

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

## LEHRSTUHL FÜR FERTIGUNGSTECHNIK UND BETRIEBSORGANISATION

### Neues DFG-Projekt im Bereich der Mikrozerspanung gestartet Entwicklung eines Magnetaktors zur aktiven Dämpfung und Stabilisierung einer Luftlagerspindel für die Mikrozerspanung

Im Zuge des anhaltenden Trends zur Miniaturisierung von Komponenten steigt auch der Bedarf an immer leistungsfähigeren Fertigungsverfahren zur Herstellung von Strukturen im Mikrometerbereich. Neben den vor allem aus der Mikroelektronik und Halbleitertechnik bekannten Ätz- und Lithographieverfahren kann dafür auch die Mikrozerspanung eingesetzt werden. Diese zeichnet sich gegenüber den beiden anderen Verfahren vor allem durch eine hohe realisierbare Geometrie-Komplexität, ein breites Spektrum an Werkstoffen und kurze Prozessketten mit geringen Fertigungszeiten aus. Aufgrund der hohen Anforderungen an die Spindeldrehzahl und die Rundlaufgenauigkeit werden in der Mikrozerspanung bisher überwiegend luftgelagerte Werkzeugspindeln eingesetzt. Beim Fräsen auftretende drehzahlunabhängige und drehzahlabhängige Störeinflüsse (z.B. aus der Umgebung oder durch Unwucht- und Zerspankräfte) können mit den rein passiven Luftlagern nicht kompensiert werden. Dadurch kommt es beim Betrieb von Luftlagerspindeln zu Schwingungen und Rundlaufabweichungen des Rotors, die die erreichbare Maximaldrehzahl und die Fertigungsgenauigkeit limitieren. Um den Einfluss der Störkräfte kompensieren zu können, muss das Spindelssystem eine aktive Regelung der Rotorlage ermöglichen. Magnetgelagerte Werkzeugspindeln bieten die Möglichkeit zur aktiven Regelung und sind auch in der Lage die geforderten Drehzahlen und Rundlaufgenauigkeiten zu erreichen. Somit stellen Magnetlagerspindeln grundsätzlich eine Alternative zu Luftlagerspindeln dar. Allerdings

ist der Aufwand zur Auslegung und Realisierung einer solchen Magnetlagerspindel im Vergleich zu einer Luftlagerspindel deutlich größer (Wegsensoren, Regler, Leistungsverstärker, etc.), weshalb sie trotz ihrer Vorteile bislang selten in der Mikrozerspanung eingesetzt werden.

Im Rahmen des neuen DFG-Projekts „Entwicklung eines Magnetaktors zur aktiven Dämpfung und Stabilisierung einer Luftlagerspindel für die Mikrozerspanung“ sollen nun die Vorteile von Luft- und Magnetlagern in einer hybriden Werkzeugspindel vereint werden. Dazu wird eine bestehende Luftlagerspindel um einen neu zu entwickelnden Magnetaktor ergänzt. Die aktive Dämpfung und Stabilisierung des Magnetaktors gleicht dabei unerwünschte Effekte wie die erhöhte radiale Rundlaufabweichung des Spindelrotors (insbesondere bei drehzahloptimierten Fräsprozessen) aus und ermöglicht so eine Steigerung der erreichbaren Fertigungstoleranzen und Oberflächengüten. Durch die Kombination von Luftlagerspindel und Magnetaktor können gegenüber einer reinen Magnetlagerspindel mit drei Magnetlagern zwei Magnetlager komplett entfallen, wodurch ein kompakterer Aufbau, ein geringerer Regelungsaufwand und niedrigere Kosten erreicht werden. Der Vorteil gegenüber einer reinen Luftlagerspindel liegt in den erweiterten Einsatzmöglichkeiten durch die aktive Regelung der Rotorposition.

Zu Beginn des Forschungsprojekts werden zunächst die dynamischen Anforderungen (Kräfte und Regelfrequenz) an Magnetaktor und Re-

gelkreis durch eine Schwingungsanalyse der Luftlagerspindel abgeleitet. Auf Basis dieser Anforderungen erfolgt anschließend die modellbasierte Auslegung und Konzeption des Magnetaktors und des Regelkreises. Hierbei ist der Aufbau eines numerischen Simulationsmodells des Magnetaktors vorgesehen, um nichtlineare Zusammenhänge (z.B. die magnetische Sättigung des Eisens und die geometrische Konfiguration des Lagers) bei der Auslegung berücksichtigen zu können. Im dritten Schritt wird eine Luftlagerspindel für die Integration des neu entwickelten Magnetaktors angepasst und ein Funktionsmuster der Hybridspindel und des Reglers gefertigt. Abschließend erfolgt die Validierung des modellbasierten Entwurfs. Anhand von Fräsversuchen wird der Einfluss des Magnetaktors auf Prozesskräfte, Bearbeitungsergebnis und Werkzeugverschleiß charakterisiert.

Die im Projekt entwickelte Hybridspindel ermöglicht eine Kompensation von Unwuchten und Störkräfteinflüssen. Die für einen konstanten Vorschub pro Zahn notwendigen Drehzahlanpassungen führen bei geregelter Rotorlage nicht mehr zu Abweichungen im Werkzeuggrundlauf, wodurch bessere Fräsergebnisse erzielt werden können. Gleichzeitig kann die Belastung auf die empfindlichen Mikrofräser reduziert werden.

#### Kontakt

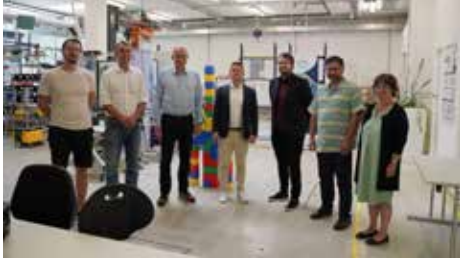
Dipl.-Ing. Felix Zell

E-Mail: felix.zell@rptu.de

Telefon: 0631 205-2865

## DFG-Projekt PartRe<sup>2</sup>Work gestartet

### Teilefertigung mit eingeschränkter Personenzahl



Kick-off Meeting in der Pilotfabrik 4.0

Selbst in hochautomatisierten Szenarien erfordern die Prozesse der Teileherstellung (z. B. durch spanende Fertigungsverfahren) menschliche Interaktion. Vorwiegend handelt es sich hierbei um Aufgaben mit hohem Qualifikations- und Erfahrungsbedarf, die den kontinuierlichen Betrieb und die Qualität der Teile sicherstellen, z. B. durch Einrichtungs- oder Problemlösetätigkeiten. Diese Abhängigkeit macht die Teilefertigung sehr anfällig für Situationen, in denen es zu einer mangelnden Verfügbarkeit von Mitarbeitenden in der Produktionsstätte kommt, wie z. B. bei Pandemien oder dem aktuellen Fachkräftemangel.

Neue Formen der Zusammenarbeit in der Telearbeit auf der Grundlage interaktiver Systeme, Visualisierungs- und Kommunikationstechnologien, kollaborative Roboter, schneller Internetverbindungen und der Fernsteuerung von

Werkzeugmaschinen bergen das Potenzial, diese Herausforderung zu bewältigen. Im von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) und dem Österreichischen Wissenschaftsfonds (FWF) geförderten Projekt „PartRe<sup>2</sup>Work“ werden in Kooperation mit der TU Wien und dem „Human Computer Interaction Lab“ der RPTU Kaiserslautern umfassende Forschungsarbeiten durchgeführt, um geeignete Modi und Systemanforderungen zu ermitteln und effektive Strategien für die Aufgabenteilung zwischen Telearbeitern und Mitarbeitern vor Ort zu entwickeln. Der Schwerpunkt liegt dabei auf digitalen Technologien, die kollaboratives Arbeiten ermöglichen, um die Produktivität in der Teilefertigung aufrechtzuerhalten, auch wenn nur ein begrenzter Teil der erforderlichen Fachkräfte Zugang zum Arbeitsplatz hat. Traditionelle Produktionsaufgaben werden analysiert, um Telearbeitspotenziale zu identifizieren und die Aufgaben entsprechend umzugestalten. Die spezifischen Aufgaben in der Teilefertigung, die in der Regel von Mitarbeitenden vor Ort ausgeführt werden, werden analysiert und auf Mitarbeitende vor Ort, Telearbeiter und unterstützende Technologien wie Cobots umverteilt. Ein weiterer Forschungsgegenstand ist die Gewährleistung einer optimalen Benutzerfreundlichkeit, um die Praxistauglichkeit und den schnellen Anlauf der entwickelten Systeme

sicherzustellen. Dazu gehört die Gestaltung benutzerfreundlicher und intuitiver Systeme, die Interaktionen zwischen Menschen und Mensch und Maschine ermöglichen und das Fehlerpotenzial minimieren.

Das Projekt wurde mit einer Kickoff-Veranstaltung in Wien in der Pilotfabrik 4.0 im September gestartet, bei der gemeinsame Forschungsziele und Anwendungsszenarien mit unterschiedlichem Automatisierungsgrad als Untersuchungsgegenstand festgelegt wurden. Insgesamt bietet das Projekt „PartRe<sup>2</sup>Work“ eine vielversprechende Vision für die zukünftige Teilefertigung, indem es innovative Ansätze zur Zusammenarbeit zwischen Mensch und Maschine vorantreibt und dabei auf moderne Technologien und Telearbeit setzt. Die Erforschung dieser neuen Ansätze und die Gestaltung benutzerfreundlicher Systeme tragen dazu bei, dass es auch für Industriearbeiter möglich wird in verschiedenen „Home-Office“-Konstellationen zu arbeiten.

#### Kontakt

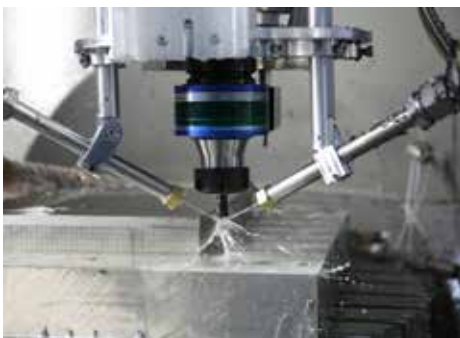
M.Sc. Philipp Schworm

E-Mail: [philipp.schworm@rptu.de](mailto:philipp.schworm@rptu.de)

Telefon: 0631 205-4066

## Projektabschluss im SFB 926: Sub-zero Fräsen von Ti-6Al-4V

### Verbesserte Zerspanbarkeit von Hochleistungswerkstoffen durch den Einsatz tiefkalter Kühlstrategien



Einsatz der sub-zero Kühlung beim Fräsen von Ti-6Al-4V

Aufgrund einer ausgeprägten Korrosionsbeständigkeit, einer hohen Warmhärte, aber vor allem einem ausgezeichneten Verhältnis aus Festigkeit und Dichte, wird die Titanlegierung Ti-6Al-4V häufig in der Luft- und Raumfahrt eingesetzt. Neben diesen vorteilhaften Eigenschaften für die Anwendungen ist Ti-6Al-4V auch durch eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit, sowie durch eine hohe chemische Reaktivität bei hohen Temperaturen charakterisiert. Dies führt bei der Zerspanung zu hohen Temperaturen innerhalb der Zerspanzone, welche einen schnell voranschreitenden, thermo-chemisch induzierten Werkzeugverschleiß begünstigen. Um die Zerspanbarkeit des Werkstoffs zu verbessern,

müssen geeignete Kühlschmierstrategien eingesetzt werden, die die Schnitttemperaturen senken und so den Werkzeugverschleiß minimieren. Für diesen Zweck werden in der Industrie Kühlschmierstoffe (KSS) mit sehr hohen Volumenströmen der Zerspanzone zugeführt, um eine effektive Wärmeabfuhr zu realisieren. Die Zufuhrtemperatur dieser konventionellen KSS liegt dabei i.d.R. bei Raumtemperatur, wodurch die potenzielle Kühlleistung limitiert wird. Dahingegen werden kryogene Kühlmedien wie bspw. CO<sub>2</sub> bei Temperaturen weit unter 0 °C eingesetzt, wodurch hohe Kühlleistungen realisierbar sind. Verglichen mit flüssigen KSS sind die Benetzungs- und Schmiereigenschaften kryogener Kühlmedien jedoch gering.

Eine vielversprechende Alternative stellt der Einsatz sogenannter sub-zero Kühlstrategien dar, die die Vorteile kryogener und konventioneller Kühlmedien kombinieren. So werden sub-zero KSS der Zerspanzone im flüssigen Zustand, jedoch bei Temperaturen von bis zu -40 °C zugeführt. Diese einmalige Kombination aus tiefen Zufuhrtemperaturen und vorteilhaften Schmiereigenschaften bietet ein hohes Potential die Temperatur bei der Zerspanung infolge einer ausgezeichneten Kühlleistung effektiv zu senken, um so die Zerspanbarkeit von Ti-6Al-4V zu verbessern. Um dieses Potential auszunutzen, wurde im Rahmen des abgeschlossenen Teilpro-

jekts des SFB 926 der Einsatz von sub-zero KSS bei der Fräsbearbeitung von Ti-6Al-4V untersucht und mit konventionellen, bzw. kryogenen Kühlstrategien verglichen.

Zunächst wurde die Zufuhrstrategie der sub-zero Kühlstrategie in Abhängigkeit des auftretenden thermo-mechanischen Belastungskollektivs ausgelegt. Dabei konnte durch den Einsatz der sub-zero Kühlung eine deutliche Reduktion der Temperaturen innerhalb der Schnittzone nachgewiesen werden. Verglichen mit einer industrienahe Überflutungskühlung und einer kryogenen CO<sub>2</sub>-Kühlung konnte aufgrund der effektiveren Kühlwirkung der sub-zero Kühlstrategie eine Reduktion des Werkzeugverschleißes, eine Verlängerung des Werkzeugstandwegs und ein stabilerer Fräsprozess erzielt werden. Darüber hinaus wurde durch den Einsatz der sub-zero Kühlung beim Fräsen von Ti-6Al-4V die Möglichkeit einer prozessintegrierten Randschichthärtung infolge eingebrachter Kaltverfestigungen nachgewiesen, wodurch die Lebensdauer von Bauteilen erhöht werden kann.

#### Kontakt

M.Sc. Kevin Gutzeit

E-Mail: [kevin.gutzeit@rptu.de](mailto:kevin.gutzeit@rptu.de)

Telefon: 0631 205-3472

# BMBF-Projekt zur Unterstützung der Arbeitsplanung bei kleinen und mittleren Unternehmen beendet

## Unterstützung der Vorgangsfolgeermittlung in der Arbeitsplanung durch maschinelles Lernen (VorPlanML)

Die Aufgabe der Arbeitsplanung umfasst die Planung aller Herstellprozesse für ein Produkt, um dieses schrittweise vom Roh- in den Fertigzustand zu überführen. Der Arbeitsplan beschreibt, ausgehend von der Produktbeschreibung, das Rohmaterial, die Abfolge der Fertigungsvorgänge, die Fertigungsmittel sowie die Vorgabezeiten. Immer kürzer werdende Produktlebenszyklen und der Trend zu kundenindividuellen Produkten steigern den Aufwand der Arbeitsplanung im industriellen Umfeld besonders in der Einzel- und Kleinserienfertigung. Vor diesem Hintergrund bietet eine Unterstützung der Arbeitsplanung durch computergestützte Systeme (engl. Computer Aided Process Planning, CAPP) hohes Einsparpotential. Bisherige CAPP-Systeme bieten zwar eine Unterstützung während der Arbeitsplanung, bei der Nutzung von Wissen aus bereits erstellten Arbeitsplänen durch die CAPP-Systeme besteht jedoch noch Verbesserungspotential. Die unzureichende Nutzung des Wissens in den CAPP-Systemen hat zur Folge, dass häufig manuelle Eingriffe erforderlich sind. Dies gilt vor allem für die Ermittlung der Vorgangsfolge, da diese Aufgabe Wissen erfordert, das schwierig formal zu spezifizieren ist. Diese Problematik wurde im Vorhaben VorPlanML adressiert.

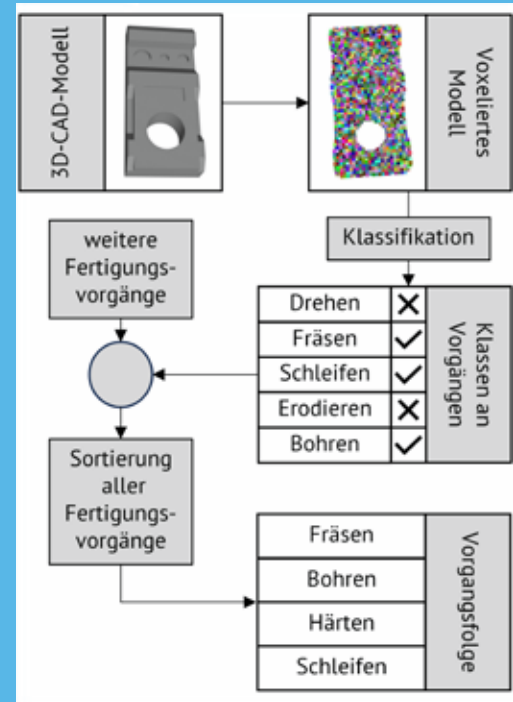
Das Ziel des Vorhabens war die Bestimmung einzelner Schritte der Vorgangsfolge durch maschinelle Lernalgorithmen. Nach eingehenden Untersuchungen zeigte ein zweistufiges Vorgehen die besten Resultate. Innerhalb dieses Verfahrens wurde zuerst mithilfe eines Lernalgorithmus die Entscheidung getroffen, welche Fertigungsverfahren für die Herstellung des Bauteils am besten geeignet sind.

Dazu wurde das 3D-CAD-Modell in eine Voxeldarstellung überführt, um durch den Lernalgorithmus analysiert werden zu können. Anschließend wurden die mithilfe von Lernalgorithmen ermittelten Fertigungsverfahren ggf. mit weiteren Fertigungsverfahren vereint, die regelbasiert ermittelt wurden. Zum Schluss wurden die Fertigungsverfahren mithilfe eines weiteren Lernalgorithmus in eine Vorgangsfolge überführt. Innerhalb einer Nutzerstudie wurde das Vorgehen validiert. Dabei konnte das System eine hohe Unterstützung bei der Arbeitsplanung leisten, wodurch die manuellen Aufwände stark reduziert werden konnten.

Die Bearbeitung des Projekts erfolgte innerhalb eines Konsortiums, dem neben dem FBK und der Arbeitsgruppe ML der RPTU Kaiserslautern auch die Unternehmen der up2parts GmbH, der KWS Kölle GmbH, sowie die assoziierten Partner der Lauscher Präzisionstechnik GmbH und der Wagner Maschinenbau GmbH angehören.

Das Vorhaben VorPlanML wurde im Rahmen des Programms „Erforschung, Entwicklung und Nutzung von Methoden der Künstlichen Intelligenz in KMU“ vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert.

**Kontakt**  
M.Sc. Marco Hussong  
E-Mail: marco.hussong@rptu.de  
Telefon: 0631 205 – 4305



Darstellung des ML-Systemablaufs

## Industrieprojekt bei John Deere abgeschlossen

### Re-Organisation des Layouts der Hartfeinbearbeitung im Werk Mannheim

Gewachsene Strukturen in fertigen Unternehmen stehen häufig im Konflikt mit einer materialflussoptimierten Layoutgestaltung. Dies kann unter anderem zu erhöhten Pufferbeständen, Durchlaufzeiten und somit Kosten führen. Zur Überwindung dieser Problematik hat das FBK John Deere bei der Re-Organisation des Layouts im Bereich der Hartfeinbearbeitung im Werk Mannheim beraten.

Hierzu hat das FBK die Ausgangssituation analysiert, Workshops zur Entwicklung neuer Layouts geplant und durchgeführt und in Zusammenarbeit mit den Mitarbeitenden von John Deere verschiedene Layoutvarianten erstellt. Neben langfristig orientierten Lösungen wurden Übergangslösungen entwickelt, sodass ein schrittweiser Umbau realisiert werden kann, der an sich verändernde Produktvarianten und Maschinen anpassbar ist. Im Zuge des Projekts wurden diese Varianten wiederholt unter Berücksichtigung der Expertenmeinungen u.a. aus den Bereichen Logistik, Disposition und Arbeitsvorbereitung bewertet und angepasst.



In Mannheim gefertigter Traktor 6M Series 6155M

Aus der Bewertung der Layoutvarianten geht hervor, dass deutliche Verbesserungen in verschiedenen Zieldimensionen erreicht werden konnten. Unter anderem kann durch die Re-Organisation des Bereichs Hartfeinbearbeitung die Transportintensität deutlich verringert werden. Das Projekt dient als gutes Beispiel für die erfolgreiche Zusammenarbeit zwischen dem FBK und der Industrie. Es zeigt, wie wissenschaftliche Vorgehensweisen und eine externe, neutrale Sichtweise mit dem in den Unternehmen vorliegenden Praxiswissen kombiniert werden können, um Prozessverbesserungen in produzierenden Unternehmen zu realisieren.

**Kontakt**  
M. Sc. Marcel Wagner  
E-Mail: marcel.wagner@rptu.de  
Telefon: 0631 205 – 3323

## Start der Juniorprofessur – Data Science in Production Engineering

Mit dem digitalen Wandel in der Produktion steigen auch die Anforderungen hinsichtlich eines kompetenten Umgangs mit den gewonnenen Daten. Die zum 15. August 2023 am FBK neu besetzte Juniorprofessur Data Science in Production Engineering adressiert die Herausforderungen datengetriebener Methoden im Bereich der Produktion von der Datenaufbereitung bis zur Ermittlung neuer Lösungen. Mit der Berufung von Jun. Prof. Dr.-Ing. Patrick Ruediger-Flore erweitert das FBK sein Forschungsfeld Digitale Technologien für Produktionssysteme. Zu den Forschungsschwerpunkten der neu eingerichteten Juniorprofessur zählen unter anderem das Transfer Lernen für KI-Anwendungen in der Produktion, sowie Ersatzmodelle (Surrogate Models) für Simulationen im Produktionskontext.



### Kontakt

Jun. Prof. Dr.-Ing. Patrick Ruediger-Flore

E-Mail: [patrick.flore@rptu.de](mailto:patrick.flore@rptu.de)

Telefon: 0631 205-4282

## Einladung zum kostenfreien Online-Workshop Erkenntnistransfer aktueller Forschungsarbeiten im Bereich der additiven Fertigung

Am 21.03.2024 bietet das am FBK beheimatete Anwendungszentrum für additive Fertigung (AAF) einen Online-Workshop an, in dessen Rahmen aktuelle Trends, Fortschritte und praktische Anwendungen im Bereich der additiven Fertigung vorgestellt und diskutiert werden sollen. Der thematische Schwerpunkt liegt dabei auf den industriell verbreiteten Verfahren des

selektiven Laserstrahlschmelzens, sowie des (Hochgeschwindigkeits)-Laserauftragschweißens.

### Kontakt

M.Sc. Kevin Gutzeit

E-Mail: [kevin.gutzeit@rptu.de](mailto:kevin.gutzeit@rptu.de)

Telefon: 0631 205-3472

## Neue Mitarbeiter



**Britta Ziehmer** arbeitet seit Juli im Support-Team am FBK.



**Marius Schmitz** arbeitet seit August als wissenschaftlicher Mitarbeiter am FBK. Der Schwerpunkt seiner Tätigkeit liegt im Bereich der digitalen Technologien für Produktionssysteme.

### 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 angege-  
benen 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

**J.C. Aurich, H. Hasse:** Component Surfaces – Manufacturing-Morphology-Property Relationships. Springer Series in Advanced Manufacturing (2023). DOI: 10.1007/978-3-031-35575-2-5

**P. Schworm, X. Wu, M. Klar, J. Gayer, M. Glatt, J.C. Aurich:** Resilience optimization in manufacturing systems using Quantum Annealing. Manufacturing Letters 36 (2023): S. 13-17. DOI: 10.1016/j.mfglet.2022.12.007

**K. Gutzeit, F. Zell, B. Kirsch, J.C. Aurich:** Pulverbettbasiertes Laserstrahlschmelzen mit variablem Spot. VDI-Z 165/11-12 (2023): S. 21-23. DOI: 10.37544/10.37544/0042-1766-2023-11-12

**P. Ruediger-Flore, M. Klar, M. Hussion, J. Mertes, L. Yi, M. Glatt, P. Kölsch, J. C. Aurich:** Neural Radiance Fields in der Fabrikplanung - Untersuchung von Neural Radiance Fields zur Modellrekonstruktion in der Fabrikplanung. WT Werkstattstechnik 113/6 (2023) S.219-223. DOI: 10.37544/1436-4980-2023-06-11

**D. Weber, B. Kirsch, C.R. D'Elia, B.S. Linke, M.R. Hill, J.C. Aurich:** Simulation-based investigation of the distortion of milled thin-walled aluminum structural parts due to residual stresses. Proceedings of the 3rd Conference on Physical Modeling for Virtual Manufacturing Systems and Processes (2023): S. 149-169. DOI: 10.1007/978-3-031-35779-4\_9

**S. Ghansiyal, L. Yi, J. Steiner-Stark, M.M. Müller, B. Kirsch, M. Glatt, J.C. Aurich:** A conceptual framework for layerwise energy prediction in laser-based powder bed fusion process using machine learning. Procedia CIRP 116 - Proceedings of the 30th CIRP Conference on Life Cycle Engineering (2023): S. 7-12. DOI: 10.1016/j.procir.2023.02.002

**M. Klar, J. Mertes, M. Glatt, B. Ravanii, J. C. Aurich:** A Holistic Framework for Factory Planning Using Reinforcement Learning. Proceedings of the 3rd Conference on Physical Modeling for Virtual Manufacturing Systems and Processes. IRTG 2023 (2023). S. 129-148. DOI: 10.1007/978-3-031-35779-4\_8

**S. Kieren-Ehse, T. Mayer, B. Kirsch, J.C. Aurich:** Indirect workpiece cooling system for micro milling based on a Peltier element. Proceedings of the 23rd international conference of the euspen (2023): S. 473-476.