

futur

VISION | INNOVATION | REALISIERUNG

Maschinen mit Herz

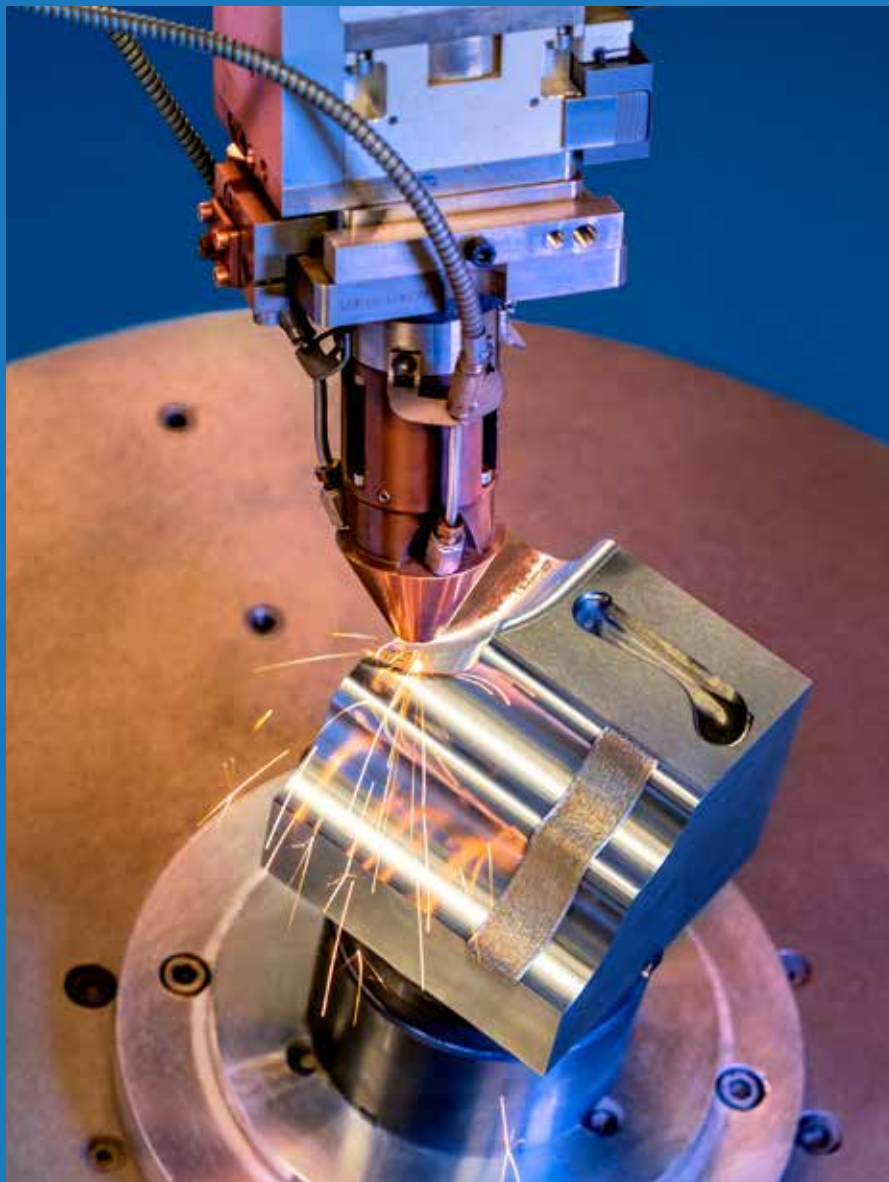
Ein neues Fraunhofer-Leitprojekt untersucht, wie Produktionssysteme durch kooperatives Verhalten widerstandsfähiger werden. Dabei spielt Empathie eine entscheidende Rolle.

S. 10

Besser als neu

Wenn Scangineering und additive Reparaturtechnologien kombiniert werden, lassen sich Werkzeuge oder Bauteile automatisiert reparieren.

S. 26



Effizienz durch Sauberkeit

Wie sich mit Spülkanälen in der Funkenerosion Produktivitätssteigerungen erzielen lassen

S. 34

Präzision ist Trumpf

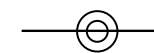
Noch sind Werkzeugmaschinen tonangebend in Sachen Genauigkeit. Doch Industrieroboter holen immer mehr auf – unter anderem dank KI.

S. 48

FERTIGUNG



**Hart und akkurat:
Diamanten in der Ultra-
präzisionszerspanung**



Produktionstechnisches Zentrum (PTZ) Berlin

KURZPROFIL Das Produktionstechnische Zentrum (PTZ) Berlin beherbergt zwei Forschungseinrichtungen: das Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb IWF der TU Berlin und das Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK. Als produktionstechnische Forschungs- und Entwicklungspartner mit ausgeprägter IT-Kompetenz sind beide Institute international gefragt. Ihre enge Kooperation im PTZ versetzt sie in die einzigartige Lage, die gesamte wissenschaftliche Innovationskette von der Grundlagenforschung über anwendungsorientierte Expertise bis hin zur Einsatzreife abdecken zu können.

Dabei unterstützen wir Unternehmen umfassend entlang der gesamten Wertschöpfung: In enger Zusammenarbeit mit Industriekunden und öffentlichen Auftraggebern entwickeln wir Systemlösungen, Einzeltechnologien und Dienstleistungen für die gesamte Prozesskette produzierender Unternehmen – von der Produktentwicklung, von der Planung und Steuerung der Maschinen und Anlagen, inklusive der Technologien für die Teilefertigung bis hin zur umfassenden Automatisierung und dem Management von Fabrikbetrieben. Zudem übertragen wir produktionstechnische Lösungen in Anwendungsgebiete außerhalb der Industrie, etwa in die Bereiche Verkehr und Sicherheit.

**LIEBE LESERINNEN,
LIEBE LESER,**

wenn heute von »Innovationen für die Produktion« die Rede ist, geht es meist um ein großes Ganzes. Die digital integrierte Produktion im Sinne der Industrie 4.0 vernetzt ganze Fabriken. Aktivitäten, die auf Ressourceneffizienz zielen, nehmen komplette Fertigungssysteme in den Blick. Und Resilienzmaßnahmen werden auf Lieferkettenebene konzipiert.

Was dabei gerne übersehen wird: Dreh- und Angelpunkt für all diese Initiativen ist jede Maschine für sich. Denn Vernetzung ist nicht möglich ohne Schnittstellen auf Anlagenebene. Und Daten, die komplexe Prozesse optimieren, werden im Wesentlichen in der einzelnen Maschine generiert. Mit dieser Ausgabe der FUTUR stellen wir Ihnen deshalb aktuelle Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten vor, bei denen unsere Forschenden die Köpfe tief in die einzelne Anlage stecken.

Unsere Projektteams untersuchen zum Beispiel, wie sich durch die Temperierung von Motorspindeln Warmlaufzeiten reduzieren und Bearbeitungsgenauigkeiten erhöhen lassen oder wie Spülkanäle in der Funkenerosion die Produktivität des Verfahrens erhöhen. Dem »alten« Problem der Gratbildung bei der Zerspanung nähern sie sich mit neuartigen Schneidstoffen und innovativer Werkzeugführung, aber auch mit gezielten Nachbearbeitungskonzepten.

Dass es die Ressourceneffizienz fördert, wenn Maschinen immer präziser arbeiten und dabei immer einfacher zu bedienen werden, beleuchten Bernfried Fleiner vom Werkzeugmaschinenhersteller exeron und Professor Julian Polte aus unserem Institut im Expertengespräch. Und auch das Thema Künstliche Intelligenz kommt

in diesem Heft nicht zu kurz: Mit ihrer Hilfe werten wir Industrieroboter zur konkurrenzfähigen Alternative zu Werkzeugmaschinen auf und verpassen älteren Bestandsmaschinen ein Upgrade für Zukunftsfähigkeit.

Apropos Zukunftsfähigkeit: Im kürzlich gestarteten Fraunhofer-Leitprojekt EMOTION denken wir die Rollen von Menschen, Maschinen, Robotern und anderen Ressourcen im Fertigungssystem weiter. Wir wollen erreichen, dass die einzelnen Akteure nicht nur ihren eigenen Zustand, sondern auch den von Akteuren im Umfeld erkennen und empathisch auf diesen reagieren können. Das wird nur möglich mit Grundlagenarbeit an jeder individuellen Maschine.

Zu guter Letzt stellen wir Ihnen zwei neue Anlagen in unserem Haus vor, mit denen wir für die nächsten Forschungsaufträge auf der Maschinenebene gerüstet sind. An einer Anlage zum Kaltgasspritzen, die in Kooperation mit dem Werner-von-Siemens Centre for Industry and Science e. V. angeschafft wurde, widmen wir uns dem Beschichten mittels thermischer Energie. Das Bearbeitungszentrum Moore Nanotech 650 FG adressiert kleinste Strukturen: Die Ultrapräzisionsmaschine der neuesten Generation erlaubt die Fertigung höchstpräziser Oberflächen durch Drehen und Fräsen.

Viel Freude bei der Lektüre wünscht

Ihr



Eckart Uhlmann



Inhalt



Auf Veränderungen antizipativ und flexibel zu reagieren, ist heute Grundvoraussetzung für wirtschaftlichen Erfolg.

↪ Mehr dazu ab Seite 10

08 Shortcuts

10 Maschinen mit Herz

Ein neues Fraunhofer-Leitprojekt untersucht, wie Produktionssysteme durch kooperatives Verhalten widerstandsfähiger werden. Dabei spielt Empathie eine entscheidende Rolle.

14 Auf den Punkt genau

Im Expertengespräch diskutieren Bernfried Fleiner, exeron GmbH und Prof. Dr. Julian Polte, Fraunhofer IPK, IVF TU Berlin die Größe »Präzision« als Schlüssel für eine nachhaltige Produktion.

20 Cold Spray: Additive Fertigung mittels kinetischer Energie

Kaltgasspritzens gilt als eines der modernsten Verfahren im Bereich des thermischen Spritzens. PTZ-Forschende haben Zugriff auf ein hochmodernes Cold-Spray-Fertigungssystem.

24 Wärmepumpe für Maschinen

Es kann sowohl heizen als auch kühlen – ein neues thermoelektrisches System ermöglicht eine bedarfsgerechte Temperierung von Motorspindeln und erhöht damit die Präzision von Werkzeugmaschinen.

26 Besser als neu

Wenn Scangineering und additive Reparaturtechnologien kombiniert werden, lassen sich Werkzeuge oder Bauteile automatisiert reparieren.

30 Durchblick dank Diamanten

Ultrapräzisionszerspanung ist das Nonplusultra in der Fertigungstechnik – akkurater geht es kaum noch.

Schneidwerkzeuge aus Diamant sind extrem akkurat
↪ Mehr dazu ab Seite 30



34 Effizienz durch Sauberkeit

Wie sich mit Spülkanälen in der Funkenerosion Produktivitätssteigerungen erzielen lassen

38 Vom Alexanderplatz an den Amazonas

Die Zusammenarbeit zwischen Deutschland und Brasilien im Bereich Industrie 4.0 nimmt Fahrt auf – mit dem Fraunhofer IPK als wichtigem Treiber.

42 Saubere Produktion für saubere Mobilität

Um Wasserstoffantriebe massentauglich zu machen, muss die Brennstoffzellenproduktion günstig und skalierbar werden. Das Projekt H2GO soll dazu einen Beitrag leisten.



Grate sind in der spanenden Bearbeitung ein leidiges Thema
↪ Mehr dazu ab Seite 44

44 Glatte Kanten mit schlanken Prozessketten
Grate können durch geschickte Prozessführung und Anpassung der Eingriffsbedingungen reduziert oder mit scharfen Werkzeugschneiden ganz vermieden werden.

46 Stromverbrauch im Blick
Klimaneutrale Produktion ist zur Erreichung der Klimaziele unerlässlich. Um Werkzeugmaschinen energieeffizienter zu machen, muss ihr Energieverbrauch transparent sein.

48 Präzision ist Trumpf
Noch sind Werkzeugmaschinen tonangebend in Sachen Genauigkeit. Doch Industrieroboter holen immer mehr auf – unter anderem dank KI.



KI unterstützt Industrieroboter bei der präzisen Positionierung
↪ Mehr dazu ab Seite 48

»Wasserstoff zur Energieerzeugung zu nutzen, ist keine neuartige Idee. Wasserstoffbasierte Brennstoffzellen wurden im Gegensatz zu fossilen und erneuerbaren Energiequellen bislang eher abgetan, zu kostenintensiv sei ihre Produktion und noch dazu nur in geringen Stückzahlen möglich.«

↪ Mehr dazu ab Seite 42

GUT GESAGT



»Unser übergeordnetes Ziel ist es, eine Wirtschaft mitzugestalten, die wie die Natur nach einem Kreislaufprinzip funktioniert. Als Werkzeugmaschinenhersteller können wir dabei den Beitrag leisten, bei jedem Fertigungsvorgang ein »first time right« zu ermöglichen. Soll heißen: Unsere Anlagen sollen auf Anhieb ein korrektes Produkt erzeugen.«

Bernfried Fleiner, Geschäftsführer der exeron GmbH

↪ Mehr dazu ab Seite 14



RETHINKING PRODUCTION: PRODUKTION ALS TREIBER FÜR EINE INDUSTRIEGESELLSCHAFT IM WANDEL

Das Produktionstechnische Kolloquium ist zurück! Bei der 17. Ausgabe der traditionsreichen Veranstaltung im Produktionstechnischen Zentrum Berlin dreht sich am 14. und 15. September 2023 alles um die großen Herausforderungen für den Industriestandort Deutschland: Digitalisierung und Nachhaltigkeit. Fach- und Führungskräfte aus Wirtschaft und Wissenschaft stellen erfolgreiche Ansätze und Strategien für eine CO₂-neutrale Produktion sowie aktuelle Industrie 4.0-Lösungen vor.

↪ Jetzt anmelden unter
www.ptk.berlin



NEUE TECHNOLOGIEN FÜR DIE PRODUKTION VON MRNA-BASIERTEN ARZNEIMITTELN

Die mRNA-Technologie wurde ursprünglich für die Krebstherapie entwickelt und kann im Kampf gegen viele Krankheiten eingesetzt werden. Das Fraunhofer IPK erforscht jetzt gemeinsam mit Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft, wie mRNA-Therapeutika und andere Medikamente besser produziert und wirksamer angewendet werden können.



↪ Weitere Informationen
unter
[www.ipk.fraunhofer.de/
mrna](http://www.ipk.fraunhofer.de/mrna)

IM DETAIL



Worauf diese Pistole gerichtet ist, sehen Sie

↪ auf Seite 21.

ENEFFNET – DIGITALE VERNETZUNGSPLATTFORM FÜR EFFIZIENZLÖSUNGEN

ÖKOTEC und Fraunhofer IPK entwickeln und erproben in Zusammenarbeit mit der Mercedes Benz AG am Standort Berlin und der Daimler Truck AG am Standort Mannheim innerhalb des neuen FuE-Projekts »EnEffNet« eine digitale Vernetzungsplattform für alle relevanten Betriebsdaten. Damit wird ein durchgängiges Management ermöglicht. Neben den Anwendungen zur Effizienzoptimierung eröffnet die Vernetzungsplattform zahlreiche Möglichkeiten zur zukunftsorientierten Nutzung energie-, maschinen- und anlagenbezogener Daten im Sinne eines Industrie 4.0-Ansatzes, beispielsweise für die vorausschauende Wartung, intelligente Qualitätssicherung oder die Optimierung von Controlling-Prozessen.

↪ Mehr zu der neuen
Plattform unter
[www.ipk.fraunhofer.de/
eneffnet](http://www.ipk.fraunhofer.de/eneffnet)



DIE ZAHL DER AUSGABE

1.100°C

erreicht das Trägergas beim Kaltgasspritzen in der neuen Cold-Spray-Anlage im Werner-von-Siemens Centre for Industry and Science e. V.

↪ Mehr zu der hochmodernen Anlage
erfahren Sie ab Seite 20.

Maschinen mit

Ein neues Fraunhofer-Leitprojekt untersucht, wie Produktionssysteme durch kooperatives Verhalten widerstandsfähiger werden. Dabei spielt Empathie eine entscheidende Rolle.

Politische Aggressionen, Lieferkettenrisiken, beschleunigte Energiewende – die globalen Rahmenbedingungen für produzierende Unternehmen haben sich massiv verändert. Damit ist eine Zeitenwende verbunden: Mehr denn je ist heute ihre Fähigkeit gefragt, auf abrupte Veränderungen agil reagieren zu können. Das Stichwort hierfür heißt Resilienz. Denn treffen akute Ereignisse auf unzureichend resiliente Wertschöpfungsketten, kann das dramatische Auswirkungen haben. Oder andersherum: Auf Veränderungen antizipativ und flexibel zu reagieren, ist heute Grundvoraussetzung für wirtschaftlichen Erfolg.

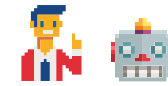
Hier setzt EMOTION an. Das neue Fraunhofer-Leitprojekt will zeigen, wie durch eine effizientere Kooperation aller Produktionsbeteiligten resiliente Wertschöpfungsgemeinschaften entstehen. Der Schlüssel dafür: Empathie. Gemeinsam werden das Fraunhofer IPK und sechs weitere Fraunhofer-Institute Mensch-Technik-Lösungen entwickeln, die Produktionssysteme dabei unterstützen, reaktions-, lern- und anpassungsfähig zu werden und die Kooperation in der Produktion zu erleichtern.

Die Annahme der Forschenden: Elementar für ein resilientes Produktionssystem ist, dass darin alle – Menschen, intelligente Maschinen und Produkte sowie IT- und OT-Systeme – kompetenzergänzend zusammenarbeiten. Doch diese Zusammenarbeit funktioniert nur, wenn die Akteure ein »wechselseitiges Verständnis« füreinander besitzen. Das heißt: wenn sie nicht nur ihren eigenen (produktionstechnischen) Zustand erfassen können, sondern darüber

hinaus den Zustand und die Intention der anderen Akteure. Die Fähigkeit, ein solch wechselseitiges Verständnis aufzubauen, steht repräsentativ für den Begriff Empathie.

DEM MENSCHEN ABGESCHAUT

Im Rahmen des Projekts wird dieser Begriff erstmals auf die Produktion übertragen. In der Psychologie beschreibt Empathie die Fähigkeit, sich in die Lage anderer zu versetzen und deren Perspektive einzunehmen. Empathie erleichtert es, mit anderen Menschen in Kontakt zu treten, ihr Verhalten zu antizipieren und adäquat auf ihre Bedürfnisse zu reagieren. Am Arbeitsplatz stärkt



Empathie – gerade in heterogenen Teams – den Zusammenhalt.

Doch wie lassen sich diese Eigenschaften technisch nutzbar machen? Die Forschenden haben dazu das Konzept des »empathischen technischen Systems« entwickelt. Das kann zum Beispiel ein mobiler Roboter sein, der in der Lage ist, die Perspektive anderer Roboter einzunehmen. Er kennt deren Ziele, Steuer- und Regelgrößen und kann diese bei Bedarf proaktiv unterstützen. Dafür »schlüpft« er in eine andere Rolle und passt ihren Aufgabenbereich eigenständig an. Oder auch eine Werkzeugmaschine, die fähig ist, die Dringlichkeit von Produktionsaufträgen zu verstehen: Sie kennt ihren Rüstzustand, die Fertigungsspezifikation und den erwarteten Liefertermin

Am Arbeitsplatz stärkt Empathie – gerade in heterogenen Teams – den Zusammenhalt.



und stimmt die Arbeitsabläufe mit anderen Maschinen sowie der Produktionsplanung und -steuerung autonom ab.

Ein komplett empathisches Produktionssystem besteht letztlich aus vernetzten Einheiten derart kooperativer, digital souveräner Akteure. Analog zu Empathie beim Menschen ermöglicht Empathie in der Produktion somit eine bessere Zusammenarbeit, mehr Vorhersehbarkeit und damit einhergehend ein schnelleres Erkennen von in- und externen Störungen sowie ein dynamischeres Gegensteuern.

AUF ZUR NÄCHSTEN STUFE!

In der Vision des Leitprojekts verkörpern empathische Produktionssysteme die nächste technologische Evolutionsstufe. Derzeit





befinden wir uns auf der Stufe der sogenannten kognitiven Produktionssysteme: Die Akteure sind durch Anbindung an Sensorik und Aktorik und den Einsatz von Daten- und KI-Technologien bereits fähig, ihren eigenen Zustand zu erfassen, ablaufende Prozesse und Ereignisse zu interpretieren und Entscheidungen zu treffen. Hierzu zählen etwa intelligente Assistenz-, Roboter-, Maschinen- und Automatisierungssysteme. Für eine effektive Zusammenarbeit mit anderen Akteuren fehlt ihnen jedoch eine das komplette System einbeziehende Informationsverarbeitung: Ein wechselseitiges Verständnis ist in kognitiven Produktionssystemen nicht möglich.

Die große Herausforderung besteht deshalb darin, kognitive Systeme derart weiterzuentwickeln, dass sie in der Lage sind, kooperatives Verhalten abzubilden. Die interdisziplinären Kompetenzen der beteiligten



Die große Herausforderung besteht darin, kognitive Systeme derart weiterzuentwickeln, dass sie in der Lage sind, kooperatives Verhalten abzubilden.

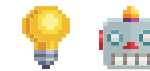


Fraunhofer-Institute in den Bereichen Produktionstechnik, Smart Maintenance, Machine Learning und Industrie 4.0 bieten hierfür optimale Voraussetzungen. Elementar für die wechselseitige Interaktion der Produktionsakteure ist zunächst eine dezentrale Systemarchitektur, die den hochfrequenten und sicheren Austausch heterogener Datenmengen gewährleistet. Entsprechend wird im Rahmen des Projekts ein Referenzmodell konzipiert, das skalierbar und für die verschiedensten Produktionstypen ableitbar ist. Darauf aufbauend entwickeln die einzelnen Institute kombinierte Hard- und Software-Lösungen, die dann in einer übergreifenden Plattform zusammengeführt werden. Durch die industriennahe Erprobung in den drei Bereichen Assistenzsysteme, Instandhaltung sowie Produktionsplanung und -steuerung soll schließlich der Mehrwert empathischer technischer Systeme nachgewiesen werden.



EMPATHISCHE ASSISTENTEN

Konkret geht es im ersten Anwendungsbereich um kognitive und physische Assistenzsysteme, die zu empathischen Assistenzsystemen erweitert werden. Hierzu zählt das empathisch agierende Exoskelett, das – situativ und individuell, je nach körperlicher Konstitution – erkennt, ob der Mitarbeitende eine Aufgabe wie das Heben eines Bauteils allein bewältigen kann oder adaptiv geregelte Unterstützung braucht. Das empathisch-kognitive Assistenzsystem indes erfasst automatisch, ob der Mitarbeitende – etwa aufgrund einer komplexen Montage-tätigkeit unter hohem Zeitdruck – kognitiv überlastet ist und bietet ihm sodann speziell aufbereitete Informationen mittels AR-Brille, Handy oder Audiohilfe an. Erkennt das System, dass der Arbeitende wieder in einen produktiven Zustand kommt, fährt es auch die Unterstützung wieder zurück. Ein weiteres Beispiel sind Fahrerlose Transportsysteme (FTS) für die Logistik und Montage, die durch Kommunikation mit anderen Akteuren Transportaufträge eigeninitiativ identifizieren und ihre Aktivitäten untereinander selbstständig koordinieren.



EMPATHIE ALS TAKTGEBER

Im Bereich Instandhaltung steht das Empathie-Merkmal Antizipation im Vordergrund: Da ein empathisches Produktionssystem permanent den Zustand aller Maschinen analysiert, kann es proaktiv agieren. Das System erkennt, welche Maschine Gefahr läuft, demnächst auszufallen und hat auch schon den Plan parat, welcher Akteur die Aufgaben kurzfristig übernimmt. Da sich alle Akteure jederzeit darüber im Klaren sind, was das aktuell dringlichste Ziel ist – etwa die fristgerechte Fertigstellung für einen wichtigen Kunden – können sie auch in punkto Maschinenauslastung und -verschleiß gemeinsam darauf hinarbeiten: Die Maschinen sind sich der Dringlichkeit »bewusst« und stellen ihre Steuerungsparameter entsprechend ein. So wird sich etwa eine Engpassmaschine derart konfigurieren, dass sie die maximale Auslastung vermeidet, um einem Ausfallrisiko vorzubeugen. Kommt es dennoch zum Ausfall, kann sie gemeinsam mit anderen Maschinen frühzeitig Vorkerhungen treffen, um eine alternative Reihenfolge der Fertigungsaufträge einzuplanen. Fertigung und Instandhaltung sind damit keine getrennten Bereiche mehr, sondern eng miteinander vernetzt.

EMPATHISCH, TRANSPARENT UND REAKTIONSSCHNELL

Die Verknüpfung ehemals getrennter Fabrikbereiche betrifft auch den dritten Anwendungsbereich, die Produktionsplanung und -steuerung. Die empathische Kooperation der digital vernetzten Akteure führt hier zu einer Auflösung der hierarchischen Strukturen: Durch virtuelles Echtzeit-Feedback vom Shopfloor zur Planungsebene können selbst kleinste Abweichungen wie ein längerer Rüstvorgang, die verzögerte Materialbereitstellung oder eine minimale Veränderung am Produkt unmittelbar erkannt und sofort entsprechende Gegenmaßnahmen eingeleitet werden. Durch die Einbindung sämtlicher Produktionsmittel in die digitale Infrastruktur der Produktionsplanung entsteht somit eine komplett transparente Fer-



tigung, die sich mithilfe intelligenter Algorithmen selbstständig organisiert und optimiert.

Dies sind nur einige praktische Beispiele, die aber bereits zeigen, wie eine empathische Produktion zu einem nahtlosen Zusammenspiel aller Beteiligten führt – und Unternehmen widerstandsfähiger gegenüber disruptiven Veränderungen macht. ♦

IHRE ANSPRECHPERSONEN

Prof. Dr. h. c. Dr.-Ing. Eckart Uhlmann
+49 30 39006-100
eckart.uhlmann@ipk.fraunhofer.de

Christopher Mühlich
+49 30 39006-144
christopher.muehlich@ipk.fraunhofer.de



© Verena Müller / BG ETEM

Auf den Punkt genau

Unsere Gesprächspartner entwickeln gemeinsam Lösungen für Fertigung mit höchster Präzision. Im Expertengespräch der FUTUR diskutieren sie die Größe »Präzision« als Schlüssel für eine nachhaltige Produktion.

| futur | **Herr Fleiner, die Maschinen von exeron stehen für höchste Fertigungsgenauigkeit bei hohen Prozesssicherheiten. Was motiviert diesen Qualitätsanspruch?**

/ **FLEINER** / Unser übergeordnetes Ziel ist es, eine Wirtschaft mitzugestalten, die wie die Natur nach einem Kreislaufprinzip funktioniert. Als Werkzeugmaschinenhersteller

können wir dabei den Beitrag leisten, bei jedem Fertigungsvorgang ein »first time right« zu ermöglichen. Soll heißen: Unsere Anlagen sollen auf Anhieb ein korrektes Produkt erzeugen. Das ist ein hohes Ziel, und wir wollen das aus zwei Gründen. Erstens wegen der Ressourceneffizienz: Wir reduzieren Ausschuss und minimieren damit den Energie- und Materialverbrauch. Außerdem erreichen wir über geringeren

Bernfried Fleiner

ist Geschäftsführer der exeron GmbH. exeron fertigt Werkzeugmaschinen für das High-End-Erodieren und Hochgeschwindigkeitsfräsen, die passgenau auf die Bedarfe der Anwender abgestimmt werden. Als einer von zwei Geschäftsführern ist Herr Fleiner bei exeron zuständig für Innovations and Services. Beim PTK 2023 am 14. und 15. September im Produktionstechnischen Zentrum Berlin wird er einen Vortrag zum »Zero-Defect-Ansatz als Beitrag zur Nachhaltigkeit« halten. (Bild rechts)

Prof. Dr.-Ing. Julian Polte

ist Leiter der Abteilungen Fertigungstechnologien sowie Produktionsmaschinen und Anlagenmanagement am Fraunhofer IPK und Inhaber des Lehrstuhls »Maschinen und Technologien für die Additive Präzisionsfertigung metallischer Bauteile« an der Technischen Universität Berlin. Er arbeitet daran, Werkzeugmaschinen und Fertigungsverfahren effizienter, präziser und nachhaltiger zu gestalten. (Bild links)

Verschleiß eine Langlebigkeit der Maschine. Damit wird der ökologische Fußabdruck einer Produktion massiv verbessert. Zweitens wegen der Mitarbeitergesundheit: Wenn ein Teil falsch produziert wird, gibt das Ärger, das verursacht Stress – mit enormen Auswirkungen auf die Menschen in der Produktion und damit auf die Produktivität eines Unternehmens. Wenn Beschäftigte Fertigungsprozesse mit Gelas-

senheit anpacken, weil sie wissen, mit der Maschine klappt das, ist das ein mächtiges Mittel für die Gesunderhaltung der Belegschaft.

| futur | **Herr Professor Polte, warum muss eine Werkzeugmaschine denn mit höchster Präzision arbeiten, um Zero Waste zu ermöglichen?**

/ POLTE / Die Ansprüche an die Bauteilgenauigkeit sind bei vielen Werkstücken enorm gestiegen. Vor einigen Jahren lag die technologische Speerspitze bei wenigen Mikrometern Genauigkeit. Das können heute viele, und gleichzeitig haben immer mehr Bauteile sehr hohe Anforderungen an die Präzision. Das liegt auch daran, dass die Bauteile ständig kleiner und kompakter werden und sich die Leistungsdichte erhöht. Hinzu kommt: Immer mehr Maschinen wer-

den in nicht spezifizierten Umgebungsbedingungen aufgestellt, aber trotzdem werden höchste Ansprüche an Genauigkeit und Verlässlichkeit gestellt. Der Markt fordert also Innovationen im Bereich der Bauteilqualität, aber auch der Genauigkeit und Zuverlässigkeit von Werkzeugmaschinen.

/ FLEINER / Wie stark die Anforderungen an die Werkstückgenauigkeit gestiegen sind, sieht man auch daran, dass wir heute systematische Produktabnahmeprozesse mit dedizierten Abnahmewerkstücken fahren. Diese Werkstücke werden bei jeder Maschinenabnahme immer gleich gefertigt, um zu schauen, wie zuverlässig ein Prozess läuft. So etwas haben wir früher nicht gemacht, heute ist es selbstverständlich. Und es liefert uns immer wieder neue Daten zur Prozesssicherheit, die in die Weiterentwicklung einfließen.

Bilder:

1

Bernfried Fleiner am exeron-
Standort im baden-württembergischen
Oberndorf
© Verena Müller / BG ETEM

2

exeron Fräsmaschine HSC MP7
mit Werkstück- und Elektroden-
handling AWEX 100
© exeron GmbH

1

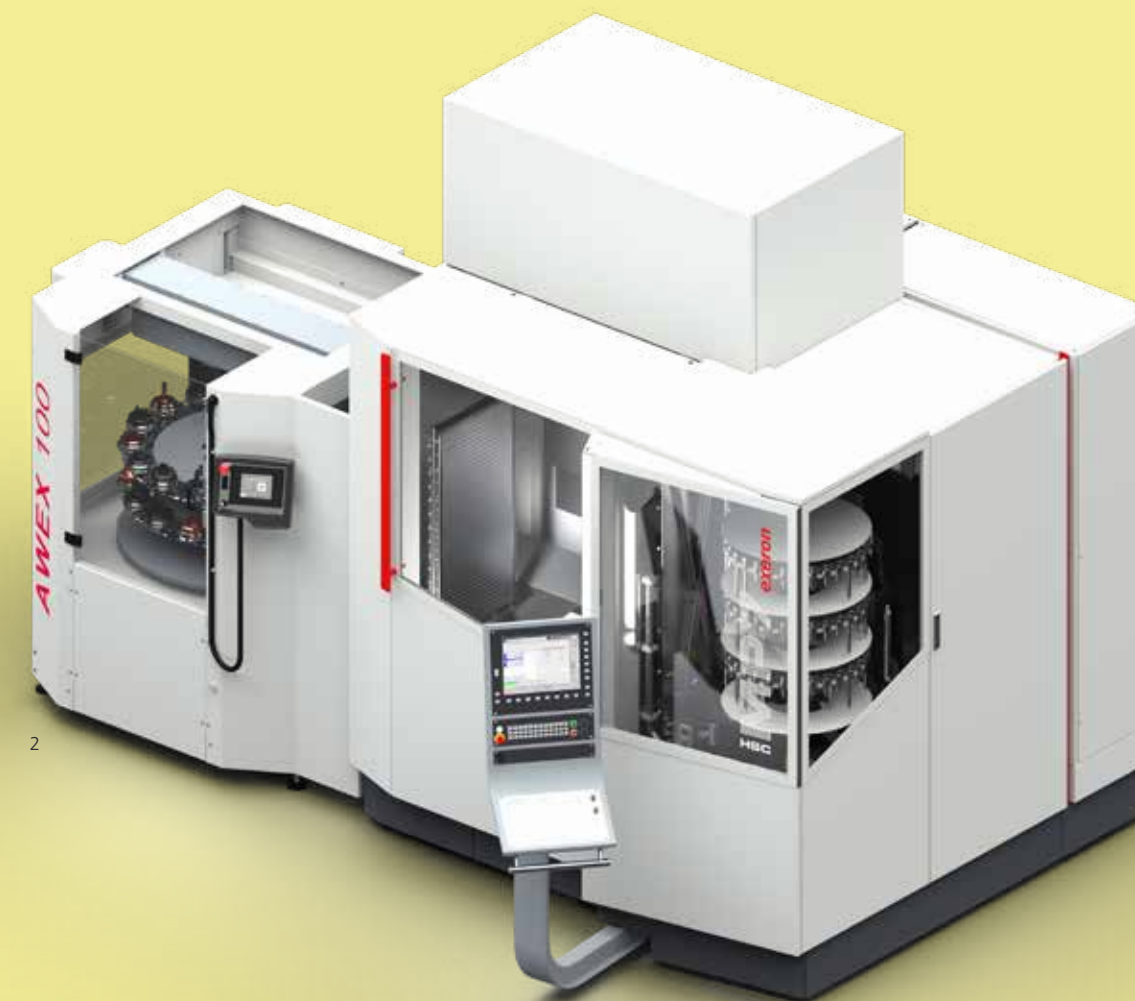


| futur | **Herr Fleiner, was würden Sie rückblickend als Meilenstein in der Entwicklung der exeron-Maschinen betrachten, wo Komponenten die Genauigkeit und Bauteilqualität entscheidend verbessert haben?**

/ FLEINER / Mit unserem Cool-Base-Konzept greifen wir innere und äußere Wärmequellen simultan auf. Dabei nutzen wir schnelle Wärmeübertragung in das verwendete Kühlmedium und eine gebremste Wärmeübertragung aus äußeren Störquellen. Von der Kühllogik kommend setzen wir auf sich ergänzende Systeme: einen Leistungskühlkreislauf als Basis, einen Präzisionskühlkreislauf und in ausgewählten Bereichen einen Höchstpräzisionskühlkreislauf mit einer Abweichung von maximal $\pm 0,1$ Kelvin. Auf dieser Grundlage baut unsere hochpräzise Messtechnik auf. Sie liefert wo nötig Ausgangsdaten für diskrete volumetrische und rotatorische Kompensationsmechanismen. Darüber hinaus war unsere Entscheidung, eine logische Brücke zwischen den Abnahmekriterien nach DIN ISO 230 über die Frässtrategie und fräswerkzeugneutrale 5-Achs-Vermessung bis zum bereits angesprochenen Abnahmewerkstück zu bilden, ein wichtiger Schritt in der Kundenkommunikation. Das Konzept haben wir bei der Berliner Runde 2019 im PTZ vorgestellt.

| futur | **Und welche Themen treiben die nächsten Entwicklungsschritte bei Werkzeugmaschinen?**

/ POLTE / Wenn wir die Werkzeugmaschine betrachten, wie sie heute ist und wie sie morgen aussehen müsste, sehen wir zahlreiche Aspekte, die berücksichtigt werden müssen. Aus meiner Sicht stechen zwei besonders hervor: Insbesondere in der Vergangenheit war hochqualifiziertes Personal zur Bedienung nötig, und davon steht immer weniger zur Verfügung. Mit Verbesserungen in der Bedienbarkeit begegnen wir also den Herausforderungen



2

des demographischen Wandels und Fachkräftemangels. Außerdem haben wir in den letzten zwei Jahren schmerzlich erfahren, wie wichtig das Thema Resilienz ist. Und da ist die Frage: Wie kann eine Werkzeugmaschine die Resilienz von Produktionsunternehmen verbessern – und wie kann ein Maschinenhersteller Unternehmen zu mehr Resilienz befähigen?

| futur | **Dann schauen wir diese Themen doch direkt an. Was kann ein Werkzeugmaschinenhersteller leisten, um dem Fachkräftemangel zu begegnen? Wie kann man etwa damit umgehen, wenn es keine Personen mit Fachausbildung gibt, die die Maschine bedienen, und trotzdem eine hohe**

Präzision und Wiederholgenauigkeit erreicht werden müssen?

/ FLEINER / Wir sind schon vor Längerem dazu übergegangen, unsere Maschinen zu automatisieren. So wird das vorhandene Fachpersonal von normalen Bedienungsaufgaben entlastet und kann sich um Vorgänge kümmern, die wirklich eine Fachkraft erfordern. Außerdem ermöglichen unsere User Interfaces ein vergleichsweise schnelles Lernen – das erleichtert die Einarbeitung in neue Maschinen oder Prozesse.

/ POLTE / Ich finde den Ansatz von exeron zum ersten Punkt sehr spannend. Das Unternehmen stellt quasi Mini-Fertigungszellen her, bei denen zum Beispiel die Werkstückwechseinheit symbiotisch in

die Werkzeugmaschine integriert ist. Das ist besonders für KMU interessant, die keine vollautomatisierten Prozessketten haben, die aber dennoch die Vorgänge an der einzelnen Maschine ein Stück weit automatisieren wollen.

| futur | **Könnten Sie bitte erläutern, was das bedeutet?**

/ FLEINER / Nun, die meisten Kunden, die solch ein System bei uns erwerben, hatten bisher durchgehend jemand an der Maschine stehen, der die Fertigungsaufträge durchleitet. Nun haben sie in der extremsten Ausbaustufe ein Jobmanagementsystem, das den Überblick über den gesamten Prozess behält. In diesen Pro-

zess geht Rohmaterial hinein, das zunächst auf Vollständigkeit geprüft und vermessen wird, ob es zusammenpasst. Dann wird auf der Fräsmaschine eine Elektrode hergestellt, anschließend wird auf der Erodiermaschine erodiert. Und wenn zum Beispiel bei der Elektrodenherstellung ein Fräserbruch geschieht, reagiert das System flexibel. Im Idealfall läuft der Prozess so autark, dass am Freitagabend beladen wird, am Montag ist der Prozess fertig und zwischendrin ist keinerlei Eingriff erforderlich. So kann ich relativ viel an Produktion zur Verfügung stellen mit vergleichsweise wenig Personen. Im geflügelten Sinne ist das wie »am Freitag säen und am Montag ernten«.

/ POLTE / Wenn man Sie also als Maschinenhersteller bezeichnen würde, wäre Ihre Leistung unzureichend beschrieben. Sie haben ja eher den Anspruch, gesamtgesellschaftliche Lösungen für Problemstellungen beim Kunden anzubieten.

/ FLEINER / Ja, das geht auch kaum noch anders, denn die reproduzierbare Herstellung hochgenauer Bauteile macht es erforderlich, dass Maschinenhersteller für Anwender ansprechbar sind. Abgesehen davon müssen wir den Kunden auch stark zur Hand gehen, denn es erfordert ein Umlernen, stärker automatisierte Prozesse zu handhaben – schon deshalb, weil dabei die Distanz zum Prozess größer ist.

/ POLTE / Das ist eine schöne Vorlage für uns, denn am Fraunhofer IPK arbeiten wir quasi am nächsten Level des Service. Wir wollen mit kontextsensitiver Assistenz Werkzeugmaschinen befähigen, die Bedienenden bei verschiedenen Prozessen bestmöglich zu unterstützen. Dabei werden die Bedienenden mit Edge Devices wie Tablets, Smartphones oder Smartwatches in Abhängigkeit von ihrem Erfahrungslevel durch den Prozess geleitet. Das können Fertigungsprozesse sein, etwa Unterstützung bei der Werkstückeinrich-



Bilder:

- 1**
Blick in das Werkzeugmagazin der HSC 600 im Versuchsfeld des PTZ
- 2**
Erodiermaschine EDM 313 Hochgenau im Anwendungszentrum Mikroproduktionstechnik – AMP
- 3**
Professor Julian Polte an der HSC 600

tung oder Vorbereitungsprozesse im Bereich der Programmierung der Bauteile, aber auch Service und Reparatur.

/ FLEINER / Das ist definitiv ein Thema, wo Forschungsunterstützung für einen Mittelständler wie uns sinnvoll ist. Denn wenn ich den Bediener oder die Bedienerin zum Beispiel dabei unterstützen möchte in

einen Prozess einzugreifen, der nicht rund läuft, dann muss ich erstmal erfassen: Wo steht denn dieser Prozess? Und ich muss Warnsignale erkennen können. Da spielen Sensorik in der Maschine sowie das Aufnehmen von Zustandsdaten über diese Sensorik und vor allem die Interpretation der Daten eine große Rolle. Da bei null anzufangen, ist eine Herausforderung.

/ POLTE / Im Übrigen brauchen Sie für die Zustandserfassung nicht mal unbedingt zusätzliche Sensorik. Wir arbeiten inzwischen an der Frage, ob man so eine Überwachung ganz auf maschineninterne Daten stützen kann, zum Beispiel indem man direkt an die CNC-Steuerung geht. Die Forschung fokussiert da hauptsächlich auf das Verständnis von Zusammenhängen. Wie sind bestimmte Signale zu interpretieren und kann man aus der Kombination aller vorhandenen Signale Rückschlüsse auf den Zustand der Maschine ziehen?

| futur | **Und wo führt das dann hin? Oder anders gefragt: Mit welchen Mitteln wird die Werkzeugmaschine der Zukunft die Grenzen des heute Möglichen erweitern?**

/ FLEINER / Wenn ich die Gedanken von Herrn Professor Polte einen Moment auf mich wirken lasse, denke ich: Wir werden mit intelligenten Softwarelösungen die Eintrittsbarrieren zur Bedienung von Maschinen, die hohe Prozesssicherheit und sehr hohe Fertigungsgenauigkeit garantieren, für einen noch breiteren Personenkreis reduzieren. Da wird neben Sensorik auch intelligente Messtechnik eine Rolle spielen und die Mensch-Maschine-Interaktion wird weiter verbessert werden.

/ POLTE / Und dabei wird es nicht bleiben. In aktuellen Forschungsprojekten rücken bereits kognitive Produktionsprozesse in den Fokus der Entwicklung. Dabei geht es darum, dass Ressourcen, die an der Produktion beteiligt sind – Maschinen, Transportfahrzeuge und so weiter – eigenständig ihren Zustand wahrnehmen und sich zum Beispiel für Aufträge zur Verfügung stellen oder Wartungen anfordern. Im Leitprojekt EMOTION wollen wir sogar noch einen Schritt weiter gehen und empathische Produktionssysteme schaffen – also Systemverbünde, in denen die beteiligten Ressourcen erkennen, dass eine andere Ressource im Prozess unter- oder

KOOPERATION ZWISCHEN EXERON UND FRAUNHOFER IPK

exeron gewährleistet reproduzierbare Bauteilqualität auf höchstem Niveau bei garantierter Maschinenverfügbarkeit. Das Anwendungszentrum Mikroproduktionstechnik – AMP des Fraunhofer IPK bietet durch seine schwingungsentkoppelten Fundamente und Klimastabilität hervorragende Voraussetzungen für die Weiterentwicklung solcher Eigenschaften. Zudem hat exeron im Fraunhofer IPK einen Partner, der sich auf die Herausforderungen des Unternehmens einstellt und zielgerichtet Lösungen umsetzt, um Spitzen im Entwicklungsbedarf abzudecken.

Mittlerweile sind im Fraunhofer IPK drei exeron-Maschinen im Einsatz:

- eine Fräsmaschine HSC MP7/5 für Entwicklungsarbeiten im Werkzeug- und Formenbau, der Energie- und Medizintechnik, der Uhrenindustrie und Mobilität
- eine Erodiermaschine EDM 313 Hochgenau für gemeinsame Entwicklungen zur Prozessoptimierung und Effizienzsteigerung
- eine Fräsmaschine HSC 600 im Applikationslabor »dip« für Forschung zur Kleinserienfertigung individualisierbarer Brennstoffzellen für Nischenmärkte sowie zu empathischen Produktionssystemen im Leitprojekt EMOTION (vgl. S. 10)



3

überfordert ist und darauf reagieren. Wir sind überzeugt, dass der Erfolg der Produktion davon abhängt, mit welcher Effizienz die Stakeholder in einem Fertigungssystem zusammenarbeiten. Und um da ran zu kommen, ist es essenziell, auf die Maschinenebene zu gehen und eine Werkzeugmaschine zu befähigen, in dem Kontext aktiv mitzuarbeiten. Damit sind wir

dann auch beim Thema Resilienz: Wenn technische Ressourcen aktiv auf unvorhergesehene Situationen reagieren, erhöht das die Resilienz einer Fertigung. ♦

IHRE ANSPRECHPERSON

Prof. Dr.-Ing. Julian Polte

+49 30 39006-433

julian.polte@ipk.fraunhofer.de

Cold Spray: Additive Fertigung mittels kinetischer Energie

Kaltgasspritzen gilt als eines der modernsten Verfahren im Bereich des thermischen Spritzens. Durch eine Forschungsk Kooperation haben Fraunhofer IPK und IWF der TU Berlin seit neustem Zugriff auf ein hochmodernes Cold-Spray-Fertigungssystem.

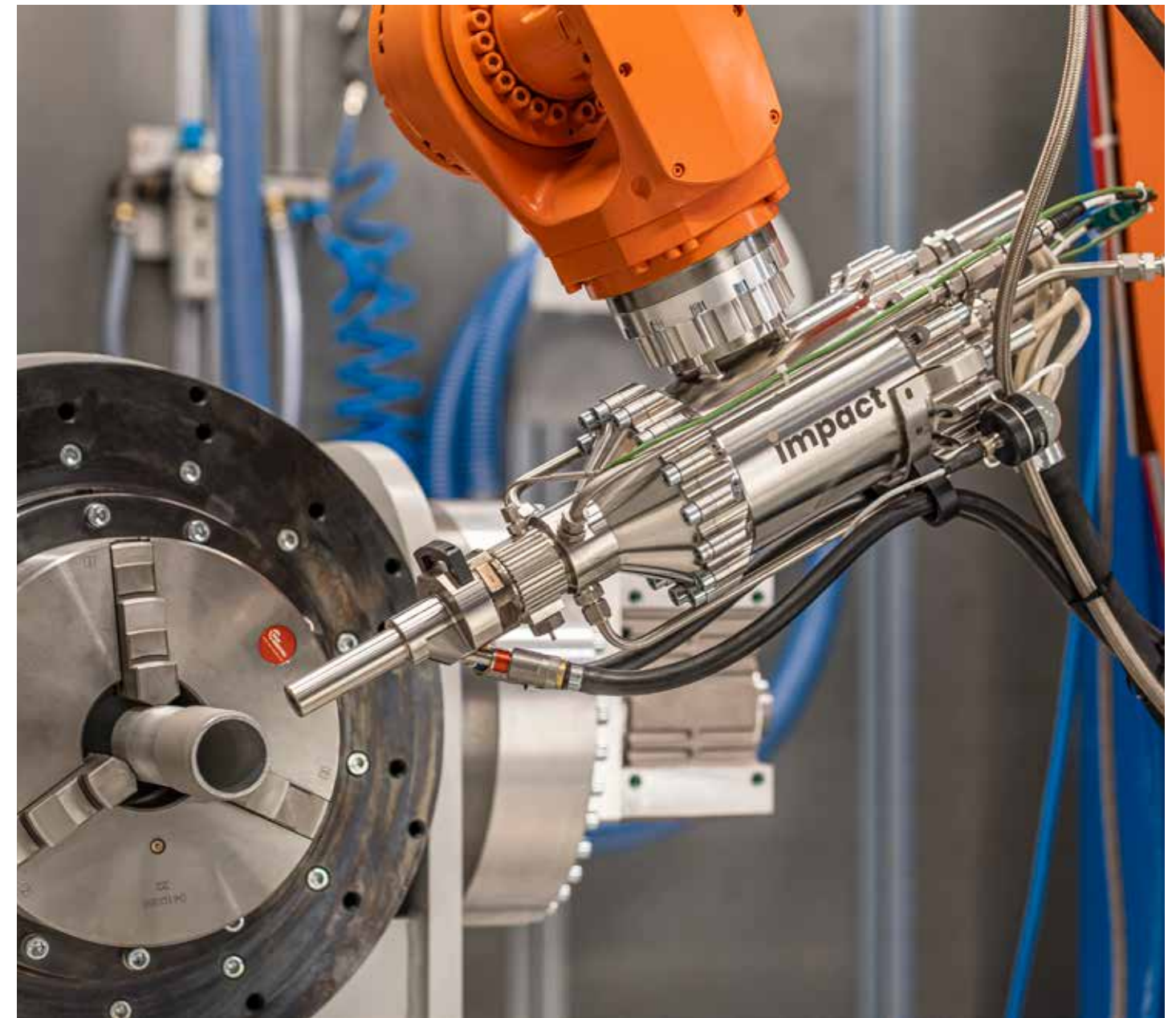
Wer Großbauteile mit komplexen Geometrien, zum Beispiel für den Automobilbau, herstellen möchte, steht vor einer Herausforderung: Der Wärmeeintrag der meisten Beschichtungsverfahren birgt die Gefahr, die Form des Bauteils zu beeinträchtigen – Stichwort Verzug durch Eigenspannungen. Hier bietet das sogenannte Kaltgasspritzen (Cold-Spray-Verfahren) einen innovativen Lösungsansatz: Ein pulverförmiger Werkstoff wird mit hoher Geschwindigkeit auf die zu beschichtende Oberfläche gestrahlt. Durch das hohe Tempo bilden die Partikel beim Aufprall eine feste und widerstandsfähige Schicht. Da das Pulver bei der Verarbeitung eine relativ niedrige Temperatur unterhalb der Schmelztemperatur hat, findet kein Aufschmelzen und Wiedererstarren im Material statt. So können Formabweichungen durch thermisch induzierte Eigenspannungen weitgehend vermieden werden.

Als Ergebnis einer gemeinschaftlichen Investition mit dem Werner-von-Siemens Centre for Industry and Science e. V. (WvSC) steht dem IWF der TU Berlin und dem Fraunhofer IPK seit dem Frühjahr 2023 ein hochmodernes Fertigungssystem für das Kaltgasspritzen zur Verfügung. Ziel ist, mit der Anlage die Grenzen dessen, was bisher mit additiven Fertigungsverfahren möglich ist, zu überschreiten.

LEISTUNGSSTARKES FERTIGUNGSSYSTEM

Cold Spray ist ein Verfahren der Beschichtungstechnik, genauer gesagt des thermischen Spritzens. Dabei wird ein meist metallisches Werkstoffpulver in einen Trägergasstrom injiziert und durch eine Lavaldüse geleitet. Durch die in der Düse wirkende Strömungsmechanik wird der Gasstrom auf bis zu dreifache Schallgeschwindigkeit beschleunigt, wodurch die Werkstoffpartikel eine hohe kinetische Energie aufnehmen. Beim Auftreffen der Partikel auf eine Substratoberfläche bewirkt diese Energie einen festen Formzusammenhalt.

Man kann sich das Prinzip vorstellen, wie wenn ein Schneeball mit viel Schwung auf einen harten Untergrund trifft: Beim Aufprall wird die Seite, die der Oberfläche zugewandt ist, plattgedrückt, der Schneeball bleibt haften. Träfe nicht nur ein Schneeball auf die Fläche, sondern tausende, entstünde ein ähnliches Schichtgebilde wie beim Kaltgasspritzen. Dabei werden hohe Bauteildichten und ausgezeichnete Materialeigenschaften erzielt. Hierzu zählen eine hohe mechanische Belastbarkeit sowie eine thermische oder elekt-



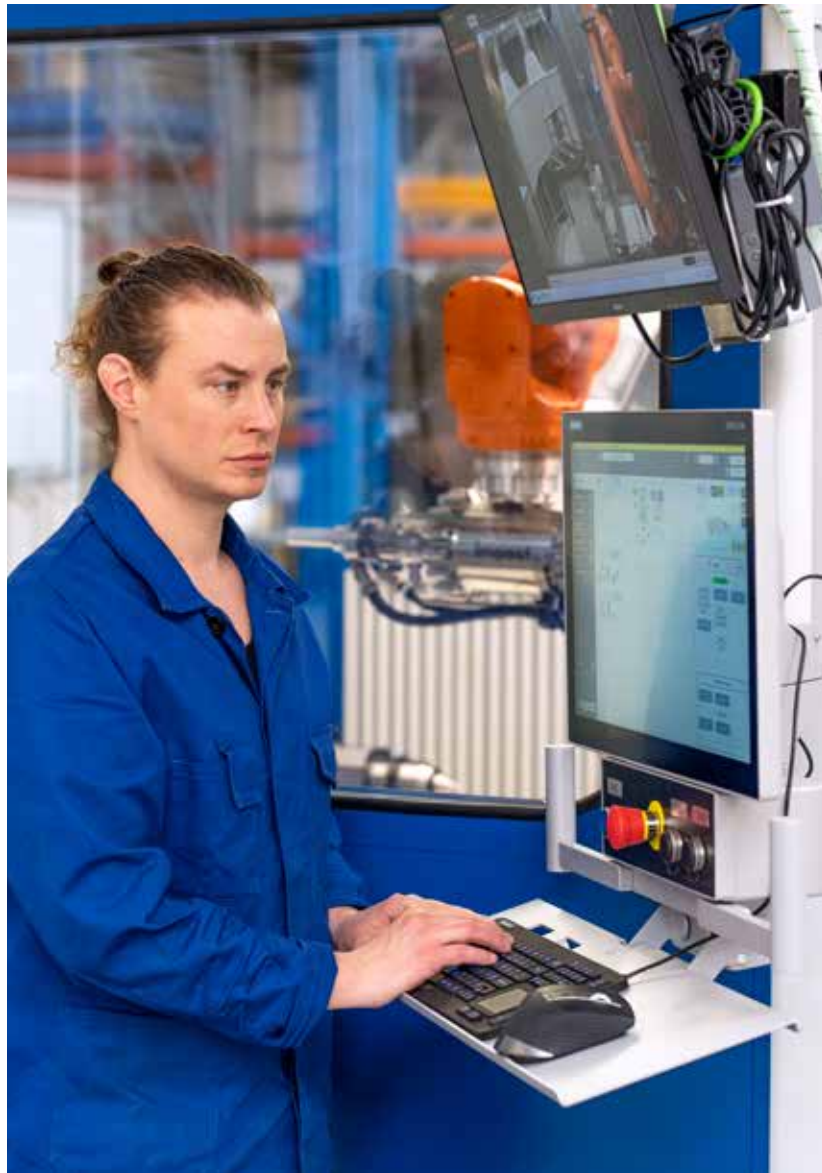
rische Leitfähigkeit, welche durch geeignete Prozessparameter gezielt eingestellt werden können. Darüber hinaus lassen sich durch eine wahlweise seriell oder parallel einstellbare Werkstoffzuführung Materialkombinationen realisieren, die auf dem Gebiet der additiven Fertigung bisher nicht möglich waren.

Kernkomponente des Fertigungssystems am WvSC ist ein Spraykopf des Herstellers Impact Innovations GmbH, der das Trägergas durch einen Druck von bis zu 60 bar und eine Gastemperatur von 1100 Grad beschleunigt. Ein Kuka-Roboter der neuesten Generation bringt den Spraykopf in eine Relativbewegung mit dem zu fertigenden Werkstück. Diese Bewegung definiert, an welcher Stelle der Bauteilgeometrie Material aufgetragen werden soll. Die Reichweite der Robotik ermöglicht dabei Bauteildimensionen

von mehr als zwei Metern. Die leistungsfähige Steuerung, die neben den sechs Roboterachsen auch zusätzliche Achsen steuern kann, ermöglicht die Fertigung von Bauteildesigns mit komplexen Geometrien.

FORSCHUNG AN INNOVATIVEN TECHNOLOGIEN

Aktuell laufende Forschungsprojekte unterstreichen den hohen Innovationsgrad von Cold-Spray-Prozessen. Das Forschungsprojekt »Elektrische Antriebe 2.0«, das in Kooperation mit dem WvSC durchgeführt wird, widmet sich der wettbewerbsfähigen elektrischen Maschine der Zukunft. Die Prozesskette zur Fertigung von großen elektrischen Hochspannungsmaschinen ist bislang durch die Anwendung von konventionellen Fertigungstechnologien geprägt. Additive Fertigungsverfahren bieten die Möglichkeit, geometrische



2

Bilder:**1**

Ein Ingenieur bei der Steuerung und Überwachung eines laufenden Kaltgasprozesses

2

Beschichtungsprozess eines rotations-symmetrischen Titanbauteils

3

Beschichtungsprozess eines ebenen Kupferbauteils

4

Fertigungssystem mit Kaltgaspistole am Kuka-KR120-Robotersystem in der Beschichtungskabine

1



3

Prozessgastemperatur:
100°C – 1100°C

Heizleistung, max.:
40 kW

Prozessgasdruck, max.:
60 bar

Prozessgasstrom, max.:
190 m³/h N₂

Handling-System:
Kuka KR 120

Bauteilgröße wird definiert durch die Reichweite der Robotik von
2701 mm

Freiheitsgrade:
6+2
Roboterachsen und zwei verknüpfte Rotationsachsen für komplexe Geometrien



4

Einschränkungen in der Fertigung von Statorwicklungen sowie Permanentmagneten zu durchbrechen und damit höhere Leistungsdichten zu erreichen.

Im Kooperationsprojekt »AddGleis« aus dem Förderprogramm Additive Manufacturing Berlin Brandenburg (AMBER) des Landes Berlin wird das Cold-Spray-System zur additiven Fertigung von topologieoptimierten Leichtbaukomponenten eingesetzt. Eine leistungsfähige bildgebende Sensorik im Zusammenspiel mit einer KI-basierten Überwachung des Prozessergebnisses wird zur zusätzlichen Weiterentwicklung der Prozessführung beitragen. ♦

IHRE ANSPRECHPERSONEN

Thomas Braun | +49 30 314 24963
braun@iwf.tu-berlin.de

Tobias Neuwald | +49 30 39006-308
tobias.neuwald@ipk.fraunhofer.de

KOOPERATION MIT DEM WERNER-VON-SIEMENS CENTRE FOR INDUSTRY AND SCIENCE E. V.

Das Werner-von-Siemens Centre for Industry and Science e. V. ist eine Forschungsk Kooperation von zahlreichen Partnern aus Wissenschaft und Industrie in Berlin. Geforscht wird an innovativen Technologien für den produktionstechnischen Wandel, um die Produktion sowie die Produkte von Morgen neu zu denken. Daneben untersuchen weitere Projekte im WvSC neue und innovative Technologien in den Zukunftsthemen Mobilitäts- oder Energiewandel. Die wissenschaftliche Arbeit fokussiert aktuell auf die Bereiche Digitalisierung, additive Fertigung, neue Materialien sowie Nachhaltigkeit. Begleitet wird sie durch die Anwendung neuer Arbeitsformen, der Zusammenarbeit in einem Co-Working-Space und unterstützenden Bildungsangeboten. Dadurch werden die Projekte sowie die beteiligten Institutionen und Unternehmen eng verzahnt und die Mitarbeitenden erhalten für ihre Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten regelmäßig Zugang zum Ort der Produktion.



Wärmepumpe für Maschinen

Es kann sowohl heizen als auch kühlen – ein neues thermoelektrisches System ermöglicht eine bedarfsgerechte Temperierung von Motorspindeln und erhöht damit die Präzision von Werkzeugmaschinen.

Ob Glaslinsen für Kameras, Spiegel für die Luft- und Raumfahrt oder Zahnräder für Uhren – in der Präzisionsfertigung kommt es auf höchste Genauigkeit an. Schon kleinste Fehler oder Unebenheiten können die Funktionalität der Gegenstände beeinträchtigen. Daher müssen die Bauteile mikrometerngenau gefräst oder geschliffen werden. Der Bedarf an derart spanend bearbeiteten Bauteilen im Bereich der Optik, Messtechnik, des Automobilbaus sowie der Informations- und Kommunikationstechnik wächst stetig. Um der Nachfrage in Zukunft nachkommen zu können, ist eine hochproduktive Präzisionsfertigung notwendig.

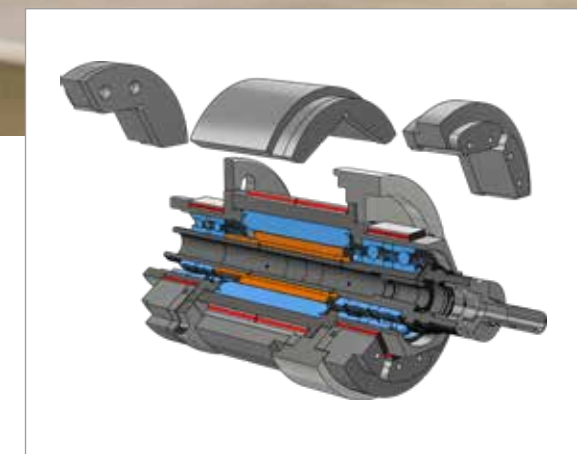
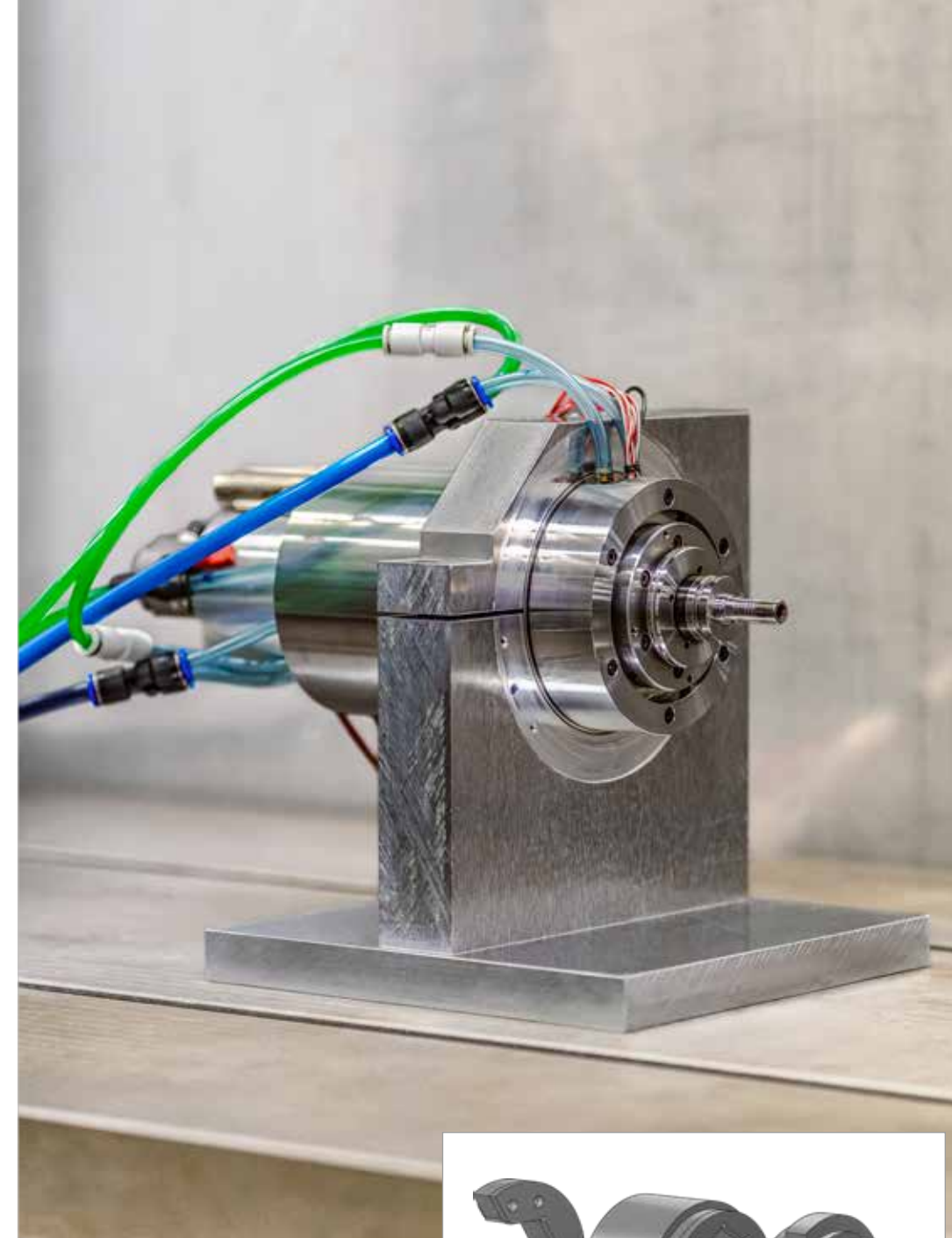
Das Problem: Die dafür aktuell eingesetzten Werkzeugmaschinen haben eine lange Warmlaufzeit, was die Produktivität einschränkt. Die notwendigen Warmlaufzeiten resultieren aus der hohen Anforderung an die Arbeitsgenauigkeit in der Präzisionsfertigung, die einen stabilen Zustand der thermisch bedingten Verlagerungen erfordert. Auf thermisch bedingte Verlagerungen lassen sich bis zu 75 Prozent der geometrischen Bauteilfehler zurückführen.

Die Motorspindeln, in die beispielsweise ein Fräs Werkzeug eingespannt wird, sind die kritische Komponente einer Werkzeugmaschine: Sie haben aufgrund ihrer Nähe zum Werkzeugwirkpunkt einen erheblichen Einfluss auf die Arbeitsgenauigkeit. Die Antriebe und Lager von Motorspindeln stellen signifikante Wärmequellen dar. Durch elektrische sowie mechanische Verlustleistungen kommt es zu einer Erwärmung von Spindelgehäuse und -welle. In der Folge dehnen sich diese Komponenten aus und sorgen für eine Verlagerung des Werkzeugmittelpunkts.

Um diesen Effekt zu reduzieren, werden nach aktuellem Stand der Technik in Motor-

spindeln Fluidkühlungen eingesetzt, die einen Großteil der induzierten Wärmeströme abführen. Konventionelle Fluidkühlssysteme reagieren allerdings nicht auf Änderungen der Wärmeströme, die beispielsweise durch eine Variation der Drehzahl aufgrund von Werkzeugwechseln hervorgerufen werden. Schon eine kurze Stillstandszeit einer Motorspindel im Zuge eines Werkzeug- oder Werkstückwechsels führt zu einer thermischen Störung, die eine erneute Warmlaufzeit notwendig macht. Eine Energieverschwendung, die es nicht nur aus Gründen der Produktivität, sondern auch des Klimaschutzes zu vermeiden gilt.

Um das thermoelastische Verhalten von Motorspindeln zu verbessern und insbesondere die Warmlaufzeit nach einem Spindelstillstand zu reduzieren, haben Forschende am IWF der TU Berlin gemeinsam mit dem deutschen Motorspindelhersteller Alfred Jäger eine thermoelektrisch temperierte Fräs-Motorspindel entwickelt. Kernkomponente des Temperiersystems sind sogenannte Peltier-Module: elektrisch in Reihe geschaltete, winzig kleine Würfel aus dem Halbleiterwerkstoff Bismuttellurid, die zwischen zwei Keramikplatten angeordnet werden. Legt man eine Spannung an, transportieren die Halbleiter Wärme von einer zur anderen Seite. In Summe kann so eine Wärmestromdichte von bis zu 15 Watt pro Quadratzentimeter erreicht werden. Für die entwickelte Motorspindel bedeutet dies, dass theoretisch ein Wärmestrom von bis zu 2,5 Kilowatt zur Verfügung steht – das ist vergleichbar mit der Kühlleistung einer Klimaanlage für einen größeren Raum. Bei einer konventionellen Spindel, die mit Wasser gekühlt wird, lässt sich hingegen nicht bestimmen, wie viel Wärme abgeführt wird. Durch den Einbau der Peltier-Module ist es damit möglich, den Wärme-



2

Bilder:

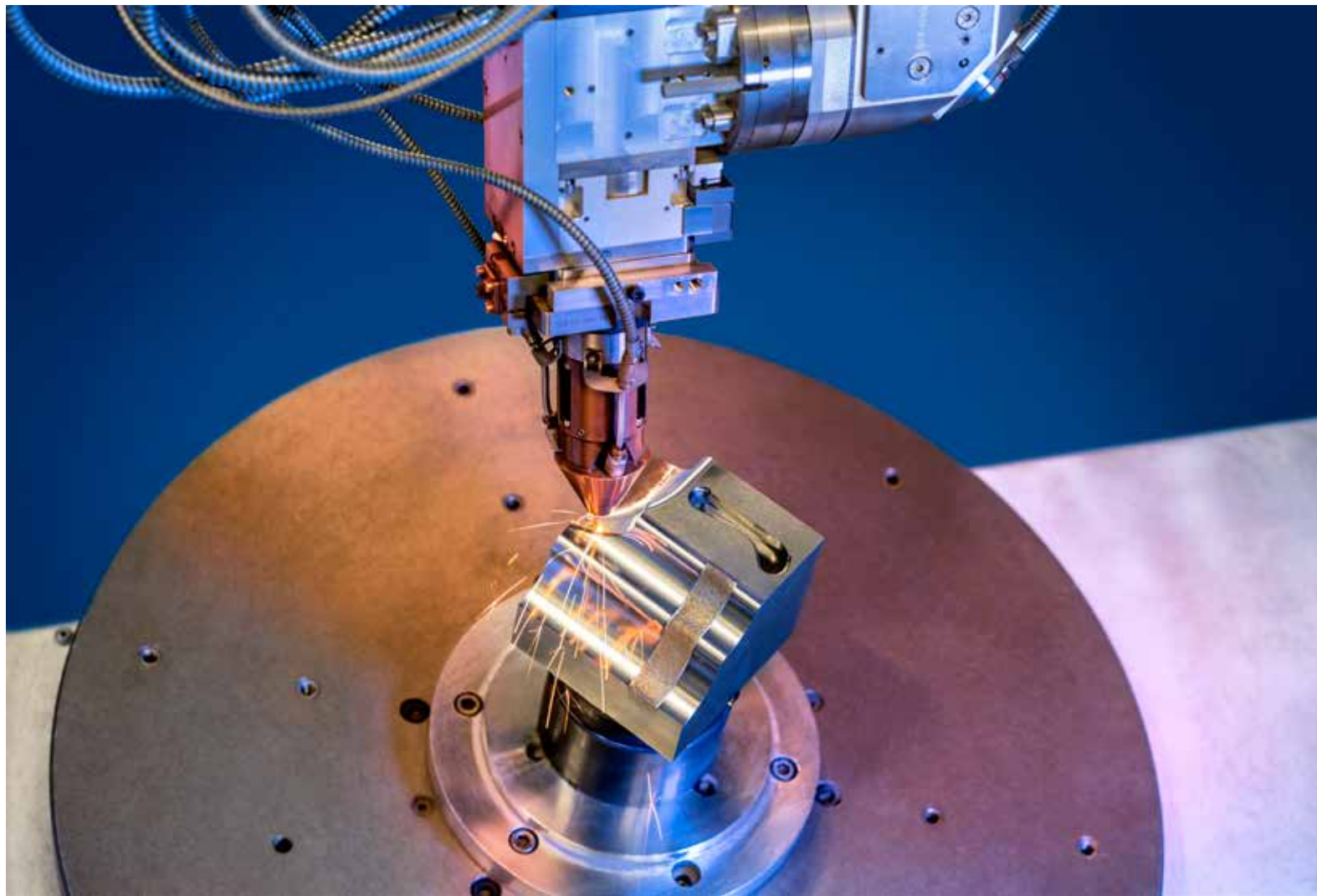
- 1 Versuchsaufbau zum Betrieb der thermoelektrisch temperierten Fräs-Motorspindel
- 2 Schnittdarstellung der thermoelektrisch temperierten Fräs-Motorspindel

strom gezielt zu regeln und die Temperatur der Spindel bedarfsgerecht anzupassen. So kann beispielsweise am vorderen Lager eine Temperatur von 25 Grad Celsius eingestellt und diese unabhängig von Drehzahländerungen gehalten werden. Durch eine Umkehrung der angelegten Stromrichtung lässt sich die Spindel auch vorwärmen, um unproduktive Warmlaufzeiten zu verkürzen. Man kann es sich wie eine Wärmepumpe für Maschinen vorstellen: Durch die Richtungs- umkehr ist sowohl Kühlung als auch Heizung möglich.

Um das Potenzial des thermoelektrischen Temperiersystems zu testen, wurden Vergleichsmessungen zwischen dem Prototyp und einer kommerziell verfügbaren Referenzspindel durchgeführt. Dabei wurden die Motorspindeln in einem Prüfstand mit einer Drehzahl von 55 000 Umdrehungen pro Minute betrieben und für eine Stillstandszeit von 300 Sekunden angehalten, was einen Werkstückwechsel simulieren sollte. Die Messungen zeigen: Durch eine geregelte Wärmezufuhr sinkt die Wellenverlagerung im Stillstand sowie die Warmlaufzeit des Prototyps signifikant. Daraus ergibt sich ein erhebliches Produktivitätssteigerungspotenzial in der Präzisionsfertigung. Fazit: Die thermoelektrisch temperierten Fräs-Motorspindeln können nicht nur das Risiko von Bauteilfehlern reduzieren, sondern auch eine positive Auswirkung auf die Energieeffizienz der eingesetzten Werkzeugmaschinen haben. ♦

IHRE ANSPRECHPERSON

Florian Triebel | +49 30 314-24450
trieb@iwf.tu-berlin.de



1

Besser als neu

Wenn Scangineering und additive Reparaturtechnologien kombiniert werden, lassen sich Werkzeuge oder Bauteile automatisiert reparieren. Ein spannendes Einsatzgebiet für die Reverse-Engineering-Technologie made by Fraunhofer IPK.

Wo massive Kräfte walten, gibt auch das härteste Bauteil irgendwann nach. Im Einsatz entwickeln Turbinenschaufeln Risse, Wellen bekommen Dellen und Stanzwerkzeuge verformen an den Kanten. Mit modernen additiven Fertigungsverfahren (AM) werden solche Schadstellen effizient repariert und das verschlissene Bauteil wieder einsatzbereit gemacht.

Für Instandsetzungsaufgaben dieser Art hat sich insbesondere Laser-Powder Directed Energy Deposition (LP-DED) als effizientes Verfahren durchgesetzt. Dabei wird mittels Laserstrahl ein Schmelzbad erzeugt, in das eine Düse einen pulverförmigen, meist metallischen Zusatzwerkstoff befördert. Dieser schmilzt im Schmelzbad auf, und durch Bewegungen der Düse oder des Bauteils entstehen Schweißraupen, flächige Beschichtungen und schichtweise komple-

xere 3D-Strukturen. So lässt sich mit LP-DED durch lokales Aufschweißen ein breites Spektrum an Komponenten reparieren.

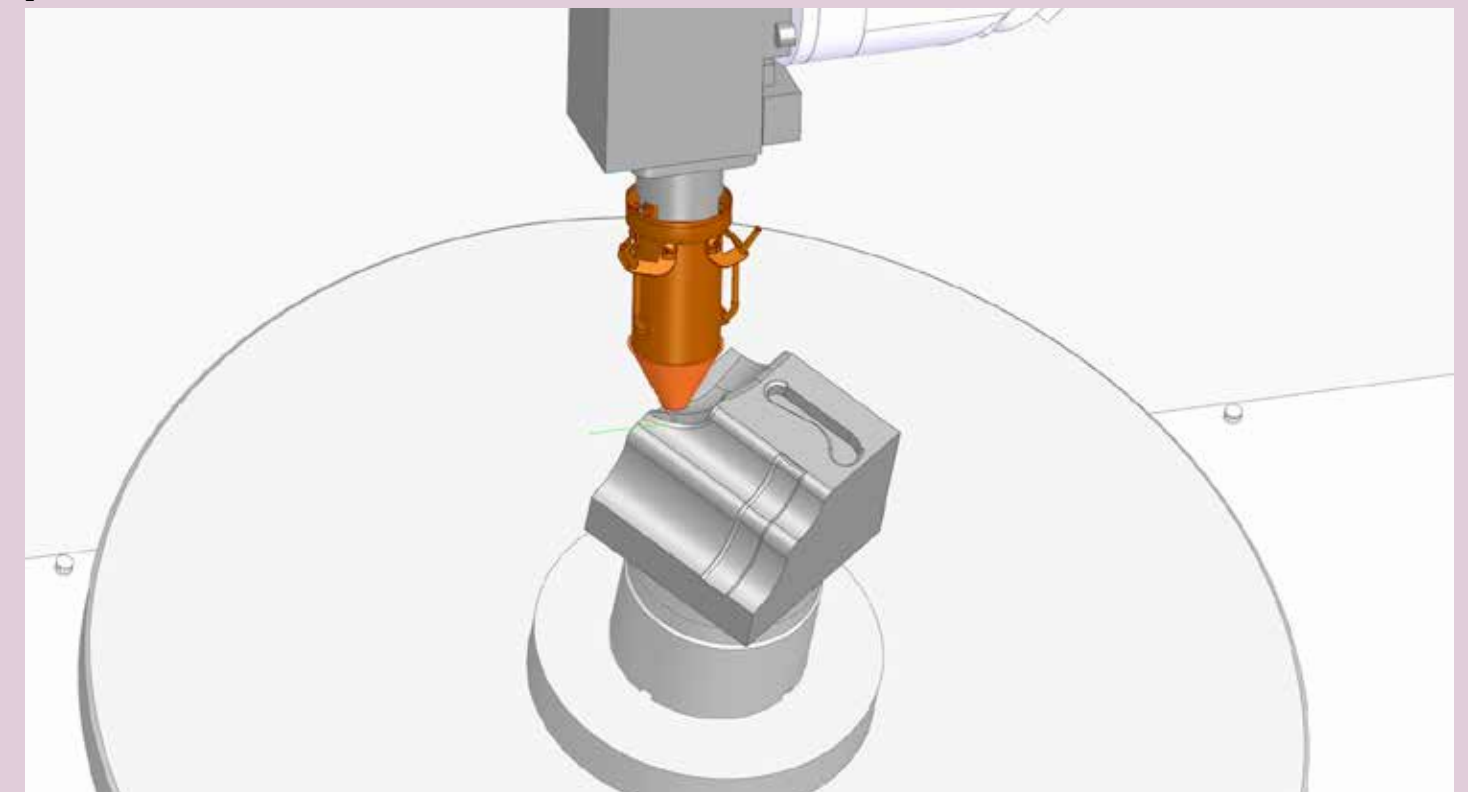
Für einfache Geometrien wie Lauf- oder Dichtflächen von Wellen ist das Verfahren etabliert und wird in der Industrie breit eingesetzt. Doch auch für teure Komponenten wie Stanz- oder Formwerkzeuge, wie sie beispielsweise im Automobilbau vorkommen, kann sich die Reparatur von lokalen Schadstellen mittels DED lohnen. Allerdings sind hier die Hürden zum effizienten Einsatz des Verfahrens durch komplexe Geometrien und individuelle Schadbilder wie Einkerbungen, Kantenabplatzungen oder -verformungen deutlich höher.

Bilder:

1
Reparaturschweißung
mittels LP-DED

2
Generierung und Auftrag-
simulation der Werkzeugwege
in der CAM-Software

2



DIE REPARATURPROZESSKETTE

Für solche Reparaturaufgaben muss in der Regel eine Prozesskette wie diese durchlaufen werden:

1. Das defekte Bauteil wird inklusive seiner Schadstelle 3D-gescannt.
2. Das Bauteil wird für die Reparatur vorbereitet (etwa durch Schleifen oder Ausfräsen der Schadstelle).
3. Das vorbereitete Bauteil wird erneut 3D-gescannt.
4. Die so erzeugten 3D-Scandaten werden verarbeitet, wobei die fehlerhaften Bereiche erfasst und ein Differenzvolumen generiert wird, das Soll- und Istzustand unterscheidet.
5. Ein additiver LP-DED-Reparaturprozess wird in einem CAM-Programm geplant.
6. Der Reparaturprozess wird durchgeführt.
7. Das reparierte Bauteil wird wärmebehandelt und nachbearbeitet.

In dieser Kette stellen vor allem die Schritte 4 und 5 Herausforderungen dar. Aus einem einfachen 3D-Scan lässt sich nicht ohne Weiteres eine Schweißbahn ableiten. Zwar ist das Erfassen und Messen von Geometrien durch Laserscanning oder Fotogrammetrie heute für viele Anwendungen Standard. Aber die dabei entstehenden, großen Datenmengen werden oft nur zu Visualisierungs- oder Messzwecken eingesetzt. Um sie für Reparaturprozesse zu nutzen, müssen die Scandaten verarbeitet, ausgerichtet und in parametrisierte 3D-Modelle umgewandelt werden. Erst mit diesen Modellen kann in einem CAM-Programm die Bahnplanung für den Reparaturprozess vorgenommen werden. Dieser Prozess der Umwandlung von 3D-Aufnahmen in CAD-Modelle nennt sich Reverse Engineering. Er wird noch zu großen Teilen manuell durchgeführt, was geschultes Fachpersonal

und einen hohen Zeitaufwand erfordert. Für hochindividuelle Bauteile ist der Reparaturaufwand daher häufig sehr groß.

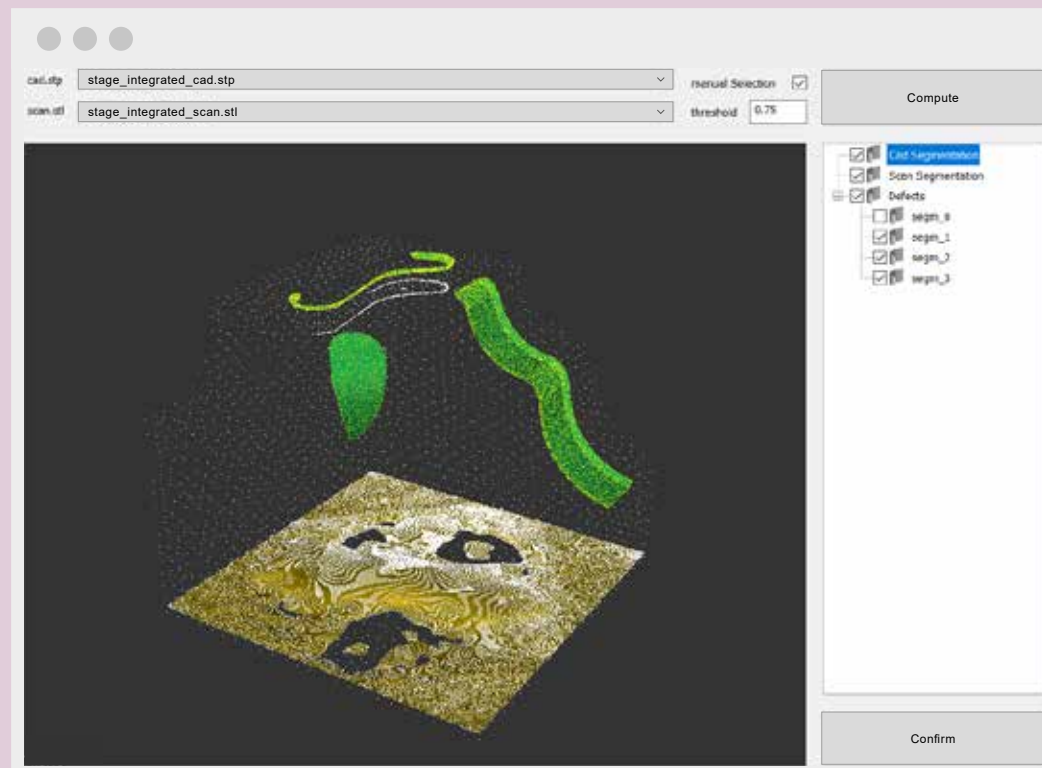
Damit nicht genug, wird der eigentliche Reparaturprozess durch schweiß- und materialtechnische Herausforderungen erschwert. Formwerkzeuge bestehen oft aus Kalt- oder Warmarbeitsstählen mit verhältnismäßig hohem Kohlenstoffgehalt. Der Kohlenstoffgehalt bringt zwar eine gute Härtebarkeit mit sich, reduziert aber auch die Schweißbarkeit des Materials, was für Reparaturschweißungen problematisch ist. Das gilt umso mehr, als die reparierten Bereiche den Anforderungen an Beständigkeit und Härte genauso entsprechen müssen, wie es das Ursprungsbauteil als Ganzes getan hat.

Forschende des Fraunhofer IPK greifen diese Herausforderungen mit einer durchgehen-

den und automatisierbaren Reparaturlösung auf. Dank Scangineering mit automatisierter Bauteilerkennung und geometriebasierter Modellierung sowie modernen AM-Verfahren können defekte Bauteile mit geringem technischem Aufwand wieder einsatzbereit gemacht werden.

3D-SCANNING UND REVERSE ENGINEERING ERGIBT SCANGINEERING

Das als »Scangineering« bekannte Reverse-Engineering-Verfahren ist eine Eigenentwicklung des Fraunhofer IPK. Dabei werden mit intelligenten Algorithmen 3D-Scandaten von Bauteilen vorverarbeitet, ausgerichtet und parametrisiert. Das bedeutet, dass aus den Punktwolken etwa eines Laserscans ein geometriebasiertes und damit manipulierbares 3D-Modell erzeugt wird, das zum Beispiel in ein CAD-Programm geladen werden kann.



Weitere Informationen
www.ipk.fraunhofer.de/
automatisiertes-reverse-engineering



Bild:
Scangineering-Software als Tool für die additive Reparaturprozesskette

Die Kombination aus »Scangineering« und modernen AM-Verfahren macht defekte Bauteile mit geringem technischem Aufwand wieder einsatzbereit.

In den Umwandlungsprozess können Nutze an jeder Stelle als Inputgeber und Analytikerinnen eingreifen. Sie werden aber gleichzeitig von manuellen und repetitiven Schritten entlastet. Mittels Scangineering können komplexe Bauteile, aber auch andere Objekte wie Maschinen oder sogar Gebäude einfach und schnell als virtuelle Modelle nutzbar gemacht werden.

CAM-PLANUNG: WERKZEUGWEGE ERRECHNEN

Für die automatisierte Bauteilreparatur werden im nächsten Prozessschritt auf Basis der Modelle die additiven Reparaturprozesse geplant. Die erkannten geometrischen Defekte werden dabei zur Errechnung der Werkzeugwege und Schweißbefehle für den additiven Aufbau verwendet.

Die mathematisch bestimmten Volumen, Flächen und Kurven reduzieren den Bedarf an zusätzlich zu erstellenden Hilfsgeometrien und erleichtern und beschleunigen

den Programmierprozess: Beschichtungsflächen sind klar definiert und auswählbar, komplette Differenzvolumen können durch schichtweisen Aufbau programmiert oder komplexe Kurven als Stützkurven für die Ausrichtung von Werkzeugwegen genutzt werden. Mittels Aufbausimulation und Überprüfung der Verfahrenswegen können die Werkzeugwege verifiziert sowie etwaige Kollisionen bereits im Vorfeld erkannt und behoben werden.

ADDITIVER REPARATURPROZESS UND NACHARBEIT

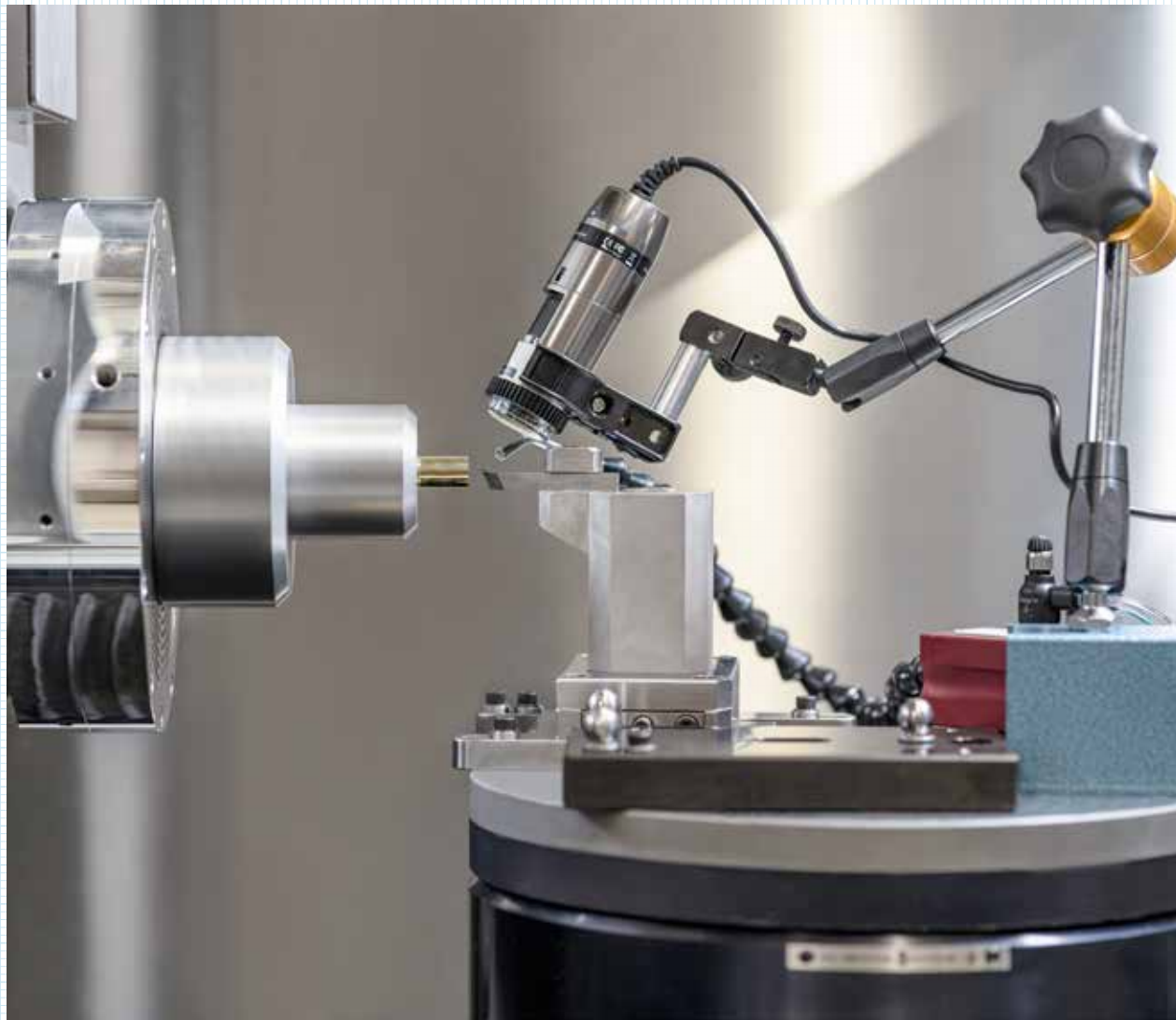
Den letzten Schritt bilden die Auslegung der Prozessparameter und die eigentliche Bauteilreparatur. Hier ist werkstofftechnisches Know-how gefragt, um eine metallurgisch hochwertige und dauerhafte Reparatur zu gewährleisten: Werkstoffspezifische Eigenschaften müssen berücksichtigt werden. Der hohe Kohlenstoffgehalt in Werkzeugstählen etwa begünstigt hohe Härtewerte – diese sind zur Erhöhung der

Standzeiten erwünscht. Beim klassischen Reparaturschweißen, etwa mit Lichtbogenverfahren, kann es allerdings durch den hohen Wärmeeintrag in Kombination mit dem Kohlenstoffgehalt sowie weiteren Legierungselementen zu Rissen im Bauteil kommen. Laserbasierte Verfahren wie LP-DED können hier vorteilhaft sein: Die hohe Energiedichte und der dadurch geringe Wärmeeintrag reduzieren die Rissneigung, die Größe der Wärmeeinflusszone, die Beeinflussung des Grundwerkstoffs sowie den Aufmischungsgrad von Grund- und Zusatzwerkstoff. Weiterhin ist die Auswahl des Zusatzwerkstoffs nicht auf die Legierung des Grundwerkstoffs beschränkt. ♦

IHRE ANSPRECHPERSONEN

Vinzenz Müller | +49 30 39006-372
vinzenz.mueller@ipk.fraunhofer.de

Stephan Mönchinger | +49 30 39006-117
stephan.moenchinger@ipk.fraunhofer.de



Durchblick dank Diamanten

Ultrapräzisionszerspanung ist das Nonplusultra in der Fertigungstechnik – akkurater geht es kaum noch.

Kameralinsen, Spiegel, Brillengläser – in der Optik kommt es auf höchste Präzision an. Mit extrem harten Schneidwerkzeugen aus Diamant wird in mehrstündigen Prozessen Material abgetragen, bis die gewünschte Geometrie erreicht ist. Ultrapräzisionszerspanung nennt sich das Fertigungsverfahren, bei dem Werkstoffe wie Metall, Keramik oder Glas durch Spanen im Bereich weniger Mikrometer bis in den Submikrometerbereich bearbeitet werden. Das Verfahren kommt neben optischen Anwendungsbereichen unter anderem beim Werkzeug- und Formenbau und der Mikrosystemtechnik zum Einsatz.

WERKZEUGE UND PROZESSPARAMETER BESTIMMEN DAS ERGEBNIS

Wie präzise das Ergebnis bei der Ultrapräzisionszerspanung gelingt, hängt von diversen Faktoren ab. Da wäre zunächst das Zerspanwerkzeug. Schneidwerkzeuge aus Diamanten gewährleisten eine hohe Standzeit und Präzision. Der Werkstoff lässt sich aufgrund seiner atomaren Gitterstruktur bis in den Nanometerbereich genau zurechtschleifen. Das ist wichtig, um eine scharfe Kante zu erhalten, mit der später etwa passgenaue Spritzgussformen für Kameralinsen gefertigt werden.

Ein wichtiger Aspekt ist zudem die Kontrolle von thermischen und mechanischen Einflüssen auf das Werkstück. Schon geringste Abweichungen können zu einer Beeinträchtigung der Qualität führen. Das ist fatal, wenn zum Beispiel die Brennweite nicht stimmt und bei einer in die Hornhaut implantierten Intraokularlinse nicht die gewünschte Sehkraftkorrektur eintritt oder die Kameralinse nicht über das gesamte Bildfeld scharf stellt. Werkzeugmaschinen für die Ultrapräzisionsbearbeitung sind daher mit äußerst präzisen Linear- und Rotationsachsen sowie hochauflösenden Positionscodern – einer Art Mini-GPS – ausgestattet, um kleinstmögliche Bearbeitungsschritte prozesssicher umzusetzen.

Last but not least stellen Bearbeitungsmaschinen für den Ultrapräzisionsbereich hohe Ansprüche an die klimatischen Bedingungen des Aufstellorts: Die Temperatur muss konstant sein, zum Beispiel 21 Grad Celsius. Die exakte Temperaturregulierung ist nicht trivial, denn: Maschinen und Beleuchtung produzieren Abwärme, die ein- und ausgehenden Personen heizen den Raum zusätzlich auf. Durch spezielle Klimaanlage gelingt es aber, Schwankungen auf etwa 0,1 Grad Celsius zu be-

Bild:
Moore Nanotech 650 FG im
Anwendungszentrum
Mikroproduktionstechnik – AMP



grenzen. Neben einer Klimatisierung des Raumes sind eine genaue und schnell regelnde Temperierung der Maschine sowie Dreh- und Frässpindeln erforderlich, um eine thermische Ausdehnung des Systems während der Bearbeitung zu verhindern.

FORSCHUNG ZUM ULTRAPRÄZISIONSDREHEN

Eine Prozessvariante, die im Fraunhofer IPK besondere Aufmerksamkeit erfährt, ist das Ultrapräzisionsdrehen. Die hochkomplexe Bearbeitungstechnologie hat in den letzten Jahren enorme Fortschritte gemacht und ermöglicht es heute, Bauteile mit sehr engen Toleranzen von weniger als einem Mikrometer herzustellen. Um die Vorteile des Verfahrens zu nutzen, müssen die bearbeiteten Materialien eine hohe Festigkeit und geringe Duktilität aufweisen, also eher spröde sein. Auch die Wahl des Schmiermittels in der Bearbeitungszone ist

entscheidend, weil es eine wichtige Rolle bei der Reduzierung von Reibung und Werkzeugverschleiß spielt.

Durch eine gekoppelte Bewegung von Drehspindel, Werkzeughubachse und Vorschubachse lassen sich auch nichtrotationssymmetrische Werkstücke über eine Drehoperation fertigen. Im sogenannten Slowslide-Verfahren wird der Werkzeughub über die Bewegung der gesamten Maschinenachse realisiert. Das heißt, das Werkzeug wird in Abhängigkeit von der Rotation des Bauteils unterschiedlich tief zugestellt. Auf diese Weise lassen sich Konturen und Freiformen erzeugen.

Mithilfe eines zusätzlichen Fast-Tool-Servo – eine Komponente, die lediglich das Werkzeug anstelle einer ganzen Maschinenachse bewegt – entsteht eine geringere Masse, wodurch sich die Fertigungsgeschwindigkeit erhöht und gleichzeitig die Bearbeitungsdauer sinkt.

MODERNSTE MASCHINENTECHNIK IM FRAUNHOFER IPK

Die Abteilung Mikroproduktionstechnik des Fraunhofer IPK verfügt seit kurzem über ein Ultrapräzisionsbearbeitungszentrum der US-Firma Moore Nanotechnology Systems. Die schrankgroße Moore Nanotech 650 FG bietet eine hohe Genauigkeit und Wiederholbarkeit bei der Bearbeitung von Flächen mit einem Durchmesser



Bild:
Durch Slowslide-
Drehen gefertigtes
Facettenbauteil

von bis zu 650 Millimetern. Durch ein WEC-System (Workpiece Error Compensation) – einer Art Spurhalteassistent – wird das Werkstück taktil mit einem Taster gemessen. Eventuell auftretende Formabweichungen können automatisiert an die CAM-Software rückgeführt und so die Abweichungen durch Anpassung des Werkzeugpfades kompensiert werden. Die Software gleicht dabei die Ist-Geometrie mit dem Soll-Zustand ab und berechnet, wie die Werkzeugbewegung verändert werden muss, damit der Fehler nicht wieder auftritt. Diese Funktionen ermöglichen es, eine Vielzahl von Materialien, einschließlich Hartmetalle, Keramiken, Kristalle und Glas, mit höchster Präzision und gesteigerter Effizienz zu bearbeiten.

Herkömmliche CAM-Software gerät bei der Ultrapräzisionsfertigung schnell an ihre Grenzen. Der Grund:

Die Software, die für gröbere Bearbeitungsaufträge wie große Stahlteile ausgelegt ist, unterteilt das Werkstück in Segmente beziehungsweise Punkte und zieht dann eine Linie zwischen den Punkten, die das Werkzeug abfährt. Je größer der Abstand zwischen den einzelnen Punkten, desto gröber das Raster. Zu große Punktabstände und die fälschliche Linearisierung kleiner Kreisbogensegmente sind die häufigsten Fehlerquellen bei konventioneller CAM-Software in der Ultrapräzisionszersetzung. Die notwendige Genauigkeit bei der Werkzeugpfaderzeugung kann oftmals nicht erreicht werden.

Um diese Lücke zu schließen und eine maschinenindividuelle CAM-Lösung anzubieten, hat der Maschinenhersteller Moore eine spezielle Software entwickelt, mit der sich optische Linsen direkt unter Angabe der geforderten Brennweite oder der Parameter der Asphären-gleichung, also der mathematischen Beschreibung der Linsengeometrie, herstellen lassen. Eine genaue Kenntnis der Linsengeometrie ist somit nicht notwendig – die Fertigung kann direkt nach Auslegung des Strahlengangs erfolgen. So hat der Betrachter durch die Linse am Ende den vollen Durchblick. ♦

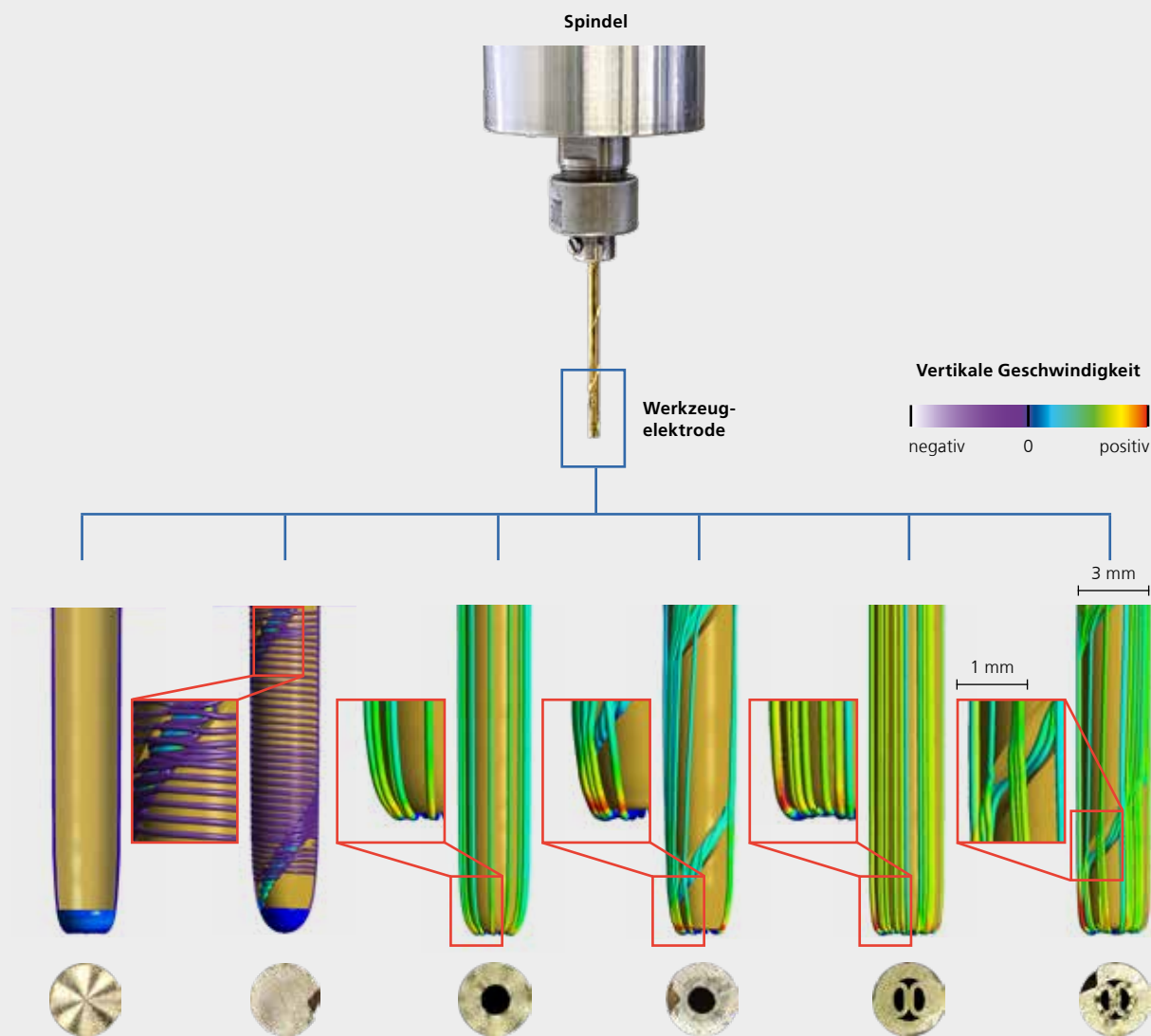
IHRE ANSPRECHPERSON

Martin Dörr | +49 30 39006-456
martin.doerr@ipk.fraunhofer.de

**Das hochkomplexe
Ultrapräzisionsdrehen
hat in den letzten
Jahren enorme Fort-
schritte gemacht.
Heute ermöglicht es,
Bauteile mit sehr
engen Toleranzen von
weniger als einem
Mikrometer herzu-
stellen.**

Effizienz durch Sauberkeit

Wie sich mit Spülkanälen in der Funkenerosion Produktivitätssteigerungen erzielen lassen



Funken schlagen, Blitze zucken, Partikel wirbeln umher – Funkenerosion ist das wohl spektakulärste Fertigungsverfahren der Produktionstechnik. Mithilfe eines Generators wird zwischen zwei Elektroden in einer nichtleitenden Flüssigkeit, einem sogenannten Dielektrikum, eine Spannung angelegt. Dabei werden Funken zwischen zwei Werkstoffen erzeugt. Werkzeug und Werkstück berühren sich dabei nicht und ihr Abstand, der sogenannte Arbeitsspalt, beträgt gerade einmal 100 Mikrometer. Das entspricht der Breite eines menschlichen Haars. Das kontaktlose Aufschmelzen erlaubt eine extrem feine Bearbeitung von Oberflächenstrukturen von Metallen.

Das abtragende Verfahren, das 1943 von dem sowjetischen Ehepaar Lazarenko entdeckt wurde, kommt unter anderem in der Zahnmedizin zum Einsatz. So werden durch Funkenerosion beispielsweise passgenaue Abutments gefertigt, die in den Kiefer als Verbindungselement von Implantaten geschraubt werden. Durch Funkenerosion können auch sehr harte Werkstoffe präzise bearbeitet und individuell angepasst werden, was gerade in der Zahntechnik wichtig ist: Passen die Kronen nicht, können sich dort Bakterien ansammeln und Entzündungen verursachen.

Während zerspanende Verfahren wie Bohren und Fräsen jedem Hobbyhandwerker ein Begriff sein dürften, wissen die wenigsten um die Schlüsselrolle, die Abtragverfahren für die Herstellung von Hochpräzisionsbauteilen in vielen industriellen Anwendungen spielen. Die Beispiele funkenerosiv hergestellter Mikrobohrungen reichen von Kühlluftbohrungen in Turbinenkomponen-

Bild:
Einphasige Strömungssimulationen von sechs verschiedenen Werkzeugelektroden

ten über Kraftstoffeinspritzsysteme, Gasdüsen und Steuerventile in der Automobiltechnik bis hin zu Fadenführern und Spinddüsen in der Textilindustrie. Im Bereich ihrer Hauptanwendungsgebiete, dem Werkzeug- und Formenbau, in der Luft- und Raumfahrt sowie der Medizintechnik wird die Funkenerosion meist als letzter Arbeitsschritt vor der Reinigung der Bauteile genutzt.

Das Verfahren bringt einige Herausforderungen mit sich: Bei jedem Funken entstehen Gasblasen und Abtragpartikel, die im Dielektrikum herumschwimmen und die Gefahr von Kurzschlüssen und Lichtbogenentladungen bergen. Diese Entladungen ziehen nicht nur zusätzliche Regelschritte oder Rückzugsbewegungen nach sich, sondern können durch Einbrände auch zur Beschädigung der finalen Bauteiloberflächen führen. Je schmutziger der Arbeitsspalt, desto instabiler wird der Prozess und desto mehr sinkt die Produktivität. Sauberkeit ist daher das A und O, auch bei der Funkenerosion.

Um die Abtragprodukte zu beseitigen, muss der Spalt daher kontinuierlich gespült werden. Beim etablierten Verfahren der Innenspülung wird die nichtleitende Flüssigkeit mit hohem Druck in den Arbeitsspalt hineingepresst. Dabei werden die Abtragpartikel und Gasblasen senkrecht hinausgespült. Je höher der Druck, desto größer ist jedoch die Gefahr von Seitenentladungen und Instabilitäten innerhalb der Mikrobohrungen. Die Folge: Formabweichungen und schiefe Bohrungen.

Um diesen hochkomplexen und stetig wachsenden Herausforderungen beim funkenerosiven Bohren zu begegnen, werden am IWF der TU Berlin Zusatzeinrichtungen, Werkzeugelektroden und Technologien für alternative Dielektrika entwickelt. Ein Beispiel ist die Einbringung

Sauberkeit ist daher das A und O, auch bei der Funken- erosion.

außenliegender Spülkanäle in die Mantelflächen zylindrischer Werkzeugelektroden. Dazu wurde mit einem speziellen Langdrehautomaten eine helikale Nut in die Werkzeugelektrode gefräst, die sich spiralförmig um den Messingschaft windet. Durch diesen Helixkanal entsteht quasi eine Ausweichroute für die Gasblasen und Abtragpartikel. Wird nun mit hohem Druck ein Dielektrikum durch den Arbeitsspalt gepresst, werden die Abtragpartikel nicht mehr nur senkrecht über den kürzesten Weg ausgeleitet, sondern können über die Außenkanäle austreten. So sinkt das Risiko für seitliche Entladungen und ungenaue Bohrungen.

In einem von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Grundlagenforschungsprojekt soll ein grundlegendes Verständnis der strömungsdynamischen Vorgänge im Arbeitsspalt erarbeitet werden. Das forschungspraktische Problem: Der Spalt misst weniger als 0,1 Millimeter, ist damit extrem klein und nur schwer zugänglich. Detaillierte optische Untersuchungen der Spülbedingungen sind daher kaum möglich. Im Rahmen von Signalanalysen, bei denen Prozesssignale der Spannung und des Stroms aufgezeichnet werden, lassen sich jedoch Rückschlüsse auf die Entladungen ziehen – und damit auf die Frage, wie effektiv die Evakuierung der Abtragprodukte ist.

Demgegenüber ermöglichen Strömungssimulationen zeitlich und örtlich unbeschränkte Einblicke in die hochkomplexe Dynamik der Funkenerosion. Mittels eines statistischen Modells konnte ein strömungsmechanischer Arbeitspunkt identifiziert werden, der die für ein optimales Wirkverhalten der helikalen Nut notwendige Kombination aus Drehzahl und Spüldruck definiert. So kann verhindert werden, dass die Abtragprodukte aufgrund eines zu hohen Spüldrucks ungeachtet der helikalen Nut einfach senkrecht die Bohrung verlassen.

Mit der geeigneten Kombination aus Drehzahl und Spüldruck lässt sich nachweisen, dass Teile der Abtragpartikel unabhängig vom modellierten Entladeort durch lokale Unterdrücke in die helikale Nut gesaugt werden und auf diesem Weg die Bohrung verlassen. Die Erweiterung des Modells um Gasblasen bestätigt bekannte Beobachtungen, wonach die aufsteigenden Gasblasen die Abtragpartikel auf ihrer Phasengrenze aufschwimmen lassen und die Evakuierung des Arbeitsspalts damit erheblich beeinflussen.

Durch die Kombination klassischer, experimenteller Bohrversuche mit softwaretechnisch anspruchsvollen Klassifizierungen der Signalcharakteristiken und nicht zuletzt mit fortschrittlichsten numerischen Modellen lassen sich mit außenliegenden Spülkanälen Produktivitätssteigerungen im Bereich des funkenerosiven Bohrens erzielen. Wer ordentlich durchspült, hat am Ende auch saubere Ergebnisse. ♦

IHRE ANSPRECHPERSON

Sami Yabroudi | +49 30 314-75306
yabroudi@iwf.tu-berlin.de

Simulation einer Einzelentladung

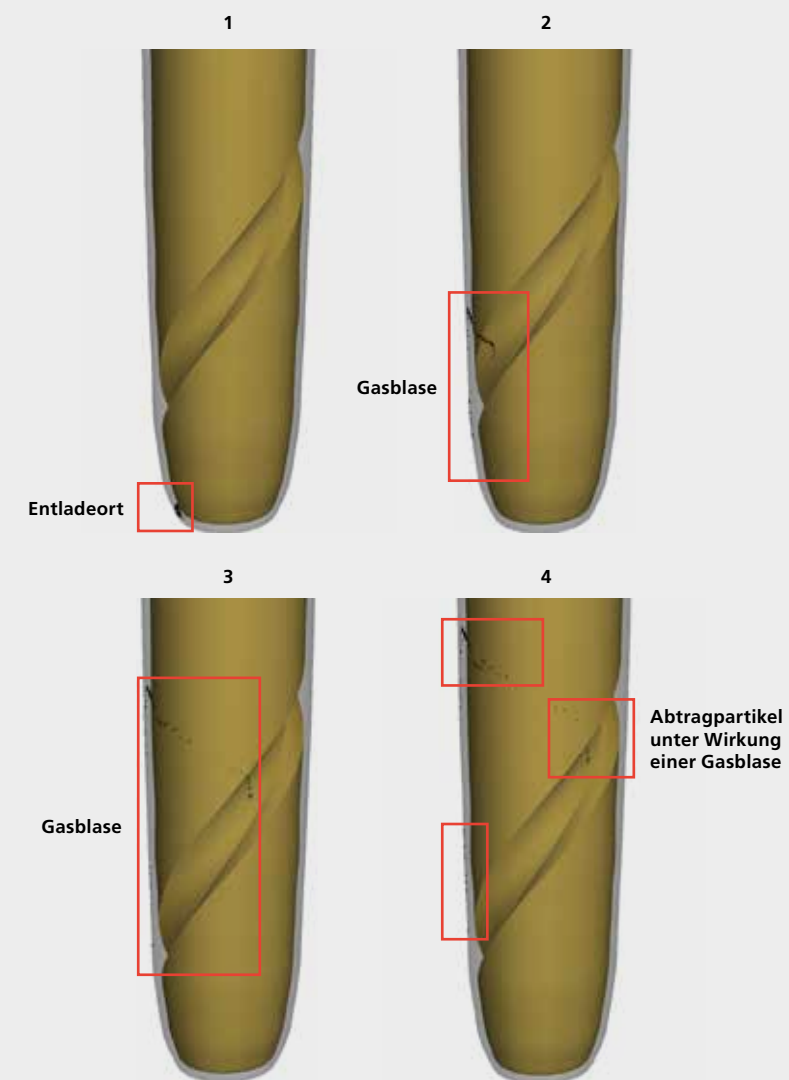


Bild:
Dreiphasensimulation aus Dielektrikum,
Partikeln und einer Gasblase;
Abtragpartikel steigen unter Wirkung
des Spüldrucks und einer Gasblase
im Arbeitsspalt auf

Vom Alexanderplatz an den Amazonas

Die Zusammenarbeit zwischen Deutschland und Brasilien im Bereich Industrie 4.0 nimmt Fahrt auf – mit dem Fraunhofer IPK als wichtigem Treiber.

EINEN SCHRITT VORAUS

Glücklicherweise muss die Zusammenarbeit zwischen den beiden Ländern nicht bei null anfangen. Es gibt Präzedenzfälle für erfolgreiche Kooperationen in Forschung und Entwicklung im Bereich Industrie 4.0. Forscher des Fraunhofer IPK arbeiten seit über einem Jahrzehnt mit wichtigen Akteuren der brasilianischen Industrieforschung zusammen, wie dem Competence Center in Manufacturing am renommierten Aeronautics Institute of Technology (CCM-ITA) und dem Nationalen Dienst für industrielle Ausbildung SENAI. Diese Partnerschaften haben sich als treibende Kräfte bei den Bemühungen um eine digital integrierte Produktion etabliert.



1

Selten war die Begeisterung für die deutsch-brasilianische Partnerschaft so groß wie im Jahr 2023. Im Januar besuchten sowohl der deutsche Bundespräsident als auch der Bundeskanzler das südamerikanische Land. Nur wenige Wochen später, im März, betonten zwei weitere hochrangige Minister, Vizekanzler Robert Habeck und Landwirtschaftsminister Cem Özdemir, bei ihrem Besuch die gemeinsamen Interessen und Werte der beiden Länder. Sie bekräftigten ihre Absicht, nachhaltige politische und wirtschaftliche Beziehungen auf Augenhöhe mit dem südamerikanischen »Premiumpartner« aufzubauen. Eines der Hauptgesprächsthemen der deutschen Politiker war das Potenzial Brasiliens bei der Etablierung einer nachhaltigen, hoch digitalisierten Industrie.

Die brasilianischen Partner profitieren von der internationalen Reputation des Fraunhofer IPK sowie von dessen langjähriger Expertise in der Fertigungsforschung und dem direkten Transfer der Ergebnisse in die Industrie. Diese Kompetenzen kommen im »Fraunhofer IPK Project Office for Advanced Manufacturing at ITA« zum Tragen. Darin entwickelt das Berliner Institut gemeinsam mit einer der führenden Ingenieursfakultäten Brasiliens vor Ort in São José dos Campos innovative produktionstechnische Lösungen. Prof. Dr. Ronnie Rego, Professor am ITA und einer der Leiter des »Fraunhofer IPK Project Office for Advanced Manufacturing at ITA«, erklärt, dass eine sehr enge Zusammenarbeit mit der Industrie notwendig sei, um den Transfer von wissenschaftlichen Ergebnissen zu gewährleisten: »Trotz

Bilder:

1

Gebäude des CCM-ITA auf dem Campus in São José dos Campos

2

Multitool-Geländeroboter für den Baustelleneinsatz © ITA



2

ZAHLEN UND FAKTEN ZU BRASILIEN

Rang 12 der größten Volkswirtschaften der Welt (Deutschland: 4)

Jährliches **BIP-Wachstum: 4,6%** (Deutschland: 2,6%)

Anteil der Wertschöpfung des **verarbeitenden Gewerbes am BIP: 9,7%** (Deutschland: 18,9%)

Anzahl der Unternehmen in Brasilien mit deutschen Wurzeln: **1400**

Vielversprechendste Märkte für gemeinsame FuE-Projekte: Luft- und Raumfahrt, Automobilindustrie, Öl und Gas, Metallverarbeitung

**Bilder:**

1
Der am CCM-ITA
gebaute Flug-
simulator basiert auf
einem handelsüb-
lichen Roboterarm
© ITA

2
Im Innenraum
befindet sich ein
Cockpit zur
Pilotenausbildung
© ITA

der jüngsten Fortschritte in dieser Richtung müssen wir noch große Anstrengungen unternehmen, um die Denkweise in Brasilien zu verankern. Wir wollen zeigen, dass sich akademische Exzellenz und industrielle Anwendung nicht gegenseitig ausschließen. Im Gegenteil, sie sind sehr eng miteinander verbunden.«

Fraunhofer IPK-Wissenschaftler Gustavo Reis de Ascensão bestätigt die Notwendigkeit einer Professionalisierung: »Als wir 2017 die Zusammenarbeit mit dem ITA begannen,

war eines unserer ersten Projekte die Etablierung eines Verkaufstrichters. Sie hatten bereits Ideen, um Industrieprojekte zu akquirieren, und gemeinsam haben wir es geschafft, den Ansatz zu systematisieren.«

EINFACH GENIAL, GENIAL EINFACH

Auf der anderen Seite schätzen die Forschenden des Fraunhofer IPK das Innovationspotenzial, das ihre brasilianischen Partner mitbringen, sehr. Eine der Stärken des CCM-ITA ist sein transdisziplinärer Ansatz. Neben hochmodernen Fertigungsforschungslabo-

ren und experimentellen Geräten gibt es dort auch ein Human Factors Research Lab. Mithilfe von Instrumenten wie EEG-Headsets zur Messung von Gehirnströmen, Augenbewegungstrackern und anderen physiologischen Sensoren erforschen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, wie Menschen mit industriellen Arbeitsumgebungen interagieren.

Eine weitere Priorität des CCM-ITA – und damit auch ein Anliegen des »Fraunhofer IPK Project Office for Advanced Manufacturing

at ITA« – ist es, wirtschaftliche und skalierbare Lösungen für die brasilianische Produktionsindustrie zu finden. »Eine Spezialität der brasilianischen Fertigungsforschungslandschaft liegt darin, Lösungen zu finden, die nicht nur innovativer, sondern auch billiger und einfacher zu bauen und damit leichter zugänglich sind«, sagt ITA-Doktorand Ivan de Souza Rehder. Ein sehr beeindruckendes Beispiel für diesen Ansatz ist ein Flugsimulator, der am CCM-ITA entstand. Seine Hardware basiert auf einer echten Pilotenkabine mit Steuerknüppeln und Bildschirmen, die auf einem Roboterarm montiert ist, der sich auf wenigen Metern Schiene bewegt. Die Forschenden haben das System so programmiert, dass es sich synchron mit der Steuerung bewegt und so aus leicht zugänglichen Industrieteilen eine kostengünstige Möglichkeit geschaffen, Pilotinnen und Piloten zu trainieren.

Die sich ergänzenden Kompetenzen des binationalen Forschungsteams sowie die gemeinsamen Anstrengungen und das Engagement für die Partnerschaft haben dazu geführt, dass das »Fraunhofer IPK Project Office for Advanced Manufacturing at ITA« außerordentliche Erfolge vorzuweisen hat. Sein Vorgänger, das FPC@ITA, übertraf sein ursprüngliches Projektvolumen um mehr als das Dreifache und erreichte statt der geplanten 2,6 Millionen Euro rund 11 Millionen Euro. Insgesamt wurden 51 FuE-Projekte durchgeführt, davon 31 Industrieprojekte und 20 öffentlich geförderte Projekte. Mit diesen Ergebnissen als Maßstab sieht die Zukunft der brasilianisch-deutschen FuE-Zusammenarbeit sehr rosig aus. ♦

IHRE ANSPRECHPERSONEN**Dr.-Ing. David Domingos**

+49 30 39006-413

david.carlos.domingos@ipk.fraunhofer.de

Gustavo Reis de Ascensão

+49 30 39006-474

gustavo.reis.de.ascencao@ipk.fraunhofer.de

ERFOLGSGESCHICHTEN

Im Laufe der Jahre hat die Zusammenarbeit zwischen dem Fraunhofer IPK und seinen Partnern in Brasilien zu mehreren erfolgreichen Forschungsprojekten geführt – drei davon möchten wir Ihnen hier vorstellen.

Das Konsortialprojekt FERA entwickelt additive Fertigungstechnologien, um die Wettbewerbsfähigkeit der brasilianischen Werkzeughersteller in diesem Sektor zu verbessern. Seine Schwerpunkte basieren auf den Bedürfnissen der lokalen Automobil- und Werkzeugindustrie: halbautomatische additive Reparatur von Tiefziehwerkzeugen und additive Fertigung von Werkzeugen mit komplexen Geometrien, von Vorrichtungen und Ersatzteilen. »Wir tragen Technologien wie das automatisierte Laserauftragschweißen zur Reparatur von Werkzeugen für Karosserien und Strukturbauteile bei. Außerdem führen wir eine Marktanalyse und Schulungen zu additiven Fertigungstechnologien durch«, berichtet Dr.-Ing. David Domingos, einer der Leiter des »Fraunhofer IPK Project Office for Advanced Manufacturing at ITA«.

Die bereits erwähnte Kooperation »ESCalate SENAI« läuft seit 2012 und nach aktuellem Planungsstand bis Oktober 2025. Ein Team des Fraunhofer IPK unterstützt den brasilianischen Industrieausbildungsdienst SENAI beim Aufbau von Innovationsinstituten nach dem Fraunhofer-Modell. Durch regelmäßige Audits fördern sie zudem die Entwicklung und Professionalisierung der Institute, sowohl in Management- als auch in Technologiefragen.

Die Partnerschaften mit SENAI und ITA haben auch neue gemeinsame Projekte hervorgebracht, wie zum Beispiel einen Spezialisierungskurs in Advanced Manufacturing. Der Kurs wurde in Zusammenarbeit zwischen SENAI Minas Gerais, ITA und Fraunhofer IPK organisiert, mit Vorträgen von Experten und Professorinnen aus jeder dieser Institutionen. Er stützte sich auf zwei Hauptpfeiler: Die Immersion in Innovationsinstitute (praxisorientierter Ansatz) und in die Technologie. Rund 40 Vertreterinnen und Vertreter brasilianischer Unternehmen nahmen an dieser Spezialisierung teil.

Mehr zu »ESCalate
SENAI« im Artikel
»Pesquisa e
Desenvolvimento«:
www.ipk.fraunhofer.de/
senai



Saubere Produktion für saubere Mobilität

Um Wasserstoffantriebe massentauglich zu machen, muss die Brennstoffzellenproduktion günstig und skalierbar werden. Das Projekt H2GO soll dazu einen Beitrag leisten.

In Sachen Umweltverträglichkeit hat der Schwerlastverkehr auf der Straße keinen guten Ruf. Zu Recht, denn bisher waren Lastkraftwagen wahre Klimasünder: Etwa 30 bis 40 Liter Diesel verbraucht ein voll beladener Vierzigtonner auf 100 Kilometern. Alternativen gibt es bisher auf Überlandstrecken nicht, denn elektrisch betriebene LKW erreichen nicht die nötigen Reichweiten. Doch eine vielversprechende Technologie steht schon in den Startlöchern: der Wasserstoffantrieb.

Wasserstoff zur Energieerzeugung zu nutzen, ist keine neuartige Idee. Gleichwohl hielt sich das Interesse daran in der Vergangenheit begrenzt, konzentrierte sich die öffentliche Aufmerksamkeit doch auf fossile Brennstoffe und erneuerbare Energien wie Solar- und Windkraft. Wasserstoffbasierte Brennstoffzellen wurden dagegen bislang eher abgetan, zu kostenintensiv sei ihre Produktion und noch dazu nur in geringen Stückzahlen möglich. Um diesem Einwand zu begegnen, wurde das Projekt »H2GO – Nationaler Aktionsplan Brenn-

stoffzellen-Produktion« ins Leben gerufen. Sein Ziel: Entwicklung und Rollout industrieller Technologien zur wirtschaftlichen Produktion von Brennstoffzellen. Das Gesamtprojekt wird vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr mit einer Summe von etwa 80 Mio. € aus den Mitteln des Zukunftsfonds Automobilindustrie gefördert. Koordiniert wird die Förderung von der NOW GmbH, für die Umsetzung ist der Projektträger Jülich (PtJ) zuständig. Im Fokus steht die Frage nach der Machbarkeit einer Massenfertigung für den straßengebundenen Schwerlastverkehr.

H2GO bündelt die Kompetenzen von 19 Fraunhofer-Instituten in fünf Teilverbänden entlang der Prozesskette bei der Produktion einer Brennstoffzelle. Das Fraunhofer IPK ist Mitglied des Teilverbundes zur Entwicklung von der Halbplatte zur Bipolarplatte. Die zentrale Aufgabe der Fraunhofer-Forschenden ist dabei die Entwicklung eines Reinigungsmoduls für die automatisierte Reinigung von Bipolarplatten.

HIGHTECH IN REIN(IGUNGS)FORM

Die Anforderungen an die automatisierte Reinigung der Bipolarplatten waren den Wissenschaftlern schnell klar: Klimaneutral sollte sie sein, präzise, trocken und rückstandsfrei. Unter diesen Gesichtspunkten fiel die Wahl des Verfahrens auf das neuartige Hochdruck-CO₂-Strahlen.

Zur Anwendung dieser Technologie werden die Labore des Fraunhofer IPK um eine neu konzipierte CO₂-Reinigungszelle erweitert, in der die Forschenden im Zuge des Projekts und über dieses hinaus experimentieren und entwickeln können. Mithilfe von Fördermitteln in Höhe von etwa 1,5 Mio. € soll die Zelle mit Technologien der CO₂-Reinigung ausgestattet werden, die dem neuesten Stand der Technik entsprechen.

Beim Hochdruck-CO₂-Strahlen wird flüssiges Kohlendioxid bei einem Druck von bis zu 4000 bar als Strahlmedium verwendet. Mit dem Kohlendioxidstrahl werden Oberflächen vor und nach den einzelnen Prozess-



schritten schonend gereinigt, ohne vorhandene Beschichtungen zu beschädigen. Verunreinigungen können durch den variabel einstellbaren Strahldurchmesser präzise entfernt werden. Durch dieses Verfahren kann der thermische Einfluss auf die sensible Bipolarplatte geringgehalten werden.

Neben der CO₂-Hochdruck-Technologie finden neueste Verfahren zur Reinigung mit Schneestrahlen und Trockeneisstrahlen in der CO₂-Reinigungszelle Platz. Zur präzisen und automatisierten Reinigung wird die Zelle mit

einem Industrieroboter ausgestattet. Zusätzlich ist eine Führung der Strahlanlagen per Hand möglich. Über ein Schnellwechselsystem kann der Roboter automatisiert zwischen den verschiedenen Strahlverfahren wechseln.

An Anwendungsfällen für die neue Reinigungstechnik mangelt es nicht, wie Fraunhofer IPK-Forscher Philipp Burgdorf betont: »Wir wollen zukünftig auch die Bearbeitung von Verbundmaterialien wie carbonfaserverstärktem Kunststoff untersuchen. Für

uns eröffnet sich damit ein breites Themenspektrum an weitergehender Forschung, beispielweise im Bereich Luft- und Raumfahrt, Automobilindustrie und Windenergie.« Erst einmal widmen sich Burgdorf und sein Team aber der im Rahmen von H2GO anstehenden Aufgabe, den Schwerlastverkehr umweltverträglicher zu machen. Schließlich ist das – wortwörtlich – kein leichtes Spiel. ♦

IHRE ANSPRECHPERSON

Philipp Burgdorf | +49 30 39006-354
philipp.burgdorf@ipk.fraunhofer.de

Mehr zu Lösungen für die Einzel- und Serienfertigung von Brennstoffzellen im Artikel »Brennstoffzellen smart gefertigt«: www.ipk.fraunhofer.de/dip



Glatte Kanten mit schlanken Prozessketten

Sie entstehen beim Bohren, Fräsen und Drehen: Abgedrängte, nicht komplett abgescherte Werkstoffreste an den Werkstückkanten bezeichnet man als Grate. Sie können durch geschickte Prozessführung und Anpassung der Eingriffsbedingungen reduziert oder mit scharfen Werkzeugschneiden ganz vermieden werden.

Grate sind in der spanenden Bearbeitung ein leidiges Thema: Ob in der Einzelteil- oder Serienfertigung, sie treten als oft unvermeidlicher Nebeneffekt in unterschiedlichsten Bearbeitungsprozessen auf. Selbst in stabilen Fertigungsprozessen können durch Werkzeugverschleiß, schwankende Prozessbedingungen oder Inhomogenitäten im Werkstoff Restgrate am Bauteil entstehen, die sich in funktionskritischen Bereichen häufig nur durch zeit- und kostenintensive Qualitätskontrollen sowie manuelle Nacharbeit ausschließen lassen. Um dem Problem »Gratbildung« auf den Leib zu rücken, verfolgt das Fraunhofer IPK verschiedene Ansätze, die jeweils auf die indi-



1

viduellen Gegebenheiten und Voraussetzungen der industriellen Partner zugeschnitten sind.

GRATREDUZIERTE SPANENDE FERTIGUNG

Neben der Forschung zum Einsatz neuer superharter Schneidstoffe arbeiten die wissenschaftlichen Mitarbeitenden an Konzepten zur werkstoff- und prozessoptimierten Bahnplanung für die Werkzeugführung. Insbesondere ungünstige Kantenübergänge von Bohrungen mit Innenkonturen sind häufig von Gratbildung betroffen. Neben dem Einsatz federgelagerter Entgratwerkzeuge sowie konturspezifischer Sonderwerkzeuge kann auch eine optimierte Konturverfolgung dazu beitragen, solche Formen prozesssicher und ohne Grate herzustellen.

Für die Forschungsarbeiten in diesen Bereichen ist das Forschungsteam im Produktionstechnischen Zentrum (PTZ) Berlin hervorragend ausgestattet. Mit über 22 CNC-Dreh- und Fräsmaschinen steht ein umfangreicher Maschinenpark mit einem breiten Spektrum industrieller Spannkonzepte zur Verfügung. Zudem kann auf ein weitreichendes Netzwerk von Maschinen- und Werkzeugherstellern zurückgegriffen werden. So können

industriennahe und serienreife Prozesse entwickelt und in industrielle Fertigungsumgebungen übertragen werden, in der Makroebene ebenso wie in der Mikrofertigung.

GEZIELTES POSTPROCESSING

Ist es nicht möglich, die Kanten- oder Oberflächenqualität von Bauteilen einzuhalten, sind effiziente Nachbearbeitungsverfahren eine wirtschaftliche Alternative. Dazu stehen am Markt verschiedenste Verfahren und Anlagen zur Auswahl, welche teils bauteilspezifisch ausgelegt sind und oft nicht alle Anforderungen einzelner Anwender erfüllen. Neben Verfahren wie dem Strahlspanen, Bürstspanen, Gleitspanen und Druckfließlappen stehen im PTZ verschiedene Technologien zur Auswahl, die eine herstellerunabhängige Prozesskettenentwick-

2



3

Bilder:

- 1 Spanend hergestellte Serienbauteile mit gratkritischen Bauteilkanten
- 2 Querschliff einer Bauteilkante mit aus dem Bohrprozess resultierendem Grat
- 3 Effektive Zerspanprozesse zur gratreduzierten Fertigung

lung für die effiziente Nachbearbeitung ermöglichen.

In den letzten zwei Jahren wurde ein neues Nachbearbeitungslabor aufgebaut, das unterschiedliche Gleitschleif- und Gleitlappverfahren adressiert. Es gestattet dem Fraunhofer IPK, diverse Prozessparameter gezielt auf individuelle Bauteilanforderungen von Kunden und Partnern abzustimmen:

- die Auswahl prozessspezifischer Schleif- und Lappmedien,
- die Entwicklung effizienter Prozessketten zur zielgerichteten Nachbearbeitung einfacher und komplexer Bauteile sowie
- die Auslegung von Werkstückspannsystemen und deren Positionierung in der Partikel- und Schleifkörperströmung.

Weiterhin bietet das Institut numerische Ansätze zur vollumfänglichen Prozessausle-

gung, basierend auf der Diskrete Elemente Methode (DEM).

OPTIMIERTE REINIGUNGSSTRATEGIEN

Flittergrate und Spanablagerungen am Bauteil lassen sich in vielen Prozessen nur schwer vermeiden. In automatisierten Prozessketten führen sie zu einem hohen Reinigungsaufwand für die Säuberung der Bauteile innerhalb der Prozesskette. Durch die gezielte bauteilspezifische Auslegung von Reinigungsdüsen, optimierte Waschzyklen und innovative Reinigungsverfahren, wie das CO₂-Schneestrahlen, konnte das Fraunhofer IPK in Industrieprojekten nachhaltige Lösungen zur Bauteilreinigung schaffen. Neben numerischen Lösungsansätzen wurden in enger Abstimmung mit den Projektpartnern anhand transparenter und dem Original nachempfunder Bauteile mit komplexen Innenstrukturen und Bohrungsverläufen erfolgreich Reinigungsstrategien ausgelegt, visualisiert und implementiert.

Für die Steigerung der Wirtschaftlichkeit bei der Bauteilfertigung und von Prozessketten gilt es, hohe Aufwände bei der Qualitätskontrolle sowie manuelle Nachbearbeitungsprozesse zu vermeiden. Dafür sind effiziente und stabile Fertigungsprozesse erforderlich, die bauteil- und werkstoffspezifisch ausgelegt werden sollten. ♦

IHRE ANSPRECHPERSON

Yves Kuche | +49 30 39006-288
yves.kuche@ipk.fraunhofer.de

Stromverbrauch im Blick

Klimaneutrale Produktion ist zur Erreichung der Klimaziele unerlässlich. Um Werkzeugmaschinen energieeffizienter zu machen, muss ihr Energieverbrauch transparent sein.

Eine erfreuliche Meldung des Umweltbundesamts aus dem März 2023: Der absolute Energieverbrauch in Deutschland ist in den letzten 30 Jahren insgesamt von 2631 Terawattstunden im Jahr 1990 auf zuletzt 2407 Terawattstunden leicht gesunken. Für produzierende Unternehmen weniger erfreulich: Die Industrie verbraucht nach wie vor am meisten Energie, nämlich 699 Terawatt im Vergleich zu den anderen Sektoren Haushalte (670), Verkehr (635) sowie Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (385). Die mit Abstand wichtigsten Energieträger in der Industrie sind Gas und Strom.

Eine Schlüsselrolle im Bereich der produzierenden Industrie nehmen Werkzeugmaschinen ein, auch was den Gesamtenergieverbrauch angeht. Weltweit wurden im Jahr 2021 Dreh-, Fräs-, Erodier- und andere fertigungstechnische Maschinen im Wert von rund 71 Milliarden Euro produziert. Als langlebige Investitionsgüter werden solche

Anlagen zum Teil über 20 Jahre und im Mehrschichtbetrieb eingesetzt. Die dabei entstehenden Energiekosten machen etwa 20 Prozent der Betriebskosten aus – da fällt es nicht schwer zu erahnen, dass sie sich über den gesamten Einsatzzeitraum auf erhebliche Werte summieren. Spielte in der Vergangenheit das Thema Energieverbrauch von Werkzeugmaschinen in der Produktion eine eher untergeordnete Rolle, so rückt es seit der Häufung dramatischer Klimakatastrophen und der aktuellen Energieverknappung in den Fokus des verarbeitenden Gewerbes.

ENERGIEVERBRAUCH HAT VIELE URSACHEN

Ob eine Werkzeugmaschine energieeffizient ist, hängt von zahlreichen Faktoren ab. Werden Aggregate wie Kühlschmierung sinnvoll ein- und ausgeschaltet? Sind Pumpen mit geregelten Motoren im Einsatz? Ist die Maschine gut gewartet? Gibt es

Standby-Strategien, wenn die Maschine mal nicht genutzt wird? Auch heute noch werden Werkzeugmaschinen in vielen Betrieben auch bei längerer Nichtnutzung häufig nicht abgeschaltet – sei es aus Angst, dass temperaturbedingte Effekte die Genauigkeit negativ beeinflussen, es zu Problemen beim Hochfahren kommen könnte oder einfach aus Bequemlichkeit. Zudem sieht man der Maschine nicht an, welches Aggregat wieviel Energie verbraucht. Möchte man die Produktion energieeffizienter gestalten, dann gibt es dafür viele potenzielle Stellhebel. Der Weg dorthin läuft immer gleich ab: Wahrnehmen, Verstehen, Vorhersagen, Steuern und Regeln. Für das Wahrnehmen und Verstehen hat das Fraunhofer IPK eine integrierte Lösung entwickelt. Auf ihrer Basis lassen sich Mechanismen für das Vorhersagen, Steuern und Regeln entwickeln. Doch vorab: Was bedeutet »Wahrnehmen« und »Verstehen«?

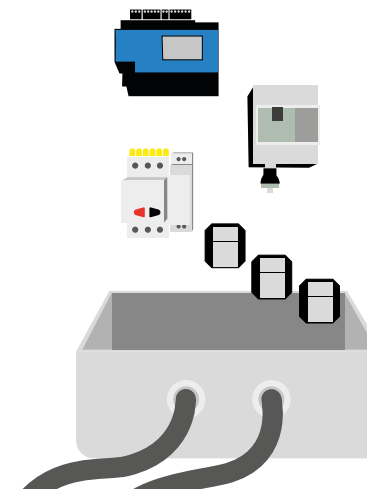
DEN ENERGIEVERBRAUCH WAHRNEHMEN

Im täglichen Leben sind sie bei vielen Menschen nicht mehr wegzudenken: Fitness-tracker. Ziel dieser kleinen Helfer ist es zu dokumentieren, wie fit wir eigentlich sind. Dazu erfassen sie mithilfe von Sensoren Daten, die dann kombiniert werden und entsprechende Kennzahlen liefern, wie die Anzahl der Schritte, die wir täglich machen. Dadurch nehmen wir wahr, in welchem Maße wir körperlich aktiv gewesen sind. Ähnlich funktioniert ein Energie-Monitoring. Ein entsprechendes Monitoringsystem für Werkzeugmaschinen erfasst Ströme und Spannungen, um daraus Energiekennwerte zu berechnen und Energieverbrauchsverläufe nachzuzeichnen.

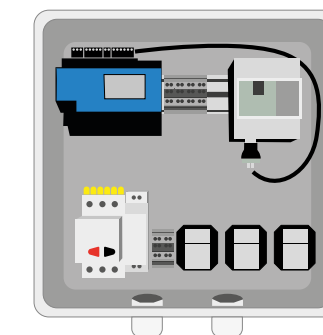
WIRKZUSAMMENHÄNGE VERSTEHEN

Wüssten wir nicht, dass es zwischen Bewegung und Fitness einen Zusammenhang gibt, dann wäre die Dokumentation der Anzahl der Schritte ein ziemlich nutzloses Unterfangen. Wenn wir die aufgezeichneten Schrittwerte aber mit der Entwicklung unse-

Konzept für ein Energiemonitoringsystem



Ein Netzanalysator (oben links) nimmt Energie-KPIs aus gemessenen Strom- und Spannungsverläufen auf, ein Einplatinencomputer (mitte rechts) übermittelt sie an einen MQTT-Broker. Ein Netzteil und drei Stromwandler vervollständigen das System.



Die Komponenten werden in ein Gehäuse integriert – hier ohne Kabelverbindungen dargestellt.



Verteilte Anwendungen abonnieren die KPIs beim MQTT-Broker. Ein Beispiel für eine Anwendung ist ein Dashboard, das Trends in den Energieverbräuchen visualisiert.

rer Leistungsfähigkeit in Beziehung setzen, erkennen wir den Zusammenhang. Aus den Erfahrungen lässt sich dann ableiten, wie sich unsere Kondition entwickeln wird, wenn wir mehr oder weniger Schritte laufen. Übertragen auf das Thema Energieeffizienz hilft die Dokumentation der Energieverbräuche im Kontext der jeweiligen Produktionsprozesse zu verstehen, ob diese Prozesse energieeffizient sind oder nicht. Hat man diese Zusammenhänge durchschaut, lassen sich daraus Maßnahmen ableiten, um die Energieeffizienz zu steigern.

EIN ENERGIEMONITORING AUFSETZEN

Um zu dokumentieren, wo und in welchem Zusammenhang wie viel Energie verbraucht wird, hat das Fraunhofer IPK eine Lösung für das Energiemonitoring entwickelt, mit der Maschinen ohne großen Aufwand nachgerüstet werden können. Die wesentlichen Komponenten sind ein Netzanalysator, drei Stromwandler und ein Einplatinencomputer. Eingebaut in eine Box, wird das System zwischen Maschine und Netzanschluss geschaltet. Bei Bedarf können die Komponenten aber auch direkt im Schaltschrank verbaut werden. Aus den Verläufen der Phasenströme und der Spannung generiert der Netzanalysator alle Energiekennwerte, die von Energiemanagementsystemen nach ISO 50001 benötigt werden. Diese werden per Modbus an den Einplatinencomputer übertragen. Ein auf dem Einplatinencomputer installierter MQTT-Client sendet die Daten dann als sogenannter Publisher an einen MQTT-Broker, von wo aus sie an beliebige Subscriber, die Abonnenten der Daten, zur Weiterverarbeitung zum Beispiel durch eine IoT-Plattform in der Cloud weitergeleitet werden. Die Umsetzung dieses Schrittes schafft die Grundlage zur Optimierung der Energieeffizienz von Produktionsanlagen. ♦

IHRE ANSPRECHPERSON

Claudio Geisert | +49 30 39006-133
claudio.geisert@ipk.fraunhofer.de



Präzision ist Trumpf

Noch sind Werkzeugmaschinen tonangebend in Sachen Genauigkeit. Doch Industrieroboter holen immer mehr auf – unter anderem dank KI.

Ohne Roboter, keine Automatisierung. Kamen Industrieroboter bislang vorwiegend bei Pick-and-Place- und Montagearbeiten zum Einsatz, übernehmen sie im Zuge der flexiblen Fertigung mehr und mehr auch die Tätigkeiten von Werkzeugmaschinen. Die Vorteile liegen auf der Hand: Verbesserte Bewegungsachsen ermöglichen mittlerweile das Erreichen jeder möglichen Position sowie jedes beliebigen Winkels, und universelle Endeffektoren sind kompatibel mit allen erdenklichen Werkzeugen – seien es Fräser, Bohrer, Scanner oder Sägen. Industrieroboter können dadurch immer kniffligere Aufgaben ausführen und komplexe Bauteile aus einer Vielfalt an Materialien wie Holz, Kunststoff oder Metallen fertigen. Während der Arbeitsbereich einer CNC-Maschine auf wenige Meter beschränkt ist, kommt der Roboter auch an schwer zugängliche Bauelemente. Diese Wandlungsfähigkeit ist ein entscheidender Pluspunkt, wenn es darum geht, auch bei kleinen Losgrößen und hoher Variantenvielfalt effizient und kostengünstig zu produzieren.

SCHWACHSTELLE: DIE GERINGE STEIFIGKEIT

Und dennoch: An die hohe Präzision einer Werkzeugmaschine, die beispielsweise Metallteile bis in den Mikrometerbereich genau bearbeitet, kommen die flexiblen Alleskönner nicht heran. Denn ein klassischer Industrieroboter – wie der am häufigsten verwendete sechsachsige Knickarmroboter – besitzt nur eine vergleichsweise geringe Steifigkeit. Das liegt vor allem daran, dass die Roboterglieder eine sogenannte

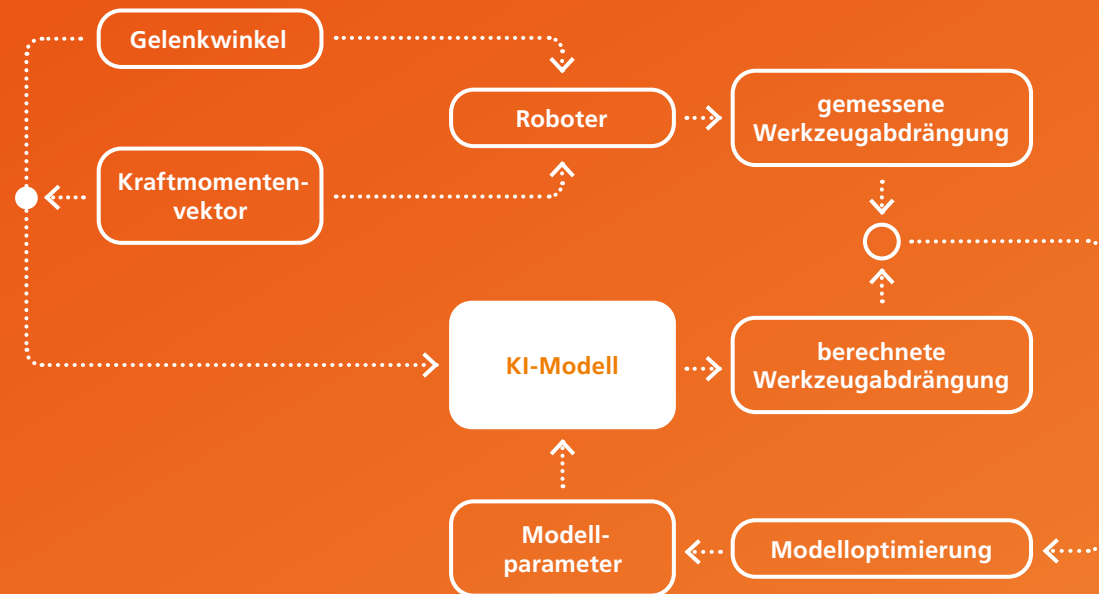
offene kinematische Kette bilden. Bei Tätigkeiten mit hohen einwirkenden Kräften wie dem Fräsen oder der Umformung gibt die Roboterstruktur nach und die gewünschte Position wird nicht exakt angefahren. Die dadurch entstehende Werkzeugabdrängung ist je nach Anwendung unterschiedlich, hat aber fast immer Einfluss auf die Fertigungsgenauigkeit. Entsprechend kommen Roboter überwiegend dort zum Einsatz, wo die hohe Genauigkeit einer Werkzeugmaschine nicht benötigt wird.

Die Verbesserung der Positioniergenauigkeit von Industrierobotern – und damit die Erweiterung ihres Einsatzgebiets – ist daher seit Jahren ein wichtiges Forschungsfeld. Dabei werden unterschiedliche Ansätze verfolgt, die entweder die Konstruktion, die Steuerung oder die Kalibrierung der Roboter in den Mittelpunkt stellen. Durch die fortschreitende Vernetzung von Maschinen und die damit einhergehende Verfügbarkeit großer Datenmengen gewinnen jedoch vor allem Methoden der Künstlichen Intelligenz, insbesondere des überwachten Maschinellen Lernens zunehmend an Bedeutung.

MIT KI WERKZEUGABDRÄNGUNG VORHERSAGEN

Das Besondere beim überwachten Lernen ist, dass das KI-Modell auf Basis eines Datensatzes lernt, bei dem die korrekten Antworten bereits existieren. Das Modell erhält also sowohl Eingaben als auch passende Ausgaben. Sobald der Algorithmus ein Muster zwischen diesen erkennt, können neue Eingaben hinzugefügt werden, und die KI prognostiziert die Ausgaben.

Training des KI-Modells



KI-basierte Kompensation



Mit KI lässt sich die Formgenauigkeit von Blechkragen um 75 Prozent verbessern.

Entsprechend bildet ein KI-Modell zur Vorhersage von Werkzeugabdrängungen die sechs Gelenkwinkel des Roboters sowie die Kraft- und Momentkomponenten am Werkzeug als Eingangsparameter auf die Werkzeugabdrängung als Ausgangsparameter ab. Ein derart trainiertes Modell kann zur Vorhersage von Werkzeugabdrängungen für beliebige Aufgaben verwendet werden.

BLECHE IN KLEINEN STÜCKZAHLEN ZU GERINGEN KOSTEN

Forschende am IWF der TU Berlin haben zur Validierung dieser Trainingsmethode mit einem Industrieroboter einen sogenannten inkrementellen Kragenziehprozess realisiert. Das Kragenziehen ist ein Zugdruckumformverfahren, bei dem vorgelochte Bleche zu einem Flansch aufgeweitet werden. Es ist Teil der Prozesskette zur Herstellung vieler Blechbauteile, zum Beispiel im Automobilbau. Die Erweiterung des konventionellen Kragenziehens um einen inkrementellen Ansatz, bei dem das Blech schrittweise durch ein generisches Werkzeug entlang eines Werkzeugpfades aufgeweitet wird, ermöglicht die Flexibilisierung und Kostenreduzierung durch das Einsparen aufwendiger Umformwerkzeuge. Die Verwendung von Industrierobotern erhöht diese Flexibilität weiter und bietet zudem die Möglichkeit, Kragen in schwer zugänglichen Bereichen mit neuartigen Verfahren zu formen.

DER WEG ZU GUTEN DATEN

Die für das Umformen notwendige hohe Kräfteinwirkung verursacht jedoch Werkzeugabdrängungen, die Einfluss auf die Formgenauigkeit der Kragen haben. Um diese Abdrängungen mithilfe des überwachten Maschinellen Lernens vorhersagen zu können, haben die Forschenden einen Trainingsdatensatz generiert, für den der Industrieroboter auf verschiedenen kreisförmigen Werkzeugpfaden mit einer Gasdruckfeder belastet wurde. Dabei wurden die Gelenkwinkel des Roboters ohne Belastung sowie unter Einwirkung der externen Kräfte an mehreren Punkten erfasst und jeweils mit einem Lasertracker gemessen. Insgesamt wurden auf diese Weise 352 Datenpunkte ermittelt. Die Werkzeugabdrängung ergibt sich aus der Differenz zwischen der belasteten und der unbelasteten Position.

FORMGENAUE KRAGEN: EINE RUNDE SACHE

Das Ergebnis: Die Formgenauigkeit der Kragen verbesserte sich um 75 Prozent, was einer Reduzierung der maximalen Abweichung auf 0,6 mm entspricht. Gleichzeitig wurden die Unterschiede zwischen dem minimalen und maximalen gemessenen Kragendurchmesser verringert und dadurch die Rundheit der Kragen gesteigert. Das Forscherteam hat somit eindrucksvoll gezeigt, wie der Einsatz von KI Positionierfehler bei Industrierobotern kompensieren und die Produktqualität deutlich verbessern kann. Doch die entwickelte Methode ist keineswegs auf das Kragenziehen beschränkt: Unter Berücksichtigung weiterer Faktoren wie dynamische Parameter und Temperaturen wird bereits daran gearbeitet, Industrieroboter künftig für beliebige Anwendungen im Hochgenauigkeitsbereich zu befähigen. ♦

IHRE ANSPRECHPERSON

Julian Blumberg | +49 30 314-24452
blumberg@iwf.tu-berlin.de

Intelligenter Neustart

Bestandsmaschinen erhalten mit Künstlicher Intelligenz und Edge Computing ein zukunfts-sicheres Upgrade.

Auch wenn das Ziel von Industrie 4.0 die Vernetzung des gesamten Maschinenparks ist: Für die Optimierung der Abläufe bleibt die einzelne Maschine ein entscheidender Ansatzpunkt. Voraussetzung für eine effiziente Vernetzung im Zuge der hochflexiblen Fertigung ist der reibungslose Informationsfluss über die gesamte Wertschöpfungskette. Aus Sicht der einzelnen Werkzeugmaschine spielt daher vor allem ihre Schnittstelle – quasi als Nadelöhr der Vernetzung – eine zentrale Rolle: Sie stellt sicher, dass die Maschine mit anderen Maschinen und Anlagen, IT-Systemen und Menschen große Mengen an Daten austauschen kann.

BIG DATA ALS CHANCE

Gleichzeitig stehen Unternehmen vor der schwierigen Aufgabe, die immer größeren digitalen Datenberge, die tagtäglich während der Produktion erzeugt werden, systematisch zu erfassen, zu speichern und auszuwerten. So generiert eine einzelne CNC-gesteuerte Werkzeugmaschine binnen einer Sekunde eine Vielzahl an Informationen – sei es zur Effizienz und Qualität der Fertigung oder dem mechanischen Zustand der Maschine. Durch die intelligente Analyse dieser Daten lassen sich wertvolle Erkenntnisse gewinnen, die als Basis für Prozessoptimierungen und wichtige unternehmerische Entscheidungen dienen können. Doch bislang war das Heben dieses Datenschatzes für Unternehmen schwer bis unmöglich.

Forschende am Produktionstechnischen Zentrum (PTZ) Berlin haben sich dieser Herausforderung angenommen und untersucht,

wie sich Steuerungsdaten von Werkzeugmaschinen ohne großen Aufwand erfassen, auswerten und nutzbar machen lassen. Konkret geht es darum, bereits vorhandene, hochproduktive Maschinen mittels neuer Schnittstellen zu optimieren und dadurch ihre Fähigkeiten gezielt zu erweitern.

KI UND EDGE: EIN STARKES DUO

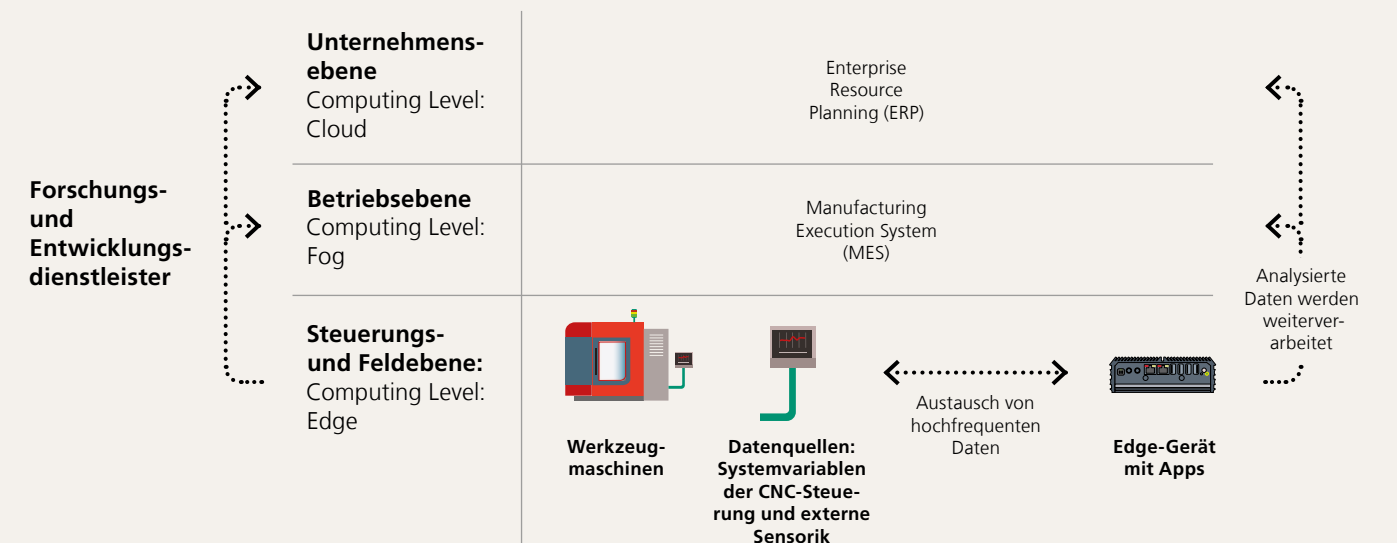
Dieses digitale Retrofit – das Nachrüsten von Maschinen mit modernster Sensorik und Kommunikationstechnik – haben die Datenspezialisten des PTZ über eine Edge-Computing-Lösung mithilfe von Künstlicher Intelligenz realisiert. Beim Edge Computing werden die Daten direkt am Ort des Entstehens, der Edge, erfasst und gespeichert. So müssen sie keine weiten Strecken zu zentralen Rechenzentren zurücklegen, sondern können ohne große Verzögerung weiterverarbeitet werden. Das ist wichtig, da es in der automatisierten Produktion auf kurze Reaktionszeiten ankommt und die Verzögerungszeit des Cloudzugriffs auf lokale KI-Anwendungen oft zu hoch ist.



Da die KI-Modelle beim Edge Computing nicht in der Cloud, sondern auf dem Endgerät ausgeführt werden, ist zudem eine rechenstarke Hardware einer der Grundpfeiler. Für das Projekt wurde ein Industrie-PC mit zwei Ethernet-Anschlüssen verwendet, der über eine interne Hochfrequenzschnittstelle direkt an die Maschinensteuerung angeschlossen wird.

Mithilfe des Edge-Geräts und in Verbindung mit einer neuartigen Edge-Plattform gelang es dem Team am PTZ, rund einhundert verschiedene Systemvariablen einer Werkzeugmaschine zu erfassen. Dies beinhaltet etwa Daten in Bezug auf die Spindeldrehzahl, den Zahnvorschub, die Schnitttiefe, die Vorschubgeschwindigkeit, Konturabweichungen sowie indirekte Informationen zur Bauteilqualität. Zeitsynchron zu diesen Parametern und bis zu 30 000 mal pro Sekunde können zudem Daten aus externer Sensorik wie Kameras oder Kraftsensoren ausgelesen sowie Informationen über Standzeiten und Fehlermeldungen abgerufen werden.

Systemarchitektur der Edge-Computing-Plattform



Die derart erfasste, unstrukturierte Rohdatenflut wird durch den Einsatz der KI auf der Edge-Plattform systematisch ausgewertet und in aussagekräftige Erkenntnisse – das heißt in wirtschaftlichen Mehrwert – umgeformt: Durch die kluge Datenanalyse lassen sich versteckte Optimierungspotenziale aufspüren, werden Fehlerquellen identifiziert sowie Maschinenverschleiß und -defekte rechtzeitig offengelegt.

Weitere Schnittstellen des Edge-Geräts, unter anderem Open Platform Communications Unified Architecture (OPC UA), dienen zur Weiterleitung der Daten an übergeordnete Systeme wie MES (Manufacturing Execution System) oder ERP (Enterprise Resource Planning), an Data Lakes zur Speicherung großer strukturierter Datenmengen sowie an unternehmenseigene Server oder Cloud-Plattformen. Die Auswirkungen des Datenverkehrs auf die CPU der Werkzeugmaschine sind hingegen minimal, da die eigentliche Verarbeitung auf dem Edge-Gerät erfolgt. Das bedeutet, dass das Edge-Gerät in bestehende Werkzeugmaschinen eingebaut wer-

den kann, ohne diese in ihrer eigentlichen Steuerungsaufgabe zu beeinträchtigen.

Darüber hinaus ist es möglich, über eine Feedback-Schleife die Bearbeitungsparameter der Werkzeugmaschine zu beeinflussen, also Befehle an die Maschinensteuerung zurückzumelden. Die Forschenden arbeiten bereits daran, erste Teile dieses Prozesses an eine entwickelte KI auszulagern.

MIT KI WERKZEUGVERSCHLEISS ERKENNEN

Nachdem das Edge-Gerät erfolgreich an der Werkzeugmaschine installiert ist, können Apps dabei helfen, die Maschinendaten einfach und übersichtlich anzuzeigen. Neue Applikationen oder Sicherheitspatches lassen sich hierbei unkompliziert implementieren. In App Stores werden bereits Anwendungen zum Download bereitgestellt, die sich auf die Überwachung des Werkzeugzustands und die Vorhersage des Werkzeugverschleißes fokussieren. Hiermit können Anwender passgenaue Entscheidungen basierend auf einem KI-Modell treffen.

EDGE APPS IM EINSATZ

Als Dienstleister entwickeln die Datenexperten des PTZ auch maßgeschneiderte Apps für spezifische Anwendungsfälle von kleinen und mittelständischen Unternehmen. Denkbar ist beispielsweise, Informationen aus datenintensiven Experimenten in Form einer App zu extrahieren, die dann an einer Werkzeugmaschine mit speziell angepasstem Edge-Gerät eingesetzt wird. Ebenso können Daten aus der Werkzeugeinsatzhistorie mit den Qualitätsdaten gefertigter Bauteile zusammengeführt und für eine Optimierung von Werkzeuggeometrien und -werkstoffen nutzbar gemacht werden. Möglich ist auch die intelligente Online-Überwachung der Werkzeugmaschine: Fertigungsfehler, beispielsweise aus Vorprozessen, werden so unmittelbar erkannt und lassen sich sofort beheben. ♦

IHRE ANSPRECHPERSON

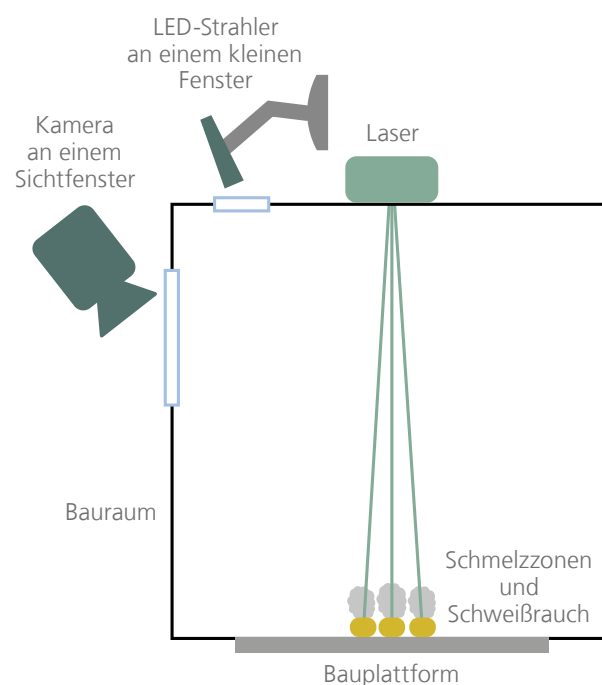
Martin Heper | +49 30 314-23449
martin.heper@iwf.tu-berlin.de

Je mehr, desto besser

Der parallele Einsatz von Lasern ist in der additiven Fertigung eine besondere Herausforderung. Ein Team am Fraunhofer IPK entwickelt hierzu eine innovative Lösung.

Das pulverbettbasierte Schmelzen von Metallen mittels Laserstrahl, kurz PBF-LB/M, ist das weitverbreitetste additive Fertigungsverfahren für metallische Werkstoffe. Zum Einsatz kommt das Fertigungsverfahren besonders dann, wenn es um komplexe Geometrien, kleine Serienfertigungen und Individualanfertigungen geht, welche mit herkömmlichen Fertigungsverfahren nicht hergestellt werden können. Mit dem Verfahren können Funktionen wie innenliegende Kühlkanäle und Leichtbaustrukturen direkt in das Bauteil integriert und in einem einzigen Prozessschritt gefertigt werden.

Obwohl die Vorteile dieser Technologie gegenüber konventionellen Verfahren hinlänglich bekannt sind, bestehen bei der Integration in die Serienfertigung diverse Herausforderungen hinsichtlich der Qualitätssicherung und Produktivität. Beides, sowohl die Qualität als auch die Produktivität, lässt sich durch eine Erhöhung der Anzahl der Laser und der dazugehörigen Laseroptiken steigern. Speziell die Bauteilgüte kann mithilfe innovativer Scanstrategien wie implementierte Vor- und Nachheizlaser verbessert werden. Die Umsetzung ist jedoch mit zahlreichen Herausforderungen verbunden: Bei



der parallelen Belichtung in benachbarten Bereichen können sich je nach Richtung, in die sich der Schutzgasstrom bewegt, die Laserstrahlen mit ihren Schweißnebenprodukten wie Schweißrauch und -spritzer gegenseitig beeinflussen. Hierdurch entstehen Schwankungen im Energieeintrag, die das Schmelzbad destabilisieren und die Prozess- und Bauteilqualität mindern. Werden mehrere Laser parallel eingesetzt, ist es deshalb wichtig, Kontakte zwischen den Lasern oder zwischen Lasern und deren Schweißnebenprodukten auszuschließen.

Ein Forschungsteam am Fraunhofer IPK hat dazu einen innovativen Algorithmus entwickelt, mit dem mehrere Laser parallel gesteuert werden können: Der Algorithmus passt auf Basis bestehender Scanvektoren die Scanstrategie an, um unerwünschte Abschattungseffekte zu vermeiden. Dafür berücksichtigt er die zeitabhängigen Positionen aller im Prozess involvierten Laser. Um dabei Beeinträchtigungen der Energie des Lasers durch den Schweißrauch zu verhindern, sind Informationen über Geometrie und Richtung der Schweißrauchfahne von besonderer Bedeutung. In einem ersten Schritt

wurde deshalb die Charakterisierung der Rauchfahne mittels visueller Bildverarbeitung durchgeführt. Dies ermöglicht es dem Algorithmus »Verbotzonen« zu definieren, also Bereiche, in die kein Laser eindringen darf, und die Scanvektoren entsprechend anzupassen.

Um die Anwendung des Algorithmus zu vereinfachen und das Verfahren zu optimieren, entwickeln die Forschenden außerdem ein neuartiges Schweißrauch-Monitoringsystem zur Vermessung der Rauchfahne. Ziel ist es, die Rauchfahne auf Basis eines Multisensorsystems umfassend zu erfassen. Dazu wird derzeit ein optischer Ansatz genutzt: Die Rauchfahne wird bildbasiert überwacht. Darüber hinaus wird mithilfe von Fotodioden der Schweißrauch detektiert. Dank der genauen Kenntnis seiner Position und Größe kann der Algorithmus automatisiert verschiedene Prozessparameter anpassen. Um eine hohe Effizienz und Kompatibilität mit diversen Softwareanwendungen zu erreichen, erfolgt die Programmierung des Algorithmus in Python. In der weiteren Entwicklung des Monitoringsystems sollen die Scanvektoren durch den Algorithmus automatisiert gesetzt werden, sodass eine Abdeckung durch Schweißrauch komplett vermieden und somit die Bauteilqualität deutlich verbessert werden kann. ♦

IHRE ANSPRECHPERSONEN

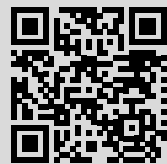
Tobias Neuwald | +49 30 39006-308
tobias.neuwald@ipk.fraunhofer.de

Anzhelika Gordei | +49 30 39006-147
anzhelika.gordei@ipk.fraunhofer.de

Messen 2023

Bei unseren Messeauftritten informieren wir Sie gerne über die angewandte Forschung und Entwicklung des Fraunhofer IPK. Kommen Sie in Kontakt mit unseren Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern und profitieren Sie von den neuesten Technologien in den Bereichen Produktion, Automatisierung und Digitale Fabrik.

Weitere Informationen:
www.ipk.fraunhofer.de/
messen



Parts2Clean

Unser Thema: Automatisierte Erkennung und Befundung von Altteilen, Oberflächenprüfung
26.–28. September 2023
Stuttgart

maintenance Schweiz

Unser Thema: Scangineering für MRO
25.–26. Oktober 2023
Zürich

Formnext

Unser Thema: Additive Technologien und Scangineering für MRO
7.–10. November 2023
Frankfurt

MEDICA

Unser Thema: Scangineering – digitale Zwillinge für die Medizintechnik
13.–16. November 2023
Düsseldorf

Space Tech Expo

Unser Thema: Digitale Zwillinge, MBSE
14.–16. November 2023
Bremen

Energy Storage

Unser Thema: Nutzung Digitaler Zwillinge für Produktenstehung im Bereich Wasserstoff
28.–30. November 2023
Düsseldorf



© Mirko Krenzel

IHRE ANSPRECHPERSON
Jens Fischler | +49 30 39006-332
jens.fischler@ipk.fraunhofer.de

MEHR KÖNNEN

In unserem MEHR KÖNNEN-Programm tragen wir technologiebasiertes Know-how direkt in die unternehmerische Praxis. Mit der Teilnahme an einer unserer Weiterbildungsveranstaltungen investieren Sie in Ihre berufliche Entwicklung und fördern gleichzeitig den wirtschaftlichen Erfolg Ihres Unternehmens. Nutzen Sie die Gelegenheit, sich wissenschaftlich fundiert und umsetzungsorientiert fortzubilden. Knüpfen Sie Netzwerke zu anderen Expertinnen und Experten, auch über die eigenen Branchengrenzen hinweg.

Nächste Veranstaltungen:



PTK 2023: Rethinking Production
14.–15.09.2023

© Adobe Stock



Mastering Digital Twins
Online-Zertifikatskurs
im Selbststudium

© iStock_2019

Weitere Informationen
zu unserem Programm
finden Sie unter
www.ipk.fraunhofer.de/
weiterbildung



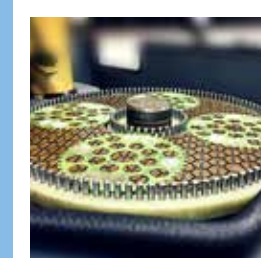
**Wissensbilanz
Made in Germany**
12.–13.10.2023

© MEV



PLM Professional
25.–29.09.2023,
13.–17.11.2023

© Adobe Stock



**IAK
Keramikbearbeitung**
19.10.2023



Kantenworkshop
20.10.2023

IMPRESSUM

FUTUR 1/2023
25. Jahrgang
ISSN 1438-1125

HERAUSGEBER

Prof. Dr. h. c. Dr.-Ing. Eckart Uhlmann

MITHERAUSGEBER

Prof. Dr.-Ing. Holger Kohl
Prof. Dr.-Ing. Jörg Krüger
Dr.-Ing. Kai Lindow
Prof. Dr.-Ing. Michael Rethmeier

Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen
und Konstruktionstechnik IPK
Institut für Werkzeugmaschinen und
Fabrikbetrieb IWF der TU Berlin

KONTAKT

Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen
und Konstruktionstechnik IPK
Claudia Engel
Pascalstraße 8–9
10587 Berlin
Telefon: +49 30 39006-140
Fax: +49 30 39006-392
pr@ipk.fraunhofer.de
www.ipk.fraunhofer.de

REDAKTION

Claudia Engel (V.i.S.d.P.)
Katharina Strohmeier (Chefredaktion):
S. 14–19, 20–23, 26–29, 44–45, 46–47,
Ruth Asan:
S. 38–41, 42–43
Kirsten Endres:
S. 54–55
Bernardo Hierneis de Rezende:
S. 42–43
Adrian Lobe:
S. 24–25, 30–33, 34–37
Martina Rennschmid:
S. 10–13, 48–51, 52–53

GESTALTUNG

Larissa Klassen (Artdirektion)

FONT-GESTALTUNG FUTUR-LOGO

Elias Hanzer

FOTOGRAFIEN UND GRAFIKEN

Soweit nicht am Bild anders vermerkt:

© Adobe Stock:
S. 7, 8, 10–13, 44 (oben)–45
© exeron GmbH:
S. 17
© Fraunhofer IPK:
S. 4/5, 25 (unten), 27/28, 44 (unten), 54
© Fraunhofer IPK/Clara Schmidt-Wiegand
S. 43, 47
© Fraunhofer IPK/Ksenia Gaillard:
S. 48
© Fraunhofer IPK/Larissa Klassen:
Titel, S. 3, 11–13, 14, 18–19, 21–23 (mit
freundlicher Unterstützung von Benjamin Blatz
und dem Team vom WvSC), 25, 26, 30–32
© iStock:
S. 43 (Hintergrund)
© IWF TU Berlin:
S. 34/37
© IWF TU Berlin/Michael Wendt
S. 52

BILDBEARBEITUNG

Larissa Klassen, Antonia Schreiber, Maria Capelo

HERSTELLUNG

Druckstudio GmbH



**Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen
und Konstruktionstechnik IPK**

Pascalstraße 8–9 | 10587 Berlin | Telefon: +49 30 39006-140
pr@ipk.fraunhofer.de | www.ipk.fraunhofer.de



[instagram.com/fraunhofer_ipk](https://www.instagram.com/fraunhofer_ipk)
[linkedin.com/company/fraunhofer-ipk](https://www.linkedin.com/company/fraunhofer-ipk)
twitter.com/Fraunhofer_IPK
[youtube.com/FraunhoferIPK](https://www.youtube.com/FraunhoferIPK)