

Entwicklung eines SLM-Prozesses für die Fertigung eines topologieoptimierten Aufbohrwerkzeuges

Matthias Horn¹, Marie Peter², Jan Arndt³, Sascha Grieser⁴, André Streek¹

¹ Laserinstitut Hochschule Mittweida, Mittweida, Deutschland

² Institut für Werkzeugmaschinen und Produktionsprozesse, Technische Universität Chemnitz, Chemnitz, Deutschland

³ PDSVISION GmbH, Hamburg, Deutschland

⁴ GBZ Mannheim GmbH & Co.KG, Frankenthal, Deutschland

Mittels des additiven Pulverbettverfahrens Selective Laser Melting (SLM) können schichtweise Bauteile mit gleichwertigen Werkstoffeigenschaften des Vollmaterials generiert werden, wodurch sich viele Vorteile gegenüber den traditionellen Fertigungsprozessen ergeben. So können Features wie innenliegende Bohrungen für Kühlschmiermittel, bionische Strukturen zur Gewichtsreduktion oder Verstärkungen entsprechend mechanischer Belastungen in das Bauteil integriert werden. Ein weiterer Ansatz ist Gegenstand des ZIM-Projektes „FlexROUND“ und wird hier dargestellt. Durch Einbringung von filigranen Strukturen bzw. Gitternetzen in Bauteile soll eine definierte elastische Verformung unter Vorgabe einer konkreten Belastung ermöglicht werden. Dies geschieht durch Variation der Elementarzellegeometrie und der Anpassung der Gitterkonstante um eine gewünschte Nachgiebigkeit zu erhalten. Durch gezielte Veränderung der Füllstrategie können somit elastische Wände aus nur einer einzelnen Laserspür generiert werden. Erste Prüfkörper aus Werkzeugstahl 1.2709 wurden im orthogonalen Drehversuch am Material AW-2007 und C45 getestet und deren Verformung über entsprechende Sensorik erfasst. Die aufgenommenen mechanischen Kennwerte wurden in einer Werkstoffdatenbank zusammengetragen und dienen als Basis für die simulationsbasierte Auslegung neuer Gitternetze für eine definierte Verformung bei entsprechender Belastung. Die gezeigten Ergebnisse fließen später in die Entwicklung eines Bohr- und Reibwerkzeuges für die CFK-Bearbeitung ein, um die Prozessstabilität zu steigern, die Werkzeugstandzeit zu erhöhen und die Bohrlochqualität zu verbessern.

1. Einleitung

Die additiven Verfahren halten immer mehr Einzug in die Serienproduktion und kommen weg vom Klischee, ein zu kostenintensives Fertigungsverfahren zu sein, das nur für den Prototypenbau geeignet ist. Damit einhergehend erfordert es ebenso eine stetige Weiterentwicklung des Verfahrens Selective Laser Melting (SLM), um eine hohe Prozessstabilität gewährleisten zu können. Dies geschieht vorrangig durch Integration von entsprechender Sensorik wie zum Beispiel Thermokameras. Diese erfassen die Temperatur des Schmelzbades und anhand der Daten kann der Energieeintrag mittels Laser im Prozess gesteuert werden (Melt-Pool-Monitoring) [1]. Durch Simulation des Energieeintrages im Laserprozess können Eigenspannungen lokal ermittelt werden, die zu Verzug am Werkstück führen könnten [2]. Durch Anpassung der CAD-Daten bzw. der Stützstrukturen kann dem entgegengewirkt werden. Die meisten am Markt erhältlichen CAD-Systeme haben bereits ein Topologietool integriert, mit dem sich Optimierungen am Design des Bauteils verwirklichen lassen, die der Funktionalität im späteren Einsatzbereich zuträglich sind. Somit können solche Gitternetze in Bauteile in ihrer Form, Größe und Ausdehnung entsprechend dem Kraftfluss bei Beanspruchung folgen [3]. Damit wird sowohl eine Reduktion der Produktionszeit, des Materialverbrauches als auch des Energieeinsatzes erreicht.

Dieses Feature wurde im Projekt FlexROUND in abgewandelter Form genutzt, um lokal am Bauteil elastische Bereiche zu integrieren. Im speziellen sollten Gitternetze eine definierte elastische Verformung bei entsprechender Belastung zulassen. Der ideale Aufbau der Netze wurde über eine Simulation bestimmt. Dies betraf die Größe und Form der Elementarzellen (kleinste Einheit im Netz). Die Zellenanzahl und die Zellwandstärke wurden zuvor berechnet.

2. Motivation

Die Zahl der am Markt verfügbaren additiv gefertigten Werkzeuge ist noch relativ überschaubar aber stetig wachsend. Durch den schichtweisen Aufbau bieten sich eine Vielzahl von neuen Möglichkeiten in der Gestaltung der Werkzeuge, ebenso Materialeinsparungen durch Leichtbau und übergreifende Funktionalitäten durch Hybridbauweise.

Die Firma Mapal zeigt in ihrem Technologie Report 08 dafür einige Beispiele ihrer additiv gefertigten Produkte [4]. Neben einem Schneidplattenbohrer mit integrierter Kühlmittelzufuhr, einer Außenreibahle mit Leichtbauweise wird auch ein HTC-Futter gezeigt, welches in Hybridbauweise hergestellt wurde.

Einen anderen Ansatz verfolgt die Firma Komet, die ihr Fräswerkzeug mit beliebig vielen Schneiden je nach Be-

darf und Anwendung ausstatten kann. Durch die Vorzüge des SLM –Verfahrens werden die Kühlkanäle so angeordnet, das diese zugleich kühlen und zum Entspannen verwendet werden [5].

Die hier gezeigten Ergebnisse fließen in die Entwicklung eines Bohr- und Reibwerkzeuges für die Bearbeitung von kohlenstoffaserverstärktem Kunststoff (CFK) ein, wodurch die Prozessstabilität gesteigert werden soll, indem die Werkzeugstandzeiten erhöht bzw. die Bohrlochqualität verbessert wird.

3. Experimentelle Durchführung

3.1. Ermittlung optimaler SLM Parameter

Die folgenden Ergebnisse wurden auf der Industrieanlage SLM 280 HL der Firma SLM-Solutions AG generiert. Als Ausgangswerkstoff wurde der Werkzeugstahl 1.2709 gewählt. Das Pulvermaterial vom Hersteller Oerlikon AM ist sphärisch und besitzt eine Korngrößenverteilung im Bereich von 8 µm bis 105 µm, wobei der d_{90} -Wert bei rund 32 µm liegt. Da bis dato keine spezifischen Druckparameter für das Material zugänglich waren, wurden diese über entsprechende Versuche und Testkörper ermittelt. Zuerst wurden Einzelspuren / -wände erzeugt um die Spurbreite zu ermitteln. Damit konnte der Spurlinienabstand (Hatch) für die flächige Füllung abgeschätzt werden. Durch weitere Untersuchungen und Variation der Laserleistung und der Strahlablenkungs -

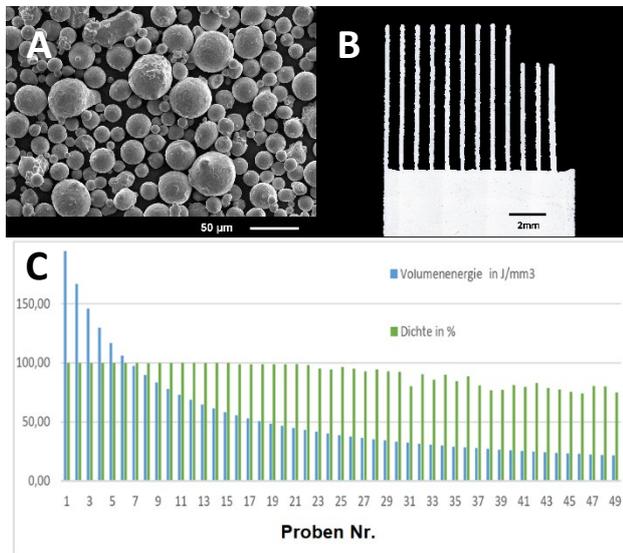


Abbildung 1: **A:** REM Aufnahme Pulvermaterial; **B:** Querschliffbild Einzelwände; **C:** Dichte vs. Volumenenergie @ 30 µm

geschwindigkeit konnten schlussendlich Parameter gefunden werden, die eine Dichte von 99,8% im Gefüge erzielten. Diese Untersuchungen wurden sowohl für die Schichtstärken 50 µm, 30 µm als auch für 20 µm durchgeführt. Wie in Abbildung 1C aufgezeigt, konnten hohe Dichtewerte auch mit Volumenenergien < 50 J/mm³ nachgewiesen werden. Für die Prozessstabilität wurde jedoch im Weiteren eine Energie von 65 J/mm³ bei einer Schichtstärke von 30 µm eingesetzt.

3.2. Simulation von elastischen Teststrukturen

Für die Simulation der elastischen Gitter kam die Software PTC Creo zum Einsatz. Auch hier war für das Material 1.2709 noch keine Materialdatenbank angelegt. Erfasste mechanische Kennwerte (Dichte, Härte, Zugfestigkeit) vom gedruckten Pulvermaterial 1.2709 und Spannungs-Dehnungskurven additiv gefertigter Zugproben bildeten die Einstiegsparameter für nachfolgende Modellberechnungen. Im weiteren Vorgehen konnten fortlaufend neue Messdaten eingepflegt werden, wodurch die späteren Simulationsdaten ziemlich präzise die real ermittelten Daten widerspiegeln konnten.

Zur Feststellung relevanter Einflussgrößen fanden Simulationen mit orthotropen Materialeigenschaften statt. Adressierbare Parameter bildeten beispielsweise die Belastungsrichtung in X/Y/Z, die Aufbaurichtung im Laserprozess, die Zellwandstärke, die Art der Füllung (Einzellinien oder Fläche) und das Setzungsverhalten des generierten Materiales.

Erste Untersuchungen erfolgten an einer simulierten 2D Wabenstruktur mit einer Elementarzelle ähnlich einer Bienenwabe, um diese dann mit realen Kennwerten vergleichen zu können. Die Probekörper (Abb.2) hatten eine Größe von 30 x 30 x 30 mm³, wobei die Deckflächen aus jeweils einer 1 mm starken Platte bestanden, um den additiv gefertigten Körper auch mechanisch belasten zu können. Untersucht wurden zwei Wabengrößen (unterschiedliche Wabenanzahl) mit einer konstruierten Wandstärke von 600 µm.

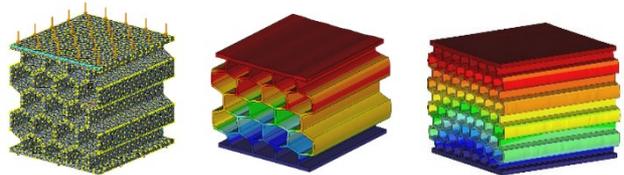


Abbildung 2: **links:** Testkörper mit Wabenstruktur in FEM-Simulation; **mitte/rechts:** simulierte Belastung an Testkörpern mit unterschiedlichen Gittern

Für das Gitter mit großen Waben (Abb.2 mitte) ergab die Simulation bei einer Belastung von 10 kN eine maximale elastische Verformung von rund 1,33 mm. Das Gitternetz mit kleineren Elementarzellen (Abb. 2 rechts) war dagegen stabiler und verformte sich nur um 1,11 mm.

Mittels einer Druck-Zugprüfmaschine der Firma Zwick/Roell wurden die Prüfkörper mit definierten Lasten geprüft und deren reale elastische Verformung ermittelt. Beginnend mit einer Last von 500 N und stetiger Steigerung von weiteren 500 N je Messung ergab sich für das kleine Wabengitter ein mittlerer Wert von 1,04 mm Nachgiebigkeit bei 10 kN Maximallast. Das Gitter mit größeren Waben war auch hier elastischer und verformte sich maximal um 1,29 mm.

Anhand vergleichbarer Resultate erwiesen sich die ersten Einstiegsparameter der Simulation als zufrieden stellend. Im Weiteren wurde die Wandstärke von 200 µm bis zu 1 mm variiert und vermessen.

Probleme ergaben sich bei der Erstellung des Baujob-Files mit der Slice-Software von Autodesk Netfabb. Die Volumenkörper werden von Außenkonturlinien (Outline) begrenzt. Diese weisen einen definierten Abstand zum eigentlichen Füllparameter des Volumenkörpers auf. Da in diesem Fall die Wandstärke von 200 μm in den Bereich der Outline fiel, wurden die Wände somit nur aus einer bzw. zwei Laserspuren realisiert. Der Abstand der Spuren zueinander musste daher händisch angepasst werden. Bei Wandstärken ab 400 μm konnte die Software wie üblich angewendet werden. Im Nachgang wurde auch der Einfluss der unterschiedlichen Belichtungsstrategien für die dünnen Wände untersucht. Dabei konnte keine eindeutige Abhängigkeit von der Füllstrategie, ob Einzellinien oder Outline mit Füllung, festgestellt werden. Die Wandstärke nach der Fertigung, erfasst mit einem Lichtmikroskop der Firma Keyence, betrug ein um 60 – 80 μm geringeren Wert als der konstruktiv vorgegebene, wohl bedingt durch die Parameteranpassung. Auf Basis dieser Erkenntnis lassen sich die Kennwerte der Simulation präziser anpassen.

Nach ersten Messungen im Drehversuch mit Werkzeugen aus Vollmaterial war ersichtlich, dass nur eine maximale Beanspruchung von 2500 N erreicht wurde. In diesem Zusammenhang erfolgte für die Einzelwaben bzw. sehr dünnwandigen Gitternetze nochmals ein Abgleich mit den Simulationsdaten (Abb. 3).

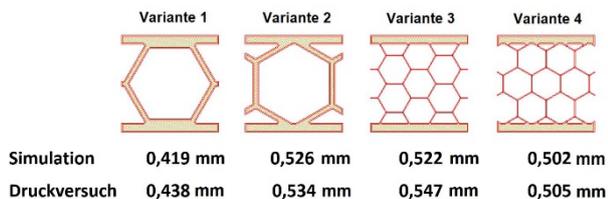


Abbildung 3: verschiedene Einzelwaben bzw. Gitter und dazugehörige Messdaten der Verformung (mm)

In Abbildung 4 rechts sind die Messkurven einer Testreihe dargestellt. Es ist im unteren Bereich bei einer Belastung von 1000 N und einer Verformung von ca. 0,3 mm ein Graph zu erkennen, der einen abweichenden, flacheren Anstieg als die restlichen Messkurven hat. Dieses Verhalten bei der ersten Kraftbelastung konnte wiederholt festgestellt werden und wird als Setzung im Materialgefüge interpretiert. Ein Einfluss der Oberflächenrauheit, infolge geglätteter Unebenheiten, konnte ausgeschlossen werden. Die Oberfläche wurde hierfür nach dem 3D Druck zusätzlich glasperlengestrahlt, überfräst oder poliert und vermessen. Dabei konnte die mittlere Flächenrauheit s_a von 7,2 μm (unbehandelt) auf 0,32 μm reduziert werden und dennoch ergaben sich ähnliche Kurvenverläufe.

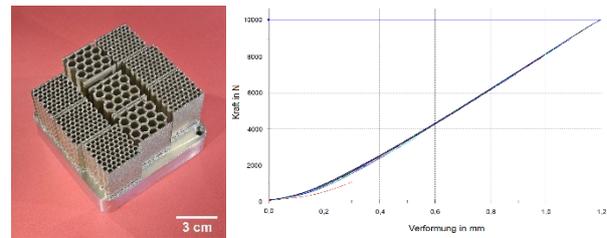


Abbildung 4: **links:** Testkörper mit Wabenstruktur; **rechts:** Diagramm: Kraft (N) zu Verformung (mm)

Abschließend konnte mit der Simulationssoftware eine Ermüdungsanalyse mit 2 Mio. Lastwechseln von 1500 N durchgeführt werden. Daraus resultierte, dass ein Sicherheitsfaktor bei der konstruktiven Auslegung der Simulationsdaten zu berücksichtigen ist. Mittels eines Schwingungstests wurden die 2 Mio. Lastwechsel bei einer Frequenz von 5 Hz ohne Versagen des additiv gefertigten Materials bzw. der filigranen Netzstruktur erfolgreich getestet.

3.3. Bohrwerkzeug / Bohrversuche

Die vorliegenden Ergebnisse sollten genutzt werden, um ein Bohr- und Reibwerkzeug für die CFK-Bearbeitung zu optimieren. Diese Optimierung soll dazu dienen, die Prozessstabilität zu steigern, die Werkzeugstandzeit zu erhöhen und die Bohrlochqualität zu verbessern. Bei der Herstellung von Bohrungen in CFK kommt es in der Regel zu starken Rundheitsabweichungen aufgrund der anisotropischen Eigenschaften der Fasern. Um dieses Problem zu vermeiden, werden meist dreischneidige Werkzeuge genutzt, da sich die Schneiden somit gegenseitig abstützen können [6, 7]. Das Ziel des im Projekt neuentwickelten Werkzeuges ist es, die unterschiedlichen auftretenden Prozesskräfte während einer Werkzeugumdrehung zu kompensieren, indem die Schneide kraftgesteuert nachgibt. Aus diesem Grund wurde ein zweischneidiges Werkzeug konstruiert, das den Rundheitsfehler durch die flexibel gelagerte Schneide kompensieren sollte. Abbildung 5 zeigt das Werkzeug sowie die Komponente, in der die flexible Wabenstruktur untergebracht ist. Die Reibschneide (1) ist durch den Stift (4) in einem Drehpunkt gelagert und soll somit den Enddurchmesser der Bohrung fertigen. Zum Eintritt der Reibschneide ist diese flexibel gelagert, indem diese in einer Art Kassette (2) geführt wird. In dieser Kassette wird die nachgiebige Struktur eingebracht wodurch die Schneide in der Lage ist sich je nach Stärke der einwirkenden Kräfte zu bewegen.

In der Simulation hat sich ergeben, dass eine Kassette mit einem Wabengitter nicht die erforderliche Nachgiebigkeit erreichen würde, weswegen eine Kassette mit einer einzelnen Wabenstruktur additiv gefertigt wurde. Um die tatsächliche Nachgiebigkeit des Werkzeuges zu ermitteln, wurde das Werkzeug zunächst in einem statischen Versuch getestet.

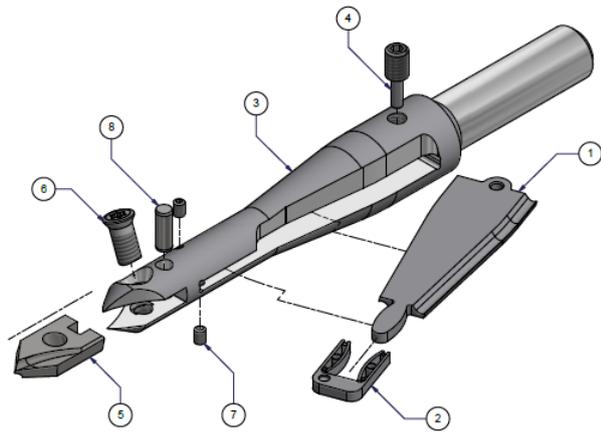


Abbildung 5: Innovatives Aufbohrwerkzeug mit flexibel gelagerter Reibschneide

Dazu wurde es in Richtung der Nachgiebigkeit mit einer gezielten Kraft gegen einen Anschlag gefahren, wobei die Kraft mit einem Rotationsdynamometer der Firma Kistler gemessen wurde. Auf der gegenüberliegenden Seite wurde der Ausschlag der Schneide mit einer Messuhr gemessen. Dabei zeigte sich eine lineare Nachgiebigkeit der Wabenstruktur (Abbildung 6), die vergleichbar ist mit der zuvor simulierten Verformung.

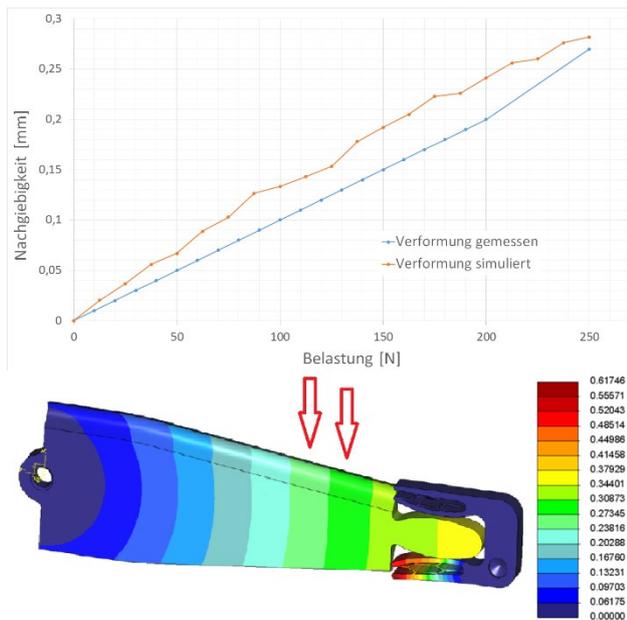


Abbildung 6: **oben:** statische Nachgiebigkeit der Wabenstruktur im Bohrwerkzeug **unten:** simulierte Belastung auf die Reibschneide und Verformung der Kassette mit Wabenstruktur

Anschließend wurde das Werkzeug im Bohrversuch getestet. Die Versuchswerkstücke bestanden aus unidirektionalem CFK und Gewebe-CFK. Die Drehzahl für den Reibprozess betrug $n = 400 \text{ min}^{-1}$ bei einem Vorschub von $f = 91,2 \text{ mm/min}$. Die Prozesskräfte wurden mit dem Rotationsdynamometer der Firma Kistler gemessen. Um

den Rundheitsfehler der Bohrungen zu ermitteln, wurden diese im Anschluss mit einem Koordinatenmessgerät vermessen.

Bei den Versuchen traten keine Schwingungen oder störenden Frequenzen auf. Die Prozesskraftverläufe bestätigten dies. Die Messungen des Koordinatenmessgerätes zeigten, dass die Enddurchmesser von 15 mm mit einer maximalen Abweichung von +0,032 mm im Gewebe-CFK und +0,118 mm im unidirektionalem CFK erreicht wurden. Insgesamt wurde eine Rundheit mit einer maximalen Abweichung von 0,008 mm in Gewebe-CFK und von 0,018 mm in unidirektionalem CFK erreicht.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Prozessstabilisierung mit dem Einsatz von nachgiebigen Strukturen in einem Bohrwerkzeug für CFK erreicht werden kann.

4. Zusammenfassung / Fazit / Ausblick

Nachdem geeignete Aufbauparameter für den Werkzeugstahl 1.2709 ermittelt wurden, konnten erste mechanische Kennwerte für die Simulationsdatenbank erfasst werden. Als Gitternetz wählte man eine Wabenstruktur und simulierte die Variation der Elementarzellegröße und Zellwandstärke und fertigte diese. Anhand von definierten Druckbelastungen wurde die elastische Verformbarkeit der Netze ermittelt und mit den Simulationsdaten abgeglichen. Nach Integration dieser elastischen Strukturen in ein Bohrwerkzeug erfolgte der Nachweis unter Realbedingungen im Prozess. Es konnte erfolgreich eine Nachgiebigkeit des Werkzeuges nachgewiesen werden.

Im Weiteren soll die Simulationssoftware PTC Creo um ein Feature erweitert werden, das es ermöglicht, Topologieoptimierung am Werkstückdesign mit der Funktionalität der Nachgiebigkeit zu verschmelzen. Für die CFK-Bearbeitung ist geplant, das bereits existierende Aufbohrwerkzeug mit flexiblen Elementen auszustatten, um eine gleichmäßige Abnutzung der Schneiden und damit eine verbesserte Prozessstabilität und Qualität zu erreichen.

Danksagung / Angaben zu Fördermittelgebern

Das Projekt META-flexROUND (FKZ: 16KN087145) wurde gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages. Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung.

Literaturverzeichnis

- [1] Spears, Thomas G., Gold, Scott A. (2016): *In-process sensing in selectiv laser melting (SLM) additive manufacturing*, Integrating Materials and Manufacturing Innovations, 2016
- [2] <https://www.simufact.de/simufact-additive.html>
- [3] Teufelhart, S. (2016): *Belastungsoptimiertes Design von Gitterstrukturen für die additive Fertigung nach dem bionischen Prinzip der kraftflussgerechten Gestaltung*, Dissertation, Technische Universität München
- [4] Mapal (2018): *Mapal Technologie Report 08: Additive Fertigung*, <https://mapal.com/de-de/mediathek/technologyreport>, 29.09.2023
- [5] Komet (2017): <https://www.youtube.com/watch?v=ZIH5a4Oy1xo>, 29.09.2023
- [6] Sauer, K., Dix, M., Putz, M. (2018): *Process Forces Analysis and a New Feed Control Strategy for Drilling of Unidirectional Carbon Fiber Reinforced Plastics (UD-CFRP)*, Journal of Manufacturing and Materials Processing, 2018
- [7] Piquet, R., Ferret, B., Lachaud, F., Swider, P. (2000): *Experimental analysis of drilling damage in thin carbon/epoxy plate using special drills*, Composite Part A: Applied Science and Manufacturing, 2000, 31, S. 1107 - 1115