

Entwicklung einer Methode zur Berechnung von Schnittkräften auf Basis von Prozessdaten für die Fräsbearbeitung¹³

Dipl.-Ing. Albrecht Hänel

1 Einleitung

Die Berechnung der Schnittkräfte auf Basis von Prozessdaten bei einer Fräsbearbeitung ist eine wesentliche Systemkomponente zur Erstellung eines digitalen Prozesszwillinges /HÄN-18/. Ziel dieser Systemkomponente ist es, dass nicht mit aufwendiger Messtechnik, wie bspw. mit einem 3-Komponenten Dynamometer, die Kräfte direkt gemessen werden, sondern das mit den zur Verfügung stehenden Prozessdaten aus der NC-Steuerung die wirkenden Schnittkräfte ermittelt werden können. Der Fokus liegt dabei auf der Aufzeichnung von Antriebsströmen und der diskreten Berechnung der geometrischen Eingriffsgrößen bei der Fräsbearbeitung.

Nach dem Prinzip eines „Softsensors“ ist dafür eine Abhängigkeitssimulation zwischen Antriebsstrom und wirkenden Schnittkräften zu erstellen. Des Weiteren muss mit Hilfe einer Abtragssimulation das Spannungsvolumen und weiterführend, mit Hilfe der geometrischen Informationen des Werkzeuges, die mittlere Spannungsdicke ermittelt werden. Nachfolgend ist eine Methode zur Berechnung der Schnittkräfte unter Verwendung einer 3-Achs Fräsmaschine mit einer HEIDENHAIN TNC620 Steuerung beschrieben.

2 Herstellung einer Schnittstelle zur Maschinensteuerung

Zur beiläufigen Aufzeichnung von geometrischen und physikalischen Prozessparametern an der Fräsmaschine ist ein Prozessdatenerfassungssystem erforderlich.

Die Softwareumgebung einer NC-Steuerung wird von den Steuerungsherstellern entwickelt und bietet häufig nicht die Möglichkeit einer integrierten Prozessdatenerfassung. Die NC-Steuerungen sind aus Performancegründen hardwarenah programmiert. Eine Speicherung der Prozessdaten innerhalb der NC-Steuerung hat starke Auswirkung auf die Performance zur Steuerung der Antriebssysteme. Aus diesem Grund werden Prozessdatenerfassungssysteme in der Regel auf externen Messdatenrechnern implementiert, die nicht die Hardware der NC-Steuerung verwenden.

Aus diesem Grund ist auf einem externen Messrechner die Software TNC-Scope der Firma HEIDENHAIN implementiert wurden, welche als Prozessdatenerfassungssystem dient. Die Software ist ein externes Oszilloskop zum Aufzeichnen und Auswerten von Achs-Kurven und PLC-Operanden von NC-Steuerungen der Firma HEIDENHAIN. Die zur Auswahl stehenden Signale sind maschinen- und steuerungsabhängig.

Die Software TNC-Scope¹⁴ bietet die Möglichkeit bis zu 14 Signale gleichzeitig aufzuzeichnen. Die Abtastrate der gewählten Signale kann diskret zwischen 0,33kHz | 1,66kHz | 6,66kHz | 8kHz | 10 kHz eingestellt werden. Die Tabelle 1 zeigt die

¹³ Ergebnisse aus dem Projekt „AeroCut4.0“ welches über den VDI/VDE im Rahmen der Fördermaßnahme Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) des BMWi gefördert wird.

¹⁴ TNC Scope: TNCscope V4.2 Deutsch, Fa. HEIDENHAIN

auswählbaren Signale einer TNC620-Steuerung. Eine alternative Abtaststrategie ist nicht einstellbar. Als Maschine steht eine WEMAS des Typs VZ-1250 Quick zur Verfügung.

Tabelle 1: Auswählbare Signale einer TNC620-Steuerung

Signal	Bedeutung	Einheit
a act	Istwert der Achsbeschleunigung; über Lagemessgerät berechnet	[m/s ²] bzw. [°/s ²]
a nom	Sollwert der Achsbeschleunigung	[m/s ²] bzw. [°/s ²]
v act	Istwert des Achsvorschubs; über Lagemessgerät berechnet	[mm/min] bzw. [°/min]
v nom	Sollwert des Achsvorschubs; berechneter Achsvorschub, der sich aus der Differenz der Lagesollwerte ergibt. Der Schleppfehler ist nicht eingerechnet.	[mm/min] bzw. [°/min]
Vorschub F	Bahnvorschub	[mm/min] bzw. [°/min]
Satznummer	Satznummer des NC-Programms für Triggerung	-
s act	Istposition	[mm] bzw. [°]
s nom	Sollposition	[mm] bzw. [°]
s diff	Schleppabstand des Lagereglers	[mm] bzw. [°]
PosDiff	Differenz zwischen Lage- und Drehzahlmessgerät	[mm] bzw. [°]
Lage: A	Messgerätsignal A des Lagemessgeräts	-
Lage: B	Messgerätsignal B des Lagemessgeräts	-
j act	Istwert des Rucks; über Lagemessgerät berechnet	[m/s ³]
j nom	Sollwert des Rucks	[m/s ³]
v (N act)	Drehzahl-Istwert; über Drehzahlmessgerät berechnet. Dabei wird die Anzahl der Motorumdrehungen ausgewertet. Bei Antrieben mit Getriebe unterscheidet sich dieser Wert von v act. v act = v (N act) * distPerMotorTurn	[Umdr./min]
v (N nom)	Geschwindigkeitssollwert; Ausgabegröße des Lagereglers	[Umdr./min]
I (N int)	Integralanteil des Strom-Sollwerts; CC 61xx, UEC 11x, UMC 111: Effektivwert	[A]
I (nom)	Drehmomentbestimmender Strom-Sollwert; CC 61xx, UEC 11x, UMC 111: Effektivwert	[A]
I2-t (Mot.)	Aktueller Wert der I2-t-Überwachung des Motors	[%]
I2-t (Lt.)	Aktueller Wert der I2-t-Überwachung des Leistungsteils	[%]
Analog	Analoge Achse/Spindel: Analogspannung = Geschwindigkeitssollwert	[V]
AFC-Diag.	Diagnose der adaptiven Vorschubregelung	-
Auslastung	Aktuelle Auslastung des Antriebs	[%]

Für die Funktion einer automatisierten Prozessdatenerfassung, unter Verwendung der TNC-Scope Software, ist zusätzlich ein Programm mit der Softwareumgebung AutoIT¹⁵ implementiert (Abb. 1). Mit dieser Software ist es möglich, dass mit einem NC-Befehl die Aufzeichnung der Prozessdaten automatisch startet. Eine weitere Funktionalität, die durch die Softwarekombination aus TNC-Software und dem AutoIT erreicht wird, ist die separierte Prozessdatenerfassung für einzelne Fertigungs- bzw. Bearbeitungsschritte. Somit lassen sich die Messdaten bestimmten Werkzeugen zuordnen. Der Speicherbedarf wird somit um unnötige Nebenzeiten (Werkzeugwechsel, Maschinenstopp, etc.) reduziert, welche nicht aufgezeichnet werden sollen.

¹⁵ AutoIT: AutoIT v3, 2018

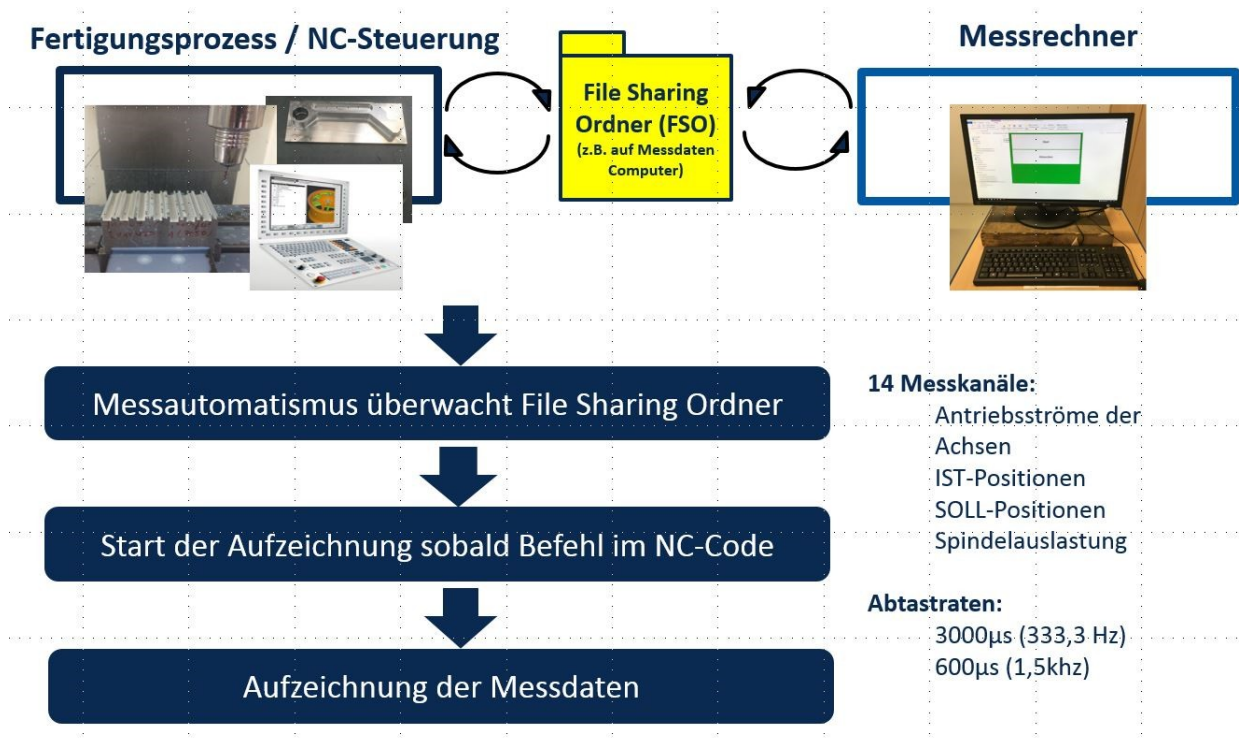


Abbildung 1: Ablauf Messautomatismus zur nebenläufigen Prozessdatenmessung

3 Maschinenkalibrierung

Bei der Maschinenkalibrierung ist das Ziel, die gemessenen Antriebsströme / Spindelauslastung mit den reellen Schnittmomenten zu vergleichen und den funktionalen Zusammenhang zu ermitteln [ARN-17]. Dies ist notwendig, da der gemessene Antriebsstrom an der Spindel inkl. Verlust- / Leerlaufleistung ausgegeben wird. Durch Messung des Schnittmoments M_c mithilfe einer piezoelektrischen KISTLER 4-Komponenten Momenten-/Kraftmessung (Abb. 2) lassen sich die Anteile ermitteln und in einen funktionalen Zusammenhang bringen. Diese Kalibrierung muss einmalig durchgeführt werden.

$$M_c \sim (M_{X'} - M_{X'.0}) \quad M_c \sim a_{X'} \quad \text{mit} \quad a_{X'} = \frac{h}{h_{X'}} \quad \text{und} \quad t \in [X', X'.0] \quad (1)$$

$$M_c \sim (M_{X'} - M_{X'.0}) \sim (a_{X'} - a_{X'.0}) \quad (2)$$

$$M_c = A_{BF} * (a_{X'} - a_{X'.0}) \quad \overline{a_{X'}} = \frac{\sum_{i=P_{min}}^{P_{max}} a_{X',i}}{P_{min} - P_{max} + 1} \quad (3)$$

Die Messungen erfolgten beim Bohren mit verschiedenen Werkzeugen $\varnothing 8\text{mm}$, $\varnothing 12\text{mm}$ und $\varnothing 19,5\text{mm}$ bei unterschiedlichen Drehzahlen (1000U/min - 10000U/min) und bei gleichem Zahnvorschub (0,1mm/U), um die mittlere Spannungsdicke h_m konstant zu halten. Insgesamt wurden mehr als 300 Einzelversuche durchgeführt.

Als Ergebnis steht eine multiple Regressionsfunktion, die den funktionellen Zusammenhang zwischen Antriebsstrom an der Spindel und Schnittmoment beschreibt. Auf Basis des Schnittmoments lassen sich dann die Schnittkräfte berechnen.

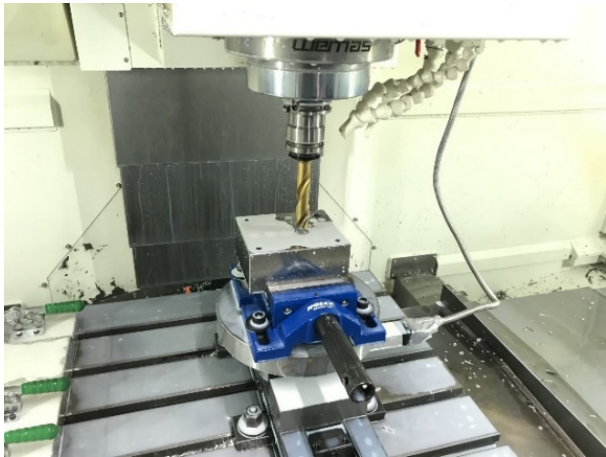


Abbildung 2: Kraftmessplattform inkl. Bohrer (lks.) und Messkette zur Bestimmung der Prozesskräfte und Prozessdaten (rts.)

Exemplarisch sind nachfolgend die ersten Ergebnisse (Abb. 3) für den Bohrer Ø8mm dargestellt. Es ist deutlich zu sehen, dass kein linearer Zusammenhang zwischen Antriebsstrom und Schnittmoment existiert.

Daher sind Regressionsfunktionen höherer Ordnung zu validieren und in die Abhängigkeitssimulation zu integrieren.

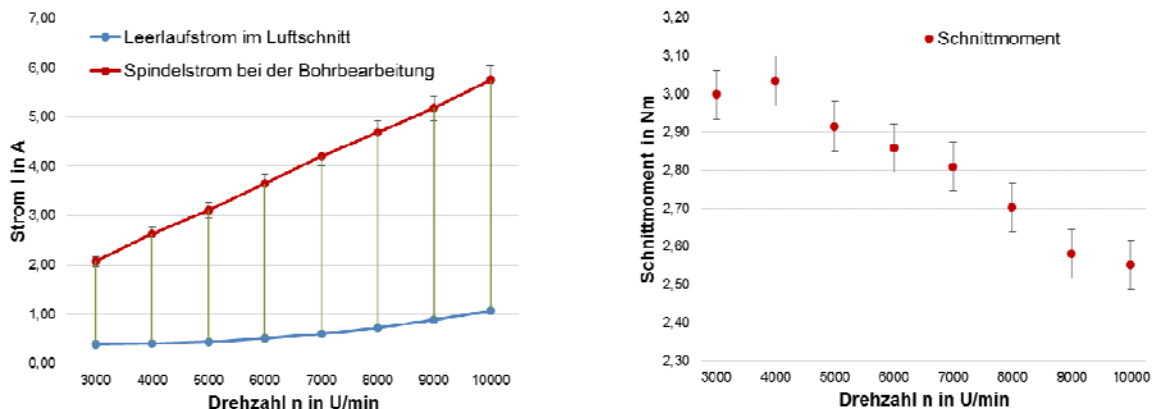


Abbildung 3: Ablauf Messautomatismus zur nebenläufigen Prozessdatenmessung für Strom (lks.) und Schnittmoment (rts.)

4 Berechnung der geometrischen Eingriffsgrößen

Zur Berechnung der wirkenden Kräfte während der Fräsbearbeitung, ist die Analyse und Recherche geeigneter Zerspankraftmodelle und der notwendigen Eingangsparameter notwendig. Die Basisgröße aller Zerspankraftmodelle ist der Spanungsquerschnitt A , aus welchen sich weitere geometrische Eingriffsgrößen, wie bspw. die mittlere Spanungsdicke h_m ableiten lassen. Die notwendigen Eingriffsgrößen werden nach dem aktuellen Stand der Technik nicht in der NC-Steuerung ermittelt und ausgegeben. Es ist daher essentiell eine Methode zu entwickeln, welche auf Basis der gemessenen Prozess- und Werkzeugdaten die geometrischen Eingriffsgrößen und das Abtragsvolumen berechnet. Darauf aufbauend lassen sich dann unterschiedliche Zerspankraftmodelle integrieren. Zur Berechnung des Abtragsvolumens und der Eingriffsgrößen sind in den letzten Jahren eine Reihe an Berechnungsmethoden, insbesondere in Grundlagenforschungsprojekten, entwickelt und untersucht wurden /LEE-12/. Grundsätzlich basieren die

Abtragmodelle auf zwei Varianten. Dies sind „räumlich partitionierte Repräsentation“ und zum anderen die „volumenorientierte Repräsentation“ /BRE-15/.

Bei der „räumlich partitionierte Repräsentation“ wird das Werkstück in Form eines Multidexel- bzw. Voxelmodells dargestellt. Das Werkzeug schneidet die in Raumrichtung angeordneten Linearsegmente bzw. Volumenkörper. Anschließend wird über einen Rekonstruktionsalgorithmus das Volumen des Werkstückes wieder zurückgerechnet. Dadurch lässt sich zeit- und ortsdiskret das Volumen und weitere geometrische Eingriffsgrößen berechnen. Im Vergleich zu den volumenorientierten Methoden (Constructive Solid Geometry, Boundary Representation) benötigen die Mutlidexelmodelle deutlich weniger Rechenaufwand und sind daher für eine Abtrags- und Eingriffsgrößenberechnung auf Basis von Prozessdaten am besten geeignet. Es wurde daher diese Methode ausgewählt.

Neben dem Abtragvolumen lassen sich auch die wirkenden Eingriffsgrößen, wie Eintritt- φ_E , Austrittswinkel φ_A und Eingriffswinkel φ_C , Arbeitseingriff a_e , Schnittbreite a_p , Werkzeugeinstellwinkel κ berechnen. Dafür wird das Werkzeug in hinreichend kleine Segmente geteilt und für jedes Segment eine eigene Profilprojektion realisiert, wodurch über die komplette Schnitttiefe die wirkenden Eingriffsgrößen ermittelt werden können (Abb. 4). Dies ist erforderlich, wenn beispielsweise kein zylindrisches Werkzeug eingesetzt wird.

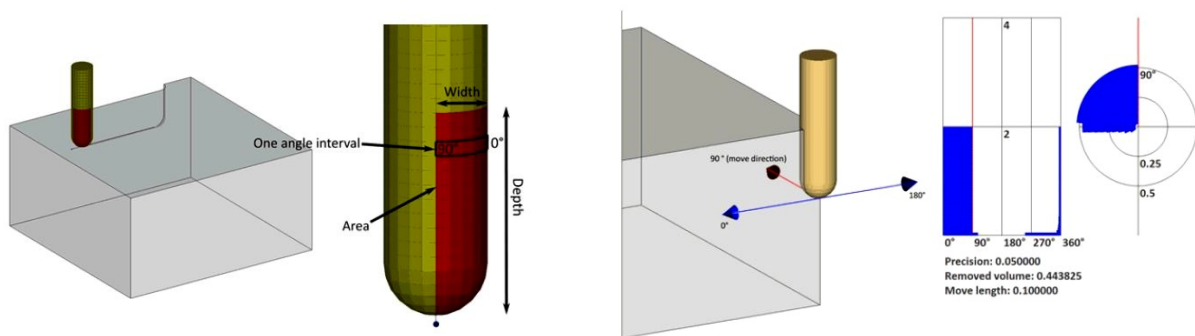


Abbildung 4: Werkzeugsegmentierung zur Berechnung des Abtragsvolumens (lks.) und Ermittlung der Eingriffswinkel (rts) (Quelle: ModuleWorks)

Unter Anwendung bekannter mathematischer Berechnungsformeln lassen sich nun die für die Zerspankraftberechnung notwendigen Bezugsgrößen, wie bspw. die mittlere Spannungsdicke h_m , berechnen /DEG-02/.

$$h_m = \frac{1}{\varphi_c} * \int_{\varphi_E}^{\varphi_A} h(\varphi) d\varphi = \frac{1}{\varphi_c} * f_z * \sin \kappa (\cos \varphi_E - \cos \varphi_A) \quad (4)$$

Mit dieser beschriebenen Methodik werden nun für jede Koordinate (IST-Position) der Spindel aus den Prozessdaten die entsprechenden geometrischen Eingriffsgrößen berechnet. Dadurch ergibt sich eine Vielzahl an Möglichkeiten der weiteren Verarbeitung. Die Umsetzung erfolgte mit einem Softwaremodul von der Firma ModuleWorks¹⁶.

5 Anwendung und Visualisierung der Schnittkräfte

Mit der Verknüpfung der geometrischen, kinematischen und Werkzeuginformationen lassen sich nun die Schnittkräfte ortsdiskret darstellen. Es ist nun möglich für die Fräsbearbeitung die wirkenden Schnittkräfte zu visualisieren und dies dem NC-Satz zuzuordnen. In Abbildung 5 ist ein exemplarisches Beispiel dargestellt.

¹⁶ ModuleWorks: ModuleWorks API, MW-SDK

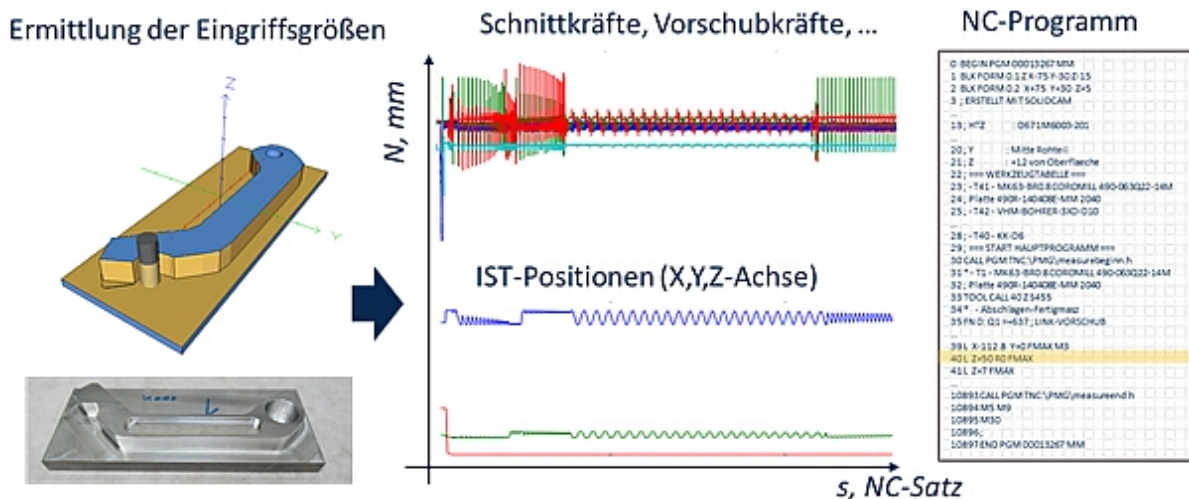


Abbildung 5: Beispiel für die Darstellung von Schnittkräften für die Fräsbearbeitung.

6 Zusammenfassung

Mit den beschriebenen Methoden lassen sich auf Basis von Prozessdaten, die von einer NC-Steuerung ausgelesen werden können, geometrische und technologische Informationen ermitteln und weiterführend die Schnittkräfte und Schnittleistungen ermitteln. In weiteren Untersuchungen sollen die Zusammenhänge zwischen Schnittmoment und Antriebsstrom vertieft werden.

Literatur

- /ARN-17/ Arnold, F.; Hänel, A.; Nestler, A.; Brosius, A.: New Approaches for the Determination of Specific Values for Process Models in Machining Using Artificial Neural Networks. 27th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, FAIM2017, 27-30 June 2017, Modena, Italy. ScienceDirect, Procedia Manufacturing 11 (2017) 1464-1470, Elsevier
- /BRE-15/ Brecher, C.: Realisierung effizienter Zerspansprozesse - Ergebnisbericht des Verbundprojekts Reffiz. Shaker Verlag, 2015
- /DEG-02/ Degner, W.; Lutze, H. und Smejkal, E.: Spanende Formung. Carl Hanser Verlag, 2002.
- /HÄN-18/ Hänel, A.: Konzeption eines digitalen Prozesszwilling auf Basis von Planungs- und Prozessdaten bei der Fräsbearbeitung von Bauteilen der Luft- und Raumfahrtindustrie. In: Nestler, A. (Hrsg.): Digitalisierung und Vernetzung von Systemen und Prozessen der spanenden Teilefertigung. Vortragsband zum 21. PAZAT-Fachkolloquium am 28.09.2018. Dresden: Selbstverlag TU Dresden, ISBN 978-3-86780-580-3
- /KLO-11/ Klocke, K.: Manufacturing Processes 1. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011
- /LEE-12/ Lee, S.W.; Nestler, A.: Virtual Workpiece: Workpiece Representation for Material Removal Process. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Volume 58, Numbers 5-8, 443-463, Springer 2011