



Erfolgreich Senkerodieren im Werkzeugbau

2021

Wolfgang Boos
Tim Herrig
Andreas Klink
Kristian Arntz
Marcel Prümmer
Rainer Horstkotte
Sebastian Schneider



mit Unterstützung der





Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen

Das Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen steht mit seinen rund 1.000 Mitarbeitenden weltweit als Synonym für erfolgreiche und zukunftsweisende Forschung und Innovation auf dem Gebiet der Produktionstechnik. In vier Forschungsbereichen werden sowohl grundlagenbezogene als auch an den Erfordernissen der Industrie ausgerichtete Forschungsvorhaben durchgeführt. Darüber hinaus werden praxisgerechte Lösungen zur Optimierung der Produktion erarbeitet. Das WZL deckt mit den vier Lehrstühlen Fertigungstechnik, Werkzeugmaschinen, Messtechnik und Qualität sowie Produktionssystematik sämtliche Teilgebiete der Produktionstechnik ab.



Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT

Aufgabe des Fraunhofer IPT ist die Umsetzung wissenschaftlicher Erkenntnisse in wirtschaftlich nutzbare, einzigartige Innovationen auf dem Gebiet der Produktion. Das Fraunhofer IPT fördert und betreibt anwendungsorientierte Forschung, Umsetzung von Forschungsergebnissen und Beratung mit Relevanz und Wirkung zum unmittelbaren Nutzen für die Industrie und leistet dadurch einen signifikanten Beitrag zu deren Wettbewerbsfähigkeit. Das Geschäftsfeld »Werkzeugbau« des Fraunhofer IPT bietet Unternehmen, Zulieferern und Kunden des Werkzeug- und Formenbaus ganzheitliche Lösungen, damit diese die vielfältigen Herausforderungen ihrer Branche erfolgreich bewältigen.

Impressum

Erfolgreich Senkerodieren im Werkzeugbau

Copyright © 2021

Autoren:

Wolfgang Boos, Tim Herrig, Andreas Klink, Kristian Arntz, Marcel Prümmer, Rainer Horstkotte
Sebastian Schneider

Design: Kevin Sander, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT

ISBN: 978-3-946612-31-5

Werkzeugmaschinenlabor WZL der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

Campus-Boulevard 30

D-52074 Aachen

www.wzl.rwth-aachen.de

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT

Steinbachstraße 17

D-52074 Aachen

www.ipt.fraunhofer.de

Bildquelle: Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT und Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen

Erfolgreich Senkerodieren im Werkzeugbau

2021

Wolfgang Boos
Tim Herrig
Andreas Klink
Kristian Arntz
Marcel Prümmer
Rainer Horstkotte
Sebastian Schneider



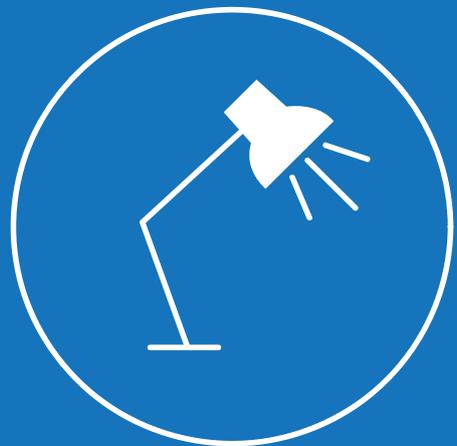
mit Unterstützung der



Spotlight

In der globalisierten und dynamischen Welt von heute muss sich neben anderen Branchen auch der Werkzeugbau in einem stark kompetitiven Wettbewerb behaupten. Steigende Anforderungen an Werkzeuge und Formen bedingen eine stetige Weiterentwicklung der zur Fertigung benötigten Technologien. In den letzten Jahren hat sich die technologische Leistungsfähigkeit der Senkerosion signifikant weiterentwickelt. Sich dadurch eröffnende, neue Bearbeitungsmöglichkeiten müssen jedoch gegenüber den damit einhergehenden Herausforderungen abgewogen werden.

Die Studie „Erfolgreich Senkerodieren“ gibt einen Einblick in derzeitige Herausforderungen und Entwicklungen, wie zum Beispiel variierende Bearbeitungsdauern, im Bereich der Senkerosion. Hierzu getätigte Untersuchungen werden anhand einer durchgeführten Umfrage und der Fertigung eines Demonstratorbauteils in ausgewählten Unternehmen vorgestellt.



50 – 200
mm³/min

**...beträgt die typische
Schruppabtragrate bei
Stahl**

1 – 20
mm³/min

**...beträgt die typische
Schlichtabtragrate bei
Stahl**

Ra < 0,1 μm

**...betragen die besten
Oberflächengüten**

80 %

**...ist der Anteil der
Graphitelektroden**



***Kontrolle des Senkererosionsprozesses mit kohlenwasserstoff-
basiertem Dielektrikum***

Executive Summary

Die Senkerosion ist eine beständige Schlüsseltechnologie im Werkzeug- und Formenbau mit Potenzial.

Die Senkerosion stellt eine etablierte Schlüsseltechnologie im Werkzeug- und Formenbau dar. Auch wenn ein gewisser Verdrängungswettbewerb durch die HSC-Fräsbearbeitung in den letzten Jahrzehnten stattgefunden hat, ist sie immer noch fester Bestandteil im heutigen Technologieportfolio führender Unternehmen. Die Bedeutung wird zukünftig auch mindestens erhalten bleiben, da die technologischen Weiterentwicklungen sowie die Möglichkeiten zur digitalen Prozesseinbindung und ganzheitlichen Automatisierung alle notwendigen fertigungstechnischen Voraussetzungen hierfür schaffen. Eine im Technologievergleich resultierende sehr günstige Kostenrechnung und die einfache Einbindung in Prozessketten haben sogar das Potenzial, verloren gegangene Anwendungsbereiche und Geometrielemente mit vergleichsweise niedrigen Aspektverhältnissen in Werkzeugen zurückzugewinnen.

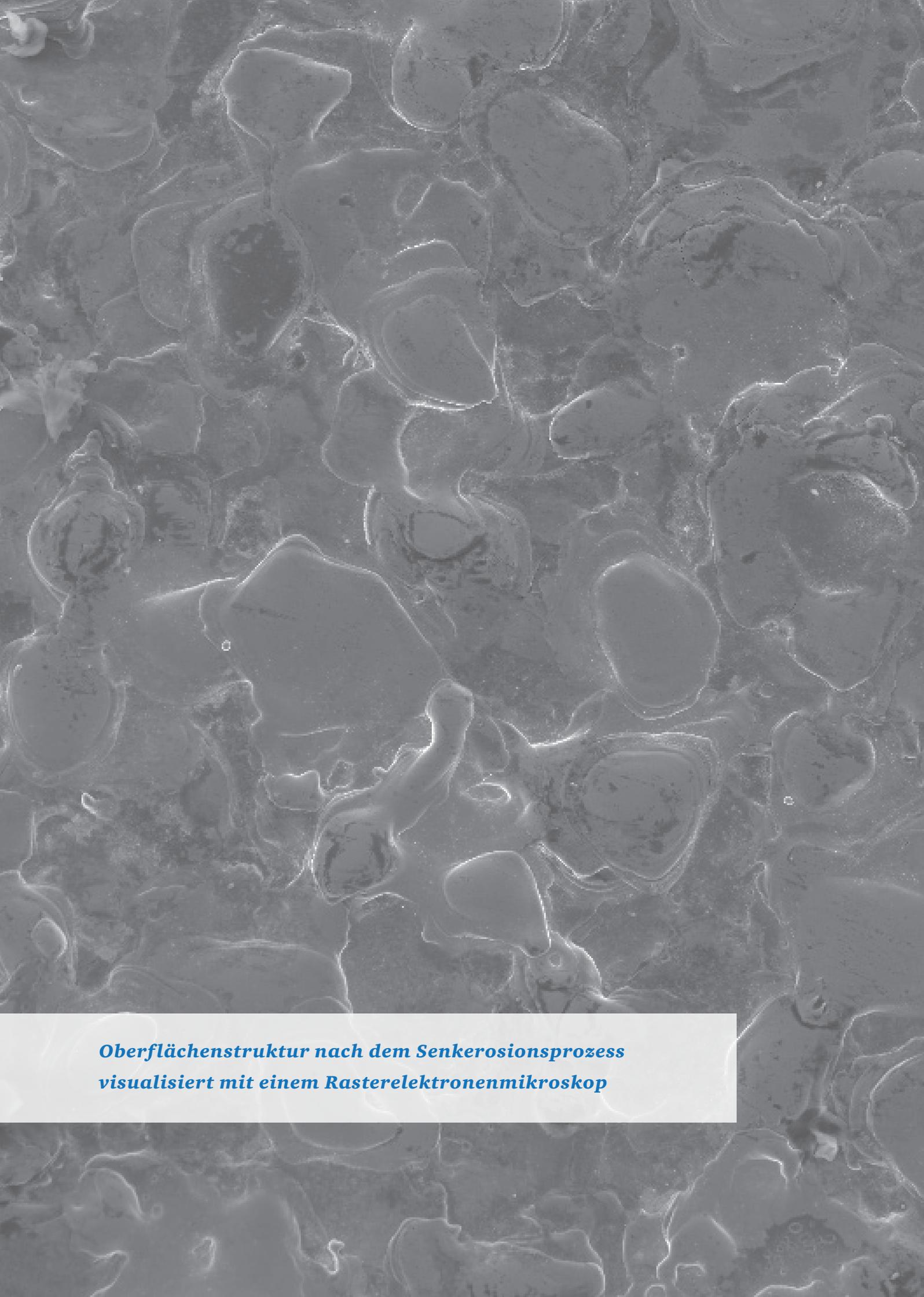
Durch die Weiterentwicklung der Werkzeugmaschinen und insbesondere der digitalen Generatortechnik in Kombination mit Regelungsstrategien konnten in den letzten Jahren übergeordnet der Werkzeugverschleiß deutlich reduziert und die Reproduzierbarkeit der Einsenkungen z.B. bei einer Mehrnestbearbeitung durch geeignete Prozessführung signifikant gesteigert werden. Dies trifft maßgeblich für die Schrapp- und überwiegende Teile der Schlichtbearbeitung zu, bei denen der Verschleiß – neben einer kinematischen Kompensation – durch werkzeugseitige Werkstoffabscheidung im Mikrometerbereich vorgehalten werden kann („Nullverschleiß“). Bei der Feinschlichtbearbeitung, die in der Regel auch mit der Realisierung hochpräziser Geometrien gekoppelt ist, müssen der Elektrodenverschleiß detaillierter betrachtet und gegebenenfalls individuelle Kompensationsstrategien – beispielsweise durch Einsatz

zusätzlicher Schlichtelektroden – entwickelt werden. Die Physik lässt sich eben nicht überlisten! In der Frage nach dem geeigneten Werkzeugelektrodenwerkstoff hat sich in den letzten Jahren der Trend hin zum Graphiteinsatz weiter fortgesetzt. Der Werkstoff bietet – neben einem reduzierten Verschleißverhalten – das große Potenzial einer einfachen und insbesondere automatisierbaren Elektrodenherstellbarkeit. So lassen sich Geometrielemente oft gut in einer Elektrode zusammenfassen und in einer Maschinenverkettung mit einer Fräsmaschine sehr effizient realisieren. Basierend auf den Bedarfen lassen sich somit zukünftig übergeordnet Optima hinsichtlich der Maschinenauslastungen beider Technologien in Abhängigkeit von der Anzahl der Schlichtelektroden und unter Berücksichtigung der erreichbaren Geometriegenauigkeiten realisieren. Lediglich zur Erzielung bester Oberflächengüten ist Kupfer als Elektrodenwerkstoff ein wichtiges Mittel der Wahl im industriellen Einsatz, da es mit der höchsten Oberflächenhomogenität zu bearbeiten ist und somit das beste Ergebnis erzielt werden kann.

Im Bereich der Realisierung bester Oberflächengüten bietet die Senkerosion heute ein wertvolles technologisches und ökonomisches Potenzial. So lässt sich heute grundsätzlich endkonturnäher und zielgerichtet bis zu besseren Oberflächengüten erodieren, um manuellen Polieraufwand zu reduzieren. Allerdings bedarf die erzielte Oberflächenqualität einer Nachprüfung hinsichtlich ihres Ergebnisses, da sie entgegen der allgemein verbreiteten Annahme keine zwingende Prozesseinstellgröße sondern eine resultierende Oberflächengüte darstellt. Ob die gewählte VDI-Klasse wirklich erreicht wurde, muss im besten Fall immer nachgeprüft werden, um auftretende Störgrößeneinflüsse aufzudecken und zu korrigieren.

In diesem Zusammenhang ist festzuhalten, dass es weiterhin ein gewisses Wissensdefizit auf Anwenderseite hinsichtlich der Technologie der Senkerosion gibt, um notwendige Prozesseinschätzungen durchführen und individuell flexible Prozessanpassungen vornehmen zu können. Nüchtern betrachtet haben wir es an dieser Stelle mit einer gewissen Ambivalenz zu tun. Auf der einen Seite haben sich die Maschinen über die letzten Jahrzehnte von Spezialexemplaren, die nur von Experten zu bedienen waren, hin zu Standardwerkzeugmaschinen entwickelt, die heute in der notwendigen Handhabung „von jedermann“ mit technischer Ausbildung schnell zu bedienen sind. Auf der anderen Seite bedarf es jedoch weiterhin definitiv der Aneignung von grundlegendem Hintergrundwissen zum Prozess, um jederzeit das Ergebnis selbstkritisch hinterfragen und überprüfen sowie darauf aufbauend sinnvolle Prozessanpassungen vornehmen zu können. Hierzu muss allerdings beispielsweise der Technologie- und Wissenstransfer von Anbieter- und Experten- sowie von Anwender- und Experten- noch maßgeblich verbessert bzw. die Technologie im Rahmen der aktuellen Weiterentwicklungen gezielt angepasst werden.

Großes Potenzial bieten hier die neuen Möglichkeiten des maschinellen Lernens, der Entwicklung und Anwendung künstlicher Intelligenz sowie der Etablierung entsprechender Daten- und Prozessmodelle innerhalb von Industrie 4.0 – Ansätzen und geschlossener automatisierter Qualitätsregelkreise für die Senkerosion. Ganzheitlich gilt es nun mit allen Beteiligten, also Werkzeugmaschinen- und Zubehörherstellern, Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen und natürlich Endanwendern, zuzupacken, denn es gibt noch viel zu tun – und auch die anderen Technologien schlafen nicht bei der kontinuierlichen Weiterentwicklung.



***Oberflächenstruktur nach dem Senkerosionsprozess
visualisiert mit einem Rasterelektronenmikroskop***

Studiendesign

Datengrundlage dieser Studie ist eine Befragung unter führenden Werkzeugbaubetrieben, der Wettbewerb „Excellence in Production“ sowie eine Demonstratorbearbeitung.

Die WBA Werkzeugbau Akademie Aachen dient als zentraler Ansprechpartner für Werkzeugbaubetriebe in den Geschäftsfeldern Industrieberatung, Weiterbildung und Forschung. In Kooperation mit dem Lehrstuhl für Produktionssystematik des Werkzeugmaschinenlabors WZL der RWTH Aachen Universität und dem Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie wurde in den letzten Jahren eine umfangreiche Datenbank mit mehr als 1.000 Benchmarkingdatensätzen deutscher und internationaler Werkzeugbaubetriebe aufgebaut. Diesen wird hiermit die Möglichkeit geboten eine technologische und organisatorische Bewertung der eigenen Leistungsfähigkeit im Vergleich zum Wettbewerb durchführen zu lassen.

Die Studie „Erfolgreich Senkerodieren“ wurde von der Abteilung Abtragende Fertigungsverfahren des Werkzeugmaschinenlabors und der Abteilung Technologieorganisation und Vernetzung am Fraunhofer IPT durchgeführt, um die in Industrie- und Forschungsprojekten gesammelte Erfahrung bei der Gestaltung von Senkerosionsprozessen den Werkzeugbaubetrieben zu vermitteln. Ziel der Studie ist es, einen Überblick über den derzeitigen Status quo des Senkerosionsprozesses im Werkzeugbau zu geben und Optimierungspotenziale aufzuzeigen.

Die Grundlage der Studie bilden zwei Umfragen zum Status quo des Senkerosionsprozesses in der Werkzeugbaubranche. Parallel wurde von sieben ausgewählten Unternehmen ein Demonstrator gefertigt, sodass durch eine Analyse der eingesetzten Erosionsstrategien ein direkter Vergleich der unternehmensinternen Prozesse möglich war.

Umfrage zum Status quo

Grundlage der vorliegenden Studie ist eine Umfrage unter 29 Werkzeugbaubetrieben, die allgemein zu ihrem Unternehmen und zu ihren Senkerosionsprozessen befragt wurden. Die befragten Unternehmen sind hauptsächlich in der Automobilindustrie, Kunststoffindustrie, Elektrotechnik oder Medizintechnik tätig. Es sind sowohl reine betriebsinterne Werkzeugbauabteilungen (74 %) als auch Werkzeugbauer, die als Dienstleister am Markt auftreten (26 %), vertreten. Die Unternehmensgröße ist bei 67 % der befragten Unternehmen größer als 100 Mitarbeiter.

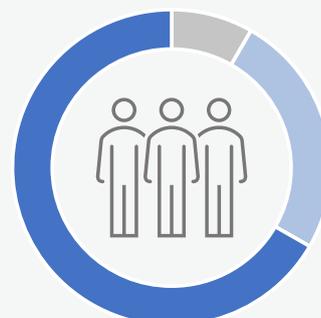
Umfrage zur Demonstratorfertigung

Der Demonstrator wurde von einem Konsortium von sieben Unternehmen und Mitarbeitern des Fraunhofer IPT sowie des Werkzeugmaschinenlabors WZL entwickelt. Im Zuge der Demonstratorfertigung wurden die teilnehmenden Unternehmen gebeten, Auskunft über die Herangehensweise und eingesetzte Erosionsstrategien zu geben.

Struktur der Studie

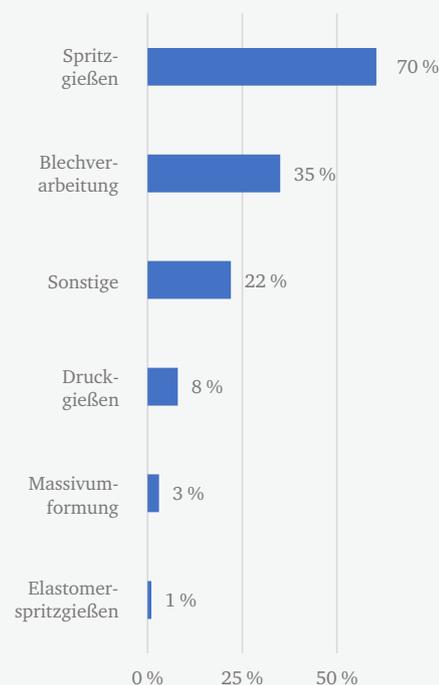
Der Aufbau der Studie ist so strukturiert, dass zunächst der aktuelle Stand der Technik in der Senkerosion beleuchtet wird. Hieraus werden technologische Handlungspotenziale abgeleitet. Diese Potenziale werden am Demonstrator sichtbar. Es werden die verschiedenen Herangehensweisen analysiert und Handlungsempfehlungen gegeben.

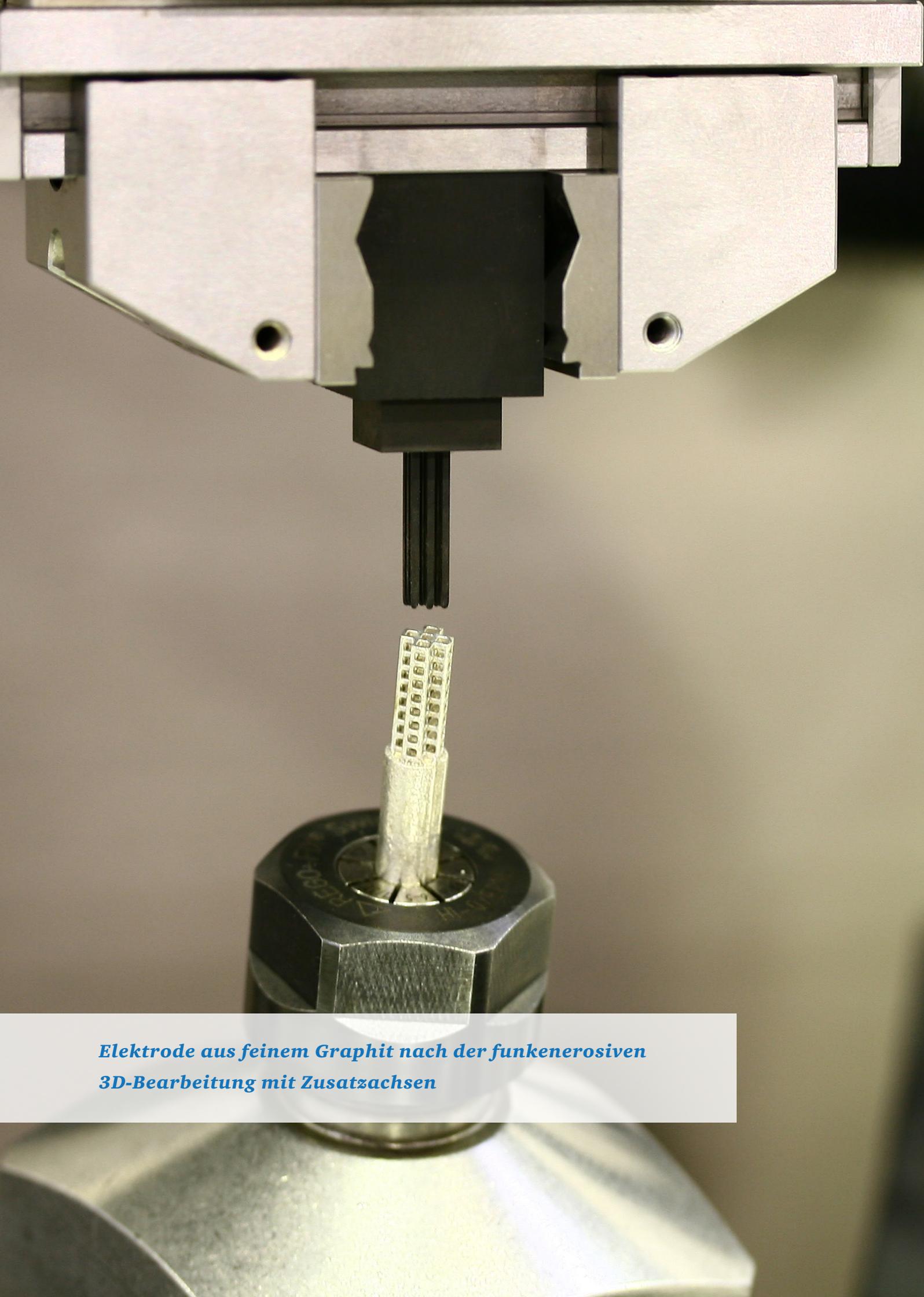
Mitarbeiteranzahl



66,7 %	> 100 Mitarbeiter
25 %	51–100 Mitarbeiter
8,3 %	20–50 Mitarbeiter

Werkzeugart





*Elektrode aus feinem Graphit nach der funkenerosiven
3D-Bearbeitung mit Zusatzachsen*

Senkerosion – Status quo

Die Senkerosion bietet umfassende Einsatzmöglichkeiten im Werkzeugbau!

Die Senkerosion kommt immer dann zum Einsatz, wenn konventionelle Fräsverfahren an ihre Grenzen stoßen. Dies ist der Fall, wenn entweder der Werkstoff schwer zerspanbar ist oder filigrane Strukturen erzeugt werden müssen. Die richtige Wahl der Bearbeitungsstrategie ist die Grundlage für einen optimalen Kompromiss aus geringen Fertigungskosten sowie geforderter Qualität. Sowohl heute als auch in Zukunft (siehe auch umseitige Prognose für 2025) hat die Senkerosion entscheidenden Fertigungsanteil sowie eine hohe Technologiebedeutung im Werkzeug- und Formenbau. Die wichtigsten Einflussfaktoren für den Senkerosionsprozess sind dabei der zu bearbeitende Werkstoff, der genutzte Werkzeugwerkstoff, die Erosionsmaschine selbst und die Technologieauswahl.

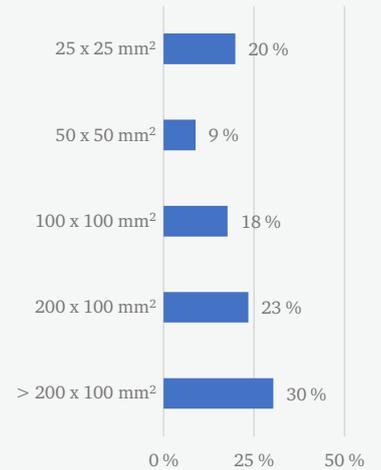
Werkstück

Die Umfrage zeigt, dass Werkstücke in verschiedenen Größen senkerosiv bearbeitet werden. Beim überwiegenden Teil der Werkstücke ist die bearbeitete Stirnfläche kleiner als 100 x 100 mm². Allerdings sind auch knapp 30 % der Kavitätsstirnflächen größer als 200 x 100 mm². Der am weitesten verbreitete Werkstoff unter den befragten Unternehmen war der Warmarbeitsstahl 1.2343. Der am häufigsten bearbeitete Härte-

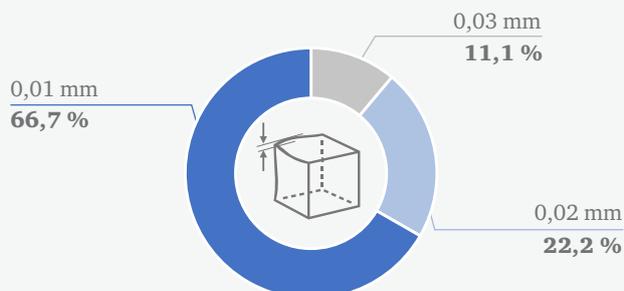
bereich liegt zwischen 50 und 60 HRC. Aber auch sehr harte Werkstoffe (> 60 HRC) sind relevant und werden senkerodiert. Die Oberflächengüte ist in der Senkerosion über das VDI-Normal genormt. Die VDI-Klassen sind umgerechnete Werte für den arithmetischen Mittenrauwert Ra. Die meisten Werkzeugbaubetriebe gaben in der Umfrage VDI-Klassen größer VDI21 nach dem Erodieren an. Das entspricht einem arithmetischen Mittenrauwert von Ra > 1,12 µm. Gleichzeitig wurden bei der durchschnittlichen Oberflächengüte für das finale Bauteil abweichende Angaben mit reduziertem Ra-Wert gemacht, die dann nur durch eine Nachbehandlung z.B. durch Polieren zu erreichen sind.

Die Umfrage zeigt auch, dass hohe Anforderungen an die Genauigkeit gestellt werden. So wird in über der Hälfte der erodierten Bauteile eine Genauigkeit von 10 µm oder weniger erwartet. Mit einhergehend sind sehr kleine Kantenradien, die positionsabhängig frästechnisch nicht mehr herstellbar sind. Ein solcher Kantenradius kleiner 100 µm wird in über der Hälfte der Bauteile gefordert. Auch hohe Aspektverhältnisse sind immer eine Herausforderung für die Fertigungstechnik. Die Umfrage ergab, dass beim Senkerodieren besonders hohe Aspektverhältnisse (> 10) erreicht werden können.

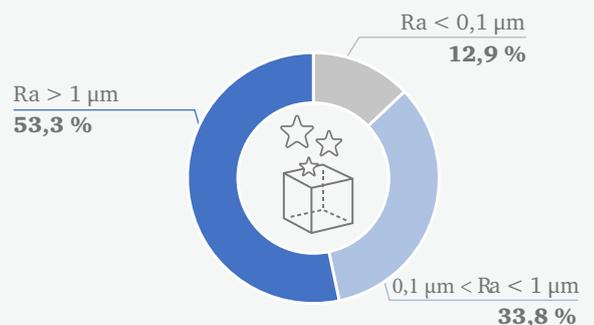
Werkzeuggröße
Stirnfläche



Geometriegenauigkeit



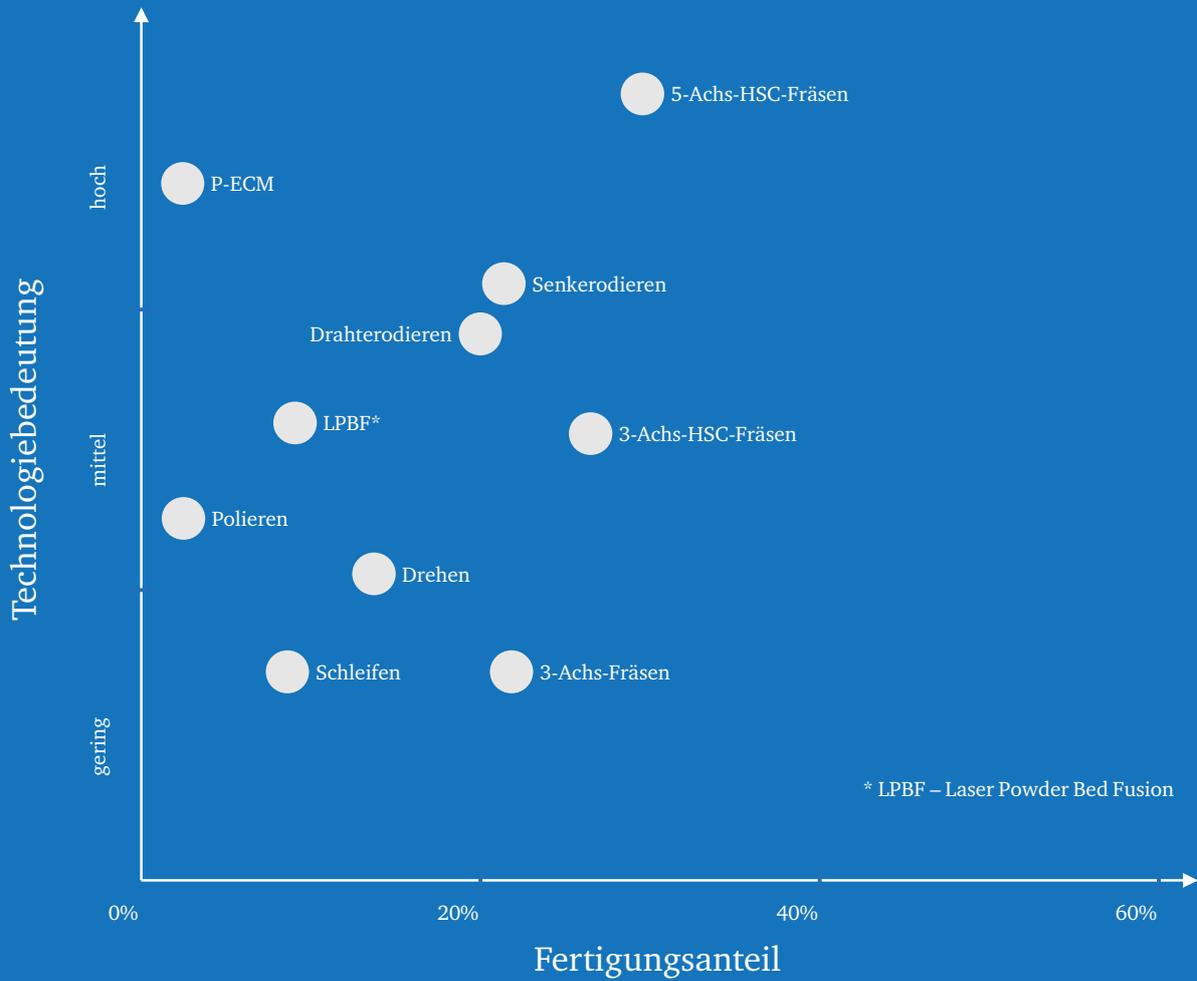
Oberflächengüte



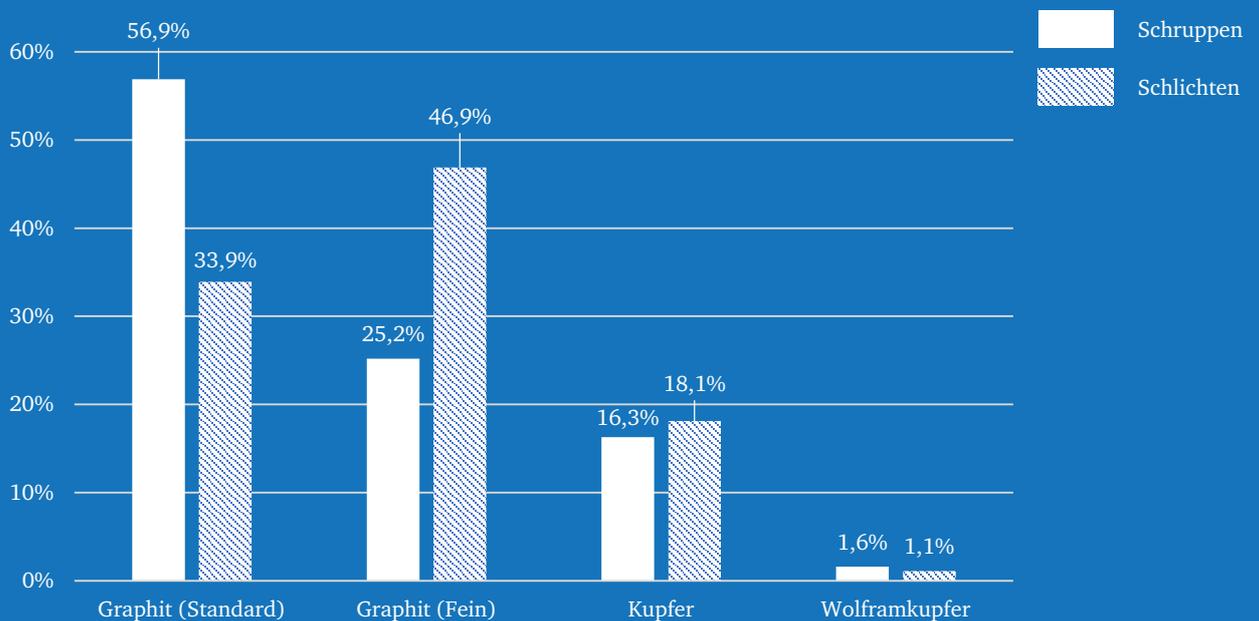


Eingesetzte Technologien im Werkzeugbau im Jahr 2025

[Mehrfachnennung möglich]



Eingesetzte Elektrodenwerkstoffe in der Senkerosion



Werkzeug

Als Standardwerkzeugwerkstoff hat sich in den letzten Jahren Graphit durchgesetzt. Dies zeigt sich auch in den hier vorgestellten Ergebnissen. Der Anteil an Graphitelektroden liegt bei etwa 80 % sowohl im Bereich der Schruppbearbeitung als auch im Schlichten. Weitere verwendete Werkzeugwerkstoffe sind Kupfer und Wolframkupfer. Bei Graphit wird gemeinhin zwischen grobkörnigem und feinkörnigem Graphit unterschieden. Während in der Schruppbearbeitung meist grobkörniger Graphit eingesetzt wird (ca. 60 %), wird in der Schlichtbearbeitung der feinkörnige Graphit genutzt (ca. 50 %). Werkstoffphysikalisch bietet Graphit den Vorteil eines reduzierten Verschleißverhaltens. Darüber hinaus bietet es das große Potenzial einer einfachen und insbesondere automatisierbaren Elektrodenherstellbarkeit. So lassen sich Geometrielemente oft gut in einer Elektrode zusammenfassen und in einer Maschinenverkettung mit einer Fräsmaschine sehr effizient realisieren. Basierend auf den Bedarfen lassen sich somit gerade im (automatisierten) Werkzeugbau übergeordnet Optima hinsichtlich der Maschinenauslastungen beider Technologien in Abhängigkeit von der Anzahl der Schlichtelektroden und unter Berücksichtigung der erreichbaren Geometriegenauigkeiten realisieren. Lediglich zur Erzielung bester Oberflächengüten ist Kupfer als Elektrodenwerkstoff ein wichtiges Mittel der Wahl im industriellen Einsatz, da es mit der höchsten Oberflächenhomogenität zu bearbeiten ist und somit das beste Ergebnis erzielt werden kann.

Aufgrund des Funkenspaltes muss die Elektrode ein Untermaß gegenüber der finalen Geometrie besitzen. Das gewählte Untermaß bestimmt zum einen die maximale Entladeenergie, also die maximale Abtragraten, aber auch die minimal erzeugbaren Details. Somit ist das zu wählende Untermaße stark von der finalen Geometrie abhängig. Trotzdem geben fast zwei Drittel der Unternehmen an, die Untermaße in der Fertigung standardisiert zu haben. Daher ergibt sich auch eine breite Variation an verwendeten Untermaßen (0,05 mm – 0,8 mm).

Strategie

Die Unternehmen gaben an im Schnitt 3,1 Senkerosionsmaschinen zu besitzen. Die meisten Kavitäten werden vor dem Erodieren gefräst (72 %), da das Fräsen das auf den Abtrag bezogen schnellere Verfahren darstellt. Im Senkerosionsprozess lassen sich bei der Bearbeitung von Stahlwerkstoffen typische Schruppabtragraten im Bereich von 50 – 200 mm³/min erzielen. In anschließenden Schlichtoperationen, die typische Ra-Werte von 0,8 µm bis 2,24 µm (VDI-Klassen zwischen 18 und 27) adressieren, werden Abtragraten im Bereich zwischen 1 und 20 mm³/min erreicht. Bei diesen Prozessen – insbesondere bei der Bearbeitung mit Graphitelektroden – kann durch geeignete Verschleißschutztechnologien der Verschleiß auf kleiner 1 % begrenzt werden, es wird auch vom Nullverschleiß der Senkerosion gesprochen. Dies wird durch eine Kombination aus kinematischer Kompensation und werkzeugseitiger Werkstoffabscheidung im Mikrometerbereich realisiert.

Die Weiterentwicklung der Generatortechnologien erlaubt die Realisierung von Feinschlichtoperationen, die den Bereich von Ra kleiner 0,8 µm (VDI-Klasse < 18) adressieren. Aufgrund der im Vergleich geringeren Kostensätze lässt sich somit grundsätzlich endkonturnäher und mit besserer Oberflächengüte erodieren und der manuelle Polieraufwand deutlich reduzieren. Allerdings muss physikalisch bedingt in diesem Fall der Werkzeugverschleiß genauer analysiert und kinematisch oder bspw. durch zusätzliche Feinschlichtelektroden vorgehalten werden.

Bei der Senkerosion muss bedacht werden, dass die definierte Zielrauheit in Form einer VDI-Klasse nicht zwingend durch die Vorgabe erreicht wird. Es handelt sich um eine Oberflächeneigenschaft, die durch eine Vielzahl an prozessbedingten Störeinflüssen noch abweichen kann. Die Werkzeugmaschinenhersteller sind somit aufgefordert maschinenseitige Weiterentwicklungen zur Prozess- und Qualitätskontrolle voranzutreiben. Gleichzeitig bedarf es aber auch der ausreichenden Wissensvermittlung an die Endanwender, um auch beim Status quo das Optimum erzielen zu können.



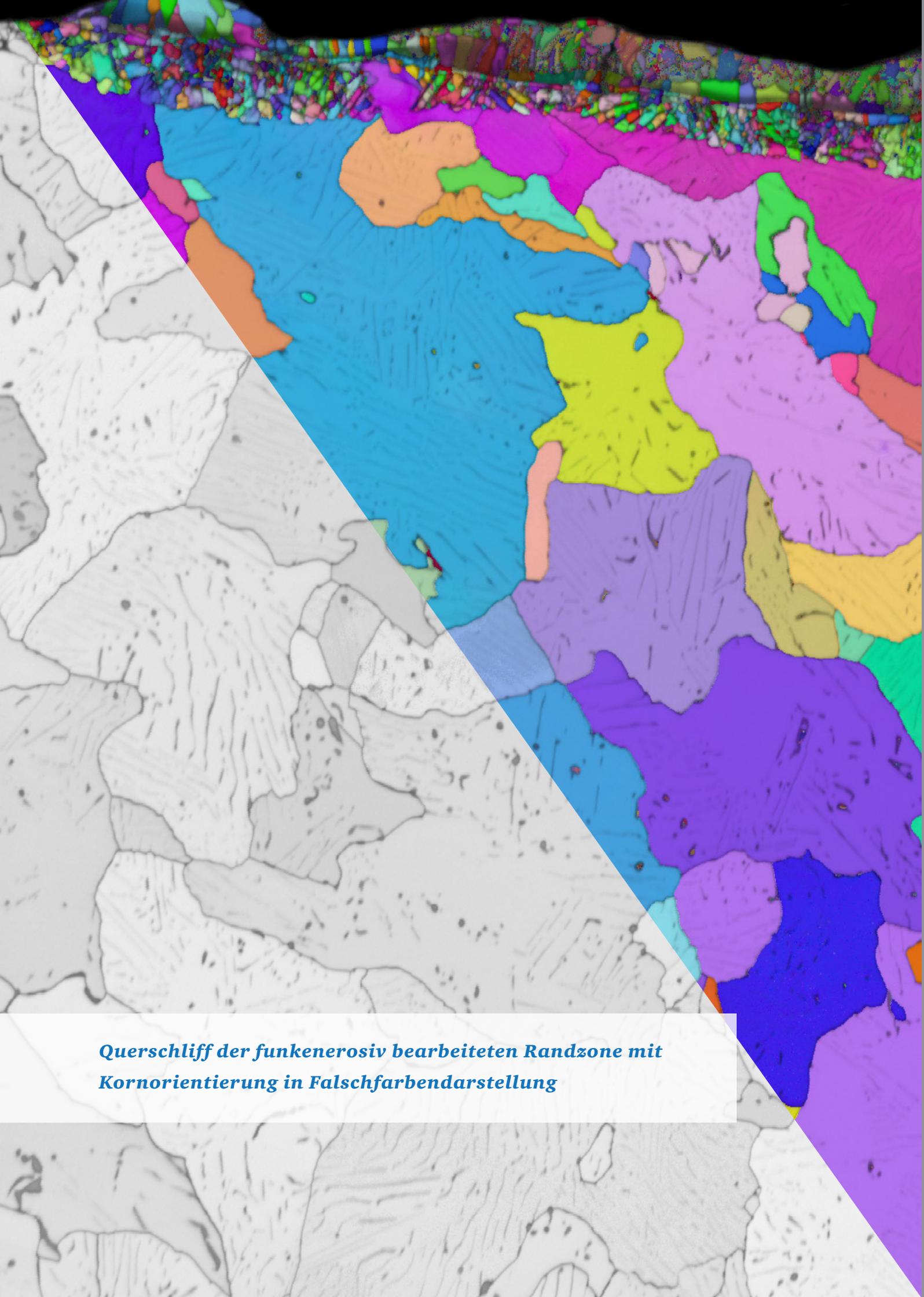
80 %

der verwendeten Elektroden bestehen aus Graphit



72 %

der Kavitäten werden vor dem Erodieren gefräst



***Querschliff der funkenerosiv bearbeiteten Randzone mit
Kornorientierung in Falschfarbendarstellung***

Demonstratorfertigung

1 Demonstrator + 7 Werkzeugbaubetriebe = Spannende Ergebnisse!

Ziel der Demonstratorfertigung ist der Vergleich industriell realisierter Programmierstrategien und Maschinenparameter zur Identifikation von Best-Practices im gesamten Senkerosionsprozess. Dazu wurde eine Geometrie definiert, die von den sieben ausgewählten Unternehmen gefertigt wurde. Die Versuche wurden vor Ort durch Mitarbeiter des Werkzeugmaschinenlabors begleitet und protokolliert. Im Anschluss wurden die Versuchsträger im Hinblick auf die Geometrie- und Maschinenperformance, aber auch die Randzoneneigenschaften hin analysiert sowie eine Kostenbetrachtung durchgeführt.

Demonstratorgeometrie

Die Demonstratorgeometrie wurde in der Diskussion im Projektkonsortium festgelegt. Ziel war eine Geometrie, die herausfordernd ist, gleichzeitig jedoch keinen großen Zeitaufwand darstellt, so dass der Versuch inklusive der kompletten Prozesskette (Fräsen der Elektroden, Ermittlung der Versatzdaten, Einrichten der Erosionsmaschine, Qualitätskontrolle, ...) an einem Tag durchgeführt werden konnte. Weiterhin sollte es möglichst praxisnahe Anforderungen an beispielsweise die Oberflächengüte geben. Entsprechend wurde die in der Abbildung rechts gezeigte Geometrie festgelegt. Besondere Herausforderung ist der 10 mm lange Schlitz mit seinem hohen Aspektverhältnis ($\phi = 10$). Ebenso die Oberflächenanforderungen in Kombination mit der geforderten Oberflächengüte sind nicht ohne Weiteres zu fertigen. Als Versuchswerkstoff wurde ein Standardwerkzeugstahl (1.2324) ausgewählt. Um Abweichungen und Chargenschwankungen des Werkstoffes zu vermeiden, wurde dieser zentral gestellt. Dabei handelte es sich um einen $30 \times 30 \times 30 \text{ mm}^3$ Würfel.

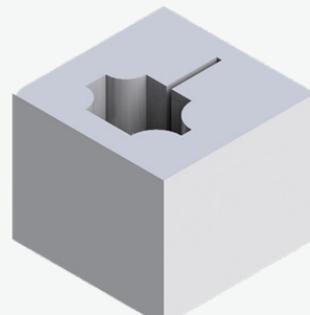
Die Oberflächen waren plangeschliffen, so dass eine optimale Ausgangsoberfläche vorlag. Die Kavität sollte mit einer Genauigkeit

von $\pm 0,01 \text{ mm}$ eingebracht werden, dabei war die absolute Position auf dem Versuchsträger nicht vorgegeben. Die Kavität sollte eine plane Zielfläche in der Tiefe von 10 mm von der Ausgangsoberfläche haben. Auf allen bearbeiteten Oberflächen sollte eine Rauheit von VDI-Klasse 21 erreicht werden; dies entspricht einem arithmetischen Mittenrauwert von $R_a = 1,12 \mu\text{m}$.

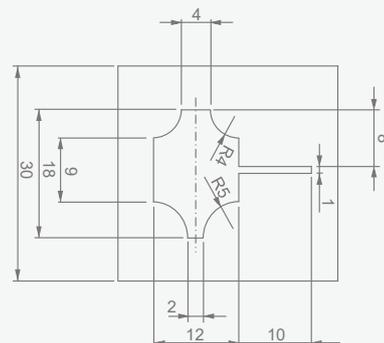
Festlegen von Bewertungskriterien

Bei den Bewertungskriterien müssen verschiedene Aspekte berücksichtigt werden. So ist neben der Produktivität auch die letztendliche Werkstückqualität von hoher Bedeutung. Im Folgenden werden Beispiele für Bewertungskriterien genannt, die individuell an den jeweiligen Anwendungsfall anzupassen und zu gewichten sind. Bereits die Wahl der Technologieabfolge einhergehend mit der Anzahl der Schrubb- und Schlichtelektroden hat maßgeblich Einfluss auf die erzielte Wirtschaftlichkeit und Bauteilqualität. Bei der Produktivität und Wirtschaftlichkeit ist die absolute Bearbeitungszeit relevant. Diese teilt sich in die Hauptzeit und Nebenzeiten auf. Die Hauptzeit entspricht dem eigentlichen Erosionsvorgang auf der Maschine. Die Nebenzeiten beinhalten Rüst- und Messzeiten, aber auch den zur Herstellung der Werkzeugelektroden notwendigen Fräsvorgang. Bei der Wirtschaftlichkeit spielen neben den Haupt- und Nebenzeiten unter anderem auch die Materialkosten für den verwendeten Elektrodenwerkstoff eine Rolle. Die Bauteil- und Prozessqualität lassen sich an verschiedenen Kriterien ermitteln. Zum einen gilt es die Kontur- und Tiefenabweichungen innerhalb der festgelegten Toleranz $\pm 0,01 \text{ mm}$ zu halten. Weiterhin soll die Oberflächenrauheit innerhalb der VDI-Klasse 21 liegen. Auch eine bessere VDI-Klasse ist im engeren Sinn kein gutes Ergebnis, da das Erscheinungsbild des Spritzgussbauteils ggf. abweichen würde.

Darstellung des CAD Modells

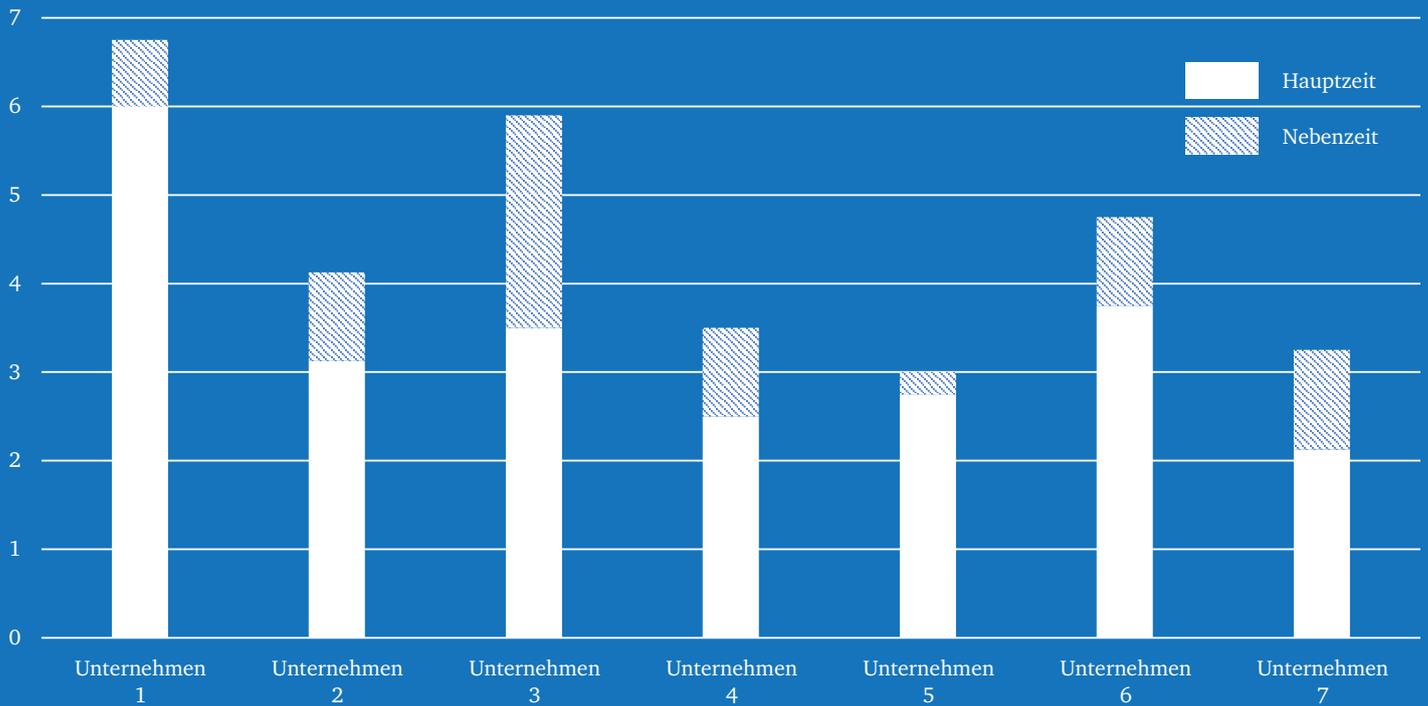


Bemaßte Draufsicht des Demonstrators

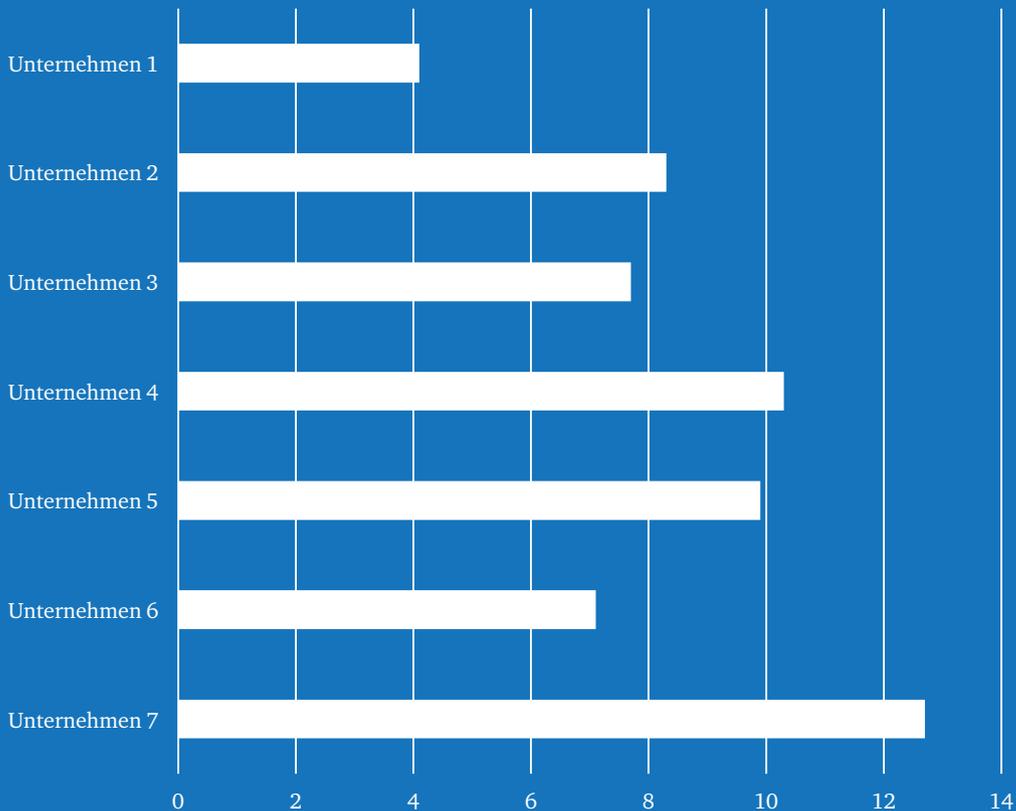




Dauer des Senkerosionsprozesses für den Demonstrator [h]



Mittlere Abtragsrate des Senkerosionsprozesses für den Demonstrator [mm³/min]



Das Unternehmenskonsortium

Die beteiligten sieben Unternehmen stellen hauptsächlich Werkzeuge für den Kunststoffspritzguss aber auch für den Aluminiumdruckguss her. Der Maschinenpark ist überwiegend modern (jünger als 10 Jahre), knapp die Hälfte der Maschinen ist sogar jünger als 2 Jahre. Unter den Maschinen sind die meisten der für den deutschen Markt relevanten Maschinenhersteller vertreten.

Bewertung der Ergebnisse

Durchlaufzeit

Zentrales Ergebnis der Demonstratorfertigung war die Durchlaufzeit des Versuchs bei den einzelnen Unternehmen. Da es sich um keine komplexe Geometrie handelte, war zu erwarten, dass die Fertigungszeiten alle in einer engen Toleranz liegen. Wie in der Abbildung zu sehen ist, sieht das Ergebnis in der Realität anders aus. Die Versuchshauptzeiten bei den Unternehmen weichen teils deutlich voneinander ab. So war die Hauptzeit bei Unternehmen 1 (6:04 h) um mehr als 200 % höher als die Hauptzeit bei Unternehmen 7 (2:04 h).

Die ermittelten Nebenzeiten umfassen das Fräsen der Elektroden, die Einrichtung der Maschine, das Einmessen der Elektroden vor dem Erosionsvorgang und die Endgeometriekontrollmessung sowie Transport- und Liegezeiten. Auch hier ergaben sich große Unterschiede bei den Projektpartnern. Die sehr hohe Nebenzeit bei Unternehmen 3 liegt am hohen Automatisierungsgrad in der Fertigung und der damit einhergehenden Schwierigkeit den Versuch kurzfristig in den laufenden Betrieb einzusteuern. Nichtsdestoweniger ergeben sich auch bei den Nebenzeiten große Unterschiede, die in einer mehr oder weniger aufwändigen Qualitätskontrolle begründet liegen. Schlussendlich lässt sich festhalten, dass trotz teils identischer Maschinenteknik große Unterschiede in den Fertigungszeiten zu erkennen sind. Dies zeigt zum einen die bis heute eingeschränkte Pro-

gnosefähigkeit der Senkerosion zum anderen aber auch insbesondere die unterschiedlichen Herangehensweisen der Unternehmen sowie den aktuellen Handlungsbedarf zur Leistungssteigerung und Prozessoptimierung. Werden lediglich die reinen Erosionszeiten zugrunde gelegt, ergeben sich mittlere Abtragraten von bis 12,7 mm³/min. Diese mittleren Abtragraten ermitteln sich aus dem Quotienten der reinen Erosionszeit aller Bearbeitungsstufen und dem erodierten Kavitätavolumen (1600 mm³). Die maximale Abtragrate wird in der Schruppstufe erreicht. Diese lag bei Unternehmen 7 beispielsweise bei etwa 75 mm³/min.



50 %
der Maschinen sind
jünger als 2 Jahre



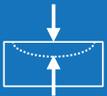
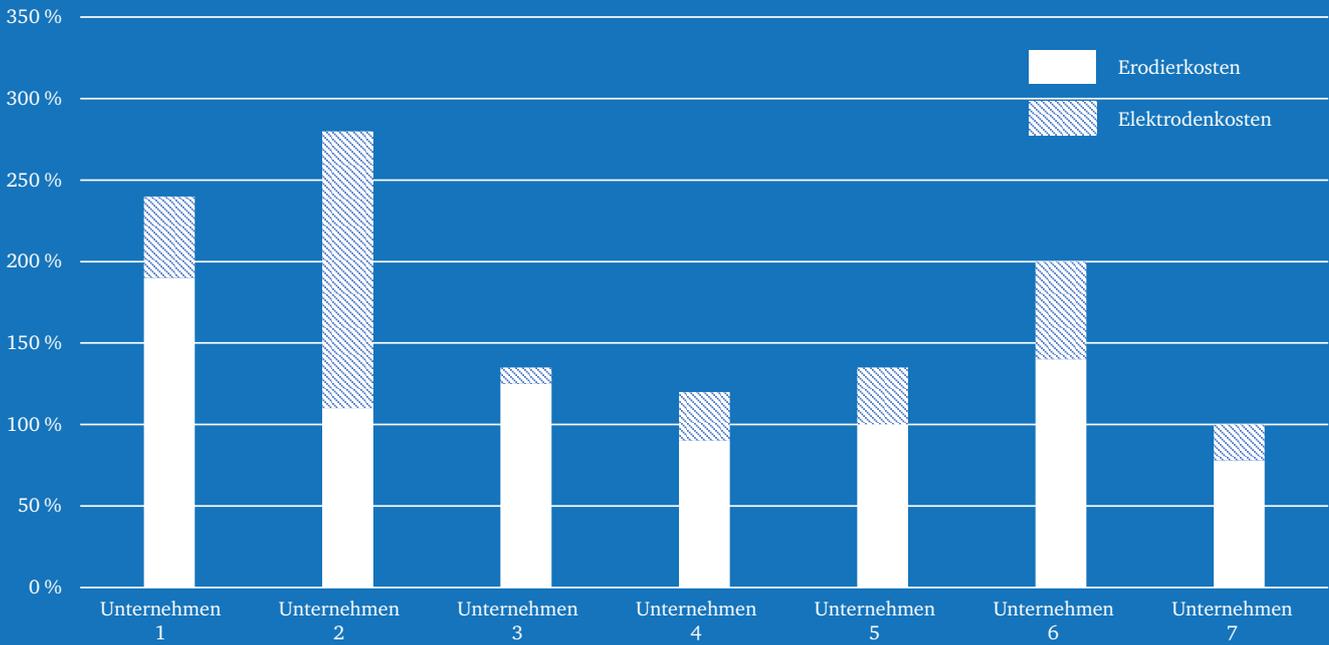
200 %
Unterschied zwischen
Hauptzeiten der
Unternehmen



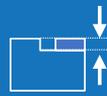
75
mm³/min
beträgt die maximale
Abtragrate in der
Schruppstufe bei der
Bearbeitung des De-
monstrators



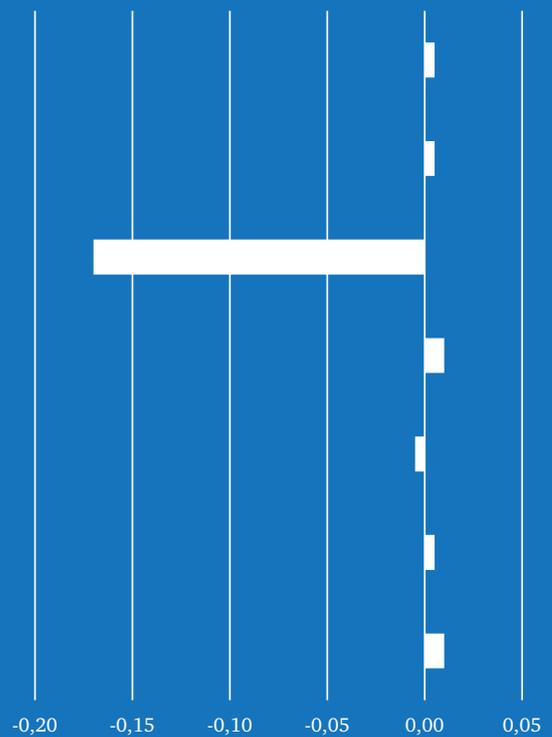
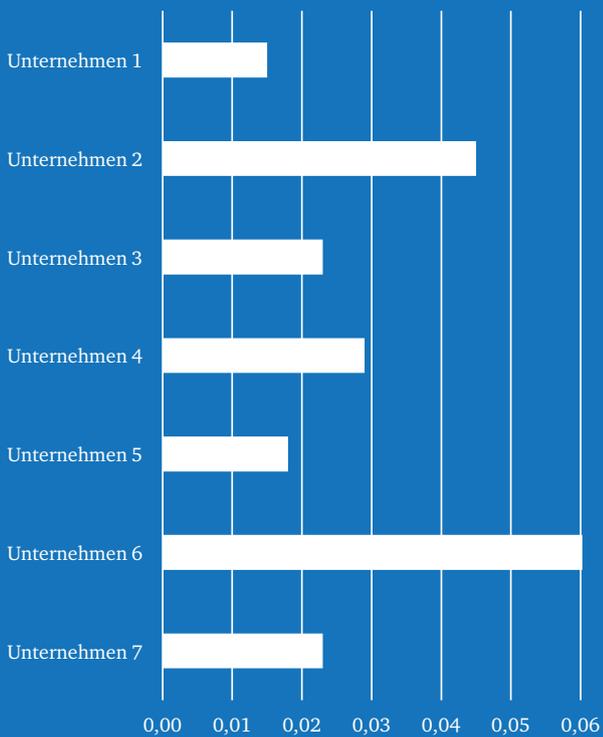
Relative Gesamtkosten pro Kavität (bezogen auf Unternehmen 7)



Maximale Konturabweichung [mm]



Abweichung Solltiefe [mm]



Fertigungskosten

Als weiterer Aspekt wurden die Fertigungskosten pro Kavität betrachtet. Für den Maschinenstundensatz der Erodiermaschine wurde zur besseren Vergleichbarkeit ein konstanter Wert für alle Unternehmen angenommen. Der Maschinenstundensatz für die Elektrodenherstellung auf der Fräsmaschine basiert hingegen auf den Angaben der jeweiligen Unternehmen und den ermittelten Bearbeitungszeiten. Die sonstigen Nebenzeiten für das Handling der Elektroden und die Vorbereitung sind in der folgenden Kostenrechnung nicht mit einbezogen. In der Abbildung (links oben) sind die Gesamtkosten der einzelnen Unternehmen auf die Gesamtkosten des Unternehmens 7 bezogen, da diese den geringsten Kostenaufwand hatten.

Weiterhin ist die prozentuale Aufteilung der jeweiligen Gesamtkosten in Kosten für die Werkzeugelektroden (Materialkosten + Fräskosten) sowie in die reinen Erodierkosten dargestellt. Besonders auffällig sind die hohen Elektrodenkosten beim Unternehmen 2. Diese entstanden dadurch, dass insgesamt elf Elektroden gefertigt wurden, wohingegen die anderen Unternehmen nur vier bis sechs Elektroden eingeplant haben. Die sehr hohen Erodierkosten bei Unternehmen 1 ergeben sich aus der langen Erodierdauer (siehe Abbildung Haupt- und Nebenzeiten). Der sehr geringe Elektrodenkostenanteil von Unternehmen 3 ergibt sich aus einer sehr schnellen Fräsbearbeitung (10 min) wohingegen andere Unternehmen teils mehr als eine Stunde benötigen haben.

Toleranzen

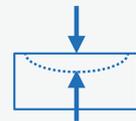
Entscheidendes Kriterium beim gefertigten Bauteil ist die Einhaltung der festgelegten Toleranzen. Daher hat die Fertigungsgeschwindigkeit streng genommen nur bei Erreichen der geforderten Fertigungstoleranzen ($|\Delta s_{\max}| = 0,01 \text{ mm}$) entscheidende Relevanz. Zur Analyse wurden die gefertigten Kavitäten mit einem Koordinatenmessgerät (KMG) gemessen. Die Kontur wurde dabei in unterschiedlichen Tiefen analysiert. In der Abbildung ist die maxima-

le Konturabweichung der einzelnen Proben aufgetragen. Es zeigt sich, dass kein Unternehmen die geforderte Formgenauigkeit erreicht hat. Unternehmen 1 erzielte hierbei die besten Ergebnisse. Ein Grund für diese zu großen Konturabweichungen kann ein falsch gemessenes oder übermitteltes Untermaß der Werkzeugelektrode sein, so dass die Senkerosionsmaschine die Erosionswege falsch berechnet. Wird die Elektrode nach dem Fräsvorgang nicht gemessen, können auch Ungenauigkeiten bei der Fräsbearbeitung der Werkzeugelektrode zu diesen Formabweichungen führen. Eine weitere Möglichkeit, wie es zu diesen Abweichungen kommen kann, sind ungenaue Daten für die Arbeitsspalte während der Erosionsbearbeitung, welche in der Maschinensteuerung hinterlegt sind. Zusätzlich können schlechte Spülbedingungen dazu führen, dass der sich einstellende Arbeitsspalt größer wird als der angenommene. Das führt schließlich dazu, dass die Formhaltigkeit nicht mehr gegeben ist. Hier bedarf es einer jeweils individuellen erweiterten Prozessanalyse, um die genauen Gründe zu ermitteln.

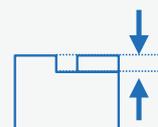
Bei Betrachtung der Ergebnisse für die Tiefenabweichung fällt auf, dass mit Ausnahme von Unternehmen 3 alle Proben innerhalb des Toleranzbereichs liegen. Bei Unternehmen 3 ist die Kavität signifikant tiefer geworden als gefordert, was nur durch eine fehlerhafte Kontrollmessung erklärt werden kann. Insgesamt wurde die Solltiefe jedoch sehr gut erreicht. Einige Unternehmen haben bei der Fertigung der Kavität diese auf dem Koordinatenmessgerät gemessen und in einem zweiten Erosionsvorgang die Untermaße bzw. die Zieltiefe entsprechend angepasst. So konnten zumindest für die Zieltiefe sehr gute Ergebnisse erzielt werden. Von diesem Vorgehen raten die Maschinenhersteller jedoch eher ab, da erneut alle Energiestufen des Senkerosionsprozesses durchlaufen werden und es infolgedessen sein kann, dass die thermische Schädigung der Randzone lokal zunimmt und auch die Rauheit negativ beeinflusst werden kann.



60 %
 beträgt die durchschnittliche Abweichung der Erodierkosten pro Kavität bei der Demonstratorfertigung

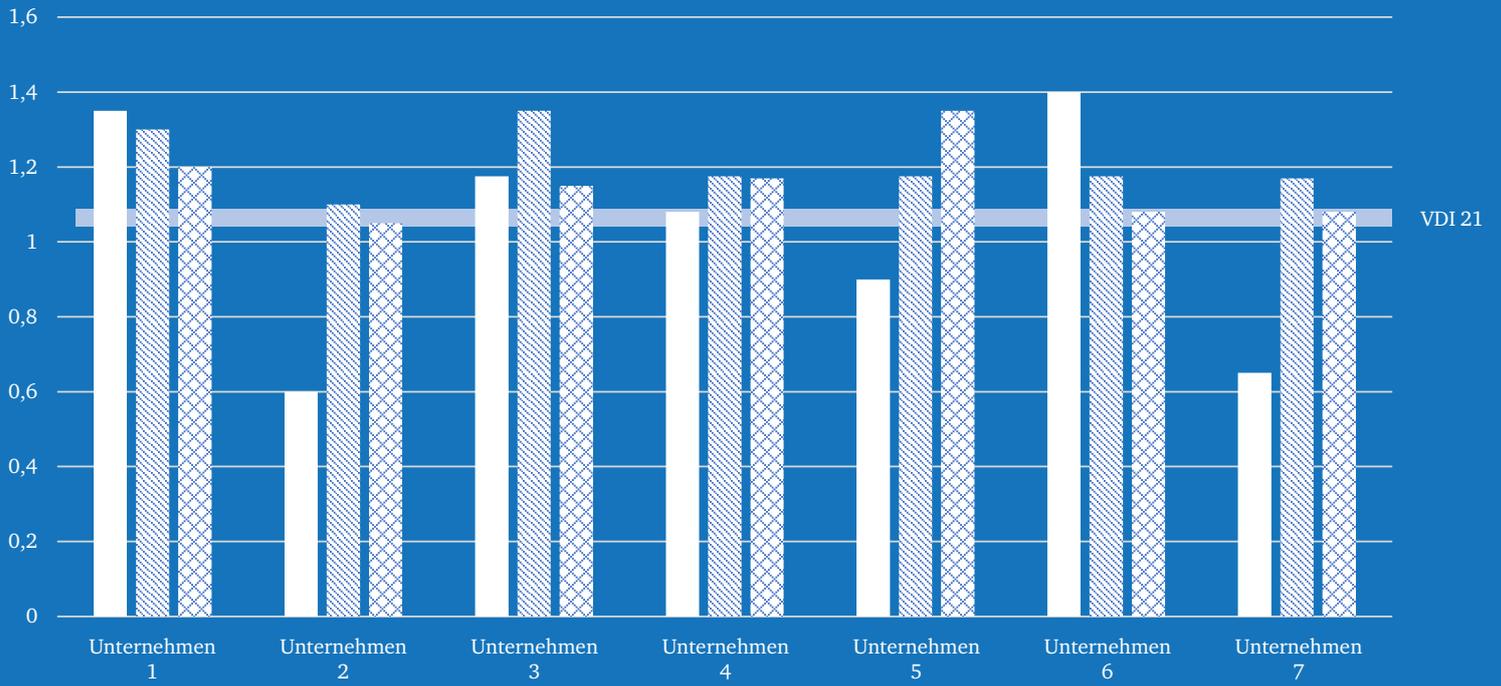


0,031 mm
 beträgt die durchschnittliche maximale Konturabweichung in lateraler Richtung bei der Demonstratorbearbeitung

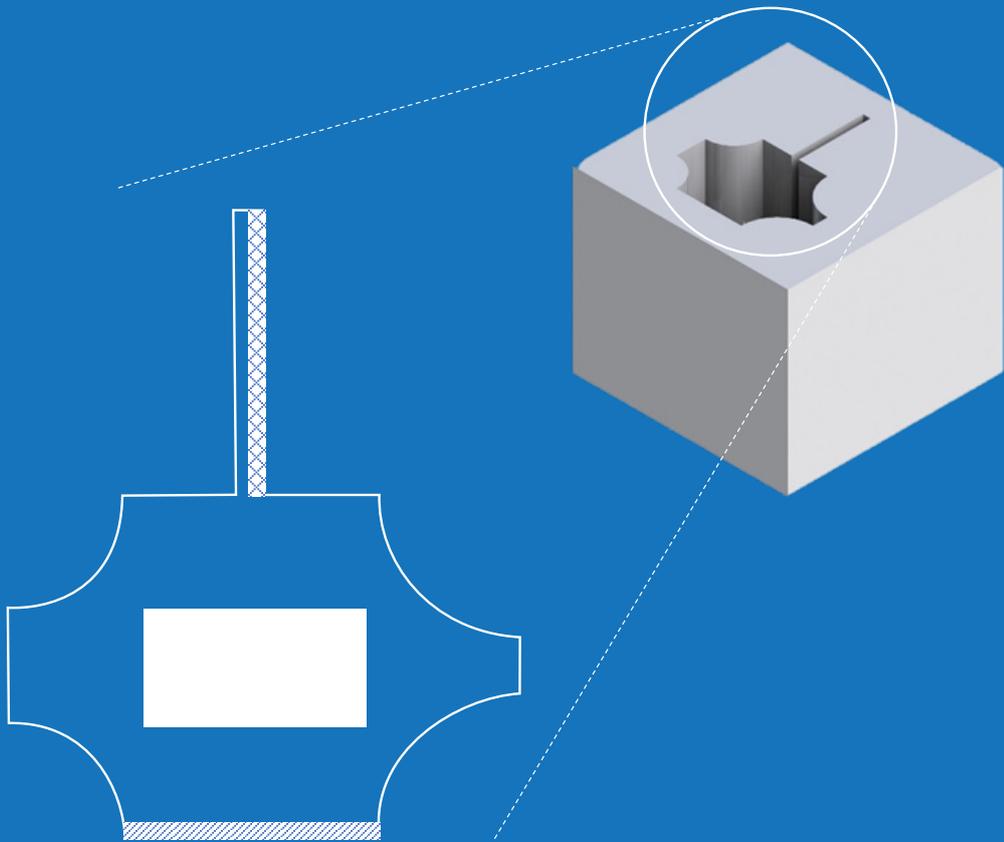


<0,005 mm
 beträgt die durchschnittliche absolute Abweichung der Solltiefe in vertikaler Richtung bei der Demonstratorbearbeitung

Arithmetischer Mittenrauwertwert [μm]



- Bereich 1
- Bereich 2
- Bereich 3

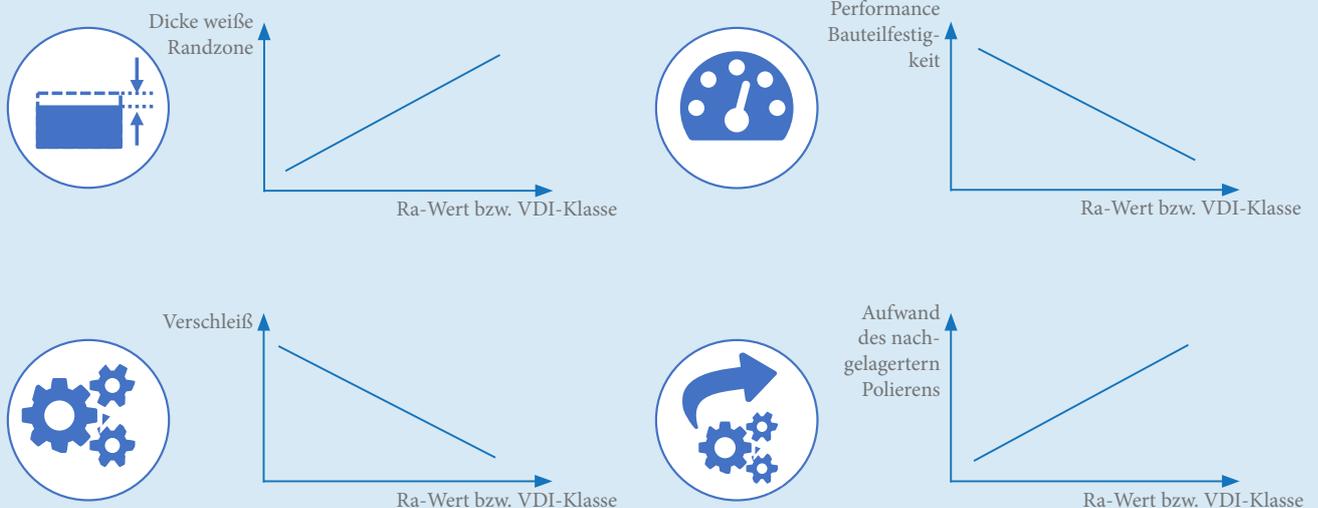


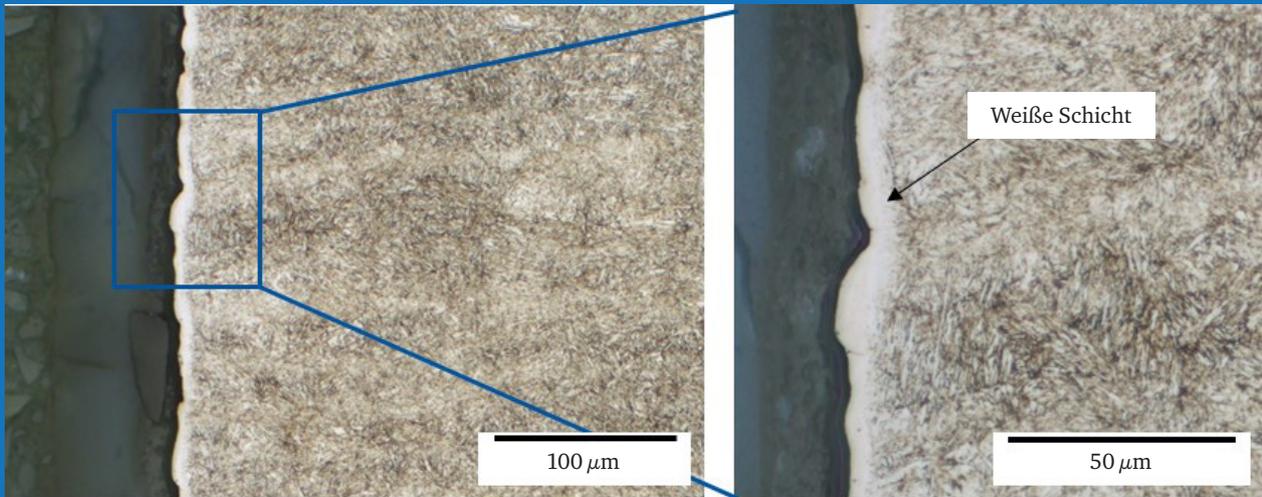
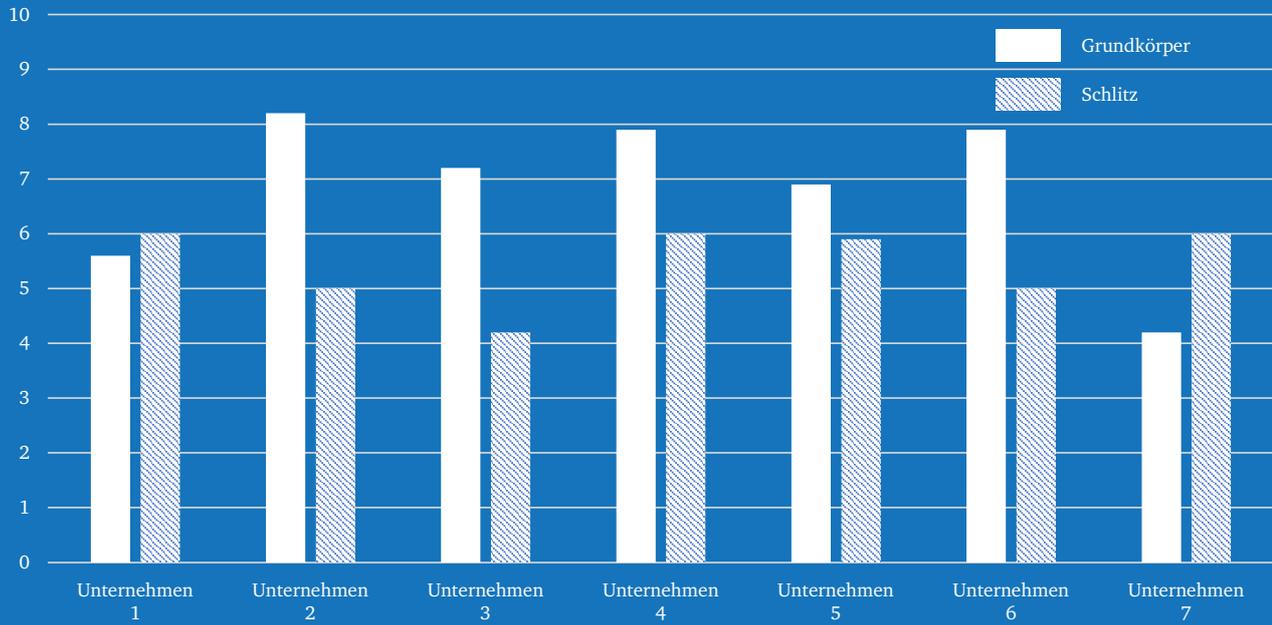
Oberflächengüte

Neben den Formabweichungen wurde auch die Oberflächenbeschaffenheit der Versuchsträger überprüft. Als Zielwert für die Oberflächenbeschaffenheit wurde die VDI-Klasse 21 gefordert. Dies entspricht einem arithmetischen Mittenrauwert im Toleranzbereich zwischen $Ra = 1,06 \dots 1,18 \mu\text{m}$. Die Rauheitswerte wurden an drei Stellen gemessen, zum einen am Boden der Kavität sowie an der Wand des größeren Grundkörpers und zum anderen an der Wand des Schlitzes, da dieser eine besondere Herausforderung darstellt und für optimale Ergebnisse mit angepassten Erosionsparametern bearbeitet werden muss. Nichtsdestoweniger sollte die Oberflächenbeschaffenheit annähernd gleich sein. An den beschriebenen Stellen wurde jeweils dreimal nebeneinander gemessen. Eine Richtungsabhängigkeit ist bei senkerodierten Oberflächen nicht zu erwarten. Die Ergebnisse zeigen, dass das Toleranzband der Rauheit kaum getroffen wurde.

Die einzigen Proben die an allen Messstellen mit dem Mittelwert die geforderte Rauheit – im Sinne eines Maximalwertes – eingehalten haben sind die Proben des Unternehmens 2. Falls jedoch eine definierte Rauheit – beispielsweise für eine Haptik – gefordert ist, darf die Oberfläche auch nicht zu glatt gefertigt werden (siehe Unternehmen 2). Alle anderen Proben liegen teils deutlich über der geforderten maximalen Rauheit. Weiterhin fällt auf, dass es große Unterschiede bei der gemessenen Rauheit an den verschiedenen Stellen gibt. Oft ist die Fläche am Boden der Kavität besser. Dies deutet auf eine schlecht abgestimmte Auslenkstrategie der Maschine in den Schlichtstufen hin. Laut Aussagen der Unternehmen wird die Rauheit vor Ort jedoch nicht mit taktiler oder optischer Messtechnik gemessen, dementsprechend gibt es keine quantitative Qualitätskontrolle für dieses Bewertungskriterium. Es kann sich jedoch keinesfalls auf die Angabe laut Technologietabelle einfach verlassen werden.

Exkurs: Grundlegende Gesetzmäßigkeiten der Senkerosion





Gefügestruktur

Infolge der Funkenentladung kommt es zum Aufschmelzen des Werkstoffs. Ein Teil des aufgeschmolzenen Werkstoffs wird abgetragen. Die verbleibende Schmelze wiedererstarrt an der Oberfläche. Dabei wird nicht derselbe Gefügestand des Grundwerkstoffs erreicht, da prozessbedingt höhere Aufheiz- und Abkühlraten vorliegen als beim temperaturgesteuerten Gießprozess. Bei Stahlwerkstoffen bilden sich so an der Oberfläche oft martensitisches Gefüge und eine weiße Randzone aus. Das Gefüge ist zwar sehr hart, jedoch auch ggf. spröde und risanfällig.

Um diese Randzonenschädigung zu beobachten, wurden aus den Versuchsträgern Querschliffe an zwei Stellen hergestellt; zum einen im Grundkörper und zum anderen im Schlitz. Damit die Mikrostruktur sichtbar wird, muss die Probe poliert und geätzt werden. Die Gefügestrukturen werden beim Ätzen unterschiedlich abgetragen, dadurch erscheinen sie im Lichtmikroskop verschieden.

Dicke der weißen Randzone

Bei den bearbeiteten Proben wurde die Dicke der weißen Schicht optisch ausgewertet. Die gemittelten Dicken der Randzone sind in der Abbildung aufgetragen. Es sind Unterschiede zwischen den Versuchsträgern der verschiedenen Unternehmen zu erkennen. Beispielsweise ist die gemessene mittlere Randzone im Grundkörper von Unternehmen 7 nur etwa halb so dick wie bei Unternehmen 2. Alle Unternehmen haben die Elektrodengeometrie in Grundkörper und Spalt aufgeteilt.

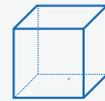
Aufgrund der verschiedenen Stirnflächen wurde mit abweichenden Erosionstechnologien gearbeitet. Dies führt zu teils deutlichen Abweichungen der Randzonendicke zwischen Grundkörper und Schlitz. Bei den präsentierten Ergebnissen muss beachtet werden, dass nur ein vergleichsweise kleiner Ausschnitt der Randzone ausgewertet wurde unter der Annahme, dass dieser repräsentativ für die gesamte Randzone ist.

Im Grundmaterial ist das typische Grundgefüge zu erkennen, welches sich bei einer Vergütung des Warmarbeitsstahls 1.2343 auf 52 HRC ergibt. An der Oberfläche ist eine weiße Schicht zu sehen, die sich klar vom Grundgefüge unterscheidet. Mehrere Untersuchungen haben gezeigt, dass sich eine dickere weiße Schicht negativ auf die Dauerfestigkeit auswirkt. Daher versucht ein optimaler Erosionsprozess diese Schicht so gering wie möglich zu halten. Dies gelingt durch geschickte Abstufung der Entladeenergieniveaus (Schlichtstufen). Dadurch verlängert sich die Bearbeitungszeit jedoch signifikant und es muss für den individuellen Anwendungsfall betrachtet werden, inwieweit diese Schicht zu minimieren ist, um einen möglichst wirtschaftlichen Prozess zu entwickeln.

Weiterhin ist eine scharfe Abgrenzung zwischen weißer Schicht und Grundmaterial lediglich anhand von geätzten Querschliffen nicht immer gegeben. Daher unterliegen die Ergebnisse einer Unsicherheit von 1 – 2 μm .

Fazit

Die Ergebnisse der hier adressierten Demonstratorfertigung zeigen aufgrund der großen Streubreiten repräsentativ auf, dass es auch heute noch grundsätzlich signifikante Potenziale zur Optimierung der Senkerosionsprozesse im Bereich des Werkzeug- und Formenbaus gibt. Dies wird weiterhin durch den Vergleich mit Referenzversuchen, die bei ausgewählten Werkzeugmaschinenherstellern bzw. am WZL durchgeführt wurden, belegt, die in den meisten Kategorien – insbesondere der Formgenauigkeit aber auch der Oberflächengüte – als Best Practices angesehen werden können. Aber auch bei diesen Versuchen wurden unter Verwendung der Standardtechnologien nicht immer die Zielkriterien eingehalten, so dass auch bei den initial implementierten Technologien der Werkzeugmaschinenhersteller noch Optimierungspotenzial liegt.



7 μm
beträgt die durchschnittliche Breite der weißen Randzone am Grundkörper



9 μm
beträgt die durchschnittliche Breite der weißen Randzone am Schlitz

Oberflächenintegrität & Bauteileigenschaften

Es werden der Einfluss von Dielektrika/Elektrolyten untersucht, sowie die Analyse der prozessbedingten Randzonen und schließlich der funktionellen Eigenschaften durchgeführt. Diese werden anhand verschiedener Versuche ermittelt (Härte, Festigkeit, Dauerfestigkeit, ...).

Neue Werkstoffe in EDM und ECM

Für innovative Hochleistungswerkstoffe, wie z. B. Keramiken, Titanaluminide und High Entropy Alloys, etc werden Strategien entwickelt, welche die abtragende Fertigung optimieren. Dazu gehören sowohl die Analyse der Abtragmechanismen als auch die Analyse des Werkstoffverhaltens während der Bearbeitung.



Ein weiterer Forschungsschwerpunkt ist die Entwicklung und Anwendung von Industrie 4.0 Applikationen zur Auslegung intelligenter Prozesse. Außerdem werden Potenziale und Trends sowie die Wirtschaftlichkeit analysiert.

Weitere Forschungsschwerpunkte

Simulative Ansätze werden für ein tiefergehendes Verständnis angewendet. Beispielsweise werden der Energieeintrag und die resultierenden Modifikationen zum Treffen von Vorhersagen als Untersuchungsgegenstand betrachtet.

Modellbasierte Untersuchung



Dr.-Ing. Tim Herrig
Oberingenieur
Telefon: +49 241 80-28008
t.herrig@wzl-aachen-gmbh.de

WZL
AACHEN GMBH

Ausblick

Die Senkerosion erfüllt die zukünftig steigenden Anforderungen im Werkzeug- und Formenbau!

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass es beim Umgang mit der Senkerosion und dem Technologiewissen noch Reserven für Verbesserungen gibt. Dies gilt sowohl für das direkt anwendbare Wissen als auch für das notwendige physikalische Prozessverständnis. Gerade das Grundlagenwissen, wie sich der Prozess mit all seinen Randbedingungen auf das resultierende Bauteil und seine Eigenschaften auswirkt, bietet Potenzial für Optimierungen und ist aktueller Forschungsgegenstand. So wird beispielsweise in dem von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Sonderforschungsbereich SFB/TRR136 „Prozesssignaturen“ dieser Fragestellung nachgegangen. Es wird die Frage beantwortet, wie die Stellgrößen und Randbedingungen der Senkerosion die Temperatur im Werkstoff, also die treibende Kraft für Veränderungen in der Werkstückrandzone, beeinflussen. Dies wird aktuell über ein Modell der Energiedissipation in Kombination mit der Simulation des Wärmetransfers auf Basis der Finite-Elemente-Methode realisiert. Somit ist es heute schon möglich die Temperatur im Werkstoff abhängig von den Stellgrößen vorherzusagen. Des Weiteren gibt es Ansätze, die Veränderungen im Werkstoff auf Basis des Temperaturfeldes zu berechnen und somit die Werkstoffeigenschaften nach der funkenerosiven Bearbeitung zu bestimmen. Die verwendete Methode ist die Phasenfeld-Methode, mit der die Phasenzusammensetzung berechnet wird. Die Kenntnis der Werkstoffzusammensetzung in der Randzone ist die Grundlage, um die Eigenschaften der Funktionsflächen vorherzusagen und letztendlich den Funkenerosionsprozess zu optimieren. Hierbei gilt es, die thermisch beeinflusste Zone und insbesondere die prozessbedingten Zugeigenspannungen zu minimieren und beispielsweise die mechanische Bauteilfestigkeit zu maximieren.

Oft ist die Senkerosion einer der letzten Bearbeitungsschritte einer langen Prozessfolge. Auch die Veränderungen der Bauteilrandzone infolge der vorgelagerten Prozessschritte

können die Qualität des Erosionsprozesses verändern, so dass unter Umständen die Prozessstellgrößen angepasst werden müssen, um optimale Ergebnisse zu erzielen. Voraussetzung für alle diese Ansätze ist eine detaillierte Prozessüberwachung, die die Energiedissipation aufzeichnet sowie orts- und zeitaufgelöst Prozessinstabilitäten erkennt. Dies ist bei einer Entladefrequenz der Senkerosion im Kilohertzbereich eine große Herausforderung und stellt hohe Anforderungen an die Messtechnik und die verwendeten Algorithmen. Übergeordnetes Ziel ist es, einen digitalen Zwilling bzw. digitalen Schatten des Werkstücks zu erzeugen. Dieser enthält die Geometrie und Werkstoffveränderungen und ist somit auch in der Lage die initialen Bedingungen für einen eventuellen Folgeprozess wiederzugeben. Dieses Wissen, welches zum Beispiel auch durch datengetriebene Ansätze (z.B. aktuelle KI-Ansätze (Künstliche Intelligenz) einiger Werkzeugmaschinenhersteller zur bildbasierten Oberflächenbewertung auf der Werkzeugmaschine) extrahiert werden kann, würde die Prozessauslegung und die Produktionsplanung optimieren.

Prozesseitig werden derzeit Maschinentechнологien weiterentwickelt, die eine gezielte Kratermorphologieveränderung adressieren können, um beispielsweise die Entformbarkeit beim Kunststoffspritzguss zu steigern. Die verfolgten flacheren Kraterstrukturen werden dabei durch eine gezielte Führung der Schmelzbaddynamik erreicht, die dann allerdings in einer dickeren weißen Randzone des widererstarteten Gefüges resultieren. Der Einfluss auf die spätere Bauteilfunktionalität muss hier noch weiter erforscht werden, um schließlich auch ein Optimum hinsichtlich der Werkzeugstandzeit erreichen zu können. Diese grundlegenden Fragestellungen und weitere anwendungsspezifische Thematiken der Senkerosion werden auch im Arbeitskreis „Elektroerosive Bearbeitung“ (EAK) am Werkzeugmaschinenlabor der RWTH Aachen gemeinsam mit Industriepartnern erarbeitet.



Zukunftsweisende Themen der Senkerosion werden im Arbeitskreis Elektroerosive Bearbeitung am Werkzeugmaschinenlabor der RWTH Aachen bearbeitet



Senkfunkenerosive Schruppbearbeitung mit mehreren Entladungen während der Belichtungszeit

Zusammenfassung und Fazit

Neben der Fräsbearbeitung stellt die Senkerosion eine Schlüsseltechnologie zur Werkzeugherstellung dar.

Als etablierte Schlüsseltechnologie im Werkzeug- und Formenbau ist die Senkerosion einem stetigen Verdrängungswettbewerb zur HSC-Fräsbearbeitung ausgesetzt. Ständige Weiterentwicklungen und der aktuelle Anwendungsstand in der Praxis offenbaren jedoch signifikante Möglichkeiten, die technologiespezifischen Vorteile beim Einsatz im Werkzeug- und Formenbau gewinnbringend auszunutzen.

Die Studie „Erfolgreich Senkerodieren“ greift die aktuellsten Trends im Bereich der Senkerosion auf und diskutiert darüber hinaus derzeitige Herausforderungen. Beginnend mit der Beschreibung des Status Quo wurden Ergebnisse einer branchenspezifischen Umfrage zur Senkerosion vorgestellt und diskutiert. Darüber hinaus lieferten die anhand eines von verschiedenen Unternehmen gefertigten Demonstratorbauteils erhobenen Daten die Grundlage für eine realistische Einschätzung des Potenzials der Senkerosion.

Die wesentlichen Ergebnisse der branchenspezifischen Umfrage werden im Folgenden noch einmal rekapituliert. Dass die Senkerosion eine Schlüsseltechnologie im Werkzeug- und Formenbau darstellt bestätigt sich in der durchgeführten Umfrage. Dort zählt die Senkerosion zu dem am zweithäufigst genutzten Verfahren nach dem Fräsen. Trotz der mittlerweile durch Senkerosion erreichbaren Oberflächengüten von unter $Ra = 0,1 \mu m$ werden die meisten Bauteile nur bis zu größeren Rauheitswerten erodiert um anschließend nachbearbeitet zu werden. Die in der Praxis überwiegend adressierten Oberflächengüten von lediglich $Ra = 1 \mu m$ und größer verdeutlichen diesbezüglich das Verbesserungspotenzial. Anwendungsspezifisch muss natürlich gegebenenfalls die Entfernung der weißen Randzone realisiert werden – dies kann dann aber mit deutlich verringertem manuellen Aufwand realisiert werden. Mit einem Anteil von 80 % dient zumeist Graphit als Elektrodenwerkstoff, wo-

bei zwischen grobkörnigem Graphit für die Schrupp- und feinkörnigem Graphit für die Schlichtbearbeitung unterschieden wird.

Die aus der Demonstratorfertigung resultierenden Daten verdeutlichen die Unterschiede hinsichtlich der technologischen Leistungsfähigkeit der ausgewählten Unternehmen. Die Abweichung der Versuchshauptzeiten um 200 % trotz teils identischer Maschinenteknik weisen auf die bis heute eingeschränkte Prognosefähigkeit der Senkerosion und der damit einhergehenden Optimierungsmöglichkeiten hin. Anhand der kalkulierten Kosten für die Fertigung des Demonstratorbauteils werden darüber hinaus die unterschiedlichen Herangehensweisen der Unternehmen deutlich. Während manche Unternehmen nur wenige Elektroden für die Fertigung einplanen, kalkulieren andere Unternehmen mehr als doppelt so viele Elektroden und folglich auch höhere Kosten für die Fertigung ein. Die geforderte Formgenauigkeit des Demonstratorbauteils wurde im Beispiel von keinem Unternehmen erzielt, ist technologisch aber realisierbar. Dies kann ein Indikator für die herausfordernde Messung und Berechnung des mit in den Fertigungsprozess einzubeziehenden Untermaßes, Ungenauigkeiten der bearbeiteten Werkzeugelektrode, falsch übermittelte Arbeitsspalte oder schlechte Spülbedingungen sein. Hinsichtlich der mithilfe der Senkerosion erreichten Oberflächengüte gibt es laut der Unternehmen keine quantitative Qualitätskontrolle, was überdacht werden sollte. Insgesamt verdeutlichten sowohl die durchgeführte Umfrage als auch die erhobenen Daten aus der Demonstratorfertigung die nach wie vor existierenden Herausforderungen bei der Anwendung der Senkerosion. Trotz umfangreicher Weiterentwicklungen im Bereich der Senkerosion besteht nach wie vor Forschungs- und Verbesserungspotenzial.



$0,1 \mu m$
ist die typischerweise beste erreichbare Oberflächengüte Ra der Senkerosion



$1 - 2 \mu m$
ist die in der Praxis bisher durchschnittlich angestrebte Oberflächengüte Ra der Senkerosion

Autoren



Prof. Dr. Wolfgang Boos

Geschäftsführer

WBA Aachener Werkzeugbau Akademie GmbH



Dr. Tim Herrig

Abteilungsleiter Abtragende Fertigungsverfahren

Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen



Dr. Andreas Klink

Leiter Wissenschaftliche Qualitätssicherung / Abtragende Fertigungsverfahren

Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen



Dr. Kristian Arntz

Abteilungsleiter Technologieorganisation und -vernetzung

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT



Dr. Marcel Prümmer

Gruppenleiter Technologieorganisation

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT



Rainer Horstkotte

Geschäftsfeldleiter Werkzeugbau

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT



Sebastian Schneider

Wissenschaftlicher Mitarbeiter Abtragende Fertigungsverfahren

Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen

Unsere Studien – Strategische Entwicklung ...



Datenbasierte Dienstleistungen für den Werkzeugbau – Status quo, Entwicklung und Beispiele
2021



Wettbewerbsfaktor Resilienz – Handlungsfelder für den krisensicheren Werkzeugbau
2021



Wettbewerbsfaktor Nachhaltigkeit – Ein Differenzierungsmerkmal für den Werkzeugbau
2020



Digitale Transformation im Werkzeugbau
2019



Intelligente Werkzeuge und datenbasierte Geschäftsmodelle
2018



Corporate Tooling – Agile Tool Development
2017



Corporate Tooling – Flexible Tooling Organization
2017



Corporate Tooling – Intelligent Tool Manufacturing
2017



Smart Tooling
2016



Fast Forward Tooling
2015



F3 Fast Forward Factory
2015

Unsere Studien – Erfolgreich ...



**Erfolgreich
Senkerodieren im
Werkzeugbau**
2021



**Erfolgreich Layout
Gestalten**
2020



**Erfolgreich Planen
und Steuern im
Werkzeugbau**
2019



**Erfolgreich Fokussieren
und Segmentieren
im Werkzeugbau**
2019



**Erfolgreich
Digitale Fräs-
prozessketten
Umsetzen**
2019



**Erfolgreich
Lieferanten
Managen**
2018



**Erfolgreich
CAx-Prozessketten
Gestalten**
2018



**Erfolgreich
Fräsen**
2018



**Erfolgreich
Automatisieren**
2017



**Erfolgreich
Restrukturieren**
2017



**Erfolgreich
Performance
Messen**
2017



**Erfolgreich
Fertigungstechno-
logien Einsetzen**
2017

Unsere Studien – Erfolgreich ...



**Erfolgreich
Finanzieren**
2016



**Erfolgreich
Digital Vernetzen**
2016



**Erfolgreich
Mitarbeiter
Motivieren**
2016



**Erfolgreich
Kalkulieren**
2015



**Erfolgreich
Planen**
2015

Unsere Studien – Tooling in ...



**Tooling in
Austria**
2020



**Tooling in
Germany**
2020



**Tooling in
Slovenia**
2019



World of Tooling
2018



**Tooling in Czech
Republic**
2018



**Tooling in
Germany**
2018



Tooling in China
2016



Tooling in Turkey
2016



**Tooling in
Germany**
2016



World of Tooling
2015



Tooling in China
2015



**Tooling in South
Africa**
2014



Herausgeber

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT

Steinbachstraße 17
D-52074 Aachen

www.ipt.fraunhofer.de

Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen

Campus-Boulevard 30
D-52074 Aachen

www.wzl.rwth-aachen.de

978-3-946612-63-6



9 783946 612636