

Open Data und Open Source schaffen datenintensive Innovationen in der Industrie

Edge Computing Software für den Zerspanungsprozess

E. Uhlmann, M. Polte, T. Hocke, K. Thißen, M. Heper

In aktuellen Forschungsprojekten entwickeln Forscher des Instituts für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb (IWF) Open-Source-Software für Edge Devices. Für die Auslegung der Fertigungsprozesse wird neben den ingenieurwissenschaftlichen Themen auch exemplarisch die Auslegung einer entwickelten Auswertelektronik inklusive der Softwarebereitstellung adressiert. Der interdisziplinäre Ansatz, einschließlich der Softwarebereitstellung, wird exemplarisch an einem DFG-Projekt zur Prozessüberwachung bei der Ultrapräzisionsdrehbearbeitung diskutiert.

STICHWÖRTER

Messen/Steuern/Regeln, Werkzeugmaschinen, Software

Edge computing software for the chipping process – Enabling data-intensive innovation in industry through open data and open source

In current research projects, researchers at the Institute for Machine Tools and Factory Management (IWF) are developing open source software for edge devices. To design the manufacturing processes, the configuration of the evaluation electronics including the software development is addressed in addition to engineering topics. The paper discusses an interdisciplinary approach, including the provision of software, using a DFG-project on process monitoring in ultraprecision turning processes as an example.

1 Einleitung

Vor dem Hintergrund steigender Qualitätsanforderungen an spanend gefertigte Hochleistungs- und Funktionsbauteile gewinnt die Prozessüberwachung zunehmend an Bedeutung. Es gilt vor allem, Fehlerauswirkungen und Störeinflüsse frühzeitig zu erkennen, sodass kritische Prozesssituationen erkannt und vermieden werden können. Die als vierte industrielle Revolution bezeichnete Integration der Produktion mit modernsten Informations- und Kommunikationstechnologien wird häufig unter dem Schlagwort „Industrie 4.0“ zusammengefasst. Grundstein bilden hierbei zwei Bereiche, die Datenerfassung und die Datenzusammenführung. Zur Datenerfassung stehen heute zahlreiche Arten von Sensoren zur Verfügung, die es ermöglichen, jederzeit ein genaues Abbild über den Zustand der Maschine zu erstellen. Diese Sensoren werden in der Regel zugekauft und in die Maschine integriert, in der Grundlagenforschung aber auch selbst entwickelt.

Die produktionsnahe Forschung und Entwicklung steht vor der Herausforderung immer größere Datenmengen aus heterogenen Datenquellen in Echtzeit („Big Data“) zu erfassen, zusammenzuführen und zu analysieren. Aus Sicht der Maschinenhersteller und -anwender ist daher das Ziel, eine geeignete Balance zwischen dem durch die Digitalisierung erzielbaren Mehrwert und dem damit verbundenen Aufwand zu finden.

Der aktuelle Bericht der Enquete-Kommission Künstliche Intelligenz des Deutschen Bundestages sieht die Datenverfügbarkeit und Datenqualität im industriellen Sektor als entscheidenden internationalen Wettbewerbsfaktor an [1]. Demnach benötigen

Unternehmen Zugang zu relevanten und qualitativ hochwertigen Datenbeständen sowie dazu passenden Modellen, welche sie mit wenig Aufwand für die Optimierung und zum Training ihrer Künstliche Intelligenz (KI)-Lösungen nutzen können. Hier fordert die Kommission einerseits, dass Daten aus dem öffentlichen Sektor, wie etwa Statistiken, Geo- oder Mobilitätsdaten, und aus öffentlichen geförderten Forschungsprojekten für KI-Methoden zur Verfügung gestellt werden. Die Forschungs- und Entwicklungsdienstleister mit Produktionsexpertise und hoher Datenkompetenz verlangen daher die Potenziale der Digitalisierung für klein- und mittelständische Unternehmen leichter zugänglich zu machen. Aus diesem Grund arbeiten die Forschenden am IWF in interdisziplinären Gruppen aus Ingenieuren, Softwareentwicklern und Datenwissenschaftlern zusammen, um gemeinsam datengetriebene Innovationen zu ermöglichen.

Den industriellen Partnern des IWF sowie der wissenschaftlichen Fachcommunity werden dabei in enger Kooperation die aufbereiteten Datensätze sowie Softwareentwicklungen als Open Data beziehungsweise als Open Source zur Nachnutzung zur Verfügung gestellt. Die rechtlichen und marktwirtschaftlichen Bedenken der Industriepartner werden bei der Veröffentlichungsform berücksichtigt.

Exemplarisch für dieses Vorgehen werden das übergeordnete Ziel des DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft)-Projekts „Erhöhung der Prozesssicherheit der Ultrapräzisions-Zerspanung durch direkte Temperaturmessung in Schneidteilen aus monokristallinem Diamant mittels Einsatz einer Bor-Dotierung“ vorgestellt sowie die Funktionen der Open-Source-Software erläutert.

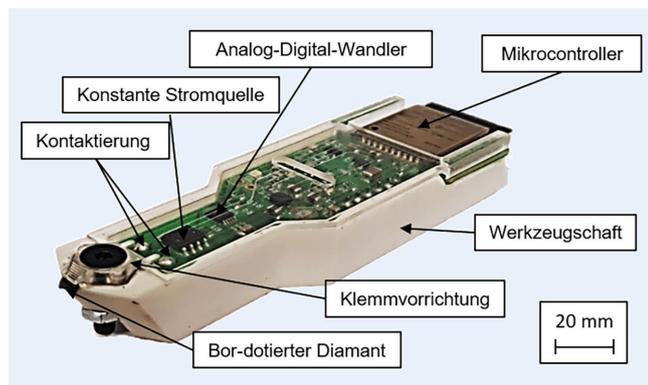


Bild 1. Temperaturmesssystem auf Basis bor-dotierter monokristalliner Diamanten. Grafik: TU Berlin

2 Stand der Technik in der Ultrapräzisionsbearbeitung

Die Ultrapräzisionszerspanung ist ein etabliertes Verfahren zur spanenden Herstellung optischer Komponenten für die Automobilindustrie, die Medizintechnik sowie Luft- und Raumfahrt. Durch den Einsatz von monokristallinen Diamantwerkzeugen mit Schneidkantenrundungen $r_{\beta} \leq 50 \text{ nm}$ ist die Herstellung von optisch funktionalen Oberflächen wie für Gitterstrukturen, Linsen oder Spiegel möglich. Trotz der hohen mechanischen Härte $H_v \approx 10\,000 \text{ HV}$ von monokristallinen Diamanten treten während des Bearbeitungsprozesses Verschleißerscheinungen am Diamantwerkzeug auf. Zurückzuführen ist dies auf einsetzende chemische Prozesse, die direkt aus den im Bearbeitungsprozess entstehenden Zerspantemperaturen ϑ_z resultieren. Zur Charakterisierung und Interpretation dieser Verschleißphänomene ist die Analyse der Temperaturentwicklung in der Wirkzone Werkstück-Werkzeug notwendig. Bisher wurden die Temperaturen ϑ im Schneidteil von Diamantwerkzeugen nicht umfassend genug untersucht. Dies liegt vor allem an der unzureichenden Eignung konventioneller Temperaturmessverfahren bei Auflösung A , Ansprechzeit t_A sowie Messgenauigkeit a_m und Baugröße [2–4].

Ein vielversprechender Ansatz zur hochsensitiven Temperaturmessung während des Zerspanungsprozesses ist die Verwendung von bor-dotierten Diamanten als Temperatursensor. Auf Basis dieses neuartigen Ansatzes sollen die bestehenden Herausforderungen hinsichtlich hoher Ansprechzeiten t_A und geringer Messgenauigkeiten a_m überwunden werden. Dafür wurde am Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb IWF ein Messsystem mit bor-dotierten monokristallinen Diamanten entwickelt und die sensorischen Eigenschaften untersucht. Die Sensoreigenschaften sind mit Blick auf den Zusammenhang zwischen der Temperatur ϑ , dem elektrischen Widerstand R_{el} und der elektrischen Spannung U erfasst worden. Daneben konnte bereits in Zerspanuntersuchungen die grundlegende Funktionsfähigkeit von bor-dotierten monokristallinen Diamanten bei der Erfassung der Zerspantemperaturen ϑ_z während der Bearbeitung von PMMA (Polymethylmethacrylat)-Werkstoffen nachgewiesen werden [5]. Die ersten Ergebnisse zeigen eine grundsätzliche Eignung des entwickelten Messsystems zur präzisen Erfassung der Echtzeittemperaturen ϑ bei der Ultrapräzisionszerspanung. Auch konnte die Abhängigkeit der Zerspantemperatur ϑ_z von der Schnittgeschwindigkeit v_c und der Schnitttiefe a_p nachgewiesen werden. Sowohl eine Verringerung der Schnittgeschwindig-

keiten v_c als auch der Schnitttiefe a_p führen zu unterschiedlichen Temperaturniveaustufen.

Das übergeordnete Ziel des DFG-Projekts ist es, mithilfe von ionenimplantierten bor-dotierten monokristallinen Diamanten direkte Temperaturmessungen im Schneidteil in der Wirkzone Werkstück-Werkzeug unter Ausnutzung der elektrosensorischen Eigenschaften durchzuführen. Zur Erreichung des Projektziels ist es nötig, eine Open-Source-Software zur Prozessüberwachung zu entwickeln, sodass die Ergebnisse auch von der wissenschaftlichen Fachwelt reproduziert werden können. Zudem wird durch die Bereitstellung der Software sichergestellt, dass diese nutzbar ist, das heißt auch von anderen Forschenden für eigene Zwecke adaptiert werden kann. Daher wird auch die wissenschaftliche Nachhaltigkeitsdimension direkt adressiert [6].

3 Messsystem

Eine Übersicht über das entwickelte Messsystem und dessen Hauptkomponenten ist in **Bild 1** dargestellt.

Die Fähigkeit, die Zerspantemperatur ϑ_z in der Wirkzone hochsensitiv zu messen, hängt wesentlich von der Konstruktion des Temperatursensors ab. Um äußere Einflüsse durch umgebende Bauteile zu vermeiden, besteht der Werkzeugschaft aus einer Glaskeramik vom Typ „Macor“. Am Ende des Werkzeugschaftes ist das Schneidteil aus bor-dotiertem Diamanten eingespannt. Zur Verbindung des Schneidteils mit der Auswertelektronik wurden leitfähige versilberte Kupferdrähte verwendet. Zur Bestimmung des Spannungsabfalls U_{RL} beziehungsweise des elektrischen Widerstands R_{el} am Diamanten wurde eine Konstantstromquelle verwendet. Die Konstantstromquelle ist eine integrierte Schaltung des Typs „LM334M“ der Firma Texas Instruments.

Um eine strombedingte Temperaturerhöhung zu vermeiden, wurde ein konstanter Strom von $I = 10 \mu\text{A}$ eingestellt [7]. Die analogen Signale wurden in digitale Signale umgewandelt, um eine elektromagnetisch störungsfreie Messung zu gewährleisten. Dazu wurde ein differenzieller Sigma-Delta-AD-Wandler vom Typ „ADS1115“ der Firma Texas Instruments verwendet. Mit den elektronischen Komponenten konnte eine Auflösung $r_e = 4 \mu\text{V}$ und eine Abtastfrequenz $f_A \leq 27 \text{ Hz}$ erreicht werden.

Unabhängig von dem zu bearbeitenden Werkstoff musste der Zusammenhang zwischen der Zerspantemperatur ϑ_z und dem Spannungsabfall U_{RL} beziehungsweise dem elektrischen Widerstand R_{el} über den Diamanten vorab in Kalibrationsversuchen experimentell bestimmt werden (**Bild 2**).

Dafür wurde jeder einzelne Diamant gezielt temperiert und der Spannungsabfall U_{RL} zur zugehörigen Temperatur ϑ abgespeichert, um eine direkte Korrelation zu ermitteln. Die so entstandene diamantspezifische Kennlinie wurde anschließend in Form einer Lookup-Tabelle in das Graphical User Interface (GUI) der verwendeten Open-Source-Software geladen. Mit diesen Informationen und einer linearen Interpolation der diskreten Datenpunkte konnte die GUI neben der Spannung U auch die Temperatur ϑ in Echtzeit anzeigen.

Um die Wiederverwendbarkeit von Open-Source-Software zu gewährleisten, wurde im gesamten Projekt auf offene Hard- und Software geachtet. Als Mikrocontroller wurde daher ein „Arduino Due A000062“ der Firma Arduino verwendet, der sich bereits in vielen Anwendungen bewährt hat. Die Echtzeiterfassung der Daten erfolgte somit mit dem Arduino durch einen Open-Source-Code. Die Daten wurden anschließend über eine USB-Verbin-

dung an einen PC übertragen. Der Datentransfer zwischen dem Arduino und dem PC wurde wiederum durch eine Open-Source-Software bestimmt.

4 Open-Source-Software

Die Open-Source-Software soll sowohl für den industriellen Einsatz als auch für die wissenschaftliche Grundlagenforschung nutzbar sein. Besonderes Augenmerk wurde deshalb auf die zu entwickelnde Programmstruktur gelegt. Dazu wurde das „Model-View-Controller (MVC) Design Pattern“, eine Struktur aus der Softwareentwicklung, für die Code-Struktur verwendet (**Bild 3**).

Da die Software jedoch mit der physikalischen Welt interagiert, wurde das MVC-Design um die Ebene der Edge Devices erweitert. Dadurch erleichtert das MVC-Design die Handhabung komplexer Anwendungen und erlaubt im Allgemeinen, veraltete durch neue Hardware zu ersetzen, ohne den gesamten Programmcode neu entwerfen zu müssen.

In der Logik des MVC-Designs stellt das Temperatormesssystem mit den bor-dotierten monokristallinen Diamanten das Edge Device sowie der Arduino den Controller mit Schreib- und Lesezugriff auf das Edge Device dar. Für den Arduino wurde ein Open-Source-Programm entwickelt, damit dieser die digitalen Werte des Analog-Digital-Wandlers interpretieren kann und als Datenerfassungsboard fungiert. Die Echtzeiterfassung der Daten erfolgt somit durch den Arduino, wobei die Daten anschließend durch eine USB-Verbindung an einen Messlaptop übergeben werden. Der Datentransfer wird dabei durch einen Open-Source-Code (C beziehungsweise C++) determiniert.

Die verbreitetste Programmiersprache im Data-Science-Kontext ist „Python“, sodass diese für die Orchestrierung der gesamten Software verwendet wird. Sie gilt grundlegend als leicht zu erlernende Programmiersprache mit einer einfachen Syntax, einer großen Bibliothek von Packages sowie einfachen Integrationsmöglichkeiten mit anderen konventionellen Programmiersprachen wie C und C++. Es handelt sich um eine Open-Source-Programmiersprache mit umfangreichen Community-Entwicklungen, einfacher Integration mit Webdiensten, benutzerfreundlichen Datenstrukturen und GUI-basierten Desktop-Anwendungen. Es gibt zudem viele weitere Anwendungen, für welche die Programmiersprache Python geeignet ist. Darunter zählen zum Beispiel das Data Engineering und das KI-Modeling, Webentwicklungen und das Internet der Dinge (IoT). Dies kann zugleich auch mit Edge Devices wie Raspberry Pi und Arduino realisiert werden. Die logischen Untergliederungen von Model und View des MVC-Designs werden daher direkt auf einem Messlaptop implementiert.

Der Open-Source-Code für den Arduino und der Pythoncode für das GUI sowie die Orchestrierung der Software können mit der Entwicklungsplattform Github umgesetzt werden [8]. Für die Nachnutzung der Software und die adaptierbare Softwareentwicklung mittels Treiberkommunikation kann das MVC-Design genutzt werden [9]. Die Software selbst ist auch unabhängig von einer Python-Installation als exe-Datei ausführbar. Für nähere Informationen kann die Readme-Datei konsultiert werden.

4.1 Graphical User Interface

Die Funktionen der Software sind die Transformation, die Visualisierung und die Speicherung der Temperaturdaten inklusi-

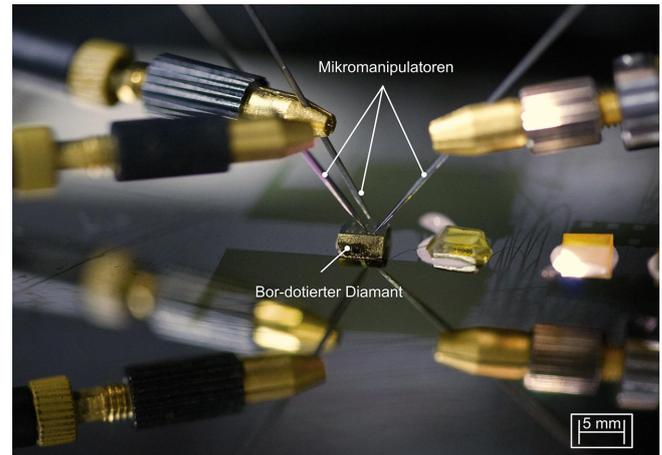


Bild 2. Experimenteller Aufbau gezielt temperierter Diamanten zur Kalibration. Foto: TU Berlin

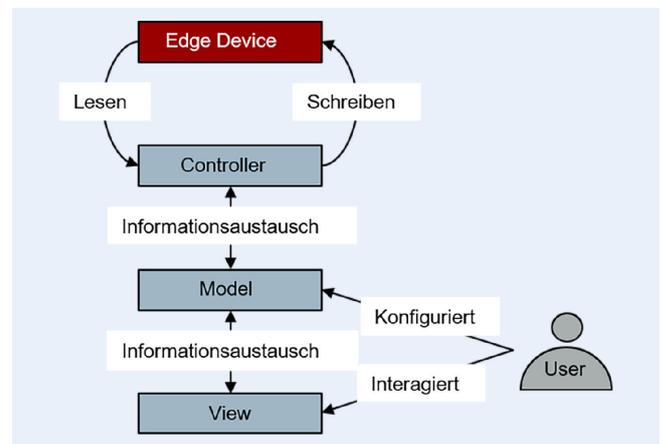


Bild 3. Darstellung des Model-View-Controller (MVC) Design Patterns mit Erweiterung der Ebene der Edge Devices. Grafik: TU Berlin

ve Metadaten. Der Benutzer kann mit diesen Funktionalitäten der Software über das GUI interagieren (**Bild 4**).

Über die Eingabe „Channel“ wird der Eingang des A/D-Wandlers mit den Auswahlmöglichkeiten 0–3 ausgewählt. Über den Befehl „Duration“ wird die maximale Dauer einer Messung angegeben. Nach Ablauf der eingegebenen Zeit t wird eine Messung automatisch beendet. Grundsätzlich kann eine Messung aber auch jederzeit über die Schaltfläche „Stop“ beendet werden. Die Messauflösung im jeweiligen Messbereich wird über die Einstellung der „Verstärkung“ festgelegt, wobei mehrere Auswahlmöglichkeiten zur Verfügung stehen. Das „Delay“ bestimmt die Abtastzeit und damit die Wartezeit zwischen zwei Messungen. Der Datenexport erfolgt über ein Auswahlfenster, wobei unterschiedliche Dateitypen zur Weiterverarbeitung ausgegeben werden können.

5 Ausblick

In diesem Beitrag wurde die interdisziplinäre Arbeitsweise der Forschenden des IWF am Beispiel eines Grundlagenprojekts der Ultrapräzisionsbearbeitung vorgestellt. Die Bereitstellung einer Open-Source-Software ermöglicht die Temperaturmessung in der Wirkzone Werkstück-Werkzeug bei deutlich vereinfachter Handhabung durch den Bediener. Während der Bearbeitung kann damit eine Auflösung $r_c = 4 \mu\text{V}$ und eine Abtastfrequenz

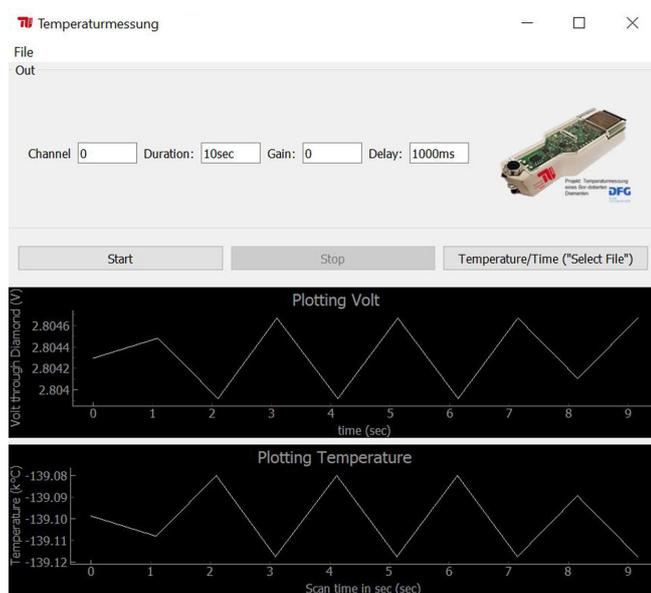


Bild 4. Exemplarische Darstellung des Graphical User Interface zur Temperaturmessung mit dem entwickelten Temperaturmesssystem (Aufnahme erfolgte ohne Diamant). Grafik: TU Berlin

$f_A \leq 27$ Hz erreicht werden. Ohne die Software wäre die Kommunikation mit dem Temperaturmesssystem nicht möglich. Insbesondere die Datenvorverarbeitung der Software reduziert den Arbeitsaufwand für die Analyse und Reproduzierbarkeit bei aktuellen Experimenten erheblich. Die Temperaturinformation aus Experimenten der Ultrapräzisionsbearbeitung wird zur besseren Charakterisierung von Verschleißphänomenen am monokristallinen Diamanten verwendet und in naher Zukunft publiziert.

Ferner erfüllen die Forscherinnen und Forscher ihren gesellschaftlichen Auftrag, indem sie neben der Bereitstellung informationsreicher Datensätze für die Industrie auch die entwickelte Software der wissenschaftlichen Fachgemeinschaft als Open Source und zur Nachnutzung zur Verfügung stellen. In parallelen Projekten arbeiten die Forschenden zudem an der Entwicklung von Apps für spezifische Anwendungen von kleinen und mittelständischen Unternehmen.

Diese Apps werden direkt an der Maschinensteuerung der Werkzeugmaschine implementiert, sodass komplexe Teilprozesse der Bearbeitung durch ein KI-Modell ausgeführt werden können oder diese als Entscheidungshilfe dient. Es ist aber auch denkbar, Maschinensteuerungsdaten aus datenintensiven Experimenten, also die Historie des Werkzeugeinsatzes, mit Qualitätsdaten von gefertigten Bauteilen zusammenzuführen, sodass diese Informationen für einen iterativen Optimierungsprozess von Werkzeuggeometrien und Werkstoffen genutzt werden können. Auch eine Online-Überwachung des Bearbeitungsprozesses ist möglich, um

DANKSAGUNG

Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung dieses Grundlagenforschungsprojekts durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft e.V. (DFG). Das Forschungsprojekt profitiert zudem von einer engen Zusammenarbeit mit der Firma Contour Fine Tooling für das Schleifen und Vorbereiten der monokristallinen Diamanten.

Fertigungsfehler aus Vorprozessen während der Bearbeitung zu erkennen und Gegenmaßnahmen einzuleiten.

Literatur

- [1] Kolbe, D.: Gesellschaftliche Verantwortung und wirtschaftliche, soziale und ökologische Potenziale. Bericht der Enquete-Kommission Künstliche Intelligenz 19/23700 (2020). Internet: dip21.bundestag.de/dip21/btd/19/237/1923700.pdf. Zugriff am 07.06.2023
- [2] Kurz, M.; Geisert, C.; Oberschmidt, D. et al.: Measurement of tool temperatures in the tool-chip contact region by embedded thin film thermocouples. Proceedings of the 5th International Conference on Micro-Manufacturing ICOMM74M, 2010, Madison, Wisconsin USA, pp. 81–84
- [3] Uhlmann, E.; Oberschmidt, D.: Process integrated temperature measurement of small monocrystalline diamond end mills while ultra-precision milling. Proceedings of the 7th euspen International Conference, 2007, pp. 424–427
- [4] Sato, M.; Tamura, N.; Tanaka, H.: Temperature Variation in the Cutting Tool in End Milling. Journal of Manufacturing Science and Engineering 133 (2011) 2, # 021005
- [5] Uhlmann, E.; Polte, J.; Polte, M. et al.: Boron-doped monocrystalline diamond as cutting tool for temperature in the cutting zone. 9th CIRP Conference on High Performance Cutting (HPC 2020), pp. 258–261
- [6] Mauere, W.; Scherzinger, S.: Digitale Forschungswerkzeuge – Nachhaltigkeit von Software und Daten. In: Präsidium des Deutschen Hochschulverband Forschung & Lehre (Hrsg.): alles was die Wissenschaft bewegt (2021) 10, S. 816–817
- [7] Uhlmann, E.; Oberschmidt, D.; Frenzel, S. et al.: Einsatz von Bor-dotierten Diamanten beim sensorintegrierten UP-Diamantdrehen. Diamond Business (2015) 3, S. 26–33
- [8] Heper, M.: Edge Computing Software für den Zerspanungsprozess. Ermöglichung datenintensiver Innovationen in der Industrie durch Open Data und Open Source. Internet: github.com/MartinHeperIWF/Edge_Computing_Wt_online. Zugriff am 07.06.2023
- [9] Carattino, A.: Python for the lab. Amsterdam: Lulu.com 2020



Prof. Dr.-Ing. **Eckart Uhlmann**

Foto: TU Berlin

Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK
Pascalstr. 8–9, 10587 Berlin
eckart.uhlmann@ipk.fraunhofer.de
www.ipk.fraunhofer.de

Toni Hocke, M.Sc.

Martin Heper, M.Sc.

Dr.-Ing. **Mitchel Polte**

Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb IWF
Technische Universität Berlin
martin.heper@iwf.tu-berlin.de
Pascalstr. 8–9, 10587 Berlin

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)