

Visualisierung der Prozess-Maschine-Interaktion beim Mikrozerspanen im unterbrochenen Schnitt mittels Stromdurchgangsmessung

G. Brudek / J. Wulfsberg

Die Visualisierung, Überwachung und Regelung der Prozess-Maschine-Interaktion gewinnt mit den immer kleiner werdenden Werkzeugdurchmessern der Mikrozerspanung in erster Linie auf Grund zahlreicher Größen- und Skalierungseffekte immer mehr an Bedeutung. In diesem Zusammenhang ist am Laboratorium Fertigungstechnik der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg (LaFT) ein neues Verfahren auf Basis einer Stromdurchgangsmessung entwickelt und als kostengünstiger und rückwirkungsfreier Sensor in die Praxis umgesetzt worden.

Zerspanprozesse generieren Kräfte, die auf die Maschinenstruktur einschließlich deren elastischer Verformung einwirken. Dies führt zu einer Veränderung der aktuellen Schnitttiefe, was wiederum die auftretenden Schnittkräfte beeinflusst. Gleichzeitig wird dabei Energie umgewandelt, die thermische Verlagerungen der Maschinenstruktur bewirkt. Darum sollten der Zerspanprozess und die Maschinenstruktur zusammen als ein geschlossener Regelkreis (Closed Loop System) angesehen werden, welcher einerseits durch Kräfte sowie Energien und andererseits durch Verformungen sowie Verlagerungen geschlossen wird und die auftretenden Wechselwirkungen widerspiegelt (siehe Abbildung 1). Die kombinierte Betrachtung von Zerspanprozess und Maschinenstruktur, im Weiteren Prozess-Maschine-Interaktion (PMI) genannt, stellt folglich eine Möglichkeit dar, die Wirkzusammenhänge von fertigungstechnischen Prozessen und den Reaktionen der beteiligten Maschinenstruktur mit Blick auf das Arbeitsergebnis aufzuzeigen. [1, 2]

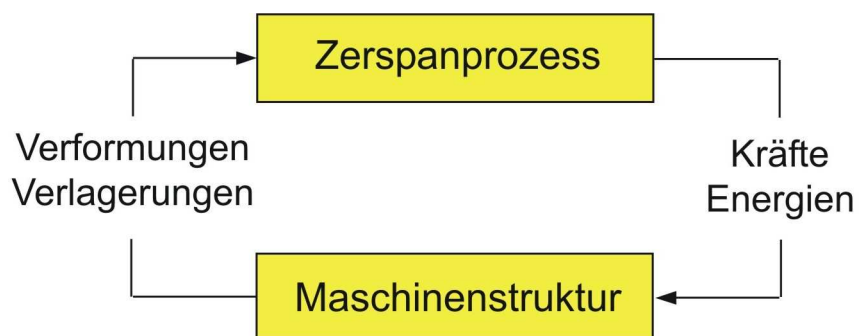


Abbildung 1: Bearbeitungsprozess als ein „Closed Loop System“ nach [1]

Unter dem Begriff Maschinenstruktur werden alle beteiligten Elemente der Maschine inkl. Spindel, Werkzeugaufnahme, Werkzeug, Werkstück, Werkstückspannsystem verstanden, da diese Bestandteile der PMI für die Erzielung bestmöglicher Arbeitsergebnisse entscheidende Einflussfaktoren sind. Das eingesetzte Werkzeug hat z.B. einen großen Einfluss auf die erzielbaren Arbeitsergebnisse, da diese von seinem Schneidstoff, seiner Schneidengeometrie, seiner Beschichtung aber auch seinem Verschleißzustand abhängen.

Bei der Mikrozerspanung dominiert innerhalb der PMI die Untermenge Prozess-Werkzeug-Interaktion, wobei zum Werkzeug auch deren Aufnahme und die Spindel gehören. Dies liegt zum einen daran, dass mit den immer kleiner werdenden Werkzeugdurchmessern (z.B. $d=0,3\text{mm}$) deren Steifigkeit sinkt und zu einer verhältnismäßig großen Abdrängung des Werkzeugs von der programmierten Bahn sowie zur erhöhten Gefahr von Werkzeugbruch führt. Zum anderen gewinnt die Schneidkantenverrunden immer mehr an Bedeutung, da diese nicht proportional zum Werkzeugdurchmesser abnimmt, sondern eher konstant bleibt, da die Werkzeuge der Mikrozerspanung ähnlich wie die herkömmlichen Werkzeuge mittels Schleifen mit Diamantschleifscheiben hergestellt werden. [3]

Heutzutage werden Prozessgrößen an spanenden Werkzeugmaschinen mit Hilfe von unterschiedlichsten Kraft-, Drehmoment-, Wirkleistungs-, Differenzdruck-, Körperschall- und Lasersensoren (Abstandssensoren, Strahlschranken) sowie Tastern visualisiert und überwacht. In wenigen Fällen werden die Prozesse auch anhand der erfassten Prozessgrößen geregelt. Dieses ist in den letzten Jahren notwendig geworden, da erstens die Anforderungen an die Prozesssicherheit und -stabilität deutlich gestiegen sind und zweitens nur so bei der Vielzahl der verschiedenartigsten Zerspanprozesse bestmögliche Arbeitsergebnisse kosten-, zeit- oder verschleißoptimal erzielt werden können. Die Sensoren liefern beispielsweise Aussagen über die sich aus den eingestellten Eingangsgrößen ergebenden Prozesskenngrößen, teilweise aber auch Aussagen über Werkzeugzustände (Verschleiß, Bruch etc.), d.h. Aussagen über die Prozess-Maschine-Interaktion. Die Sensoren werden zum Teil prozessbegleitend (Inprozess), aber auch vor und nach dem Zerspanprozess (Pre-/Postprozess) eingesetzt. Die Inprozess-Messungen vermeiden grundsätzlich Nebenzeiten und entlasten den Maschinenbediener, sind aber prozessbedingten Messunsicherheiten unterworfen. Die Pre-/Postprozess-Messungen haben dagegen auf Grund der „stehenden“ Prozesse eine sehr hohe Erkennungssicherheit und sind einfach handhabbar, verlängern aber die Fertigungszeiten. Manche Sensoren liefern zu-

sätzlich noch weitere Signale, beispielsweise für die Erkennung des Werkstückanschnittes. [4, 5, 6]

Folglich ist heutzutage die Verfügbarkeit und der Einsatz kostengünstiger und modellarmer Sensoren zur direkten Erfassung der Prozess-Maschine-Interaktion beim Zerspanen im unterbrochenen Schnitt eingeschränkt. Um aus den primären Messsignalen mehrere Prozessgrößen zu ermitteln, sind Multi-Modell-Systeme notwendig, durch die aber die Berechnung der Prozessgrößen häufig mit Fehlern und Unsicherheiten behaftet ist.

Innovativer Stromdurchgangssensor

Das am LaFT neu entwickelte Verfahren [7] nutzt die Erkenntnis, dass sich beim Schneideeingriff von elektrisch leitenden Werkzeugen in elektrisch leitenden Werkstücken ein dynamischer elektrischer Übergangswiderstand ausbildet. Durch einen während des Prozesses kontinuierlich eingespeisten Strom lässt sich in Umgehung der Spindel direkt der prozessabhängige elektrische Übergangswiderstand zwischen Werkzeug und Werkstück als eine Spannung messtechnisch erfassen. Diese zum Übergangswiderstand proportionale Spannung spiegelt die Prozess-Maschine-Interaktion wieder. Das Verfahren beeinflusst dabei den eigentlichen Prozessverlauf nicht und ist somit rückwirkungsfrei.

Bei der Umsetzung des Verfahrens als Stromdurchgangssensor, wird als Schaltung, siehe Abbildung 2, ein Stromkreis aufgebaut, in dem ein Gleichstrom aus einer Quelle in Umgehung der Spindel direkt über das Werkzeug und die Kontaktstelle Werkzeug/Werkstück zum Werkstück und dann wieder zurück zur Quelle geleitet wird. Der dynamische elektrische Übergangswiderstand zwischen Werkzeug und Werkstück R_{ii} ändert sich dabei prozessabhängig. Wenn der Stromfluss von einem unendlichen Übergangswiderstand (Werkzeug und Werkstück haben kein Kontakt) unterbrochen wird, muss dieser, um die Bildung von Funkenüberschlag zwischen Werkzeug und Werkstück zu vermeiden, über einen zum dynamischen Übergangswiderstand parallelgeschalteten Widerstand R_2 umgeleitet werden, da der Stromfluss auf Grund seiner physikalischen Eigenschaften immer stetig ist. Der konstante Gesamtstrom teilt sich bei der Parallelschaltung dieser beiden Widerstände zu zwei zu den Widerstandswerten umgekehrtproportionalen Teilströmen auf. Gemessen wird der durch den Gesamtstrom erzeugte Spannungsabfall über die parallel geschalteten Widerstände. Auf den Messwert hat der zum Übergangswiderstand parallel geschaltete Widerstand wenig Einfluss, da dieser erheblich größer als der Übergangswiderstand gewählt wird und sich auch auf Grund seines konstanten

Wertes bei der Messwertbewertung bei Bedarf herausrechnen lässt. Zur Strombegrenzung befindet sich vor der Parallelschaltung ein weiterer Widerstand R_1 . Abbildung 3 stellt den erwarteten Signalverlauf am Beispiel des Umfangsfräsens dar. Dabei ist U_{kE} die Spannung über den zum dynamischen Übergangswiderstand parallelgeschalteten Widerstand R_2 (keine Schneide im Eingriff) und U_E die zum dynamischen Übergangswiderstand proportionale Spannung (Schneide im Eingriff).

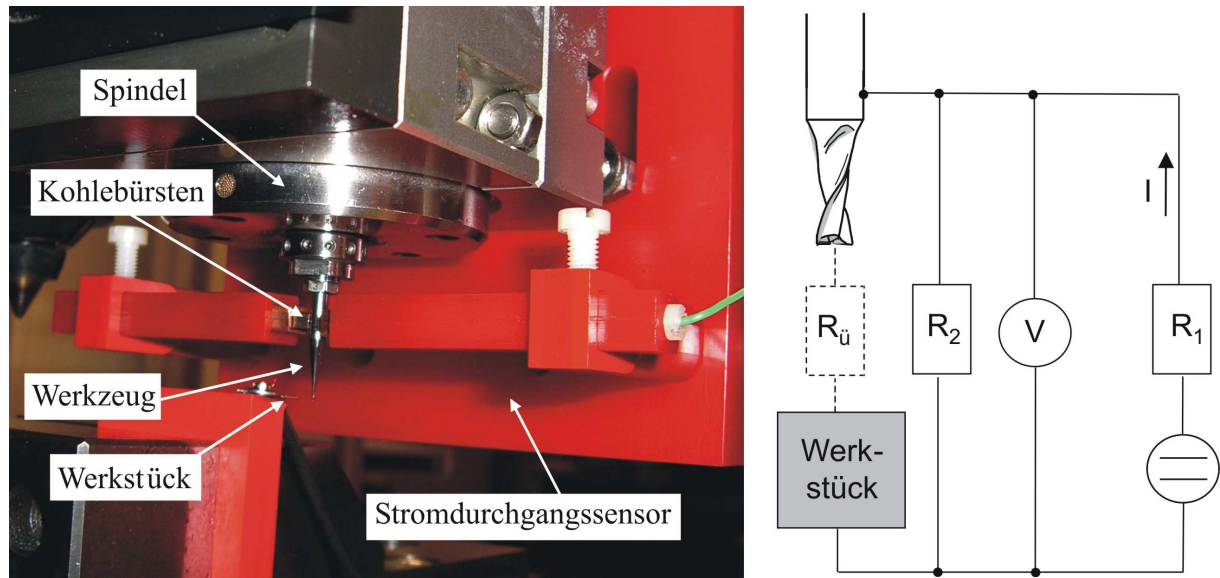


Abbildung 2: Innovativer Stromdurchgangssensor des LaFT

Die Ankontaktierung der Stromquelle am Werkzeug ist äußerst kritisch, da es mit sehr hoher Drehzahl rotieren kann, beispielsweise während der Mikrozerspanung mit Drehzahlen von bis zu 160.000min^{-1} . Der Ankontaktierungswiderstand muss aber dauerhaft konstant sein, um nicht den dynamischen Übergangswiderstand zwischen Werkzeug und Werkstück zu verfälschen. Dabei darf die durch die Ankontaktierung des rotierenden Werkzeugs entstehende Reibungswärme den Ankontaktierungswiderstand nicht verändern. Dieses wird durch den Einsatz eines selbstschmierenden und reibungsarmen Kontaktwerkstoffs erreicht. In der Praxis hat sich der Einsatz von Bronze-Bürsten bewährt.

Dimov hat einen ähnlichen Ansatz gewählt und beschreibt in [8] einen Versuchsaufbau eines indirekten „Tool-Workpiece Voltage Monitoring Systems“, welches auf einem Hochfrequenzstromkreis aufbaut. Dieser bezieht die Spindel einer Werkzeugmaschine mit ihren Übergangswiderständen und Kapazitäten mit ein und scheidert gleichzeitig an den physikalischen Gegebenheiten der Spindelkomponenten. Dieser indirekte Weg wurde von Dimov versuchs-

weise gewählt, da sich bisher eine direkte Messung des Übergangswiderstandes zwischen Werkzeug und Werkstück als unmöglich erwies.

Anwendungsmöglichkeiten des Stromdurchgangssensors

Die mittels des neuen Stromdurchgangssensors direkt während der Zerspanprozesse gewonnenen Messwerte spiegeln die Prozess-Maschine-Interaktion wieder und bieten eine Vielzahl an Anwendungsmöglichkeiten. Abbildung 4a stellt zunächst einen „idealen“ Signalverlauf beim Mikroumfangsfräsen mit einem zweischneidigen, nicht verschlissenen Fräser bei optimalen Einstellgrößen und ohne Kühlschmierung dar, das einem Rechtecksignal (steile Flanken beim Schneideneintritt und -austritt und gleichmäßige Schneideneingriffszeiten) ähnelt. Alle Abweichungen vom „idealen“ Signalverlauf haben ihre Ursachen, was im zerspantechnischen Sinne zur Analyse der PMI genutzt werden können. Ausgewertet werden dabei je nach Anwendung sowohl die Zeitachse (Schneideneingriffszeiten) als auch die Amplitudensachse (Spannung proportional zum Übergangswiderstand zwischen Werkzeug und Werkstück).

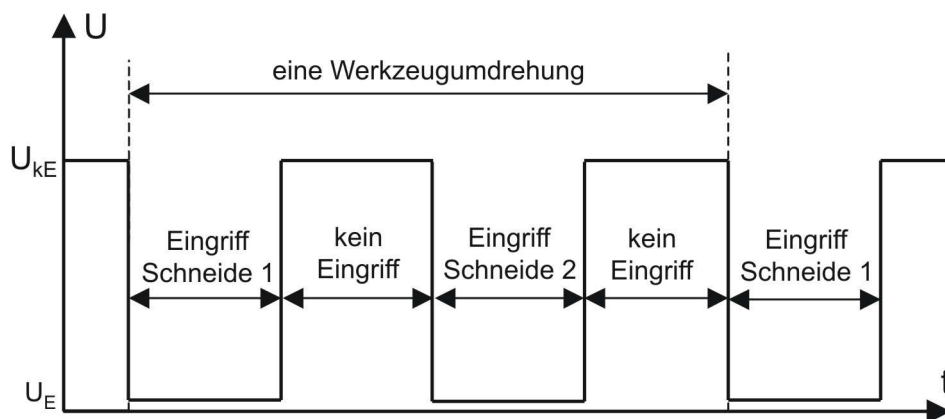


Abbildung 3: Erwarteter Signalverlauf beim Umfangfräsen mit zweischneidigem Werkzeug

Erste Anwendungsmöglichkeiten des Stromdurchgangssensors nutzen die Tatsache, dass mit diesem eindeutig die beiden Zustände „kein Schneideneingriff“ und „Schneide im Eingriff“ ermittelt werden können. Dementsprechend kann aus der Anzahl der Schneideneingriffe in einem bestimmten Zeitintervall die aktuelle Ist-Drehzahl berechnet werden. Weiterhin kann beim Anschnitt der Erstkontakt des Werkzeugs mit dem Werkstück (siehe Abbildung 4b) detektiert werden, woraus sich der Werkstück-Nullpunkt durch eine geeignete Antaststrategie automatisch bestimmen lässt. Ebenso kann nach dem gleichen Prinzip beim mehrmaligen Anschnitt entlang einer Werkstückkante auch die Werkstücklage (Verdrehung des Werkstückkoordinatensystems in Relation zum Maschinenkoordinatensystem) abgeleitet werden. Zugleich

ist der Einfluss der Einstellgrößen (Drehzahl, Zustellung etc.) auf den Zerspanprozess selbst ablesbar. Dies wird am Beispiel nach Abbildung 4c verdeutlicht, wo durch eine zu geringe Zustellung und eine drehzahlbedingte Werkzeugunwucht sich lediglich eine Schneide im Eingriff befindet. Ebenfalls kann bei der Zerspanung von Verbundwerkstoffen der Übergang von einem Werkstoff, z.B. von Stahl (leitend), zum anderen Werkstoff, z.B. Keramik (nicht leitend), erkannt werden.

Darüber hinaus kann der Stromdurchgangssensor zur Analyse von Werkzeugunwuchten, -abdrängung bzw. -verbiegung, -bruch und -verschleiß eingesetzt werden. Werkzeugunwuchten können anhand der Schneideneingriffszeiten erkannt werden. Abbildung 4d zeigt unterschiedlich lange Schneideneingriffszeiten eines zweiseidigen Fräasers beim Mikrofräsen auf. Dabei ist Schneide 2 deutlich kürzer im Eingriff als Schneide 1, was auf eine Werkzeugunwucht schließen lässt. Ist plötzlich keine Schneide mehr im Eingriff, deutet das auf Werkzeugbruch hin.

Das Messsignal ändert sich ebenfalls mit dem während der Bearbeitung zunehmenden Werkzeugverschleiß. Zuerst nehmen die Schneideneingriffszeiten mit der prozessbedingten Schneidkantenverrundung zu. Danach treten, wie in Abbildung 5 dargestellt, Signalstörungen beim eigentlichen Schneideneingriff auf, die auf einen erhöhten Übergangswiderstand hinweisen. Dieser ist bedingt durch die prozessbedingten Schneidkantenverrundung, den Freiflächenverschleiß oder sogar eventuelle Schneidkantenausbrüche. Abschließend ist beim sehr hohen Werkzeugverschleiß auch die Rückseite der Schneide im Eingriff, d.h. es treten Eingriffe auf, wo eigentlich keine Schneide im Eingriff sein sollte. Diese Verschleißphänomene und deren Nachweis mittels REM-Bilder der verschlissenen Fräser sind in Abbildung 5 dargestellt. Besonders erkennbar ist dabei, dass die doppelt geschliffene Freifläche des Fräasers komplett verschliffen ist.

Des Weiteren liefert der Stromdurchgangssensor Messsignale, mit denen der Einfluss von Kühlschmiermitteln auf die Prozess-Maschine-Interaktion untersucht werden kann. Abbildung 4e zeigt beispielhaft, dass beim Einsatz von Kühlschmiermittel die Flanken im Messsignal sowohl beim Schneideneintritt als auch beim Schneidenaustritt nicht, wie es bei der Trockenbearbeitung der Fall ist, steil und eindeutig definiert, sondern eher verzerrt und undefiniert sind. Eine mögliche Ursache dafür könnten hydrodynamische Effekte sein, genauer gesagt die Bildung einer hydrodynamischen Grenzschicht im Bereich des strömenden Kühlschmiermit-

tels am Werkstück oder am Werkzeug. Die Bildung anderer Schichten, die ebenfalls einen Einfluss auf den Übergangswiderstand zwischen Werkzeug und Werkstück haben könnte, wäre auch denkbar. Sollten sich diese Zusammenhänge in weiteren Untersuchungen bestätigen, könnte eine gezielte Beeinflussung der Kühlschmierung und der Schichtbildung, sowie deren Messung bzw. Visualisierung mit dem Stromdurchgangssensor ermöglicht werden.

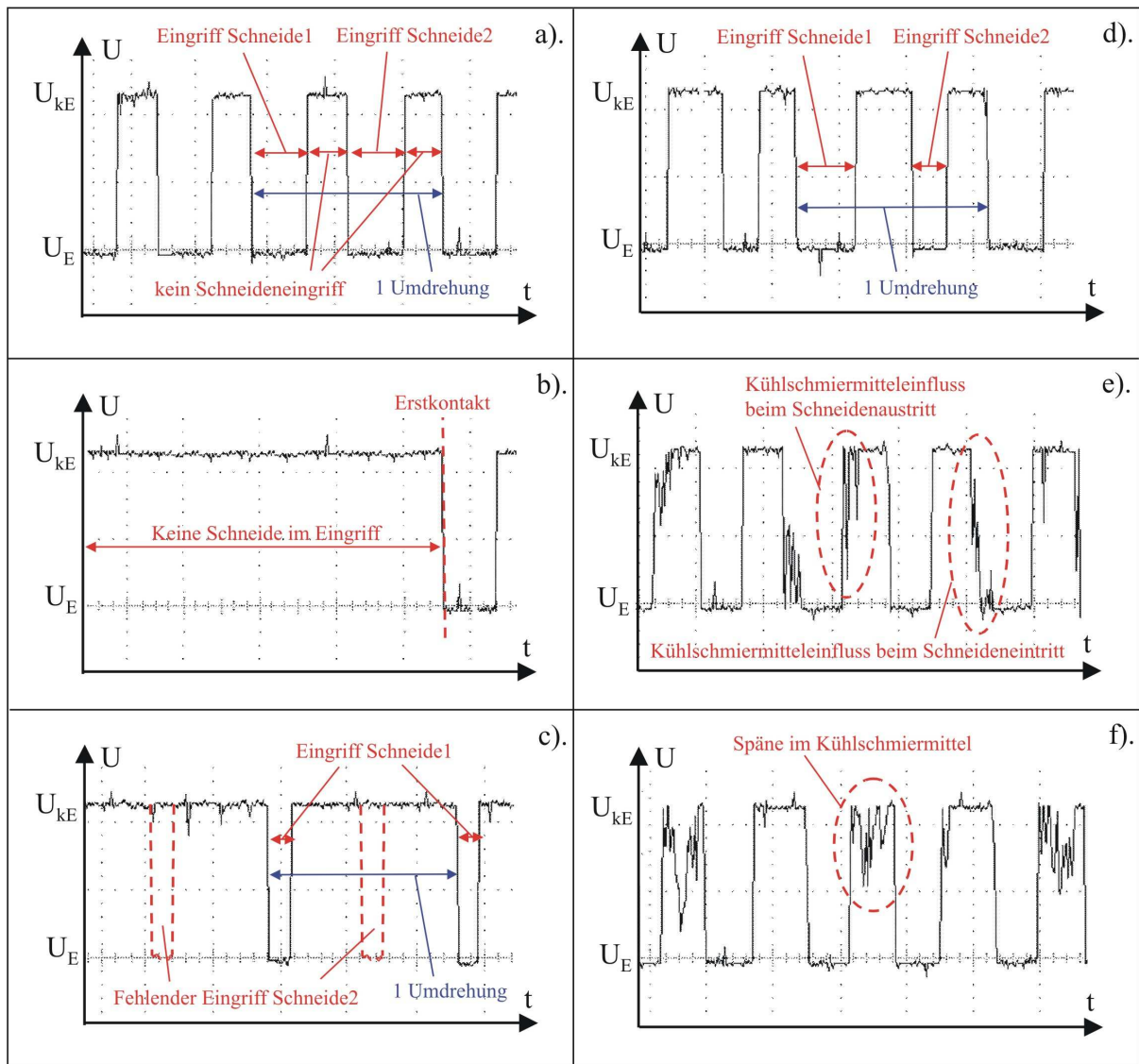


Abbildung 4: Anwendungsmöglichkeiten des Stromdurchgangssensors

Die beim Mikrofräsen anfallenden Späne werden zum größten Teil im Kühlschmiermittel gebunden. Nach Abbildung 4f ist es demnach sehr wahrscheinlich, dass diese im Kühlschmiermittel gebundenen Späne zwischen Werkzeug und Werkstück gelangen und dadurch einen indirekten Kontakt zwischen der Rückseite der Schneide und dem Werkstück, in einem Bereich in dem eigentlich keine Schneide im Eingriff sein sollte, herstellen. Dieser indirekte Kontakt kann im Messsignal eindeutig vom eigentlichen Schneideneingriff unterschieden

werden. Der Übergangswiderstand hängt von der Kontaktkraft ab, d.h. je größer die Kontaktkraft desto größer die Berührfläche und somit kleiner der Übergangswiderstand. Folglich ist der Übergangswiderstand beim indirekten Kontakt zwischen Werkzeug und Werkstück über Späne im Vergleich zum direkten Kontakt beim eigentlichen Schneideneingriff auf Grund der sehr kleinen Kontaktkräfte relativ hoch und somit auch deutlich erkennbar. Die Bindung von Spänen im Kühlschmiermittel wird ähnlich wie die Schichtbildung in weiteren Arbeiten näher untersucht.

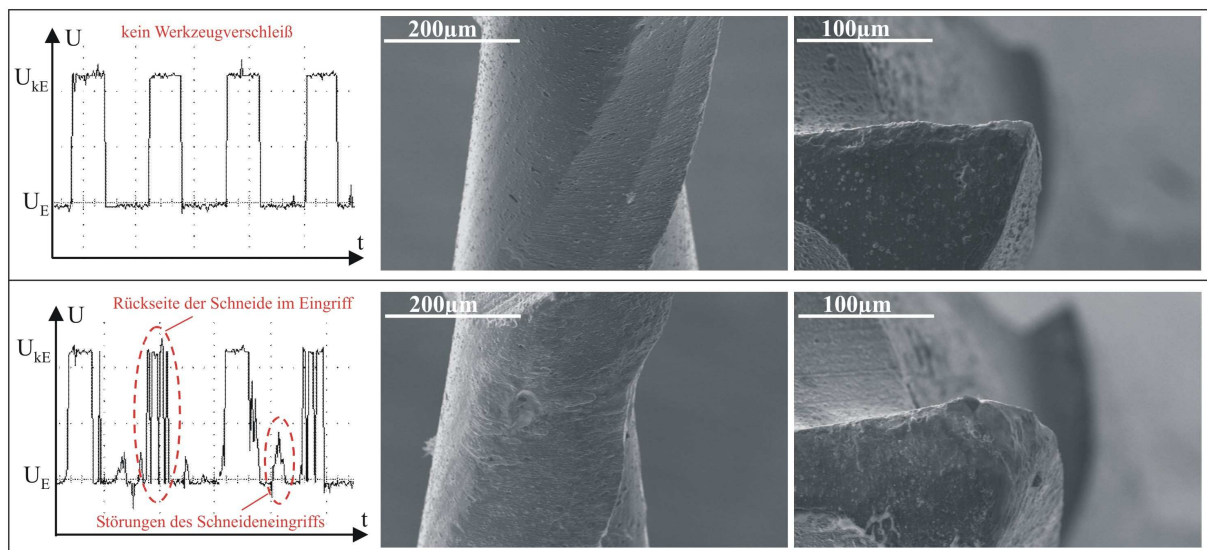


Abbildung 5: Verschleißdetektion mit dem Stromdurchgangssensor

Wie bereits erwähnt, kann der Stromdurchgangssensor auch zur Regelung bzw. Steuerung der Prozess-Maschine-Interaktion eingesetzt werden. Beispielsweise könnte die nach Abbildung 4c zu gering eingestellte Zustellung und das daraus resultierende Ergebnis, dass nur eine Schneide im Eingriff ist, nachgeregelt werden, indem die Zustellung automatisch so lange vergrößert wird, bis beide Schneiden gleichmäßig im Eingriff sind (vgl. Abbildung 4a). Solch eine Regelung der Einstellgrößen verbessert die Prozess-Maschine-Interaktion, durch die die Prozesssicherheit und -stabilität gesteigert und kosten-, zeit- und verschleißoptimale Erzielung bestmöglicher Arbeitsergebnisse ermöglicht wird.

Zusammengefasst ist festzustellen, dass bereits heute mit dem neu am LaFT entwickelten Stromdurchgangssensor, auch in dem für die Mikrozerspannung besonders bedeutsamen hohen Drehzahlenbereich von bis zu 160.000 min^{-1} und höher, die aktuelle Ist-Drehzahl, der Erstkontakt beim Anschnitt, die Werkstücklage, Werkzeugunwucht, -abdrängung bzw. -verbiegung, -bruch und -verschleiß sowie der Werkstoffübergang detektiert und visualisiert

werden können. Der Einsatz des Stromdurchgangssensors zur Analyse des Einflusses von Kühlschmiermitteln und der dazugehörigen Schichtbildung wird in zukünftigen Arbeiten näher untersucht. Im Weiteren soll der Sensor zur Prozessregelung und somit zur Regelung der Prozess-Maschine-Interaktion eingesetzt werden.

Quellen

- [1] Inasaki, I.: **Machining Processes in Precision Engineering**. In: Klocke, F.; Pritschow, G.: Autonome Produktion. Springer Verlag, Berlin [u.a.] 2004
- [2] Denkena, B.: **Prognose und Beeinflussung der Wechselwirkungen von Strukturen und Prozessen**. Antrag auf Einrichtung eines neuen DFG-Schwerpunktprogramms, IFW Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen, Universität Hannover, 2004
- [3] Bergmann, S. et al.: **Bearbeitungskonzepte für die Zerspanung von Mikro- und Leichtbaustrukturen**. Proceedings 50. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium - Mechanical Engineering from Macro to Nano, Ilmenau 2005
- [4] Tönshoff, H.K.; Denkena, B.: **Spanen - Grundlagen**. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2004
- [5] Weck, M.: **Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme**. VDI-Buch, Springer Verlag, Berlin 2005
- [6] Werner, A.R.: **Prozessauslegung und Prozesssicherheit beim Einsatz von schlanken Schaftfräsern**. Shaker Verlag, Aachen 1993.
- [7] Wulfsberg, J. P.; Brudek, G.; Bruhns, F.: **Verfahren zur Visualisierung, Überwachung und Regelung der Prozess-Maschine-Interaktion beim Zerspanen im unterbrochenen Schnitt**. Patentanmeldung 13.12.2005, Aktenzeichen 10 2005 059 945.1
- [8] Dimov, S.: **Multi-Material Micro Manufacture**. 3. Erlanger Workshop on Microforming, Erlangen 2005