutzenverständnis vergrößert Lösungsraum für erforderliche Wertangebote. Bild: Institut für IFF

gehören unter anderem die Wohnungssuche, Finanzierung, Umzug, Versicherung, Sharing-Dienstleistungen und anderes mehr [11, 12].

Eine Vielzahl von Studien belegt, dass sich die Wettbewerbssituation insbesondere durch die Digitalisierung und deren Folgen auch im B2B-Bereich zunehmend verändern wird [13 – 15]. Daher stellt sich auch für viele Industrieunternehmen im Bereich B2B zunehmend die Frage, wie Wertangebote gemeinsam schneller und flexibler weiterentwickelt werden können. Beziehungsweise, wie unterschiedliche, in der Vergangenheit getrennte Wertangebote zu einem übergeordneten Wertangebot gebündelt werden können, um durch entsprechende Alleinstellungsmerkmale langfristig die Wettbewerbsfähigkeit abzusichern.

Sehr relevant ist hierbei die Entscheidung, wie das Unternehmen Zugriff auf die erforderlichen Ressourcen und Kompetenzen erhält: Erfolgt dies klassisch durch die Anpassung der Wertschöpfungsketten, also in Form des Auf-/Ausbaus entsprechender Kunden-/Lieferantenbeziehungen, durch entsprechende Akquisitionen, beziehungsweise in Form klassisch bekannter Konstellationen von strategischen Allianzen? Oder lässt sich das Unternehmen darüber hinaus auf eine offenere Zusammenarbeit in Form von Business Ecosystems ein und bündelt mit Dritten komplementäre Wertangebote zu einem gemeinsamen übergeordneten Wertangebot.

Es ist bereits eine Reihe von Veröffentlichungen zu Business Ecosystems (siehe Kapitel 2) und deren Ausprägungen verfügbar. Dargelegt wird die Entstehung und gegenseitige Abhängigkeit der Partner [16], die Rollen der Partner [17], die strategische Bedeutung wie zum Beispiel die Verlagerung des Wettbewerbs auf Ebene von Business Ecosystems [18, 19], oder die Möglichkeit für mittelständische Unternehmen mit komplementären Wertangeboten gegen größere, integrierte Unternehmen in Wettbewerb zu treten [20].

Eine konsequente Ableitung der Veränderung des Nutzerverhaltens und des Nutzenverständnisses der B2B-Kunden (Bild, ④), im Zuge der Digitalisierung und dem einhergehenden Bedürfniswandel sowie den Konsequenzen auf den Lösungsraum der Wertangebote (Bild, ⑤), liegt nach aktuellem Kenntnisstand nicht vor. Auch gibt es keine Untersuchung hinsichtlich der Veränderungen der Kooperationsart und Interaktionsintensität zwischen B2B-Unternehmen (Industrielogik), um mit anderen

Unternehmen Wertangebote gemeinsam schneller und flexibler weiterzuentwickeln beziehungsweise unterschiedliche, in der Vergangenheit getrennte Wertangebote zu einem übergeordneten Wertangebot zu bündeln und in entsprechende Geschäftsmodelle einzubinden (Bild, ⑥). Ebenfalls fehlt eine Einschätzung, wie offen B2B-Unternehmen einem Wandel zu ökosystemorientierter Zusammenarbeit [21] gegenüberstehen.

Um diese Wissenslücke schließen zu können, wurde die Studie in der B2B-Branche Maschinenbau, durchgeführt. In dieser Untersuchung wird die Relevanz von Business Ecosystems im Zusammenhang mit der Veränderung der Industrielogik aufgezeigt. Die Ergebnisse der Studie dienen darüber hinaus dazu, die Akteure für den notwendigen Wandel zu sensibilisieren. Auch leistet die Studie einen Beitrag zu den erforderlichen Grundlagen, auf deren Basis die Erarbeitung eines Rahmens zur Gestaltung von Business Ecosystems im Maschinenbau ermöglicht wird.

Untersuchungsgegenstand waren folgende Hypothesen:

- Digitalisierung in Verbindung mit dem Bedürfniswandel führen im Maschinenbau zur Veränderung des Nutzerverhaltens / Nutzenverständnisses der Kunden (Bild, ④).
- Deshalb sind künftig noch kundenspezifischere (individuellere, passgenauere) Wertangebote erforderlich. Neue übergeordnete Wertangebote, zum Beispiel durch das Bündeln von in der Vergangenheit getrennter Wertangebote, werden im Maschinenbau zunehmend relevant (Bild, ⑥).
- In Folge vergrößert sich der erforderliche Lösungsraum für künftige Wertangebote (Bild, ⑤).
- Um entsprechende Wertangebote anbieten zu können, muss sich die Kooperationsart und Interaktionsintensität (Industrielogik) der Unternehmen hin zu ökosystemorientierter Zusammenarbeit wandeln. In diesem Zusammenhang werden die Branchengrenzen verschwimmen.
- Nicht alle Unternehmen sind für eine Zusammenarbeit in Business Ecosystems offen.

Dieser erste Teil einer zweiteiligen Veröffentlichung hat folgende Grundstruktur: Kapitel 2 stellt den Stand der Forschung dar und klärt wesentliche Begrifflichkeiten. Daran anschließend werden in Kapitel 3 die Methoden, die dieser Arbeit zugrunde liegen, skizziert. Im 4. Kapitel, das Teil der zweiten Veröffentlichung ist, werden die Ergebnisse der Untersuchung in Themenkomplexen diskutiert. Abschließend erfolgt in Kapitel 5 ein zusammenfassendes

der Ausblick. Er soll weitere Anregungen für Forschungsansätze im Themenkomplex geben.

2 Definition und Stand der Forschung

2.1 Industrielogik

Die Autoren verstehen unter Industrielogik die Kooperationsart und Interaktionsintensität zwischen Unternehmen, die zur Erbringung von Wertschöpfung mit dem Ziel eines Wertangebotes für einen Endkunden notwendig sind.

Bei Industrieunternehmen erfolgt die Wertschöpfung entlang einer Wertschöpfungskette [22]. Ausgehend vom Rohmaterial erfolgt die Fertigung von Teilen und Komponenten bei unterschiedlichen Lieferanten beziehungsweise in unterschiedlichen Fabriken, bis das fertige Produkte beim Endkunden eintrifft. Dabei handelt es sich um einen deterministischen beziehungsweise statischen Prozess [23], bestehend aus einer Vielzahl von bilateralen Kunden-/Lieferantenbeziehungen [10]. Eine Wechselbeziehung zwischen mehreren Partnern des Systems gibt es nur im Zusammenhang mit Störungen (context of fragility) entlang der Wertschöpfungskette [10].

Der Kunde gibt nur die absolut notwendigen Informationen an den Lieferanten weiter. Auch eine Abstimmung der grundsätzlichen Ziele oder ein offenerer Informationsaustausch außerhalb bestehender Auftragsverhältnisse ist eher die Ausnahme. Interaktionen im Sinne einer gemeinsamen Gestaltung von Wertangeboten gibt es im Normalfall nicht. Dadurch wird viel Leistungspotenzial, auch für mögliche gemeinsame Wertangebote [24] der Unternehmen entlang der Wertschöpfungskette, verschenkt.

Gemäß *Normann* und *Ramírez* besteht Strategie in einem volatilen Wettbewerbsumfeld nicht in der Anordnung einer begrenzten Anzahl von Aktivitäten entlang der Wertschöpfungskette. Auch ist der strategische Fokus zunehmend nicht auf das Unternehmen oder die Branche gerichtet, sondern auf das Wertschöpfungssystem (Value Creating System), in welchem die verschiedenen wirtschaftlichen Akteure – Lieferanten, Geschäftspartner, „Mitstreiter“ und Kunden – zusammenarbeiten um Wert zu schaffen [25].

Damit wird initial die Entwicklung zu Wertschöpfungsnetzwerken beschrieben. Es handelt sich dabei um eine Anzahl (Set) von Akteuren (Unternehmen, Wettbewerbern Lieferanten, Kunden und Hersteller von Ergänzungsprodukten) [26]. Diese bilden sich mit zunehmender Komplexität heraus, insbesondere um neue Technologien herum (Value Networks) [27]. Im Vordergrund steht dabei eine erweiterte Lieferkette, welche meist die Kostenstruktur eines Fokalunternehmens bestimmt [20, 27]. *Kagermann* et al. beschreiben ein Wertschöpfungsnetzwerk als „Dezentrales polyzentrisches Netzwerk, das gekennzeichnet ist durch komplexe wechselseitige Beziehungen zwischen autonomen, rechtlich selbstständigen Akteuren. Es bildet eine Interessengemeinschaft von potenziellen Wertschöpfungspartnern, die bei Bedarf in gemeinsamen Prozessen interagieren. Die Entstehung von Wertschöpfungsnetzwerken ist auf nachhaltigen ökonomischen Mehrwert ausgerichtet. Besondere Ausprägungen von Wertschöpfungsnetzwerken werden als Business Webs bezeichnet“ [28]. Auch hier steht die Wertschöpfung und nicht unbedingt die Bündelung von unterschiedlichen Wertangeboten im Vordergrund.

Einen deutlichen Hinweis, dass sich die Kräfteverhältnisse in den klassischen Wertschöpfungsketten ändern, geben auch *Porter* und *Heppelmann* [5]. Sie führen aus, dass die Digitalisierung, ins-

besondere durch intelligente und vernetzte Produkte die Wertschöpfungsketten zerstört. Es werden mächtige neue Lieferanten erwartet, die traditionelle Hersteller bisher nicht benötigt haben, zum Beispiel Anbieter von Sensoren, Software, Konnektivität, Embedded-Betriebssystemen, Datenspeicherung oder Analytik.

Gehen Wertangebote über singular für sich stehende Produkte und Dienstleistungen inklusive kundenindividueller Lösungen hinaus, erfordert dies das Bündeln von in der Vergangenheit getrennten Wertangeboten [11]. In diesem Fall müssen oft Leistungen von Unternehmen einbezogen werden, die außerhalb ihrer bestehenden Wertschöpfungsstrukturen liegen [17]. Beispielsweise können dies bei Maschinenbauunternehmen auch neue Technologien, komplementäre Leistungen [6] Bearbeitungs- und Prozessstufen sein, auf welche ein Unternehmen keinen Zugriff hat. Es können aber auch Finanzierungen und andere Dienstleistungsangebote sein. Auch generieren Firmen, die Ressourcen und Kompetenzen teilen, einen Wettbewerbsvorteil gegenüber denen, die keine Kooperationen eingehen [29, 30]. Entsprechend dieser Entwicklung und im Zuge einer entsprechenden Denkweise [21] bilden sich zunehmend Business Ecosystems. Im Vergleich zu einem klassischen Wertschöpfungsansatz, in welchem Unternehmen Teil einer vertikal integrierten beziehungsweise statisch diskreten Lieferketten sind, kann man sich Business Ecosystems als überlappende Netzwerke vorstellen [23], die sich bilden, damit gemeinsam ein bestimmtes Wertangebot, gegebenenfalls bestehend aus einer Konfiguration in der Vergangenheit getrennter Wertangebote, realisiert werden kann.

2.2 Business Ecosystems

Unter Business Ecosystems wird analog zu *Adner* [10] eine Gruppe von Akteuren verstanden, die interagieren müssen, damit ein bestimmtes Wertangebot überhaupt zustande kommt; das heißt, eine Konfiguration von Aktivitäten, die durch das Wertangebot definiert sind. Dies kann auch die für die Verwirklichung des Wertangebots erforderlichen Innovationsstrukturen sowie Plattformen umfassen, die den Kundenzugang ermöglichen und absichern. Im Vergleich zu herkömmlichen Arten der Zusammenarbeit besteht hier eine gegenseitige Abhängigkeit der Akteure; eine Änderung des Wertangebots kann zu einer Veränderung der notwendigen Konstellation von Akteuren führen und vice versa [19]. Entsprechend können Unternehmen in mehreren Business Ecosystems mit unterschiedlichen Wertangeboten vertreten sein (siehe unter anderem [7]).

Business Ecosystems entstehen meist um einen zentralen Akteur herum. In der Fachliteratur wird er „Leader“ [31], „Hub“, „Keystone“ [17], „Focal Firm“ [10] oder „Orchestrator“ [9] genannt. Oft wird die spezifische Kompetenz in Business Ecosystems von sehr leistungsstarken Nischenherstellern geprägt. Daneben gibt es Partner mit austauschbaren Wertbeiträgen, so genannten „Commodities“ [17]. Merkmale von Business Ecosystems bilden unter anderem die Komplementarität und Modularität der Wertangebote [6]. Die dynamische Anpassungsfähigkeit von Business Ecosystems erlaubt es Unternehmen, im ständigen Wettbewerbswandel zu agieren. Damit beeinflussen sie strategisches Denken und unternehmerisches Handeln [18, 21].

Analog zur Beschreibung der Koevolution des Anthropologen *Gregory Bateson* [32] bezeichnet *Moore* [16] die erforderliche Koevolution und Wechselwirkung zwischen Unternehmen als Business Ecosystem. Basis für die gewählte Definition bilden die

Beschreibungen von Moore [16, 31] den Hartigh und van Asseldonk [33], Williamson et al. [9] Clarysee, Wright et al. [34] und Adner [10].

2.3 Nutzerverhalten und Nutzenverständnis

Die Definition von Nutzerverhalten leitet sich aus den einzelnen Definitionen von „Nutzer“ und „Verhalten“ ab. Die Nutzer im Kontext dieses Beitrags sind Anwender beziehungsweise Anwendergruppen, aber auch Organisationseinheiten oder ein Unternehmen insgesamt.

Die Verhaltenswissenschaft definiert Verhalten als „jenes Geschehen, das an einem Organismus oder von einem Organismus ausgehend, außenseitig wahrnehmbar ist. Der Prädiktor Geschehen weist darauf hin, dass Verhalten ein in der Zeit sich verändernder Sachverhalt ist.“ [38]. In der Studie wurde dazu die Veränderungen des grundsätzlichen Verhaltens in Bezug auf die Entwicklung der Kundenorientierung, die Entwicklung und Bereitstellung künftiger Wertangeboten, die Bedeutung von betrieblicher Leistung (Operational Excellence) sowie das strategischen Verhalten insgesamt untersucht.

Unter Nutzen wird „die Einschätzung des Verbrauchers bezüglich der Fähigkeit des Produktes zur Bedürfnisbefriedigung“ [36] verstanden. Der Nutzen wird allerdings unter Berücksichtigung der Kosten bewertet. Entsprechend erfolgt die Bewertung nach dem Kosten-/Nutzenverhältnis [35]. Das Nutzenverständnis berücksichtigt auch die Erwartungshaltung des Nutzers. Deshalb resultiert es aus „einem subjektiven Vergleich zwischen monetären und nichtmonetären Aufwendungen und Erträgen, die für den Nachfrager wahrnehmbar, relevant und bewertbar sind“ [37], also dem (empfundene) Mehrwert.

3 Methode

Die Forschungsfragen sollten einerseits über einen qualitativen methodischen Ansatz zur Sicherstellung der Realitätsnähe und andererseits durch einen quantitativen Ansatz zur Gewährleistung der Reproduzierbarkeit und zur Identifikation kausaler Zusammenhänge erschlossen werden. Der gewählte Mixed-Method-Ansatz [38, 39] ermöglicht durch „das Einnehmen unterschiedlicher Perspektiven auf denselben Forschungsgegenstand“ [40] eine umfassende Antwort auf die Forschungsfragen. Innerhalb des Methodenansatzes wurde das mehrgleisige Untersuchungsdesign (Multistrand Design) gewählt [41]. Es ist, im Gegensatz zum eingeleisigen Untersuchungsdesign, dadurch gekennzeichnet, dass nicht nur in der Empiriephase „mehrere Methoden zur Beantwortung derselben Fragestellung parallel zum Einsatz kommen“ [42], sondern, dass es auch die beiden anderen Phasen des Forschungsprozesses (Konzeptions- und Schlussphase) betreffen kann. Dieses Vorgehen erlaubte es, die Haltung und Aussagen der Befragten besser einzuordnen. Sie gewährt einen Einblick in das Innenleben der Unternehmen und zeichnet eine Tendenz auf, wohin die Branche sich bewegt.

Im Vorfeld der Studie wurde das Forschungsfeld Business Ecosystems durch entsprechende Literaturstudien analysiert. In der Konzeptionsphase [42] wurden die zur Untersuchung der unter Ziffer 1 abgeleiteten Aufgabenstellungen erforderlichen Fragestellungen formuliert und in einen Fragebogen und ein detailliertes Präsentationskonzept eingebettet.

An der zweistufigen Empiriephase haben 16 Maschinenbauunternehmen teilgenommen. Die Betriebe repräsentieren zwölf unterschiedliche Fachzweige, beziehungsweise Teilbranchen (Industry Segments) nach der VDMA Definition [43]. Die Auswahl unter Herstellern von Komponenten, Maschinen und Anlagen ist gewählt worden, um die Heterogenität der Industriebranche abzubilden. Die Unternehmen erhielten zunächst einen Fragebogen, zur Klärung der grundsätzlichen Organisations-, Auftrags- und Marktstrukturen. Dieser wurde mit einer Ausnahme von allen Teilnehmenden beantwortet. In einer zweiten Stufe erfolgte die Datenerhebung über Experten-Interviews [44] in Form von Einzel- und Gruppeninterviews in den einzelnen Unternehmen. An diesen nahmen jeweils mindestens ein Vorstand beziehungsweise Geschäftsführer teil.

Die Experten-Interviews fanden im Rahmen eines klar strukturieren und standardisierten Workshopkonzeptes statt. Der einleitende Teil führte in das Vorhaben ein und klärte zugleich das Verständnis der Begrifflichkeit Business Ecosystems. Daran anschließend wurden in Ergänzung zum vorab versendeten Fragebogen Informationen zur aktuellen Struktur des Unternehmens erfragt. Im dritten Teil des Workshops wurde die Relevanz der Digitalisierung und des Bedürfniswandels sowie deren Implikation auf das Nutzerverhalten und Nutzenverständnis der Kunden, aber auch auf das Unternehmen selbst erhoben. Anschließend wurden die Auswirkungen auf den künftigen Lösungsraum für Wertangebote beleuchtet. Im Folgenden wurden die sich daraus ergebenden Konsequenzen auf die Kooperations- und Interaktionsintensität mit anderen Unternehmen diskutiert sowie die in diesem Zusammenhang erforderliche Notwendigkeit und Bereitschaft eines an Ecosystemen orientierten Wandels erörtert.

Der diesem Workshop-Konzept zugrunde liegende Fragebogen enthielt geschlossene wie auch offene Fragen. Die Gespräche wurden auf Tonträger aufgezeichnet und später paraphrasierend transkribiert. Die Interviews dauerten in der Regel zwei Stunden. Der Zeitraum der Befragung war Februar bis Mai 2019, wobei die Workshop-Termine verteilt über diesen Zeitraum an unterschiedlichen Tagen stattfanden.

Die Auswertung der einzelnen Frage- und Antwortkomplexe erfolgte zunächst statistisch. In Verbindung mit der Auswertung der transkribierten Texte erfolgte dann eine Analyse und Interpretation der Erkenntnisse. Diese wurden in einem weiteren Schritt verdichtet.

Literatur

- [1] DaSilva, C. M.; Trkman, P.: Business Model: What It Is and What It Is Not. *Long Range Planning* 47 (2014) 6, pp. 379–389
- [2] Mahadevan, B.: Business Models for Internet-Based E-Commerce: An Anatomy. *California Management Review* 42 (2000) 4, pp. 55–69
- [3] Hoffmeister, C.: *Digitale Geschäftsmodelle richtig einschätzen*. München: Carl Hanser Verlag 2013
- [4] Vendrell-Herrero, F.; Bustinza, O. F.; Parry, G. et al.: Servitization, digitization and supply chain interdependency. *Industrial Marketing Management* 60 (2017), pp. 69–81
- [5] Porter, M. E.; Heppelmann, J. E.: Wie smarte Produkte den Wettbewerb verändern. *Harvard Business Manager* (2014) 12, pp. 34–60
- [6] Jacobides, M. G.; Cennamo, C.; Gawer, A.: Towards a theory of ecosystems. *Strategic Management Journal* 39 (2018) 8, pp. 2255–2276
- [7] Atluri, V.; Dietz, M.; Henke, N.: Competing in a world of sectors without borders. *McKinsey Quarterly* (2017) 3. Quartal. pp. 32–47
- [8] Adner, R.; Kapoor, R.: Value creation in innovation ecosystems: How the structure of technological interdependence affects firm performance in new technology generations. In: *Strategic Management Journal*, 31 (2010) pp. 306–333

- [9] Williamson, P. J.; Meyer, A. de: Ecosystem Advantage: How to Successfully Harness the Power of Partners. California Management Review 55 (2012) 1, pp. 24–46
- [10] Adner, R.: Ecosystem as Structure. Journal of Management 43 (2017) 1, pp. 39–58
- [11] Lings, B.; Gassmann, O.: Das Ende des Branchendenkens. Die Volkswirtschaft (2018) 7, S. 58–60
- [12] Huber, F.; Miehe, L.; Lings, B.: Helvetia: Neue Customer Journey im Ecosystem „HOME“. In: Gassmann, O.; Sutter, P. (Hrsg.): Digitale Transformation gestalten. Geschäftsmodelle, Erfolgsfaktoren, Checklisten. München: Hanser-Verlag 2019, S. 225–232
- [13] VDMA Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.; McKinsey & Company, Inc. (Hrsg.): How to succeed: Strategic options for European machinery. Shifting growth patterns, increasing pace of digitization, and organizational change. Frankfurt, Düsseldorf 2016
- [14] Bughin, J.; Catlin, T.; Hirt, M. et al.: Why digital strategies fail. McKinsey Quarterly (2018) 01, pp. 61–75
- [15] Roland Berger GmbH (Hrsg.): Plattformökonomie im Maschinenbau. Herausforderungen – Chancen – Handlungsoptionen. München 2018
- [16] Moore, J. F.: Predators and prey: a new ecology of competition. Harvard business review 71 (1993) 3, pp. 75–86
- [17] Iansiti, M.; Levien, R.: Strategy as Ecology. Harvard business review 82 (2004) 3, pp. 68–78
- [18] Zahra, S. A.; Nambisan, S.: Entrepreneurship and strategic thinking in business ecosystems. Business Horizons 55 (2012) 3, pp. 219–229
- [19] Geitner, R. E.; Bauernhansl, T.: Identifikation und Auswahl von Business Ecosystems. Grundsätzliches Vorgehen sowie strategische und operative Einbindung in Industrieunternehmen. wt Werkstattstechnik online 109 (2019) 4, S. 292–299. Internet: www.werkstattstechnik.de; Düsseldorf: VDI-Verlag
- [20] Hagel, J., III; Singer, M.: Unbundling the Corporation. Harvard Business Review 77 (1999) 2, pp. 133–141
- [21] Kumar, P.; Dass, M.; Kumar, S.: From competitive advantage to nodal advantage: Ecosystem structure and the new five forces that affect prosperity. Business Horizons 58 (2015) 4, pp. 469–481
- [22] Simchi-Levi, D.; Kaminsky, P.; Simchi-Levi, E.: Designing and managing the supply chain. Concepts, strategies, and case studies. New York: McGraw Hill 2008
- [23] Fuller, J.; Jacobides, M. G.; Reeves Martin: The Myths and Realities of Business Ecosystems. Before determining an ecosystem strategy, organizations must first shift to a new perspective and way of thinking. MIT Sloan Management Review 60 (2019) 2, pp. 1–9
- [24] Osterwalder, A.; Pigneur, Y.; Bernarda, G. et al.: Value Proposition Design. Entwickeln Sie Produkte und Services, die Ihre Kunden [wirklich] wollen. Frankfurt am Main: Campus-Verlag 2015
- [25] Normann, R.; Ramirez, R.: From value chain to value constellation: designing interactive strategy. Harvard business review 71 (1993) 4, pp. 65–77
- [26] Brandenburg, M.; Nalebuff, B. J.: Co-opetition. New York: Crown Business 1996
- [27] Christensen, C. M.; Rosenbloom, R. S.: Explaining the attacker's advantage: Technological paradigms, organizational dynamics, and the value network. Research Policy (1995) 24, pp. 233–257
- [28] Kagermann, H.; Wahlster, W.; Helbig, J.: Deutschlands Zukunft als Produktionsstandort sichern. Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0, Forschungsunion/acatech, Berlin/Frankfurt 2013
- [29] Dyer, J.; Singh, H.; Dyer, J. H.: The Relational View: Cooperative Strategy and Sources of Interorganizational Competitive Advantage. The Academy of Management Review 23 (1998) 4, pp. 660–679
- [30] Chesbrough, H. W.: Why companies should have open business models. MIT Sloan Management Review 48 (2007) 2, p. 22
- [31] Moore, J. F.: The rise of a new corporate form. The Washington Quarterly 21 (1998) 1, pp. 167–181
- [32] Bateson, G.: Mind and nature. A necessary unity. Toronto, New York: Bantam Books 1980
- [33] den Hartigh, E.; van Asseldonk, T.: Business ecosystems. A research framework for investigating the relation between network structure, firm strategy, and the pattern of innovation diffusion. ECCON 2004 Annual Meeting: Co-Jumping on a Trampoline, The Netherlands (2004)
- [34] Clarysee, B.; Wright, M.; Bruneel, J. et al.: Creating value in ecosystems: Crossing the chasm between knowledge and business ecosystems. ERC Research Paper No. 22. Enterprise Research Centre (2014) August
- [35] Faßnacht, G.: Verhalten. Internet: <https://www.spektrum.de/lexikon/psychologie/verhalten/16243>. Zugriff am 23.10.2019
- [36] Kotler, P.; Bliemel, F.: Marketing-Management: Analyse, Planung und Verwirklichung. München: Pearson Studium 2006
- [37] Schuh, G.; Georgi, L.: Kundenorientierte Konfiguration von Leistungsbündeln. In: Keuper, F.; Hogenschurz, B. (Hrsg.): Sales & Service. Wiesbaden: Gabler-Verlag 2008, S. 61–91
- [38] Buber, R.; Holzmüller, H. H. (Hrsg.): Qualitative Marktforschung. Konzepte – Methoden – Analysen. Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler | GWV Fachverlage GmbH 2007
- [39] Tashakkori, A.; Teddlie, C. (Hrsg.): Handbook of Mixed Methods in Social & Behavioral Research. Thousand Oaks 2003
- [40] Hussy, W.; Schreier, M.; Echterhoff, G.: Forschungsmethoden in Psychologie und Sozialwissenschaften für Bachelor. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2013
- [41] Tashakkori, A.; Teddlie, C.: The Past and Future of Mixed Methods Research: From Data Triangulation to Mixed Model Designs. In: Tashakkori, A.; Teddlie, C. (Hrsg.): Handbook of Mixed Methods in Social & Behavioral Research. Thousand Oaks 2003, pp. 671–701
- [42] Foscht, T.; Angerer, T.; Swoboda, B.: Mixed Methods Systematisierung von Untersuchungsdesigns. In: Buber, R.; Holzmüller, H. H. (Hrsg.): Qualitative Marktforschung. Konzepte – Methoden – Analysen. Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler | GWV Fachverlage GmbH 2007, S. 247–259
- [43] VDMA Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. (Hrsg.): Statistisches Handbuch für den Maschinenbau. Ausgabe 2018. Frankfurt: VDMA Verlag GmbH 2018
- [44] Kaiser, R.: Qualitative Experteninterviews. Wiesbaden: Springer Fachmedien 2014



Dipl.-Ing. (FH), Dipl.-Wirtschaftsing. (FH) **Richard E. Geitner**,
Bild: Autor

MBE (Univ.), Tech. Dipl.-Betriebsw. (FH) **Oliver Schöhlhammer**,
Prof. Dr.-Ing. **Thomas Bauernhansl**
Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb IFF
Universität Stuttgart
Nobelstr. 12
70569 Stuttgart
Tel. +49 (0)7361 / 610080
richard@geitner.org
www.iff.uni-stuttgart.de, www.ipa.fraunhofer.de

Herausforderungen und Chancen – Ergebnisse einer Umfrage

Energiespeicher für industrielle Einsatzoptionen

F. Zimmermann, D. Wang, A. Sauer

In produzierenden Unternehmen existiert eine Vielzahl von Einsatzoptionen für Energiespeicher. Jedoch scheitert eine Energiespeicherintegration oftmals an deren Wirtschaftlichkeit. Durch eine Umfrage zum Thema Energiespeicherintegration in produzierenden Unternehmen im Rahmen einer Studie konnten die Herausforderungen und Chancen einer Energiespeicherintegration identifiziert werden. Dieser Beitrag stellt die Ergebnisse vor.

STICHWÖRTER

Energieeffizienz, Fabrikplanung, Investitionsplanung

1 Einleitung

In vielen produzierenden Unternehmen sind bereits Energiespeicher integriert, dabei erfolgte die Integration bisher zumeist in Zwischenkreisen von Maschinen [1]. Hier werden Energiespeicher als unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) für sensible Prozesse eingesetzt [2]. Durch die technische Weiterentwicklung von Energiespeichertechnologien und die daraus folgende Reduktion der Investitionskosten werden weitere Einsatzoptionen für produzierende Unternehmen zunehmend wirtschaftlich [3]. Aktuell werden jedoch viele Potenziale für eine Energiespeicherintegration noch nicht genutzt. Vor diesem Hintergrund wurde eine Studie durchgeführt, um sowohl die möglichen Einsatzoptionen als auch die aktuellen Herausforderungen und Chancen für Energiespeicher in produzierenden Unternehmen zu identifizieren. Im Rahmen dieser Studie sind hierzu sowohl Experten als auch Industrieunternehmen befragt worden.

Auf Basis einer Literaturrecherche wurden im ersten Schritt die Einsatzoptionen für Energiespeicher in produzierenden Unternehmen sowie der aktuelle Stand der Technik von Energiespeichertechnologien aufbereitet. Durch Experteninterviews wurden im zweiten Schritt die ermittelten Einsatzoptionen sowie die Herausforderungen und Chancen einer Energiespeicherintegration plausibilisiert. Für eine möglichst breite Einschätzung wurden hierfür Experten aus den Bereichen Forschung, Anlagenbau, Systemintegration und Projektierung befragt. Im dritten Schritt wurde schließlich aufbauend auf den Experteninterviews ein Fragebogen entwickelt und als Online-Umfrage umgesetzt. An der Umfrage nahmen insgesamt 269 Personen von Unternehmen, die

Industrial applications for energy storages systems – Challenges and opportunities

Manufacturing companies have a large number of applications for energy storage systems. However, energy storage integration often fails due to its economic efficiency. A survey on the topic of energy storage integration in manufacturing companies as part of a study identified the challenges and opportunities of energy storage integration. This article presents the results.

Tabelle 1. Klassifikation von Einsatzoptionen nach der Speicherdauer [2]

Bezeichnung	Speicherdauer
Kurzfristige Speicher	Sekunden bis Minuten
Mittelfristige Speicher	Stunden bis Tage

sich für das Thema industrielle Energieversorgung interessieren, teil, davon flossen 136 Datensätze in die Auswertung ein. Die Ergebnisse der Studie werden in diesem Beitrag vorgestellt.

2 Einsatzoptionen für Energiespeicher in Industrieunternehmen

Für Energiespeicher bieten Industrieunternehmen eine Vielzahl an Einsatzoptionen. Ein Kriterium zur Unterscheidung der Einsatzoptionen ist die Dauer der Energiespeicherung, genannt Speicherdauer. Diese beschreibt den Zeitraum, welcher durch die Energiespeicherung überbrückt wird [2]. Anhand der Speicherdauer lassen sich die Einsatzoptionen klassifizieren (Tabelle 1).

In der Studie lag der Fokus der Untersuchungen auf kurz- und mittelfristigen Einsatzoptionen und den hiermit verbundenen Energiespeichertechnologien. Eine langfristige Energiespeicherung wie beispielsweise durch Power-to-X-Verfahren zum Ausgleich saisonaler Schwankungen wurde nicht betrachtet. Die kurz- bis mittelfristigen Einsatzoptionen lassen sich anhand des unternehmerischen Nutzens in drei Kategorien einteilen (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2. Einsatzoptionen für Energiespeicher in produzierenden Unternehmen nach unternehmerischen Nutzen

Absicherung der Produktion	Optimierung des Energiebezugs	Bereitstellung von Systemdienstleistungen
Versorgungssicherheit	Eigenverbrauchs-optimierung	Abschaltbare Lasten
Versorgungsqualität	Rekuperation von Bremsenergie	Regelenergiebereitstellung
	Handel an der Strombörse	
	Netzentgeltreduktion	

Zu den Einsatzoptionen zur Absicherung der Produktion zählen die Versorgungssicherheit sowie die Aufrechterhaltung der Versorgungsqualität. Für diese Einsatzoptionen sind Energiespeicher bereits am Markt verfügbar und werden bereits eingesetzt [2]. Der übergeordnete Nutzen der Einsatzoptionen ist die Vermeidung von Produktionsstörungen oder -ausschuss im Falle von Netzschwankungen oder -ausfällen und daraus resultierenden Qualitätsabweichungen des Produkts.

Die Einsatzoptionen der Kategorie Optimierung des Energiebezugs gewinnen vor dem Hintergrund der erforderlichen Effizienzsteigerung für Unternehmen an Bedeutung. Zu den Einsatzoptionen zur Optimierung des Energiebezugs gehören die Eigenverbrauchsoptimierung, die Rekuperation, die Lastspitzenreduktion zur Verringerung der Netzentgelte und die Lastverschiebung durch Handel an der Strombörse. Das übergeordnete Ziel dieser Einsatzoptionen ist das Reduzieren von Energiekosten entweder durch eine Reduktion des Energieverbrauchs (Energieeffizienzsteigerung) oder das Anpassen des Leistungsbezugs, um das Netzentgelt zu verringern.

In der dritten Kategorie der Einsatzoptionen Bereitstellung von Systemdienstleistungen werden Energiespeicher netzdienlich eingesetzt. Darunter ist zu verstehen, den Energiespeicher so einzusetzen, dass dieser zur Stabilisierung des übergeordneten Energiesystems beiträgt [4]. Das zur Verfügung stellen und tatsächliche Abrufen der Kapazitäten wird von dem zugehörigen Übertragungsnetzbetreiber je nach Produkt unterschiedlich vergütet. Zu den Systemdienstleistungen zählt die Regelenergiebereitstellung, aufgeteilt in Primärregelleistung, Sekundärregelleistung und Tertiärregelleistung, sowie die abschaltbaren Lasten. Das übergeordnete Ziel dieser Einsatzoptionen ist das Erwirtschaften von Erlösen durch die Bereitstellung von Systemdienstleistungen. Eine weitere Einsatzoption dieser Kategorie wäre die Bereitstellung der Momentanreserve, jedoch gibt es gegenwärtig für diese Einsatzoption keine Vergütung [4].

3 Herausforderungen und Chancen für Energiespeicher – Ergebnisse einer Umfrage

Zur Beobachtung und Analyse wurde die aktuelle Situation im Markt durch Experteninterviews und einer Umfrage nach den aktuellen Einsatzoptionen von Energiespeichern im Unternehmen, sowie den Herausforderungen und Chancen für den Einsatz von Energiespeichern erfasst. Für die Umfrageergebnisse gilt, dass die Auswertungen jeweils die Anzahl der abgegebenen Antworten (n), die von einer bestimmten Anzahl an Teilnehmern

(m) abgegeben wurden, darstellen. Für die Auswertung wurden alle Antworten der Umfrageteilnehmer in die beiden Gruppen Nutzer (Energiespeicher bereits vorhanden) und Interessierte (noch kein Energiespeicher vorhanden) aufgeteilt, um Unterschiede zu identifizieren und daraus Handlungsempfehlungen abzuleiten. Die Ergebnisse werden in diesem Kapitel vorgestellt.

3.1 Einsatzoptionen im Markt

Wie bereits erwähnt, gehören die Einsatzoptionen zur Absicherung der Produktion zum aktuellen Stand der Technik. Diese Einschätzung teilen auch die Experten in den Interviews. Die aktuell am häufigsten genutzte Einsatzoption ist laut Experten die unterbrechungsfreie Stromversorgung, immer relevanter werden jedoch die Eigenverbrauchsoptimierung und die Netzentgeltreduktion. **Bild 1** zeigt die Einsatzoptionen, für welche die Nutzer einen Energiespeicher aktuell bereits nutzen.

Es ist zu erkennen, dass die Nutzer, im Gegensatz zu den Expertenaussagen, die Einsatzoptionen zur Optimierung des Energiebezugs (Energierückgewinnung, Netzentgeltreduktion und Eigenverbrauchsoptimierung) an erster Stelle sehen (49 %). An zweiter Stelle steht die Absicherung der Produktion 30 % (Prozessstabilisierung und Entkopplung von der Energieversorgung). Die netzdienlichen Einsatzoptionen spielen eher eine untergeordnete Rolle oder stellen ein Nebeneffekt aus anderen Einsatzoptionen dar. Dies zeigt deutlich, dass die Einsatzoptionen zur Optimierung des Energiebezugs bei den Unternehmen an Bedeutung gewonnen haben.



Bild 1. Aktuelle Einsatzoptionen der bereits integrierten Energiespeicher (ausschließlich Nutzer) [5] Bild: Fraunhofer IPA

Je nach Einsatzoption spielt auch der physische Integrationspunkt für den Energiespeicher eine Rolle, das heißt auf welcher Produktionsebene die Integration eines Energiespeichers stattfand beziehungsweise stattfinden würde. Bei der Frage nach dem Integrationspunkt anhand der Produktionsebenen ergibt sich aus den Experteninterviews kein klares Bild, da dies zu stark von der jeweiligen Einsatzoption und Unternehmensgröße abhängt. Die Ergebnisse der Umfrageteilnehmer zeigen ein zweigeteiltes Bild zwischen Nutzern und Interessierten (siehe **Bild 2**).

44 % beziehungsweise 47 % der Nutzer integrierten einen Energiespeicher auf Werks- oder Hallenebene oder in kleinen dezentralen Energiespeichern auf Maschinen- und Anlagenebenen.

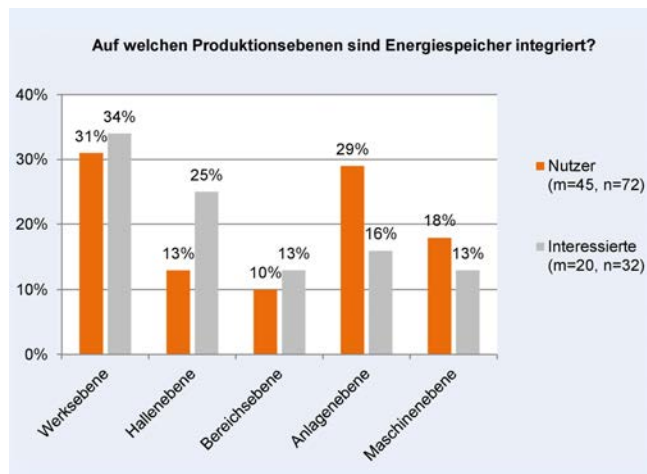


Bild 2. Integrationspunkt einer Energiespeicherintegration nach Produktionsebenen [4] Bild: Fraunhofer IPA

Dieses Ergebnis spiegelt auch die Fragestellung wieder, inwiefern ein großer zentraler Energiespeicher oder mehrere dezentrale kleine Energiespeicher für eine Energiespeicherintegration in Frage kommen. Demgegenüber würden 59 % der Interessierten bevorzugen, einen Energiespeicher auf Werks- oder Hallenebene zu integrieren. Eine Energiespeicherintegration auf unteren Produktionsebenen wird von den Interessierten nicht so stark befürwortet wie von den Nutzern. Der Grund für die Tendenz der „Interessierten für einen großen zentralen Energiespeicher kann in einem geringeren Risiko liegen, da der Fertigungsprozess von einem zentralen großen Energiespeicher nicht betroffen ist. Zentrale Energiespeicher bieten die Möglichkeit, das Werk oder die Halle energetisch vollständig vom Netz zu entkoppeln. Ein weiterer Vorteil dieser großen zentralen Energiespeicher liegt in der Möglichkeit sie multifunktional einsetzen zu können [6], um durch mehrere Einsatzoptionen die Wirtschaftlichkeit der Energiespeicher zu optimieren.

3.2 Herausforderungen einer Energiespeicherintegration

Die beiden Umfrageergebnisse zeigen durch die Vielfalt der Einsatzoptionen und Integrationspunkte die Komplexität einer Energiespeicherintegration auf. Die Vielzahl an Einsatzoptionen und Integrationspunkten sind für jeden individuellen Fall auf die Wirtschaftlichkeit zu überprüfen. Um Faktoren herauszufinden, welche die Integration von Energiespeichern ausbremsen, wurden durch die Experten sowie Umfrageteilnehmer die aktuellen Herausforderungen identifiziert. Einige sind die Experten sowie die Umfrageteilnehmer, die bereits einen Energiespeicher nutzen, in drei zentralen Herausforderungen:

- **Wirtschaftlicher Faktor:** Dieser ist am wichtigsten, da den hohen Investitionskosten zu geringe Kosteneinsparungen gegenüberstehen.
- **Regulatorischer Faktor:** Am zweitwichtigsten sind für die Nutzer regulatorische Hürden. Die Experten verweisen vor allem auf die fehlenden regulatorischen Rahmenbedingungen im Bereich Automobil und Sicherheitstechnik.
- **Wissensfaktor:** Zu wenige Erfahrungswerte stellen die drittgrößte Herausforderung für die Umfrageteilnehmer dar. Auch die Experten sind durchweg der Meinung, dass in diesem Bereich Know-how und praxisnahe Demonstratoren fehlen.

Die drei Punkte spiegeln 60 % der Umfrageantworten wider. Die übrigen 40 % verteilen sich auf neun weitere Herausforderungen. Dabei gibt es erhebliche Abweichungen in den Antworten zwischen den Teilnehmergruppen Nutzer und Interessierte bei den Herausforderungen fehlendes Wissen über die Hersteller, komplexe Auslegung und Dimensionierung und Instandhaltungsaufwand. Ungefähr doppelt so viele Interessierte sehen in den genannten Punkten eine Herausforderung. Umgekehrt sehen die Interessierten die Herausforderungen regulatorische Hürden und großer Platzbedarf als weniger wichtig an. Die Experten weisen zudem darauf hin, dass gerade im Bereich der Mobilität technische Anforderungen wie hohe Leistungsdichten existieren, die mit den aktuell am Markt verfügbaren Energiespeichertechnologien nur schwer umsetzbar sind. Daneben mangelt es oft an einer verlässlichen Informationsbasis, zum Beispiel bei Verbrauchsdaten und Lastgängen, welche für die Auslegung von Energiespeichern eine Grundvoraussetzung darstellen.

3.3 Wirtschaftlichkeit von Energiespeichern

Da die Wirtschaftlichkeit nach wie vor eine der größten Herausforderungen bei einer Energiespeicherintegration ist, wurden die unterschiedlichen wirtschaftlichen Bewertungsmethoden analysiert (siehe **Bild 3**).

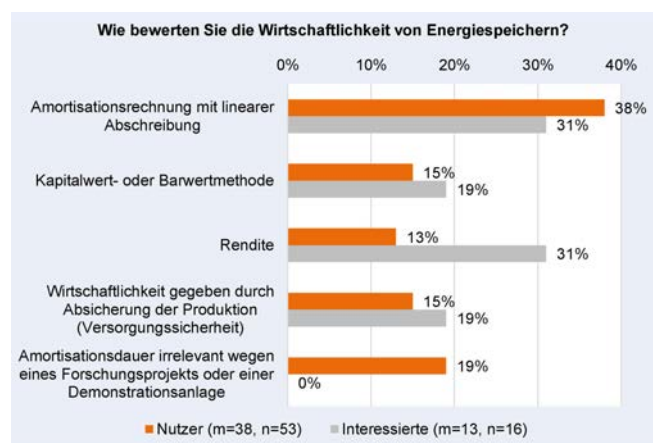


Bild 3. Wirtschaftliche Bewertungsmethoden für Energiespeicher [5] Bild: Fraunhofer IPA

Aus Sicht der Experten gestaltet sich die Wirtschaftlichkeitsrechnung als schwierig, denn eine reine Nutzung der Energiespeicher zur Speicherung von Energie ist an sich meist nicht wirtschaftlich. Allerdings kann die synergetische Nutzung eines Energiespeichers beispielsweise in Kombination mit einer USV eine wirtschaftliche Investition mit vergleichsweise kurzer Amortisationszeit darstellen. Interessant ist, dass für Interessierte die Amortisationsrechnung (mit linearer Abschreibung) und die Rendite gleich wichtig sind (jeweils 31 %). Ebenso verhält es sich mit der Kapitalwertmethode und der Wirtschaftlichkeit gegeben durch die Absicherung der Produktion (jeweils 19 %). Dagegen gaben die Nutzer klar die Amortisationsrechnung als das wichtigste Bewertungsinstrument (38 %) an. Im Gegensatz dazu ist an zweiter Stelle die Amortisationszeit aufgrund eines Forschungsprojektes als irrelevant eingestuft worden (19 %). Die übrigen 4 % verteilen sich relativ gleichmäßig auf Kapitalwertmethode, Rendite und Produktionsabsicherung. Aufgrund der

großen Bedeutung der Amortisationszeit sowohl für die Nutzer als auch für die Interessierten wurde die geplante Amortisationszeit von Nutzern und Interessierten verglichen (siehe **Bild 4**).

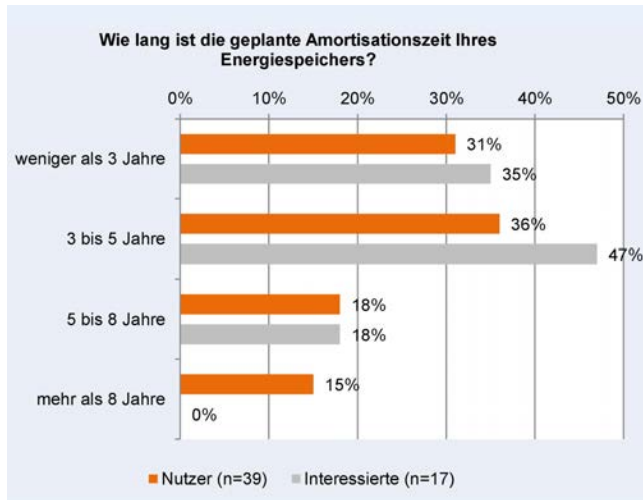


Bild 4. Geplante Amortisationszeit von Energiespeichern [5]
Bild: Fraunhofer IPA

Für die geplante Amortisationszeit ergibt sich ein ähnliches Bild bei Nutzern und Interessierten: In beiden Gruppen gaben 18 % an, mit fünf bis acht Jahren Amortisationszeit zu planen; ungefähr ein Drittel plant in beiden Gruppen jedoch mit weniger als drei Jahren. Die meisten beider Gruppen planen mit einer Amortisationszeit von drei bis fünf Jahren (36 % der Nutzer und 47 % der Interessierten). Während 15 % der Nutzer sogar mit mehr als acht Jahren planen, hat keiner der Interessierten solch einen langen Zeitraum veranschlagt. Die Ergebnisse decken sich also nicht ganz mit der Expertenaussage, dass meist eine Amortisationszeit von fünf bis acht Jahren angestrebt wird. Beim Abgleich der Ergebnisse der Nutzer zwischen der geplanten und der tatsächlichen Amortisationszeit ergibt sich folgendes Bild (siehe **Bild 5**).

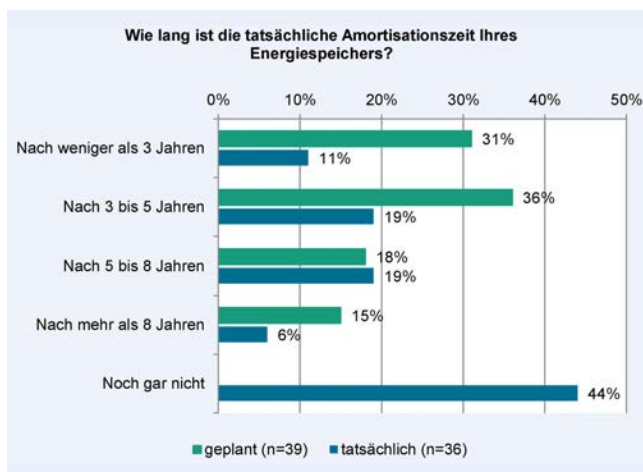


Bild 5. Vergleich der geplanten mit der tatsächlichen Amortisationszeit (ausschließlich Nutzer) [5] Bild: Fraunhofer IPA

Beinahe die Hälfte aller installierten Energiespeicher hat sich bisher noch nicht amortisiert. Mit jeweils 19 % liegt der Großteil der bisher tatsächlich amortisierten Energiespeicher in einem Zeitbereich von drei bis fünf beziehungsweise fünf bis acht Jahren. Obwohl ein knappes Drittel der Nutzer mit einer Amortisationszeit von unter drei Jahren geplant hat, konnten sich bisher lediglich 11 % der Energiespeicher tatsächlich innerhalb dieser Zeitspanne amortisieren. Generell scheint die optimistische Planung (67 % der Energiespeicher sollten sich innerhalb von fünf Jahren amortisieren) in der Realität bisher noch nicht zutreffen. Nur 30 % der Energiespeicher haben sich bisher innerhalb von fünf Jahren amortisiert. Es zeigt sich, dass die zentrale Herausforderung der Wirtschaftlichkeit besonders durch die hohen Investitionskosten und die Anforderung an eine möglichst geringe Amortisationszeit beeinflusst wird.

3.4 Chancen für Energiespeicher in Industrieunternehmen

Insgesamt hat sich gezeigt, dass grundsätzlich vier Treiber existieren, welche Anwender zu einer Energiespeicherintegration bewegen können (siehe **Bild 6**). Diese sind:

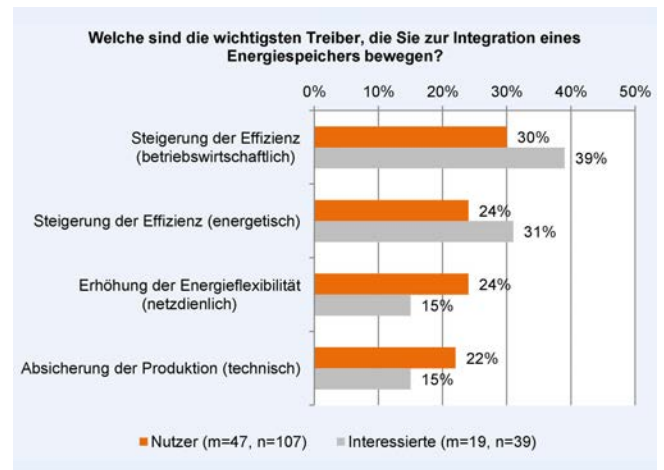


Bild 6. Gründe für die Integration von Energiespeichern [5]
Bild: Fraunhofer IPA

- Kostenreduktion durch Anpassung des Leistungsbezugs (betriebswirtschaftliche Sicht)
- Kostenreduktion Energieeffizienzsteigerung (energetische Sicht)
- Absicherung der Produktion (Produktionssicht)
- Erhöhung der Energieflexibilität (Netzdienlichkeit)

Für die Umfrageteilnehmer haben alle vier Treiber eine Relevanz. Jedoch unterscheidet sich die Aufteilung der Antworten zwischen den Nutzern und Interessierten. Während die Interessierten hauptsächlich die betriebswirtschaftliche (39 %) und energetische (31 %) Effizienzsteigerung im Fokus haben, ist die Aufteilung der vier Treiber unter den Nutzern insgesamt gleichmäßiger. Die Steigerung der betriebswirtschaftlichen Effizienz ist zwar auch bei den Nutzern wichtiger (30 %), aber die übrigen 70 % verteilen sich ungefähr gleich auf die weiteren drei Treiber. Die Experten sehen neben der Absicherung der Produktion außerdem einen weiteren Treiber bei Entwicklungen von Anwendungen bei den

Kunden. Das kann so verstanden werden, dass bereits Kundennachfrage für eine Energiespeicherintegration vorhanden ist.

4 Fazit

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass für Energiespeicher viele Einsatzoptionen im industriellen Umfeld existieren. Grundsätzlich kann zwischen den Einsatzoptionen zur Absicherung der Produktion, Optimierung des Energiebezugs und Systemdienstleistungen unterschieden werden. Bereits etabliert sind die Einsatzoptionen zur Absicherung der Produktion, während die Einsatzoptionen zur Optimierung des Energiebezugs für produzierende Unternehmen immer interessanter und auch wirtschaftlicher werden. Die Einsatzoptionen durch Systemdienstleistungen werden nur als Nebeneffekt zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit gesehen.

Die Umfrage hat gezeigt, dass die Integration von Energiespeichern in produzierenden Unternehmen durchaus bereits eine Rolle spielt. Die größte Herausforderung ist und bleibt jedoch die Wirtschaftlichkeit. Besonders die hohen Investitionskosten der Energiespeicher und die hohen Anforderungen der Unternehmen an geringe Amortisationszeiten stellen eine Hürde dar. Neben der Wirtschaftlichkeit sind jedoch auch die Regulierungen eine Herausforderung für die Energiespeicherintegration. Außerdem mangelt es im Industriesektor an Erfahrung, Know-how und praxisnahen Demonstratoren. Der größte Treiber für die Energiespeicherintegration ist die Notwendigkeit zur Effizienzsteigerung sowohl aus betriebswirtschaftlicher als auch aus energetischer Sicht. Eine Möglichkeit die Wirtschaftlichkeit zu erhöhen, ist der multifunktionale Betrieb des Energiespeichers [6], das heißt den Energiespeicher für mehrere Einsatzoptionen zu nutzen und dadurch mehrere Erlöse oder Kosteneinsparungen, je nach Einsatzoptionen, zu erzielen.

Die gesamte Studie zu den identifizierten und analysierten Einsatzoptionen, mit einem Überblick aktueller Energiespeichertechnologien sowie allen Ergebnissen der Umfrage finden sich auf der Homepage des Fraunhofer-Instituts für Produktionstechnik und Automatisierung IPA (www.ipa.fraunhofer.de) und des Instituts für Energieeffizienz in der Produktion EEP der Universität Stuttgart (www.eep.uni-stuttgart.de).

DANKSAGUNG

Die Autoren danken dem Umweltministerium des Landes Baden-Württemberg, welches das Forschungsvorhaben und damit diese Arbeit, gefördert hat.

Literatur

- [1] Fahlbusch, E. (Hrsg.): Batterien als Energiespeicher. Beispiele, Strategien, Lösungen. Berlin, Wien, Zürich: Beuth Verlag GmbH 2015
- [2] Köhler, A. R.; Baron, Y.; Bulach, W. et al.: Ökologische und ökonomische Bewertung des Ressourcenaufwands. Stationäre Energiespeichersysteme in der industriellen Produktion 2018. Internet: https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/downloads/studien/VDI-ZRE_Studie_Energiespeichertechnologien_bf.pdf. Zuletzt aufgerufen am 13.08.2019
- [3] Rothacher, T.; Schwarzbürger, H.; Tinke, T.: Stromspeicher für Gewerbe und Industrie. Technik, Auswahl und Auslegung. Mit Anmerkungen für Heimspeicher. Berlin: Beuth Verlag GmbH 2018
- [4] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.: Bereitstellung von (System-)Dienstleistungen im Stromversorgungssystem: Beitrag von Energiespeichern 2016. Internet: www.bdew.de/media/documents/Awh_20160725_SDL-Energiespeicher.pdf. Zuletzt aufgerufen am 28.11.2019
- [5] Zimmermann, F.; Emde, A.; Laribi, R. et al.: Energiespeicher in Produktionssystemen (ESIP-Studie). Herausforderungen und Chancen für industrielle Einsatzoptionen. <https://doi.org/10.24406/ipa-n-552073>. Zuletzt aufgerufen am 08.08.2019
- [6] Kanggießer, A.: Entwicklung eines generischen Modells zur Einsatzoptimierung von Energiespeichern für die techno-ökonomische Bewertung stationärer Speicheranwendungen. Dissertation, Technische Universität Dortmund 2013



Dipl.-Wi.-Ing. (FH) **Fabian Zimmermann**, MBE

Bild: Autor

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA
Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart
Tel. +49 (0)711 / 970-1908
fabian.zimmermann@ipa.fraunhofer.de
www.ipa.fraunhofer.de

Dipl.-Wi.-Ing. **Diana Wang**,
Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. **Alexander Sauer**

Institut für Energieeffizienz in der Produktion EEP
Universität Stuttgart
Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart
Tel. +49 (0)711 / 970-3839, -3600
diana.wang@eep.uni-stuttgart.de
alexander.sauer@eep.uni-stuttgart.de
www.eep.uni-stuttgart.de