Ansätze zur produktiven und prozesssicheren Herstellung von Bohrungen und Innengewinden in bleifreie Messinglegierungen

Klocke, F.; Döbbeler, B.; Nobel, C. (1)

Die Gesetzgebung zielt aufgrund der umwelt- und gesundheitsschädlichen Wirkung von Blei verstärkt auf eine Reduzierung dieses Elementes in Kupferwerkstoffen ab. Dies betrifft vorrangig Kupfer-Zink-Legierungen (Messinglegierungen), die oftmals mit bis zu 3,5 % Blei legiert sind [1]. Die Zerspanung von bleifreien Messinglegierungen ist aufgrund der Neigung zu Langspanbildung, Gratbildung, einer höheren mechanischen und thermischen Werkzeugbelastung und geringeren Werkzeugstandzeiten im Vergleich zu den weit verbreiteten, bleihaltigen Automatenmessingen deutlich schlechter. Insgesamt ist daher die Produktivität und Wirtschaftlichkeit bei der Zerspanung von bleifreien Messinglegierungen geringer. Eine besondere Herausforderung stellt die Innenbearbeitung dar. Wissenschaftliche Untersuchungen zur Zerspanung von bleifreien Kupferlegierungen gab es in der jüngeren Vergangenheit jedoch wenige [2-5].

Vor dem geschilderten Hintergrund werden 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) (IGF 17953N) finanzierten Projektes angepasste Werkzeuge und Bearbeitungsstrategien zur Steigerung der Produktivität und Prozesssicherheit bei der Gewindeherstellung und beim Bohren von schwer zerspanbaren bleifreien Kupferwerkstoffen entwickelt. Die angewandten Verfahren und Größenbereiche der Bohrungen und Gewinde richten sich nach verschiedenen industriellen Anwendungsbereichen. Der Schwerpunkt der Untersuchungen liegt auf der Herstellung von Bohrungen mit einem Durchmesser von d = 1 mm und von M3 Innengewinden mittels Gewindebohren, -formen und -fräsen. Diese Bohrungs- und Gewindegrößen können primär Bauteilanwendungen aus der Elektro- / Elektronikindustrie und der Automobilindustrie zugeordnet werden. Werkstoffseitig werden verschiedene Materialien aus den Legierungsgruppen Reinkupfer, niedriglegiertes Kupfer, Messing, Sondermessing, Zinn- und Aluminiumbronze sowie Neusilber in die Untersuchungen einbezogen. Der Fokus der bisherigen Untersuchungen lag auf der Bearbeitung der Cu-Zn-Legierungen CuZn21Si3P (Fa. Wieland), CuZn40 (Fa. lebronze alloys) und CuZn42 (Fa. Aurubis). Der Bleigehalt und die mechanischen Eigenschaften dieser Werkstoffe sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Die Stangen besaßen jeweils einen Ausgangsdurchmesser von 10 mm und wurden vor dem Einbringen der Bohrungen und Innengewinde in Richtung der Längsachse plan gefräst. Aufgrund der neben einer α-Phase vorliegenden siliziumreichen κ-Phase im Gefüge war der Werkstoff CuZn21Si3P durch die höchste Festigkeit von R_m = 739 MPa gekennzeichnet. Der Bleigehalt betrug lediglich Pb = 0,004 %. Die beiden Messinge mit α- und β-Phase, CuZn40 und CuZn42, lagen trotz des unterschiedlichen Volumenanteils der β-Phase (CuZn40: ≈ 30%, CuZn42: ≈ 50-60 %) in einem ähnlichen Festigkeitszustand vor. Dies ist auf einen unterschiedlichen Herstellprozess, insbesondere bei der Kaltumformung, zurückzuführen. Der Bleigehalt von CuZn40 war mit Pb = 0,008 % um den Faktor 10 geringer im Vergleich zu CuZn42. Das bleihaltige Automatenmessing CuZn39Pb3 wurde als Referenz herangezogen und lag mit einer geringeren Zugfestigkeit von R_m = 476 MPa vor.

Vor diesem Hintergrund werden 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 Projektes angepasste Werkzeuge und Bearbeitungsstrategien zur Steigerung der Produktivität und Prozesssicherheit bei der Gewindeherstellung und beim Bohren von schwer zerspanbaren bleifreien Kupferwerkstoffen entwickelt. Die angewandten Verfahren und Größenbereiche der Bohrungen und Gewinde richten sich nach verschiedenen industriellen Anwendungsbereichen. Der Schwerpunkt der Untersuchungen liegt auf der Herstellung von Bohrungen mit einem Durchmesser von d = 1 mm und von M3 Innengewinden mittels Gewindebohren, -formen und -fräsen. Diese Bohrungs- und Gewindegrößen können primär Bauteilanwendungen aus der Elektro- / Elektronikindustrie und der Automobilindustrie zugeordnet werden. Werkstoffseitig werden verschiedene Materialien aus den Legierungsgruppen Reinkupfer, niedriglegiertes Kupfer, Messing, Sondermessing, Zinn- und Aluminiumbronze sowie Neusilber in die Untersuchungen einbezogen. Der Fokus der bisherigen Untersuchungen lag auf der Bearbeitung der Cu-Zn-Legierungen CuZn21Si3P (Fa. Wieland), CuZn40 (Fa. lebronze alloys) und CuZn42 (Fa. Aurubis). Der Bleigehalt und die mechanischen Eigenschaften dieser Werkstoffe sind in Tabelle 1

Werkstoff	Bleigehalt Pb / Gew.-%	Zugfestigkeit R_m / MPa	Streckgrenze $R_{p0.2}$ / MPa	Bruchdehnung A / %
CuZn21Si3P	0,004	739	502	25
CuZn40	0,008	650	490	5
CuZn42	0,08	628	543	12
CuZn39Pb3	≈ 3	476	324	27

Tabelle 1: Bleigehalt und mechanische Eigenschaften ausgewählter Versuchswerkstoffe

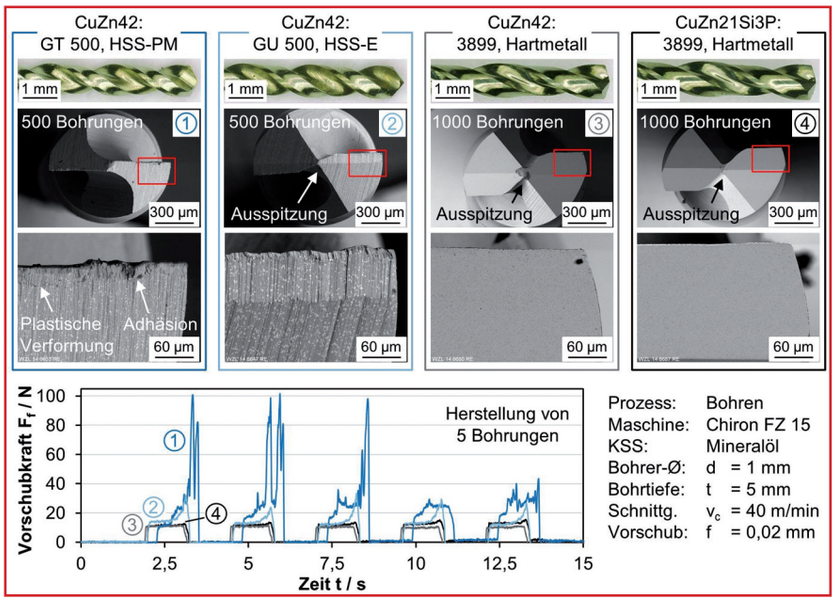

Bild 1: Werkzeugverschleiß und Vorschubkraft beim Bohren von CuZn42 und CuZn21Si3P

zusammengefasst. Die Stangen besaßen jeweils einen Ausgangsdurchmesser von 10 mm und wurden vor dem Einbringen der Bohrungen und Innengewinde in Richtung der Längsachse plan gefräst. Aufgrund der neben einer α-Phase vorliegenden siliziumreichen κ-Phase im Gefüge war der Werkstoff CuZn21Si3P durch die höchste Festigkeit von R_m = 739 MPa gekennzeichnet. Der Bleigehalt betrug lediglich Pb = 0,004 %. Die beiden Messinge mit α- und β-Phase, CuZn40 und CuZn42, lagen trotz des unterschiedlichen Volumenanteils der β-Phase (CuZn40: ≈ 30 %, CuZn42: ≈ 50-60 %) in einem ähnlichen Festigkeitszustand vor. Dies ist auf einen unterschiedlichen Herstellprozess, insbesondere bei der Kaltumformung, zurückzuführen. Der Bleigehalt von CuZn40 war mit Pb = 0,008 % um den Faktor 10 geringer im Vergleich zu CuZn42. Das bleihaltige Automatenmessing CuZn39Pb3 wurde als Referenz herangezogen und lag mit einer geringeren Zugfestigkeit von R_m = 476 MPa vor.

Herstellung von Bohrungen mit d = 1 mm

Beim Bohren mit einem Durchmesser von d = 1 mm wurde die Bohrtiefe zu t = 5 mm festgelegt. Der Bohrprozess erfolgte in allen Untersuchungen in einem Schritt. Bild 1 zeigt exemplarisch den Werkzeugverschleiß und den Verlauf der Vorschubkraft beim Einsatz verschiedener Werkzeuggeometrien und Schneidstoffe beim Bohren von CuZn42 und CuZn21Si3P. Die Schnittgeschwindigkeit wurde in diesem Fall zu v_c = 40 m/min und der Vorschub zu f = 0,02 mm gewählt. Beim Bohren von CuZn42 mit einem Spiralbohrer aus pulvermetallurgischem Schnellarbeitsstahl HSS-PM (Typ GT 500, Fa. Gühring, Drallwinkel δ = 23 / 12°, Freiwinkel α = 20°, Spitzenwinkel σ = 130°) wurde nach 500 Bohrungen eine plastische Verformung der Schneidkanten festgestellt. Zudem waren verstärkt Werkstoffadhäsionen an den Hauptschneiden sowie an der Querschneide zu beobachten. Der Bohrprozess war des Weiteren durch einen starken Anstieg der Vorschubkraft während einer Bohrung charakterisiert. Die aufgeführten Probleme wurden durch den Einsatz eines HSS-E Bohrers mit veränderter Makrogeometrie (Typ GU 500, Fa. Gühring, Drallwinkel δ = 38°, 1. Freiwinkel α = 5°, Spitzenwinkel σ = 118°) und ausgespitzter Querschneide deutlich reduziert, Bild 1. Insbesondere wegen der Ausspitzung der Querschneide wurden die Reib- und Quetschanteile während des Schneidvorgangs verringert. Zudem ist anzunehmen, dass sich der erhöhte Drallwinkel positiv auswirkte. Die veränderte Bohrergeometrie führte zu einer Reduzierung der Vorschubkraft. Jedoch war auch bei der Verwendung des GU 500 Bohrers ein Anstieg des Kraftsignals am Ende eines jeweiligen Schnittes festzustellen, der auf einen nicht optimalen Spanabtransport aus der Bohrung schließen lässt. Während sich beim Bohren von CuZn42 längere Wendelspäne ausbildeten, waren diese bei der Bearbeitung von CuZn21Si3P wegen des heterogenen Gefüges mit harter κ-Phase wesentlich kürzer.

Ein deutlich verbessertes Ergebnis verglichen mit beiden HSS-Bohrern wurde bei der Anwendung eines unbeschichteten Hartmetallbohrers (Typ 3899, Fa. Gühring, Drallwinkel δ = 30°, Freiwinkel α = 7°, Spitzenwinkel σ = 140°, ausgespitzte Querschneide) erzielt. Nach 1.000 Bohrungen war nahezu kein Verschleiß am Werkzeug feststellbar. Die Vorschubkraft war gering und während eines Bohrvorgangs annähernd konstant. Das positive Ergebnis wurde sowohl beim Bohren von CuZn42 als auch von CuZn21Si3P festgestellt. Bei der Bearbeitung von CuZn21Si3P war beim Einsatz des GU 500-Bohrers nach 3 und in einem Wiederholversuch nach 7 Bohrungen jeweils ein Werkzeugbruch aufgetreten. Dieser konnte durch die veränderte Geometrie des GU 500-Werkzeugs zwar vermieden werden, allerdings wurden nach 100 Bohrungen starke Ausbrüche an den Schneidenecken beobachtet, sodass der Versuch vorzeitig beendet wurde. Das im Vergleich zu CuZn42 verstärkte Auftreten von Ausbrüchen ist auf die höhere Werkstofffestigkeit zurückzuführen. Das höhere Leistungspotential des Hartmetallbohrers ist unabhängig vom Werkstoff maßgeblich durch die höhere Härte und Verschleißbeständigkeit gegenüber HSS zu erklären. Zudem wies das Hartmetallwerkzeug einen stabileren Kern auf, der das Risiko von Werkzeugbrüchen weiter reduzierte. Die Analyse der Spannuten unter einem Lichtmikroskop zeigte darüber hinaus deutlich geringere Werkstoffadhäsionen auf dem Hartmetallwerkzeug verglichen mit den HSS-Bohrern.

In einem weiterführenden Schritt wurde die Anwendbarkeit höherer Schnittparameter analysiert, Bild 2. Zudem wurden die Werkzeuge in einigen Versuchsreihen mit einer TiAlN-Beschichtung eingesetzt. Aufgrund des hohen Versuchsaufwands wurde die maximale Bohrungszahl zu jeweils 1.000 definiert.

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass CuZn39Pb3 aufgrund der positiven Wirkung von Blei die beste Zerspanbarkeit aufwies. Die beiden HSS-Werkzeuge GT 500 und GU 500 konnten bei Vorschüben von f < 0,04 mm mit hoher Prozesssicherheit eingesetzt werden. Bei höheren Vorschüben von f ≥ 0,04 mm traten jedoch wegen der geringen Stabilität der HSS-Bohrer vereinzelt Werkzeugbrüche auf. In diesen Fällen ist daher der Einsatz von Hartmetallwerkzeugen zu empfehlen. Der Fokus der Untersuchungen lag aufgrund der schwierigeren Zerspanbarkeit auf dem Bohren der bleifrei-

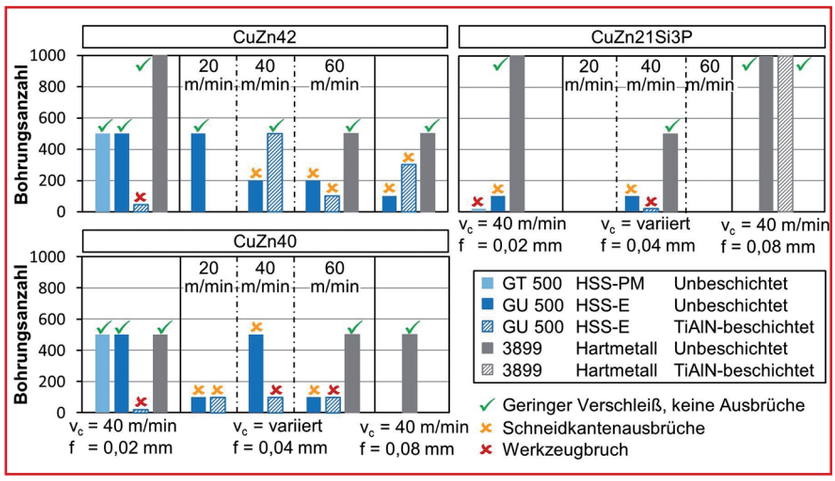

Bild 2: Vergleich der Bohrungsanzahl beim Bohren (d = 1 mm, t = 5 mm) verschiedener Cu-Zn-Legierungen mit Mineralöl

en Legierungen. Anhand der in Bild 1 und 2 dargestellten Ergebnisse lässt sich schlussfolgern, dass beim Bohren von CuZn21Si3P HSS-Werkzeuge mit d = 1 mm unter keinen Bedingungen prozesssicher und wirtschaftlich eingesetzt werden konnten. Dies liegt vorrangig an der hohen Werkstofffestigkeit. Die Verwendung des Hartmetallbohrers (Typ 3899) führte hingegen zu einer hohen Prozesssicherheit, Werkzeugbrüche traten nicht auf. Die Schnittgeschwindigkeit konnte sowohl beim Einsatz eines unbeschichteten als auch eines TiAlN-beschichteten Hartmetallwerkzeugs auf v_c = 60 m/min und der Vorschub auf f = 0,08 mm gesteigert werden. Unterschiede in der Verschleißentwicklung in Abhängigkeit von der Werkzeugbeschichtung wurden nicht beobachtet. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die maximale Bohrungsanzahl auf 1.000 begrenzt war. Zukünftige Langzeitversuche im Rahmen des laufenden IGF-Vorhabens zielen darauf ab, Aussagen über die maximal erreichbaren Standmengen treffen zu können.

Beim Bohren von CuZn40 mit HSS-Werkzeugen traten im Vergleich zu CuZn42 verstärkt Werkzeugbrüche auf. Dies lässt sich durch den um den Faktor 10 geringeren Bleigehalt von lediglich Pb = 0,008 % erklären. Bei der Anwendung von Vorschüben von f ≥ 0,04 mm war daher unabhängig von der Schnittgeschwindigkeit ausschließlich der Einsatz von Hartmetallwerkzeugen prozesssicher möglich. In weiterführenden Untersuchungen wurde eine CuZn40-Legierung mit einem höheren Bleigehalt von Pb = 0,099 % und einer geringeren Festigkeit von R_m = 498 MPa eingesetzt. Im Gegensatz zur zuvor verwendeten CuZn40-Legierung war dadurch der Einsatz des GU 500-Bohrers (HSS-E) selbst bei hohen Schnittgeschwindigkeiten von v_c = 40 - 60 m/min (f = 0,04 mm) prozesssicher möglich. Dieses Ergebnis verdeutlicht den hohen Einfluss des Bleigehalts und der Festigkeit auf das Bohren von Cu-Zn-Legierungen, insbesondere bei kleinen Durchmessern im Bereich d = 1 mm.

Beim Bohren von CuZn42 hing das Leistungspotential des GU 500-Bohrers (HSS-E) stark von den gewählten Schnittbedingungen ab. Im unbeschichteten Zustand war der Einsatz lediglich bei einem kleinen Vorschub von f = 0,02 mm oder einer geringen Schnittgeschwindigkeit von v_c = 20 m/min möglich. Durch die Anwendung einer TiAlN-Beschichtung konnten die Schnittgeschwindigkeit auf v_c = 40 m/min und der Vorschub auf f = 0,04 mm gesteigert werden. Bei kleinem Vorschub von f = 0,02 mm traten hingegen wegen der größeren Schneidkantenverrundung der beschichteten Bohrer Werkzeugbrüche auf. Für eine weitere Steigerung der Schnittgeschwindigkeit sowie des Vorschubs war auch beim Bohren der CuZn42-Legierung die Verwendung von Hartmetallwerkzeugen erforderlich.

Weitere Untersuchungen zum Bohren zielen darauf ab, den Einfluss der Werkzeugbeschichtung und des KSS-Mediums näher zu analysieren. In ersten Stichversuchen wurde ein positiver Einfluss einer inneren KSS-Zufuhr auf den Spanabtransport und infolgedessen auf die Vorschubkraft festgestellt. Dies gilt insbesondere für die Legierungen CuZn40 und CuZn42 mit einer im Vergleich zu CuZn21Si3P und CuZn39Pb3 höheren Neigung zur Langspanbildung. Darüber hinaus sollen Langzeitversuche Aufschluss über die maximal zu erreichenden Standmengen geben.

Herstellung von M3 Innengewinden

Ein weiterer Forschungsschwerpunkt im Rahmen des IGF-Vorhabens liegt auf der Herstellung von M3 Innengewinden. Vorrangiges Ziel ist die Analyse des Einflusses der Werkzeuggeometrie, des Schneidstoffs, der Beschichtung, der Schnittgeschwindigkeit, des KSS-Mediums und des Fertigungsverfahren in Abhängigkeit vom zu bearbeitenden Werkstoff. In Bild 3 ist exemplarisch das Drehmoment beim Gewindebohren und -formen mit einer Schnittgeschwindigkeit von v_c = 20 m/min für verschiedene Cu-Zn-Legierungen dargestellt. Aufgrund des reibungsmindernden Bleischmierfilms und der niedrigen Werkstofffestigkeit wurden die geringsten Drehmomente bei der Bearbeitung des Automatenmessings CuZn39Pb3 gemessen. Zudem entstanden

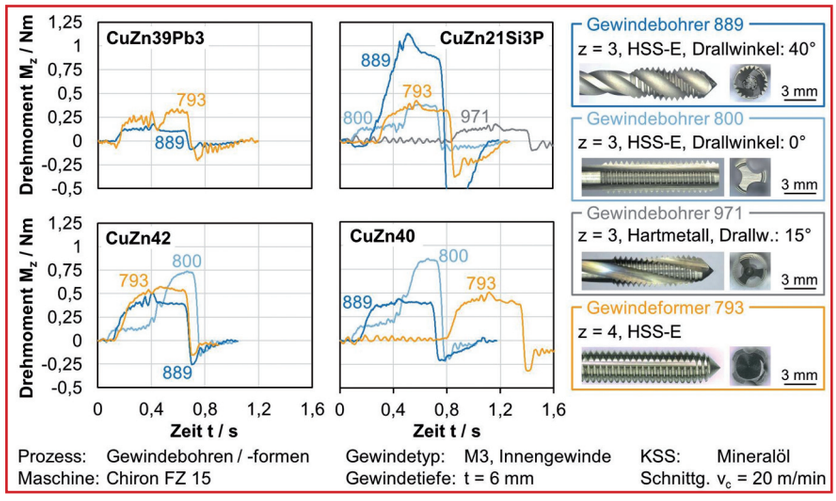

Bild 3: Vergleich des Drehmoments beim Gewindebohren und -formen von Cu-Zn-Legierungen

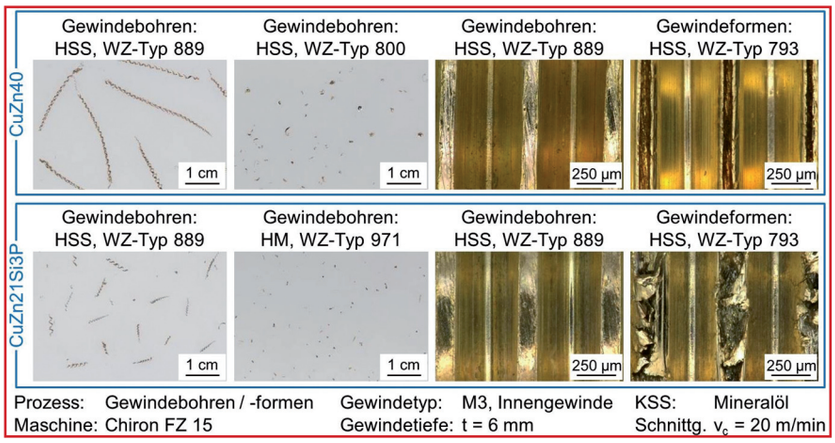

Bild 4: Vergleich der Spanformen und Gewindequalität beim Gewindebohren und -formen von CuZn40 und CuZn21Si3P

beim Gewindebohren kurze Nadelspäne. Die Drehmomente bei der Gewindeherstellung in CuZn40 und CuZn42 waren im Vergleich zu CuZn39Pb3 ungefähr doppelt so hoch. Wegen der höheren Werkstofffestigkeit und des geringeren Bleigehalts lagen die Messwerte bei CuZn40 ein wenig über denen von CuZn42. Mit einem dreischneidigen Gewindebohrer (Typ 889, Drallwinkel 40°) aus HSS-E wurden jeweils 500 Gewinde eingebracht, ohne dass ausgeprägter Verschleiß am Werkzeug festzustellen war. Es bildeten sich jedoch bei beiden Legierungen lange Wendelspäne aus, die sich gelegentlich um das Werkzeug wickelten und manuell entfernt werden mussten. Eine deutliche Verbesserung des Spanbruchs wurde durch die Verwendung eines geradgenuteten, dreischneidigen Gewindebohrers (Typ 800) aus HSS-E erreicht, Bild 4. Nachteilig wirkte sich die veränderte Geometrie infolge der stärkeren Werkstoffumformung auf das Drehmoment aus. Inwiefern sich die gestiegene Werkzeugbelastung auf die erreichbare Standzeit auswirkt, wird in zukünftigen Langzeitversuchen analysiert. Eine weitere Möglichkeit ist die Herstellung der Innengewinde mittels Gewindeformen, wodurch das Problem des Spanbruchs umgangen wird. Die Drehmomente bei der Bearbeitung von CuZn40 und CuZn42 waren nur geringfügig höher verglichen mit dem Gewindebohrer 889 und geringer als beim geradgenuteten Werkzeug 800. Dies ist auf das hohe Formänderungsvermögen der Werkstoffe zurückzuführen. Die Gewindequalität bei der angewandten Schnittgeschwindigkeit von v_c = 20 m/min war ähnlich hoch verglichen mit dem Gewindebohren, Bild 4. Grundsätzlich zeichnen sich geformte Gewinde verfahrensbedingt durch eine höhere Festigkeit aus. Das Gewindeformen ist bei den anderen beiden Legierungen CuZn21Si3P und CuZn39Pb3 aufgrund des begrenzten Formänderungsvermögens der Werkstoffe jedoch nicht zu empfehlen. Die für das Gewindeformen typische Zipfelbildung am Gewindekopf erfolgte in diesen Fällen äußerst unregelmäßig, Bild 4.

Beim Gewindebohren von CuZn21Si3P war das Einbringen der Gewinde mit dem HSS-Bohrer 889 bei einer Schnittgeschwindigkeit von v_c = 20 m/min im im Gegensatz zu den anderen Werkstoffen nicht prozesssicher möglich. Nach 52 bzw. in einem Wiederholversuch nach 68 Gewinden trat ein Bruch des Werkzeugs auf. Dieser konnte durch die Verwendung einer TiN-Beschichtung nicht verhindert werden. Positiv ist hingegen anzumerken, dass aufgrund des heterogenen Werkstoffgefüges mit harter κ-Phase kurze Späne entstanden, die nicht manuell entfernt werden mussten, Bild 4. Eine Möglichkeit zur Vermeidung von Werkzeugbrüchen war die Reduzierung der Schnittgeschwindigkeit auf v_c = 10 m/min. Unter dem Aspekt der Produktivität und Wirtschaftlichkeit ist dies jedoch nicht zu empfehlen. Alternativ wurde beim Einsatz des geradgenuteten Gewindebohrers aus HSS-E (Typ 800) ein deutlich geringeres Drehmoment gemessen. Dementsprechend wurde nach 500 Gewinden kein Werkzeugbruch festgestellt. Ähnlich wie beim Bohren mit d = 1 mm wurde beim Gewindebohren von CuZn21Si3P mit Hartmetall (Werkzeugtyp 971) das höchste Leistungspotential identifiziert. Mit der verwendeten Geometrie (Drallwinkel 15°) entstanden sehr kurze Späne (Bild 4) und nach 500 Gewinden war nahezu kein Verschleiß am Werkzeug feststellbar.

Weiterführende Untersuchungen zum Einfluss der Schnittgeschwindigkeit ergaben, dass bei den bleifreien Legierungen der Einsatz eines Bereich von v_c = 20 bis 30 m/min grundsätzlich möglich ist. Dieser Bereich ist in der Industrie für das Einbringen von M3 Innengewinden in bleihaltige Automatenmessinge weit verbreitet. Ein starker Einfluss auf die Gewindequalität zwischen v_c = 10, 20 und 30 m/min wurde nicht festgestellt. Die Auswirkung auf die erreichbare Werkzeugstandzeit wird in zukünftigen Langzeituntersuchungen analysiert.

Als Alternative zur Verwendung von Mineralöl wurde des Weiteren das Leistungspotenzial einer Gewindeschneidpaste der Fa. Jokisch untersucht. Diese zeichnet sich durch eine sehr hohe Viskosität und einen im Vergleich zur Überflutungskühlung mit Öl deutlich geringeren Verbrauch des Schmiermediums aus. Erste Experimente zeigten, dass das Drehmoment und der Werkzeugverschleiß bei der Bearbeitung der bleifreien Legierungen leicht reduziert werden konnten. Nachteilig sind an dieser Stelle lediglich das manuelle Auftragen der Gewindeschneidpaste sowie das Anhaften von Spänen am Werkstück zu nennen. Eine weitere Möglichkeit zur Reduzierung des KSS-Verbrauchs stellt die Minimalmengenschmierung (MMS) dar. In ersten Versuchen zum Gewindebohren und -formen mit einem sogenannten „Aerosol-Trockenschmiersystem" der Fa. Rother Technologie wurde grundsätzlich nachgewiesen, dass die bleifreien Messinglegierungen unter MMS-Bedingungen bearbeitet werden können. Weiteren Aufschluss hierzu geben zukünftige Zerspanuntersuchungen.

Literatur:

[1] Deutsches Kupferinstitut: Richtwerte für die spanende Bearbeitung von Kupfer und Kupferlegierungen. Informationsdruck i.18, Düsseldorf, 2010

[2] Nobel, C.; Klocke, F.; Lung, D.; Wolf, S.: Machinability Enhancement of Lead-Free Brass Alloys. Procedia CIRP, 14/2014, S. 95-100.

[3] Kato, H.; Nakata S.; Ikenaga, N.; Sugita, H.: Improvement of Chip Evacuation in Drilling of Lead-Free Brass Using Micro Drill. International Journal of Automation Technology 8(6)/2014, S. 874-879.

[4] Nobel, C.; Hofmann U.; Klocke, F.; Veselovac, D.: Experimental investigation of chip formation, flow, and breakage in free orthogonal cutting of copper-zinc alloys. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015

[5] Wobker, H.-G.; Friedrich, T.; Denkena, B.; Köhler, J.; Grove, T.: Entwicklung von Lösungen für die spanende Bearbeitung einer entzinkungsbeständigen, bleifreien Kupfer-Zink-Legierung. In: METALL - Fachzeitschrift für Metallurgie, 65(11)/2011, S. 493-523

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