

# RP<sup>TU</sup> | **FBK** INFOBRIEF

LEHRSTUHL FÜR FERTIGUNGSTECHNIK UND BETRIEBSORGANISATION

## Nutzbarmachung des Hochgeschwindigkeits-Laserauftragschweißens mit Fokus auf regionale kleine und mittlere Unternehmen Projektabschluss des Anwendungszentrums für additive Fertigung

Die additive Fertigung bietet als neuartiger Fertigungsprozess viele Vorteile gegenüber konventionellen Fertigungsprozessen. Hierzu zählen unter anderem die rein digitale Prozesskette bis zur Fertigung des Produktes, die große Gestaltungsfreiheit ohne fertigungsbedingte Restriktionen sowie eine wirtschaftliche Möglichkeit für individualisierte Produkte in kleinen Losgrößen. Ein limitierender Faktor für die breite Etablierung der additiven Fertigung in der Industrie ist jedoch die niedrige Produktivität, bedingt durch geringe Prozessgeschwindigkeiten. Dies hemmt insbesondere den Einsatz additiver Fertigungstechnologien im Rahmen einer Serienfertigung mit hohen Stückzahlen.

Das Hochgeschwindigkeits-Laserauftragschweißen (HLA) bietet das Potenzial, die Nachteile bisheriger additiver Fertigungsverfahren durch deutlich höhere Vorschub- und Aufbauraten (Faktor 10 bis 100 im Vergleich zum herkömmlichen Laserauftragschweißen) zu eliminieren und eine Produktivitätssteigerung zu erreichen. Dies wird durch eine Verfahrensadaptation erreicht, indem das pulverförmige Ausgangsmaterial bereits oberhalb des Bauteils aufgeschmolzen wird. Dadurch erreichen die Pulverpartikel das Bauteil in einem flüssigen Zustand, wodurch die Zeitspanne zum Aufschmelzen der Pulverpartikel im Schmelzbad auf der Bauteiloberfläche entfällt. Als nachteilig erweist sich jedoch der noch niedrige Technologiereifegrad des HLA-Verfahrens, weshalb es einen großen Bedarf an Forschung und Wissenstransfer in die Industrie gibt. Die Adressierung dieses Forschungsbedarfs war der Untersuchungsgegenstand des vom europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) und des Ministeriums

für Wirtschaft, Verkehr, Landwirtschaft und Weinbau des Landes Rheinland-Pfalz geförderten Projekts „Anwendungszentrum für additive Fertigung mit Hochgeschwindigkeits-Laserauftragschweißen“. Untersucht wurde dabei unter anderem die Nutzbarmachung des neuartigen Fertigungsverfahrens für regionale kleine und mittlere Unternehmen. Zu diesem Zweck wurde eine pe3D Anlage der Firma Ponticon beschafft, die alle Kriterien an die Genauigkeiten und Bearbeitungsgeschwindigkeiten für den HLA-Prozess erfüllt. Die Anlage verfügt über einen 8 kW Diodenlaser und kann Vorschubgeschwindigkeiten von bis zu 200 m/min realisieren. Es kann ein breites Spektrum an Werkstoffen mit der Anlage verarbeitet werden. Des Weiteren können aufgrund eines speziellen Pulverförderers zwei verschiedene Materialien gleichzeitig in den Prozess gefördert werden, wodurch die Herstellung gradierter Materialien ermöglicht wird. Nach der Inbetriebnahme der Anlage wurden geeignete Prozessparameterkombinationen für die industriell verbreiteten Edelstähle 1.4404 und 1.4542 erforscht. Wesentliche Parameter, die hierbei untersucht wurden, waren die Laserleistung, die Vorschubgeschwindigkeit, der Pulvermassenstrom sowie der Laserspot-Durchmesser. Im Fokus stand die Fertigung von Bauteilen mit geringer Porosität, da Poren die mechanischen Eigenschaften der Bauteile negativ beeinflussen können, indem sie einen Ausgangspunkt der Rissbildung darstellen. Unterschiedliche Parameterkombinationen führen zu anderen Werkstoffeigenschaften, weshalb die Bauteile zusätzlich hinsichtlich ihres resultierenden Gefüges und ihrer Mikrohärtة charakterisiert wurden.

Um die Wirkzusammenhänge beim HLA-Prozess detaillierter zu untersuchen, wurde zusätzliche Messtechnik integriert, welche in Echtzeit Aufschluss über die Temperatur an der Bauteiloberfläche gibt. Die Temperaturdaten eines Pyrometers können nun genutzt werden, um direkt auf resultierende Bauteilfehler zu schließen. Eine zu geringe Temperatur lässt auf sogenannte „Lack of Fusion“-Poren schließen, zu hohe Temperaturen können das Ausgangsmaterial verdampfen. Durch die Nutzung der zusätzlichen Messtechnik ist eine Echtzeitregelung der Laserleistung möglich, um gleichmäßigere Schichten mit konstanter Temperatur zu erzeugen. Weiterhin wurde ein Messsystem zur Pulvergasstromanalyse beschafft, welches Aufschluss über die Geometrie des von der Düse erzeugten Pulverkegels gibt, um unter anderem den Verschleißzustand der Düse zu detektieren.

Im Rahmen des Projekts wurden verschiedene Formate angeboten, welche über das Verfahren und dessen Anwendungsmöglichkeiten informierten, um regionalen Unternehmen einen Einblick in die Vorteile HLA-Technologie zu verschaffen. So fanden unter anderem ein Vortrag im Rahmen der Reihe Insight inTU Research statt sowie ein Workshop in Kooperation mit der Handwerkskammer. Auch nach Projektende steht das Anwendungszentrum regionalen Unternehmen als Ansprechpartner für die Thematik der additiven Fertigung zur Verfügung.

### Kontakt

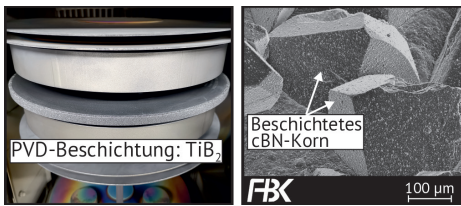
M.Sc. Jacques Platz

E-Mail: [jacques.platz@rptu.de](mailto:jacques.platz@rptu.de)

Telefon: 0631 / 205 3239

## PVD-Beschichtung zur Verbesserung galvanisch gebundener cBN-Schleifscheiben

### DFG-Projekt abgeschlossen



PVD-Beschichtung der cBN-Schleifscheibe

Eine Reduzierung der Reibungsvorgänge und chemischen Wechselwirkungen zwischen den Kontaktpartnern beim Schleifen kann durch den Einsatz einer Physical Vapour Deposition (PVD)-Beschichtung an der Schleifscheibe erreicht werden. Dadurch besteht das Potenzial die Schleifbearbeitung wirtschaftlicher zu machen. In dem von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Projekt „PVD-Beschichtung galvanisch gebundener cBN-Schleifwerkzeuge zur Optimierung des Verschleiß- und Einsatzverhaltens für die Zerspaltung von Nickel-Basis-Legierungen“ wurden zunächst unterschiedliche Beschichtungen (TiN, AlTiN, AlTiSiN und TiB<sub>2</sub>) auf Probekörpern abgeschieden und hinsichtlich ihrer Eigenschaften untersucht und bewertet. Zwecks besserer Untersuchungsmöglichkeiten verfügte die Oberfläche des Probekörpers über einen Bereich aus Schleifbelag und einen Bereich aus galvanisch abgeschiedenem Nickel ohne kubisches Bornitrid (cBN). Am Bereich ohne Schleifkorn wurden Untersuchungen zur Schichthftung und zu den Reibungsei-

genschaften durchgeführt, am Schleifbelag wurde die Schichthftung ergänzend am Schleifkorn bewertet. Für den Schleifbelag wurden zudem unterschiedliche Korneinbettiefen (45, 55 und 70 % des mittleren Korndurchmessers) hinsichtlich der resultierenden Kornhaltekräft untersucht. Dabei wurde das Ziel verfolgt, den Kornüberstand bzw. den Spanraum für einen besseren Transport des Kühlschmierstoffs und der Späne zu maximieren, ohne einen kritischen Abfall der Kornhaltekräfte zu bewirken. Es konnte nahezu kein Einfluss der Korneinbettiefe auf die Kornhaltekräft festgestellt werden. Die Beschichtung bewirkte allerdings eine leichte Steigerung der Kornhaltekräft. Bei nahezu allen Beschichtungsparametern und Beschichtungen wurde eine gute Schichthftung an der galvanischen Nickelbindung festgestellt. Die Schichthftung am cBN-Korn war im Vergleich dazu geringer ausgeprägt. Da das cBN-Korn bereits über eine ausreichend hohe Verschleißbeständigkeit verfügt, wurde die Haftfähigkeit am Schleifkorn als weniger wichtig eingestuft. Für die weiteren Untersuchungen wurden die Schichtsysteme AlTiN und TiB<sub>2</sub> auf Schleifscheiben mit einer Korneinbettiefe von 50 % aufgebracht und zum Schleifen von Inconel® 718 eingesetzt. AlTiN verfügt über eine hervorragende Oxidationsbeständigkeit und thermische Isolationswirkung. TiB<sub>2</sub> verfügt über hervorragende reibungsreduzierende Eigenschaften. Aus den Leistungsfähigkeitsun-

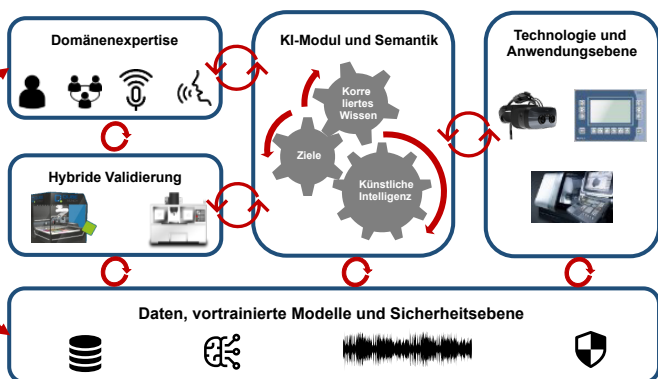
tersuchungen beim Schleifen ging hervor, dass die Reduzierung der Korneinbettiefen von 70 % auf 50 % eine Verringerung der Prozesskräfte bewirkte, was auf den größeren Spanraum und die bessere Kühlschmierstoffversorgung zurückgeführt werden kann. Durch den Einsatz der TiB<sub>2</sub> Beschichtung konnten die Prozesskräfte weiter um bis zu 18 % reduziert werden. Das Schichtsystem AlTiN führte hingegen zu einem leichten Anstieg der Prozesskräfte im Vergleich zur unbeschichteten Schleifscheibe. Bei den Mikrohärteverläufen wurde festgestellt, dass beide untersuchten PVD-Schichten eine tiefere Randzonenbeeinflussung bewirken. Dies wird auf die thermische Isolationswirkung der Schichten zurückgeführt, wodurch die Prozesstemperaturen weniger gut über das Werkzeug abgeführt werden können. Nach höheren Zerspanvolumina konnte jedoch durch den Einsatz von TiB<sub>2</sub> im Vergleich zur unbeschichteten Schleifscheibe eine geringere Randzonenbeeinflussung und somit ein günstigeres Prozessverhalten beobachtet werden. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass durch den Einsatz der PVD-Beschichtung die Prozesskräfte signifikant reduziert werden konnten. Dadurch werden die Werkstücke mechanisch weniger stark beansprucht und es sind geringere Spindelleistungen zur Bearbeitung erforderlich. Es ist auch davon auszugehen, dass höhere Werkzeugstandzeiten erreicht werden.

#### Kontakt

PD Dr.-Ing. habil. Benjamin Kirsch  
E-Mail: benjamin.kirsch@rptu.de  
Telefon: 0631/205 - 3770

## Mit Werkzeugmaschinen sprechen für moderne Produktionssysteme gebundener cBN-Schleifscheiben

### BMBF-Projekt zur Sprachsteuerung von Maschinen und Anlagen basierend auf Künstlicher Intelligenz gestartet



Konzept: Dialokim

Im Alltag ist eine intuitive Sprachsteuerung und Konversation mit Sprachrobotern in vielen Bereichen mittlerweile allgegen-

wärtig. Die Nutzung von Sprachinteraktion mit Endgeräten, Maschinen und Anlagen wird von Nutzern zunehmend akzeptiert und intuitiv adaptiert. Dies ist beispielsweise durch die Sprachsteuerung von Unterhaltungselektronik in Kraftfahrzeugen und von Mobiltelefonen ersichtlich. Sprachsteuerung ermöglicht eine kontaktlose Bedienung ohne Sichtkontakt. Anwendungsspezifische Sprachsteuerungen für Werkzeugmaschinen haben sich jedoch noch nicht etabliert. Insbesondere bei manuellen Prozessen, wie dem Umrüsten einer Werkzeugmaschine, entstehen durch intelligente Sprachsteuerung Effizienzpotenziale. Hierdurch muss nicht zwischen jedem manuellen Schritt eine Interaktion an einem weit entfernten Bedienpult erfolgen. Daneben ermöglichen präzise Sprachbefehle mitunter eine Zeitersparnis, da aufwendige Eingaben über verschachtelte Menüstrukturen entfallen. Die dialogbasierte Anlagenbedienung fördert zudem die Inklusion von Personen mit körperlichen Beeinträchtigungen, denen eine Interaktion mit Anlagen oder ihre Bedienung bisher verwehrt ist.

Im Rahmen des Projektes „Dialogorientierte Künstliche Intelligenz zur intuitiven Maschinensteuerung (DialoKIM)“ werden Methoden und Lösungen entwickelt, um insbesondere kleine und mittlere Unternehmen dabei zu unterstützen, ihre Maschinen und Anlagen mit intelligenten Spracheingabe- und -ausgabesystemen auszustatten.

Innerhalb des Projektes wird ein nutzerbezogenes und systemübergreifendes Konzept entwickelt, implementiert und validiert, um Sprachmodelle anwendungsspezifisch mit einer domänenspezifischen Sprache zu trainieren.

Hierfür werden im ersten Projektabschnitt künstliche neuronale Netze zur Sprachverarbeitung und zum Sprachverständnis – sogenanntes Natural Language Processing (NLP) – weiterentwickelt und fach-

spezifisch in einer virtuellen Umgebung trainiert. Die virtuelle Umgebung besteht aus einem Digitalen Zwilling einer 3-Achs-CNC-Fräse, wodurch Entwicklung, Training und Validierung der Sprachsteuerung im virtuellen Raum ermöglicht wird. Dieses hybride Vorgehen mit Hardware und virtualisierter Hardware ermöglicht die einfache und kostensparende Skalierung der Sprachsteuerung auf eine Vielzahl heterogener Maschinen. In der zweiten Projektphase wird die Zuverlässigkeit der Sprachsteuerung sowie die Datensicherheit der sprachbasierten Steuerung adressiert. Abschließend wird das in der jeweiligen virtuellen Umgebung entwickelte Modell an den entsprechenden, physisch vorhandenen Anlagen implementiert und validiert. Das Vorhaben DialoKIM wird vom Bundesministerium für Bildung und

Forschung (BMBF) unter der Fördermaßnahme KMU-innovativ für Informations- und Kommunikationstechnologien gefördert. Im Projekt arbeitet das FBK interdisziplinär mit Konsortialpartnern (SABO mobile IT GmbH, agitum UG, EES Beratungsgesellschaft mbH) und assoziierten Partnern (MIWE Michael Wenz GmbH, RAUCH Landmaschinenfabrik GmbH, QUBE Munich GbR) aus der Industrie zusammen. Das FBK unterstützt im Vorhaben die Optimierung des NLP und implementiert und validiert das Modell anhand einer 3-Achs-CNC-Fräse.

#### Kontakt

M.Sc. Avik Mukherjee

E-Mail: [avik.mukherjee@rptu.de](mailto:avik.mukherjee@rptu.de)

Telefon: 0631/205 - 3224

## OptiAM – Untersuchung additiv-subtraktiver Prozessketten in der Fertigung

KSB Projekt in weitere Förderphase gestartet



Additiv gefertigte Bauteile

Die Oberflächenqualitäten nach der pulverbasierten additiven Fertigung entsprechen in der Regel nicht den Anforderungen an Funktionsflächen. Zur Verbesserung der Oberflächenqualität eignen sich insbesondere spanende Nachbearbeitungsverfahren. Durch den Einsatz von hohen

Schnittgeschwindigkeiten bei der HSC (High Speed Cutting) Fräsbearbeitung, steigt die Wirtschaftlichkeit der additiv-subtraktiven Prozesskette durch kürzere Bearbeitungszeiten. In der ersten Förderphase des Projekts wurde der Einfluss der Prozessparameter auf die resultierenden Bauteileigenschaften sowohl beim pulverbettbasierten Laserstrahlschmelzen als auch beim Laserauftragschweißen untersucht. Der Einsatz verschiedener Prozessparameter wirkt sich auf die Mikrostruktur und damit auf die Eigenschaften der additiv gefertigten Bauteile aus. Diese Unterschiede beeinflussten die Zerspanbarkeit. Im Rahmen der neuen Förderphase werden verschiedene Wärmebehandlungen der

Bauteile als weiterer Teil der Prozesskette untersucht. Eine Wärmebehandlung im Anschluss an die additive Fertigung wird oft eingesetzt, um die prozessbedingten hohen Eigenspannungen zu minimieren und dadurch die Einseigenschaften der Bauteile zu verbessern. Daher wird sowohl der Einfluss der Wärmebehandlung auf die Eigenschaften additiv gefertigter Bauteile als auch der Einfluss auf die HSC-Nachbearbeitung erforscht. Die Ergebnisse dienen somit als Grundlage für eine wissensbasierte und wirtschaftliche Gestaltung additiv-subtraktiver Prozessketten.

#### Kontakt

M.Sc. Johanna Steiner-Stark

E-Mail: [johanna.steiner-stark@rptu.de](mailto:johanna.steiner-stark@rptu.de)

Telefon: 0631/205 - 5763

## Inbetriebnahme EOS M290 mit Big-Spot Upgrade

Erweiterung des Anwendungszentrums für additive Fertigung

Im Rahmen eines vom Land Rheinland-Pfalz geförderten Projektes wurde eine neue Anlage zum pulverbettbasierten Schmelzen mittels Laserstrahl (PBF-LB) beschafft und in Betrieb genommen. Das Ziel des Projekts „Erhöhung der Wirtschaftlichkeit des Laserstrahlschmelzens für den Einsatz in der industriellen Produktion“ ist die Verbesserung der Wirtschaftlichkeit des PBF-LB. Mit der von EOS neu entwickelten Big-Spot Technologie und einer verfügbaren Laserleistung von bis zu 1 kW kann der Laserspotdurchmesser zwischen 90-1000 µm variiert werden. Mit großen Laserspots kann die Aufbaureate

durch gleichzeitig höhere Scanabstände und höhere Scangeschwindigkeiten deutlich gesteigert werden, während die Detailtreue mit kleinen Laserspots erhalten bleibt. Durch die resultierende Erhöhung der Produktivität kann die Wirtschaftlichkeit somit verbessert werden.

#### Kontakt

M. Sc. Shradha Ghansiyal

E-Mail: [shradha.ghansiyal@rptu.de](mailto:shradha.ghansiyal@rptu.de)

Telefon: 0631/205 - 5975



Inbetriebnahme der EOS M290

## Vortrag und Messestand auf dem Wissensforum Zerspanung in Würzburg

### BMBF-Projekt TransKI vorgestellt



Vortrag auf dem Wissensforum Zerspanung, Oxana Gruber Photography

Am 24.11.2022 gaben Mathias Schmidt von der K.-H. Müller Präzisionswerkzeuge GmbH und Peter Simon vom FBK auf dem Wissensforum Zerspanung in Würzburg Einblicke in die Inhalte des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekts TransKI. Ziel des Projekts ist die Nutzbarmachung von Transfer

Learning für die Verschleißprognose von Zerspanwerkzeugen. Hierfür wird im Rahmen des Projekts ein digitales Assistenzsystem für das Werkzeugmanagement entwickelt. Außerdem wird untersucht, wie die gewonnenen Erkenntnisse in innovative Geschäftsmodelle überführt werden können. Zusätzlich zum Vortrag konnten sich interessierte Experten aus Forschung und Industrie am Messestand über die Fortschritte im Projekt informieren und mit den Beteiligten ins Gespräch kommen.

#### Kontakt

M.Sc. Peter Simon  
E-Mail: [peter.simon@rptu.de](mailto:peter.simon@rptu.de)  
Telefon: 0631/ 205 – 4210  
M.Sc. Maximilian Berndt  
E-Mail: [maximilian.berndt@rptu.de](mailto:maximilian.berndt@rptu.de)  
Telefon: 0631/ 205 – 3386

## Neue Vorlesung im Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik

### Ausweitung des Lehrangebotes am FBK



Vorlesung

Mit der neu gestalteten Vorlesung *Nachhaltigkeit in Maschinenbau und Verfahrenstechnik* verstärkt das FBK sein Engagement in der Ausbildung zukünftiger Ingenieurinnen und Ingenieure. Die Veranstaltung wurde in Zusammenarbeit mit den Lehrstühlen für Virtuelle Produktent-

wicklung (VPE) und Fluidverfahrenstechnik (LRF) konzipiert, um den Studierenden einen möglichst umfassenden Überblick über den Beitrag des Maschinenbaus und der Verfahrenstechnik zur Nachhaltigkeit zu bieten. Abgerundet wird die Veranstaltung durch praxisbezogene Gastvorträge der BASF und des Ministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie und Mobilität des Landes Rheinland-Pfalz.

#### Kontakt

M. Sc. Max Werrel  
E-Mail: [max.werrel@rptu.de](mailto:max.werrel@rptu.de)  
Telefon: 0631/ 205 – 4128

## Neue Mitarbeiter



**Marcel Wagner** arbeitet seit Februar als wissenschaftlicher Mitarbeiter am FBK. Der Schwerpunkt seiner Tätigkeit liegt im Bereich digitaler Technologien für Produktionssysteme.



**Felix Zell** arbeitet seit Februar als wissenschaftlicher Mitarbeiter am FBK. Der Schwerpunkt seiner Tätigkeit liegt im Bereich der Mikro- und Ultrapräzisionsbearbeitung.

#### 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](mailto:fbk@rptu.de) Tel.: 0631 205 – 2618  
Internet: [www.fbk-kl.de](http://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

**S. Basten, L. Seis, M. Oehler, B. Kirsch, H. Hasse, J.C. Aurich:** Tribological behaviour of AISI 4140 and WC-Co carbides during dry condition, using cryogenic media, and sub-zero metalworking fluids at high contact stresses. *WEAR* (2023): DOI: 10.1016/j.wear.2022.204525.

**P. Schworm, X. Wu, M. Glatt, J.C. Aurich:** Solving flexible job shop scheduling problems in manufacturing with Quantum Annealing. *Production Engineering – Production Management* (2022): DOI:10.1007/s11740-022-01145-8.

**K. Gutzeit, M. Berndt, J. Schulz, D. Müller, B. Kirsch, E. von Harbou, J.C. Aurich:** Optimization of the cooling strategy during cryogenic milling of Ti-6Al-4 V when applying a sub-zero metalworking fluid. *Production Engineering – Research and Development* (2022): DOI: 10.1007/s11740-022-01178-z.

**L. Yi, B. Ravani, J. C. Aurich:** Energy performance-oriented design candidate selection approach for additive manufacturing using toolpath length comparison method. *Manufacturing Letters* 33 (2022): S. 5-10. DOI: 10.1016/j.mfglet.2022.06.001.

**D. Weber, K. Gutzeit, B. Kirsch, C.R. D'Elia, B.S. Linke, M.R. Hill, J.C. Aurich:** Analysis of the effect of cryogenic machining on the quality of milled thin-walled monolithic aluminum structural parts. *Proceedings of the 22nd Machining Innovations Conference for Aerospace Industry* (2022): S. 29-36. DOI: 10.2139/ssrn.4259195

**A. Mukherjee, M. Glatt, W. Mustafa, M. Kloft, J. C. Aurich:** Designing Resilient Manufacturing Systems using Cross Domain Application of Machine Learning Resilience. *Procedia CIRP* 115 – Proceedings of the 10th CIRP Global Web Conference (2022): S. 83-88. DOI: 10.1016/j.procir.2022.10.054.

**T. Mayer, S. Kieren-Ehse, B. Kirsch, J.C. Aurich:** Dressing of grinding wheels for the manufacture of all-ceramic micro end mills. *Proceedings of the 22nd euspen International Conference* (2022): S. 479-482.

**M. Klar, P. Langlotz, J.C. Aurich:** A Framework for Automated Multiobjective Factory Layout Planning using Reinforcement Learning. *Procedia CIRP* 112 – Proceedings of the 15th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering (2022): S. 555-560. DOI: 10.1016/j.procir.2022.09.099.

**A. Lange, D. Müller, B. Kirsch, J.C. Aurich:** Numerical analysis of process-tool-interactions in micro milling. *Procedia CIRP* 108 – 6th CIRP Conference on Surface Integrity (2022): S. 299-304. DOI: 10.1016/j.procir.2022.03.051