

RP^{TU} | FBK INFOBRIEF

LEHRSTUHL FÜR FERTIGUNGSTECHNIK UND BETRIEBSORGANISATION

Neues DFG-Projekt gestartet

Automatisierte Planung von Fabriklayouts mittels Quanten-Annealing

Die Layoutplanung ist ein zentraler Bestandteil der Fabrikplanung und umfasst im Kern die räumliche Anordnung der Funktionseinheiten innerhalb einer Fabrik. Ein optimiertes Layout kann den Betrieb eines Produktionssystems verbessern und die Betriebskosten erheblich reduzieren. Dabei müssen verschiedene Zielgrößen wie die Minimierung der Durchlaufzeiten und Transportkosten erreicht und gleichzeitig zahlreiche Restriktionen wie verfügbare Medienanschlüsse berücksichtigt werden. Folglich handelt es sich bei der Layoutplanung um ein komplexes Optimierungsproblem. Durch die Nachfrage nach kundenindividuellen Produkten und die dadurch bedingt kurzen Produktlebenszyklen steigen die Häufigkeit und die Anforderungen an Fabrikplanungsprozesse. Diese Entwicklung erfordert eine flexible und schnelle Anpassung der Produktionssysteme, was die Komplexität der Layoutplanung erheblich steigert.

Die traditionellen Ansätze zur Layoutplanung basieren auf manuellen Methoden, die sich auf die Erfahrungswerte der Planer stützen. Diese manuellen Verfahren bringen valide Lösungen hervor, sind jedoch durch Subjektivität und eine begrenzte Berücksichtigung quantitativer Randbedingungen eingeschränkt. Mit dem technologischen Fortschritt wurden rechnergestützte Verfahren entwickelt, die exakte oder approximierende Algorithmen nutzen. Exakte Verfahren sind aufgrund ihres hohen Berechnungsaufwands nur für kleine Problemgrößen geeignet. Im Unterschied dazu können approximierende Verfahren, wie Metaheuristiken, Lösungen in akzeptabler Zeit finden, indem sie nahe an das Optimum he-

ranreichen. Dennoch bestehen bei zunehmender Problemgröße und Zielkomplexität Limitationen hinsichtlich der Lösungsqualität und Rechenzeit. Quanten-Annealing (QA) ist eine Form von Quantencomputing, das die Prinzipien der Quantenmechanik nutzt, wodurch sich die Optimierungsprobleme mit deutlichen Rechenzeitvorteilen lösen lassen. Quanten-Annealer, eine spezielle Klasse von Quantencomputern, können Optimierungsprobleme lösen, die für klassische Computer unlösbar sind. Im Vergleich zu anderen Quantencomputern sind Quanten-Annealer bereits auf dem Markt verfügbar und ermöglichen die Lösung praxisnaher Problemdimensionen. Das hardwarebedingte Anwendungspotenzial wird zusätzlich dadurch verstärkt, dass Quanten-Annealing als cloudbasierte Rechenleistung bedarfsorientiert genutzt werden kann, wodurch der Bezug und die Administration kostenintensiver Quanten-Annealing-Hardware nicht erforderlich sind. Die Anwendung von QA in der Layoutplanung bietet Potenzial gegenüber traditionellen Methoden, insbesondere im Hinblick auf die Berücksichtigung mehrerer Ziele und die zeiteffiziente Generierung von Layoutvarianten für unterschiedliche Problemgrößen in Sekundenschnelle mit hoher Qualität.

Im Projekt „Automatisierte Planung von Fabriklayouts mittels Quanten-Annealing“, gefördert von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), wird QA zur Optimierung von Fabriklayout eingesetzt und die Leistungspotentiale untersucht. Ziel des Projekts ist es, durch den Einsatz von QA im Vergleich zu herkömmlichen Methoden für verschiedene Arten und Größen von Produk-

tionsystemtypen in kürzerer Zeit Layoutvarianten zu finden, die eine bessere Lösungsqualität aufweisen.

Zunächst werden die Anwendungsszenarien modelliert, um die Anforderungen und Ziele der Layoutplanung zu identifizieren. Diese Szenarien bilden die Grundlage für die Entwicklung des QA-basierten Algorithmus, der mathematische Modelle zur Beschreibung der Layoutplanungsprobleme verwendet. Zusätzlich werden Visualisierungsmethoden entwickelt, um die generierten Layouts anschaulich darzustellen. Daraufhin wird die Leistungsfähigkeit von QA im Vergleich zu bestehenden Metaheuristiken untersucht. Verschiedene Parameter werden optimiert und die Ergebnisse hinsichtlich Rechendauer und Lösungsqualität bewertet. Diese Analyse ermöglicht eine umfassende Bewertung der Stärken und Schwächen des QA-Ansatzes im Vergleich zu traditionellen Methoden.

Abschließend wird die allgemeine Anwendbarkeit der entwickelten Methoden sichergestellt und dokumentiert. Ein interaktiver Handlungsleitfaden und ein Software-Demonstrator werden erstellt, um das Fabrikplanungspersonal bei der Anwendung der neuen Methoden zu unterstützen. Dieses strukturierte Vorgehen ermöglicht eine umfassende Erforschung und praxisnahe Umsetzung der Potenziale des QA für die Fabriklayoutplanung.

Kontakt

M.Sc. Xiangqian Wu

E-Mail: xiangqian.wu@rptu.de

Telefon: 0631 205-5783

Teilprojekt B01 des TRR 375-HyPo gestartet

Fertigung funktional gradierter Materialien auf porösen Metallen durch Laserauftragschweißen



In-Prozessaufnahme beim DED-LB

Die Anforderungen an technische Komponenten hinsichtlich ihrer Ressourcen- und Energieeffizienz steigen stetig. Innerhalb definierter Rahmenbedingungen, wie beispielsweise dem verfügbaren Bauraum in der Luft- und Raumfahrt, werden diese Komponenten zusätzlich hinsichtlich mehrerer Funktionalitäten, wie etwa Steifigkeit und Gewicht, optimiert. Dabei genügen die physikalischen Eigenschaften bisher verwendeter Materialien immer häufiger nicht mehr.

Ein innovativer Ansatz, um die technologischen Möglichkeiten zu erweitern, ist der Einsatz neuartiger Werkstoffsysteme bestehend aus hybriden porösen (HyPo) Materialien. Diese Materialien werden im von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Sonderforschungsbereich/Transregio (TRR) 375 erforscht. Ziel ist es dabei,

Bauteileigenschaften gezielt lokal zu variieren, um die spezifischen Anforderungen an das gesamte Bauteil optimal zu erfüllen. Der hybride Charakter wird durch eine Veränderung der chemischen Werkstoffzusammensetzung und/oder der Mikrostruktur erreicht. Solche Materialsysteme werden als funktional gradierte Materialien (FGM) bezeichnet. Der poröse Charakter wird durch den Einsatz metallischer Schäume erreicht, die eine lokal angepasste Dichte aufweisen können.

Um die Integration der verschiedenen Funktionen und die gewünschte Gradierung der Materialeigenschaften zu erreichen, werden im TRR additive Fertigungsverfahren eingesetzt. Diese unterliegen weniger Fertigungsrestriktionen als konventionelle Herstellungsverfahren. Insbesondere werden das pulverbasierte Laserauftragschweißen (Laser based Directed Energy Deposition, DED-LB) und das Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)-Verfahren verwendet. Die additiven Verfahren ermöglichen neben der lokalen Veränderung der Materialzusammensetzung auch die lokale Variation der Dichte. Hierfür sollen die metallischen Werkstoffe gezielt aufgeschäumt werden. Dadurch wird neben einer Gewichtsreduktion auch eine gezielte Beeinflussung der Dämpfungseigenschaften erreicht.

Im Teilprojekt B01 „Laser directed energy deposition funktional gradierter Materialien auf porösen Metallen“ wird der DED-LB Prozess gezielt genutzt, um gradierte Materialschichten auf porösen und hybrid porösen Metallen zu fertigen. Hybride poröse

Metalle weisen dabei ein poröses Gefüge mit einer gradierten Werkstoffzusammensetzung auf. Die systematische Variation der Materialeigenschaften der gradierten Schichten wird durch die lokale Anpassung der Materialzusammensetzung erreicht. Hierbei wird die Zusammensetzung des Pulvermassenstroms Schicht für Schicht sowie innerhalb einer Schicht variiert, um die gewünschten Gradierungen zu erzeugen. Es ist dabei essenziell, eine ausreichende Anbindung an das poröse Basismaterial als auch an die zuvor aufgetragenen Schichten sicherzustellen und die resultierenden Materialeigenschaften präzise zu kontrollieren, um eine reproduzierbare Fertigung der gewünschten Gradierungen zu gewährleisten.

Zur Optimierung dieses Prozesses werden unterschiedliche DED-LB Prozess- und Gradierungsstrategien untersucht. Zu Beginn werden gradierte Materialschichten auf dichten Substraten gefertigt, um grundlegende Erkenntnisse zu gewinnen. Diese Erkenntnisse werden anschließend auf die Fertigung von gradierten Schichten auf (hybrid) porösen Materialien übertragen. Bei diesen Untersuchungen stehen insbesondere die Materialkombinationen der nichtrostenden Stähle 316L mit 17-4 PH sowie der Aluminiumlegierung AlSi10Mg mit 17-4 PH im Fokus.

Kontakt

M.Sc. Jacques Platz

E-Mail: jacques.platz@rptu.de

Telefon: 0631205-3239

KSB-Stiftung fördert Projekt zur additiven Fertigung

Untersuchung und Optimierung der Pulvereffizienz von Hochgeschwindigkeits-Laserauftragschweißen

Das Hochgeschwindigkeits-Laserauftragschweißen (HS DED-LB) ist eine vergleichsweise junge additive Fertigungsverfahren für metallische Werkstoffe. Der Name leitet sich aus den hohen Prozessgeschwindigkeiten und den damit verbundenen wesentlich kürzeren Prozesszeiten ab. Diese werden durch einen im Vergleich zum konventionellen Laserauftragschweißen verschobenen Pulver- und Laserfokus erreicht, wodurch der pulverförmige Ausgangswerkstoff bereits vor dem Auftreffen auf die Substratoberfläche geschmolzen wird. Hierdurch können höhere Vorschubgeschwindigkeiten und Materialauftragsraten erreicht werden, was zu einer Reduktion der Prozesszeiten führt. Dadurch ist eine kundenindividuelle und schnelle Produktion metallischer Bauteile möglich.

Während der Fertigung wird allerdings nur ein Teil des verwendeten Pulvers auf das Substrat aufgetragen, was zu hohen Pulververlusten führt. Da die Herstellung von Pulver energie- und kostenintensiv ist, entstehen durch nicht aufgetragenes Pulver zum einen große ökologische Nachteile und zum anderen erhöhte Bauteilkosten. Eine Optimierung des Pulvernutzungsgrads bietet daher das Potenzial, die Ressourceneffizienz und Wirtschaftlichkeit des Verfahrens zu erhöhen. Ziel des durch die KSB-Stiftung geförderten Projekts ist daher die systematische Untersuchung der komplexen physikalischen und thermodynamischen Mechanismen, die zu Pulververlusten beim HS DED-LB führen. Hierbei werden ursächlich zwei Arten von Pulververlusten unterschieden: Thermische Pulververluste und kinematische Pulververluste. Thermische Pulververluste treten während des Materialauftrags auf, während kinema-

tische Pulververluste in den Prozessabschnitten mit ausgeschaltetem Laserstrahl entstehen.

Um qualitativ hochwertige Bauteile zu erhalten, ist ein gleichmäßiger Materialauftrag notwendig, der eine konstante Geschwindigkeit der Bauplattform erfordert. Beim HS DED-LB sind somit aufgrund der hohen Achsgeschwindigkeiten Scanfadabschnitte definiert, in denen die Bauplattform auf die gewünschte Geschwindigkeit für den Materialauftrag beschleunigt bzw. vor einer Richtungsänderung abgebremst wird. In diesen Scanfadabschnitten erfolgt kein Materialauftrag, jedoch wird aufgrund der hohen Latenz des Pulvermassenstroms im Vergleich zu den Prozessgeschwindigkeiten trotz ausgeschaltetem Laserstrahl weiterhin Pulver gefördert. Dies führt zu kinematischen Pulververlusten, die lediglich beim HS DED-LB auftreten. Als Ausgangspunkt zur zukünftigen Reduktion der kinematischen Pulververluste erfolgt im Projekt eine Analyse des Einflusses von Prozessparametern wie Vorschubgeschwindigkeit und Scanfad auf die kinematische Pulvereffizienz. Thermische Pulververluste treten bei Verfahren des pulverbasierten Laserauftragschweißens auf. Hierbei kann es zum einen aufgrund eines nicht ausreichenden Aufschmelzens der Pulverpartikel durch den Laserstrahl zu abprallenden und somit nicht aufgetragenen Pulverpartikeln kommen. Zum anderen kann ein zu starker Energieeintrag auf die Pulverpartikel dazu führen, dass der Werkstoff verdampft. Zur Maximierung der thermischen Pulvereffizienz unter Berücksichtigung der Bauteilqualität erfolgt zunächst eine experimentel-

Die hohen Vorschubgeschwindigkeiten von HS DED-LB ermöglichen kurze Prozesszeiten und bieten somit großes Potenzial für die industrielle Serienanwendungen

Energiebedarf und CO₂-Emissionen der Pulverherstellung übersteigen die des HS DED-LB Prozesses

Pulvereffizienz von HS DED-LB ist aufgrund der hohen Geschwindigkeiten gering

Eine Reduktion der Pulververluste bietet hohes Potenzial zur Erhöhung der Ressourceneffizienz und Wirtschaftlichkeit des Verfahrens

Ziel und Motivation des Projekts

Die Untersuchung und Identifikation der Einflussfaktoren und Zusammenhänge thermischer Pulververluste beim HS DED-LB. Basierend auf den Projektergebnissen können zukünftig effektive Prozessplanungsstrategien zur Minimierung von Pulververlusten entwickelt und damit die Ressourceneffizienz und Wirtschaftlichkeit des Hochgeschwindigkeits-Laserauftragschweißens erhöht werden.

Kontakt

M.Sc. Svenja Ehmsen

E-Mail: svenja.ehmsen@rptu.de

Telefon: 0631205-5448

Abschluss des Landesprojekts zur Resilienzsteigerung in Produktionssystemen

Erhöhung der Resilienz von Produktionssystemen durch bereichsübergreifende Anwendung von Methoden des maschinellen Lernens

Produzierende Unternehmen werden durch vielfältige Faktoren beeinflusst. Hierzu gehören u. a. der Wunsch nach kundenindividuellen Produkten, die Komplexität global vernetzter Lieferketten, Druck durch Marktbegleiter oder neue technologische Entwicklungen. All diese Faktoren führen dazu, dass die Gestaltung und der Betrieb eines Produktionssystems (PS) anspruchsvolle Aufgaben sind. Ein wichtiger Planungs- und Betriebsaspekt, den ein Produktionsplaner berücksichtigen sollte, ist die Resilienz des Produktionssystems. Resilienz wird definiert als die Fähigkeit des PS, seine normale Produktionsfähigkeit unter dem Einfluss von Störungen innerhalb akzeptabler Zeit- und Kostengrenzen wiederherzustellen. Um robuste Planungs- und Betriebsstrategien zu entwickeln, wird eine genaue Modellierung des PS benötigt. Dies kann durch den Einsatz von künstlicher Intelligenz erreicht werden. Mit Hilfe einer multidisziplinären Bedeutung von Resilienz in der Produktion und maschinellem Lernen (ML) sollte in diesem Projekt ein Algorithmus zum robusten Design von Produktionssystemen entwickelt werden.

Zur Erreichung des Forschungsziels wurde das Produktionssystem in Teilsysteme unterteilt und die Wirkzusammenhänge wurden formell beschrieben. Hierbei wurden zwei zentrale Parameterklassen (Gestaltungs- und Betriebsparameter) identifiziert, die einen direkten Einfluss auf das Produktionsvolumen haben und sowohl mittel- als auch kurzfristige Auswirkungen auf den Betrieb eines Produktionssystems haben. Gestaltungsparameter stellen dabei mittelfristig wirksame Variablen dar, wie den Ressourcen- oder Kapazitätsbedarf. Die Betriebsparameter

wirken hingegen kurzfristig und wurden u. a. durch Maschinen- oder Personalüberstunden modelliert.

Anschließend wurde eine Simulationsumgebung entwickelt, mit der unterschiedlich parametrisierte Produktionssysteme simuliert und beurteilt werden können. Dieses Modell des Produktionssystems wurde mittels diskreter Eventsimulation implementiert, da es generalisierte Schnittstellen ermöglichen die zuvor beschriebenen mittel- und kurzfristigen Parameter zu variieren und ihren Einfluss auf das Produktionsvolumen abzubilden. Anhand eines statistischen Versuchsplans konnte so die benötigte hohe Anzahl an Daten generiert werden, die als Grundlage für das Training der Modelle des maschinellen Lernens dienen.

Das Produktionssystem wurde durch ein ML-Modell in Form eines tiefen neuronalen Netzes abgebildet. Das Modell wurde mit „Adversarial Attacks“ konfrontiert, die darauf abzielen durch eine gezielte Veränderung der Betriebsparameter, z. B. Maschinenlaufzeiten oder Arbeitszeiten der Mitarbeiter, eine Verschlechterung des Betriebs des Produktionssystems herbeizuführen. Auf diese Weise können externe Schocks abgebildet werden. Anschließend wurde nach robu-

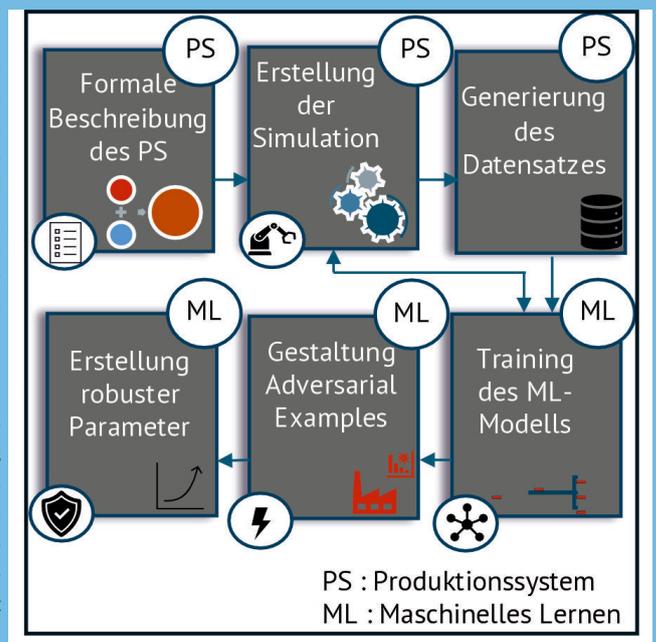
sten Designparametern gesucht, die den geringsten Einbruch der Produktionskapazität unter dem Einfluss der veränderten Betriebsvariablen verursachen. Die Ergebnisse des Forschungsprojekts zeigen, dass durch den Einsatz von ML in Kombination mit Adversarial Attacks eine langfristig robuste Gestaltung und ein resilienter Betrieb des Produktionssystems realisiert werden kann.

Kontakt

M. Sc. Avik Mukherjee

E-Mail: avik.mukherjee@rptu.de

Telefon: 0631 205-3224



Projektvorgehensweise

WGP Forum Office am 16./17. Mai 2024

Treffen der Sekretärinnen am FBK

Das traditionelle Treffen der Sekretärinnen der WGP-Institute fand in diesem Jahr an der RPTU in Kaiserslautern statt. Es wurde von dem Lehrstuhl für Fertigungstechnik und Betriebsorganisation-FBK und dem Lehrstuhl für Messtechnik und Sensorik-MTS ausgerichtet. 21 Teilnehmerinnen aus ganz Deutschland hatten die Gelegenheit, die RPTU, den FB MVT und die beiden Lehrstühle durch Vorträge und Laborbesichtigungen kennenzulernen und sich im Rahmen eines universitätsübergreifenden Austauschs zu vernetzen. Mit einem Besuch des Japanischen Gartens und einer Stadtbesichtigung über den Dächern von Kaiserslautern, auf der Rathaus-Terrasse, wurde das Programm am Donnerstag abgerundet.

Am Freitag fand ein von der TK Kaiserslautern gesponserter Workshop zum Thema „Mit Stress gesünder umgehen“ statt. Die Trainee, Frau Bommer, konnte den Teilnehmerinnen sehr viele wertvolle Tipps mit nach Hause geben. Die Veranstaltung endete mit einem gemeinsamen Mittagessen.

Kontakt

Rosemarie Schleret

E-Mail: fbk@mv.rptu.de

Telefon: 0631 205-2618

Die Zukunft von 6G-Mobilfunknetzen aus der Sicht der Produktionstechnik

Das FBK präsentiert dem Publikum der Hannover-Messe aktuelle Forschungsergebnisse aus dem Open6GHub



FBK präsentiert Forschungsergebnisse auf der Hannover-Messe

Auch in diesem Jahr war das FBK auf der Hannover-Messe vertreten und präsentierte dem Fachpublikum aus Industrie und Wissenschaft die inno-

vativen Forschungsergebnisse aus dem Bereich der 6G-Mobilfunktechnologie des Forschungsprojekts Open6GHub. Im Fokus stand dabei das Konzept von Underlayer-Netzwerken für die Produktionstechnik, welche eine zeitdeterministische Kommunikation mit Latenzzeiten von unter einer Millisekunde ermöglichen. Diese Eigenschaft macht sie interessant für Anwendungen in der Produktionstechnik, wo eine zuverlässige und verzögerungsfreie Kommunikation zwischen Maschinen und deren Steuerungen entscheidend für die Effizienz und Präzision von Produktionsprozessen ist. Marius Schmitz und Jan Mertes stellten am Messestand der 6G-Plattform einen Demonstratoraufbau vor, der die Möglichkeiten dieser dedizierten Underlayer-Netzwerke als Teil zukünftiger 6G-Mobilfunknetze verdeutlicht und die Auswirkungen von Netzwerk- und Kommunikationsstörungen auf geschlossene Regelkreise in der Produktionstechnik veranschaulicht.

Kontakt

Dipl.-Ing. Marius Schmitz
E-Mail: marius.schmitz@rptu.de
Telefon: 0631 205-4225

Neue Mitarbeiter



Dipl.-Ing. Jannik Gayer arbeitet seit Mai als wissenschaftlicher Mitarbeiter am FBK. Der Schwerpunkt seiner Tätigkeit liegt im Bereich der Digitalen Technologien für Produktionssysteme



Jonas Barbosa, M.Sc. arbeitet seit Mai als wissenschaftlicher Mitarbeiter am FBK. Der Schwerpunkt seiner Tätigkeit liegt im Bereich der Zerspanung und Additiven Fertigung



Maik Schürmann, M.Sc. arbeitet seit Juni 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 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

P. Schworm, X. Wu, M. Klar, M. Glatt, J.C. Aurich: Multi-objective Quantum Annealing approach for solving flexible job shop scheduling in manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems* 72 (2024): S. 142-153.

F. Grossmann, V. Follmann, T. Zhu, J. Uebel, S. Wolke, B. Kirsch, M. Smaga, T. Beck, J.C. Aurich: Control concept for the regulation of the surface layer properties using consecutive cuts in cryogenic hard turning of AISI 52100. *Production Engineering - Research and Development* (2024): S. 253-265.

M. Klar, P. Ruediger, M. Schuermann, G.T. Gören, M. Glatt, B. Ravani, J.C. Aurich: Explainable generative design in manufacturing for reinforcement learning based factory layout planning. *Journal of Manufacturing Systems* 72 (2024): S.74-92.

K. Gutzeit, F. Grossmann, B. Kirsch, J.C. Aurich: Tribological characterization of the cooling performance when applying cryogenic coolants and minimum quantity lubrication. *Manufacturing Letters* 41, (2024): S. 22-26.

A. Mukherjee, J. Mertes, M. Glatt, J.C. Aurich: Voice User Interface based control for Industrial machine tools. *Procedia CIRP* 121 - Proceedings of the 11th CIRP Global Web Conference (2024): S. 121-126.

T. Reeber, J. Henninger, N. Weingarz, P. M. Simon, M. Berndt, M. Glatt, B. Kirsch, R. Eisseler, J.C. Aurich, H.-C. Möhring: Tool condition monitoring in drilling processes using anomaly detection approaches based on control internal data. *Procedia CIRP* 121 - Proceedings of the 11th CIRP Global Web Conference (2024): S. 216-221.

M. Wagner, F.J.P. Sousa, M. Glatt, J.C. Aurich: Bridging the gap: A conceptual framework for developing and operating hybrid modeled digital twins under limited model input conditions. *Procedia CIRP* 121 - Proceedings of the 11th CIRP Global Web Conference (2024): S. 31-36.

F. Zell, A. Lange, B. Kirsch, J.C. Aurich: Analysis of the vibration characteristics of an air bearing spindle to identify and control the magnitude of the radial run-out with an active magnetic bearing. *Proceedings of the 24th international conference of the euspen* (2024): S. 449-452.