

Temperatur-, Kraft- und Verschleißmessung zur Digitalisierung von Zerspanungsprozessen

Werkzeugintegrierte Dünnschichtsensorik

M. Plogmeyer, G. González, V. Schulze, G. Bräuer

Mit Dünnschichtsensoren werden die Temperaturen, Kräfte und der Werkzeugverschleiß in Zerspanungsprozessen in unmittelbarer Nähe zur Wirkzone erfasst. Dadurch können zum einen analytische Modelle zur Beschreibung von Randschichtzuständen präzise kalibriert werden. Zum anderen kann mit den in-process erfassten Kenngrößen ein sogenannter Softsensor zur Regelung der Prozessstellgrößen implementiert werden, um gezielt Randzoneigenschaften des Werkstücks einzustellen.

Tool-integrated thin-film sensors – Temperature, force and wear measurement for the digitalization of cutting processes

Thin film sensors are used to record temperatures, forces and tool wear in machining processes in the immediate vicinity of the contact zone between tool and workpiece. On the one hand, this makes it possible to precisely calibrate analytical models for describing boundary layer conditions. On the other hand, the parameters recorded in-process can be used to implement a so-called soft sensor for controlling the process parameters in order to specifically adjust the properties of the subsurface layer of the workpiece.

STICHWÖRTER

Beschichtungen, Sensoren, Messen/Steuern/Regeln

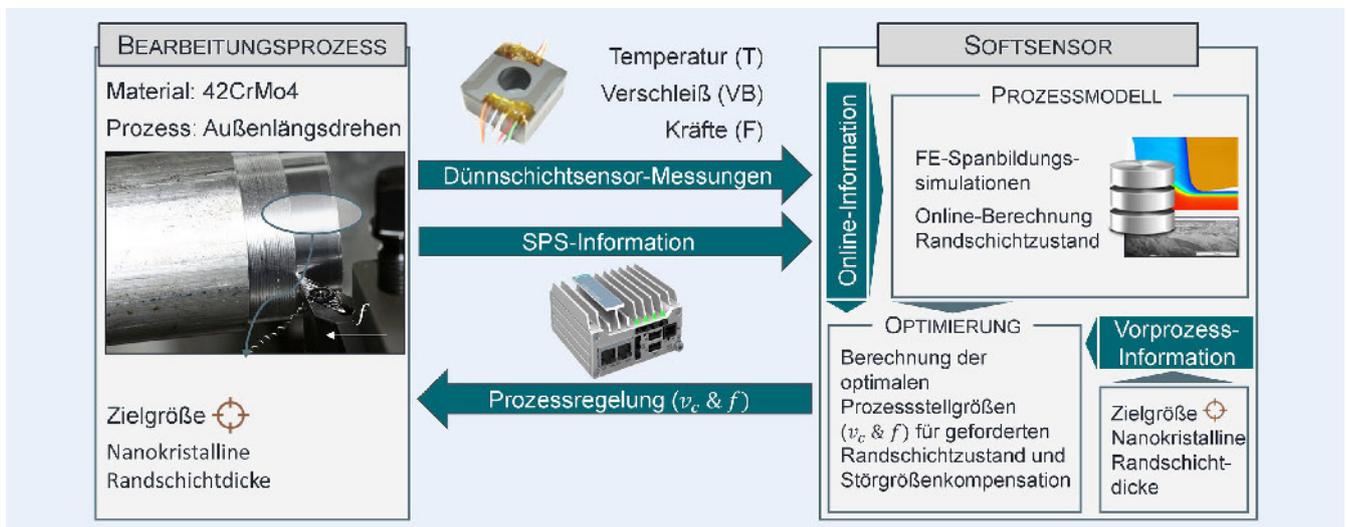


Bild 1. Regelkreis der Softsensorik mithilfe von Dünnschichtsensorik. Grafik: KIT wbk

1 Einleitung und Motivation

Durch Digitalisierung und Automatisierung von Fertigungsprozessen steigt der Bedarf an Informationen über die Prozessgrößen. Wichtig ist es, diese Größen wirkstellennah und präzise zu erfassen, um den größtmöglichen Nutzen daraus zu gewinnen. Zur Erfüllung dieses Bedarfs bietet sich die Dünnschichtsensorik an, die in Beschichtungsprozessen in Dicken von weniger als 10 μm direkt auf Werkzeuge abgeschieden werden kann. Mit der Dünnschichtsensorik können etwa für das Außenlängsdrehen Temperaturen direkt in der Werkzeug-Span-Kontaktzone oder

der Freiflächenverschleiß während des Prozesses erfasst werden. Auch Schnittkräfte lassen sich in unmittelbarer Nähe zum Werkzeug erfassen. Darauf aufbauend ermöglichen die Dünnschichtsensoren die Entwicklung einer in-process-fähigen Regelung des Außenlängsdrehens, welche prozesssicher und verschleißunabhängig gezielt nanokristalline Randschichten an vergütetem 42CrMo4 einzustellen gestattet (Bild 1) [1].

Übergeordnetes Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es, mithilfe eines Prozessmodells (Softsensor) die Schnittgeschwindigkeit und den Vorschub während des Prozesses zu verändern, um die gezielte Erzeugung einer Werkstückrandschicht regeln zu

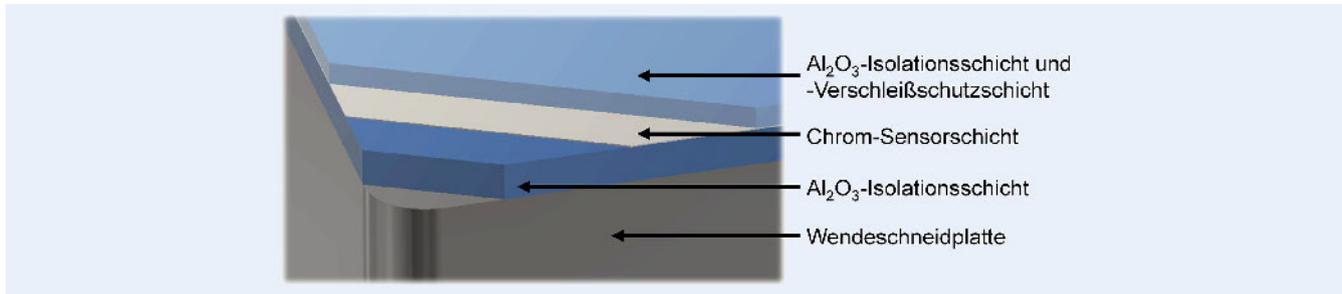


Bild 2. Schematische Darstellung des Schichtsystems zur Temperaturmessung [3]. Grafik: TU Braunschweig IOT

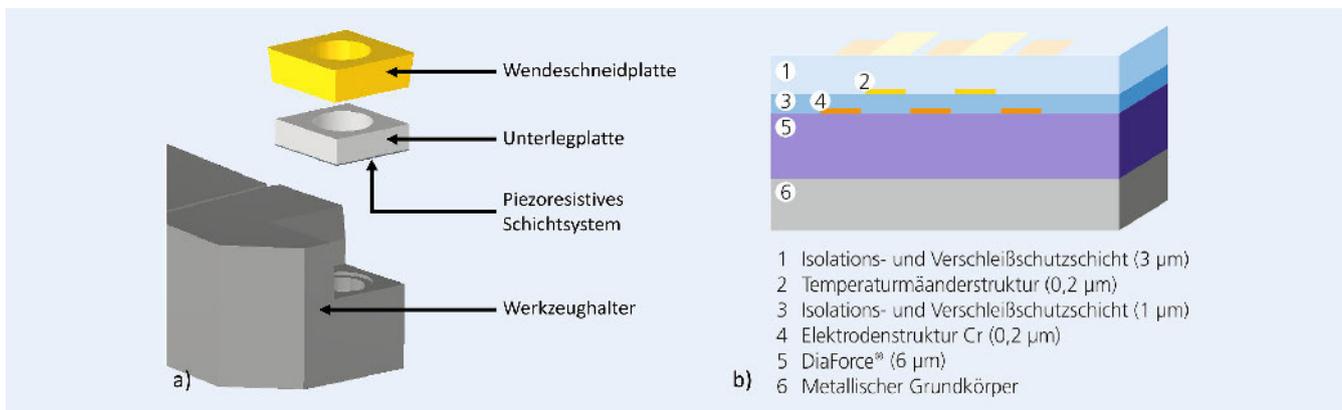


Bild 3. a) Explosionsdarstellung für die Integration der Kraftsensorik; b) Schematische Darstellung des piezoresistiven Dünnschichtsystems. Grafik: a) TU Braunschweig IOT; b) Fraunhofer IST

können. Indem der Softsensor die Korrelationen der Prozessstellgrößen und des auf die Bauteilrandschicht wirkenden thermomechanischen Lastkollektivs mit der entstehenden nanokristallinen Randschicht und deren Dicke bereitstellt, lassen sich der Randschichtzustand (Englisch: Surface Integrity) und damit auch das Reibungs- und Verschleißverhalten sowie die Lebensdauer bei schwingender Belastung von Wellen gezielt einstellen [2].

2 Entwicklung der Dünnschichtsensorik

Zur wirkstellennahen Erfassung der Messgrößen Temperatur, Verschleiß und Schnittkraft werden geeignete Dünnschichtsensoren entwickelt. Das jeweilige Dünnschichtsystem wird dabei entweder direkt auf das Werkzeug abgeschieden (Temperatur und Verschleißmessung) oder für die Kraftmessung in unmittelbarer Nähe zum Werkzeug in den Werkzeughalter integriert. Die einzelnen Messmethoden sind im Folgenden im Detail erläutert.

2.1 Temperatursensor

Das für die Temperaturmessung verwendete Schichtsystem ist in Bild 2 dargestellt [3].

Alle Schichten werden in PVD-Prozessen (Physikalische Gasphasenabscheidung) direkt auf das Werkzeug (Geometrie SNGA 190908) abgeschieden. Zunächst wird eine 3–4 µm dicke Aluminiumoxid (Al_2O_3)-Isolationsschicht aufgebracht, um die Sensoren vom metallischen Grundkörper zu isolieren. Im Anschluss wird eine 200-nm-Chrom-Sensorschicht und abschließend eine weitere Isolations- und Verschleißschutzschicht aus Al_2O_3 mit einer Dicke von $t = 2 \mu\text{m}$ abgeschieden. Die Temperatursensorik basiert auf dem thermoresistiven Verhalten der Chrom-Sensor-

strukturen. Die Strukturierung der Sensorschicht erfolgt durch Fotolithografie. Es ist möglich, 10 µm breite Leiterbahnstrukturen bis zu 100 µm nah an der Schneidkante zu fertigen.

2.2 Verschleißsensor

Das Prinzip der Verschleißsensorik basiert auf parallel geschalteten Leiterbahnen, die entlang der Schneidkante platziert werden, und deren Gesamtwiderstand per Zweipunktmessung ausgelesen wird. Wird eine Leiterbahn bei fortschreitender Verschleißmarkenbreite durchtrennt, führt dies zu einer Erhöhung des Gesamtwiderstands. Die Leiterbahnen sind parallel zur Schneidkante in definierten Abständen angeordnet, wodurch sich die Auflösung ergibt.

2.3 Kraftsensor

Für die Messung der Schnittkraft wird die Sensorik nicht direkt auf dem Werkzeug, sondern unterhalb einer Unterlegplatte zwischen Werkzeughalter und Werkzeug aufgebracht (Bild 3 a).

Dies bietet den Vorteil, dass beim Wechseln des Werkzeugs die Kraftsensorik nicht mitausgetauscht werden muss, sodass Kosten reduziert werden. Weiterhin ist das Dünnschichtsystem auf der Unterlegplatte vor unmittelbarem Verschleiß und hohem Temperatureinfluss geschützt. Zudem lässt sich eine Unterlegplatte einfach und ohne großen Aufwand in fast jedes Werkzeug integrieren, so dass eine Maschine nicht mit einer teuren Kraftmessplattform ausgerüstet werden muss. Umgesetzt wird das Messprinzip mit einem piezoresistiven Dünnschichtsystem, das bereits in anderen Anwendungen zur statischen und dynamischen Kraftmessung zum Einsatz kommt, wie bei der Überwachung von

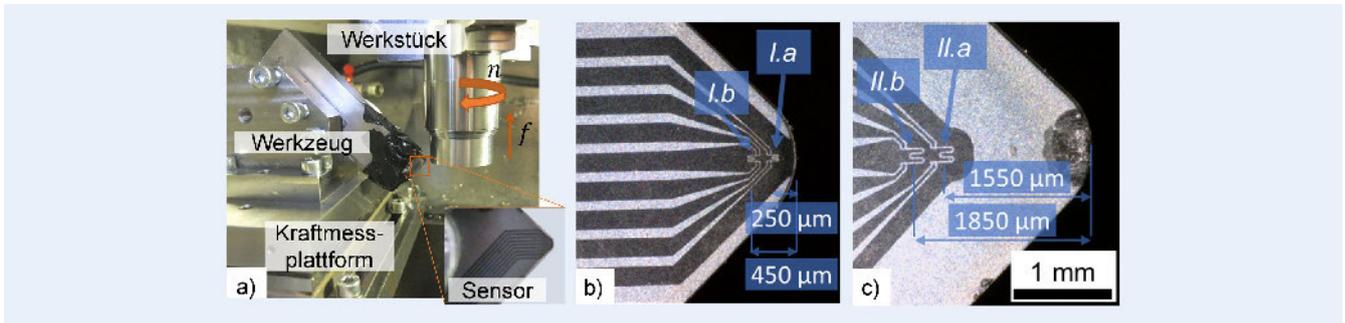


Bild 4. a) Versuchsaufbau; b) Position der Sensoren I.a und I.b; c) Position der Sensoren II.a und II.b. Foto: KIT wbk

Tabelle. Prozessparameter für die Versuche mit den Dünnschichtsensoren.

v_c in m/min	f in mm/rev	a_p in mm	r_c in mm	r_f in μm	γ	α	β	κ	λ
100	0,15	0,05 – 0,3	0,8	5	-7°	7°	90°	45°	0°

Schraubverbindungen [4] oder auf Werkzeugen in der Umformtechnik [5]. Der schematische Aufbau ist in Bild 3 b dargestellt.

Auf der metallischen Unterlegplatte, deren Oberfläche eine Rauheit von $R_z < 0,1 \mu\text{m}$ aufweisen sollte, um Kurzschlüsse zu vermeiden, wird eine amorphe, diamantähnliche Kohlenwasserstoffschicht (diamond-like carbon, DLC), die „DiaForce“-Schicht, homogen mit einer Dicke von circa $t = 6 \mu\text{m}$ in einem PACVD (plasmaunterstützte chemische Gasphasenabscheidung)-Prozess abgeschieden. Darauf wird mittels Fotolithografie eine Elektrodenstruktur aus Chrom gefertigt. Es folgt eine circa $1 \mu\text{m}$ dicke, elektrisch isolierende, mit Silizium und Sauerstoff modifizierte amorphe Kohlenwasserstoffschicht, die „Sicon“-Zwischenschicht, die ebenfalls im PACVD-Prozess abgeschieden wird. Auf dieser werden die Leiterbahnen, wiederum aus Chrom, strukturiert und mit einer zweiten abschließenden Sicon-Schicht isoliert und vor Verschleiß geschützt. Der Widerstand der DiaForce-Schicht wird unter Kraftereinfluss zwischen Elektrode und metallischem Grundkörper gemessen. Es ergibt sich eine lineare Widerstandsabhängigkeit von der Belastung

3 Messungen in der Zerspanung

Die Temperatur- und Verschleißsensoren wurden in Außenlängsdrehversuchen von vergütetem 42CrMo4 (Anlasstemperatur = 650°C) an einer Vertikaldrehmaschine „Index V100“ getestet. Die Implementierung der Kraftsensorik in den Zerspanungsprozess steht zum jetzigen Zeitpunkt noch bevor.

3.1 Temperaturmessung

Es wurde die Funktion und Lebensdauer der Dünnschichtsensoren in den Zerspanungsversuchen untersucht. Der Versuchsaufbau ist in Bild 4 a gezeigt. Die Versuchsparameter sind in der Tabelle aufgelistet.

Die gezeigten Temperaturmessungen wurden mit zwei verschiedenen Wendeschneidplatten aufgenommen: Zum einen mit Sensoren, welche sehr nah an der Schneidkante platziert waren (Bild 4 b), zum anderen mit Sensoren mit größerem Abstand zur Schneide (Bild 4 c).

Für eine Schnitttiefe von $a_p = 0,1 \text{ mm}$ sind die Ergebnisse in Bild 5 a vergleichend dargestellt.

Zu Beginn des Schnitts bei $t = 0 \text{ s}$ steigen die Temperaturen jeweils schnell an, was die geringe Latenz der Oberflächensensorik demonstriert. Während der Sensor I.a bereits bei geringer Schnitttiefe defekt war und deshalb nicht aufgeführt ist, spiegeln die anderen Sensoren sehr gut den Temperaturgradienten auf der Werkzeugoberfläche wider. Dadurch zeigt sich die gute Ortsauflösung der Sensoren. Bild 5 b stellt die Messungen des Sensors II.a für verschiedene Schnitttiefen dar. Mit zunehmender Schnitttiefe nimmt die Temperatur zu. Besonders in unmittelbarer Nähe zur Schneidkante kam es sehr früh zu Schichtabplatzungen (Bild 4 c), die sich mit fortschreitender Versuchsdauer ausbreiteten und damit zu Sensorausfällen führten. Die Sensoren II.a und II.b lagen jedoch weit genug von der Schneidkante entfernt, sodass sie auch nach allen Versuchen mit einem Gesamtzerspanweg von circa 100 m noch intakt waren.

3.2 Verschleißmessung

Für die Verschleißmessungen wurden wiederum die Prozessparameter aus der Tabelle verwendet. Mit den um die Ecke geführten Leiterbahnen konnte nach mehreren Schnitten bei einer Schnitttiefe von $a_p = 0,3 \text{ mm}$ eine sprunghafte Widerstandsänderung mittels Durchtrennung der ersten Leiterbahn festgestellt werden. In Bild 6 ist der Widerstandsverlauf des Schnitts, in dem die Durchtrennung auftrat, dargestellt.

Der kontinuierliche Widerstandsanstieg zu Beginn ist auf die Temperaturerhöhung während des Schnitts zurückzuführen, entsprechend das spätere Absinken auf das Ende des Schnitts bei circa 12 s. Anhand der Mikroskopbilder vor und nach dem Schnitt ist deutlich erkennbar, wie ein Teil des Schichtsystems bis in den Bereich der ersten Leiterbahn abgeplatzt ist. Während das wesentliche Funktionsprinzip des Sensors somit nachgewiesen werden konnte, muss in der weiteren Entwicklung die Haftung des Schichtsystems, wie auch für die Temperatursensorik, weiter verbessert werden, um mit dem Sensor den tatsächlichen Werkzeugverschleiß und nicht nur Schichtabplatzungen zu detektieren.

4 Ausblick

Die präsentierten Entwicklungen bei der Dünnschichtsensorik sollen im nächsten Schritt zusammengeführt werden, sodass am

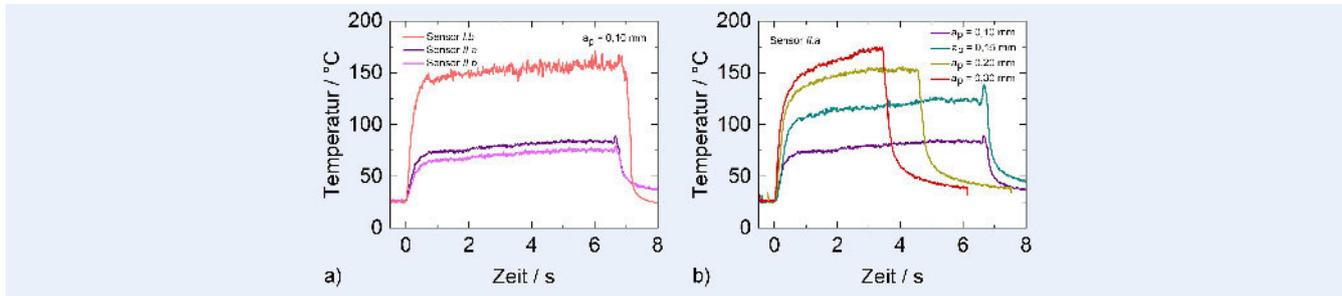


Bild 5. a) Gemessene Werkzeugoberflächentemperatur an drei verschiedenen Positionen; b) gemessene Werkzeugoberflächentemperatur bei verschiedenen Schnitttiefen. Grafik: TU Braunschweig IOT

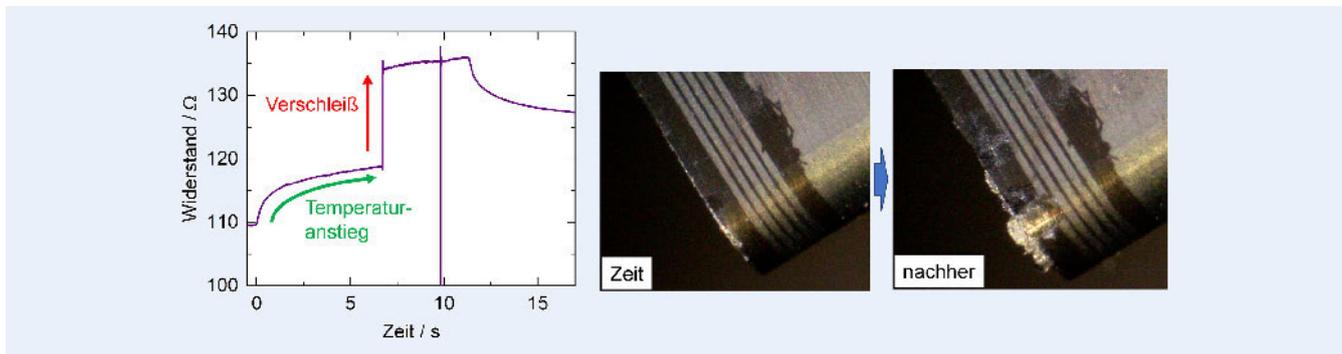


Bild 6. Messsignal sowie Mikroskopbilder der Freiflächenverschleißmessung vor und nach dem Schnitt. Foto: KIT wbk

Ende ein multisensorisches Werkzeug vorliegt. Gleichzeitig müssen Lebensdauer und Beschichtungsqualität der Temperatur- und Verschleißsensorik verbessert werden. Vielversprechende Ansätze werden derzeit umgesetzt. Schließlich wird der oben beschriebene Softsensor zur gezielten Einstellung von nanokristallinen Randschichtzuständen mithilfe der Dünnschichtsensoren umgesetzt.

So werden der Industrie in Zukunft Möglichkeiten eröffnet, ihre Prozesse zu digitalisieren, zu überwachen und vor allem hinsichtlich der Qualität der gefertigten Teile zu optimieren.

10. Internet: www.logistics-journal.de/proceedings/2013/3782. Zugriff am 01.12.2022
- [5] Biehl, S.; Rumposch, C.; Paetsch, N. et al.: Multifunctional thin film sensor systems as monitoring system in production. *Microsystem Technologies* 22 (2016) 7, pp. 1757–1765

DANKSAGUNG

Die Arbeit wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG im Rahmen des Schwerpunktprogramms SPP 2086 (BR 2178/47–2, SCHU 1010/63–2). gefördert. Die Autoren danken der DFG für die finanzielle und technische Unterstützung.

Literatur

- [1] Stampfer, B.; González, G.; Gerstenmeyer, M. et al.: The present state of surface conditioning in cutting and grinding. *Journal of Manufacturing and Materials Processing* 5 (2021) 3, pp. 1–17
- [2] Brown, M.; Wright, D.; M'Saoubi R. et al.: Destructive and non-destructive testing methods for characterization and detection of machining-induced white layer: A review paper. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* (2018) 23, pp. 39–53
- [3] Plogmeyer, M.; González, G.; Schulze V. et al.: Development of thin-film based sensors for temperature and tool wear monitoring during machining. *Tm-Technisches Messen* 87 (2020) 12, pp. 768–776
- [4] von Daacke, S. Overmeyer, L.: InUse – Intelligente Unterlegscheibe zur Messung der Kräfte in Schraubverbindungen. *Logistics Journal* (2013)



Marcel Plogmeyer, M.Sc.
Foto: Fraunhofer IST

Prof. Dr. **Günter Bräuer**
Technische Universität Braunschweig
Institut für Oberflächentechnik IOT
Bienroder Weg 54 E, 38114 Braunschweig
Tel. +49 351 / 2155-661
m.plogmeyer@tu-braunschweig.de
www.tu-braunschweig.de/iot

Marcel Plogmeyer, M.Sc.
Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik IST
Bienroder Weg 54 E, 38114 Braunschweig
Tel. +49 351 / 2155 661
marcel.plogmeyer@ist.fraunhofer.de
www.ist.fraunhofer.de

Germán González, M.Sc.
Prof. Dr.-Ing. habil. **Volker Schulze**
Karlsruhe Institut für Technologie
wbk Institut für Produktionstechnik
Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe
Tel. +49 1523 / 9502577
german.gonzalez@kit.edu
www.wbk.kit.edu