

Titel

Analyse der Anwendung von Machine Learning Methoden für die Echtzeitüberwachung der Zerspanung inhomogener Werkstoffe zur Beurteilung von Werkzeugzustand und Werkstückqualität in kleinen und mittelständischen Unternehmen

IGF-Nr.: 22150 N

Forschungseinrichtungen

Forschungseinrichtung 1: Institut für Werkzeugforschung und Werkstoffe
Papenberger Straße 49, 42859 Remscheid (IFW-R)

Forschungseinrichtung 2: Institut für Werkzeugmaschinen
Holzgartenstraße 17, 70174 Stuttgart (IFW-S)



Ansprechpartner beim IFW-R:

Dr.-Ing. Robin Roj
+49 (2191) 5921-122
roj@fgw.de

Ansprechpartner beim IFW-S:

Dr.-Ing. Thomas Stehle
+49 (711) 685-83866
thomas.stehle@ifw.uni-stuttgart.de

Danksagungen

Das IGF-Vorhaben 22150 N der Forschungsvereinigung Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V. – FGW, Papenberger Straße 49, 42859 Remscheid wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Ausgangssituation

In industriellen zerspanenden Bearbeitungsprozessen ist die Gewährleistung der Prozessstabilität für die Sicherstellung der Werkstückqualität von hoher wirtschaftlicher Relevanz. Werden Abweichungen nicht rechtzeitig erkannt, führt dies zu Produktionsfehlern und damit verbundenen Nachbearbeitungen oder Neuanfertigungen. Mittels selbstlernenden Überwachungsmethoden ist es möglich, den Werkzeug- und Werkstückzustand im laufenden Prozess zu bewerten und kritische Vorgänge zu melden. Für die Realisierung eines derartigen Systems ist der Ist-Zustand kontinuierlich zu analysieren, sodass mögliche Abweichungen zum Soll-Zustand detektiert und an den Maschinenbediener weitergegeben werden können. Insbesondere kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) besitzen aus Kapazitätsgründen oft nicht die Möglichkeit eine derartige Prozessanalyse auf Basis künstlicher Intelligenz (KI) in ihren Fertigungsumgebungen zur zerspanenden Bearbeitung zu implementieren.

Ein beträchtlicher Kostenfaktor entsteht im Rahmen der Bearbeitung von schwer zerspanbaren und inhomogenen Materialien. Zwar sind Hardware- und Software-Systeme zur sensorischen Ausstattung und Auswertung der gewonnenen Daten kommerziell erhältlich; diese sind jedoch im oberen Preissegment angesiedelt und meist nicht auf die besonderen Anforderungen von KMU ausgerichtet. Die Implementierung derartiger Systeme umfasst die Themenkomplexe sowie den Funktionsumfang aus den Bereichen der Anomalieerkennung, der Predictive Quality, der Predictive Maintenance sowie weiteren spezifischen Ansätzen auf dem Weg zur Industrie 4.0.

Forschungsziel

Das übergeordnete Ziel des Projektes bestand darin, KMU aus dem Bereich der zerspanenden Fertigung einen einfachen Einstieg in die Nutzung von KI für die Analyse ihrer Fertigungsprozesse zu ermöglichen. Der Fokus lag dabei auf schwer bearbeitbaren Materialien mit dem Ziel die Effizienz der Maschinen- und Werkzeugnutzung zu steigern und Verschleißerscheinungen zu reduzieren.

Bezogen auf die Vorgehensweise während der Bearbeitung konnten die Teilziele wie folgt formuliert und in vier Kategorien eingeteilt werden:

I Einstieg für KMU in KI

1. Mit der Erarbeitung eines Handlungsleitfadens, galt es Unternehmen und insbesondere KMU einen niederschweligen und kostengünstigen Einstieg in die KI-basierte Erhebung, intelligente Analyse und Nutzung von Prozessdaten zur Verfügung zu stellen.
2. Zur Abhebung vom wissenschaftlichen Stand der Technik sowie von kommerziellen Zukaufslösungen waren Optionen für einen Einstieg in die KI-Technologie aufzuzeigen, die mit möglichst geringem technologischen Aufwand zu realisieren und möglichst ohne IT-technisches Fachwissen zu implementieren sind.

II Effizienzsteigerung und Ressourcenschonung

3. Da es sich bei der zerspanenden Bearbeitung von verschleißbeständigen Materialien um besonders intensive Prozesse für Maschine und Werkzeug handelt, wurden die Versuche im Projekt so konzipiert, dass hauptsächlich die Zerspanung von derartigen Werkstoffen untersucht wurde. Hier bestand ein Teilziel darin, einen effizienten Einsatz von Maschinen und Werkzeugen zu gewährleisten und somit aus allgemeiner Sicht möglichst viele Ressourcen einzusparen.
4. In diesem Themenkomplex bewegt sich das Teilziel der vorhersagbaren Qualität, das als Predictive Quality bezeichnet wird. Mit Hilfe der Implementierung einer geeigneten Sensorik, IT-Infrastruktur sowie Auswertungsalgorithmik galt es die Werkstückqualität schon während der Fertigung sicherzustellen bzw. vorherzusagen.
5. Die Erreichung von Teilziel 4 bildet eine Voraussetzung für Teilziel 5 und ermöglicht unmittelbar das Einsparen von Prüfschritten und die Reduktion von Nachbearbeitungsaufwänden sowie die Einsparung bzw. gezielte Planung von nachfolgenden Qualitätsprüfungs- und Nachbearbeitungsschritten.
6. Zur Überwachung der Abläufe und Vorhersage der Produktqualität wurde eine frühzeitige Erkennung von Prozessabweichungen und Produktionsfehlern als weiteres Teilziel angesetzt.
7. Diese frühzeitige Erkennung von Abweichungen bzw. Anomalien ermöglicht erst eine Vermeidung der Weiterbearbeitung fehlerhafter Bauteile, bei denen angestrebt wurde, diese frühzeitig als Ausschuss zu kennzeichnen, so dass keine weiteren Aufwände bei der Weiterbearbeitung entstehen.
8. Als weiteres Teilziel wurde der Fachbegriff Predictive Maintenance für eine vorausschauende Wartung definiert, die eng mit der allgemeinen Unternehmens- bzw. Auftragsbearbeitungsorganisation sowie der Verbesserung dieser verknüpft ist. Durch die geschickte Taktung von Stillstandzeiten sowie Wartungs- und Reparaturperioden galt es die Fertigungseffizienz bzw. die Produktionskapazität auf Basis von KI-basierten Informationen zu erhöhen.

III Hardware- und Softwareeffizienz

9. Zur Gewährleistung des angestrebten Informationserhalts bzw. zur Gewinnung der intendierten Erkenntnisse galt es für das jeweilige Fertigungsverfahren jeweils eine geeignete IT-Infrastruktur zu konzipieren und aufzubauen, welche die Sensordatenerfassung, -aufbereitung, -weiterverarbeitung und -analyse sicherstellte.
10. Während der softwareseitige Schwerpunkt auf eine Open-Source Eigenentwicklung auszurichten war, bestand ein weiteres Teilziel darin, die wissenschaftlich-technischen Möglichkeiten auf der Hardwareseite zu ermitteln und zu bewerten. Diese Bewertung war mit der Forschungsfrage verknüpft, welcher Aufwand zur hard- und softwareseitigen Datenerfassung für aussagekräftige Ergebnisse zu betreiben war.
11. Bereits die Ermittlung des minimal nötigen Aufwands im Rahmen von ökonomischen oder zeitlichen Investitionen sollte mit der Beantwortung der Frage nach den

Datenmengen, den benötigten Rechenkapazitäten sowie den Anstrengungen zur Implementierung und dem Betrieb in Verbindung gebracht werden.

12. Auch hier galt es, die Teilziele im Bereich der Hard- und Softwareimplementierung mit den ökonomischen Aspekten für Unternehmen und insbesondere KMU zu verknüpfen und Ansätze zu entwickeln, mit möglichst geringem Aufwand die angestrebten Ergebnisse noch zu erreichen.

IV Unternehmensorganisation

13. Neben den angestrebten technischen Entwicklungen zur Analyse von zerspanenden Fertigungsprozessen konnten von diesen weitere Teilziele aus dem Bereich einer geschickten Unternehmensorganisation sowie dem Prozessmanagement abgeleitet werden. Bspw. bestand ein Teilziel darin, den Maschinen- und Prozessbetreibern eine Überwachungs- bzw. Analysewerkzeug zur Verfügung zu stellen, das einen Überblick gewährleistet und eine entsprechende Ableitung von nötigen Tätigkeiten und Handlungen ermöglicht.
14. Der in der Prozessüberwachung inkludierte Aufbau einer Datenbasis zur Weiterverarbeitung und Archivierung innerhalb der Forschungseinrichtungen und Unternehmen konnte als sekundäres Teilziel angenommen werden. Dieses ist im Bereich des Wissensmanagements sowie dem Aufbau einer Datenbank anzusiedeln.
15. Mit dem Aufbau eines derartigen Datenstocks bzw. der Filterung von relevanten Informationen sowie insbesondere der Verknüpfung von Fertigungsprozessen und Informationsflüssen können die unterschiedlichen Themengebiete bzw. Disziplinen des Projekts als übergeordnetes Teilziel und Schritt auf dem Weg zur Industrie 4.0 vereint werden.

Vorgehensweise und Forschungsergebnisse

Das übergeordnete Ziel des Projektes, KMU aus dem Bereich der zerspanenden Fertigung einen einfachen Einstieg in die Nutzung von KI für die Analyse ihrer Fertigungsprozesse zu ermöglichen, wurde erreicht. Der Fokus lag dabei auf schwer bearbeitbaren Materialien mit dem Ziel die Effizienz der Maschinen- und Werkzeugnutzung zu steigern und Verschleißerscheinungen zu reduzieren.

I Einstieg für KMU in KI

1. Die Erarbeitung eines Handlungsleitfadens wurde erfolgreich realisiert. Der Handlungsleitfaden beinhaltet die wichtigsten Informationen, die aus Sicht von KMU für einen niederschweligen Einstieg in eine KI-basierte Auswertung ihrer Fertigungsprozesse nötig sind (vgl. Abb. 1). Der Handlungsleitfaden ist so strukturiert, dass unabhängig von der Fertigungstechnologie eine generalisierte Gültigkeit entsteht und die Inhalte somit auf alle zerspanenden Fertigungsprozesse angewendet werden können.
2. Zur Abhebung vom wissenschaftlichen Stand der Technik sowie von kommerziellen Zukaufslösungen wurden zunächst die verfügbaren Mittel erprobt, so dass im

Anschluss insbesondere im Softwarebereich Eigenentwicklungen mit Open-Source Lösungen realisiert werden konnten. Auch im Hardwarebereich wurden zur Einhaltung des Teilziels eines niederschweligen und kostengünstigen Einstiegs Low-Cost Optionen zusammengestellt, die den gewünschten Funktionsumfang vollumfänglich erreichen und somit den wissenschaftlichen und kommerziellen Stand der Technik um die im Projekt entwickelten Lösungen erweitern.

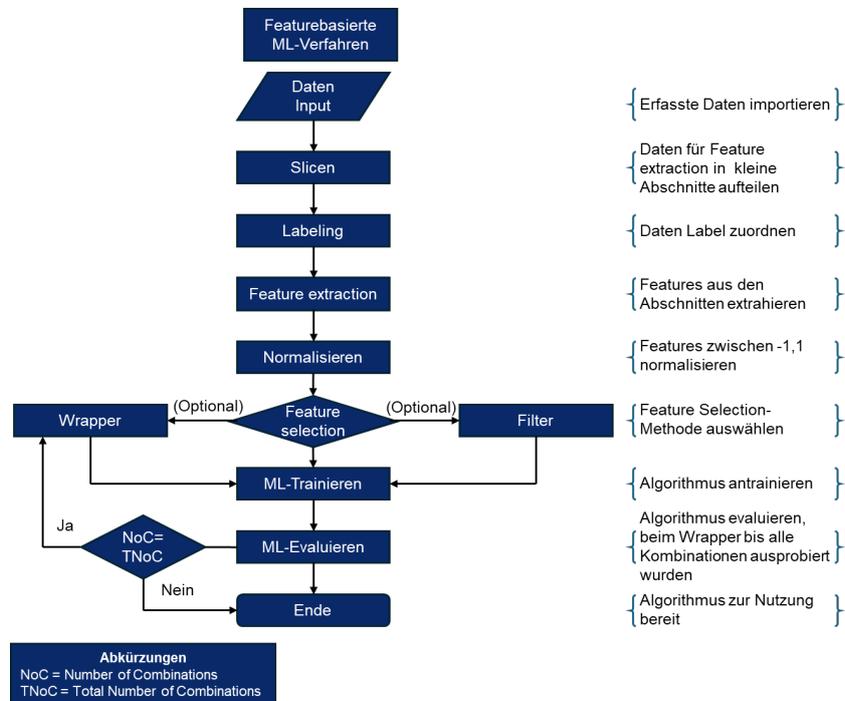


Abb. 1: Exemplarisches Vorgehen zur Implementierung eines featurebasierten ML-Verfahrens.

II Effizienzsteigerung und Ressourcenschonung

3. Die im Projekt durchgeführten Zerspanungsversuche wurden durch den Probenaustausch zwischen beiden Forschungseinrichtungen mit zahlreichen Werkstoffen und Werkstückgeometrien sowohl im Bereich des Sägens (vgl. Abb. 2) als auch mittels Fräsens (vgl. Abb. 3) durchgeführt. Für die praktische Bearbeitung wurden zunächst von beiden Forschungseinrichtungen verhältnismäßig weiche bzw. leicht zu bearbeitende Materialien gewählt. Mit der anschließenden Untersuchung von Werkstoffen, wie etwa Inconel, GGG oder additiv verarbeitetem Stellite wurden im weiteren Verlauf anspruchsvoll zu bearbeitende Materialien in die Betrachtungen mit aufgenommen und bildeten letztendlich den Schwerpunkt.
4. Zur Realisierung der übergeordneten Teilziele zur Effizienzsteigerung und Ressourcenschonung im Rahmen der Fertigungsprozesse war es durch die technologische Unterscheidung der beiden betrachteten Zerspanungsverfahren bei beiden Forschungseinrichtungen notwendig, eine individuelle IT-Infrastruktur zu konzipieren und aufzubauen. In Hinblick auf die Erreichung einer funktionalen Predictive Quality konnten sowohl beim Sägen als auch beim Fräsen sensorielle Überwachungsprozesse in (nahezu) Echtzeit implementiert werden, welche nicht direkt die Qualität der Werkstücke analysieren, sondern die Stabilität des Fertigungsprozesses kontrollieren.

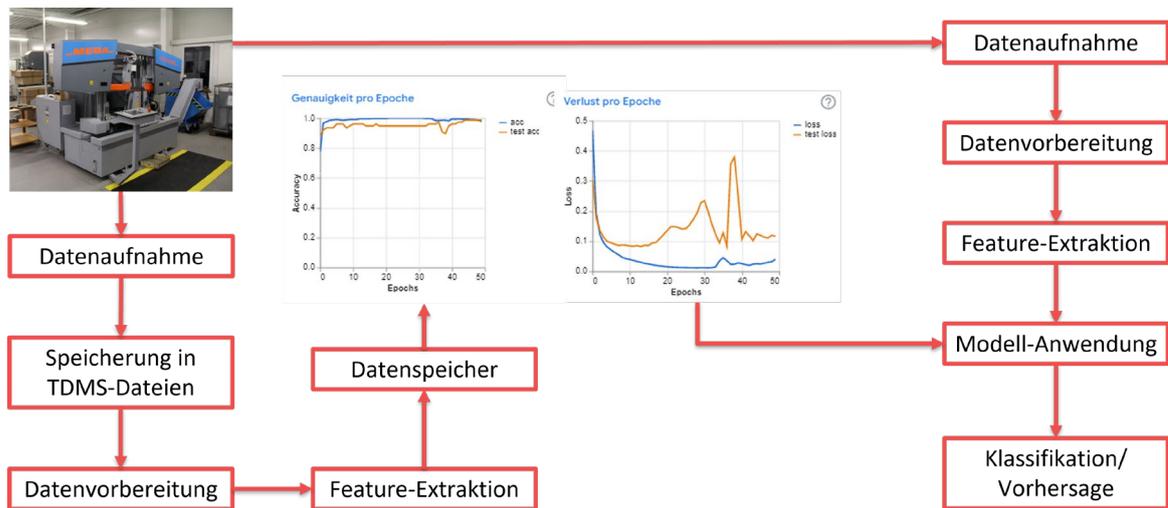


Abb. 2: Flussdiagramm zur Datenaufnahme und Auswertung beim Sägen.

5. Durch die Sicherstellung stabiler Fertigungsprozesse, welche durch eine kontinuierliche sensorielle Überwachung erreicht wird, erlauben die im Projekt entwickelten Lösungen für das Sägen und Fräsen als praktischen Vorteil für KMU eine Reduktion des Qualitätsprüfaufwandes sowie die Reduktion von Nachbearbeitungsschritten.
6. Von beiden Forschungseinrichtungen wurde für die Prozessüberwachung jeweils ein System konzipiert, das (nahezu) in Echtzeit arbeitet, so dass sowohl für das Sägen als auch das Fräsen eine frühzeitige Erkennung von Prozessabweichungen und Produktionsfehlern als Ergebnis des Projekts sichergestellt werden konnte (vgl. Abb. 4). Mit der Berücksichtigung von direkten (z. B. Vorschub, Drehzahl etc.) und indirekten (z. B. Leistungsaufnahme, Schwingungen etc.) Maschinenparametern und der auf die Erfassung und Analyse abgestimmten Hard- und Software konnte von beiden Forschungseinrichtungen eine eigene Lösung für die technologischen Besonderheiten der beiden Fertigungsverfahren gefunden und in Bezug auf den effizienten Betrieb (z. B. geringe Rechenkapazität direkt an der Edge) und kostengünstigen Aufbau (z. B. Nutzung von Low-Cost Hardware und Open-Source Software) realisiert werden.

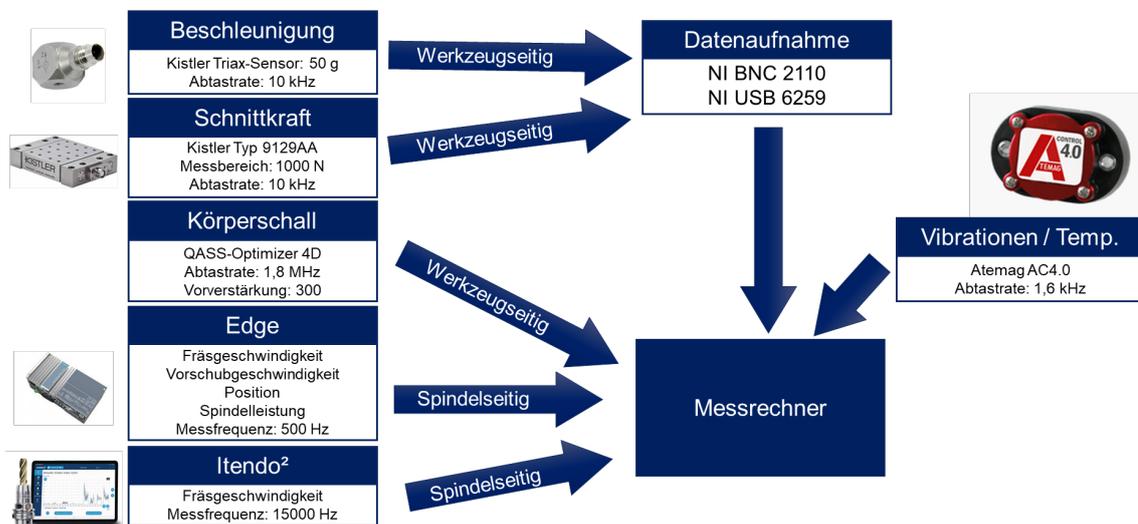


Abb. 3: Mess- und Informationstechnik für die datengetriebene Analyse der Fräsbearbeitung.

7. Sowohl beim Sägen als auch beim Fräsen wurde von beiden Forschungseinrichtungen jeweils ein System zur Anomalieerkennung entwickelt und an den entsprechenden Maschinen implementiert. Dieses ist so aufgebaut, dass lediglich eine Alarmmeldung ausgegeben wird, wenn eine Anomalie erkannt wird. Beim Einsatz in einem Unternehmen ist der Ablauf so vorgesehen, dass der Anwender durch diese Alarmmeldung informiert wird, jedoch im Anschluss selbst die Ursachen erörtern und die Handlungsabfolge entscheiden muss.
8. Auch die technologischen Grundlagen der vorausschauenden Wartung sind eng mit der integrierten Qualitätskontrolle bzw. der Überwachung des Prozesses verbunden. Im Projekt konnte der Verschleiß sowie die Degradation der Werkzeuge durch die Analyse der Schwingungsdaten gezeigt werden. Somit wird es den Anwendern ermöglicht, die Wartungsintervalle vorherzusehen und die organisatorischen Abläufe zu Stillstands- und Rüstungszeiten zu optimieren. Bei den Untersuchungen wurde auch deutlich, wie unterschiedlich die Prozesse beim Fräsen und Sägen ausfallen und sich auf die eigentlichen Wartungs- und Organisationstätigkeiten auswirken.

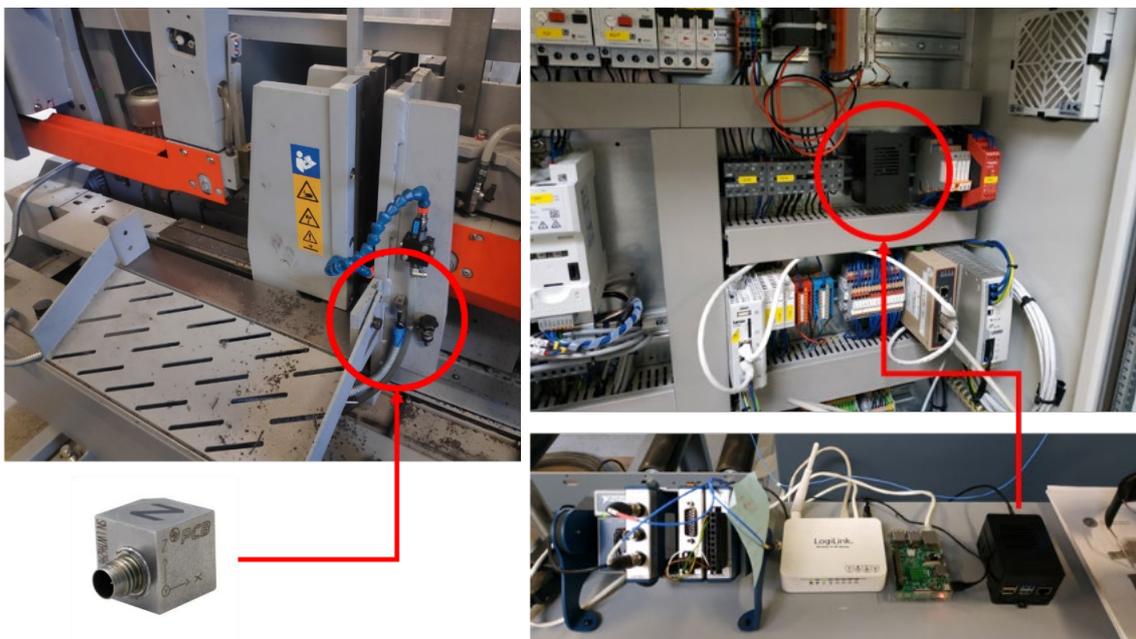


Abb. 4: Sensorausstattung und Datenaufnahme an der Bandsäge

III Hardware- und Softwareeffizienz

9. Unabhängig von der Sensordatenanalyse war es in Hinblick auf Stromverbrauch, Automatisierung und Rechenleistung bei den Laboraufbauten von beiden Forschungseinrichtungen nötig, zunächst eine geeignete IT-Infrastruktur zu entwickeln, welche die gewünschten Eigenschaften, wie etwa eine niederschwellige Implementierung am vorhandenen Maschinenpark (Retrofit), die Installation von Rechenleistung direkt an der Edge (Konzipierung von Edge Devices), eine möglichst schnelle Analyse in (nahezu) Echtzeit oder ein geeigneter Ablauf innerhalb von Datenpipelines, erst ermöglicht.

10. Durch die Entwicklung von eigener Software sowie die Nutzung von Open-Source Möglichkeiten konnte auch hier gezeigt werden, wie bei einem niederschweligen Einstieg von KMU in die technischen Möglichkeiten der KI vorzugehen ist. In Bezug auf die Hardwarekomponenten wurden zu Beginn sowohl die Möglichkeiten von High-End Produkten untersucht. Im weiteren Verlauf wurden dann mit Middle-Class Komponenten und eigener Open-Source Software die angestrebten Funktionalitäten realisiert. In der späten Projektphase wurde untersucht, inwiefern Low-Cost Hardware zum Einsatz kommen kann, ohne die technologische Leistungsfähigkeit einzuschränken. Bei beiden Forschungseinrichtungen und beiden Fertigungsverfahren stellte sich heraus, dass mit Low-Cost Hardware gute Ergebnisse erzielt werden konnten und diese sich auch für den Einsatz in der Fertigung von KMU eignet.
11. Zur weiterführenden Bewertung der Effizienz bzw. zur Reduktion des Aufwandes galt es die Forschungsfrage zu beantworten, welche Datenmengen erhoben werden müssen, um aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen und inwiefern der Aufwand zur Datenaufnahme und Auswertung zu minimieren ist. Im Lauf der Projektbearbeitung wurde deutlich, wie unterschiedlich die Prozesse des Sägens und FräSENS bei der Datenaufnahme ausfielen und wie dementsprechend eine unterschiedliche Vorgehensweise zur KI-basierten Verarbeitung nötig war. Zwar konnte von beiden Forschungseinrichtungen nicht definitiv festgestellt werden, wie gering die Datenmenge für die Trainingsphase der KI ausfallen konnte; jedoch wurde bei beiden Fertigungsverfahren bewiesen, dass der Aufwand zur Implementierung von Hard- und Software für den Realisierungsprozess in KMU ausschlaggebender ist. Die zeitlichen und monetären Investitionen fallen somit eher bei der Ausstattung der Maschinen sowie beim Aufbau der IT-Infrastruktur an und weniger bei der Datensammlung, welche die Datensätze für die Trainingsphase erzeugt. Es konnte somit demonstriert werden, dass die zu erhebende Datenmenge nicht den limitierenden Faktor zur Einrichtung der KI-basierten Auswertungstechnologie darstellt.
12. Die im Projekt erarbeiteten wissenschaftlich-technologischen Ergebnisse sowie der Handlungsleitfaden wurden insbesondere auf die Niederschwelligkeit aus Sicht von KMU sowie die Sicherstellung der angestrebten Funktionalität fokussiert. Während mit der Verwendung von Low-Cost Hardware und Open-Source Software die Randbedingungen für eine problemlose Integration in die jeweilige Fertigungsumgebung sichergestellt sind, wurde das Projekt jedoch nicht auf die Entwicklung von neuartigen Geschäftsmodellen ausgerichtet. Durch den Fokus auf eine einfache Implementation kann das Teilziel zur Berücksichtigung von ökonomischen und praktikablen Aspekten dennoch als erreicht angesehen werden.

IV Unternehmensorganisation

13. Im Rahmen der Projektarbeiten wurde deutlich, dass die Sensordatenanalyse und -auswertung mit eigenentwickelter Software zumindest für den Laborbetrieb zwar praktikabel war, für die Überwachung einer ganzen Werkstatt bzw. eines Fertigungsbetriebes mit einer größeren Anzahl an Maschinen aber weitere Systeme

notwendig waren. Aus diesem Grund wurde ein sogenanntes Dashboard entwickelt, das es erlaubt, eine individuell konfigurierbare Benutzeroberfläche nach den eigenen Anforderungen zusammenzustellen. Mit einer derartigen graphischen Benutzeroberfläche wurde der Grundstein einer praktikablen Integration in die vorhandenen IT-Lösungen in einem KMU gelegt und die Übersicht über den Maschinenpark der Betreiber sichergestellt.

14. Während der Umsetzung der Projekteinhalte wurde deutlich, dass einerseits der Aufbau einer geeigneten und leistungsfähigen IT-Infrastruktur mit entsprechender Zusammenstellung der Hard- und Softwarekomponenten für die Implementierung von KI-Technologie in Fertigungsumgebungen einen Großteil des Aufwandes darstellt. Andererseits konnte festgestellt werden, dass sich nach erfolgtem Aufbau die Sammlung der Datenmengen nicht mehr wesentlich auf den Aufwand und die Kosten auswirkt. Im Hinblick auf die Langzeitarchivierung von Rohdaten oder die Verwaltung einer Datenbasis (z. B. Unternehmenswiki, Wissensmanagement, Automatisierung, Prävention gegen Fachkräftemangel) konnten somit im Rahmen des Projekts für die Realisierung in einem Unternehmen ebenso die Grundlagen geschaffen werden.
15. Mit dem Aufbau eines derartigen Datenstocks bzw. der Filterung von relevanten Informationen sowie insbesondere der Verknüpfung von Fertigungsprozessen und Informationsflüssen können die unterschiedlichen Themengebiete bzw. Disziplinen des Projekts als übergeordnetes Teilziel und Schritt auf dem Weg zur Industrie 4.0 vereint werden. Auch das Teilziel zur Abdeckung von Aspekten der Industrie 4.0 kann als erreicht angesehen werden. Zwar wurde das Projekt nicht explizit auf die Industrie 4.0 ausgerichtet, doch die Ansätze zur KI-basierten und automatisierten Überwachung einer Fertigungsumgebung decken wichtige Teilbereiche der Industrie 4.0 ab.

Zusammenfassung

Das Hauptziel des Projektes bestand darin, KMU aus dem Bereich der zerspanenden Fertigung einen einfachen Einstieg in die Nutzung von KI für die Analyse ihrer Fertigungsprozesse zu ermöglichen. Der Schwerpunkt lag dabei auf der Bearbeitung von schwer zerspanbaren und inhomogenen Materialien, um die Effizienz in der Maschinen- und Werkzeugnutzung zu steigern sowie Verschleißerscheinungen zu reduzieren.

Während der Projektbearbeitung wurden mehrere Teilziele verfolgt, die alle auf das übergeordnete Ziel ausgerichtet waren. Zum Abschluss wurde ein Handlungsleitfaden mit den wichtigsten Projektergebnissen entwickelt, der speziell auf KMU zugeschnitten ist. Dieser Leitfaden ermöglicht den Unternehmen einen niederschweligen und kostengünstigen Einstieg in die Erhebung, Analyse und Nutzung von Prozessdaten mithilfe von unterschiedlichen KI-basierten Lösungsmöglichkeiten. Dabei wurde besonderer Wert darauf gelegt, den Unternehmen verschiedene Optionen aufzuzeigen, wie sie die

KI-Technologie schrittweise in ihre bestehende Infrastruktur integrieren können. Dies sollte ihnen ermöglichen, erste Erfolge zu erzielen und das Potenzial von KI-basierten Analysen für die Optimierung ihrer Fertigungsprozesse zu erkennen.

Die Analyse der Fertigungsprozesse konzentrierte sich insbesondere auf schwer zerspanbare und inhomogene Materialien am Beispiel des Sägens und Fräsens. Durch den Einsatz von ML konnten Daten aus den laufenden Prozessen in (nahezu) Echtzeit ausgewertet werden, was es den Unternehmen ermöglicht, Schwachstellen in ihren Prozessen zu identifizieren und gezielte Optimierungsmaßnahmen zu ergreifen (Predictive Quality, Predictive Maintenance). So wurde gezeigt, dass es möglich ist, mit niederschweligen Soft- und Hardwarelösungen die Effizienz der Maschinen- und Werkzeugnutzung zu verbessern. In der Laborumgebung beider Forschungseinrichtungen gelang es, den Verschleiß der Werkzeuge zu reduzieren. Dies zeigt das Potenzial auf, in einer Fertigungsumgebung eines KMU nicht nur eine längere Lebensdauer der Werkzeuge, sondern auch eine höhere Produktionsqualität und -geschwindigkeit zu erreichen.

Im Verlauf des Projektes wurde klar, dass der Einsatz von KI in der Fertigung zahlreiche Vorteile mit sich bringt; insbesondere für KMU, die aufgrund von fehlendem Fachwissen und ggf. Personalmangel nur eingeschränkte Möglichkeiten besitzen, ihre Prozesse datenbasiert zu optimieren. Die im Rahmen des Projektes gewonnenen Erkenntnisse und entwickelten Methoden bieten diesen Unternehmen nun einen wertvollen Ansatzpunkt, um ihre Wettbewerbsfähigkeit langfristig zu sichern und sich in einem zunehmend technologiegetriebenen Marktumfeld zu behaupten.

Ein besonderer Dank gilt allen Mitgliedern im projektbegleitenden Ausschuss für die gute Zusammenarbeit und für die Unterstützung bei der Durchführung der Forschungsarbeiten.

Eine Langfassung der Forschungsarbeiten kann in Form eines Schlussberichts bei der Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V., Papenberger Str. 49, 42859 Remscheid, www.fgw.de, angefordert werden.

Weiter Informationen erhalten Sie bei Dr.-Ing. Robin Roj unter +49 (2191) 5921-122.