

UC Davis

UC Davis Previously Published Works

Title

Oberflächenmorphologie gefräster Aluminiumwerkstücke

Permalink

<https://escholarship.org/uc/item/9422329s>

Journal

Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 116(7-8)

ISSN

0947-0085

Authors

Weber, Daniel
Kirsch, Benjamin
Gutzeit, Kevin
[et al.](#)

Publication Date

2021-08-01

DOI

10.1515/zwf-2021-0114

Peer reviewed

Oberflächenmorphologie gefräster Aluminiumwerkstücke

Daniel Weber^{a*}, Benjamin Kirsch^a, Kevin Gutzeit^a, Barbara S. Linke^b, Michael R. Hill^b und Jan C. Aurich^a

^a Lehrstuhl für Fertigungstechnik und Betriebsorganisation, Technische Universität Kaiserslautern, Gottlieb-Daimler-Str., 67663 Kaiserslautern

^b Department of Mechanical and Aerospace Engineering, University of California, One Shields Avenue, Davis, CA 95616, USA

*Kontakt E-mail Adresse: daniel.weber@mv.uni-kl.de

Abstrakt

Das Einsatzverhalten dünnwandiger, monolithischer Aluminiumlegierungen, welche in der Luft- und Raumfahrtindustrie eingesetzt werden, wird maßgeblich durch deren Oberflächenmorphologie beeinflusst. Diese setzt sich aus den mechanischen und metallurgischen Randschichteigenschaften, sowie der Oberflächentopografie zusammen. In diesem Beitrag werden der Einfluss der Schnittparameter auf die Rauheit, die Mikrostruktur, die Mikrohärtigkeit, sowie auf prozessinduzierte Eigenspannungen von gefrästem Al 7050 untersucht.

Stichworte: Fräsen, Oberflächenmorphologie, Aluminium, Eigenspannungen, Mikrostruktur

Abstract: Surface morphology of milled aluminum workpieces

The performance of thin-walled, monolithic aluminum alloys used in the aerospace industry is significantly influenced by their surface morphology. This is composed of the mechanical and metallurgical boundary layer properties and the surface topography. The influence of the cutting parameters on surface roughness, microstructure, microhardness and machining induced residual stresses of milled AA 7050 is investigated in this research.

1. Einleitung

Dünnwandig gefräste Aluminiumbauteile werden häufig in der Luft- und Raumfahrtindustrie aufgrund ihrer hervorragenden Eigenschaften wie einem guten Festigkeit-Gewichts-Verhältnisses eingesetzt [1]. Die Qualität dieser Bauteile nach der notwendigen Fräsbearbeitung ist entscheidend bezüglich einem möglichen Bauteilversagen. Der Einfluss der Fräsparemeter auf die Bauteilmorphologie, welche sowohl die Oberflächentopographie als auch die Randzone umfasst, ist daher von besonderem Interesse [2]. Mikrostrukturelle Defekte, Mikrohärtigkeit, Oberflächenrauheit und Eigenspannungen (ES) sind Eigenschaften der Oberflächenmorphologie, welche zu Bauteilversagen wie z.B. Ermüdungsbrüchen führen können [3]. Außerdem rufen prozessinduzierte Eigenspannungen (PES), welche durch den Fräsprozess in die Randschicht eingebracht werden, den Bauteilverzug von dünnwandigen Aluminiumbauteilen hervor [1]. Aus der Literatur geht hervor, dass die Fräsparemeter und das Werkzeug die PES beeinflussen können [1]. Insbesondere die hohen mechanischen Belastungen, die während der Bearbeitung auftreten, führen zu einer ungleichmäßigen plastischen Verformung in der Bauteilrandzone [4]. Typischerweise führen diese Verformungen zu einem „wurzelförmigen“ Druck-ES-Tiefenverlauf in der Bauteilrandschicht [1]. Es wurde festgestellt, dass eine Erhöhung des Vorschubs pro Zahn zu höheren Druck-ES führt [5]. Im Gegensatz dazu zeigte die Variation der Schnittgeschwindigkeit keinen eindeutigen Trend des Einflusses dieser auf die PES [5,6,7]. Neben den PES gibt es die initialen ES (IES), welche sich im gesamten Rohmaterial aufgrund vorgelagerter Prozesse wie Gießen, Walzen und Wärmebehandlungen (z. B. Abschrecken) befinden [1].

Bei der Fräsbearbeitung von Aluminiumlegierungen können mikrostrukturelle Defekte in Form von plastischer Verformung, stark verzerrten Schichten oder Stufenbildungen auftreten [3,8]. Darüber hinaus ist die Einbringung von Kaltverfestigungen in die Randschicht während des Fräsens charakteristisch [9]. Perez et al. konnte keine Abhängigkeit der Defekte von der Schnittgeschwindigkeit feststellen [3]. Yao et al. hingegen beobachtete eine Zunahme der Tiefe der plastischen Verformungsschicht mit zunehmender thermisch-mechanischer Belastung [8]. Zudem wurde eine erhöhte Mikrohärtigkeit in der oberflächennahen Randschicht (ca. 10 μm) aufgrund eingebrachter Kaltverfestigungen festgestellt [9]. Eine Variation der Fräsparameter hatte keinen Einfluss auf die Mikrohärtigkeit [8]. Im Gegensatz dazu haben die Fräsparameter Schnittgeschwindigkeit und Vorschub einen deutlichen Einfluss auf die Oberflächenrauheit. So führte die Erhöhung des Vorschubs zu einer Erhöhung dieser [8]. Eine Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit resultierte in konträren Ergebnissen [8, 9].

Aus der Literatur geht hervor, dass die Fräsparameter Vorschub pro Zahn und Schnittgeschwindigkeit den größten Einfluss auf die Oberflächen- und Randzoneigenschaften haben; deren Untersuchung wird im Folgenden beschrieben.

2. Methoden

2.1. Versuchsaufbau

Die Fräsversuche im Gleichlauf und Trockenschnitt wurden auf einer 5-Achs CNC-Maschine durchgeführt. Mit Hartmetall-Schaftfräser (10 % Co, 0.6 % Cr, 89.4 % WC, 3 Schneiden, 12 mm Durchmesser, keine Schneidkantenverrundung) wurden Aluminiumblöcke (206x102x28,5 mm³) plan gefräst. Bei den untersuchten Werkstücken handelte es sich um lösungsgeglühte und durch kontrolliertes Recken entspanntes Al 7050-T7451 mit geringen IES (< 20 MPa). Die Bearbeitungsrichtung entsprach der negativen x-Richtung (siehe Abb. 1). Es wurden drei verschiedene Vorschübe pro Zahn f_z und zwei verschiedene Schnittgeschwindigkeiten v_c untersucht (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1 Variierte Parameter

Bezeichnung	Schnittgeschwindigkeit in m/min	Vorschub pro Zahn in mm	Wärmebehandlungszustand
M1	200	0,04	T7451
M2	200	0,1	T7451
M3	200	0,2	T7451
M3b	200	0,2	T7451
M4	450	0,04	T74

Die Schnittbreite a_e und die Schnitttiefe a_p betragen 4 mm bzw. 3 mm. Eine Oberflächenschicht wurde entfernt, was zu 25 Durchgängen mit einer konstanten Schnittbreite von 4 mm führte. Zusätzlich wurde ein Werkstück des Typs Al 7050-T74 mit großen IES (bis zu +100 MPa und -150 MPa), welches keinem Wärmebehandlungsprozess zum ES-Abbau unterzogen wurde, mit den Schnittparametern M3 untersucht (M3b). Die drei orthogonalen Kräfte (F_x , F_y , F_z), wobei F_x die Kraft in negativer Vorschubrichtung, F_y in orthogonaler Vorschubrichtung und F_z die passive Kraft ist (siehe Abb. 1), wurden mittels piezoelektrischen Dynamometer und einer Abtastrate von 15 kHz überwacht. Um die Kräfte der Bearbeitungsparameter zu vergleichen, wurde der Effektivwert (RMS-Wert) des Kraftsignals jedes gemessenen Durchgangs berechnet und gemittelt. Ein- und Auslaufeffekte wurden aus der Analyse ausgeschlossen, indem 80 % des Kraftsignals analysiert wurden.

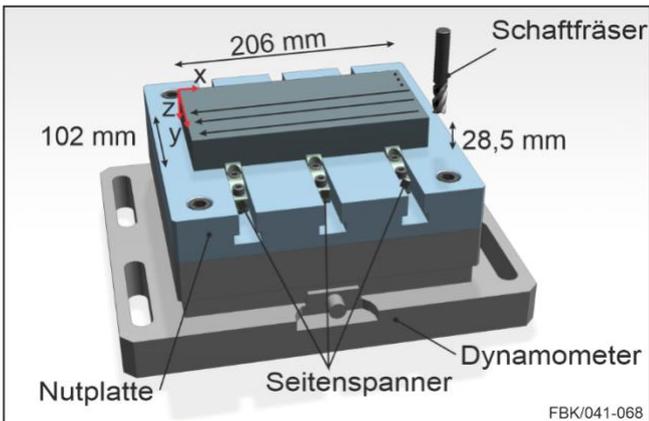


Abb. 1 Versuchsaufbau

2.2. Eigenspannungsmessung

Die Messungen der PES erfolgte mittels Bohrlochmethode nach ASTM E837-13a Norm [10]. Hierbei werden die Dehnungen, welche aufgrund der Freisetzung der Eigenspannungen um das Bohrloch entstehen, nach jedem inkrementalen Schnitt mit Dehnungsmessstreifen gemessen und die ES (σ_{xx} , σ_{yy} , τ_{xy}) in Abhängigkeit ihrer Tiefe berechnet. Der Lochdurchmesser betrug 2 mm und wurde mit einem Schafffräser ($d = 1,59$ mm) auf einer Orbitalbahn gefräst [11]. Pro Werkstück wurden drei Messungen durchgeführt (Positionen X/Y Koordinate in mm: 103/17, 103/51 103/85) und der Mittelwert und die Standardabweichung der ES in Abhängigkeit der Tiefe berechnet. Zusätzlich wurde eine Messung auf M3b im Bereich initialer Druck-ES (Koordinaten: 103, 22) durchgeführt.

2.3. Mikrohärtemessung und mikroskopische Aufnahmen der Mikrostruktur

Die Proben zur Mikrohärtemessung wurden mittels Bandsäge und Präzisionstrennmaschine den Werkstücken gemäß Abb. 2 entnommen und deren Oberfläche stufenweise (P2500, P4000) plangeschliffen und poliert (3μ -, sowie 1μ -Suspension). Die Mikrohärt wurde in 10μ Schritten ab einer Tiefe von 20μ bis zu 200μ gemessen (siehe Abb. 2) unter der Verwendung einer Prüfkraft von $F = 0,098$ N (HV 0.01) gemäß DIN EN ISO 6507-1. Es wurden drei Messungen pro Probe durchgeführt. Zur abschließenden Untersuchung der Mikrostruktur wurden die Proben mit dem Ätzmittel nach Kroll geätzt. Die Tauchätzung erfolgte bei Raumtemperatur und einer Tauchzeit zwischen 25s und 45s. Es wurden mikroskopische Aufnahmen der Fläche orthogonal zur Vorschubrichtung analysiert.

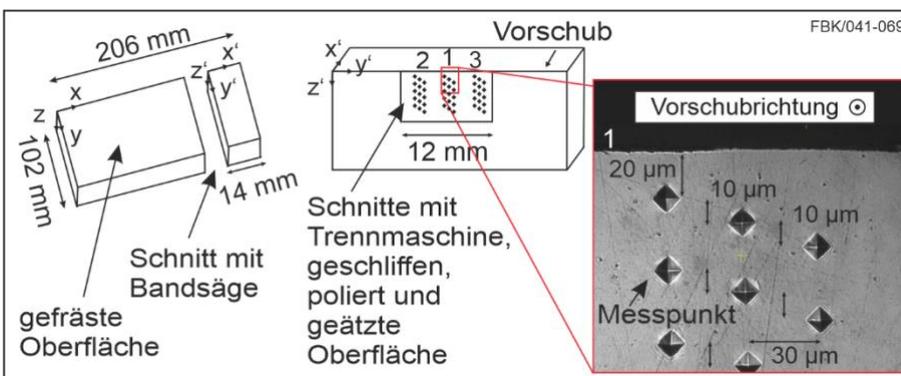


Abb. 2 Versuchsaufbau der Mikrohärtmessung

2.4. Rauheitsmessung

Die Oberflächenrauheit wurde mittels eines Perthometers nach DIN ISO 4288 innerhalb der Fräsbahnen in Vorschubrichtung gemessen. Dabei wurden zur statistischen Absicherung 10 Messungen pro Probe durchgeführt und die Kennwerte arithmetischer Mittenrauwert R_a und maximale Rautiefe R_{max} ausgewertet.

3. Ergebnisse

3.1. Kräfte

Die Kräfte in y-Richtung sind betragsmäßig die größten, da die Schnittbewegung hauptsächlich in dieser Achse verläuft. In der Vergrößerung in Abb. 3 ist der Kraftverlauf aller drei Schneiden für eine Umdrehung des Fräasers deutlich zu erkennen. Mit steigendem Vorschub steigen die Kräfte in alle drei Richtungen, da die mittlere Spannungsdicke und somit das Zeitspanvolumen erhöht wird. Dies erfordert einen größeren Energiebedarf zur plastischen Verformung des Materials und der Überwindung der höheren Reibung. Eine Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit von 200 m/s auf 450 m/s hat kaum Auswirkungen auf die Kräfte. Sowohl die Kraft in x- als auch z-Richtung steigt leicht aufgrund der höheren Vorschubgeschwindigkeit. Die Kraftkomponente F_y fällt dagegen leicht. Zudem ist kein signifikanter Unterschied der Kräfte für unterschiedliche IES-Zustände der Werkstücke bei gleichen Schnittparametern festzustellen (vgl. M3 zu M3b).

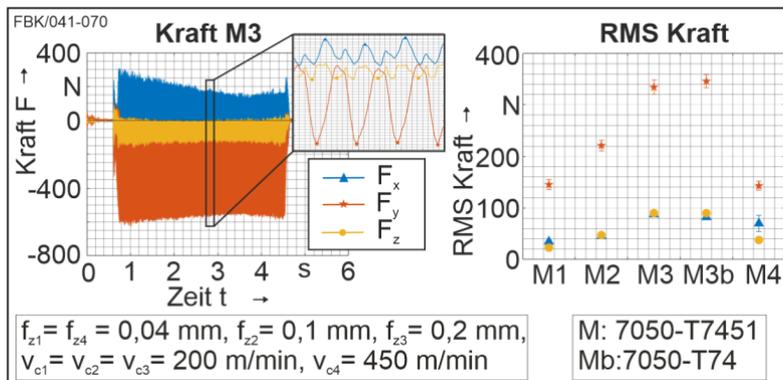


Abb. 3 Kraftauswertung

3.2. Eigenspannungen

In Abb. 4 sind unterschiedliche ES-Tiefenverläufe gezeigt, welche in der Oberflächenrandschicht aufgrund der Variation der Fräsparameter vorliegen. Das typische Profil mit Druck-ES ist für alle Fräsparameter zu erkennen. Allerdings zeigt nur der höchste Vorschub ein ausgeprägtes Maximum an Druck-ES ($\sigma_{xx} = -100 \text{ MPa}$, $\sigma_{yy} = -120 \text{ MPa}$, $\tau_{xy} = -47 \text{ MPa}$) in größerer Tiefe ($\sim 60 \mu\text{m}$) auf. Dieses Verhalten lässt sich durch die größeren Kräfte bei einem erhöhten Vorschub pro Zahn erklären, woraus ein höheres Maß an plastischer Verformung resultiert. Die restlichen Profile zeigen ihre maximalen Druck-ES in der ersten gemessenen Tiefe ($\sim 12,5 \mu\text{m}$). Auch die gesamte Eindringtiefe der PES ist für M3 am größten ($\sim 200 \mu\text{m}$). Die Variation der Schnittgeschwindigkeit von 200 m/s auf 450 m/s hat kaum Einfluss auf die PES, was mit ähnlich hohen Kräften zu begründen ist. Das Maximum der normalen Druck-ES von M3b ($\sigma_{xx} = -238 \text{ MPa}$, $\sigma_{yy} = -226 \text{ MPa}$) ist größer als M3, da an der gemessenen Stelle initiale Druck-ES vorliegen (erkennbar an den gemessenen ES ab einer Tiefe von $200 \mu\text{m}$). Diese überlagern sich mit den PES.

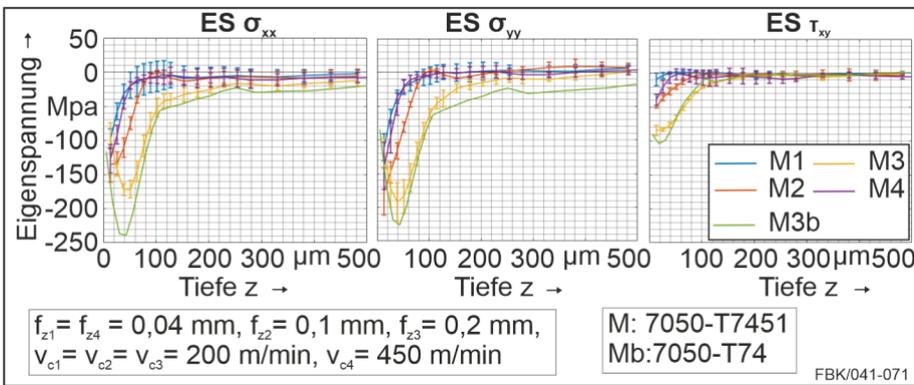


Abb. 4 Prozessinduzierte Eigenspannungstiefenprofile

3.3. Mikrohärt

Eine Variation der Fräsparameter hat keinen signifikanten Einfluss auf die Mikrohärt. Die durchschnittliche Mikrohärt beträgt 166 ± 6 HV0.01 (M1), 160 ± 6 (M2), 163 ± 4 HV0.01 (M3), 160 ± 6 HV0.01 (M4), 158 ± 6 HV0.01 (M3b), sodass für keine Probe eine signifikante Änderung bezüglich der Grundhärt (162 HV0.01) beobachtet wird. Eine Änderung der Mikrohärt entlang des Härte-Tiefe-Profiles wird ebenfalls nicht beobachtet. Hieraus kann gefolgert werden, dass der Fräsprozess, sowie die dadurch eingebrachten Druck-ES ab einer Tiefe von $20 \mu\text{m}$ keinen signifikanten Einfluss auf die Mikrohärt haben. Bei einem Randabstand kleiner $20 \mu\text{m}$ ist ein Anstieg der Mikrohärt denkbar, jedoch sind Messungen mit dem vorhandenen Messsystem hier nicht möglich. Hier zeigen sich, insbesondere bei einem hohen Vorschub, plastische Deformationen in Richtung der Schnittgeschwindigkeit. Das Auftreten plastischer Deformationen kann die Versetzungsdichte und damit die Härte im unmittelbaren Randbereich des Werkstücks erhöhen. Eine repräsentative Aufnahme der plastischen Deformation innerhalb der Werkstückrandschicht ist in Abb. 5 dargestellt.

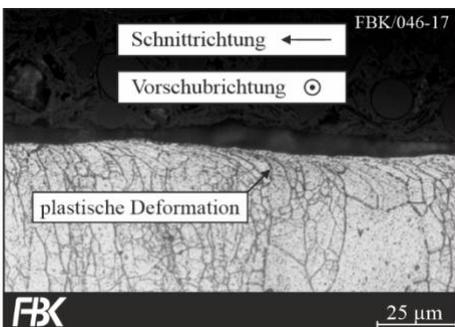


Abb. 5 Mikroskopische Aufnahme von M3

3.4. Rauheit

Es ist zu erkennen, dass die Rauheit mit Zunahme des Vorschubs pro Zahn steigt (siehe Tabelle 2). Eine Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit führt zu einer leichten Erhöhung der Rauheit. Zudem wird eine ähnliche Oberflächengüte für unterschiedliche IES-Zustände der Werkstücke bei gleichen Schnittparametern erreicht (vgl. M3 zu M3b).

Tabelle 2 Rauheitskennwerte

	$R_a / \mu\text{m}$	$R_{\text{max}} / \mu\text{m}$
M1	$1,5 \pm 0,2$	$8,3 \pm 4,4$
M2	$2,4 \pm 0,3$	$12,4 \pm 2,9$
M3	$9,4 \pm 0,6$	$38,3 \pm 2,4$
M3b	$6,8 \pm 1$	$34,2 \pm 3,3$
M4	$2,2 \pm 0,2$	$9,4 \pm 0,7$

4. Zusammenfassung

Die Kräfte und die Rauheit gefräster Aluminiumwerkstücke 7050 steigen mit Zunahme des Vorschubs. Die PES sind Druck-ES, deren Maximum mit Zunahme des Vorschubs tiefer im Material vorzufinden ist. Es ist kein Effekt der Schnittparameter auf die Mikrohärtigkeit (in einer Tiefe größer 20 μm) zu erkennen. Ausgeprägtere plastische Deformationen können bei hohen Vorschüben beobachtet werden. Eine Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit von 200 auf 450 m/s hatte keinen Einfluss auf die untersuchten Größen. Werkstücke mit IES (Al 7050-T74) beeinflussen die PES. Darüber hinaus wurde kein Einfluss dieser auf Kräfte, Rauheit oder mikrostrukturellen Defekte beobachtet.

5. Literatur

- [1] Li J, Wang S (2016) Distortion caused by residual stresses in machining aeronautical aluminum alloy parts: recent advances. *Int J Adv Manuf Technol* 89/1-4: 997–1012.
- [2] Cai XJ, Ming WW, Chen M (2012) Surface integrity analysis on high speed end milling of 7075 aluminum alloy. *Adv Mater. Res* 426:321–324. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.426.321>
- [3] Perez I, Madariaga A, Cuesta M, A. Gray A, Arrazola PJ, Ruiz JJ, Rubio FJ, Sanchez R (2018) Effect of cutting speed on the surface integrity of face milled 7050-T7451 aluminium workpieces. *Procedia CIRP* 71 – Proceedings to the 4th CIRP Conference on Surface Integrity:460-465.
- [4] Masoudi S, Amini S, Saeidi E, Eslami-Chalander H (2015) Effect of machining-induced residual stress on the distortion of thin-walled parts. *Int J of Adv Manuf Technol*
- [5] Denkena B, Boehnke D, de Leon L (2008) Machining induced residual stress in structural aluminum parts. *Production Engineering* 2:247–253.
- [6] Denkena B, Reichstein M, de Leon Garcia L (2008) Milling Induced Residual Stresses in Structural Parts out of Forged Aluminum Alloys. *Int J Mach And Machinab of Mater* 4/4:335–344.
- [7] Rao B, Shin Y (2001) Analysis on high-speed face-milling of 7075-T6 aluminum using carbide and diamond cutters. *Int J of Mach Tools & Manuf* 41:1763–1781.
- [8] Yao, C; Zuo, W; Wu, D; Ren, J; Zhang, D.: Control rules of surface integrity and formation of metamorphic layer in high-speed milling of 7055 aluminum alloy. *Journal of Engineering Manufacture* 229(2) (2015): S.187-204.
- [9] Ammula, SC; Guo, YB: Surface Integrity of Al 7050-T7451 and Al 6061-Induced by High Speed Milling. *Journal of Aerospace SAE International* 114 (2005): S. 1135-1143.
- [10] ASTM International (2013) E837-13a Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- [11] Chighizola CR, D’Elia CR, Hill MR (2020) Intermethod comparison and evaluation of near surface residual stress in aluminum parts subject to various milling parameters. In: Baldi A et al. (eds) *Residual Stress, Thermomechanics & Infrared Imaging and Inverse Problems, Volume 6. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*. Springer, Cham.

6. Die Autoren dieses Beitrags

Dipl.-Ing. Daniel Weber, geb. 1991, studierte Maschinenbau an der Technischen Universität Kaiserslautern. Seit September 2017 ist er Wissenschaftlicher Mitarbeiter am FBK.

Dr.-Ing. Benjamin Kirsch, geb. 1981, studierte Maschinenbau an der Technischen Universität Kaiserslautern. Seit 2008 ist er Mitarbeiter am FBK und dort seit 2012 Oberingenieur für den Bereich Fertigungstechnologie.

M. Sc. Kevin Gutzeit, geb. 1993, studierte Maschinenbau an der Technischen Universität Kaiserslautern. Seit September 2019 ist er Wissenschaftlicher Mitarbeiter am FBK.

Associate Prof. Dr.-Ing. Barbara S. Linke, geb. **XX**, studierte an der RWTH Aachen und University of California Berkeley Maschinenbau. Seit 2012 ist sie Associate Professor am Lehrstuhl Mechanical and Aerospace Engineering an der University of California Davis.

Prof. Michael R. Hill, geb. **XX**, studierte Maschinenbau an der University of Arizona (Tucson) und Stanford University. Seit 1996 ist er Professor am Lehrstuhl Mechanical and Aerospace Engineering an der University of California Davis.

Prof. Dr.-Ing. Jan C. Aurich, geb. 1964, studierte Maschinenbau mit dem Schwerpunkt Produktionstechnik an der Leibniz-Universität Hannover und der Colorado State University. Seit 2002 leitet er den Lehrstuhl für Fertigungstechnik und Betriebsorganisation (FBK) an der TU Kaiserslautern.

7. Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) und der National Science Foundation (NSF) für die Förderung der beschriebenen Arbeiten im Rahmen des Projektes „NSF/DFG Zusammenarbeit: Analyse der Verzug bestimmenden Faktoren beim Fräsen von Aluminium-Werkstücken“ (Förderkennzeichen DFG: AU 185/64-1; NSF: 1663341).