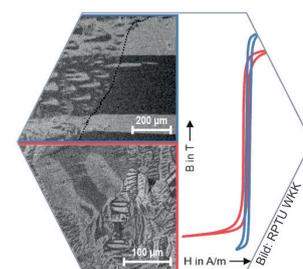


HYP

Multifunktionale Hochleistungskomponenten
aus hybriden porösen Werkstoffen



Multifunktionale Werkstoffe

RP^{TU} | FBK INFOBRIEF

LEHRSTUHL FÜR FERTIGUNGSTECHNIK UND BETRIEBSORGANISATION

Neuer Sonderforschungsbereich/Transregio TRR 375 startet in erste Förderperiode

Am 23.11.2023 hat der zuständige Ausschuss der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) die Einrichtung des neuen Sonderforschungsbereichs/Transregios (TRR) „Multifunktionale Hochleistungskomponenten aus hybriden porösen Werkstoffen“ empfohlen. Der neue TRR wird ab dem ersten April 2024 bis Ende 2027 mit rund zwölf Millionen Euro von der DFG gefördert. Beteiligt sind neben zwölf Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern der RPTU Kaiserslautern auch sechs Institute der Leibniz Universität Hannover und Forschende der TU Darmstadt, des Fraunhofer-Instituts für Techno- und Wirtschaftsmathematik und des Leibniz-Informationszentrums Technik und Naturwissenschaften und Universitätsbibliothek. Sprecher des Sonderforschungsbereichs ist Prof. Aurich.

Ziel des TRR 375 ist es eine neue Klasse an Bauteilen zu etablieren: multifunktionale Hochleistungskomponenten. Diese bestehen aus hybriden porösen (kurz: HyPo) Materialien, die durch eine Kombination unterschiedlicher metallischer Werkstoffe und durch die gezielte Einbringung von Poren charakterisiert sind. Komponenten aus HyPo-Werkstoffen weisen eine lokal variierende Dichte, etwa in Form einer gradierten Porosität, und lokal speziell auf den Anwendungsfall abgestimmte mechanische und thermische Eigenschaften auf. Zusätzlich sollen sie ergänzende Funktionen erfüllen, z. B. durch in die Komponenten integrierte Sensoren. Diese auf einem Dünnschichtkonzept basierenden Sensoren werden während des Herstellungsprozesses der Komponenten auf inneren Bauteiloberflächen appliziert. Die Sensoren können z. B. zur permanenten Selbstüberwachung genutzt werden, wodurch

eine komplette Belastungshistorie der Komponente bis hin zu ihrem drohenden Ausfall aufgezeichnet wird und ihre Lebensdauer somit bestimmt und vollständig ausgenutzt werden kann. Im Fokus des Sonderforschungsbereichs steht die Methodenentwicklung zur Berechnung, Auslegung, Konstruktion, Fertigung und Charakterisierung von Komponenten aus HyPo-Werkstoffen. Um die zugrundeliegenden Fragestellungen zu beantworten, verfolgt der Sonderforschungsbereich einen interdisziplinären Ansatz. Im TRR 375 werden Forschende aus den Disziplinen Fertigungstechnik, Werkstofftechnik, Messtechnik, Mechanik, Konstruktion und Informatik gemeinsam an dem Verständnis zur Werkstoffauslegung, Entwicklung und Fertigung von multifunktionalen Hochleistungskomponenten arbeiten. Hergestellt werden die Komponenten mit additive Fertigungsverfahren. Mithilfe des Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) werden in Hannover Komponentenkerne mit einer gradierten Porosität erzeugt. Auf diese metallischen Schäume werden am FBK mit dem pulverbasierten additiven Fertigungsverfahren Laser Directed Energy Deposition (DED-LB) funktional gradierte Werkstoffschichten aufgebracht. Betrachtet werden zunächst Kombinationen aus verschiedenen Stahllegierungen und einer Aluminiumlegierung. Durch diese Werkstoffauswahl wird eine möglichst hohe Beanspruchbarkeit und eine möglichst hohe Masseneffizienz abgedeckt. Zudem können durch die Metastabilität der Stahllegierungen in späteren Förderperioden gezielt elektrische und magnetische Funktionen in die Komponenten integriert werden. Insgesamt ist das FBK mit drei Projekten am Sonderforschungsbe-

reich beteiligt. Neben der Erzeugung gradiertter Werkstoffschichten wird am FBK die Entwicklung einer Prozessüberwachung und -steuerung für das DED-LB auf der Grundlage des Deep Reinforcement Learning adressiert. Das Modell soll bei Bedarf selbstständig korrigierende Steuerbefehle in den DED-LB-Prozess einbringen, so dass hergestellte Komponenten prozesssicher die geforderten Eigenschaften aufweisen. Weiterhin ist das FBK an einem zentralen Serviceprojekt beteiligt. Durch den sukzessiven Einbau von Komponenten aus HyPo-Werkstoffen in eine CNC-Fräsmaschine wird im Serviceprojekt ein Demonstrator aufgebaut. Dieser veranschaulicht die Fortschritte entlang der Förderdauer und das hiermit einhergehende steigende Potenzial multifunktionaler Hochleistungskomponenten. So kann unter anderem festgestellt werden, in welchem Umfang Komponenten aus HyPo-Werkstoffen die mögliche Dynamik einzelner Maschinenkomponenten und den Energiebedarf der Maschine beeinflussen.

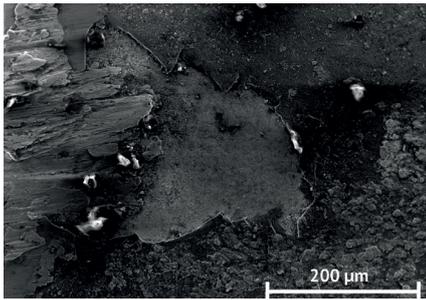
Neben der Umsetzung des Forschungsprogramms ist die Aus- und Weiterbildung der Promovierenden ein zentrales Anliegen des TRR 375. Aus diesem Grund wurde ein Qualifizierungsprogramm entwickelt, das die Promovierenden fachlich und organisatorisch während ihrer Projektlaufzeiten begleitet und fördert. Kern des Programms sind Seminare zu Schlüsselqualifikationen und Vorträge von Gastwissenschaftlern.

Kontakt

Prof. Dr.-Ing. Jan C. Aurich
E-Mail: jan.aurich@rptu.de
Telefon: 0631 205-2618

Projektstart des SPP 2402

Greybox-Modelle zur Qualifizierung beschichteter Werkzeuge für die Hochleistungszerspanung



Abplatzung der Beschichtung auf der Spanfläche einer Wendeschneidplatte

Zerspanungswerkzeuge mit geometrisch bestimmter Schneide werden überwiegend beschichtet, da diese höhere Standzeiten und damit eine effizientere Zerspanung ermöglichen. Aufgrund der zeitlich veränderlichen thermo-mechanischen Belastungen des Werkzeugs ist eine zuverlässige Verschleißprognose beschichteter Werkzeuge derzeit nicht möglich. Der Einsatz von Machine Learning (ML) bietet großes Potenzial, den Verschleißzustand von Werkzeugen abzuschätzen. Jedoch ist es aufgrund des Blackbox-Charakters von ML-Modellen schwierig, dass im Training erlernte Modell zu interpretieren und Informationen über den Verschleißprozess abzuleiten. Um die Genauigkeit und Interpretierbarkeit zu steigern, können datengetriebene ML-Modelle

(Blackbox) mit deterministischen Modellen (Whitebox) in Greybox-Modelle kombiniert werden. Im Schwerpunktprogramm (SPP) 2402 wird ein tieferes Verständnis des stationären und insbesondere des instationären Verschleißverhaltens, wie Werkzeugausbrüche oder Schichtabplatzungen, von beschichteten Werkzeugen bei der Hochleistungszerspanung erforscht. Dabei steht die Entwicklung von Greybox-Modellen im Kontext der Zerspanung im Fokus des DFG-Forschungsvorhabens. Die robuste Vorhersage physikalischer Zusammenhänge aus den Whitebox-Modellen sollen zusammen mit der modellhaften Abbildung komplexer Korrelationen aus den Blackbox-Modellen zu einem präzisen Ziel Fenster konvergiert werden. Dieser innovative Ansatz zielt darauf ab, zeitliche, verschleißbedingte Veränderungen von beschichteten Zerspanwerkzeugen bis zum Standzeitende präzise zu erfassen und zu prognostizieren. Im Teilprojekt D6 („Entwicklung eines Greybox-Modells zum Verständnis und zur Vorhersage des Verschleißes von beschichteten Werkzeugen beim Drehen“) wird am FBK in Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe Werkstoffprüfung und dem Lehrstuhl für Messtechnik und Sensorik der RPTU ein tieferes Verständnis des stationären und instationären Systemverhaltens von beschichteten Werkzeugen beim Drehen erforscht. Als Grundlage werden Drehversuche und

Analogieversuche zum Schädigungsverhalten durchgeführt, um den mechanischen Schädigungsprozess an den Werkzeugen und ihren Beschichtungen zu charakterisieren. Hierzu werden neben Methoden zur Schichtcharakterisierung und dem Schädigungsverhalten die Werkzeuge auch computertomographisch untersucht. Die Erkenntnisse aus den experimentellen Untersuchungen dienen als Eingangsgrößen für die FEM-Zerspanungssimulation (Whitebox-Modell) und die statistische Datenanalyse (Blackbox-Modell). Abschließend werden die Modelle mit einem Fuzzy-Modell und einem Regressions-Modell in einem Greybox-Modell zusammengeführt. Mit Kernel basierten Methoden wie Support Vector Machines oder Gausprozesse wird die Greybox die Veränderungen von Zerspanwerkzeugen im Einsatz bis zum Ende ihrer Lebensdauer abbilden. Die Greybox-Modelle werden so die Verschleißursachen, Verschleißkennwerte, die Materialdegradation sowie die zeitvariante Performance von beschichteten Zerspanwerkzeugen prognostizieren können. Dies ermöglicht eine wissensbasierte Qualifizierung beschichteter Werkzeuge für effizientere Zerspanprozesse.

Kontakt

M.Sc. Maximilian Berndt

E-Mail: maximilian.berndt@rptu.de

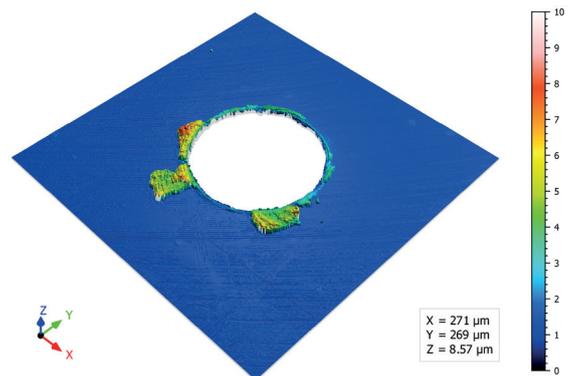
Telefon: 0631 205 – 3386

Neues DFG-Projekt im Bereich der Mikrozerspanung gestartet

Untersuchung der Span- und Gratbildung beim Mikrobohren

Das spanende Mikrobohren zeichnet sich durch eine kurze Prozesszeit und der Möglichkeit eine große Anzahl verschiedener Materialien zu bearbeiten aus. Allerdings ist das Verfahren durch prozessbedingte Gratbildung am Ein- und Austritt des Bohrers gekennzeichnet. Diese hat oftmals zur Folge, dass die Funktion der Bauteile eingeschränkt wird. Insbesondere bei Bohrungsdurchmessern kleiner 300 µm spielt die minimale Gratbildung eine wichtige Rolle, da ein nachträgliches Entgraten schwierig oder gar nicht möglich ist. Der Zusammenhang zwischen der Werkzeuggeometrie, den Prozessparametern und der Span- und Gratbildung bei Werkzeugen mit einem Durchmesser von weniger als 300 µm ist bisher kaum erforscht. Das Projekt schließt diese Wissenslücke, um die Gratbildung zu reduzieren und die Bohrungsqualität zu erhöhen. Im Rahmen des Projekts wird zunächst ein Geometriemodell für eine einschneidige Mikrobohrergeometrie entwickelt, um Mikrobohrer mit verschiedenen Geometrien und Durchmessern herstellen zu können. Anschließend werden zunächst Mikrobohrer mit einem Durchmesser von 100 µm hergestellt und im Rahmen von experimentellen Untersuchungen hinsichtlich der Werkzeugwinkel optimiert. Es folgt die Herstellung von Werkzeugen mit den Durchmessern 50 µm, 100 µm und 300 µm. Mit

diesen Werkzeugen werden Mikrobohrungen unter verschiedenen Ein- und Austrittswinkeln, bei Variation der Schnittgeschwindigkeit, des Vorschubs pro Umdrehung und des Schneidenradius in INCONEL 718 und Messing hergestellt und hinsichtlich der Span- und Gratbildung untersucht. Damit wird der Einfluss des Verhältnisses zwischen Schneidenradius und Spanungsdicke untersucht. Parallel dazu werden 3D-FE-Simulationen durchgeführt, um die experimentell nicht ermittelbaren Temperaturverteilungen und Spannungen bei der Spanbildung zu bestimmen. Die Kombination der experimentellen Ergebnisse mit den Ergebnissen der FE-Simulationen bildet die Basis für ein vertieftes Verständnis der Span- und Gratbildung beim Mikrobohren. Nach Abschluss des Projekts werden Handlungsempfehlungen für die Herstellung gratarmer Mikrobohrungen mit Durchmessern kleiner 300 µm formuliert. Basierend auf diesen Handlungsempfehlungen können gratminimierende Prozessparameter sowie Werkzeuge mit angepasster



Gratbehaftete Mikrobohrung mit einem Durchmesser von 100 µm

Makro- und Mikrogeometrie, abgestimmt auf die Werkstückgeometrie, definiert werden. Durch die erzielten Erkenntnisse können zukünftig miniaturisierte technische Produkte wirtschaftlicher und mit höherer Qualität hergestellt werden.

Kontakt

Dipl.-Ing. Sonja Kieren-Ehse

E-Mail: sonja.kieren-ehse@rptu.de

Telefon: 0631 205 – 5961

Abschluss DFG-Projekt „ÖkoPSS“

Erforschung der Nachhaltigkeit technischer Produkt-Service Systeme

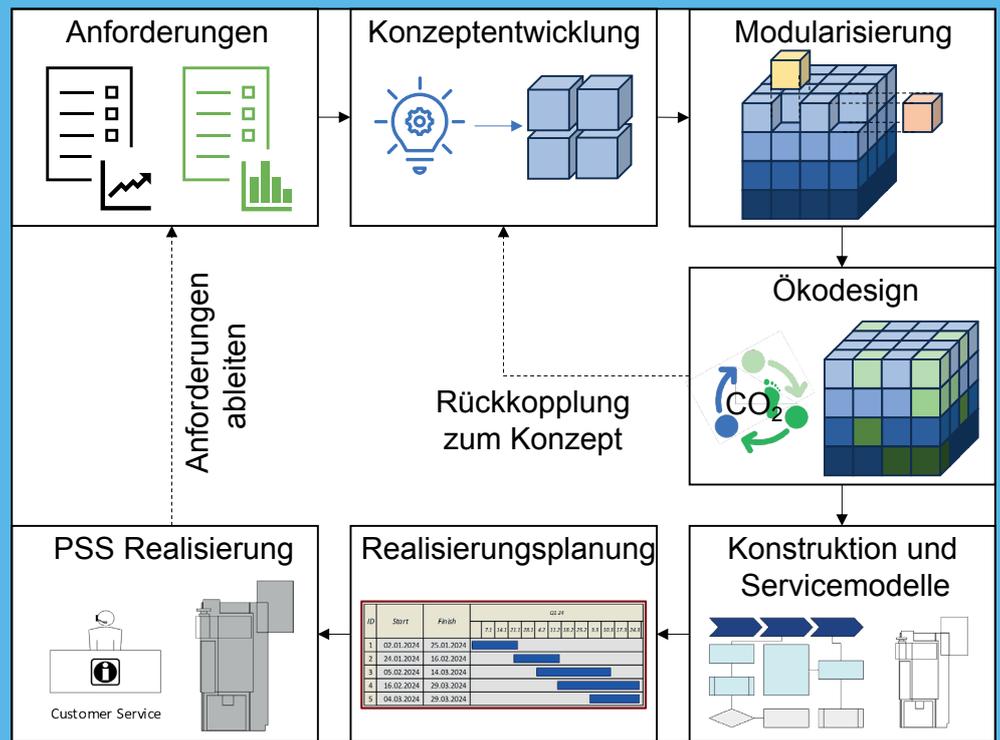
Technische Produkt-Service Systeme (PSS) beschreiben eine Kombination aus Investitionsgütern und komplementären Services. PSS haben sich nicht nur in der industriellen Praxis als wirtschaftlich erfolgreich etabliert, sondern zeigen auch Potenziale, zu einer nachhaltigen Entwicklung beizutragen. Im Zuge des DFG-Projekts „Analyse und Sicherstellung der ökologischen Nachhaltigkeit technischer Produkt-Service Systeme in der frühen Gestaltungsphase – ÖkoPSS“ wurde erforscht, wie diese Potenziale systematisch genutzt werden können. Exemplarisch betrachtet wurden Nutzfahrzeuge und Werkzeugmaschinen, unterstützt durch Services wie Wartung und Instandhaltung, Remote-Überwachung oder Nutzerschulungen.

Um die Nachhaltigkeit von PSS zu steigern, bietet sich die PSS-Gestaltung als Ansatzpunkt an. In dieser frühen Lebenszyklusphase können verbessernde Maßnahmen kostengünstig und mit einem großen Einfluss auf den übrigen Lebensweg getroffen werden. Um geeignete Verbesserungsmaßnahmen zu identifizieren, ist es notwendig, die entstehenden Umwelteinflüsse der Herstellung und Nutzung von PSS zu verstehen. Dazu wurden umfassende Ökobilanzen für den gesamten Lebenszyklus erstellt. Die Ergebnisse zeigen, dass der Großteil der Umweltauswirkungen bei der Produktion des Kernproduktes und in dessen Nutzungsphase entstehen. Services haben geringere direkte Umwelteinflüsse und können indirekt sogar dazu beitragen, die gesamte Umweltbelastung des PSS zu senken, indem sie die Effizienz und Funktionalität des Kernproduktes erhalten und potenziell verbessern.

Um die Umwelteinflüsse in der Herstellung und Nutzung gezielt zu senken, wurde ein Vorgehensmodell entwickelt,

das es erlaubt, die Umwelteinflüsse von PSS bereits in der Entwicklung gezielt zu beeinflussen. Das Vorgehensmodell beginnt mit einer detaillierten Anforderungsidentifikation, um nachfolgend ein PSS-Konzept zu entwickeln, das diese Anforderungen möglichst genau erfüllt. Anschließend wird das Konzept in ein-

lanzen entsprechend angepasst werden. Zusätzlich fließen die Ökodesignmaßnahmen über eine Feedbackschleife in die PSS-Konzeptentwicklung ein. Die letzten Schritte des Vorgehensmodells umfassen die Konstruktion des Sachproduktes und die Planung der Services. Danach erfolgt die Realisierungsplanung,



Darstellung des erarbeiteten Vorgehensmodells

zelle Module zerlegt, die mittels Ökobilanzen untersucht werden. So können die größten Treiber der Umwelteinflüsse identifiziert und deren Einfluss mit gezielten Ökodesign-Maßnahmen gesenkt werden. Beispielsweise zeigen die Ergebnisse der Ökobilanzierung einer Werkzeugmaschine, dass der Gebrauch von Druckluft bis zu einem Drittel des gesamten CO₂-Fußabdrucks ausmachen kann. Dieses Wissen kann in die PSS-Gestaltung einfließen und bereits in der Konstruktion der Werkzeugmaschine als Sachprodukt berücksichtigt werden. Zusätzlich könnte in der Planung des Serviceportfolios ein zusätzlicher Service zur Überprüfung und Instandhaltung des Druckluftsystems ausgearbeitet werden. Die Wirksamkeit der Ökodesignmaßnahmen wird überprüft, indem die Ökobi-

lanzen der die Produktion des Sachproduktes geplant und Serviceresourcen aufgebaut werden. In der abschließenden PSS-Realisierung wird das Sachprodukt hergestellt, vertrieben sowie die Services erbracht.

Mit Hilfe des entwickelten Vorgehensmodells und der Ökodesign-Maßnahmen konnten Senkungspotenziale von bis zu 40% identifiziert werden. Das Vorgehensmodell bietet ein theoretisches Rahmenwerk und soll zukünftig in der industriellen Praxis Anwendung finden.

Kontakt

M. Sc. Max Werrel

E-Mail: max.werrel@rptu.de

Telefon: 0631 205-4128

FBK stärkt seine Kompetenz durch neues BMBF-Projekt zur Erforschung künftiger Mobilfunkstandards

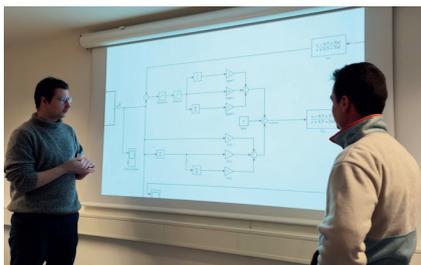
Mitgestalten des 6G Mobilfunkstandards für die Produktion

6G (Sixth Generation Wireless) bezeichnet den zukünftigen Mobilfunkstandard und stellt den Nachfolger der 5G-Mobilfunktechnologie dar. 6G verspricht eine deutliche Verbesserung einer Vielzahl von Leistungscharakteristika. Hierzu zählt beispielsweise eine nahezu latenzfreie und zeit-deterministische Kommunikation zwischen einer Vielzahl von Geräten, die direkte Integration von Funktionen der künstlichen Intelligenz und größere mögliche Datenraten durch die Nutzung höherer Frequenzbereiche. Zudem bieten diese Frequenzbereiche das Potenzial, Standorte von Geräten ohne dedizierte Netzwerkschnittstelle zentimetergenau zu erkennen.

Diese Lokalisierungstechnologie, die auch als „Joint Communication and Sensing“ bezeichnet wird, ermöglicht eine sensorlose Ortung verschiedener Produktionsanlagen oder Entitäten und schafft eine neue, zusätzliche Informationsebene innerhalb eines Kommunikationsnetzwerkes von Unternehmen. Die gewonnenen Informationen der präzisen Position von Geräten oder Anlagen können innerhalb industrieller Produktionsumgebungen genutzt werden, um Prozesse in einer Fabrik ganzheitlicher zu erfassen und die Funktionalität cyber-physischer Produktionssysteme zu erweitern.

Durch die zusätzliche Informationsebene eröffnet 6G neue Anwendungsfälle auf Fabrik-, Maschinen- und Prozessebene, wodurch eine präzisere Arbeits- und Prozessplanung und -steuerung, basierend auf Positionsdaten, beispielsweise von Werkstücken, fahrerlosen Transportsystemen oder aktuellen Prozesszuständen von Werkzeugmaschinen ermöglicht wird. Dies führt insbesondere in komplexen, dynamischen und flexiblen Produktionsumgebungen zu einer erheblichen Komplexitätsreduktion von heterogenen Steuerungsprozessen.

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projektes



Untersuchung einer Latenz-behafteten Maschinensteuerung

Open6Ghub wird am FBK die neue 6G-Technologie untersucht, nutzbar gemacht sowie Grenzen und Anforderungen evaluiert.

Hierzu werden die dezentrale, kabellose Maschinensteuerung und -regelung, die sensorlose Materialflussüberwachung und die Integration von digitalen Zwillingen innerhalb eines industriellen Metaversums untersucht.

Da sich 6G in einem noch nicht standardisierten Zustand (Vorstandardisierung) befindet, werden am FBK die benötigten Leistungscharakteristika eines künftigen 6G-Standards hinsichtlich expliziter industrieller Anwendungsfälle erforscht. Die Zielsetzung umfasst die Identifikation von Indikatoren, die in den Standardisierungsprozess einfließen können und die Anforderungen an Mobilfunknetze für den Einsatz in Produktionssystemen der Zukunft verdeutlichen. Diese Identifikation erfolgt anhand einer selbstentwickelten Werkzeugmaschine mit kabelloser Maschinensteuerung und ihrem digitalen Zwilling.

Kontakt

Dipl.-Ing. Marius Schmitz

E-Mail: marius.schmitz@rptu.de

Telefon: 0631 205 - 4225

Neue Mitarbeiter



Christian Render arbeitet seit Februar im Support-Team am FBK.



Jan-Luka Neubert arbeitet seit Februar im Support-Team am FBK.

Herausgeber

Lehrstuhl für Fertigungstechnik und Betriebsorganisation
Prof. Dr.-Ing. Jan C. Aurich

Kontakt

Lehrstuhl für Fertigungstechnik und Betriebsorganisation
Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau
Postfach 3049
67653 Kaiserslautern

E-Mail: fbk@rptu.de Tel.: 0631 205 - 2618
Internet: www.fbk-kl.de Fax: 0631 205 - 3238

Zu allen Veranstaltungen, Veröffentlichungen und Projekten erhalten Sie neben den angegebenen Quellen Informationen beim Herausgeber.

Der Infobrief ist auch in elektronischer Form als PDF-Datei über die Internet-Seiten des FBK erhältlich. Dort kann der Infobrief ebenfalls abonniert werden.

ISSN 1615-2492

Veröffentlichungen

K. Ullrich, M. von Elling, K. Gutzeit, M. Dix, M. Weigold, J.C. Aurich, R. Wertheim, I.S. Jawahir, H. Ghadbeigi: AI-based optimisation of total machining performance: A review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 50, (2024): S. 40-54. [10.1016/j.cirpj.2024.01.012](https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2024.01.012)

P. Schworm, X. Wu, M. Wagner, S. Ehmsen, M. Glatt, J.C. Aurich: Energy supply scheduling in manufacturing systems using Quantum Annealing. *Manufacturing Letters* 38 (2023): S. 47-51. [10.1016/j.mfglet.2023.09.005](https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2023.09.005)

T. Mayer, S. Kieren-Ehse, B. Kirsch, J.C. Aurich: Comparison of different 3Y-TZP substrates for the manufacture of all-ceramic micro end mills with respect to the cutting edge radius and the tool wear. *Manufacturing Letters* 38 (2023): S. 44-46. [10.1016/j.mfglet.2023.09.001](https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2023.09.001)

M. Glatt, P. Kölsch, M. Wagner, J. Mertes, J. C. Aurich: Framework for synergetic integration of heterogeneous Digital Twins in Manufacturing Systems. *Procedia CIRP* 120 - Proceedings of the 56th CIRP Conference on Manufacturing Systems (2023): S. 798-803. [10.1016/j.procir.2023.09.078](https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.09.078)

K. Gutzeit, M. Berndt, B. Kirsch, J.C. Aurich: Improving the Machinability when Milling Ti-6Al-4V Using a Sub-Zero Metalworking Fluid. *Proceedings of the 23rd Machining Innovations Conference for Aerospace Industry* (2023): S. 1-8. [10.2139/ssrn.4640122](https://doi.org/10.2139/ssrn.4640122)

S. Ghansiyal, L. Yi, P. M. Simon, M. Klar, M. M. Müller, M. Glatt, J. C. Aurich: Anomaly detection towards zero defect manufacturing using generative adversarial networks. *Procedia CIRP* 120 - Proceedings of the 56th CIRP Conference on Manufacturing Systems (2023): S. 1457-1462. [10.1016/j.procir.2023.09.193](https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.09.193)

A. Lange, N. Altherr, B. Kirsch, J.C. Aurich: Numerical analysis of different turbine designs for high-frequency spindles. *Proceedings of the 23rd euspen International Conference* (2023): S. 211-214. [AICE23105](https://doi.org/10.1016/j.aice.2023.08.009)

J. Mertes, M. Glatt, C. Schellenberger, P. M. Simon, L. Yi, H. D. Schotten, J. C. Aurich: Implementation and Evaluation of 5G-enabled sensors for Machine Tools. *Procedia CIRP* 120 - Proceedings of the 56th CIRP Conference on Manufacturing Systems (2023): S. 45-50. [10.1016/j.procir.2023.08.009](https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.08.009)

N. Altherr, A. Lange, M. Zimmermann, B. Kirsch, J. C. Aurich: Kinematic simulation model for micro grinding processes using detailed tool models. *Procedia CIRP* 117 - Proceedings of the 19th CIRP Conference on Modeling of Machining Operations (2023): S. 237-242.