

# Simulation des Zerspanens von zellularen metallischen Werkstoffen

Dipl.-Ing. Rafael Guerra

## 1 Einleitung

Die Entwicklung von Simulationsverfahren werden zur Analyse der Zerspanbearbeitung von zellularen metallischen Werkstoffen wird weitergeführt. 2D- und 3D-FE-Modelle und Künstliche Neuronale Netzwerke (KNN) zur Simulation des Fräsens zellulärer metallischer Werkstoffen werden weiterentwickelt und untersucht.

Die Implementierung eines FE-Modells soll eine realistische Darstellung der Spanbildung ermöglichen. Das KNN-Modell soll eine zuverlässige Methode zur Vorhersage Oberflächengüte liefern.

## 2 Entwicklung des KNN-Modells

Ein offenporiger Metallschaum aus Edelstahl 316L wurde als Referenzmaterial verwendet. Das zellulare metallische Material wurde vom Fraunhofer IFAM Dresden [1] hergestellt. Der Herstellungsprozess basiert auf einem Pulvermetallurgieverfahren [2]. Potenzielle Anwendungen sind u.a. Wärmetauscher und Knochenimplantate.

Ausgangspunkt sind Ergebnisse aus Zerspanversuchen zum Umfangsfräsen von Metallschaum auf einer NC-Fräsmaschine (HSC Mikromat 4V) [3]. Insgesamt 96 Datensätze werden während der Experimente erzeugt. Verschiedene Kombinationen von Schnittgeschwindigkeit ( $v_c$ ), Vorschub pro Zahn ( $f_z$ ), Werkzeug-Spanwinkel ( $\alpha_o$ ) und Zerspanverfahren (Gleichlauf- und Gegenlauffräsen) wurden getestet. Reaktionskräfte ( $F_x$  und  $F_y$ ) und Verschmierungen sowie Ausrisse als Anteil der Oberfläche wurden für alle Kombinationen von Schnittparametern und Werkzeuggeometrien gemessen.

### 2.1 Datenbehandlung

96 Datensätze von Zerspanversuchen wurden ausgewertet. Schnittgeschwindigkeit, Vorschub pro Zahn, Spanwinkel und Fräsverfahren (Gleich- oder Gegenlauf) wurden als Eingangsdaten ausgewählt. Messwerte von Kräften ( $F_x$ ,  $F_y$ ), Verschmierung, Ausrisse und Richtungswinkel der Aktivkraft wurden als Ausgangsdaten benutzt. Die Datensätze erfordern als Vorverarbeitung eine Lineare Skalierung. Dadurch werden alle Parameterwerte an den gewünschten Bereich  $[0,1]$  angepasst.

### 2.2 Netzgenerierung und Modellerstellung

Verschiedene Kombinationen von Eingangs- und Ausgangsparametern wurden getestet, um die besten zu ermitteln. Außerdem wurden unterschiedliche Anzahl von Neuronen und verdeckten Schichten evaluiert [4]. Zwei verdeckten Schichten (jeweils zehn und vier Neuronen) bieten zufriedenstellende Ergebnisse. Darauf aufbauend wurde diese Netzstruktur ausgewählt.

Die Sigmoid-Funktion wurde als die Übertragungsfunktion in der verdeckten Schicht verwendet. Stattdessen wurde in Ausgangsschicht die Purelin-Funktion benutzt. Netzgenerierung und Modellerstellung wurde mithilfe der Software JavaNNS [5] durchgeführt.

## 2.3 Training

Die wesentlichen Parameter des Zerspanversuches ( $v_c$ ,  $f_z$  und  $\gamma_o$  und Drehrichtung) werden als Eingangsparameter verwendet. Reaktionskräfte ( $F_x$ ,  $F_y$ ) sowie Oberflächengüte (Verschmierungen, Ausrisse) werden als Ausgangsparameter benutzt. Die Datensätze werden stichprobenartig in zwei Kategorien unterteilt. Trainingsdaten bestehen aus zwei Dritteln (64) der Datensätze.

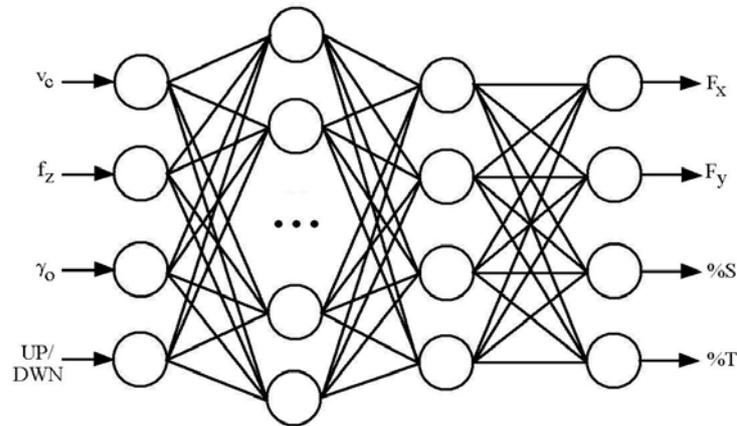


Abb. 2.1: Struktur des KNN

## 2.4 KNN Test

Das trainierte KNN wurde zunächst mithilfe der verbleibenden 32 Datensätze getestet. Die mittleren quadratischen Fehler (MSE) ist dann für alle Muster berechnet. Die MSE nach dem Trainingsverfahren wurde auf 0,014 bestimmt. Abb. 2.4 zeigt den Fehlerkurve während des Trainings mit 64 Datensätzen. In der Untersuchung wurden als Ziel von Training 10.000 Epochen und  $MSE = 0,001$  festgelegt. Die Testergebnissen bestimmen eindeutig, dass die vorhergesagten Werte ausreichend sind, indem sie die experimentellen Werte annähern. Die MSE ist für das Testverfahren 0,012.

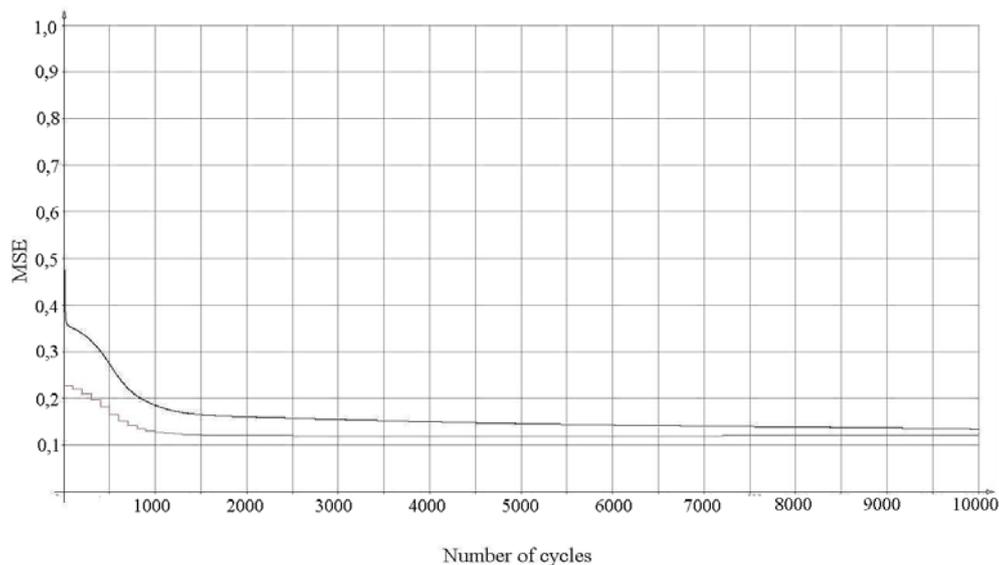


Abb. 2.2: Trainings- und Testkurven für das 4x10x4x4 KNN-Modell [6]

### 3 Weiterentwicklung des Finite-Elemente-Modells

Verfügbare Finite-Elemente-Methoden zur Simulation der Spanbildung [7] sind bei zellularen metallischen Werkstoffen ungeeignet. Mögliche Gründe dieses Problems werden untersucht: ein ungeeignetes Materialgesetz, eine irreal Darstellung der Mikro- und Mesostruktur und eine unzureichende Steifigkeit des 2D- Modelles.

Aus diesem Grund werden neue FE-Modelle entwickelt. 2D mesoskopische FE-Modelle von zellularen metallischen Werkstoffen werden entwickelt, welche die Defekte des Werkstoffes beachten. Verfügbare Stoffgesetze und Bruchkriterien werden untersucht. Der Einfluss von Stoffgesetz, Defekten der Mesostruktur und Schnittparametern wird auch analysiert.

3D-Modelle werden zusätzlich entwickelt, welche mithilfe experimenteller Daten validiert werden können.

#### 3.1 Auswahl des Materialgesetzes

Das zellulare Material wird in mehreren Schritten hergestellt. Dabei wird in einem pulvermetallurgischem Abformverfahren zunächst ein Polyurethan-Schwamm in einer Suspension beschichtet. Das Trägermaterial wird daraufhin durch eine thermische Behandlung wieder entfernt und abschließend wird die verbleibende Struktur gesintert [2].

Es gibt kaum Information über Materialeigenschaften in Zellwände von PM-Schäume aus Edelstahl 316L. Obwohl einige Materialeigenschaften in Zellwände mithilfe Härteprüfungen gemessen oder abgeleitet werden können [8], können die bei Zerspanverfahren bedeutenden Eigenschaften nicht erzeugt werden [9].

Aus diesem Grund werden Materialeigenschaften gesintertem Edelstahl 316L benutzt. Zwei Stoffgesetze, welche den Einfluss von Dehnungsgeschwindigkeit beachten, werden zur Simulation verwendet: das Johnson-Cook Stoffgesetz [10], und das KHL-Stoffgesetz [11]. Kenngröße zur Implementierung der Stoffgesetze stehen in der Literatur zur Verfügung [10, 11].

Es wird festgestellt, dass die Dehnungsgeschwindigkeit die Zerspannsimulationen beeinflusst. Außerdem wird es bestimmt, dass nur durch geeignete Randbedingungen und die Anwendung eines Bruchkriteriums man die Simulation von Spanbildung mit 2D FE-Modelle erzielen kann (Abb. 3.1).

Das Johnson-Cook-Stoffgesetz ermöglicht eine Verringerung der Rechenzeit im Vergleich mit dem KHL-Stoffgesetz, welches als Daten eines Spannungs-Dehnungs-Diagramms eingegeben wird [12].

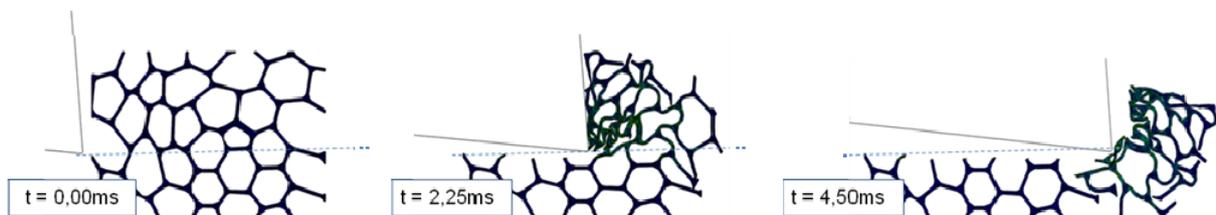


Abb. 3.1: Simulation der Spanbildung mithilfe eines Bruchkriteriums [12]

#### 3.2 Einfluss der Mesostruktur

PM-Materialien haben eine poröse Mikrostruktur. Poren führen zu Rissen, da sie als Stress-Konzentratoren wirken. Verformbarkeit hängt von Porigkeit, aber der Einfluss

der Poren auf die Zähigkeit des Werkstoffes ist noch größer. Bei Analyse der Probe von Kerbschlagbiegeversuch es wurde benachrichtigt, dass eine spröde Bruchfläche deutlich gesehen wird [13]. Aber nicht nur Poren, sondern auch Welligkeiten auf den Zellwänden wirken als Spannungskonzentratoren.

Zwei Modelle mit Defekten in Zellwände werden entwickelt: ein Modell mit variabler Wanddicke und anderes mit Poren (Abb. 3.2). Diese Defekte sollen den Einfluss der Mikrostruktur in der Simulation darstellen, welche als Spannungskonzentratoren wirken und die Spannbildung beeinflussen sollte.

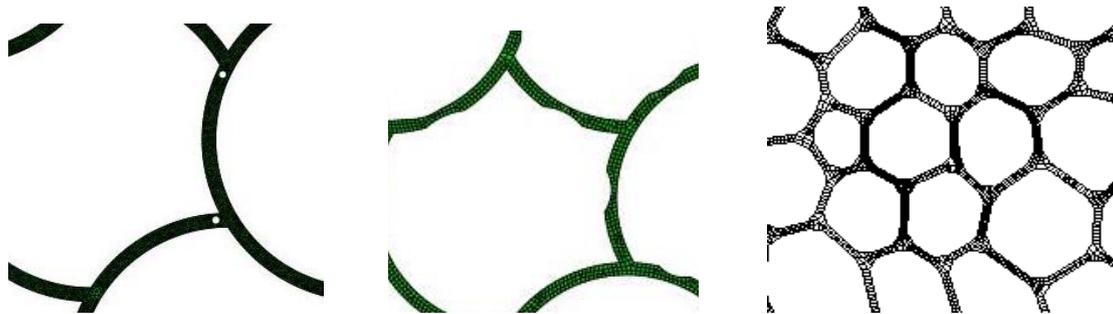


Abb. 3.2: Modifizierten Bogemodelle mit Poren (links) und variabler Wanddicke (mitte). Das polygonale Modell (rechts) [14]

Der Einfluss von Welligkeiten und Poren werden evaluiert und miteinander verglichen. Es wird bestimmt, dass Welligkeiten Poren als Spannungskonzentratoren wirken. Beide Defekten vereinfachen das Biegen von Stegen, aber sie ermöglichen nicht die Spannbildung.

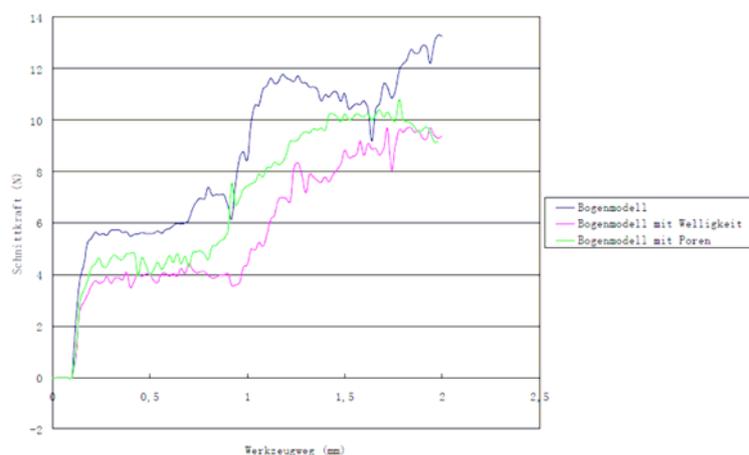


Abb. 3.3: Vergleich von Reaktionskraft beim Zerspanen vom Bogenmodell, Bogenmodell mit Welligkeiten und Bogenmodell mit Poren in Abhängigkeit vom Werkzeugweg [12].

Zusätzlich werden auch Simulationen mit einem Modell durchgeführt, das polygonale Poren enthält, das sogenannte polygonale Modell (Abb. 3.2, rechts). Der Einfluss der Zufälligkeit der Mesostruktur wird mithilfe dieses Modell untersucht. Zerspansimulationen mit vier verschiedenen polygonalen Modellen werden durchgeführt. Die Modelle unterscheiden sie sich nur in Massenverteilung in der Mesostruktur. Es wird darauf hingewiesen, dass eine relativ große Streuung der

Daten auch in Simulationen zu erwarten ist. Aus diesem Grund sollte die Massenverteilung berücksichtigt werden.

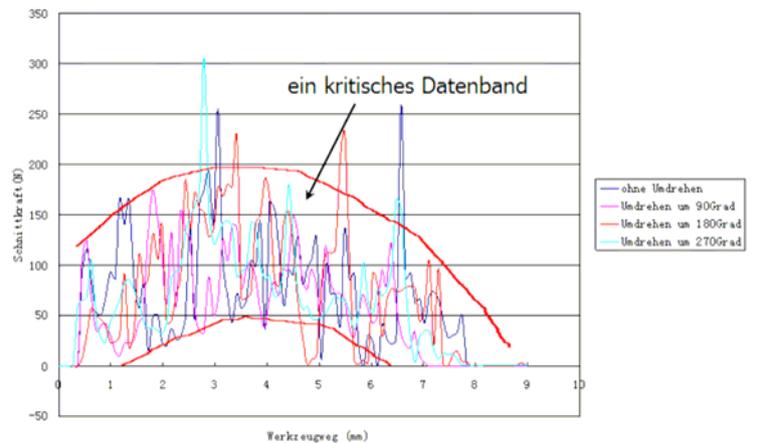


Abb. 3.4: Vergleich von Reaktionskraft beim Zerspanen vom vier verschiedenen polygonalen Modell in Abhängigkeit vom Werkzeugweg mit  $a_p = 3\text{mm}$  [12]

### 3.3 Einfluss von Werkzeuggeometrie und Schnittparametern

Der Einfluss von Spanwinkel und Schnitttiefe werden auch untersucht. Der Einfluss von bestimmten Parametern ist bemerkbar, z.B ein positiver Spanwinkel sollte die Materialausrisse unterstützen (Abb. 3.5). Trotzdem sind weitere Simulationen erforderlich, um den Einfluss der Mesostruktur auszuschließen.

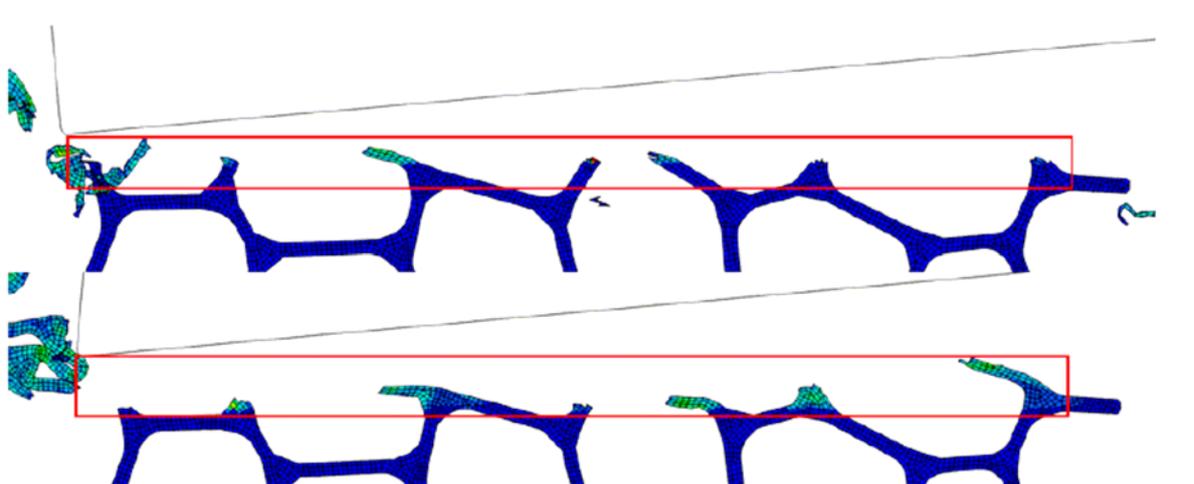


Abb. 3.5: Vergleich von Oberflächengüte des Werkstücks mit  $\gamma = 5^\circ$  (unten) und  $\gamma = -5^\circ$  (oben) [12]

### 3.4 Entwicklung eines 3D FE-Modells

3D-Modelle von zellularen metallischen Werkstoffen zur Zerspansimulation werden entwickelt. Die Weaire-Phelan Struktur wird als Basis für die Entwicklung des Modells ausgewählt. Diese Struktur wird wegen deren Unregelmäßigkeit ausgewählt, welche die reale Mesostruktur des Werkstoffes annähert.

Eine 16-zellige Probe von zellularen metallischen Werkstoffen wird entwickelt. Das Johnson-Cook mit Bruchkriterium wird angewende. Die Materialeigenschaften und Kenngrößen des gesinterten Edelstahl 316L werden verwendet.

Das Werkzeug ( $\gamma = 5^\circ$ ,  $\alpha = 5^\circ$ ) wird als verformbare Körper modelliert wird. Die Probe wird unten und hinten festgelegt (Abb. 3.6). Das Werkzeug hat eine Schnittgeschwindigkeit  $v_c = 50\text{m/min}$ . Die Schnitttiefe ist  $a_p = 1\text{ mm}$ .

Kontaktkräfte werden an Werkzeugoberfläche gemessen. Die Reaktionskraft und Schnittenergie werden davon abgeleitet. Werkzeugverschleiß wird nicht berechnet. Die berechnete Schnittenergie liegt im Bereich von experimentellen Ergebnissen (Tabelle 3-1).

Tab. 3.1: Validierung des 3D FE-Modells [15]

Quelle	Schnittenergie ( $\text{MJ/m}^3$ )
Experimentelle Daten (Fräsbearbeitung) [3]	
- $\epsilon_{\min}$	3,142
- $\epsilon_{\max}$	27,514
Simulation (Orthogonal)	8,755

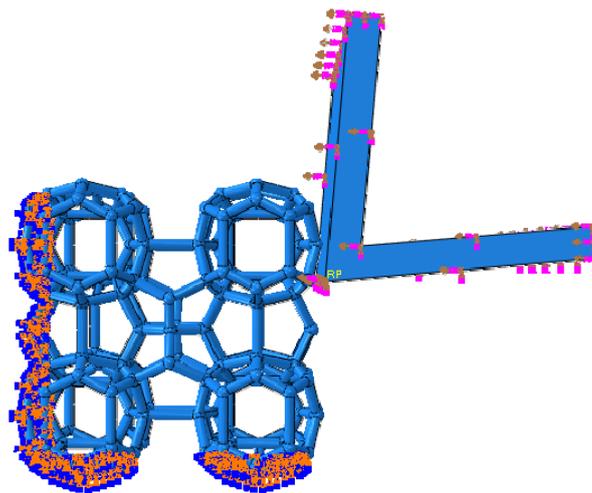


Abb. 3.6: Randbedingungen des 3D FE-Modells [15]

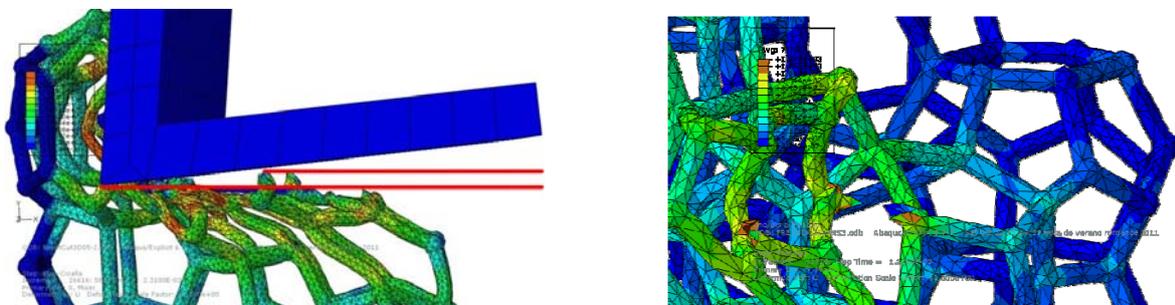


Abb. 3.7: Mithilfe des Bruchkriteriums kann man die Spanbildung simulieren [15]

### 3.5 Ausblick

Mehrere Probleme müssen noch bei der Implementierung des 3D FE-Modells gelöst werden, beispielweise die Implementierung von Randbedingungen und die Berechnung von Reaktionskraft.

Die thermo-mechanische Kopplung des Modells musste implementiert werden. Dadurch sollte die FE Zerspannsimulation verbessert werden.

Die 2D-Modelle müssen noch verwendet werden, wegen die große Rechenzeit bei 3D FE-Simulationen. 2D-Modelle werden immer noch zur Analyse von zellularen Werkstoffen angewendet werden. Dadurch kann man, z.B. den Einfluss von Schnittparametern und Werkzeuggeometrie analysieren. Methode zur Bewertung von Oberflächengüte müssen noch entwickelt werden, damit man die Oberflächengüte nach der Bearbeitung vergleichen kann.

### Literatur

- [1] [http://www.ifam-dd.fraunhofer.de/fhg/ifam\\_dd/EN/gebiete/schaum/index.jsp](http://www.ifam-dd.fraunhofer.de/fhg/ifam_dd/EN/gebiete/schaum/index.jsp)
- [2] Stephani, G.; Andersen, O.; Göhler, H.; Kostmann, C.; Kümmel, K.; Quadbeck, P.; Reinfried, M.; Studnitzky, T.; Waag, U.: Iron Based Cellular Structures – Status and Prospects; *Advanced Engineering Materials* (8) 2006, p.p. 847-852.
- [3] Liskamm, C.: HSC-Fräsbearbeitung ebener Flächen bei metallischen zellularen Materialien: Diplomarbeit, Fakultät Maschinenwesen, Technische Universität Dresden, 2008.
- [4] Guo, B.: Entwicklung von KNN-Modellen zur Simulation der Zerspanbarkeit von zellularen metallischen Werkstoffen, Belegarbeit TU Dresden, 2011
- [5] Fischer, I.; Hennecke, F.; Bannes, C.; Zell, A.: Java Neural Network Simulator User Manual, Version 1.1; University of Tübingen.
- [6] Guerra, R.; Nestler, A., Teicher, U.: Development of an ANN Model for the Machining of Cellular Metals. In: Slabe, J.M.: 8th International Conference on Industrial Tools and Material Processing Technologies, ICT&IPT 2011, Ljubljana, Slovenia. October 2-5, 2011, Vol.8, pp. 317-322, Celje: TECOS, ISBN 978-961-6692-02-1
- [7] Mackerle, J. (1999). Finite-element analysis and simulation of machining: a bibliography (1976–1996). *Journal of Materials Processing Technology*. 86 (1999) 17–44.
- [8] Hasan M.; Kim, A.; Lee, H.: Measuring the cell wall mechanical properties of Al-alloy foams using the nanoindentation method; *Composite Structures*, (83) 2008, p.p.: 180–188.
- [9] Dirikolu, M.; Childs, T.: Modeling requirements for computer simulation of metal machining; *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, (24) 2000, p.p.: 81-93.
- [10] Umbrello, D.; M'Saoubib, R.; Outeiro, J.: The influence of Johnson–Cook material constants on finite element simulation of machining of AISI 316L steel; *International Journal of Machine Tools & Manufacture* (47) 2007 p.p.: 462–470.
- [11] Lee, W.; Lin, C.; Liu, T.: Impact and fracture response of sintered 316L stainless steel subjected to high strain rate loading; *Materials Characterization*, (58) 2007, p.p. 363–370. [10] Rao, G.; Mahajan, P.; Bhatnagar, N.: Micro-mechanical modeling of machining of FRP composites –Cutting force analysis; *Composites Science and Technology*, (67) 2007, p.p. 579–593.
- [12] Ma, Z.: Simulation des Zerspanens von zellularen metallischen Werkstoffen - Einfluss der Stoffgesetze auf FEM-Berechnungen. Diplomarbeit TU Dresden, 2011

- [13] Kurgan, N.; Varol, R.: Mechanical properties of P/M 316L stainless steel materials; Powder Technology, (201) 2010, p.p.: 242–247.
- [14] Guerra, R.; Nestler, A.; Teicher, U.: Development of a FEM model for the Machining of Cellular Metals. European Congress and Exhibition on Advanced Materials and Processes EUROMAT 2011, Federation of European Materials Societies (FEMS), Montpellier, France, 12-15 September 2011
- [15] Fuentes, R.: 3D Finite-Element-Modellierung von zellularen metallischen Werkstoffen zur Simulation des Zerspanens. Diplomarbeit TU Dresden, 2011