

Ansätze zur Hochleistungszerspanung bleifreier Kupferwerkstoffe

Klocke, F.; Lung, D.; Nobel, C. (1)

Kupferwerkstoffen werden in der Regel zerspanungsverbessernde Elemente, insbesondere Blei, zulegiert, um eine hohe Produktivität und geringe Fertigungskosten bei der spanenden Bearbeitung zu realisieren. Das in der Matrix praktisch unlösliche Blei wirkt in feindisperser Verteilung als ausgezeichneter Spanbrecher [1]. Zudem bildet das Blei in der Kontaktzone zwischen Werkzeug und Spanunterseite einen reibungsmindernden Schmierfilm aus, der die Zerspankräfte und damit die mechanische Belastung auf das Werkzeug und das Werkstück reduziert [2]. Hieraus resultieren lange Werkzeugstandzeiten und eine hohe geometrische Maßhaltigkeit der gefertigten Bauteile. Bleilegierte Kupferwerkstoffe wie das Automatenmessing CuZn39Pb3 zählen daher zu den am besten zu zerspanenden Metallen.

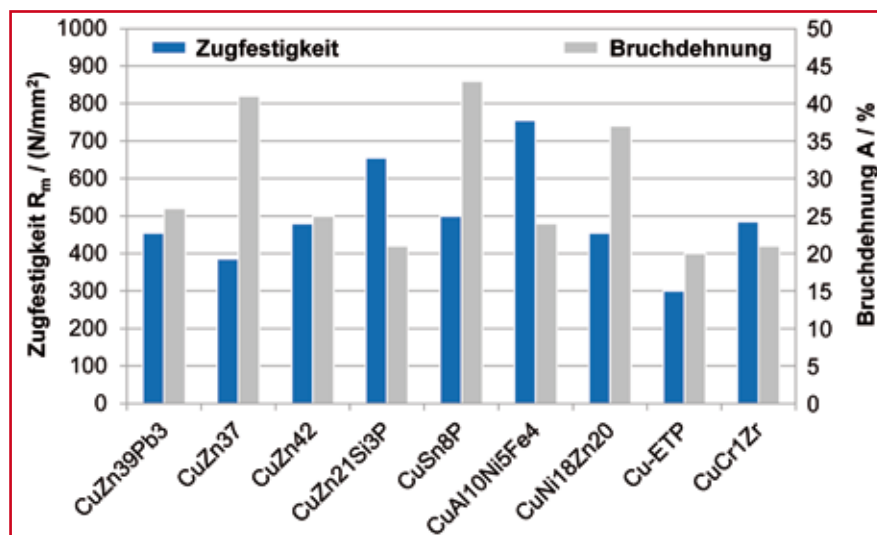


Bild 1: Zugfestigkeit und Bruchdehnung einiger der untersuchten Kupferwerkstoffe

Seit den 1990er Jahren wird weltweit und auch verstärkt von der Europäischen Kommission und den EU-Mitgliedsstaaten das Ziel verfolgt, die Emissionen und die Verwendung von Schwermetallen, insbesondere Blei, zum Schutz von Gesundheit und Umwelt zu reduzieren [3]. Aus diesem Bestreben resultieren Richtlinien wie die deutsche Trinkwasserverordnung TrinkwV 2001 und die Richtlinien 2000/53/EG bzw. 2002/95/EG des Europäischen Parlamentes und Rates über Altfahrzeuge bzw. alte Elektro- und Elektronikgeräte, die den Einsatz von Blei in Kupferlegierungen limitieren. Die spanende Bearbeitung bleifreier Kupferlegierungen ist zwar besser im

Vergleich zu einigen anderen metallischen Werkstoffen wie hochfestem Stahl oder Nickel-Basislegierungen, im Vergleich zu den bleihaltigen Kupferlegierungen jedoch wesentlich schwieriger.

Vor diesem Hintergrund wird am Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der RWTH Aachen im Rahmen eines vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie über die AiF im Programm zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) finanzierten öffentlichen Projektes eine angepasste Hochleistungszerspanung für schwer zerspanbare bleifreie Kupferwerkstoffe entwickelt. In systematischen Untersuchungen zum Außenlängsdrehen wurde in einem ersten Schritt die Zerspan-

barkeit von Reinkupfer, niedriglegiertem Kupfer, Messing, Sondermessing, Zinn- und Aluminiumbronze sowie Neusilber hinsichtlich Spanform, Zerspankraft, Oberflächenqualität und Werkzeugverschleiß beurteilt und mit dem bleihaltigen Automatenmessing CuZn39Pb3 (Zerspanbarkeitsindex 100) verglichen. Eine Übersicht über die Zugfestigkeit und Bruchdehnung einiger dieser Werkstoffe ist in Bild 1 dargestellt.

CuZn39Pb3 zeigte wegen der positiven Auswirkungen des Legierungselementes Blei in jeder Hinsicht eine sehr gute Zerspanbarkeit. Das Reinkupfer Cu-ETP und niedriglegierte Kupfer CuCr1Zr sowie eine Vielzahl bleifreier Legierungen wie CuZn37, CuZn42, CuSn8P, CuAl10Ni5Fe4 und CuNi18Zn20 erwiesen sich hinsichtlich des Spanbruchs hingegen als schwierig zu zerspanen. Die beim Drehen verschiedener Kupferwerkstoffe mit $v_c = 200$ m/min, $a_p = 2$ mm und $f = 0,1$ mm entstandenen Spanformen sind in Bild 2 (links) dargestellt. Durch das Fehlen des spanbruchfördernden Legierungselementes Blei bildeten sich oftmals lange Band- oder Wirrspäne aus, die sich zum Teil um das Werkstück oder den Werkzeughalter wickelten. In der automatisierten Fertigung ergeben sich dadurch Maschinenstillstandzeiten und somit eine geringere Produktivität sowie eine reduzierte Prozesssicherheit. Die Problematik verschärfte sich besonders bei Schlichtoperation mit geringen Vorschüben und Schnitttiefen. Die bleifreien, siliziumhaltigen Sondermessinge CuZn10Si4, CuZn10Si4-C sowie CuZn21Si3P zeigten hingegen einen guten Spanbruch. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die siliziumreichen Phasen (κ -Phasen) im Werkstoffgefüge ähnlich wie Blei als Spanbrecher wirken.

Im Zusammenhang mit der Ausbildung ungünstiger Spanformen steht zudem die unterschiedliche Spanbildung bei der Bearbeitung bleifreier Kupferwerkstoffe. Bild 2 (rechts) zeigt hierzu Längsschliffe von Spänen des bleihaltigen Messings CuZn39Pb3 und der bleifreien Messinge CuZn37 und CuZn42, die während des Außenlängsdrehens mit einer TiB₂-beschichteten Hartmetallschneidplatte bei $v_c = 200$ m/min, $a_p = 3$ mm und $f = 0,2$ mm entstanden. Bei CuZn39Pb3 wurden aufgrund der reibungsmindernden Wirkung von Blei durch den sich ausbildenden Schmierfilm eine sehr geringe Verformung des Werkstoffgefüges an der Spanunterseite sowie eine Spandickenstauchung von $\lambda_h \approx 1$

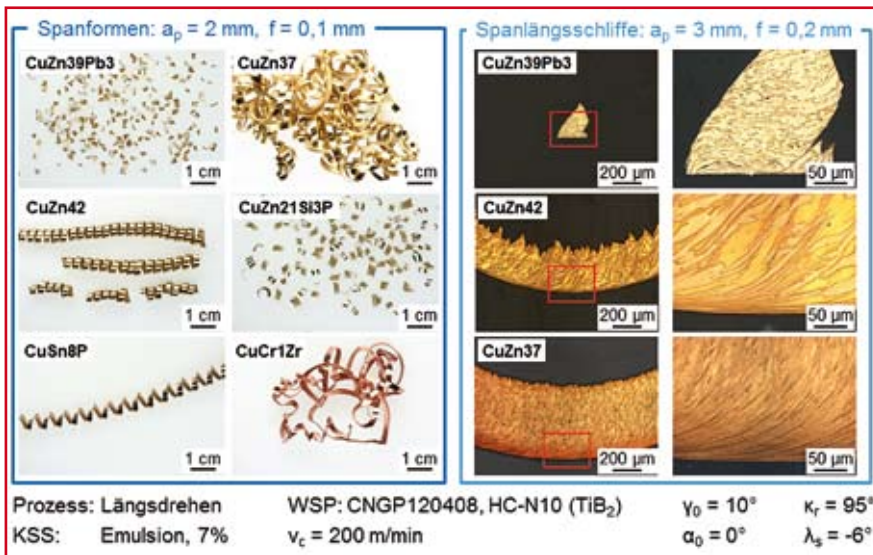


Bild 2: Entstandene Spanformen und -arten beim Außenlängsdrehen verschiedener Kupferwerkstoffe

festgestellt. Durch die geringe Scherfestigkeit des Materials brach der Span direkt nach der Bildung der ersten Spanlamelle. Eine bis zu dreimal größere Spandickenstauchung und wesentlich stärkere Verformung des Werkstoffgefüges an der Spanunterseite wurden hingegen beim Drehen der homogenen, bleifreien Messinglegierung CuZn37 beobachtet. Dies ist auf eine erhöhte Reibung zwischen Spanunterseite und Spanfläche des Werkzeugs und die hohe Verformungsfähigkeit des homogenen Werkstoffgefüges zurückzuführen. Das Vorliegen eines zweiten, spröderen β -Mischkristalls im heterogenen Gefüge von CuZn42 und eine damit einherge-

hende geringere Verformungsfähigkeit reduzierten die bei CuZn37 aufgetretenen Effekte.

Wegen der fehlenden Wirkung des Bleischmierfilms und der dadurch veränderten Reibungsverhältnisse zwischen Werkzeug und Spanunterseite ergibt sich bei der Bearbeitung bleifreier Messing- und der anderen untersuchten bleifreien Kupferwerkstoffe eine weitere Problematik in der erhöhten mechanischen und thermischen Belastung auf das Werkzeug. Die mit einem piezoelektrischen Dynamometer vom Typ Z15814 der Fa. Kistler gemessenen Schnittkräfte und die mittels 2-Farben-Pyrometrie ermittelten Tempe-

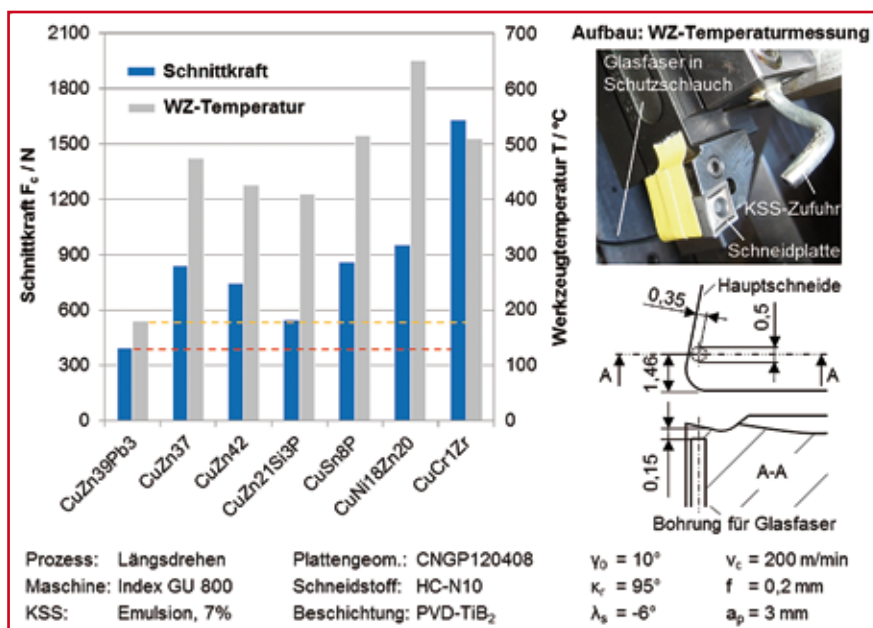


Bild 3: Schnittkraft und Werkzeugtemperatur beim Außenlängsdrehen verschiedener Kupferwerkstoffe

raturen im Werkzeug sind in Bild 3 dargestellt. Demnach führte das Fehlen von Blei beim Drehen der bleifreien Messinglegierungen zu einer im Vergleich zu CuZn39Pb3 ungefähr doppelt so hohen Schnittkraft und Werkzeugtemperatur. Bei der Bearbeitung des Neusilbers CuNi18Zn20 wurde, aufgrund der verglichen mit den anderen untersuchten Kupferwerkstoffen niedrigen Wärmeleitfähigkeit und hohen Festigkeit, sogar eine ca. 3,5-mal höhere Werkzeugtemperatur als bei CuZn39Pb3 ermittelt. Wegen der sehr starken Spandickenstauchung von CuCr1Zr wurde beim Drehen dieses Werkstoffs die mit Abstand höchste Schnittkraft gemessen.

Aufbauend auf den Erkenntnissen aus den vergleichenden Zerspanbarkeitsuntersuchungen werden am Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der RWTH Aachen derzeit Ansätze für eine Hochleistungs-zerspanung bleifreier Kupferwerkstoffe entwickelt. Dies erfordert eine optimale Abstimmung von Schneidstoffsubstrat, Werkzeuggeometrie, Schichtsystem, Werkzeugkonzept, Kühlschmierstoffstrategie, Bearbeitungsstrategie und Prozessparameter. Ziel ist eine signifikante Steigerung der Produktivität und Prozesssicherheit und dadurch eine erhebliche Reduzierung der Fertigungskosten.

Ein wesentlicher Ansatzpunkt hierfür sind an die Bearbeitung bleifreier Kupferwerkstoffe angepasste Werkzeugmakro- und -mikrogeometrien. Untersuchungen zum Einfluss des Schneidkantenradius zeigten, dass beim Einsatz scharfkantiger, unbeschichteter Hartmetallwerkzeuge ($r_\beta = 5 \mu\text{m}$) im Vergleich zu stark verrundeten Werkzeugen ($r_\beta = 50 \mu\text{m}$) mit gleicher Makrogeometrie eine deutlich geringere Gratbildung beim Drehen bleifreier Kupferwerkstoffe zu beobachten war. Je nach Bauteilgröße, zulässiger Schnittkraft und Werkzeugbeschichtung empfiehlt sich für die Schlichtbearbeitung bleifreier Kupferwerkstoffe eine Schneidkantenverrundung von 5 bis 25 μm . Die Gefahr von Schneidkantenausbrüchen durch mechanische Überbelastung ist bei der Bearbeitung von Kupferwerkstoffen wegen der im Vergleich zu anderen metallischen Werkstoffen geringeren Festigkeit wesentlich kleiner. Aus diesem Grund ist der Einsatz einer Schutzphase an der Schneidkante mit negativem Werkzeugspanwinkel, die bei der Bearbeitung von höherfesten Materialien vorteilhaft sein kann, nicht sinnvoll.

Wegen der Bildung langer Band- und Wirrspäne ist der Einsatz von glatten Schneid-

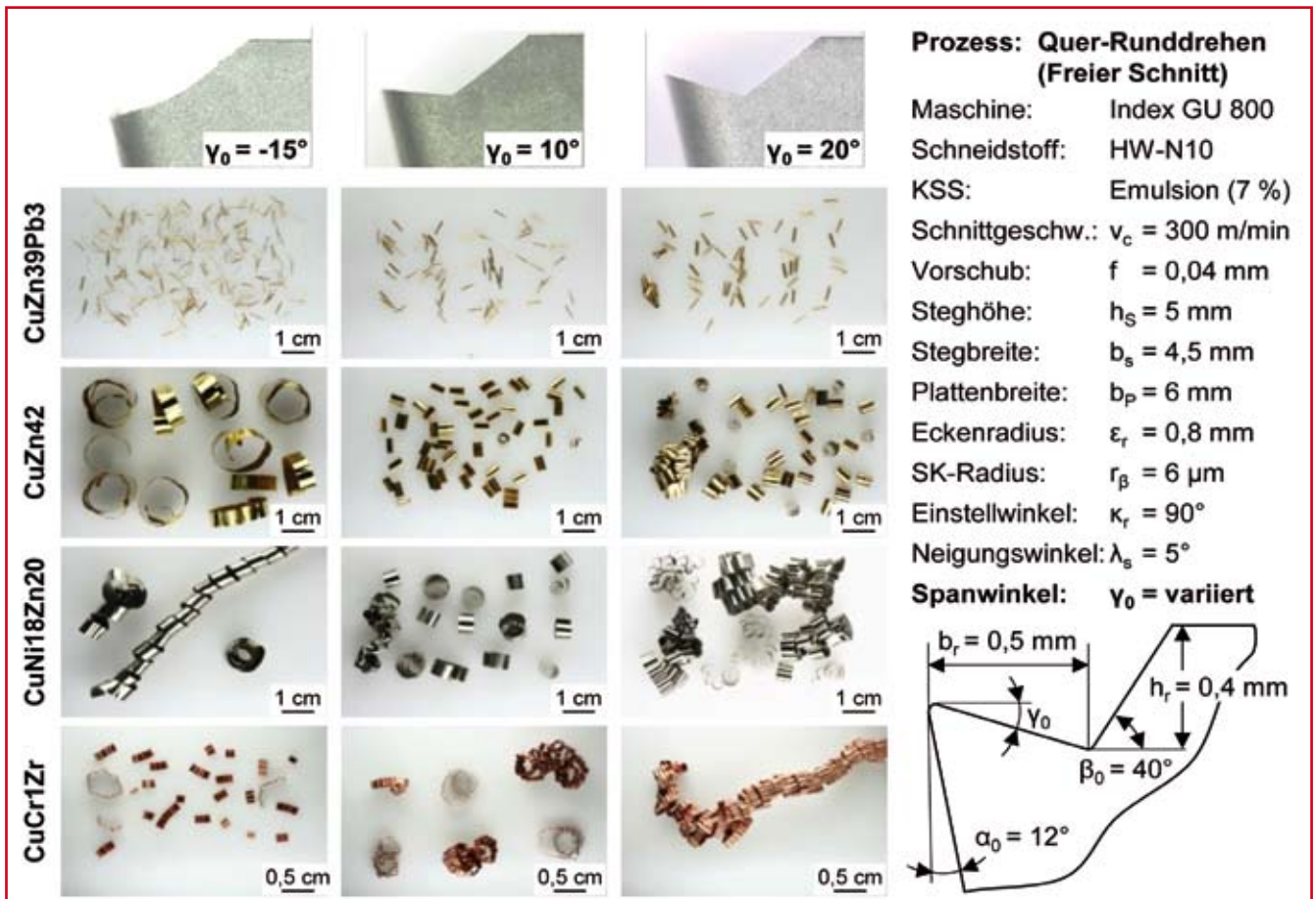


Bild 4: Entstandene Spanformen in Abhängigkeit des Werkzeugspanwinkels beim Quer-Runddrehen im freien Schnitt

platten beim Längs- und Einstechdrehen bleifreier Kupferwerkstoffe nicht sinnvoll. Die optimale Gestaltung der Spanleitstufe zur Erzielung günstiger Spanformen, niedriger Zerspanskräfte und hoher Werkstückoberflächenqualitäten ist daher von hoher Bedeutung. Zu diesem Zweck wurden am WZL der RWTH Aachen unbeschichtete Hartmetalleinstechplatten individuell angeschliffen, um den Einfluss des Spanwinkels, der Rillentiefe der Spanleitstufe jeweils unabhängig voneinander zu untersuchen. Die Versuche wurden beim Quer-Runddrehen von CuZn39Pb3, CuZn38As, CuZn42, CuSn8P, CuNi18Zn20 und CuCr1Zr mit Schnittgeschwindigkeiten von $v_c = 150$ und 300 m/min und Vorschüben von $f = 0,04$ bis $0,12 \text{ mm}$ durchgeführt. Die Breite der Schneidplatten war in diesen Versuchen größer als die Breite der Stege, die von der Welle abgestochen wurden, so dass sich ausschließlich die Hauptschneide im Eingriff befand (freier Schnitt).

Bild 4 zeigt beispielhaft die entstandenen Spanformen bei der Bearbeitung von CuZn39Pb3 und den bleifreien Legierungen CuZn42, CuNi18Zn20 und CuCr1Zr mit $v_c = 300 \text{ m/min}$ und $f = 0,04 \text{ mm}$ in

Abhängigkeit des Werkzeugspanwinkels, der in vier Schritten von $\gamma_0 = -15^\circ$ über 0° und 10° bis 20° variiert wurde.

Bei allen Werkstoffen wurde eine Reduzierung der Schnittkraft mit ansteigendem positivem Werkzeugspanwinkel ermittelt. Das bleihaltige Messing CuZn39Pb3 zeigte wie erwartet sehr guten Spanbruch unabhängig vom Werkzeugspanwinkel. Bei der Bearbeitung der bleifreien Legierungen CuZn42 und CuNi18Zn20 sowie der in Bild 4 nicht abgebildeten Werkstoffe CuZn38As und CuSn8P konnte ein guter Spanbruch für Spanwinkel von $\gamma_0 = 0^\circ$ und 10° erzielt werden. Bei einem stärkeren positiven Spanwinkel von $\gamma_0 = 20^\circ$ wurden die Späne jedoch erst später gebrochen. Lange Wendelspäne bildeten sich zum Teil bei einem negativen Spanwinkel von $\gamma_0 = -15^\circ$ aus. Es ist anzunehmen, dass durch den negativen Spanwinkel der Span in einem deutlich flacheren Winkel auf den Rücken der Spanleitstufe auftraf und die Umformung des Spans nicht ausreichte, um frühzeitigen Spanbruch zu erreichen. Neben den Versuchen zum Einfluss des Spanwinkels zeigte sich, dass sich für die Bearbeitung der o. g. bleifreien Kupferlegierungen eine „aggressive“ Spanleit-

stufe günstig auf das Spanbruchverhalten auswirkt. Für die bleifreien Messinglegerungen CuZn38As und CuZn42 ist für den untersuchten Vorschubbereich bis $f = 0,12 \text{ mm}$ eine Rillentiefe von $b_r = 0,25 - 0,5 \text{ mm}$, eine Rillentiefe von $h_r = 0,6 \text{ mm}$ und ein Rückenwinkel von $\beta_0 = 55 - 70^\circ$ zu empfehlen. Bei der Zerspaltung von CuNi18Zn20 und CuSn8P erwiesen sich eine leicht größere Rillentiefe von $h_r = 0,8 \text{ mm}$ und ein flacherer Rückenwinkel von $\beta_0 = 40^\circ$ als vorteilhaft.

„Inverses“ Spanbruchverhalten verglichen mit den anderen untersuchten Werkstoffen zeigte das niedriglegierte Kupfer CuCr1Zr. Hier konnte bei einem negativen Spanwinkel von $\gamma_0 = -15^\circ$ guter Spanbruch erzielt werden, wohingegen sich mit ansteigenden positiven Spanwinkeln lange Wendelspäne ausbildeten. Es wird vermutet, dass der Span durch den negativen Spanwinkel stärker umgeformt und der Aufwärtskrümmungsradius des Spans reduziert wurde. Dies bewirkte anschließend ein frühzeitiges Brechen des Spans an der oberen Kante der Spanleitstufe oder beim Auftreffen auf das Werkstück. Bei positiven Spanwinkeln hingegen wurde der Span an der Schneidkante weniger stark umgeformt und im

Gegensatz zu den anderen untersuchten bleifreien Werkstoffen konnte der Span beim Auftreffen auf die Rückenfläche der Spanleitstufe nicht gebrochen werden. Neben der optimalen Auslegung der Werkzeugmakro- und -mikrogeometrie ist die Auswahl geeigneter Schneidstoffe und Kühlschmierstoffstrategien für eine Hochleistungszerspanung bleifreier Kupferwerkstoffe erforderlich. Hartmetalle zeigten aufgrund ihrer hohen Härte und Verschleißfestigkeit ein großes Leistungspotential beim Längs- und Einstechdrehen. Wegen der im Vergleich zu bleihaltigen Legierungen größeren mechanischen und thermischen Belastung auf das Werkzeug ist der Einsatz von Werkzeugbeschichtungen bei der Bearbeitung bleifreier Kupferlegierungen zu empfehlen. PVD-TiAlN Beschichtungen zeigten bei einer Vielzahl der untersuchten Kupferwerkstoffe nur geringe Verschleißerscheinungen nach einer Schnittzeit von $t_c = 150$ Minuten ($v_c = 200$ m/min, $f = 0,1$ mm, $a_p = 1$ mm, KSS: Emulsion). Der Einsatz von Schneidplatten mit polierter Spanfläche und PVD-TiB₂- Beschichtungen mit sehr geringer

Oberflächenrauheit bewirkte eine Reduzierung der Reibung und damit eine Verringerung der zum Teil starken Adhäsionsneigung und Werkstoffaufschmierungen am Werkzeug. Für bleifreie Werkstoffe wie Cu-ETP und CuSn8P, die einen hohen Verschleiß beim Einsatz der PVD-TiAlN-Beschichtung verursachten, zeigten CVD-Diamant- und -Al₂O₃-Beschichtungen ein sehr hohes Leistungspotential. Im Vergleich zu glatten Schneidplatten aus polykristallinem Diamant (PKD), die keine Verschleißerscheinungen beim Drehen von Cu-ETP und CuSn8P nach einer Schnittzeit von $t_c = 50$ min aufwiesen, kann durch den Einsatz von CVD-beschichteten Schneidplatten bei ähnlich geringer Verschleißausbildung besserer Spanbruch durch die freie Gestaltung von Spanleitstufen erzielt werden. Das Einlasern von Spanleitstufen in glatte PKD-Schneidplatten wirkte sich zwar zum Teil positiv auf den Spanbruch aus, ist aber sehr aufwändig. Eine vielversprechende Alternative stellt hier die zielgerichtete Zufuhr des Kühlschmierstoffs mit hohem Druck (zwischen 40 und 150 bar) und Volumen-

strom (zwischen 15 und 30 l/min) auf die Spanfläche des Werkzeugs dar. Mit Hilfe dieser Hochdruck-KSS-Zufuhr konnte selbst beim Schlichten äußerst langspannender bleifreier Kupferlegierungen kontrollierter Spanbruch beim Einsatz glatter Hartmetall- und PKD-Platten erzielt werden [4].

Literatur

[1] Klocke, F. und König, W.: *Fertigungsverfahren Drehen, Bohren, Fräsen*. 8., neu bearbeitete Auflage. Berlin: Springer-Verlag 2008.
 [2] Deutsches Kupferinstitut: *Richtwerte für die spanende Bearbeitung von Kupfer und Kupferlegierungen* (Informationsdruck). Düsseldorf: Deutsches Kupferinstitut 2010.
 [3] European Environment Agency: *Heavy metal (HM) Emissions (EEA EU 27)*
 [4] Klocke, F., Lung D. und Nobel C.: *Angepasste Zerspanprozesse für bleifreie Kupferwerkstoffe*. MM Maschinenmarkt 36/2012, S. 74-77.

(1) Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Dr. h.c. Fritz Klocke; Dipl.-Ing. Dieter Lung; Dipl.-Ing. Christoph Nobel; WZL der RWTH Aachen, Lehrstuhl für Technologie der Fertigungsverfahren

Offshore Windenergie – Entwicklung und Perspektiven

Berg, H. (1)

Die Offshore-Windenergie ist ein wesentlicher Bestandteil des Umbaus der Energieversorgung in Deutschland. Eine Vielzahl von Projekten befindet sich derzeit in der deutschen Nord- und Ostsee in der Planung und Umsetzung. Für viele deutsche Produktions- und Dienstleistungsunternehmen bieten die milliardenschweren Investitionen neue Geschäftschancen. In dem

Beitrag zum HochschulKupferSymposium werden wichtige Fakten zu dieser noch relativ jungen Industrie zusammengestellt. Es werden zunächst die Hintergründe dargestellt, die der Offshore-Windenergie in Deutschland zum Durchbruch verholfen haben sowie die wesentlichen politischen Rahmenbedingungen und wirtschaftlichen Aspekte. Schwerpunkt des Beitrags ist die Darstellung der wichtigsten technischen Heraus-

forderungen und Trends; insbesondere zu folgenden Themen:
 ■ Herausforderung Offshore,
 ■ Anlagen,
 ■ Fundamente,
 ■ Installation, Betriebsführung und Wartung.

(1) Dr. Hans Berg, Germanischer Lloyd Industrial Services GmbH

Fachbuch: Einführung in die Windenergietechnik

Die Windenergie als wichtigste erneuerbare Energiequelle in der Stromerzeugung braucht Metalle, insbesondere Kupfer. Das rote Metall findet sich innerhalb der Anlage selbst, aber auch außerhalb in Kabeln in nicht unerheblicher Menge. Ein wichtiger Markt also für die Branche. Doch wie steht es um den Markt, wie sind die Zukunftsaussichten? Dieses Lehrbuch stellt die Windenergie im Gesamtzusammenhang von der Ressource Wind bis hin zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit dar. Es gibt zunächst Einblicke in Windressourcen, Standortbewertung und Ökologie, aber

auch in die technischen Grundlagen: Interessant sind die Ausführungen zu Aerodynamik und Blattentwurf, Rotorblättern und Triebstrangkonzepthen sowie Turm und Gründung. Das Buch behandelt auch Generatoren und Umrichter, Regelung und Betriebsführung, Netzintegration und Offshore-Windenergie. Die Grundlagen werden leicht verständlich vermittelt und durch Beispiele verdeutlicht.

CEwind eG / A. Schaffarczyk (Hrsg.), Carl Hanser Verlag 2012, 496 S., br., 39,90 Euro, ISBN: 978-3-446-43032-7

