



Montanuniversität Leoben – University of Leoben

Department Metallurgie – Department of Metallurgy

Nichteisenmetallurgie – Nonferrous Metallurgy



MASTERARBEIT

Thema:

Einsatz von Diamantschneidplatten bei der CNC-Bearbeitung von Aluminium- und Kupferlegierungen



Ersteller:

Anna Lisbeth Visser

Betreuer:

Dipl.-Ing.Dr.mont. Susanne Koch

Univ.-Prof.Dipl.-Ing.Dr.mont. Helmut Antrekowitsch

Leoben, Juni 2012

Einsatz von Diamantschneidplatten bei der CNC-Bearbeitung von Aluminium- und Kupferlegierungen

Fuchshofer Präzisionstechnik GmbH fertigt seit 17 Jahren komplexe Dreh- und Frästeile mit Schwerpunkt auf 2D- und 3D-Bearbeitung im CAM- und CNC-Präzisionsbereich. Circa 50 % der Fertigung bei Fuchshofer Präzisionstechnik GmbH basiert derzeit auf der Bearbeitung von Aluminiumlegierungen.

Bei der spanabhebenden Bearbeitung von Metallen wird seit einigen Jahren zunehmend ein Wechsel weg von Hartmetall-Werkzeugen und hin zu Diamantschneiden vollzogen. Diesem Trend will Fa. Fuchshofer GmbH folgen, insbesondere, weil die bei der Zerspanung von Aluminium- und Kupferlegierungen stetig steigenden Qualitätsanforderungen ein alternatives Bearbeitungskonzept erfordern.

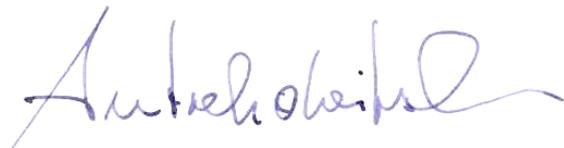
Sehr hohe Maßgenauigkeit und Oberflächengüte sowie erhöhte Schnittgeschwindigkeiten und Standzeiten erhöhen die Attraktivität der Diamantwerkzeuge gegenüber herkömmlichen Hartmetall-Werkzeugen. Die Vorteile dieses extrem harten und verschleißfesten Schneidstoffes stehen den höheren Kosten für die Anschaffung gegenüber.

Ziel der Masterarbeit ist es, einen passenden Diamantschneidstoff sowie eine geeignete Werkzeuggeometrie für die CNC-Bearbeitung der Aluminiumlegierungen AA2007 und AA7075 sowie der Kupferwerkstoffe Bronze CuSn11Pb2 und Messing CuZn39Pb3 zu finden. Im Rahmen der Untersuchungen sollen die Prozessparameter für das Drehen und Fräsen mit den neuen Werkzeugen im Hinblick auf die Werkstückqualität und Wirtschaftlichkeit optimiert werden. Dies erfolgt durch eine Reihe von Zerspanversuchen sowie der anschließenden Analyse des Materialverhaltens.

Der positive Abschluss der Arbeit soll die Basis für die Herstellung von Präzisionsbauteilen mit optimierter Bearbeitung, vergrößerter Prozesssicherheit, verringerten Maschinenzeiten und folglich gesenkten Bearbeitungskosten bilden.

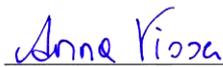
Mit den neuen Fertigungskonzepten soll es möglich sein, langfristig Produktivität, Produktqualität, Umwelt und Reproduzierbarkeit im Vergleich zum Stand der Technik deutlich zu verbessern.

Leoben, Juni 2012



Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt, wörtlich und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.



Anna Lisbeth Visser

Leoben, Juni 2012

BSc
Anna Lisbeth Visser
Munschgasse 7
4030 Linz



An den Studiendekan der Montanuniversität Leoben

Zustimmungserklärung zur digitalen Veröffentlichung von Abschlussarbeiten

Mir ist bekannt, dass die Arbeit mit dem Titel "Einsatz von Diamantschneidplatten bei der CNC-Bearbeitung von Aluminium- und Kupferlegierungen" im Sinne des § 86 UG 2002 (Veröffentlichungspflicht) auch in digitaler Form veröffentlicht werden kann und in digitaler Form unbefristet an der Montanuniversität Leoben gespeichert werden darf sowie ggf. auch eine technikgestützte Plagiatsprüfung vorgenommen werden kann.

Darüber hinaus erkläre ich mich ausdrücklich damit einverstanden, dass die Universitätsbibliothek der Montanuniversität Leoben die oben genannte Arbeit in pdf-Form auf einem Dokumentenserver im WEB zur Verfügung stellt. Für gesperrte Abschlussarbeiten erfolgt dies nach Ablauf der Sperre.

Der digitalen Veröffentlichung meiner Arbeit durch die Universitätsbibliothek stimme ich hiermit zu:

Ja

Nein

Datum 18.02.2013

Unterschrift Verfasser/in

CNC-Bearbeitung von Aluminium- und Kupferlegierungen mit Diamantschneidplatten

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Frage nach einem passenden Diamantschneidstoff und der geeigneten Werkzeuggeometrie für die CNC-Bearbeitung der Aluminiumlegierungen AA2007 und AA7075 sowie der Kupferwerkstoffe Bronze CuSn11Pb2 und Messing CuZn39Pb3. Im Rahmen der Untersuchungen wurden die Prozessparameter für das Drehen und Fräsen mit den neuen Werkzeugen im Hinblick auf die Werkstückqualität und Wirtschaftlichkeit optimiert. Dies erfolgte durch eine Reihe von Zerspanversuchen sowie der anschließenden Analyse des Materialverhaltens.

Die praktischen Versuche mit PKD- und CVD-Werkzeugen haben gezeigt, dass sich ein größerer Vorschub vorteilhaft auf die Spanform auswirkt und sich dabei gleichzeitig die Rauheit stark erhöht. Von der Einstellung der Spantiefe lässt sich keine eindeutige Wirkung auf die Oberflächenqualität ableiten. Sie hat jedoch entscheidenden Einfluss auf die Länge der Späne, da eine größere Spantiefe kürzere Späne bewirkt, was gleichzeitig die Bildung einer Aufbauschneide begünstigt.

Application of diamond cutting inserts for CNC machining of aluminium alloys

This paper deals with the search for an appropriate diamond cutting material and suitable tool geometry for CNC machining for processing the aluminium alloys AA2007 and AA7075 as well as the copper alloys bronze CuSn11Pb2 and brass CuZn39Pb3. The task also implies the optimisation of the process parameters for turning and milling using those new cutting tools particularly with regard to work piece quality and cost-effectiveness. As a part of this research this was accomplished by a series of cutting experiments and the subsequent material performance analysis.

The practical tests with PCD- and CVD-tools have shown that an increasing feed is beneficial for the produced chip shape and at the same time strongly increases the surface roughness. Decreasing the depth of cut hardly showed any distinct impact on the surface quality, but resulted in longer chips and the tendency of developing a built-up edge.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Problemstellung, Zielsetzung und Lösungswege	2
2.1	Problemstellung	2
2.2	Zielsetzung und Lösungswege.....	3
3	Literatur- und Patentrecherche	4
3.1	Grundlagen der Spanbildung	4
3.1.1	Schnitt- und Spanungsgrößen	4
3.1.2	Schneidkeilgeometrie	6
3.1.2.1	Einfluss des Freiwinkels α	6
3.1.2.2	Einfluss des Keilwinkels β	6
3.1.2.3	Einfluss des Spanwinkels γ	7
3.1.2.4	Einfluss des Einstellwinkels κ	8
3.2	Schneidstoffübersicht.....	9
3.2.1	Einteilung der Diamantschneidstoffe.....	11
3.2.2	Naturdiamant und synthetischer Diamant	11
3.2.3	Monokristalline Diamantwerkzeuge	11
3.2.4	Polykristalline Diamantwerkzeuge	12
3.2.5	Hartstoffbeschichtungen	14
3.3	Anwendungsgebiete von Diamantschneidstoffen.....	16
3.3.1.1	Bearbeitung von Aluminium	16
3.3.1.2	Bearbeitung von Kupfer und Messing	16
3.3.1.3	Bearbeitung von Stahl	17
3.3.2	Einsatzgebiete von MKD-Schneiden.....	17
3.3.3	Einsatzgebiete von PKD-Schneiden	17
3.3.4	Prozessparameter für die Bearbeitung mit Diamant-werkzeugen.....	18
3.3.5	Materialverhalten bei der Bearbeitung mit Diamantwerkzeugen.....	20
3.3.6	Glanz-/Spiegeldrehen	20
3.4	Verschleiß.....	22
3.4.1	Verschleißmechanismen.....	22
3.4.2	Verschleißformen.....	22
3.4.3	Standzeit	24
3.4.4	Verschleiß von Diamantschneiden.....	24
3.4.4.1	Verschleiß bei der Bearbeitung von AlSi17Cu4Mg.....	25
3.4.4.2	Verschleiß bei der Bearbeitung von Al6061 und 1215 Stahl	25
3.5	Kühlschmierung	26
3.5.1	Minimalmengenschmierung	26

3.5.2	Trockenzerspanung	26
3.5.3	Anwendungsbereiche der MMS und Trockenbearbeitung.....	27
4	Praktischer Teil	29
4.1	Verwendete Maschinen und Zerspanwerkzeuge.....	29
4.2	Verwendete Werkstoffe.....	32
4.3	Beurteilung der Spanform	37
4.4	Drehen.....	38
4.5	Fräsen	45
4.5.1	Planfräsen	45
4.5.2	Nutfräsen	50
4.6	Diskussion der Ergebnisse	51
4.7	Wirtschaftliche Aspekte.....	52
5	Zusammenfassung und Ausblick.....	53
6	Literatur.....	55
7	Abkürzungsverzeichnis.....	58
8	Abbildungsverzeichnis.....	60
9	Tabellenverzeichnis.....	63
10	Anhang	64
10.1	Hersteller von Diamantwerkzeugen	64
10.1.1	Lach-Diamant	64
10.1.2	Becker-Diamantwerkzeuge.....	65
10.1.3	MAPAL Dr. Kress KG	65
10.1.4	Sumitomo	66
10.1.5	Sandvik.....	67
10.1.6	Paul Horn GmbH	67
10.1.7	Weitere Hersteller.....	67
10.2	Gefügebilder der verwendeten Legierungen	69
10.3	Drehen.....	77
10.4	Fräsen	87

1 Einleitung

Die Entwicklung der Schneidstoffe führte im 20. Jahrhundert von den Schnellarbeitsstählen zu den Hartmetallen, den Schneidkeramiken und schließlich zu den superharten Materialien Bornitrid und synthetischer Diamant, sowie beschichtetem Hartmetall. Diese Fortschritte ermöglichten vor allem höhere Schnittgeschwindigkeiten und Standzeiten. ^[2]

Bei der spanabhebenden Bearbeitung von Leichtmetallen wird seit einigen Jahren zunehmend ein Wechsel weg von Hartmetall-Werkzeugen und hin zu Diamantschneiden vollzogen. Insbesondere bei der Zerspanung von Aluminiumlegierungen gibt es durch steigende Qualitätsanforderungen an die Bauteile kaum noch ernstzunehmende Alternativen zu Diamantwerkzeugen. Gründe dafür sind nicht nur die sehr hohe Maßgenauigkeit und Oberflächengüte der diamantbearbeiteten Werkstücke, auch bezüglich der Schnittgeschwindigkeiten und Standzeiten sind diese den Hartmetall-Werkzeugen weit überlegen. Die Vorteile dieses extrem harten und verschleißfesten Schneidstoffes stehen den höheren Kosten für die Anschaffung gegenüber. ^{[1][4][8]}

Während Diamantschneidplatten früher hauptsächlich bei der Feinbearbeitung zum Einsatz kamen, haben vor allem die polykristallinen Diamantwerkzeuge das Anwendungsgebiet stark erweitert und ermöglichen oftmals die Zusammenfassung der Vor- und Endbearbeitung in einem Arbeitsschritt. ^[8]

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Frage nach einem passenden Diamantschneidstoff und der geeigneten Werkzeuggeometrie für die CNC-Bearbeitung spezieller Aluminium- und Kupferlegierungen. Die Aufgabe besteht des Weiteren darin, die Prozessparameter für das Drehen und Fräsen mit den neuen Werkzeugen im Hinblick auf die Werkstückqualität und Wirtschaftlichkeit zu optimieren. Dies soll durch eine Reihe von Zerspanversuchen und die anschließende Analyse des Materialverhaltens im Rahmen dieser Arbeit realisiert werden.

2 Problemstellung, Zielsetzung und Lösungswege

Der Einsatz von Diamantschneidplatten eröffnet eine Vielzahl an Möglichkeiten für die zerspanende Bearbeitung. Um diese wirtschaftlich nutzen zu können, bedarf es der richtigen Wahl des Werkzeuges und einer entsprechenden Anpassung der Schnittbedingungen für die verschiedenen Werkstoffe.

2.1 Problemstellung

Der Schwerpunkt dieser Arbeit sind die Aluminiumlegierungen AA2007 und AA7075 sowie die Kupferwerkstoffe Bronze CuSn11Pb2 und Messing CuZn39Pb3. Die Aufgabe besteht darin, die spanabhebende Fertigung von Bauteilen aus diesen Materialien mittels Diamantwerkzeugen hinsichtlich der gestellten Anforderungen zu untersuchen. Diese sind in erster Linie eine gute Oberflächenqualität der Produkte und eine maximale Standzeit der Werkzeuge.

Bei der Umstellung von Hartmetall- auf Diamantschneidplatten ergeben sich daher folgende Fragen:

- Wie müssen Schnittgeschwindigkeit, Vorschub und Spantiefe geändert werden, um das gewünschte Ergebnis zu erreichen?
- Wo sind die Grenzen dieser Schnittparameter, bei welchen der superharte Schneidstoff versagt?
- Wie verändern sich die Oberflächengüte des Werkstückes und die Spanform in Abhängigkeit der verschiedenen Einstellungen?
- Welche Werkzeugstandzeit kann erreicht werden? Erweist sich der Wechsel des Schneidstoffes als wirtschaftlich?

2.2 Zielsetzung und Lösungswege

Wie in der Problemstellung beschrieben, wird im Rahmen dieser Arbeit die CNC-Bearbeitung von Al- und Cu-Legierungen mit Diamantwerkzeugen behandelt. Das Ziel ist dabei die Ermittlung der optimalen Prozessparameter für das Erreichen einer guten Oberflächenqualität des Werkstückes, einer günstigen Spanform, möglichst langer Werkzeugstandzeiten und einer daraus resultierenden Zeit- und Kosteneinsparung.

Das Vorgehen gliedert sich in drei Abschnitte:

1. Literaturrecherche zur Analyse des aktuellen Standes der Technik. Diese beinhaltet des Weiteren auch eine Marktrecherche, die einen Überblick der angebotenen Werkzeuge verschiedener Hersteller sowie der empfohlenen technischen Daten geben soll.
2. Durchführung entsprechender Zerspanversuche der erwähnten Werkstoffe mit Diamantwerkzeugen unter Variation der Prozessparameter. Zur Beurteilung der Ergebnisse sollen die anfallenden Späne und die gemessene Oberflächenrauheit herangezogen werden.
3. Schlussfolgerung aus den Ergebnissen der durchgeführten Versuche und Beantwortung der ursprünglichen und sich neu ergebenden Fragestellungen.

3 Literatur- und Patentrecherche

Dieses Kapitel beginnt mit einer kurzen, allgemeinen Einführung in die Theorie der spanabhebenden Fertigung und geht weiters auf die Besonderheiten von Diamantschneidstoffen sowie den aktuellen Stand der Technik ein.

3.1 Grundlagen der Spanbildung

Bei der spanenden Formgebung bewirkt die Schneide im bearbeiteten Werkstoff eine Scherspannung, die dessen Fließgrenze übersteigt. Dadurch entsteht ein Span, der über die Spanfläche des Schneidkeils abfließt. Die Spanbildung hängt stark mit den gewählten Prozessparametern und der Art der Schneide zusammen. ^[1]

3.1.1 Schnitt- und Spanungsgrößen

In der DIN 6580 ist die Betrachtung der Spanungsbewegung so definiert, dass das Werkstück in Ruhe ist und sich das Werkzeug bewegt. Dabei setzt sich die Wirkbewegung aus Schnitt- und Vorschubbewegung zusammen.

Unter der Schnittgeschwindigkeit v_c wird die Geschwindigkeit der Spanabnahme entlang der Schneidkante verstanden.

Der Vorschub sorgt für einen fortwährenden Materialabtrag längs des Werkstücks. Die Vorschubgeschwindigkeit v_f berechnet sich aus dem Weg, den ein Werkzeug in Vorschubrichtung, längs des Werkstückes, in einer gewissen Zeit zurücklegt und wird meist in mm/Minute angegeben. Eine andere Art der Angabe bietet der Vorschub f , der den Vorschub in mm pro Umdrehung beschreibt.

Im Fall von Fräsern und Bohrern, die mehrere Schneiden besitzen, wird der Vorschub geteilt, sodass die Schneiden lediglich anteilig zum gesamten Vorschub beitragen. Dementsprechend wird der Anteil am Vorschub pro Zahn z als Zahnvorschub f_z bezeichnet und wird mittels Division von f durch z berechnet.

Die Resultierende aus Schnitt- und Vorschubgeschwindigkeit ist die Wirkgeschwindigkeit v_e . Abbildung 1 veranschaulicht diesen Zusammenhang. ^[1]

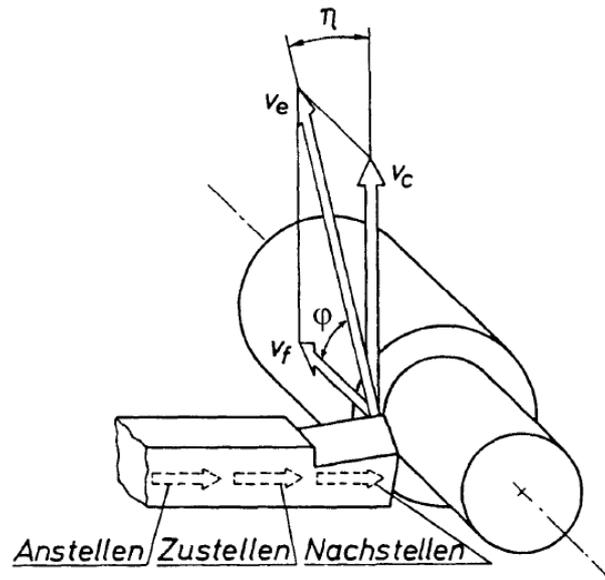


Abbildung 1: Darstellung der Spanungsbewegung^[1]

Weitere Definitionen:^[1]

- Die Schnitttiefe a_p beschreibt die Eingriffstiefe der Schneide, im rechten Winkel zur Arbeitsebene.
- Der Wirkrichtungswinkel η ist der Winkel zwischen Wirkrichtung und Schnittrichtung.
- Der Arbeitseingriff a_e einer Schneidkante definiert das Ausmaß des Schneideneingriffs, orientiert in der Arbeitsebene und senkrecht zur Vorschubrichtung.
- Vorschubeingriff: Der Vorschubeingriff a_f quantifiziert den Schneideneingriff in Richtung des Vorschubes.

3.1.2 Schneidkeilgeometrie

In Abbildung 2 sind Span- und Freifläche eines Schneidkeils dargestellt. Die abgebildeten Winkel haben folgende Bezeichnungen: ^[2]

- Freiwinkel α
- Keilwinkel β
- Spanwinkel γ

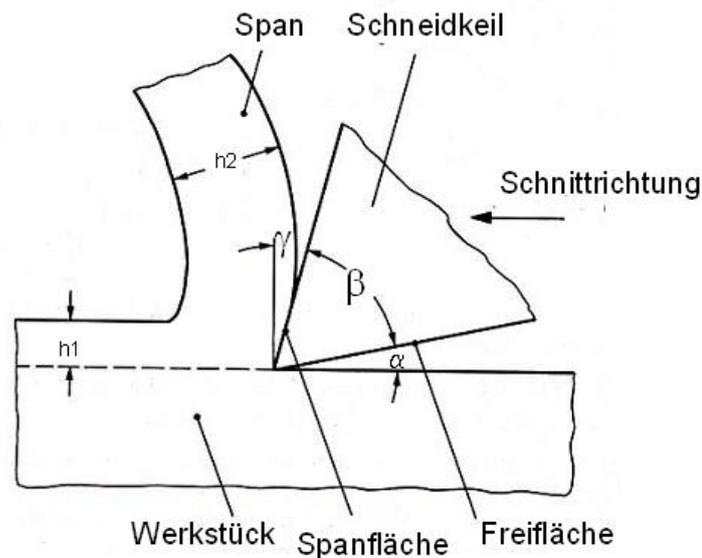


Abbildung 2: Flächen- und Winkelbezeichnungen ^[3]

3.1.2.1 Einfluss des Freiwinkels α

Der Freiwinkel α wird immer gerade so groß gewählt, dass zwischen der Freifläche des Werkzeugs und dem Werkstück möglichst wenig Reibung entsteht. Bei harten, abriebfesten Werkstoffen werden kleinere Freiwinkel bevorzugt, bei weichen und zähen Werkstoffen hingegen größere. ^[4]

3.1.2.2 Einfluss des Keilwinkels β

Der Keilwinkel β soll für weiche Werkstoffe klein und für harte, spröde Werkstoffe groß sein ^[4]. Kleinere Werte führen zu geringeren Schnittkräften, können aber auch eine Instabilität der Schneide, unzureichenden Wärmeabtransport und eine ungünstige Spanbildung zur Folge haben. ^[1]

3.1.2.3 Einfluss des Spanwinkels γ

Der Spanwinkel γ ist für die Trennung des zu zerspanenden Materials zuständig und beeinflusst die Stabilität der Schneide. Er kann, wie Abbildung 3 zeigt, sowohl positive als auch negative Werte annehmen. ^[1]

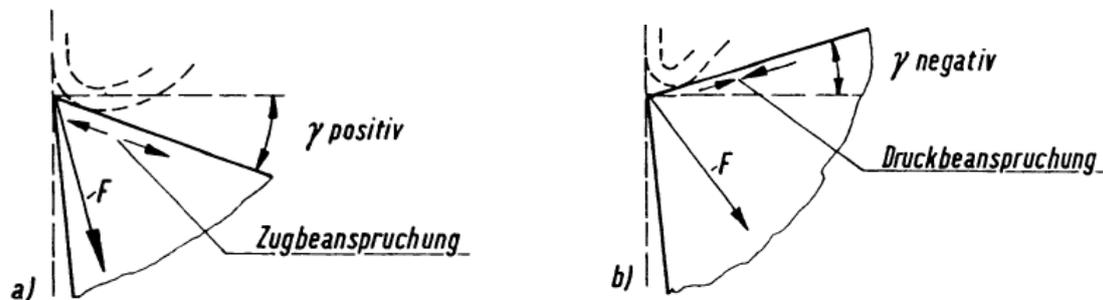


Abbildung 3: Abhängigkeit der Spanflächenbeanspruchung vom Spanwinkel γ ^[1]

Die Vorteile eines positiven Spanwinkels sind die kleineren Schnitt- und Vorschubkräfte und die oft bessere Werkstückoberfläche. Der Nachteil ist die Erzeugung eines langen Spans (Neigung zur Fließspanbildung). Dieser kann durch eine weitere Umlenkung mittels Spanleitstufen gebrochen werden.

Ein negativer Spanwinkel hat den Vorteil, dass die Zerspankraft dabei als Druck- statt als Zugbelastung auf die Spanfläche wirkt. Bei stoßempfindlichen Schneidstoffen ist diese Art der Beanspruchung schonender. Negative Spanwinkel steigern außerdem die Stabilität der Schneide, haben aber gleichzeitig eine höhere Temperaturbelastung des Werkzeugs zur Folge. Zusätzlich kommt es zu einem verstärkten Kolkverschleiß der Spanfläche, wodurch sich die Werkzeugstandzeiten verkürzen können.

Ein negativer Spanwinkel führt zu größeren Schnittkräften und erhöht den Leistungsbedarf. Abbildung 4 zeigt diesen Zusammenhang zwischen dem Spanwinkel und der spezifischen Schnittkraft. Um größere Schnittkräfte zu vermeiden, wird oft ein negativer Fasenspanwinkel γ_f gewählt, wobei der Haupt-Spanwinkel γ positiv bleibt. Die Breite einer solchen Spanflächenfase beträgt meist $0,5$ bis $1 \cdot f$, wobei f der Vorschub pro Umdrehung ist. ^[1]

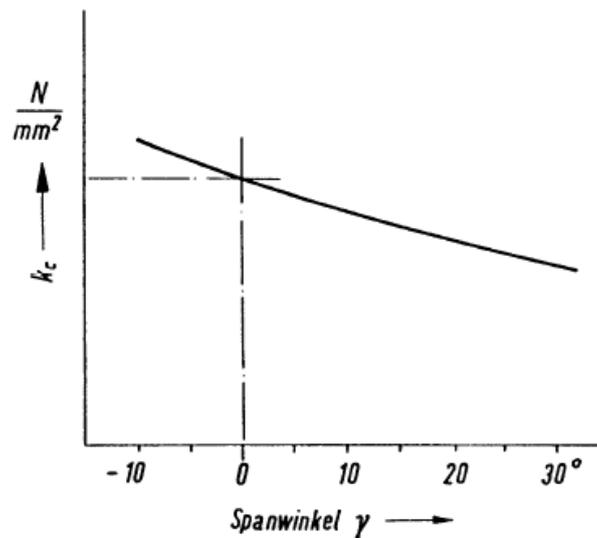


Abbildung 4: Abhängigkeit der spezifischen Schnittkraft k_c vom Spanwinkel γ ^[1]

Der Spanwinkel sollte umso negativer (bis zu -25°) gewählt werden, je höher die Härte und Festigkeit des Werkstoffs sind und je spröder der Schneidstoff ist. Für eine schöne Schnittfläche muss die Schnittgeschwindigkeit ausreichend groß sein. ^[1]

3.1.2.4 Einfluss des Einstellwinkels κ

Der Einstellwinkel κ legt, wie in Abbildung 5 dargestellt, die Position der Hauptschneide zum Werkstück fest. Je größer der Einstellwinkel ausgeführt wird, desto größer ist auch die Vorschubkraft. Kleine Einstellwinkel vergrößern die Eingriffslänge der Hauptschneide und sind aufgrund der größeren Passivkräfte nur bei sehr steifen Werkstücken sinnvoll. ^[4]

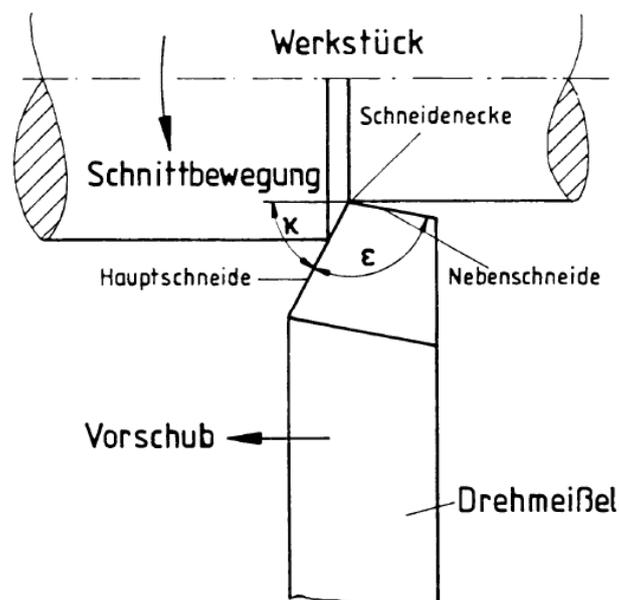


Abbildung 5: Position der Hauptschneide zum Werkstück ^[1]

3.2 Schneidstoffübersicht

Schneidstoffe zur spanenden Fertigung lassen sich in vier große Gruppen einteilen. Im Folgenden sind diese nach zunehmender Härte und Verschleißfestigkeit sowie abnehmender Biegefestigkeit gereiht. ^[2]

- Werkzeugstähle
- Hartmetalle
- Schneidkeramik
- Hochharte Schneidstoffe aus Bornitrid (BN) und Diamant

Abbildung 6 zeigt eine größere Auswahl verschiedener Schneidstoffe, die gemäß ihren Eigenschaften im Diagramm platziert wurden.

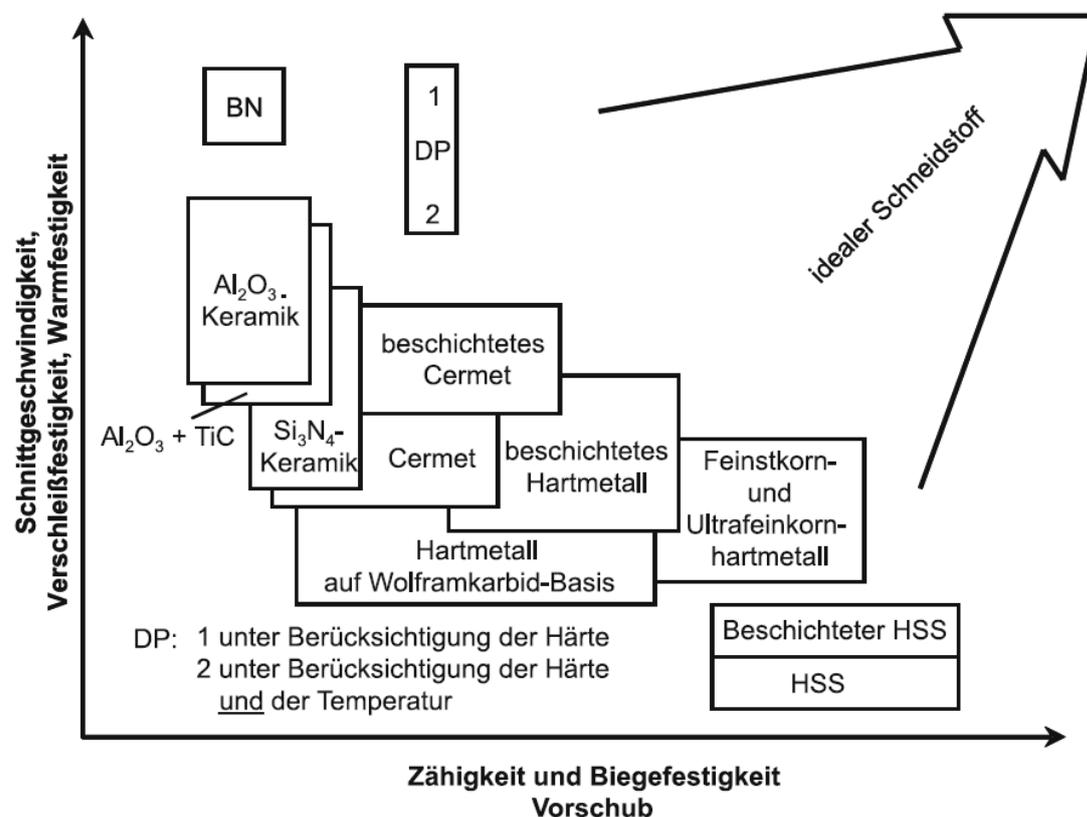


Abbildung 6: Gegenüberstellung verschiedener Schneidstoffe sowie deren Eigenschaften ^[2]

Nach DIN ISO 513 lassen sich die Werkstück-Werkstoffe in sechs Hauptanwendungsgruppen unterteilen, die durch einen Kennbuchstaben (P, M, K, N, S, H) und eine Kennfarbe beschrieben werden (siehe Abbildung 7). Innerhalb dieser Hauptanwendungsgruppen erfolgt eine weitere Klassifizierung durch Kennzahlen, die sich nach der Zähigkeit und

Verschleißfestigkeit des Schneidstoffs richten. Umso größer die Kennzahl ist, desto höher ist die Zähigkeit und desto geringer ist die Verschleißfestigkeit des Schneidstoffs. ^[2]

Hauptanwendungsgruppe			Anwendungsgruppe			
Kennbuchstabe	Kennfarbe	Werkstück – Werkstoff	Harte Schneidstoffe			
P	blau	Stahl: Alle Arten von Stahl und Stahlguss, ausgenommen nichtrostender Stahl mit austenitischem Gefüge	P01 P10 P20 P30 P40 P50	P05 P15 P25 P35 P45	↑	↓
M	gelb	Nichtrostender Stahl: Nichtrostender austenitischer und austenitisch-ferritischer Stahl und Stahlguss	M01 M10 M20 M30 M40	M05 M15 M25 M35	↑	↓
K	rot	Gusseisen: Gusseisen mit Lamellengraphit, Gusseisen mit Kugelgraphit, Temperguss	K01 K10 K20 K30 K40	K05 K15 K25 K35	↑	↓
N	grün	Nichteisenmetalle: Aluminium und andere Nichteisenmetalle, Nichtmetallwerkstoffe	N01 N10 N20 N30	N05 N15 N25	↑	↓
S	braun	Speziallegierungen und Titan: Hochwarmfeste Speziallegierungen auf der Basis von Eisen, Nickel und Kobalt, Titan und Titanlegierungen	S01 S10 S20 S30	S05 S15 S25	↑	↓
H	grau	Harte Werkstoffe: Gehärteter Stahl, gehärtete Gusseisenwerkstoffe, Gusseisen für Kokillenguss	H01 H10 H20 H30	H05 H15 H25	↑	↓
↑ Zunehmende Schnittgeschwindigkeit, zunehmende Verschleißfestigkeit des Schneidstoffes ↓ Zunehmender Vorschub, zunehmende Zähigkeit des Schneidstoffes						

Abbildung 7: Darstellung der Hauptanwendungsgruppen von Schneidstoffen ^[2]

Die folgenden Seiten widmen sich dem hochharten Schneidstoff Diamant. Dabei wird vor allem auf die Vor- und Nachteile sowie die Anwendungsgebiete der unterschiedlichen Diamantschneidstoffe eingegangen.

3.2.1 Einteilung der Diamantschneidstoffe

Der Diamant ist eine kubische Kristallmodifikation von elementarem Kohlenstoff. Die C-Atome sind tetraedrisch und kovalent gebunden. Diamant übertrifft wegen seiner extrem hohen Bindungs- und Gitterenergie alle anderen bekannten Werkstoffe an Härte und Wärmeleitfähigkeit. ^[2]

Die Unterteilung der Diamantschneidstoffe erfolgt in natürliche und synthetische sowie in mono- und polykristalline Formen. Nach DIN ISO 513 sind die Kennbuchstaben für monokristallinen Diamant DM und für polykristallinen DP. Wie in der Praxis gebräuchlich, werden im Rahmen dieser Arbeit die Abkürzungen MKD und PKD verwendet. ^[2]

3.2.2 Naturdiamant und synthetischer Diamant

Bei der zerspanenden Bearbeitung wird Naturdiamant nur in seiner monokristallinen Form eingesetzt, da polykristalline Diamantschneidstoffe aus wirtschaftlichen und technologischen Gründen bevorzugt synthetisch hergestellt werden. ^[1]

Die Diamantsynthese erfolgt in einem Temperatur- und Druckbereich, in dem Diamant stabil ist. Dabei entstehen monokristalline Diamantpartikel, deren Abmessungen, Reinheit und Porosität von den gewählten Prozessparametern abhängen. Sie können als monokristalline Diamantschneidkörper verwendet oder zu polykristallinen Schneiden weiterverarbeitet werden. ^[1]

3.2.3 Monokristalline Diamantwerkzeuge

Bei monokristallinen Diamanten ist besonders die Anisotropie der mechanischen Kennwerte zu beachten. Das heißt, dass ihre Eigenschaften, im Gegensatz zu polykristallinen Werkstoffen, richtungsabhängig sind, da der gesamte Diamant dieselbe Gitterorientierung aufweist. Der Kristall besitzt vier bevorzugte Spaltrichtungen. Daher sollte das Schleifen immer in Richtung eines Härteminimums durchgeführt werden. Beim Einsetzen der MKD-Werkzeuge in den Werkzeughalter muss darauf geachtet werden, dass der Diamant so orientiert ist, dass die Zerspankraft in Richtung der größten Härte zeigt. Das in Abbildung 8 dargestellte Werkzeug besitzt eine Schneidkante und findet beim Bohren und Außendrehen

Verwendung. Ein sehr kleiner Nebenschneidenwinkel ermöglicht den Einsatz als Breitschlichtschneide zum Nachglätten der Oberfläche. [2]

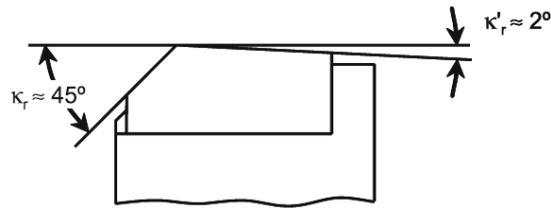


Abbildung 8: Werkzeug mit einer Schneidkante [2]

Das Werkzeug mit Rundschliff (in Abbildung 9 links) bietet eine große nutzbare Schneidenlänge, jedoch mit eher ungünstigen Spanbildungsbedingungen und höheren Passivkräften.

Eine weitere Variante ist das Werkzeug mit Facettenanschliff (in Abbildung 9 rechts) mit kleinem Nebenschneideneinstellwinkel, der die Oberflächenqualität entscheidend beeinflusst. [2]

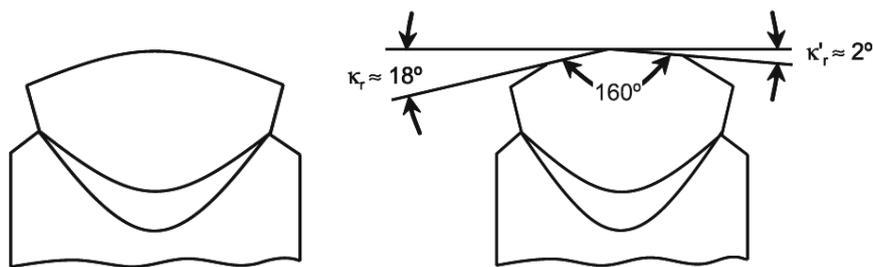


Abbildung 9: Werkzeuge mit Rund- und Facettenanschliff [2]

3.2.4 Polykristalline Diamantwerkzeuge

PKD-Schneidkörper entstehen durch Aufsintern polykristalliner Diamantschichten mit einer Dicke von etwa 0,5 mm auf Hartmetallsubstrat. Eine Diamantschicht, bestehend aus synthetischem Diamantpulver mit gleichmäßig feiner Körnung, wird bei einem Druck von 6 - 7 GPa und einer Temperatur von 1400 – 2000 °C in Anwesenheit metallischer Katalysatoren (Kobalt, Silizium, Wolfram, Wolframkarbid) versintert. Dabei bilden sich sogenannte Diamantbrücken, die dem polykristallinen Körper seine Festigkeit verleihen. Die Zwischenräume benachbarter Kristalle sind durch das verwendete Katalysatormetall ausgefüllt, das dem Material seine Zähigkeit gibt. Diese Zwischenräume können verkleinert werden, indem Diamantpartikel unterschiedlicher Korngrößen eingesetzt werden. Die größere Zahl an Diamantbrücken verbessert dabei die Stoßfestigkeit und die Schneidkantengüte. [2]

Die mechanischen Kennwerte der PKD-Werkstoffe sind richtungsunabhängig, also isotrop. Die polykristallinen Schichten weisen daher nicht die Spaltbarkeit monokristalliner Schneidkörper auf, ebenso erreichen sie aber auch nicht deren extreme Härtewerte. ^[2]

Polykristalline Diamanten als Schneidenmaterial haben gegenüber Hartmetall folgende Vorteile: ^[4]

- Niedrigere Oberflächenrauheit und geringerer Anstieg derselben über dem abgespannten Volumen. Dies gilt auch beim Zerspanen von abrasiven Al-Si-Legierungen.
- Kleinere Zerspankräfte und weniger Zunahme über dem abgespannten Volumen.
- Höhere Schnittgeschwindigkeit und größerer Vorschub sind möglich.
- Längere Standzeit des Werkzeuges.
- Weniger Nachbearbeitung.
- Engere Maß- und Formtoleranzen der Werkstücke.

Zu beachten ist jedoch die hohe Stoßempfindlichkeit von PKD-Werkzeugen. Auch Schnittunterbrechungen sind zu vermeiden. ^[4]

Für die Herstellung der fertigen Schneideneinsätze werden die Rohlinge durch funkenerosives Schneiden mit Draht zerteilt und danach geschliffen und eventuell poliert. Die Feinbearbeitung und die Korngröße des Diamant-Rohpulvers entscheiden über die Schärfe der Schneidkante. ^{[1][2]}

Einfluss der Diamant-Korngröße

Die Eigenschaften von Diamantschneiden hängen stark von der Diamantkörnung ab und können so gezielt beeinflusst werden.

So besitzen etwa die grobkörnigen Schneidmaterialien (Korngröße ca. 25 µm) eine bessere thermische Beständigkeit und höhere Härte. Sie werden aufgrund ihrer Verschleißbeständigkeit bei vorwiegend abrasiver Beanspruchung eingesetzt. Diese Werkzeuge sind daher bezüglich Verschleiß sowie Schneidkantengüte und -festigkeit bestens für die Zerspanung von Aluminiumlegierungen geeignet.

Die Vorteile feinkörniger Sorten sind die geringere Schneidkantenverrundung und -schartigkeit. Feine Körnungen (ca. 2 µm) werden überwiegend in der Automobilindustrie bevorzugt, da sie die optimale Schneidkantengüte besitzen. ^[2]

PKD-Schneidstoffe mittlerer Korngröße (ca. 10 µm) sind vielseitig einsetzbar. Aufgrund ihrer Schneidkantengüte und dem vorteilhaften Standverhalten werden sie beispielsweise bei umlaufenden Werkzeugen verwendet.

Als Bindephase kommt meist Kobalt zum Einsatz, da es sich durch eine hohe Wärmeleitfähigkeit auszeichnet. Die Verwendung von SiC hat dagegen den Vorteil einer höheren thermischen Stabilität. ^[2]

3.2.5 Hartstoffbeschichtungen

Für das Aufbringen von Hartstoffschichten bieten sich zwei Verfahrensarten an:

- CVD (Chemical Vapour Deposition)
- PVD (Physical Vapour Deposition)

Im Vergleich zu den konventionellen Diamantschneidstoffen zeichnen sich CVD-Diamant-Dickschicht-Werkzeuge durch besondere Härte und Temperaturfestigkeit aus. Mit diesem Verfahren sind außerdem größere Werkzeuge als jene aus monokristallinem Diamant herstellbar. ^[6]

Bei der CVD-Diamantbeschichtung kondensieren die Zersetzungsprodukte kohlenstoffhaltiger Gase unter Zufuhr von Wärme- oder Strahlungsenergie auf einem Trägermaterial (siehe Abbildung 10). Dabei bilden sich durch chemische Abscheidung aus der Gasphase dünne Schichten aus Diamantkristallen. Diese bestehen im Gegensatz zu polykristallinem Diamant nur aus Diamantkristallen und enthalten keine „Bindephase“. Als Substratmaterial für die Werkzeuge kommen Hartmetall und Keramik in Frage. Nach einer entsprechenden Vorbehandlung werden auf der Oberfläche winzige Diamantkeimen verteilt. Im nächsten Schritt wird das Substrat in eine Kammer mit einem Vakuum von meist 10 bis 100 mbar gebracht. Diese ist mit Wasserstoff und wenigen Prozent eines Kohlenstoffträrgases gefüllt, wie beispielsweise Methan, aus dessen Kohlenstoff sich der Diamant bildet. ^[6]

Aufgrund der gleichmäßigen Abscheidung bietet sich das Verfahren auch besonders für komplizierte Werkzeugformen wie Schafffräsern, Bohrer und Wendeschneidplatten mit Spanformrille an. Vor allem die Zerspanung von Kupfer, Faserverbundwerkstoffen und Aluminiumlegierungen mit hohen Siliziumgehalten werden durch diese Beschichtungen erleichtert. ^[2]

CVD-Diamantdickschichten kommen bei der Zerspanung von hochabrasiven Werkstoffen, etwa von aluminiumbasierten Metall-Verbundwerkstoffen zum Einsatz. ^[2]

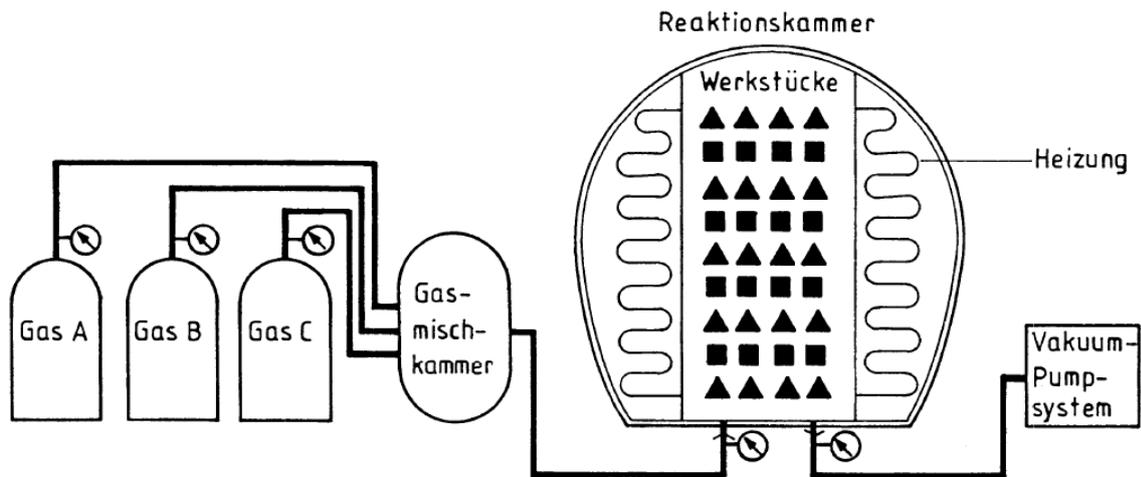


Abbildung 10: Prinzipskizze des CVD-Verfahrens ^[1]

Bei der Bearbeitung von Nichteisenmetallen sieht Paucksch et al. ^[1] einen Entwicklungstrend von den gegenwärtig bevorzugten Beschichtungen TiN, (Ti,Al)N, Ti(C,N) hin zu Diamant- und TiB-Beschichtungen. ^[1]

3.3 Anwendungsgebiete von Diamantschneidstoffen

Diamant kommt vor allem bei der Zerspanung von Legierungen der folgenden Elemente zum Einsatz: ^[7]

- Aluminium
- Kupfer
- Magnesium
- Zink

Auch Nichtmetalle wie faserverstärkte Kunststoffen, Hartgummi, Keramik und Holzfaserprodukte gehören in das Anwendungsgebiet der Diamantenwerkzeuge. ^[7]

3.3.1.1 Bearbeitung von Aluminium

Diamantwerkzeuge eignen sich hervorragend für die spanabhebende Fertigung von Aluminiumlegierungen und ermöglichen hohe Schnittgeschwindigkeiten und Vorschübe bei gleichzeitig langen Standzeiten und optimalen Werkstückoberflächen. Besonders wichtig ist die Anwendung polykristalliner Diamantwerkzeuge bei der Bearbeitung übereutektischer Al-Si-Legierungen, aufgrund ihrer Zusammensetzung aus weichem Aluminium und harten, stark abrasiv wirkenden Si-Kristallen. PKD-Schneiden ermöglichen auch hier wesentlich höhere Schnittgeschwindigkeiten und erreichen Standzeiten, die etwa 80-mal höher sind, als die von Hartmetall-Werkzeugen. Sie bieten hohe Fertigungssicherheit sowie Genauigkeit und produzieren hervorragende Oberflächenqualitäten. Diese werden daher auch in der Massenproduktion auf Transferstraßen, wo kurze Taktzeiten und hohe Sicherheit gegen Schneidenbruch gefragt sind, den Hartmetall-Werkzeugen vorgezogen. ^{[1][4]}

3.3.1.2 Bearbeitung von Kupfer und Messing

Die Verwendung hochpräziser PKD-Werkzeuge erfolgte bislang zum großen Teil beim Bearbeiten siliziumhaltiger Aluminiumlegierungen. Doch parallel dazu gewinnt auch die Zerspanung von Messingbauteilen mit dem hochharten Schneidstoff PKD immer mehr an Bedeutung.

Der Einsatz von Messing findet in der Industrie ein breites Anwendungsfeld. Wegen seiner guten korrosionschemischen Eigenschaften wird Messing häufig als Werkstoff für Armaturen und Formstücke in der Sanitär- und Heizungstechnik verwendet. Mit seinen Legierungsbestandteilen Kupfer und Zink besitzt dieses Material generell sehr gute

Zerspanungseigenschaften und wird daher vorwiegend mit Schneiden aus Hartmetall bearbeitet.

Die Bearbeitung mit PKD-Werkzeuge bringt folgende Vorteile mit sich: hohe Oberflächengüte, gratfreies Bearbeiten und lange Standzeiten der Werkzeuge, in Verbindung mit stark reduzierten Taktzeiten und erhöhtem Vorschub. Zudem entfällt oft die Nachbearbeitung, da mit dem PKD-Werkzeug eine gratfreie Oberfläche entsteht. ^[8]

3.3.1.3 Bearbeitung von Stahl

Diamant eignet sich im Allgemeinen nicht für die Zerspanung von Stählen, weil bei den auftretenden Temperaturen während der Bearbeitung Kohlenstoffatome vom Diamantschneidstoff in das Eisen diffundieren. Stattdessen wird auf diesem Gebiet beispielsweise CBN (kubisches Bornitrid) eingesetzt, das sich aufgrund seiner fehlenden Kohlenstoffaffinität für die Zerspanung harter Eisenwerkstoffe anbietet. ^[1]

Nur unter bestimmten Bedingungen kommen PKD-Schneiden bei der Bearbeitung von Eisen-Gusswerkstoffen zum Einsatz. Voraussetzungen sind geringe Schnitttiefen, Vorschübe und Schnittgeschwindigkeiten bei gleichzeitig intensiver Schneidenkühlung. Auf diese Weise können auch bei der Gussbearbeitung lange Werkzeugstandzeiten, hohe Oberflächenqualitäten und Bauteilgenauigkeit mit PKD-Werkzeugen erreicht werden. Diese Möglichkeit wird beispielsweise bei der Bohrungsfeinbearbeitung genutzt. ^[1]

3.3.2 Einsatzgebiete von MKD-Schneiden

MKD-Schneiden sind dann von Vorteil, wenn sehr hohe Maßgenauigkeit und Oberflächengüte gefordert werden. Sie kommen daher hauptsächlich in der Fein- und Ultrapräzisionsbearbeitung (Drehen, Fly-cutting, Hobeln) zum Einsatz. Bei letzterer können durch die Verwendung beinahe schartenfrei auspolierter MKD-Schneiden Oberflächen mit Rautiefen von 3 – 6 nm hergestellt werden. Beispiele für Einsatzgebiete sind die Erzeugung von Spiegeln für optische Anwendungen und die Fertigung von Werkzeugen für den Kunststoffspritzguss. Für große Schnitttiefen und Vorschübe sind sie aufgrund ihrer kleinen Abmessungen und geringeren Bruchfestigkeit nicht geeignet. ^[1]

3.3.3 Einsatzgebiete von PKD-Schneiden

Polykristalliner Diamant zeichnet sich wie der Naturdiamant durch große Härte und lange Standzeit aus, ist dabei aber weniger schlagempfindlich. Das Anwendungsgebiet der PKD-Werkzeuge umfasst sowohl die Feinbearbeitung als auch die Grobzerspanung. Häufig ermöglicht der Einsatz von polykristallinen Schneidwerkzeugen die Zusammenfassung der

Vor- und Endbearbeitung in einem Arbeitsschritt. Bei der zerspanenden Fertigung von Aluminium und anderen NE-Metallen haben sich PKD-Werkzeuge als Hochleistungswerkzeuge durchgesetzt. Aber auch für die Bearbeitung von Kunststoffen, Holz und Verbundwerkstoffen werden Schneiden aus polykristallinem Diamant eingesetzt. Weitere Anwendungsbeispiele sind das Fräsen von Magnesium-Druckguss-Legierungen und das Hochleistungsfräsen von Aluminium-Integralbauteilen in der Flugzeugindustrie.^{[1][4]}

Von den verschiedenen Einsatzgebieten der PKD-Werkzeuge mit bestimmter Schneide hat die Bearbeitung von Aluminiumwerkstoffen und speziell die von übereutektischen Al-Si-Legierungen, aufgrund ihrer hohen Anforderungen an den Schneidstoff, eine besonders große Bedeutung erlangt. Beispiele auf diesem Gebiet sind das Drehen von Kolben und die Bearbeitung von Motorblöcken oder Kompressorgehäusen.^[9]

3.3.4 Prozessparameter für die Bearbeitung mit Diamantwerkzeugen

Für PKD-Werkzeuge sind hohe Werte von bis zu 5000 m/min bei der Schnittgeschwindigkeit kein Problem, sofern die Maschine schwingungsfrei arbeitet.

Die Firma Lach Diamant vertreibt Monoblock-Diamant-Fräser „dia-compact“ für das Plan- und Eckfräsen von Aluminiumteilen. Die Diamantschneide wird dabei mit dem Stahlsubstrat zu einer festen Einheit verbunden, wodurch im HSC-Bereich laut Hersteller Vorschübe bis zu 60 m/min und Schnittgeschwindigkeiten bis zu 7500 m/min beim Schruppen, Schlichten und Feinschlichten möglich sind.^[7]

In Tabelle 1 sind die wichtigsten Werkstoffe mit den geeigneten Schnittbedingungen aufgeführt.

Tabelle 1: Einsatzbedingungen für PKD-Schneiden beim Drehen ^[1]

Werkstoff	Bearbeitung	Schnittgeschwindigkeit m/min	Schnitttiefe mm	Vorschub mm/U
Al-Legierung Si < 12 %	Vordrehen	1000 – 3000	0,1 – 3,0	0,1 – 0,4
	Fertigdrehen	1000 – 3000	0,1 – 3,0	0,1 – 0,2
Al-Legierung Si > 12 %	Vordrehen	300 – 800	0,1 – 3,0	0,1 – 0,4
	Fertigdrehen	300 – 800	0,1 – 1,0	0,1 – 0,2
Cu-Legierung Zn-Legierung	Vordrehen	600 – 1000	0,5 – 2,0	0,1 – 0,4
	Fertigdrehen	700 – 1200	0,1 – 0,5	0,1 – 0,4
Hartmetall	Vordrehen	20 – 40	0,1 – 0,5	0,1 – 0,3
	Fertigdrehen	20 – 40	0,1 – 0,2	0,1 – 0,3

Tabelle 2 listet die von Degner et al. ^[9] empfohlenen Schnittparameter für das Feindrehen mit Diamantschneiden auf.

Tabelle 2: Prozessparameter beim Feindrehen mit Diamantwerkzeugen ^[9]

Werkstoff	Schnittgeschwindigkeit v_c	Vorschub f	Schnitttiefe a_p
	m/min	mm/U	mm
Reinaluminium	250 – 900	0,03 – 0,06	0,02 – 0,1
Al-Legierung	600 – 900	0,015 – 0,06	0,02 – 0,1
Al-Si-Legierung	< 500	0,02 – 0,04	0,02 – 0,1
Mg-Legierung	< 900	0,03 – 0,06	0,02 – 0,1
Kupfer	200 – 300	0,07 – 0,1	0,35 – 0,5
Messing	100 – 200	0,07 – 0,1	0,1 – 0,2
Gussbronze	150 – 400	0,02 – 0,1	0,1 – 0,15
Phosphorbronze	< 3000	0,02 – 0,04	0,02 – 0,5
Weißmetall	200 – 400	0,02 – 0,2	0,1 – 0,5

3.3.5 Materialverhalten bei der Bearbeitung mit Diamantwerkzeugen

Die Verwendung von Diamantschneiden ermöglicht im Allgemeinen sehr gute Oberflächenqualitäten mit kleinen Mittenrauwerten R_a . Die Bildung von sogenannten Scheinspänen kann jedoch zu einem unregelmäßigen Verlauf der Rautiefe in Form eines zeilenartigen Verschmierens der Werkstückoberfläche führen. Dabei wird das Aluminium vor der Schneidkante plastisch und es bildet sich zusätzlich zum normalen Span ein Scheinspan, der zwischen Werkstück und Werkzeugfreifläche austritt ^[11]. Dieses Phänomen hat negative Auswirkungen auf die Werkstückoberfläche. ^[9]

Die Scheinspanbildung ist weitgehend unabhängig vom eingesetzten Schneidstoff und kann auch beim Drehen mit Hartmetallschneiden beobachtet werden. Voraussetzung für die Scheinspanbildung sind bestimmte Druck- und Temperaturverhältnisse in den Kontaktzonen zwischen Werkstück und Schneidstoff. Diese werden durch die Schnittbedingungen und den Verschleißzustand der Schneide mit beeinflusst. Die Scheinspanbildung kann durch Kühlung und Verminderung der Reibung in der kritischen Zone verringert werden. Das Schleifen und Polieren der Werkzeugschneide und die Verwendung eines geeigneten Kühlschmierstoffes können daher zu einem besseren Ergebnis beitragen. Durch Herabsetzen der Schnittgeschwindigkeit und damit auch der Temperatur, kann die Scheinspanbildung verkleinert werden. ^[9]

3.3.6 Glanz-/Spiegeldrehen

Das Glanzdrehen ist ein Verfahren zur Herstellung spiegelnder, dekorativer Oberflächen mit einer mittleren Rautiefe $R_z < 0,4$ ^[12] und wird hauptsächlich in der Schmuck- und Uhrenindustrie angewandt. Glanzgedrehte Produkte kommen aber auch in der Automobil-, Optik- und Sanitärindustrie sowie in der Lichttechnik zum Einsatz. Als Werkstoff eignen sich NE-Metallen wie Aluminium, Kupfer, Gold, Silber, Platin, Messing und Rotguss sowie Kunststoffe. Eine Nacharbeitung durch Schleifen oder Polieren ist nicht mehr erforderlich. Um solche ebenen, gleichmäßigen und hochglänzenden Oberflächen im Nanobereich zu erzeugen, sind vibrationsfrei arbeitende Drehmaschinen erforderlich, die beispielsweise über hydrostatische Lager und luftgelagerte Spindeln verfügen. Mit konventionellen Maschinen erreicht man zwar ebenfalls eine glänzende, aber in ihrem Gesamtbild leicht unruhige Oberfläche. Zur Vorbereitung werden die Werkstücke meist mit PKD- oder Hartmetall-Schneidplatten bei einem Aufmaß von 0,02 bis 0,05 mm vorgedreht. Das Glanzdrehen erfolgt mit Diamantwerkzeugen. ^[13]

Die Kugler-Ultrapräzisionsfertigung, die unter anderem bei der Herstellung von Laserspiegeln zur Anwendung kommt, erfolgt vibrationsfrei auf luftgelagerten Maschinen. Als

Fräswerkzeug dient ein einkristalliner Naturdiamant, als Spiegelmaterial werden meist OFHC-Kupfer (Oxygen free high conductivity) oder spezielle Aluminiumlegierungen ausgewählt. Die Abstände der Bearbeitungsspuren sowie die Spantiefen liegen im niedrigen Mikrometerbereich. Nachpolieren ist nicht notwendig. Kugler fertigt zusätzlich Fokussierspiegel mit Hilfe von Präzisions-Diamantdrehmaschinen. Diese Spiegel werden beispielsweise aus Aluminium (Gewichtersparnis) hergestellt und mit Kupfer beschichtet (reflektierende Spiegeloberfläche).^[14]

Aluminium ist als Spiegelmaterial für sichtbares Licht besonders gut geeignet. Es zeichnet sich durch gute mechanische Festigkeit und Wärmeleitfähigkeit sowie hohes Reflexionsvermögen aus.^[15]

3.4 Verschleiß

Der Verschleiß der Schneidwerkzeuge wird durch mechanische, thermische und chemische Einflüsse bewirkt. Die Verschleißursachen führen je nach Werkstoff, Schneidstoff und Schnittbedingungen zu verschiedenen Verschleißformen.

3.4.1 Verschleißmechanismen

Es gibt vier verschiedene Verschleißmechanismen: ^[1]

- Der Reibverschleiß, auch Abrasion genannt, tritt auf der Spanfläche und der Freifläche auf. Er lässt sich unter anderem durch kleinere Schnittgeschwindigkeiten, niedrige Temperaturen, glatte Schneidoberflächen und Schmierstoffe verringern.
- Zu Aufbauschneidbildung kommt es, wenn sich durch Druck und Temperatur erweichende Werkstoffteilchen auf der Spanfläche aufschweißen
- Diffusionsverschleiß wird durch hohe Temperaturen begünstigt und äußert sich bei Hartmetallschneiden typischerweise durch Auskolkung. Auf Diffusionsverschleiß bei Diamantwerkzeugen wird weiter unten näher eingegangen.
- Mechanische Verformung der Schneidkante unter Druckeinwirkung.

3.4.2 Verschleißformen

Die oben beschriebenen Mechanismen führen zu folgenden Verschleißformen: Freiflächen- und Kolkverschleiß sowie weiteren Ausprägungen, die nachfolgend näher beschrieben sind.

Freiflächenverschleiß

Der Freiflächenverschleiß entsteht vor allem durch Reibung an der Kante der Haupt- und Nebenschneide. Der Verschleiß wird in Form der Verschleißmarkenbreite angegeben. Darunter wird, wie in Abbildung 11 dargestellt, die Länge der senkrechten Verschleißriefen verstanden. Wird eine definierte Verschleißmarke erreicht, so klassifiziert man das Werkzeug als stumpf. Der Schneidkantenversatz SV entspricht jenem Betrag, um den ein Werkzeug nachzustellen ist, um ihm wieder das ursprüngliche Maß zu geben. ^[1]

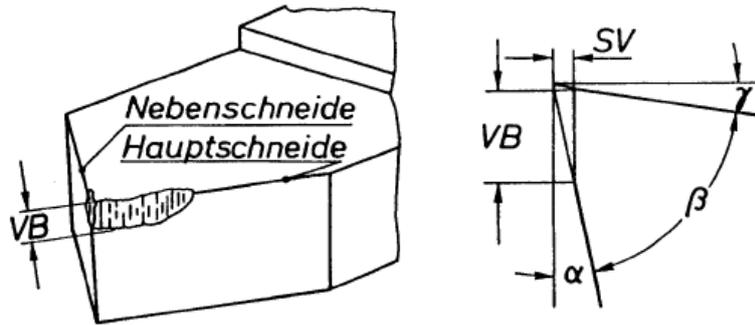


Abbildung 11: Darstellung des Freiflächenverschleißes ^[1]

Kolkverschleiß

Der Begriff des Kolkverschleißes steht für eine muldenförmige Aushöhlung der Spanfläche, welche durch das Zusammenspiel von Reibung und Diffusion entsteht. Der Kolkverschleiß hat dieselben Auswirkungen wie eine Änderung des Spanwinkels γ und kann die Stabilität der Schneide stark verringern. Diese Verschleißart ist bei höheren Schnittgeschwindigkeiten dominierend. Das sogenannte Kolkverhältnis K ist ein Maß für diese Art von Verschleiß und berechnet sich aus dem Verhältnis von Kolktiefe KT zu Kolkmittenabstand KM , wie in Abbildung 12 skizziert. Das Kolkverhältnis sollte unter der erlaubten Grenze von $K = 0,4$ bleiben. Die Standzeit ist bei beschichteten Spanflächen bedeutend länger. ^[1]

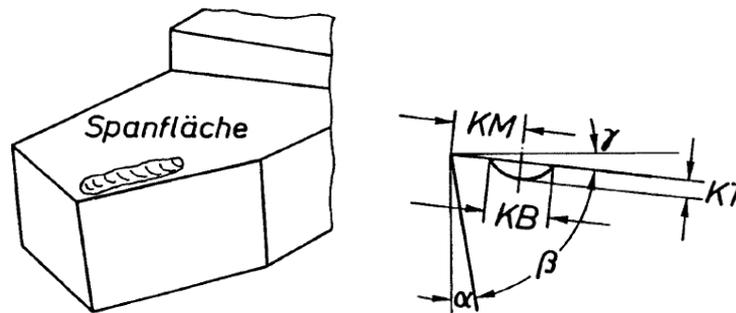


Abbildung 12: Darstellung des Kolkverschleißes ^[1]

Weitere Verschleißformen

Abbildung 13 zeigt weitere Verschleißformen am Beispiel einer Drehmeißelschneide.

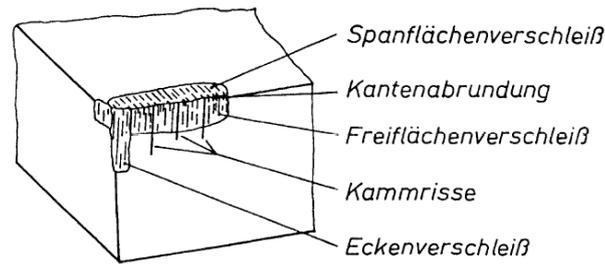


Abbildung 13: Darstellung von verschiedenen Verschleißformen ^[1]

3.4.3 Standzeit

Die Standzeit ist die nutzbare Zeit eines Werkzeugs, bevor dieses ausgewechselt oder nachgeschliffen werden muss und wird durch Verschleißkriterien begrenzt. Das Ende der Standzeit ist durch ein Standzeitkriterium wie die Verschleißmarkenbreite oder das Kolkverhältnis definiert, welches eine bestimmte Größe nicht überschreiten darf.

Die Standzeit hängt von zahlreichen Faktoren ab, wobei die Schnittgeschwindigkeit einen besonders großen Einfluss hat. Mit steigender Schnittgeschwindigkeit nimmt die Standzeit schnell ab. Auch eine zunehmende Spandicke sowie eine größere Spanbreite wirken sich negativ auf die Standzeit aus. ^[1]

Es besteht auch ein bedeutender Zusammenhang zwischen der Standzeit und der gewählten Schneidstoff-Werkstoff-Paarung. Wie bereits erwähnt, stellen auch abrasive Aluminiumlegierungen mit Diamantwerkzeugen eine gute Schneidstoff-Werkstoff-Kombination bezüglich Verschleiß und Standzeit dar. Degner et al. ^[9] beziffert diesen Vorteil der Diamantwerkzeuge mit einer 40- bis 50-fachen höheren Standzeit gegenüber Hartmetall-Schneiden bei gleichen Spanungsbedingungen. ^[9]

3.4.4 Verschleiß von Diamantschneiden

Bei höheren Temperaturen kommt es bei Diamanten zum sogenannten Oxidationsverschleiß der Schneidkanten. Dieser Verschleiß beginnt bei Naturdiamanten oberhalb von 800 °C, bei polykristallinen Diamanten setzt er aufgrund ihrer größeren Oberfläche bereits bei 650 °C ein. ^[1]

Als Richtwerte für das Standkriterium von Schneidkeramik-Werkzeugen nennt Klocke et al. ^[1] eine Verschleißmarkenbreite VB von 0,15 bis 0,3 mm und eine Kolktiefe KT von 0,1 mm.

3.4.4.1 Verschleiß bei der Bearbeitung von AlSi17Cu4Mg

Bei der Bearbeitung von Al-Si-Legierungen ist die glatte Durchtrennung der Si-Kristalle besonders wichtig. Dies erfordert scharfe, verschleißfeste Schneidkanten, wie sie von PKD-Werkzeugen geboten werden. Hartmetall-Schneiden hingegen runden sich schon nach kurzer Einsatzzeit ab, was dazu führt, dass die Si-Kristalle zertrümmert oder herausgerissen werden. Hoffmann^[16] vergleicht die Standzeiten von Hartmetall- und PKD-Schneiden beim Fräsen von Kurbelgehäuse-Außenteilen aus AlSi17Cu4Mg. Bei einem Zahnvorschub von 0,08 mm/Z und einer Schnittgeschwindigkeit von 800 m/mm beträgt die Standzeit 25 min beim Hartmetallwerkzeug und 500 min bei der PKD-Schneide. Des Weiteren werden die Standzeiten beim Ausspindeln von Zylinderbohrungen in Kurbelgehäusen aus AlSi17Cu4Mg gegenübergestellt, wobei sich für das Hartmetall 75 min und für PKD 3000 min pro Schneide ergeben. Hoffmann^[16] zieht daraus den Schluss, dass allein die um ein Vielfaches höheren Standzeiten des Diamantwerkzeuges die höheren Estandskosten rechtfertigen.^[16]

3.4.4.2 Verschleiß bei der Bearbeitung von Al6061 und 1215 Stahl

Lane et al.^[17] verglichen den Verschleiß von Diamantschneiden bei der Bearbeitung der Aluminiumlegierung Al6061 und 1215 Stahl. Diese beiden Materialien haben eine ähnliche Härte, verursachen jedoch verschiedene Verschleißarten. Al6061 enthält Legierungselemente wie Si und Cr. Durch die harten Einschlüsse kommt es beim Schneidwerkzeug vor allem zu Reibverschleiß. Bei der Bearbeitung von Stahl sind hingegen die Verschleißmechanismen vorwiegend Abrasion und Diffusion. Um den Verschleiß vergleichen zu können, wird der Volumsverlust über der Schnittdistanz aufgetragen. Die Untersuchungen ergaben, dass bei der Zerspanung von Al6061 die 1000-fache Schnittdistanz zu einem ähnlichen Verschleiß führt, verglichen mit der Bearbeitung von 1215 Stahl. Die Prozessparameter und Härtewerte dieser Versuche sind in Tabelle 3 angeführt:

Tabelle 3: Zerspan-Parameter bei den Werkstoffen Al (6061) und Stahl (1215)^[17]

	Al 6061	1215 Stahl
Spantiefe	2 µm	1 µm
Schnittgeschwindigkeit	3,40 - 2,66 m/s	2,13 m/s
Schnittdistanz	10 km	20 m
Vickershärte	1185 MPa	1850 MPa

3.5 Kühlschmierung

Kühlschmierstoffen werden bei der Zerspanung eingesetzt, um die Reibung durch Schmierung zu verringern, die entstehende Wärme abzuleiten und die Späne schneller abzutransportieren. Im Wesentlichen lassen sich die Kühlschmierstoffe in zwei Gruppen teilen: nicht wassermischbare und wassermischbare.

Wassermischbare Kühlschmierstoffe sind Emulsion aus unterschiedlichen Anteilen Wasser und Öl gemischt. Der hohe Wasseranteil von bis zu 99 % ist Ursache für die gute Kühlwirkung der Emulsionen, er fördert jedoch auch die Korrosion.

Nicht wassermischbare Kühlschmierstoffe sind vor allem Mineralöle mit Zusätzen, durch die eine Verbesserung der Druckfestigkeit erzielt wird.^[1]

Mit wachsender Schnittgeschwindigkeit werden die Voraussetzungen zur Bildung von Schmierfilmen immer ungünstiger. Gleichzeitig führt der Temperaturanstieg zu Diffusionsvorgängen zwischen den Reibpartnern oder im Extremfall zu plastischen Verformungen der Schneide. Die Standzeit hängt dann viel mehr von der Kühlwirkung der Flüssigkeit ab, als von ihrer Schmierfunktion.

Im Fall von niedrigen Schnittgeschwindigkeiten kann die Standzeit durch vorwiegende Schmierung und im Fall von hohen Schnittgeschwindigkeiten hauptsächlich mittels Kühlung optimiert werden.^[1]

3.5.1 Minimalmengenschmierung

Bei der Minimalmengenschmierung MMS werden nur geringe Mengen Kühlschmiermittel eingesetzt, die im Prozess kontrolliert dosiert werden müssen. Über die Spindel wird ein stetiger Schmierfilm aufgetragen. MMS bietet ökologische und finanzielle Vorteile, bedarf aber einer sorgfältigen Abstimmung der Prozessparameter. Probleme ergeben sich hierbei aus der Zerstäubung der Schmierstoffe, durch die eine Überwachung der Aerosolemissionen und Feinstäube nötig ist.^{[1][2]}

3.5.2 Trockenzerspannung

Der Verzicht auf Kühlschmierstoffe bringt einige Vorteile, wie die Steigerung der Effizienz, Senkung der Kosten, sowie eine Verbesserung der Arbeitsqualität und Verminderung der Umweltbelastung. Die entstehende Wärme wird hauptsächlich durch die anfallenden Späne abgeleitet. Dies ist mit Schneidstoffen mit hoher Warmfestigkeit umsetzbar, wie sie

beschichtete Hartmetalle, Keramiken oder CBN-Schneidstoffe aufweisen. Des Weiteren müssen die heißen Späne, etwa durch Pressluft, abtransportiert werden. ^{[1][2]}

3.5.3 Anwendungsbereiche der MMS und Trockenbearbeitung

Der Einsatz einer Minimalmengenschmierung ist, wie Tabelle 4 zeigt, insbesondere bei der spanabhebenden Fertigung von Aluminiumknetlegierungen unverzichtbar. Auf der Verfahrensseite sind für die MMS-Technik das Sägen, die Bohrungsherstellung und die Bohrungsnachbearbeitung klassische Einsatzgebiete. ^{[1][2]}

Tabelle 4: MMS und Trockenbearbeitung bei Aluminiumlegierungen ^[2]

Verfahren	Al-Gusslegierung	Al-Knetlegierung
Drehen	MMS/trocken	MMS/trocken
Fräsen	MMS/trocken	MMS
Bohren	MMS	MMS
Reiben	MMS	MMS
Gewindeschneiden	MMS	MMS
Gewindeformen	MMS	MMS
Tiefbohren	MMS	MMS
Sägen	MMS	MMS

Tabelle 5 zeigt ausgewählte Schneidstoff-Beschichtungskombination für den Einsatz der Trockenbearbeitung bzw. der Minimalmengenschmierung.

Tabelle 5: MMS und Trockenbearbeitung verschiedener Werkstoffe ^[1]

Verfahren		Sägen	Fräsen	Wälzfräsen	Bohren	Tieflochbohren	Gewinde-schneiden	Gewinde-formen	Drehen	Räumen	Reiben
Werkstoff											
Aluminium-gusslegierung	Schmierung	MMS	MMS	×	MMS	MMS	MMS	MMS	MMS	×	MMS
	Beschichtung	TiN	TiN + MoS ₂		(Ti,Al)N	(Ti,Al)N + MoS ₂	TiN	CrN, WC/C			(Ti,Al)N, PKD
Aluminium-knetlegierung	Schmierung	MMS	MMS	×	MMS	×	MMS	MMS	MMS	MMS	MMS
	Beschichtung	TiN	ohne		ohne				TiN		ohne
Messing	Schmierung	Trocken	Trocken / MMS	×	Trocken / MMS	MMS	MMS		Trocken / MMS	MMS	×
	Beschichtung										
Grauguss	Schmierung	Trocken	Trocken	Trocken	Trocken	MMS	MMS	MMS	Trocken / MMS	Trocken / MMS	MMS
	Beschichtung		TiN + MoS ₂	TiN	TiN	TiN	Ti(C,N)		TiN	TiN	PKD
Hochleg. Stähle, Wälzlagerstahl	Schmierung	MMS	Trocken / MMS	Trocken / MMS	MMS	×	MMS	MMS	MMS	Trocken / MMS	(MMS)
	Beschichtung		(Ti,Al)N	(Ti,Al)N + MoS ₂	(Ti,Al)N + MoS ₂		TiN		TiN	Ti(C,N)	
Automaten- / Vergütungsstahl	Schmierung	MMS	Trocken / MMS	Trocken / MMS	Trocken / MMS	MMS	MMS	MMS	MMS	Trocken / MMS	MMS
	Beschichtung		TiN + MoS ₂	TiN	TiN	(Ti,Al)N + MoS ₂	TiN	Ti(C,N)	TiN	Ti(C,N)	PKD
Nichtrostende VA-Qualität	Schmierung	(MMS)	MMS	(MMS)	(MMS)	×	×	×	(MMS)	×	×
	Beschichtung			(Ti,Al)N	(Ti,Al)N						

Bei der Zerspanung mit Diamantwerkzeugen wird die Minimalmengenschmierung bevorzugt. Besondere Bedeutung kommt dabei der Kühlwirkung des Wassers zu, welche für die Aufrechterhaltung des Flüssigkeitsfilms essentiell ist. Grund dafür ist die geringe Wärmebeständigkeit (bis etwa 800 °C) der Diamantschneidstoffe. ^{[9][18]}

Im Rahmen einer Marktrecherche erfolgte weiters die Ermittlung von Herstellern für unterschiedliche Werkzeuge sowie die dazugehörigen technischen Daten. Die Beschreibungen sowie Werte sind im Anhang zusammengefasst.

4 Praktischer Teil

Dieser Teil der Arbeit umfasst die Beschreibung der Versuchsdurchführung und die Dokumentation der Ergebnisse.

4.1 Verwendete Maschinen und Zerspanwerkzeuge

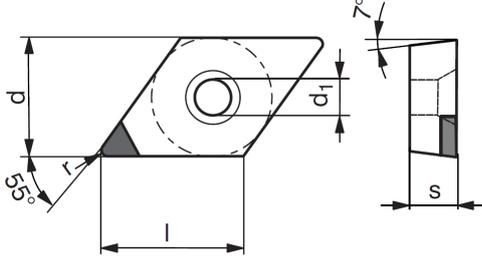
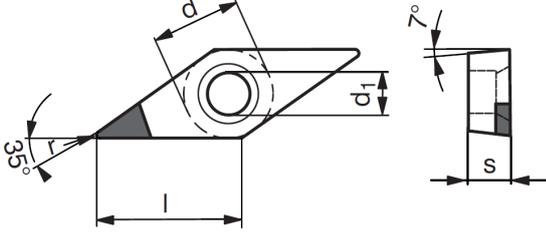
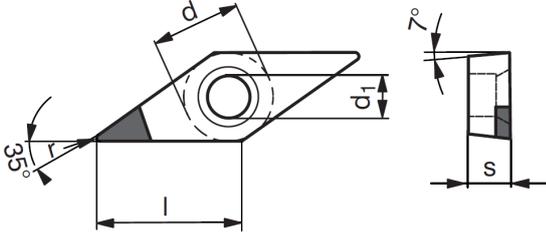
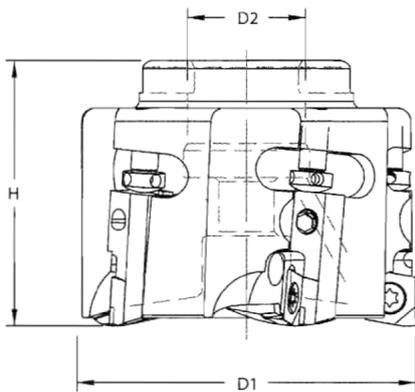
Im Rahmen der praktischen Versuche kamen die in Tabelle 6 aufgelisteten Maschinen zum Einsatz. Des Weiteren erfolgte die Messung der mittleren Rautiefe der neu entstandenen Oberfläche mit dem Mahr Perthometer M2.

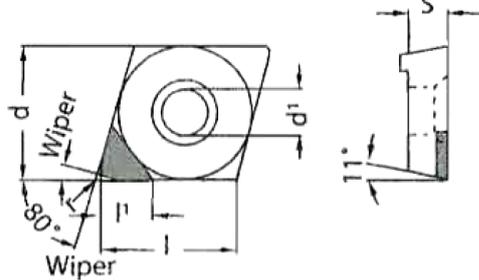
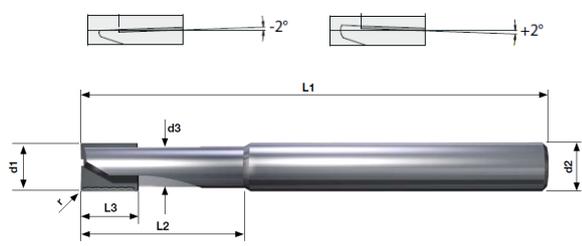
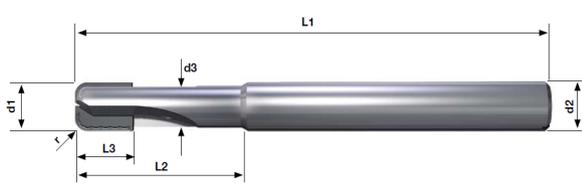
Tabelle 6: Verwendete Maschinen ^[19]

Anwendung	Gerät/Maschine	
Drehen folgender Legierung: AlCu4PbMgMn	<u>EMCO TURN 360:</u> Maximale Spindeldrehzahl: 4.000 U/min	
Drehen folgender Legierungen: AlCuPbMg AlZnMgCu1.5 CuSn11Pb2 CuZn39Pb3	<u>MORI-SEIKI SL-25 MC:</u> Maximale Spindeldrehzahl: 8.000 U/min	
Fräsen folgender Legierungen: AlCuPbMg AlCu4PbMgMn AlZnMgCu1.5 CuSn11Pb2 CuZn39Pb3	<u>MAHO DMC 104 V LINEAR:</u> Maximale Drehzahl: 12.000 U/min Hochdruckkühlung (40 bar) durch Spindel	

Die in Tabelle 7 angeführten Werkzeuge dienten der spanenden Bearbeitung. Die damit zerspannten Legierungen sind der rechten Spalte zu entnehmen.

Tabelle 7: Verwendete Zerspanwerkzeuge

Anwendung	Werkzeug	Abmessungen	Werkstoffe
Drehen – Schichten	DCGT 11T304-PDC-S-CB1 (54,4) ^[20]	 $r = 0,4 \text{ mm}$ $l = 11,60 \text{ mm}$ $s = 3,97 \text{ mm}$ $d_1 = 4,4 \text{ mm}$ $d = 9,525 \text{ mm}$	AlCuPbMg AlCu4PbMgMn AlZnMgCu1.5 CuSn11Pb2 CuZn39Pb3
Drehen – Schruppen	VCGT 160404-PDC-S-CB2 (72,1 Euro) ^[20]	 $r = 0,4 \text{ mm}$ $l = 16,60 \text{ mm}$ $s = 4,76 \text{ mm}$ $d_1 = 4,4 \text{ mm}$ $d = 9,525 \text{ mm}$	AlCu4PbMgMn CuSn11Pb2
Schruppen	VCGT 160408-PDC-S-CB1 (79,4) ^[20]	 $r = 0,8 \text{ mm}$ $l = 16,60 \text{ mm}$ $s = 4,76 \text{ mm}$ $d_1 = 4,4 \text{ mm}$ $d = 9,525 \text{ mm}$	AlCuPbMg AlZnMgCu1.5 CuZn39Pb3
Fräsen (Schruppen und Schichten)	CVD-Planfräser von Beckerdiamant TCP90-80mm-Al ^[21]	 Zähne: 7 $D1 = 80 \text{ mm}$ $D2 = 27 \text{ mm}$ $H = 50 \text{ mm}$	AlCuPbMg AlZnMgCu1.5 CuSn11Pb2 CuZn39Pb3

Anwendung	Werkzeug	Abmessungen	Werkstoffe
	PDC-S-Fräsplatte von Beckerdiamant ^[21]	 <p> $d = 9,52 \text{ mm}$ $d^1 = 4,40 \text{ mm}$ $s = 3,97 \text{ mm}$ $l = 9,70 \text{ mm}$ $l^1 = 4,29 \text{ mm}$ $r = 0,4 \text{ mm}$ </p>	
Nut-Fräsen	CVD-Schafffräser von Beckerdiamant BMC-S10-85-CVD ^[21]	 <p> $Z = 2$ Axialwinkel = 2° $d_1 = 10 \text{ mm}$ $r = 0,2 \text{ mm}$ $d_2 = 10 \text{ mm}$ $d_3 = 8,5 \text{ mm}$ $L_1 = 72 \text{ mm}$ $L_2 = 26 \text{ mm}$ $L_3 = 12 \text{ mm}$ CVD-Dicke = $1,0$ </p>	AlZnMgCu1.5
Fräsen	MillCut-Torusschafffräser mit Innenkühlung BMC-T12-R10-CVD ^[21]	 <p> $Z = 2$ $d_1 = 12 \text{ mm}$ $R = 1,0 \text{ mm}$ $d_2 = 12 \text{ mm}$ $d_3 = 10,1 \text{ mm}$ $L_1 = 83 \text{ mm}$ $L_2 = 32 \text{ mm}$ $L_3 = 8,5 \text{ mm}$ CVD-Dicke = $1,0$ </p>	

4.2 Verwendete Werkstoffe

Bei den Zerspanversuchen wurden die in Tabelle 8 angeführten Werkstoffe spanend bearbeitet. Die chemischen Analysen der ersten beiden Legierungen entsprechen der normierten Zusammensetzung von AA2007, wie aus Tabelle 9 hervorgeht. Weiters erfüllt die Legierung AlZnMgCu1.5 die Norm der AA7075. Tabelle 10 beinhaltet die Legierungsnormen für Messing und Bronze.

Die Bestimmung der Legierungszusammensetzungen erfolgte mittels optischer Emissionsspektrometrie (OES) mit dem Funkenspektrometer SPECTROMAXx auf dem Institut für Nichteisenmetallurgie der Montanuniversität Leoben.

Tabelle 8: Chemische Zusammensetzung der untersuchten Legierungen (in Gew.-%)

Bezeichnung	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Bi	Pb	Sn	Al
AlCuPbMg	0,530	0,485	3,45	0,59	0,72	0,034	0,027	0,49	0,065	0,055	0,92	0,012	Rest
AlCu4PbMgMn	0,479	0,680	3,70	0,58	0,61	0,036	0,011	0,09	0,041	0,149	0,95	0,017	Rest
AlZnMgCu1.5	0,083	0,128	1,54	0,05	2,24	0,188	-	5,57	0,063	-	0,02	-	Rest
CuSn11Pb2	-	0,018	Rest	-	-	-	0,215	0,45	-	-	0,76	10,33	-
CuZn39Pb3	-	0,276	Rest	-	-	-	0,066	39,62	-	-	1,98	0,24	-

Tabelle 9: Legierungsnormen von Aluminiumlegierungen (Angaben in Gew.-%) ^{[22] [23]}

Bezeichnung	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Bi	Pb	Sn	Al
EN AW AlCuMgPb (AA2007)	≤ 0,8	≤ 0,8	3,3–4,6	0,5–1,0	0,4–1,8	≤ 0,1	≤ 0,2	≤ 0,8	≤ 0,2	≤ 0,2	0,8–1,5	≤ 0,2	87,4–95,0
EN AW AlZn5,5MgCu (AlZnMgCu1,5) (7075)	≤ 0,4	≤ 0,5	1,2–2,0	≤ 0,3	2,1–2,9	0,18–0,28	-	5,10–6,10	≤ 0,2	-	-	-	87,1–91,4

Tabelle 10: Legierungsnormen der Bronze und des Messings (Angaben in Gew.-%) ^{[24] [25]}

Bezeichnung	Si	Fe	Cu	Mn	Ni	Zn	Pb	Sn	P	Al
CuSn11Pb2	≤ 0,01	≤ 2,0	83,5–87,0	≤ 2,0	≤ 2,0	≤ 2,0	0,7–2,5	10–12,5	≤ 0,4	≤ 0,01
CuZn39Pb3		≤ 0,5	57,0–59,0		≤ 0,3	Rest	2,5–3,5	≤ 0,3		≤ 0,05

Gefügebilder der verwendeten Legierungen

Die Proben wurden jeweils geschliffen und mit 3 μm und 1 μm - Diamantsuspension poliert. Abschließend erfolgte bei den Al-Legierungen eine Ätzung nach einem der beiden folgenden Rezepte: ^[26]

- m3:
- In einer Lösung aus 1–2 g Natriumhydroxid und 100 ml destilliertem Wasser für 5–10 Sekunden ätzen.
 - Danach in einer Lösung aus 5 ml Salpetersäure (65 %ig) und 95 ml destilliertem Wasser spülen.
 - Dann nochmals ca. 15 Minuten in der ersten Lösung ätzen.
 - Zuletzt 10 Minuten mit Wasser spülen.
- m5:
- Ätzen mit einer Lösung aus 75 ml destilliertem Wasser und 25 ml Salpetersäure (65 %ig) für 1–2 Stunden bei Raumtemperatur

Bei den Cu-Legierungen folgte auf das Polieren mit Diamantsuspension das Polieren mit OPS (Mischung mit 1 % H_2O_2 und 1 % Ammoniak) sowie eine Mikro- und eine Makroätzung: Bei der Mikroätzung kam eine Lösung aus 10 g $\text{H}_8\text{N}_2\text{O}_8\text{S}_2$ Ammoniumperoxodisulfat und 100 ml destilliertem Wasser zum Einsatz (Dauer ca. 30 Sekunden).

Für die Makroätzung stand eine Lösung aus 30 ml Salpetersäure (65 %ig) und 90 ml destilliertem Wasser zur Verfügung.

Zur Herstellung der Schliffbilder diente das Auflichtmikroskop Zeiss Axio Imager M1m auf dem Institut für Nichteisenmetallurgie der Montanuniversität Leoben.

Abbildung 14 bis Abbildung 18 zeigen ausgewählte Gefügebilder der Legierungen AlCuPbMg und CuSn11Pb2 angeführt, wobei sich die restlichen Gefügebilder dieser sowie der anderen Legierungen im Anhang befinden.

Die Al-Legierungen AlCuPbMg und AlCu4PbMgMn weisen die Phasen CuAl_2 , Al_2CuMg , Fe_2SiAl_8 und feine Mg_2Si -Ausscheidungen auf. ^[27]

Die Legierung AlZnMgCu1.5 enthält die Phasen MgZn_2 (hexagonale Struktur) und $\text{Mg}_{32}(\text{Al,Zn})_{49}$. ^[28]

Die Bronzelegierung CuSn11Pb2 weist ein Gefüge bestehend aus einer kubisch-flächenzentrierten α -Phase und einem ($\alpha+\delta$)-Eutektoid. Die α -Phase ist eine feste Lösung von Sn in Cu. Die δ -Phase hat ein kubisches Gitter mit der Zusammensetzung $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$. Das Blei löst sich nicht und verteilt sich an den Korngrenzen. ^[24]

Das Gefüge der Messinglegierung CuZn39Pb3 setzt sich aus der kubisch-flächenzentrierten α - und der kubisch-raumzentrierten β -Phase zusammen. Das Blei bleibt ungelöst und befindet sich an den Korngrenzen. Es dient dabei der Kornfeinung und wirkt sich günstig auf die Spanbarkeit aus. ^[25]



Abbildung 14: Gefügebild der m5-geätzten AlCuPbMg-Probe 200-fache Vergrößerung

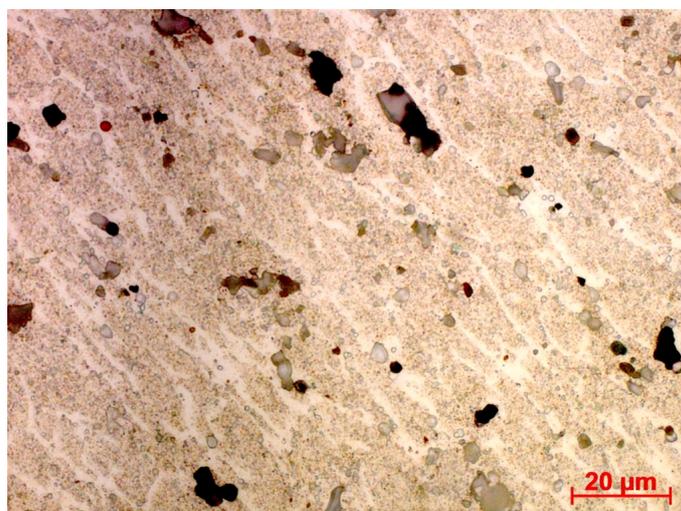


Abbildung 15: Gefügebild der m5-geätzten AlCuPbMg-Probe 1000-fache Vergrößerung

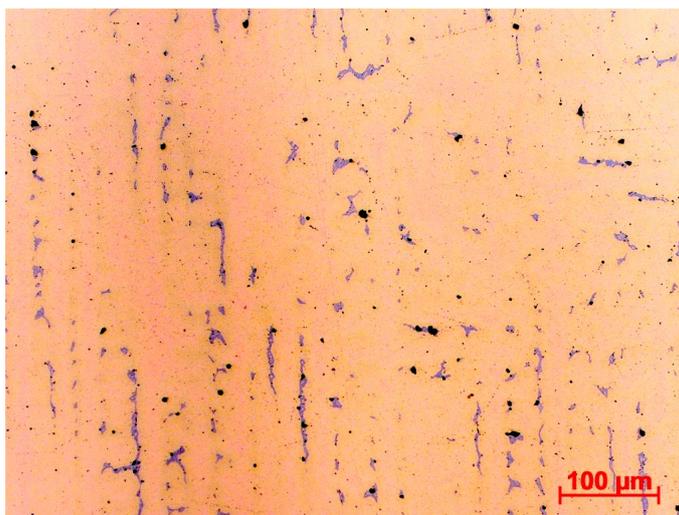


Abbildung 16: Gefügebild der OPS-polierten CuSn11Pb2-Probe 200-fache Vergrößerung

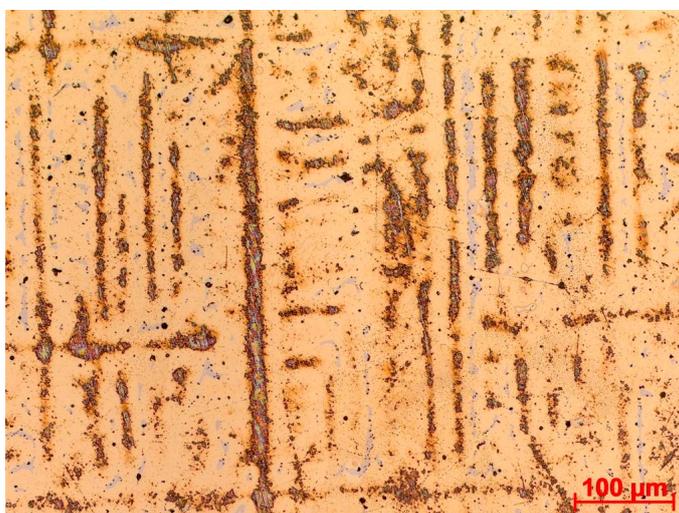


Abbildung 17: Gefügebild der mikrogeätzten CuSn11Pb2-Probe 200-fache Vergrößerung

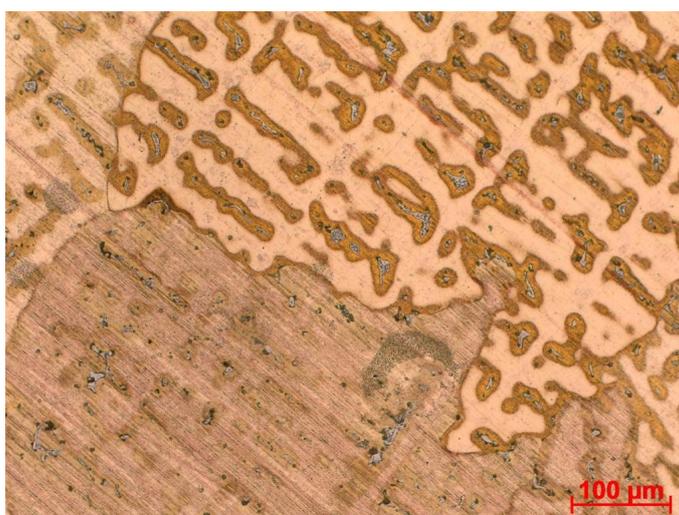
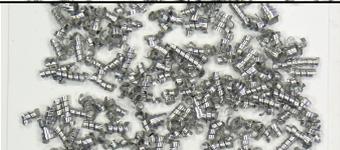


Abbildung 18: Gefügebild der makrogeätzten CuSn11Pb2-Probe 200-fache Vergrößerung

4.3 Beurteilung der Spanform

Die Beurteilung der Spanform erfolgt nach den in Tabelle 11 angeführten Spanformklassen SFK.

Tabelle 11: Darstellung der Spanformklassen ^[30]

1	Bandspäne		ungünstig
2	Wirrspäne		
3	Flachwendelspäne		
4	Lange, zylindrische Wendelspäne		
5	Spiralspanstücke		brauchbar
6	Bröckelspäne		
7	Wendelspanstücke		gut
8	Spiralspäne		

Als ungünstig gelten Band-, Wirr- und Flachwendelspäne, da sie eine Gefahr für Material, Maschine und Personen darstellen. Bröckel- und Spiralspanstücke können weniger leicht von der Wirkstelle abtransportiert werden als Wendelspanstücke und Spiralspäne, die daher am günstigsten sind. ^[21]

4.4 Drehen

Dieses Kapitel enthält die f - a_p -Diagramme für das Schlichten und Schruppen der einzelnen Legierungen. Sie zeigen die Spanbilder und die erzielte mittlere Rautiefe R_z in Abhängigkeit des Vorschubes f und der Spantiefe a_p . Die Schnittgeschwindigkeit ist für die jeweilige Legierung konstant.

Abbildung 19 bis Abbildung 21 stellen exemplarisch die f - a_p -Diagramme der Legierungen AlCu4PbMgMn und CuZu39Pb3 dar. Die übrigen Diagramme befinden sich im Anhang.

Legierung: AlCu4PbMgMn

Schnittgeschwindigkeit: 800 m/min

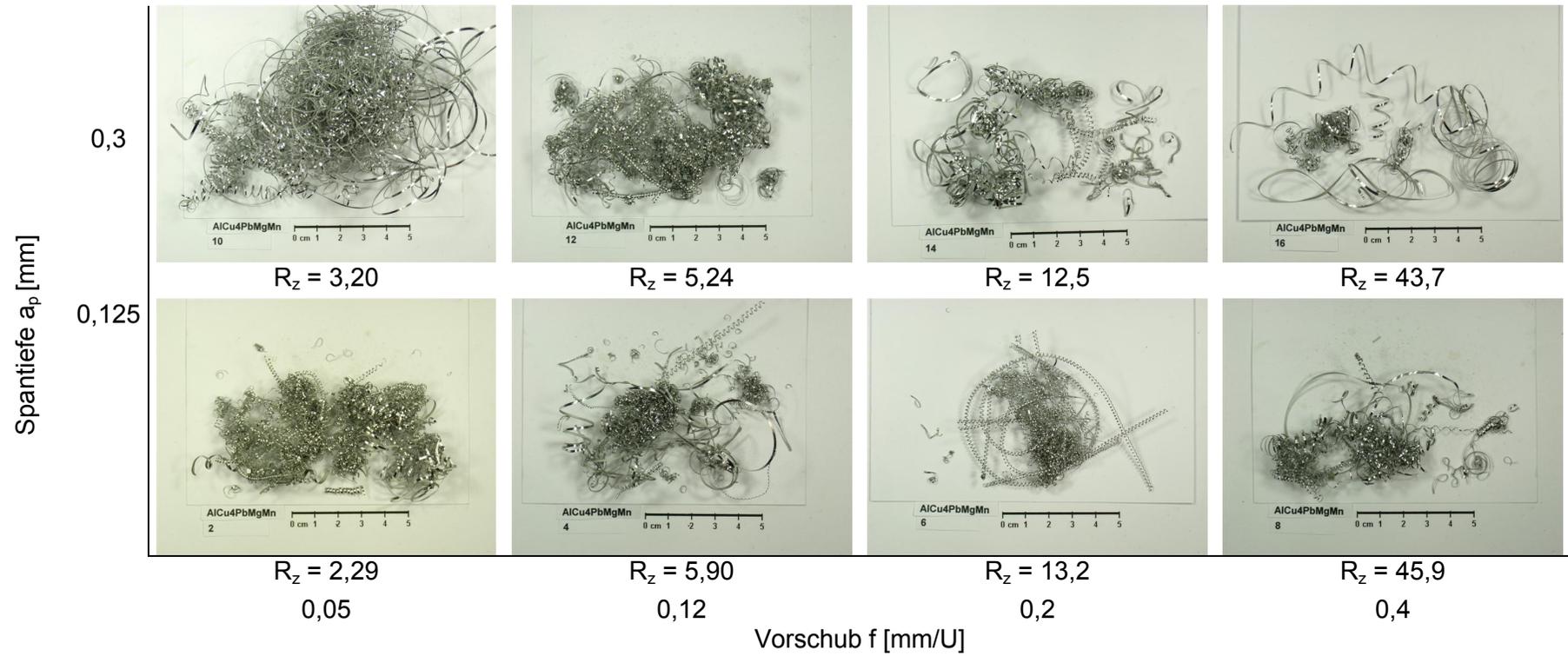


Abbildung 19: Spanformen im f - a_p -Diagramm AlCu4PbMgMn – Innenseite

Legierung: CuZn39Pb3

Schnittgeschwindigkeit: 750 m/min

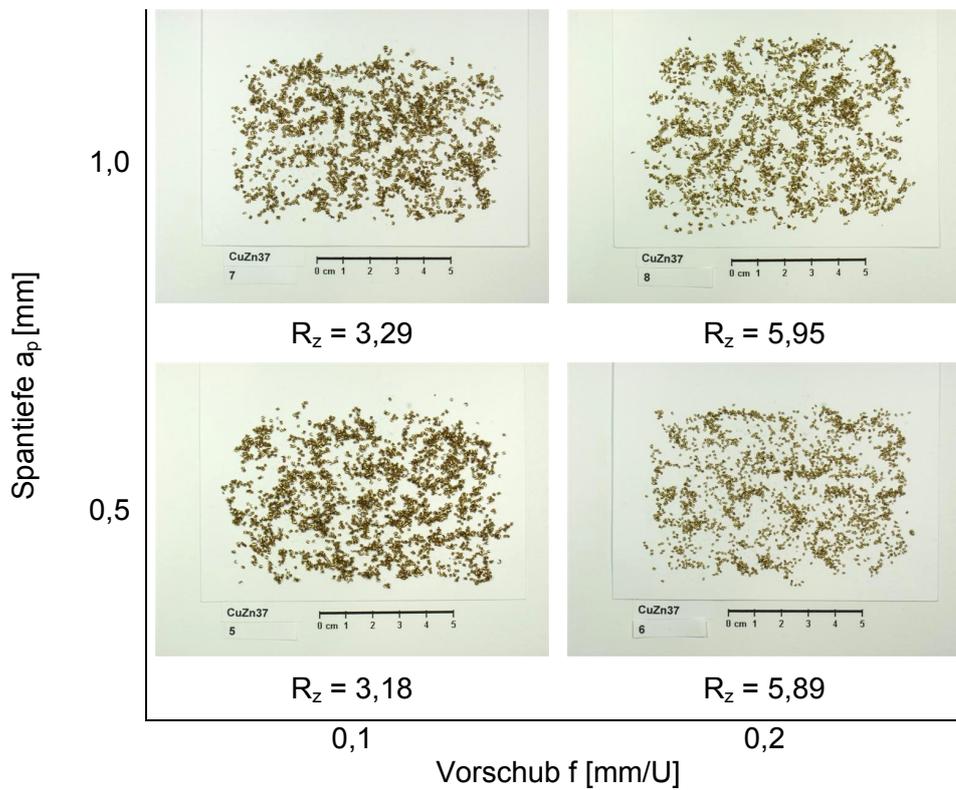


Abbildung 20: Spanformen im f - a_p -Diagramm CuZn39Pb3 – Schruppen

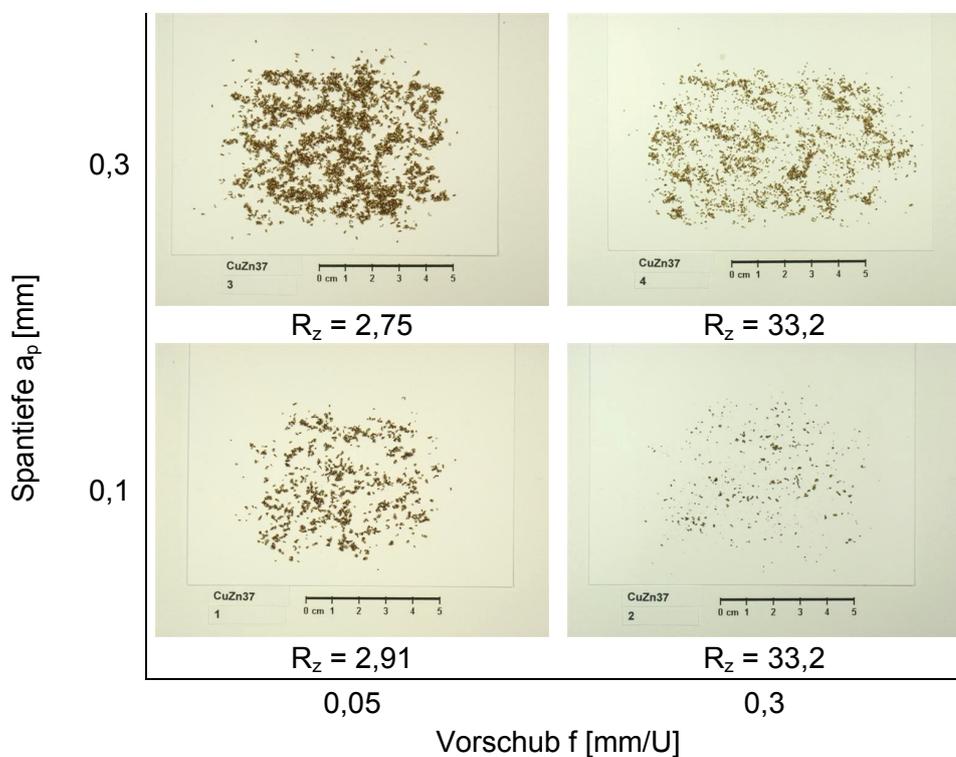


Abbildung 21: Spanformen im f - a_p -Diagramm CuZn39Pb3 – Schlichten

Anhand dieser Spanbilder ist der Zusammenhang zwischen Spanform und den Bearbeitungsparametern gut erkennbar. Während sich etwa bei der Legierung AlCuPbMg bei geringem Vorschub ein unvorteilhafter Wirrspan bildet, entstehen bei höherem Vorschub Wendelspäne.

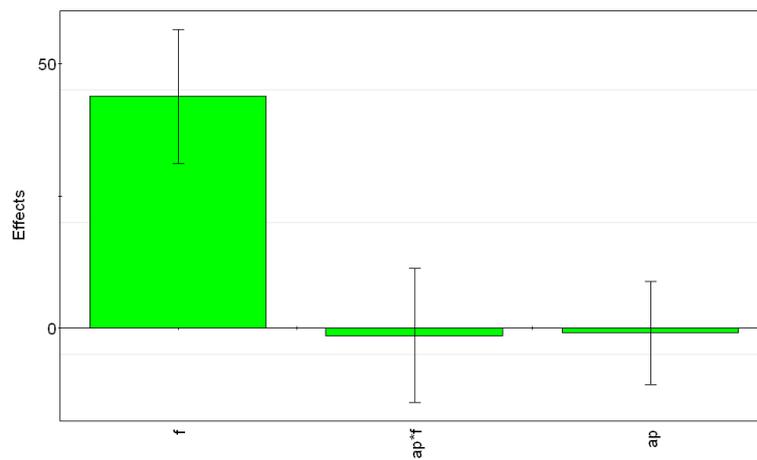
Entscheidenden Einfluss auf die Länge der Späne besitzt dabei die Spantiefe. So hat eine größere Spantiefe kürzere und damit günstigere Späne zur Folge. Gleichzeitig führt diese jedoch auch zu einer stärkeren Belastung des Werkzeuges, sodass sich Aufbauschneiden bilden und es im Extremfall sogar zum Schneidenbruch kommen kann. Dieser Fall liegt bei der Schrubbearbeitung der CuSn11Pb2-Legierung tatsächlich vor und ist das Resultat der sehr hoch gewählten Parameter (Schnittgeschwindigkeit 1500 m/min, Schnitttiefe 2 mm, Vorschub 0,4 mm/U). Bei den darauffolgenden Versuchen wurde die Spantiefe abgesenkt, um einen weiteren Schneidenbruch zu vermeiden.

Bei den Legierungen AlZnMgCu1.5 und AlCuPbMg konnte außerdem die Bildung einer Aufbauschneide festgestellt werden, die wahrscheinlich auf den großen Vorschub zurückzuführen ist.

Die gemittelte Rautiefe R_z wächst bei gesteigertem Vorschub auf ein Vielfaches und hängt kaum von der Spantiefe ab.

Die folgende Abbildung 22 zeigt die mit der Versuchsplanungssoftware Modde® 7.0 erstellten „Effects Plots“ für die Legierungen AlCu4PbMgMn und CuZn39Pb3 (die Effect Plots der restlichen Legierungen befinden sich im Anhang). Diese Diagramme stellen den Zusammenhang der verschiedenen Parameter (Vorschub f , Spantiefe a_p , Produkt $f \cdot a_p$) mit der gemittelten Rautiefe R_z in Form von Balken dar. Dabei wird wie erwartet vor allem die Proportionalität des Vorschubs zur Rauheit deutlich. Die Spantiefe scheint hingegen insgesamt keinen signifikanten Einfluss auf die Oberflächengüte zu haben.

AlCu4PbMgMn – Innenseite



CuZn39Pb3

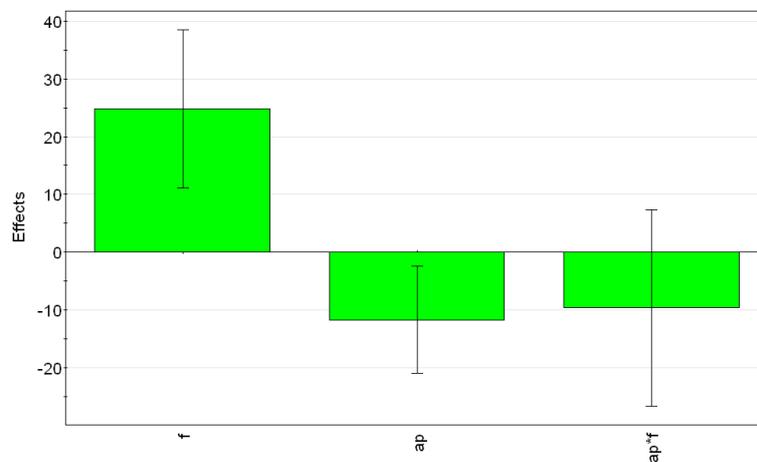
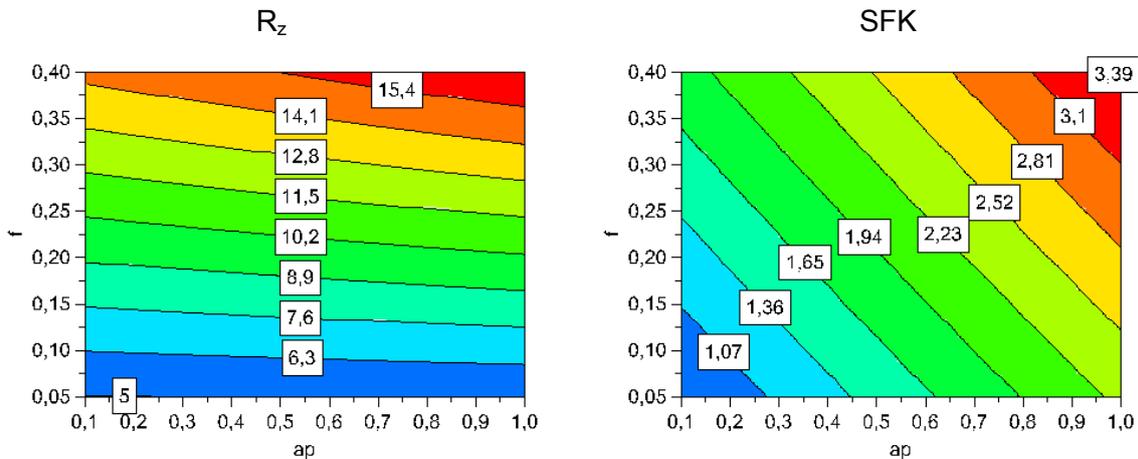
Abbildung 22: Effects Plots für R_z -Drehen

Abbildung 23 stellt die erreichten R_z -Werte und Spanformklassen in f- a_p -Diagrammen dar. Diese wurden für die einzelnen Legierungen für die Schlicht- und Schruppbearbeitung mittels Modde® 7.0 berechnet. Die entsprechenden Abbildungen für die übrigen Legierungen befinden sich im Anhang.

AlCu4PbMgMn – Außenseite



CuZn39Pb3

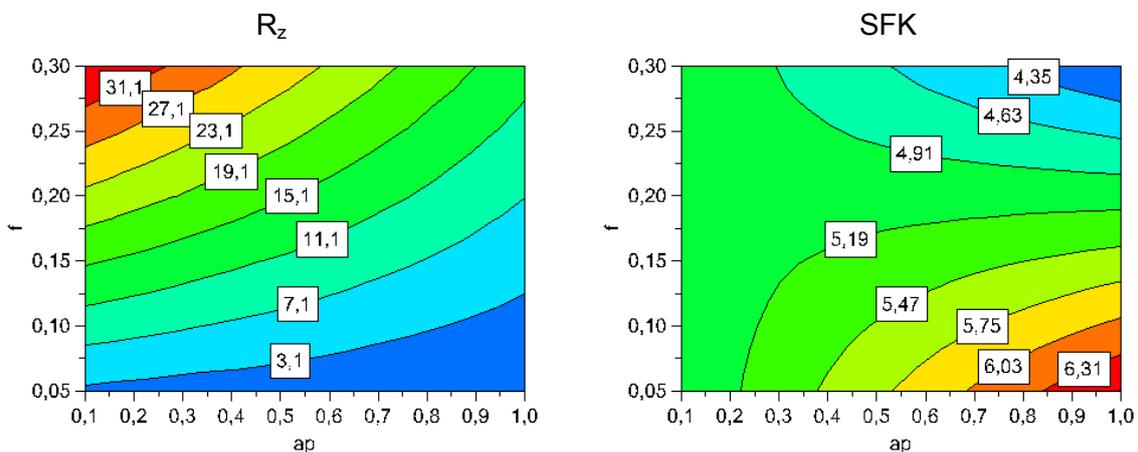


Abbildung 23: Contour Plots: Abhängigkeit der Rautiefe R_z bzw. Spanformklasse SFK von Spantiefe a_p und Vorschub f – Drehen

Auch hier wird der starke Zusammenhang zwischen Vorschub und Rauheit deutlich. Während die Spantiefe kaum Einfluss auf R_z hat, ist ihre Wirkung auf die Spanformklasse sehr unterschiedlich.

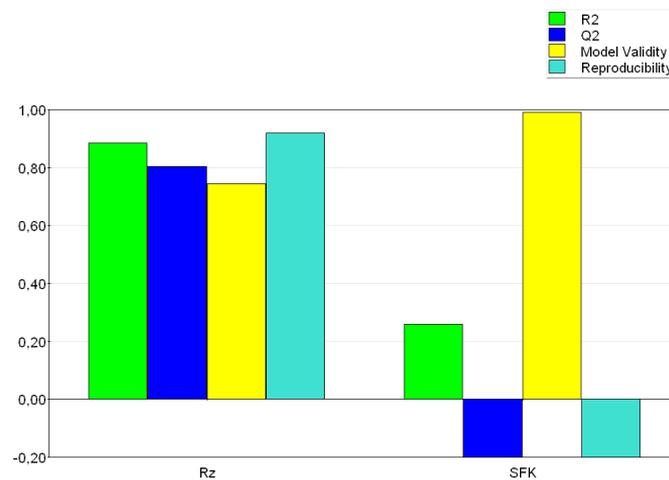
Die statistische Auswertung der Eingangsgrößen Vorschub f und Spantiefe a_p sowie die Messergebnisse der Zielgrößen Spanformklasse SFK und mittlere Rautiefe R_z erfolgte mit der Software Modde® 7.0. Dabei errechnet die Software mittels Regression ein Modell, dessen Übereinstimmung mit den Messdaten die statistischen Größen R^2 und Q^2 beschreiben. Ist das Bestimmtheitsmaß $R^2 > 0,8$ und der Vorhersagbarkeitswert $Q^2 > 0,5$, dann ist die nötige Modellqualität erreicht, um das Modell zu verwenden.

Abbildung 24 zeigt die statistischen Kenngrößen R^2 und Q^2 für die Legierungen AlCu4PbMgMn und CuZn39Pb3 in Form von Balken. Bei ersterer Legierung können durch die größere Zahl an Versuchen auch die Modellvalidität und die Reproduzierbarkeit im Diagramm abgebildet werden. Die entsprechenden Abbildungen für die übrigen Legierungen befinden sich im Anhang.

Anhand dieser Berechnungen der Software hinsichtlich der Rauheitswerte R_z ist auf ein hohes Bestimmtheitsmaß, eine gute Vorhersehbarkeit und damit auf eine ausreichende Modellqualität zu schließen. Bei der Legierung AlCu4PbMgMn erreichen auch die Modellvalidität und die Reproduzierbarkeit günstige Werte.

Die schlechten statistischen Kennzahlen für die Spanformklassen sind hingegen ein klares Zeichen dafür, dass die SFK mit diesem Modell nicht gut genug berechnet werden können.

AlCu4PbMgMn – gesamt



CuZn39Pb3

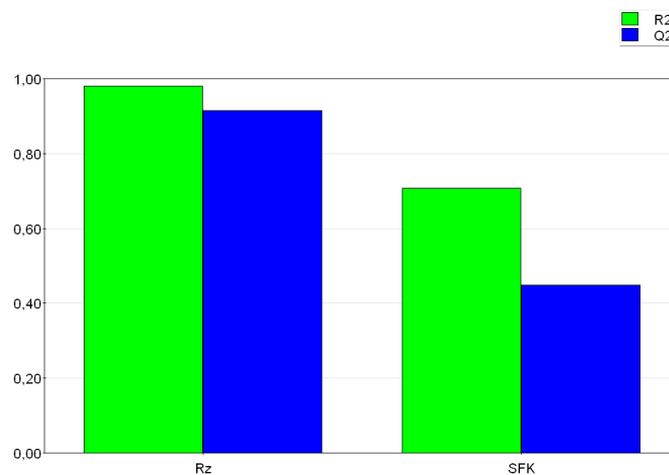


Abbildung 24: Statistische Kenngrößen für AlCu4PbMgMn (oben) bzw. CuZn39Pb3 (unten) – Drehen

4.5 Fräsen

Dieses Kapitel widmet sich dem Plan- und Nutfräsen der einzelnen Legierungen und enthält die dazugehörigen f - a_p -Diagramme.

4.5.1 Planfräsen

Als Werkzeug für das Planfräsen diente der Planfräskopf TCP90-80mm-Al mit 7 PKD-Schneiden von Becker Diamantwerkzeuge. Abbildung 25 und Abbildung 26 zeigen die Spanbilder und die erzielte mittlere Rautiefe R_z in Abhängigkeit des Vorschubes f und der Spantiefe a_p für zwei ausgewählte Legierungen (die übrigen Abbildungen befinden sich im Anhang). Die Schnittgeschwindigkeit ist für die jeweilige Legierung konstant. Die entsprechenden Abbildungen für die übrigen Legierungen befinden sich im Anhang.

Dabei ist die veränderte Form der Späne im Vergleich zum Drehen sehr deutlich, außerdem sind die erreichten Rauheitswerte sehr gut.

Legierung: AlZnMgCu1.5

Schnittgeschwindigkeit: $v_c = 12000 \text{ U/min} = 3000 \text{ m/min}$

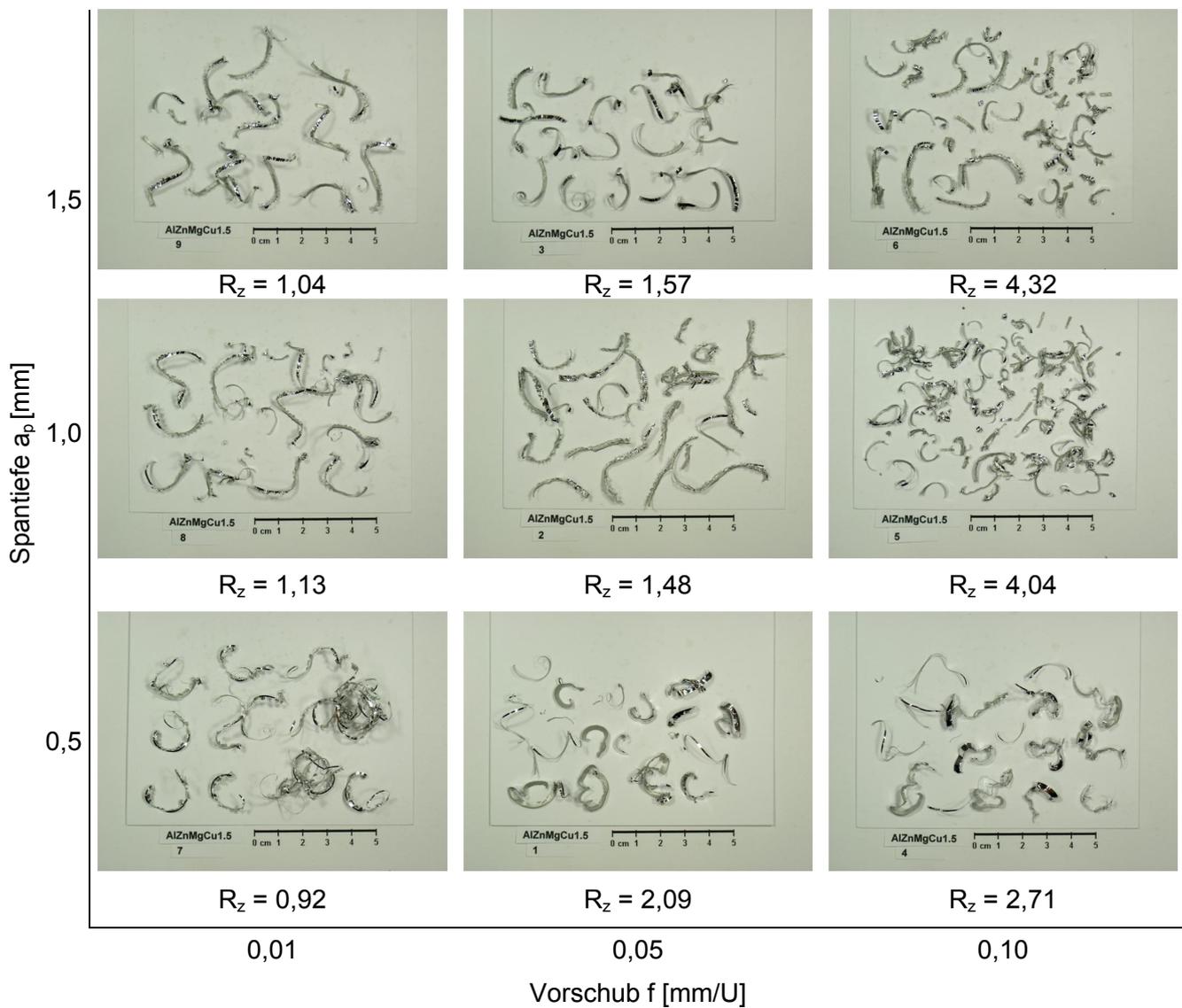
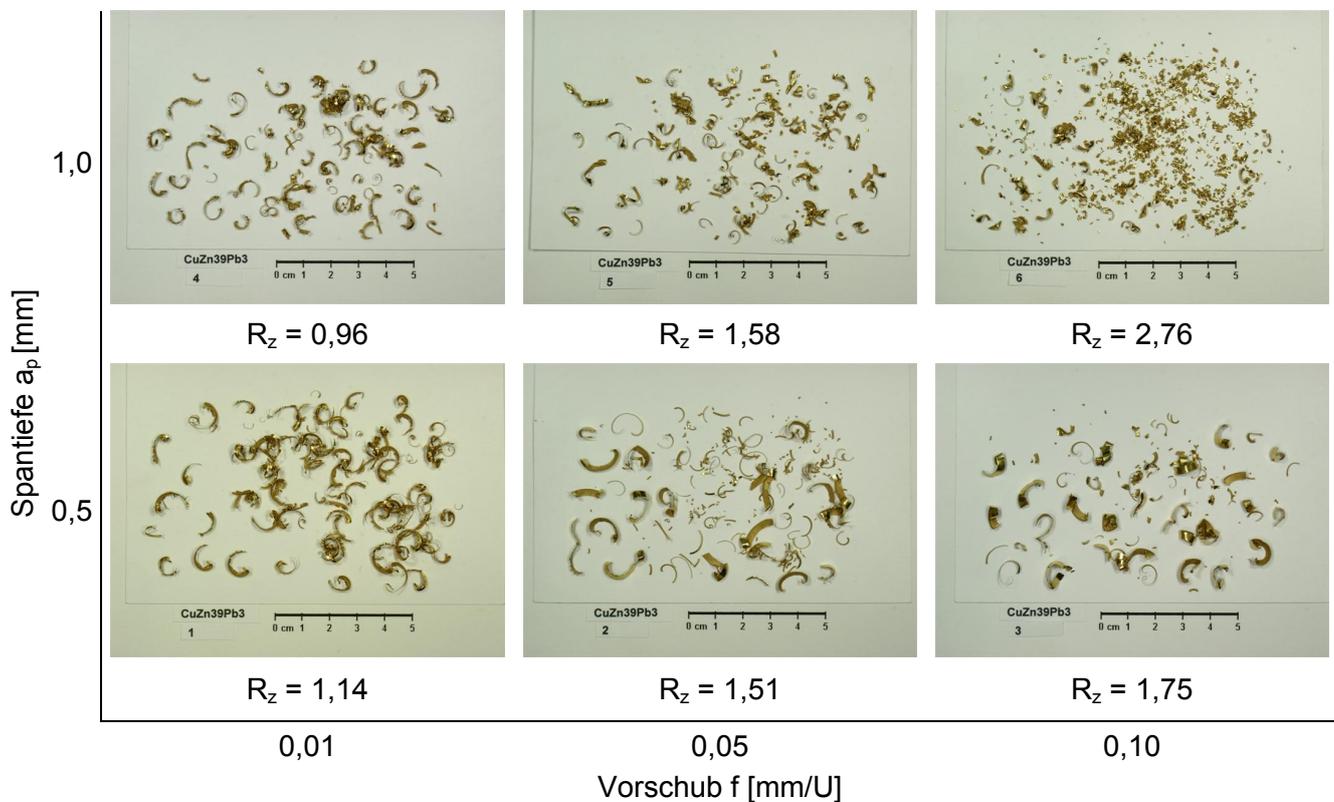
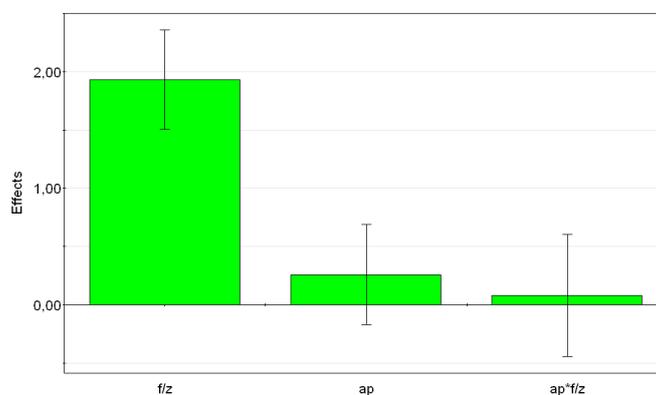


Abbildung 25: Spanformen im f - a_p -Diagramm AlZnMgCu1.5 - Fräsen

Legierung: CuZn39Pb3Schnittgeschwindigkeit: $v_c = 8000 \text{ U/min} = 2000 \text{ m/min}$ Abbildung 26: Spanformen im f - a_p -Diagramm CuZn39Pb3 - Fräsen

Die Abbildung 27 zeigt die mit der Versuchsplanungssoftware Modde® 7.0 erstellten „Effects Plots“ für das Planfräsen. Diese veranschaulichen den Zusammenhang der verschiedenen Parameter (Vorschub f , Spantiefe a_p , Produkt $f \cdot a_p$) mit der gemittelten Rautiefe R_z in Form von Balken. Dabei wird wiederum die Proportionalität des Vorschubs zur Rauheit deutlich, allerdings weniger stark als bei den Drehversuchen. Der Einfluss der Spantiefe ist, wie aus der Abbildung ersichtlich, nicht signifikant. Diese Abbildungen beinhaltet nur die Effects Plots für AlCuPbMg und CuZn39Pb3, wobei die entsprechenden Diagramme für alle anderen Legierungen im Anhang zu finden sind.

AlCuPbMg



CuZn39Pb3

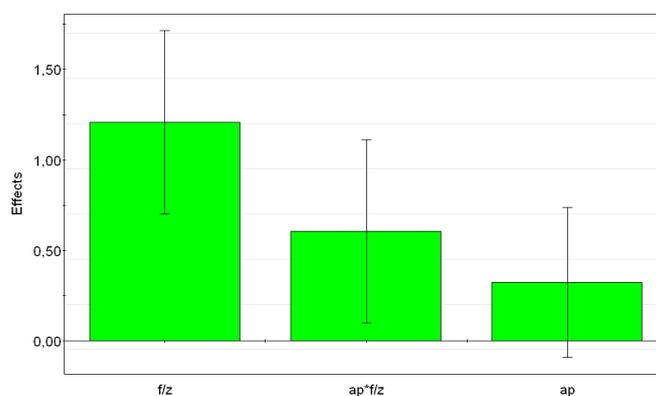
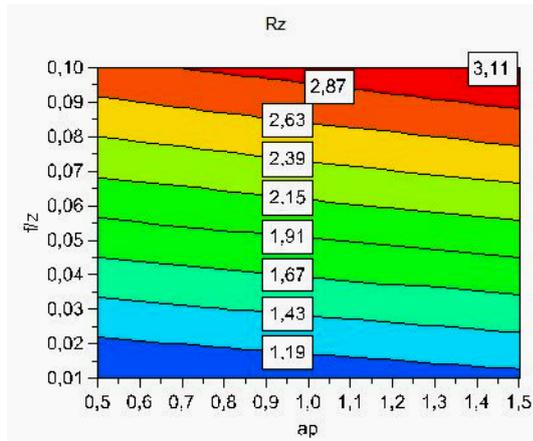


Abbildung 27: Effects Plots für R_z für AlCuPbMg bzw. CuZn39Pb3– Fräsen

Abbildung 28 stellt die erreichten R_z -Werte für die Legierungen AlCuPbMg und CuZn39Pb3 in f- a_p -Diagrammen dar. Diese wurden für die einzelnen Legierungen für das Planfräsen mittels Modde® 7.0 berechnet. Die entsprechenden Abbildungen für die übrigen Legierungen befinden sich im Anhang.

Auch hier kommt der Zusammenhang zwischen Vorschub und Rauheit stark zur Geltung. Die unterschiedlich eingefärbten Rauheitsabstufungen liegen beinahe waagrecht im Diagramm, was bedeutet, dass hauptsächlich die auf der y-Achse aufgetragene Größe, der Vorschub pro Zahn, R_z beeinflusst. Die Spantiefe hat hingegen kaum Einfluss auf R_z , sodass beispielsweise bei steigender Spantiefe keine signifikante Änderung der Rauheitswerte erfolgt.

AlCuPbMg



CuZn39Pb3

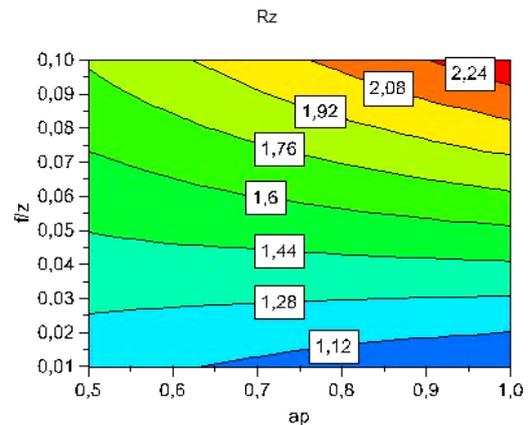
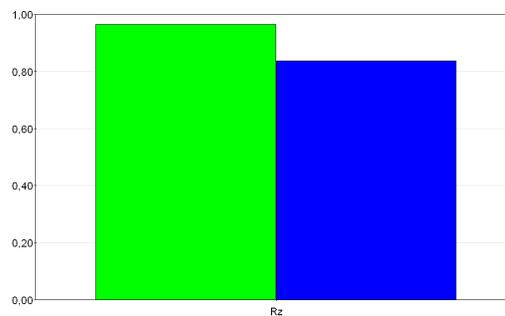


Abbildung 28: Contour Plots: Abhängigkeit der Rautiefe R_z von Spantiefe a_p und Vorschub f_z – Fräsen

Abbildung 29 zeigt die statistischen Kenngrößen R2 und Q2 für die Legierungen AlCuPbMg und CuZn39Pb3 in Form von Balken. Abgesehen von CuSn11Pb2 erfüllen alle Legierungen die Bedingungen ($R2 > 0,8$ und $Q2 > 0,5$) was eine gute Modellqualität bedeutet. Die entsprechenden Abbildungen für die übrigen Legierungen befinden sich im Anhang.

AlCuPbMg



CuZn39Pb3

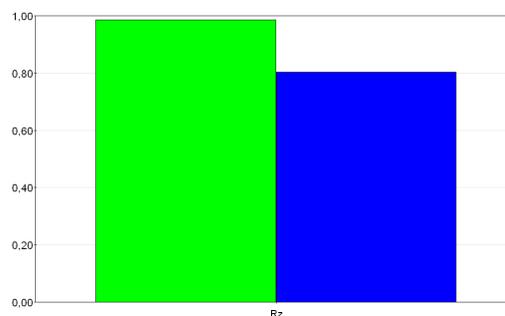


Abbildung 29: Summary Plots: R2 (grün) und Q2 (blau) für AlCuPbMg (oben) und CuZn39Pb3 (unten) – Fräsen

4.5.2 Nutfräsen

Das Fräsen einer Nut wurde, wie in Abbildung 30 dargestellt, an den verschiedenen Werkstoffen durchgeführt. Als Werkzeug diente dabei der CVD-Schafffräser BMC-S10-85-CVD von Becker Diamant.

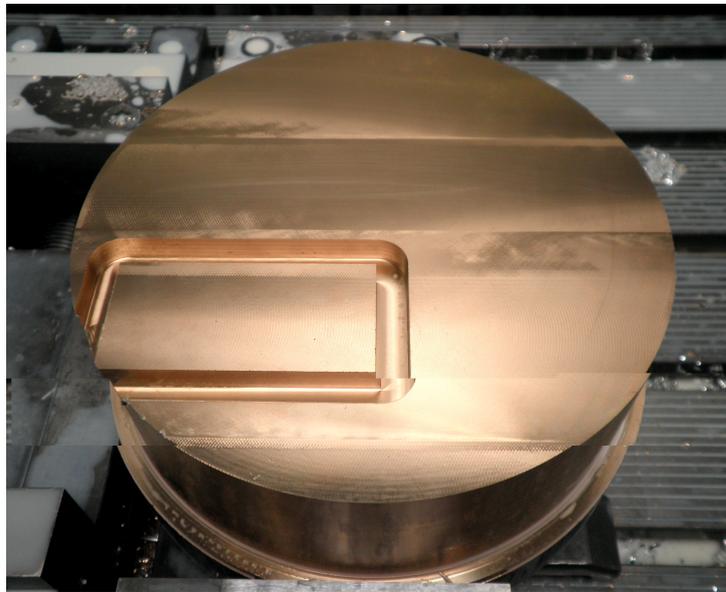


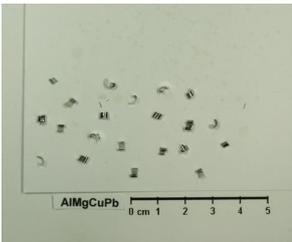
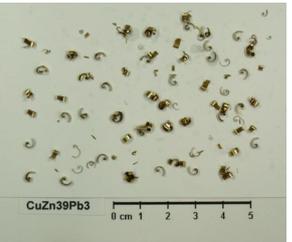
Abbildung 30: gefräste Nut

In Tabelle 12 sind die Spanbilder zusammen mit dem Vorschub f und den Ergebnissen der Zerspanung abgebildet.

Prozessparameter: Schnittgeschwindigkeit: $v_c = 12000$ U/min

Spantiefe: $a_p = 2$ mm

Tabelle 12: Spanformen beim Nutfräsen der verschiedenen Legierungen

AlZnMgCu1.5	AlMgCuPb	CuZn39Pb3	CuSn11Pb2
$f = 0,050$ mm/Zahn	$f = 0,050$ mm/Zahn	$f = 0,025$ mm/Zahn	$f = 0,025$ mm/Zahn
			
$R_z = 1,01$ SFK: 6	$R_z = 1,34$ SFK: 6	$R_z = 1,35$ SFK: 6	$R_z = 1,68$ SFK: 6

4.6 Diskussion der Ergebnisse

Unabhängig von der Legierung zeigt sich ein direkter Zusammenhang zwischen dem Vorschub und der mittleren Rautiefe, weshalb bei hohen Anforderungen an die Oberflächengüte geringe Vorschübe von bis zu 0,1 mm/U empfehlenswert sind.

Die Schnittgeschwindigkeiten sind durchgehend hoch gewählt und betragen beim Drehen der Al-Legierungen bis zu 1100 m/min, sowie bei Messing bis zu 1500 m/min. Die erreichten Rauheitswerte sind dabei umso besser, je geringer der Vorschub eingestellt wird. Der Nachteil der sehr hohen Schnittgeschwindigkeit liegt daher nicht in den erzielten Oberflächenwerten des Werkstückes, sondern in der teilweise extrem hohen Beanspruchung der Werkzeuge, die in Kombination mit hohen Werten für Vorschub und Spantiefe zur Bildung von Aufbauschneiden und im schlimmsten Fall sogar zum Bruch führen kann. Beim Drehen sind daher maximale Schnittgeschwindigkeiten von etwa 800 m/min empfehlenswert.

Um eine günstige Spanform zu erzielen, scheint ein Vorschub von etwa 0,2 mm/U vorteilhaft, da sich kurze Späne bilden. Bei sehr geringen Vorschüben kommt es leichter zur Bildung von Wirrspänen, die zu einer Verschlechterung der Qualität der neu erzeugten Oberfläche führen können.

Die Spantiefe hat beim Drehen vor allem Einfluss auf die Länge der Späne, so hat eine größere Spantiefe kürzere und damit günstigere Späne zur Folge. Die Belastung des Werkzeuges wird dabei aber sehr hoch, sodass sich eine Spantiefe von bis zu 1 mm als Maximalwert ergibt.

Auch beim Planfräsen zeigen sich ähnliche Zusammenhänge. Die Schnittgeschwindigkeiten liegen bei 3000 m/min bei den Al-Legierungen und 2000 m/min bei Messing und Zink, wobei diese Werte sich als unproblematisch bezüglich einer Schädigung des Werkzeuges herausgestellt haben. Auch beim Fräsen wird die Proportionalität des Vorschubs zur Rauheit deutlich, allerdings weniger stark als bei den Drehversuchen. Ein Vorschub pro Zahn von bis zu 0,1 U/min ermöglicht sehr gute Ergebnisse beim Fräsen.

Der Einfluss der Spantiefe ist beim Fräsen hingegen nicht signifikant. Die erreichten Rauheitswerte bewegen sich dabei in einem sehr niedrigen Bereich, es entstanden also durchwegs sehr gute Oberflächen.

Die Ergebnisse beim Nutfräsen mit einem CVD-Werkzeug sind bei allen vier Legierungen sehr gut, wobei R_z im Bereich von 1,0 bis 1,7 liegt. Diese Werte sind vor allem aufgrund der hohen Schnittgeschwindigkeit (12000 U/min) und Spantiefe (2 mm) beachtlich. Die angefallenen Späne sind günstig (SFK 6) da sie sich kurz und fein ablösen, ohne das Werkstück zu zerkratzen.

4.7 Wirtschaftliche Aspekte

Die Stückpreise für Hartmetall- und Diamantschneidplatten liegen weit auseinander. So kostet eine HM-Wendeschneidplatte mit V- oder D-Form etwa 8,50 Euro. Das für dieselbe Anwendung geeignete PKD-Produkt (DCGT 11T304-PDC-S-CB1) weist Kosten von 52,00 Euro, was dem ungefähr 6-fachen Preis des HM-Werkzeuges entspricht.

Noch stärker zeigt sich die Kostendifferenz bei der Gegenüberstellung des verwendeten Diamant-Schaftfräasers (429 Euro/Stück) und einem vergleichbaren HM-Fräser (56 Euro/Stück). Es ergibt sich dabei ein Faktor von fast 8.

Die höheren Stückkosten sind jedoch aufgrund einer deutlich gesteigerten Standzeit durchaus angemessen, da diese durch den Einsatz von Diamantschneiden etwa verzehnfacht wird. Zusätzlich kommt es dabei auch zu einer Zeitersparnis, da der Werkzeug-Wechsel nun weniger oft durchgeführt werden muss.

Des Weiteren hat die größere Schnittgeschwindigkeit, welche aufgrund der Umstellung auf Diamantschneidstoffe möglich ist, eine Zeitersparnis zur Folge. Beim Drehen beträgt diese etwa 10 %. Jede Verringerung des Zeitaufwandes bietet auf weitere Sicht auch ein Potenzial zur Kostensenkung.

Je nach Anwendung ist daher festzustellen, ob die Vorteile des Diamantwerkzeuges entsprechend genutzt werden können. Ist dies der Fall, dann ergeben sich aus der Umstellung von Hartmetall- auf Diamant-Produkte klare wirtschaftliche Vorteile.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Diamantwerkzeuge eignen sich besonders gut für die Zerspanung von Leicht-, Schwer- und Edelmetallen, sowie von Kunststoffen. Bei der spanenden Formung von Eisen- und Stahlwerkstoffen sind sie jedoch aufgrund der Affinität des Eisens zum Kohlenstoff nur unter bestimmten Voraussetzungen einsetzbar.

Die Anwendungsgebiete der monokristallinen Diamantwerkzeuge liegen vorwiegend in der Feinbearbeitung, da sie wegen ihrer kleinen Abmessungen und relativ geringen Biegebruchfestigkeit für große Schnitttiefen und Vorschübe nicht geeignet sind. Ihre Vorteile sind vor allem die hohe Oberflächengüte und Maßgenauigkeit.

Der Einsatz von polykristallinen Werkzeugen reicht von der Fein- bis zur Schruppbearbeitung und ermöglicht es in manchen Fällen Vor- und Endbearbeitung in einem Arbeitsgang zusammenzufassen. PKD hat sich daher vor allem bei der spanabhebenden Fertigung von Aluminium und anderen Nichteisenmetallen als Hochleistungsschneidstoff durchgesetzt. Besondere Bedeutung kommt den PKD-Werkzeugen bei der Zerspanung übereutektischer Al-Si-Legierungen zu, wo sie aufgrund weit höhere Schnittgeschwindigkeiten und Standzeiten den Hartmetallschneiden vorgezogen werden. Neben der hervorragenden Genauigkeit und Oberflächenqualität ist die hohe Fertigungssicherheit ein weiterer Vorteil dieses Schneidstoffes.

Diamant besitzt, bedingt durch seine Härte, eine besonders hohe Verschleißfestigkeit gegen Abrasion, jedoch ist seine Anfälligkeit für Oxidationsverschleiß zu beachten, der oberhalb von 800 °C, beziehungsweise 650 °C bei polykristallinen Diamanten, vorherrscht. Deshalb ist unter anderem während der Zerspanung mit Diamantwerkzeugen eine ausreichende Kühlung der Schneide besonders wichtig.

Die Werkzeughersteller bieten eine Vielzahl von Diamantschneiden mit unterschiedlichsten Geometrien für das Bohren, Fräsen und Drehen an. Die PKD-Produkte und CVD-beschichteten Schneidplatten dominieren dabei die Auswahl.

Die praktischen Versuche mit PKD- und CVD-Werkzeugen haben gezeigt, dass vor allem der Vorschub einen großen Einfluss auf die erzielbare Oberflächengüte hat. Allgemein scheint sich ein größerer Vorschub vorteilhaft auf die Spanform auszuwirken und dabei gleichzeitig die Rauheit stark zu erhöhen.

Von der Einstellung der Spantiefe lässt sich hingegen keine eindeutige Wirkung auf die Oberflächenqualität ableiten. Sie hat jedoch entscheidenden Einfluss auf die Länge der Späne. So zeigen die Spanbilder in den f-ap-Diagrammen, dass eine größere Spantiefe kürzere und damit günstigere Späne zur Folge hat. Gleichzeitig führt sie jedoch auch zu

einer stärkeren Belastung des Werkzeuges, sodass sich Aufbauschneiden bilden und es im Extremfall sogar zum Schneidenbruch kommen kann.

In dieser Studie wurde deutlich, dass Diamantwerkzeuge auch aus wirtschaftlicher Sicht klare Vorteile gegenüber den Hartmetallprodukten bieten. Diese ergeben sich vor allem aus der vielfach höheren Standzeit. Daher rentieren sich Diamantschneidplatten in erster Linie bei großen Produktionsstückzahlen. Sind sowohl der Werkstoff als auch die bearbeitende Maschine für größere Schnittgeschwindigkeiten geeignet, so kann auch dieser Vorzug der Diamantwerkzeuge für eine Zeit- und Kostenersparnis genutzt werden.

Aufbauend auf den Ergebnissen und Schlussfolgerungen dieser Studie sollten weiterführende Zerspanversuche mit einer Variation der Schnittgeschwindigkeit durchgeführt werden, um den Einfluss dieser Größe auf die Spanform und Oberflächenqualität des Werkstückes sowie auf die Werkzeugstandzeit zu ermitteln. Auch die Durchführung dieser Versuche an weiteren Werkstoffgruppen, wie etwa Al-Si-Legierungen, wäre eine wichtige Ergänzung dieser Arbeit.

Da sich Diamantwerkzeuge auch hervorragend für das Glanzdrehen eignen, ist eine ähnlich Untersuchung mit dem Ziel, spiegelnde, dekorative Oberflächen mit minimaler Rauheit herzustellen, ein interessantes Thema zur Erweiterung dieses Projektes. Neben Al- und Cu-Legierungen würden sich auch Gold, Silber, Platin und manche Kunststoffe für Glanzdrehversuche anbieten.

Gegenstand weiterer Untersuchungen könnte ebenfalls eine Reduzierung des Kühl- und Schmiermittelverbrauchs sein. Dies hätte neben dem positiven Umweltaspekt möglicherweise auch eine Kostenersparnis zur Folge.

Außerdem wäre eine längerfristige Dokumentation der erreichbaren Werkzeugstandzeiten in der Serienproduktion von Bauteilen sinnvoll, um genauere Aussagen über die Wirtschaftlichkeit der Investition in Diamantschneidplatten treffen zu können.

6 Literatur

- [1] Paucksch, E., et al.: Zerspantechnik - Prozesse, Werkzeuge, Technologien. 12. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden 2008.
- [2] Klocke, F. und W. König: Fertigungsverfahren 1 – Drehen, Fräsen, Bohren. 8. Auflage, Springer Verlag, New York, 2008.
- [3] Winkel am Schneidkeil. Online im Internet: http://www.bs-iki.de/mediawiki/index.php/Trennen_von_Werkstoffen#Keilschneiden, Stand: 21.02.2008, Abruf: 09.01.2011.
- [4] Tschätsch, H. und J. Dietrich: Praxis der Zerspantechnik – Verfahren, Werkzeuge, Berechnung. 9. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden 2008.
- [5] Jäger, K. und D. Schöpf: In Time: Rationalization on Assembly Lines by PKD-High Speed Tools. Ind.-Anz. 111 (1989), 50-52.
- [6] Fraunhofer Institut: CVD-Diamantabscheidung. Online im Internet: <http://www.cvd-diamant-werkzeuge.de/cvd-diamantabscheidung.php>, Stand: 2008, Abruf: 17.05.2011.
- [7] Anonym: Hard, harder, CBN, Diamond. Werkstatt und Betrieb 138 (2005), 83-85.
- [8] Online im Internet: <http://www.zerspantungstechnik.at/news/zerspantungswerkzeuge-allgemein/pkd-werkzeuge/>, Stand: 04.05.2009, Abruf: 09.01.2011.
- [9] König, W. und K. Gerschwiler: Turning of GK-AISi17Cu4FeMg by Polycrystalline Diamond Tools With Intermittent Cutting at Elevated Cutting Speeds. Giesserei. 69 (1982), 10-13.
- [10] Degner, W., et al.: Spanende Formung: Theorie, Berechnung, Richtwerte. 15. Auflage, Hanser Verlag, München 2002.
- [11] Schönherr, H.: Spanende Fertigung. Odenbourg Wissenschaftsverlag, München 2002.
- [12] Sundwiger Drehtechnik GmbH: Glanzdrehen. Online im Internet: <http://www.sundwiger.de/glanz-drehen.php>, Abruf: 09.05.2011
- [13] Paul Horn GmbH: World of Tools. Online im Internet: http://www.phorn.de/en/nc/company/press-releases/viewmode/presse_33/pointer/4/, Abruf: 17.05.2011.
- [14] Kugler GmbH: Laseroptik und Systemkomponenten. Online im Internet: <http://www.kugler-precision.com/>, Abruf: 09.01.2011.
- [15] Kugler GmbH: Mikrobearbeitung und Optik; Online im Internet: <http://www.kugler-precision.com/>, Abruf: 09.01.2011.

-
- [16] Hoffmann J.: Polykristalline Diamantwerkzeuge in der Aluminiumbearbeitung. In.-Anz. 110 (1988), 29-30.
- [17] Lane, B. M., et al.: Diamond tool wear when machining Al6061 and 1215 steel. Wear 268 (2010), 11-12.
- [18] Itoigawa, F., et al.: Effects and mechanisms in minimal quantity lubrication machining of an aluminum alloy. Wear 260 (2006), 339-344.
- [19] Fuchshofer, H.: Zur Verfügung gestellte Daten und Bilder. Fuchshofer GmbH, Eibiswald 2011.
- [20] WNT Deutschland GmbH: Diamantwendeschnidplatten mit Spanbrecher. Online im Internet: www.wnt.com/download/2009-01_DE_standard_52-111.pdf, Abruf: 17.05.2011.
- [21] Becker Diamantwerkzeuge GmbH. Online im Internet: <http://www.beckerdiamant.de/produkte/drehen.html>, Abruf: 09.01.2011.
- [22] MatWeb Material Properties Data. Online im Internet: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=0d6a6689bd3b408e957338fca26ef353>, Abruf: 09.05.2011.
- [23] MatWeb Material Properties Data. Online im Internet: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=da98aea5e9de44138a7d28782f60a836>, Abruf: 09.05.2011.
- [24] Deutsches Kupferinstitut: Werkstoff Datenblatt CuSn11Pb2. Online im Internet: http://www.kupfer-institut.de/front_frame/pdf/CuSn11Pb2-C.pdf, Stand: 2005, Abruf: 09.05.2011.
- [25] Deutsches Kupferinstitut: Werkstoff Datenblatt CuZn39Pb3. Online im Internet: http://www.kupfer-institut.de/front_frame/pdf/CuZn39Pb3.pdf, Stand: 2005, Abruf: 09.05.2011.
- [26] Petzow G.: Metallographisches Ätzen. 5. Auflage, Borntraeger Verlag, Berlin 1976.
- [27] Mondolfo L. F.: Aluminium alloys structure and properties. Butterworths London 1976.
- [28] aluMATTER. Online im Internet: <http://aluminium.matter.org.uk/content/html/ger/default.asp?catid=70&pageid=1894099225>, Abruf: 13.2.2012.
- [29] Tönshoff, H. K. und B. Denkena: Spanen: Grundlagen. 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg 2004
- [30] Koch, S.: Untersuchung von bleifreien Aluminium-Automatenlegierungen. Dissertation, Montanuniversität Leoben 2010.

-
- [31] Jakob Lach GmbH & Co. KG: Spanende Diamant- und CBN-Werkzeuge – Drehen – Bohren – Fräsen. Online im Internet: <http://www.lach-diamant.de/>, Abruf: 09.01.2011.
- [32] Mapal Dr. Kress KG. Online im Internet: <http://www.mapal.com/produkte/produktgruppen/pkd-werkzeuge/>, Abruf: 09.01.2011.
- [33] Sumitomo Electric Carbide, Inc. Materials Group. Online im Internet: <http://www.sumicarbide.com/materialsgroup/diada.htm>, Abruf: 09.01.2011.
- [34] AB Sandvik Coromant. Online im Internet: <http://www.sandvik.coromant.com>, Stand: 06.10.2010, Abruf: 09.01.2011.
- [35] Kennametal AMSG GmbH; Online im Internet: <http://www.kennametal.com/en-US/home.jhtml>, Abruf: 09.01.2011.
- [36] Mitsubishi Materials Corporation. Online im Internet: <http://www.mitsubishicarbide.com/EU/West/product/catalog/catalog.html>, Abruf: 09.01.2011.
- [37] Walter AG. Online im Internet: <http://www.walter-tools.com/>, Abruf: 09.01.2011.
- [38] Ceratizit Austria GmbH. Online im Internet: <http://www.ceratizit.com>. Abruf: 09.01.2011.

7 Abkürzungsverzeichnis

Al	Aluminium
a _p	Spantiefe
Bi	Wismut
BN	Bornitrid
bzw.	beziehungsweise
°C	Grad Celsius
Cr	Chrom
Cu	Kupfer
CVD	Chemical Vapour Deposition
f	Vorschub
Fe	Eisen
g	Gramm
GPa	Gigapascal
Gew.-%	Gewichtsprozent
HM	Hartmetall
HSS	Schnellarbeitsstahl
kg	Kilogramm
km	Kilometer
Mg	Magnesium
MKD	Monokristalliner Diamant
ml	Milliliter
mm	Millimeter
MMS	Minimalmengenschmierung
MPa	Megapascal
Mn	Mangan
µm	Mikrometer
N	Stickstoff
Ni	Nickel
Pb	Blei
PKD	Polykristalliner Diamant
PVD	Physical Vapour Deposition
R _z	mittlere Rautiefe
SFK	Spanformklasse
Si	Silizium

Sn	Zinn
Ti	Titan
u. a.	unter anderem
U/min	Umdrehungen pro Minute
v_c	Schnittgeschwindigkeit
z. B.	zum Beispiel
Zn	Zink

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Darstellung der Spanungsbewegung ^[1]	5
Abbildung 2: Flächen- und Winkelbezeichnungen ^[3]	6
Abbildung 3: Abhängigkeit der Spanflächenbeanspruchung vom Spanwinkel γ ^[1]	7
Abbildung 4: Abhängigkeit der spezifischen Schnittkraft k_c vom Spanwinkel γ ^[1]	8
Abbildung 5: Position der Hauptschneide zum Werkstück ^[1]	8
Abbildung 6: Gegenüberstellung verschiedener Schneidstoffe sowie deren Eigenschaften ^[2] 9	
Abbildung 7: Darstellung der Hauptanwendungsgruppen von Schneidstoffen ^[2]	10
Abbildung 8: Werkzeug mit einer Schneidkante ^[2]	12
Abbildung 9: Werkzeuge mit Rund- und Facettenanschliff ^[2]	12
Abbildung 10: Prinzipskizze des CVD-Verfahrens ^[1]	15
Abbildung 11: Darstellung des Freiflächenverschleißes ^[1]	23
Abbildung 12: Darstellung des Kolkverschleißes ^[1]	23
Abbildung 13: Darstellung von verschiedenen Verschleißformen ^[1]	24
Abbildung 14: Gefügebild der m5-geätzten AlCuPbMg-Probe 200-fache Vergrößerung.....	35
Abbildung 15: Gefügebild der m5-geätzten AlCuPbMg-Probe 1000-fache Vergrößerung....	35
Abbildung 16: Gefügebild der OPS-poliereten CuSn11Pb2-Probe 200-fache Vergrößerung .	36
Abbildung 17: Gefügebild der mikrogeätzten CuSn11Pb2-Probe 200-fache Vergrößerung .	36
Abbildung 18: Gefügebild der makrogeätzten CuSn11Pb2-Probe 200-fache Vergrößerung	36
Abbildung 19: Spanformen im f-ap-Diagramm AlCu4PbMgMn – Innenseite	39
Abbildung 20: Spanformen im f-ap-Diagramm CuZn39Pb3 – Schruppen	40
Abbildung 21: Spanformen im f-ap-Diagramm CuZn39Pb3 – Schichten.....	40
Abbildung 22: Effects Plots für R_z - Drehen.....	42
Abbildung 23: Contour Plots: Abhängigkeit der Rautiefe R_z bzw. Spanformklasse SFK von Spantiefe ap und Vorschub f – Drehen.....	43
Abbildung 24: Statistische Kenngrößen für AlCu4PbMgMn (oben) bzw. CuZn39Pb3 (unten) – Drehen	44
Abbildung 25: Spanformen im f-ap-Diagramm AlZnMgCu1.5 - Fräsen	46
Abbildung 26: Spanformen im f-ap-Diagramm CuZn39Pb3 - Fräsen.....	47
Abbildung 27: Effects Plots für R_z für AlCuPbMg bzw. CuZn39Pb3– Fräsen	48
Abbildung 28: Contour Plots: Abhängigkeit der Rautiefe R_z von Spantiefe a_p und Vorschub f – Fräsen.....	49
Abbildung 29: Summary Plots: R_2 (grün) und Q_2 (blau) für AlCuPbMg (oben) und CuZn39Pb3 (unten) – Fräsen.....	49
Abbildung 30: gefräste Nut.....	50

Abbildung 31: Gefügebild der ungeätzten AlCu4PbMgMn-Probe	69
Abbildung 32: Gefügebild der m3-geätzten AlCu4PbMgMn-Probe	69
Abbildung 33: Gefügebild der m3-geätzten AlCu4PbMgMn-Probe	70
Abbildung 34: Gefügebild der m5-geätzten AlZnMgCu1.5-Probe	70
Abbildung 35: Gefügebild der m5-geätzten AlZnMgCu1.5-Probe	70
Abbildung 36: Gefügebild der OPS-poliereten CuSn11Pb2-Probe	71
Abbildung 37: Gefügebild der OPS-poliereten CuSn11Pb2-Probe	71
Abbildung 38: Gefügebild der mikrogeätzten CuSn11Pb2-Probe	71
Abbildung 39: Gefügebild der mikrogeätzten CuSn11Pb2-Probe	72
Abbildung 40: Gefügebild der mikrogeätzten CuSn11Pb2-Probe	72
<i>Abbildung 41: Gefügebild der makrogeätzten CuSn11Pb2-Probe</i>	<i>72</i>
Abbildung 42: Gefügebild der makrogeätzten CuSn11Pb2-Probe	73
Abbildung 43: Gefügebild der makrogeätzten CuSn11Pb2-Probe	73
Abbildung 44: Gefügebild der OPS-poliereten CuZn39Pb3-Probe.....	74
Abbildung 45: Gefügebild der OPS-poliereten CuZn39Pb3-Probe.....	74
Abbildung 46: Gefügebild der mikrogeätzten CuZn39Pb3-Probe.....	74
Abbildung 47: Gefügebild der mikrogeätzten CuZn39Pb3-Probe.....	75
Abbildung 48: Gefügebild der mikrogeätzten CuZn39Pb3-Probe.....	75
Abbildung 49: Gefügebild der mikrogeätzten CuZn39Pb3-Probe.....	75
Abbildung 50: Gefügebild der makrogeätzten CuZn39Pb3-Probe	76
Abbildung 51: Gefügebild der makrogeätzten CuZn39Pb3-Probe	76
Abbildung 52: Gefügebild der makrogeätzten CuZn39Pb3-Probe	76
Abbildung 53: Spanformen im f-ap-Diagramm AlCu4PbMgMn – Außenseite	78
Abbildung 54: Spanformen im f-ap-Diagramm AlCuPbMg – Schuppen	79
Abbildung 55: Spanformen im f-ap-Diagramm AlCuPbMg – Schichten.....	79
Abbildung 56: Spanformen im f-ap-Diagramm AlZnMgCu1.5 – Schuppen	80
Abbildung 57: Spanformen im f-ap-Diagramm AlZnMgCu1.5 – Schichten	80
Abbildung 58: Spanformen im f-ap-Diagramm CuSn11Pb2 – Schuppen.....	81
Abbildung 59: Spanformen im f-ap-Diagramm CuSn11Pb2 – Schichten.....	81
Abbildung 60: Effects Plots für R_z	82
Abbildung 61: Contour Plots: Abhängigkeit der Rautiefe R_z bzw. Spanformklasse SFK von Spantiefe a_p und Vorschub f	84
Abbildung 62: Statistische Kenngrößen: R_2 (grün) und Q_2 (blau) für AlCu4PbMgMn beim Drehen an der Außenseite (oben) bzw. Innenseite (unten).....	85
Abbildung 63: Spanformen im f-ap-Diagramm AlCuPbMg	87
Abbildung 64: Spanformen im f-ap-Diagramm CuSn11Pb2.....	88
Abbildung 65: Effects Plots für R_z für AlCuPbMg, AlZnMgCu1.5 und CuSn11Pb2.....	90

Abbildung 66: Contour Plots: Abhängigkeit der Rautiefe R_z von Spantiefe a_p und Vorschub f
– Fräsen.....91

Abbildung 67: Statistische Kenngrößen R_2 (grün) und Q_2 (blau) für AlZnMgCu1.5 und
CuSn11Pb2 – Fräsen.....92

9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einsatzbedingungen für PKD-Schneiden beim Drehen ^[1]	19
Tabelle 2: Prozessparameter beim Feindreihen mit Diamantwerkzeugen ^[9]	19
Tabelle 3: Zerspan-Parameter bei den Werkstoffen Al (6061) und Stahl (1215) ^[17]	25
Tabelle 4: MMS und Trockenbearbeitung bei Aluminiumlegierungen ^[2]	27
Tabelle 5: MMS und Trockenbearbeitung verschiedener Werkstoffe ^[1]	28
Tabelle 6: Verwendete Maschinen ^[19]	29
Tabelle 7: Verwendete Zerspanwerkzeuge.....	30
Tabelle 8: Chemische Zusammensetzung der untersuchten Legierungen (in Gew.-%)	33
Tabelle 9: Legierungsnormen von Aluminiumlegierungen (Angaben in Gew.-%) ^{[22] [23]}	33
Tabelle 10: Legierungsnormen der Bronze und des Messings (Angaben in Gew.-%) ^{[24] [25]}	33
Tabelle 11: Darstellung der Spanformklassen ^[30]	37
Tabelle 12: Spanformen beim Nutfräsen der verschiedenen Legierungen.....	50
Tabelle 13: Prozessparameter für PKD-Drehwerkzeuge ^[25]	64
Tabelle 14: Prozessparameter für dia-compact – Monoblock-Diamant-Fräser ^[25]	65
Tabelle 15: Schnittdatenempfehlung ^[32]	66
Tabelle 16: Diamantschneidstoffe von Sumitomo ^[33]	66
Tabelle 17: Schnittdaten für das Glanzdrehen ^[13]	67

10 Anhang

10.1 Hersteller von Diamantwerkzeugen

Dieses Kapitel beinhaltet eine Marktrecherche, die einen Überblick der angebotenen Werkzeuge verschiedener Hersteller sowie der empfohlenen technischen Daten geben soll.

10.1.1 Lach-Diamant

Lach-Diamant bietet Naturdiamanten sowie synthetische MKD- und PKD-Werkzeuge an. Ihre Produktpalette umfasst unter anderem folgende Diamantwerkzeuge: ^[25]

- PKD-Schneidplatten/Schneidfräsplatten
- PKD-Schneidplatten mit Spanbrecher für einen kontrollierten Spanbruch von Aluminium
- PKD-Drehwerkzeuge zum Außendrehen/Einstecken/Innendrehen
- PKD-Kollektordrehwerkzeuge
- PKD-Schaftfräser
- Monoblock-Diamant-Planfräser/Planeckfräser
- PKD-Spiralbohrer/Stufenbohrer

Die Richtlinien für den Einsatz sind in Tabelle 13 und Tabelle 14 angeführt.

Tabelle 13: Prozessparameter für PKD-Drehwerkzeuge ^[25]

Werkstoff	V_c m/min	Vorschub f mm/U	Spantiefe a_p mm
Aluminiumlegierungen unter 3 % Si	200 – 2000	0,05 – 0,4	Bis zur ganzen Diamant- Schneide
Aluminiumlegierungen bis zu 12 % Si	150 – 1000	0,05 – 0,4	
Aluminiumlegierungen bis ca. 21 % Si	100 – 800	0,05 – 0,4	
Messing-, Magnesium- und Zinklegierungen	200 – 2000	0,05 – 0,4	
Kupfer-, Bronze- und Bleilegierungen	200 – 1000	0,05 – 0,4	

Tabelle 14: Prozessparameter für dia-compact – Monoblock-Diamant-Fräser^[25]

Werkstoff	V_c m/min	Vorschub f mm/U	Spantiefe a_p mm
Aluminiumlegierungen unter 3 % Si	bis 7000	bis 0,25	bis 6,0
Aluminiumlegierungen bis zu 12 % Si	bis 4000	bis 0,20	bis 6,0
Aluminiumlegierungen bis ca. 21 % Si	bis 1500	bis 0,20	bis 5,0
Messing- und Kupferlegierungen	bis 4000	bis 0,20	bis 6,0

Für unterbrochenen Schnitt müssen die Schnittdaten halbiert werden. Intensive Kühlung mit KSS oder MMKS verbessert die Schnittleistung.^[25]

10.1.2 Becker-Diamantwerkzeuge

Die Becker Diamantwerkzeuge GmbH vertreibt Präzisions-Zerspanwerkzeuge aus ultraharten Schneidstoffen. Im Folgenden ist eine Auswahl der Produkte angeführt:^[21]

- ISO Wendeschneidplatten bestückt mit Naturdiamant zum Glanzdrehen
- ISO Wendeschneidplatte bestückt mit PKD zum Drehen von Al-Legierungen
- ISO Wendeschneidplatten mit Naturdiamant zum Hartfräsen
- ISO Wendeschneidplatten bestückt mit PKD zum Hartfräsen

10.1.3 MAPAL Dr. Kress KG

Das Programm der PKD-Produktlinie von Mapal umfasst:^[32]

- Präzisionsaufbohrwerkzeuge
- Zirkularfräswerkzeuge
- Schafffräser
- Wendeschneidplatten und
- ein Planfräskopfsystem mit austauschbaren Fräseinsätzen

Speziell für langspanende Materialien, wie etwa Al-Legierungen mit niedrigem Si-Gehalt, bietet Mapal Schneiden mit Spanbrecherstrukturen. Es sind standardmäßig zwei Strukturen verfügbar, wobei jeweils eine spezielle Struktur für den kontrollierten Spanbruch bei der Feinbearbeitung und für die Bearbeitung mit höherer Schnitttiefe vorliegt. Die Späne werden gestaucht und gebrochen, ohne die Struktur zu verkleben und ohne Aufbauschneiden zu bilden.^[32]

Tabelle 15 enthält die von Mapal empfohlenen Schnittgeschwindigkeiten für die Bearbeitung mit Wendeschneidplatten.

Tabelle 15: Schnittdatenempfehlung ^[32]

Werkstoff	V _c
	m/min
Al-Legierungen mit bis zu 12 % Si	800 – 3000
Al-Legierungen mit über 12 % Si	500 – 1800
Kupfer und Kupferlegierungen	500 – 1500
Messing	500 – 1500
Bronze	200 – 500

10.1.4 Sumitomo

Sumitomo stellt PKD-Schneiden aus synthetischem Diamanten auf Wolframcarbidsubstrat her. Die PKD-Werkzeuge eignen sich für die spanabhebende Formung von NE-Metallen wie Aluminium, Kupfer, Al/Grauguss-Verbundwerkstoffe, Kunststoffe, Glasfasern und Holz. Die sogenannten SumiDIA-DA-Schneiden sind in drei Abstufungen der Korngröße (siehe Tabelle 16) sowie in vielen verschiedenen Formen und Größen erhältlich. ^[33]

Tabelle 16: Diamantschneidstoffe von Sumitomo ^[33]

Bezeichnung	DA90	DA150	DA200	DA2200
Durchschnittliche Korngröße in µm	50	5	0.5	0.5
Vickershärte	10.000 – 12.000	10.000 – 12.000	8.000 – 10.000	9.000 – 10.000
Bruchdurchbiegung (kg/mm ²)	110	200	220	250

10.1.5 Sandvik

Sandvik bietet speziell für die spanabhebende Fertigung von NE-Metallen die folgenden zwei Werkzeugtypen der Gruppe CoroTurn:^[34]

- CD10: diamantbestücktes Werkzeug für hervorragende Standzeit, optimal geeignet für die Endbearbeitung
- CD1810: diamantbeschichtete Karbide für effektive Spanführung, bevorzugt verwendet für die mittelgrobe Zerspanung

10.1.6 Paul Horn GmbH

Die Paul Horn GmbH hat, in Kooperation mit der Firma H10, ihr Angebot um Diamantwerkzeuge für das Glanzdrehen erweitert. Die empfohlenen Schnittdaten sind in Tabelle 17 angeführt.

Tabelle 17: Schnittdaten für das Glanzdrehen ^[13]

Werkstoff	v_c	f	a_p
	m/min	mm/U	mm
Aluminium	200 – 400	0,02 – 0,10	0,02 – 0,05
Kupfer	150 – 300	0,02 – 0,10	0,02 – 0,05
Bronze	150 – 250	0,05 – 0,10	0,02 – 0,05
Messing	150 – 250	0,05 – 0,10	0,02 – 0,05
Silber	200 – 250	0,05 – 0,06	0,02 – 0,05
Gold	200 – 250	0,05 – 0,06	0,02 – 0,05

10.1.7 Weitere Hersteller

Kennametal bietet PKD-Werkzeuge zum Bohren, Drehen, Drehräumen, Fräsen sowie zum Gewindeschneiden bzw. –bohren ^[35].

Mitsubishi hat PKD-Werkzeuge verschiedener Geometrien und Größen im Sortiment ^[36].

Walter AG bietet PKD-Werkzeuge ^[37].

Ceratizit bietet PKD-Werkzeuge mit der Produktbezeichnung MaxiMill HPC/HSV.

Diese enthalten eine integrierte Kühlmittelzufuhr mit Direktführung durch Spindel und Werkzeug. Der Kühlmittelstrahl richtet sich dabei direkt auf die Schneide. Im Vordergrund steht dabei mehr das Spülen des Werkstückes und nicht das Kühlen (geeignet für Minimalmengenschmierung).^[38]

10.2 Gefügebilder der verwendeten Legierungen

Abbildung 31 bis Abbildung 52 zeigen Schliiffbilder von Proben der eingesetzten Legierungen. Nach dem Schleifen und Polieren wurden teilweise Ätzungen durchgeführt, diese sind in den Bildunterschriften vermerkt.

Legierung AlCu4PbMgMn:

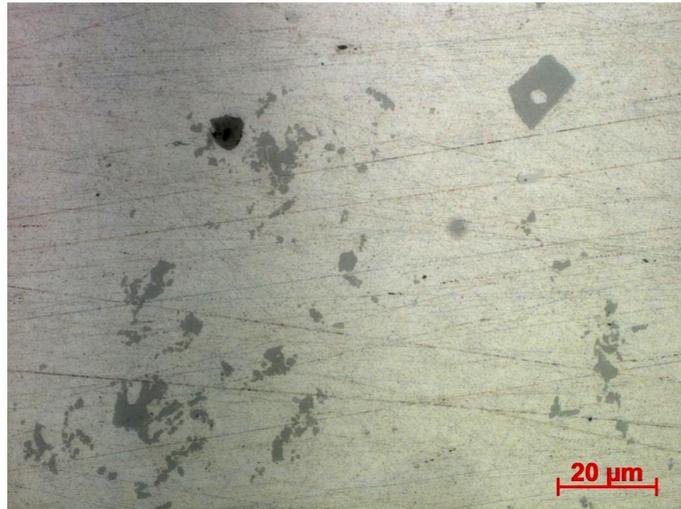


Abbildung 31: Gefügebild der ungeätzten AlCu4PbMgMn-Probe

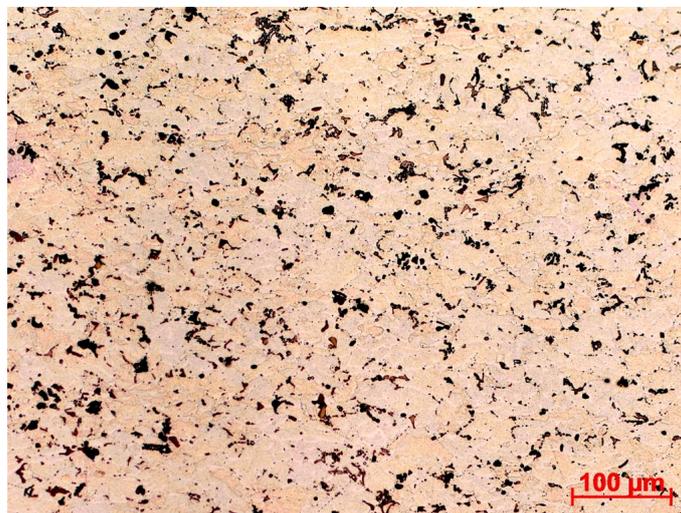


Abbildung 32: Gefügebild der m3-geätzten AlCu4PbMgMn-Probe

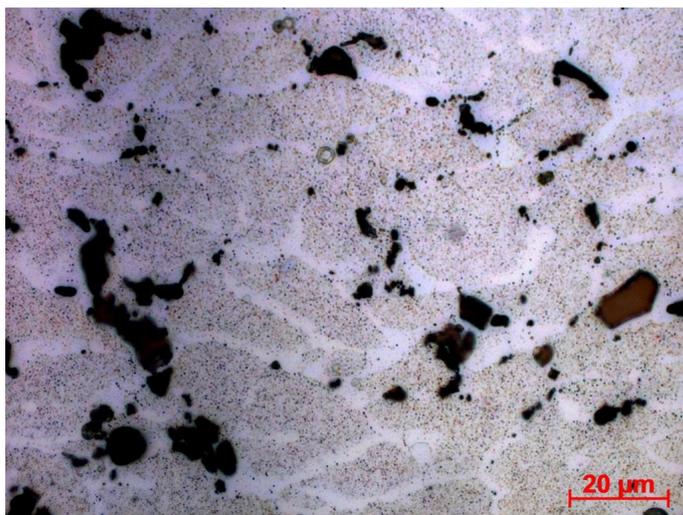


Abbildung 33: Gefügebild der m3-geätzten AlCu4PbMgMn-Probe

Legierung AlZnMgCu1.5:

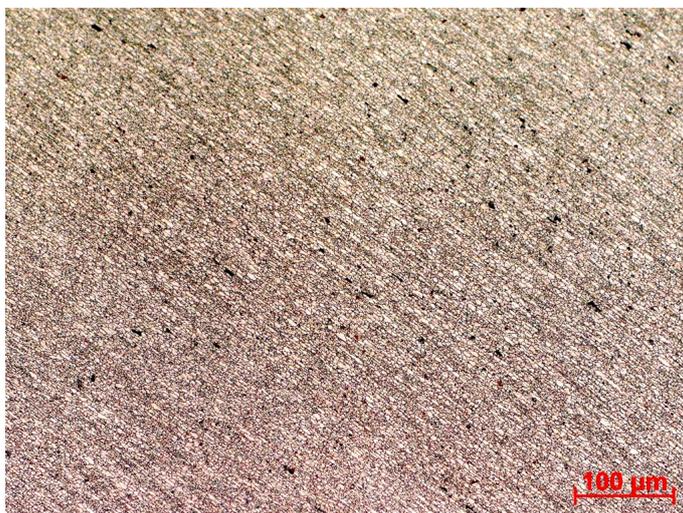


Abbildung 34: Gefügebild der m5-geätzten AlZnMgCu1.5-Probe

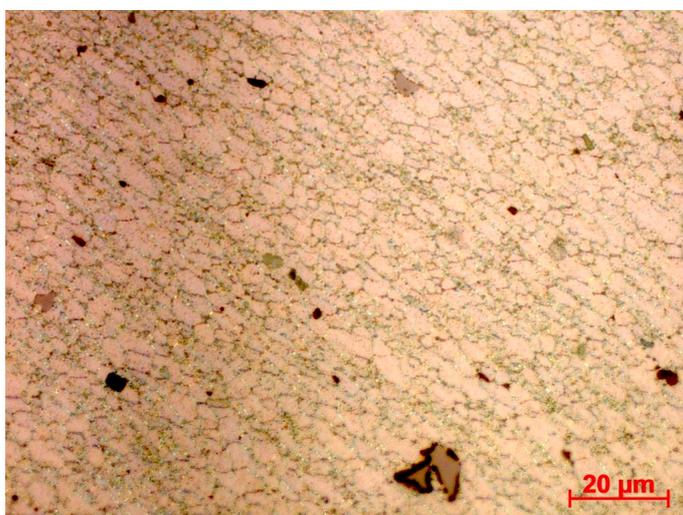


Abbildung 35: Gefügebild der m5-geätzten AlZnMgCu1.5-Probe

Legierung CuSn11Pb2:

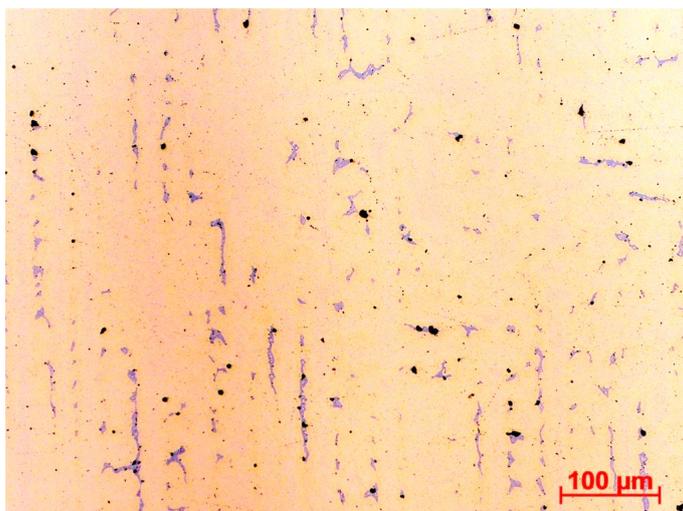


Abbildung 36: Gefügebild der OPS-polierten CuSn11Pb2-Probe

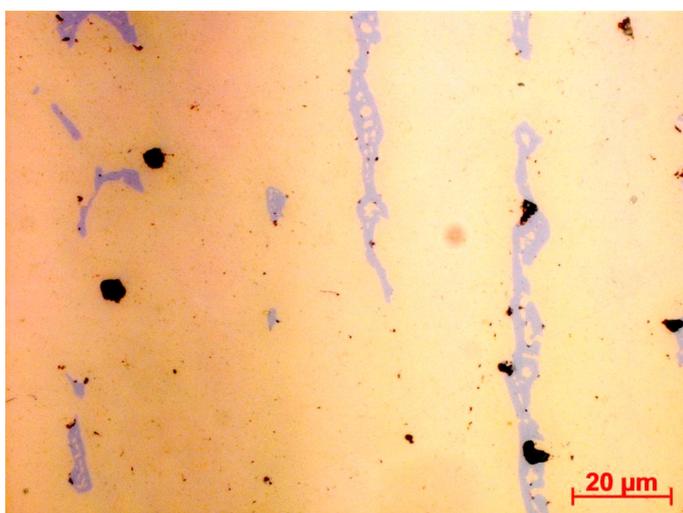


Abbildung 37: Gefügebild der OPS-polierten CuSn11Pb2-Probe

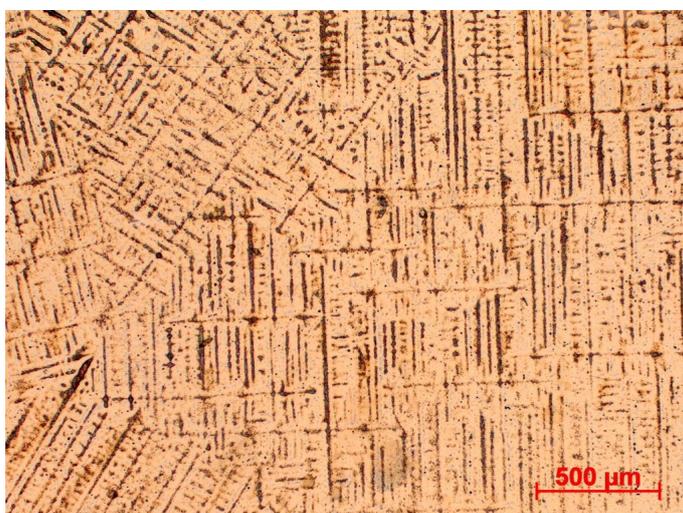


Abbildung 38: Gefügebild der mikrogeätzten CuSn11Pb2-Probe

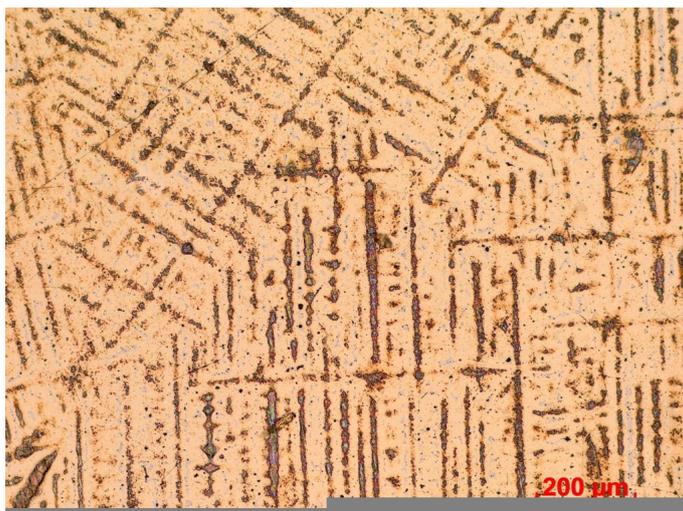


Abbildung 39: Gefügebild der mikrogeätzten CuSn11Pb2-Probe

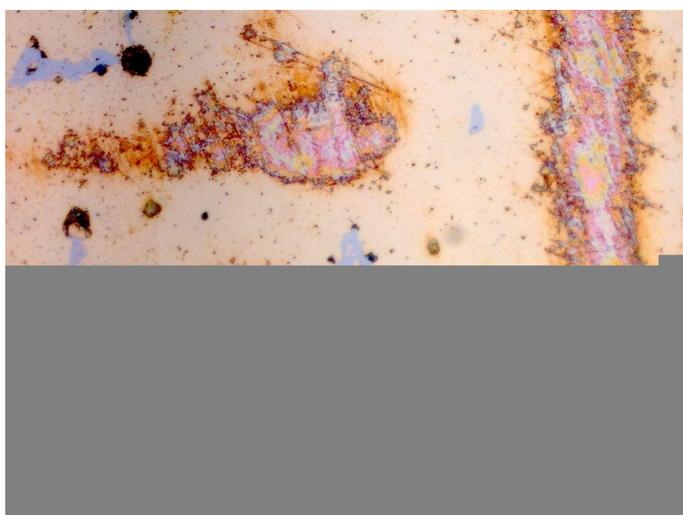


Abbildung 40: Gefügebild der mikrogeätzten CuSn11Pb2-Probe



Abbildung 41: Gefügebild der makrogeätzten CuSn11Pb2-Probe

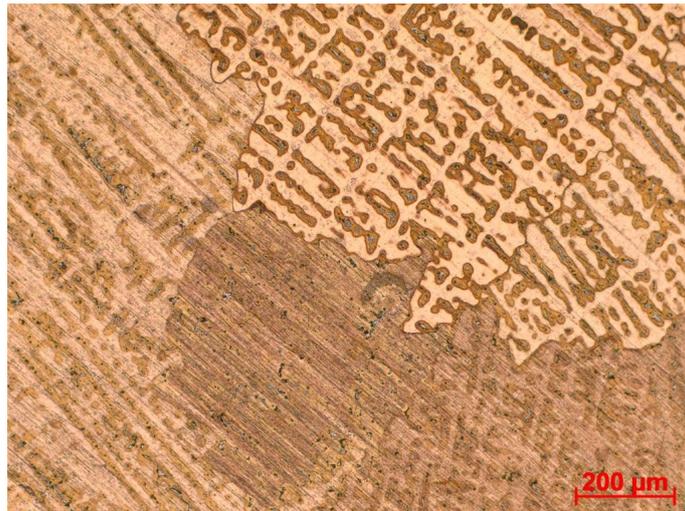


Abbildung 42: Gefügebild der makrogeätzten CuSn11Pb2-Probe

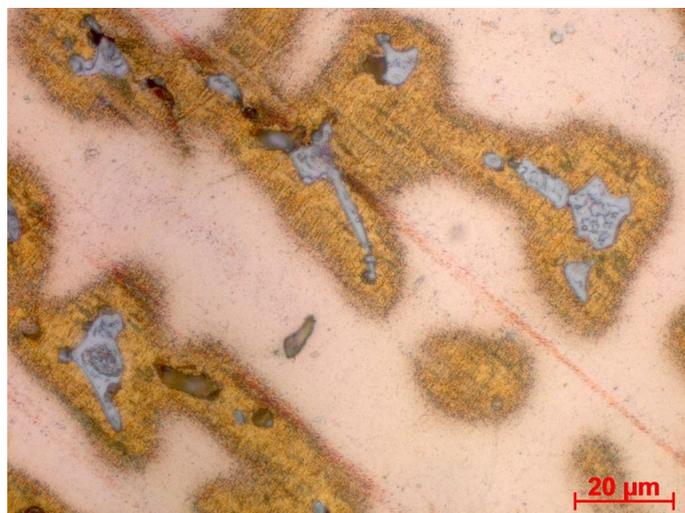


Abbildung 43: Gefügebild der makrogeätzten CuSn11Pb2-Probe

Legierung CuZn39Pb3:

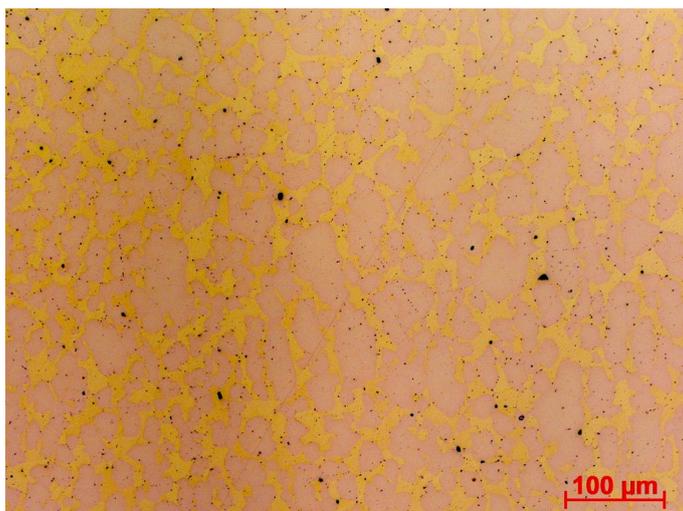


Abbildung 44: Gefügebild der OPS-polierten CuZn39Pb3-Probe

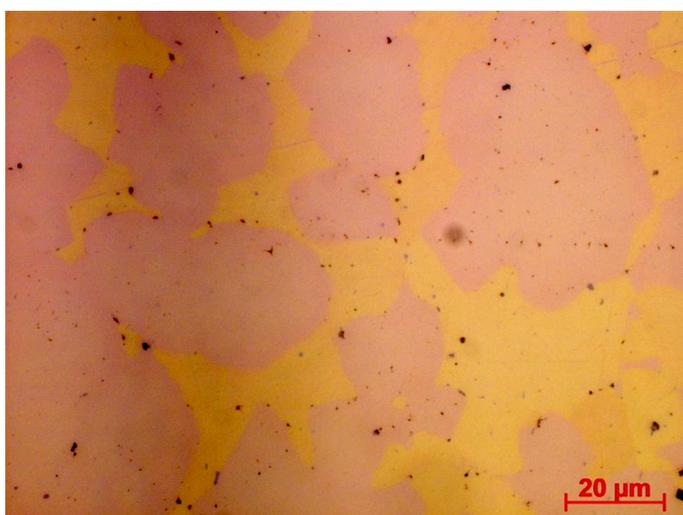


Abbildung 45: Gefügebild der OPS-polierten CuZn39Pb3-Probe



Abbildung 46: Gefügebild der mikrogeätzten CuZn39Pb3-Probe

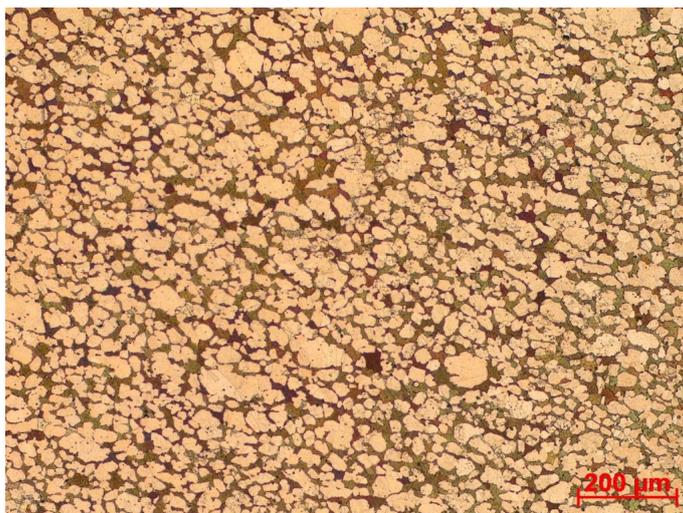


Abbildung 47: Gefügebild der mikrogeätzten CuZn39Pb3-Probe

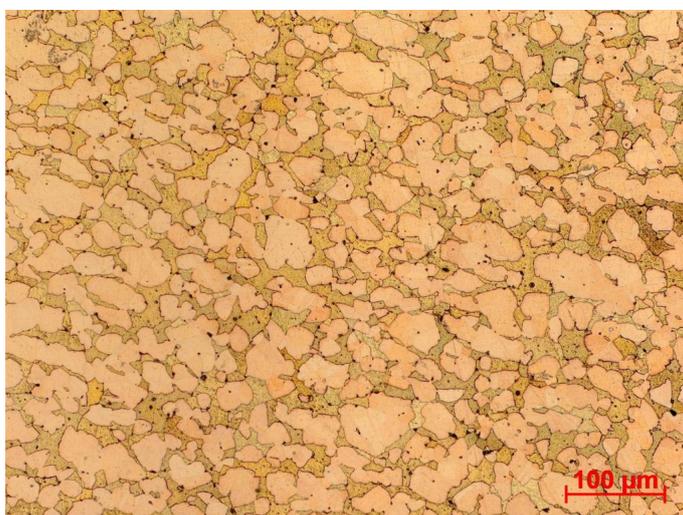


Abbildung 48: Gefügebild der mikrogeätzten CuZn39Pb3-Probe

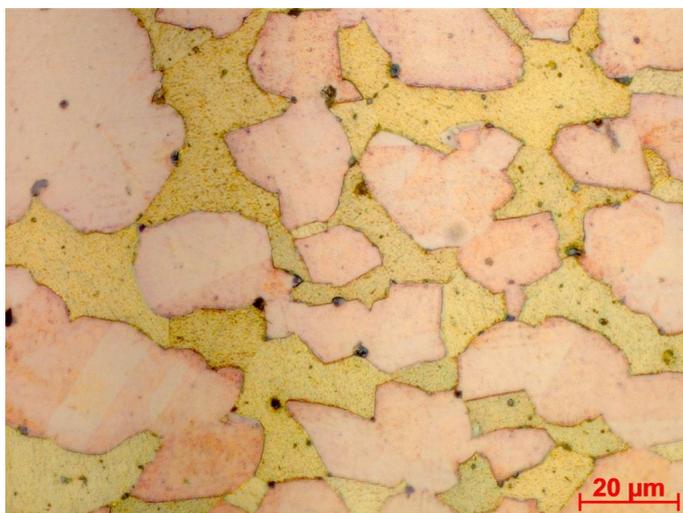


Abbildung 49: Gefügebild der mikrogeätzten CuZn39Pb3-Probe



Abbildung 50: Gefügebild der makrogeätzten CuZn39Pb3-Probe

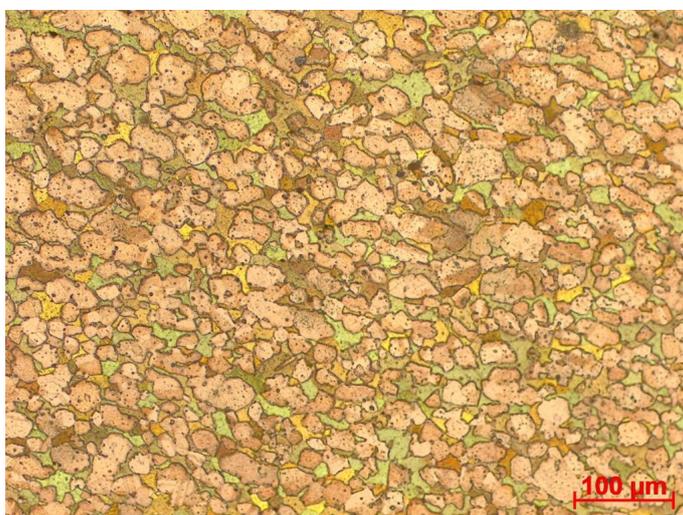


Abbildung 51: Gefügebild der makrogeätzten CuZn39Pb3-Probe



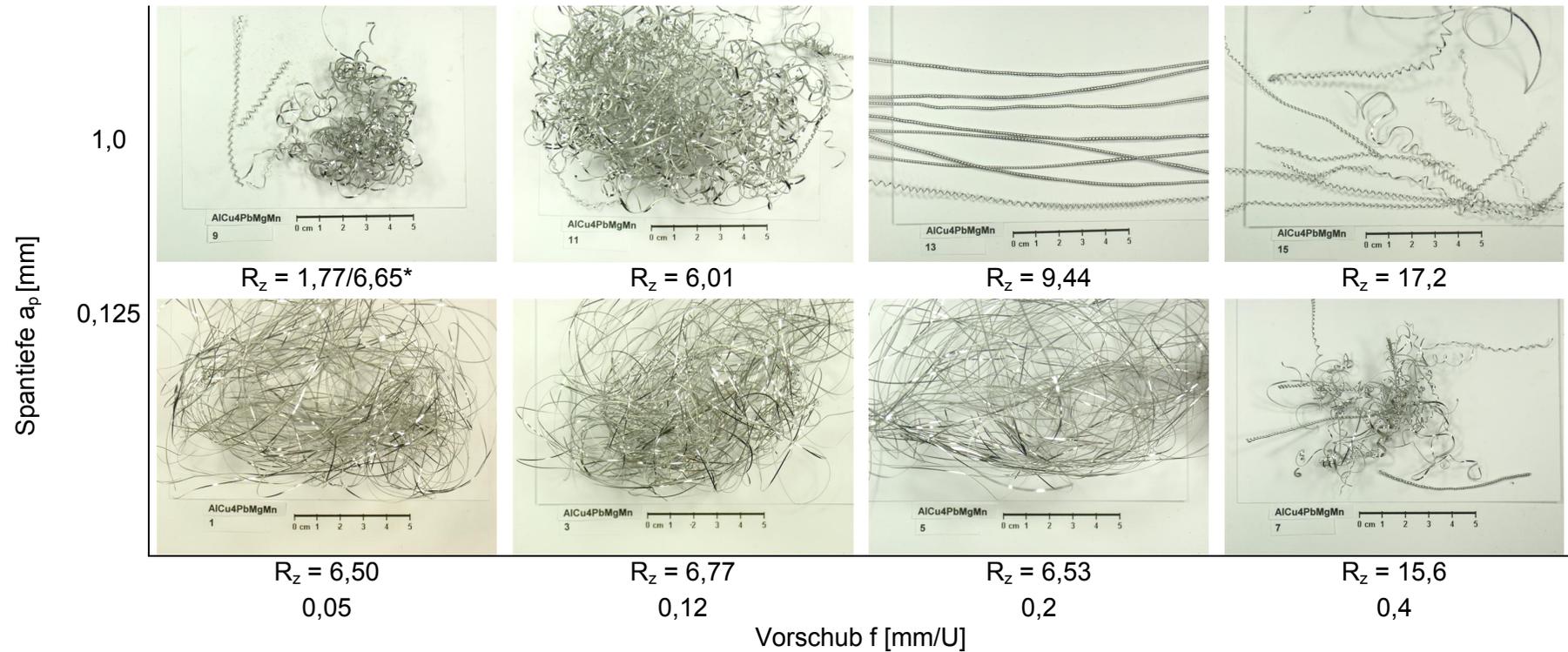
Abbildung 52: Gefügebild der makrogeätzten CuZn39Pb3-Probe

10.3 Drehen

Die folgenden Abbildungen zeigen die f-ap-Diagramme für das Schlichten und Schruppen der einzelnen Legierungen.

Legierung: AlCu4PbMgMn

Schnittgeschwindigkeit: 800 m/min

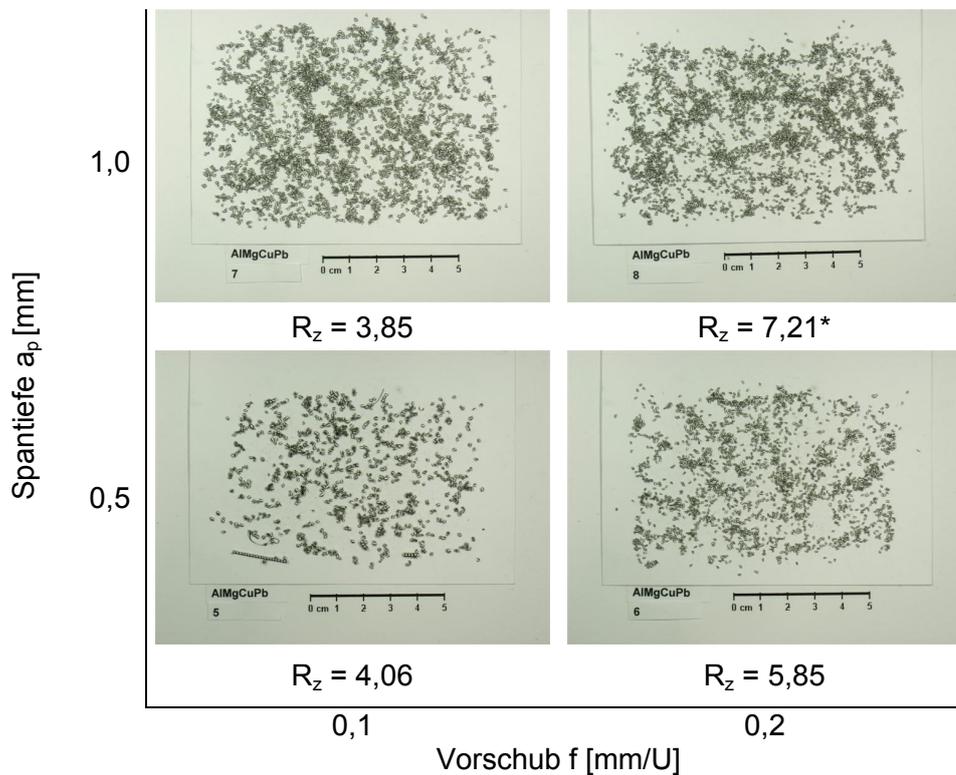


*Bereich in dem die Platte schlägt

Abbildung 53: Spanformen im f - a_p -Diagramm AlCu4PbMgMn – Außenseite

Legierung: AlCuPbMg

Schnittgeschwindigkeit: 1100 m/min



*Bildung einer Aufbauschneide

Abbildung 54: Spanformen im f - a_p -Diagramm AlCuPbMg – Schruppen

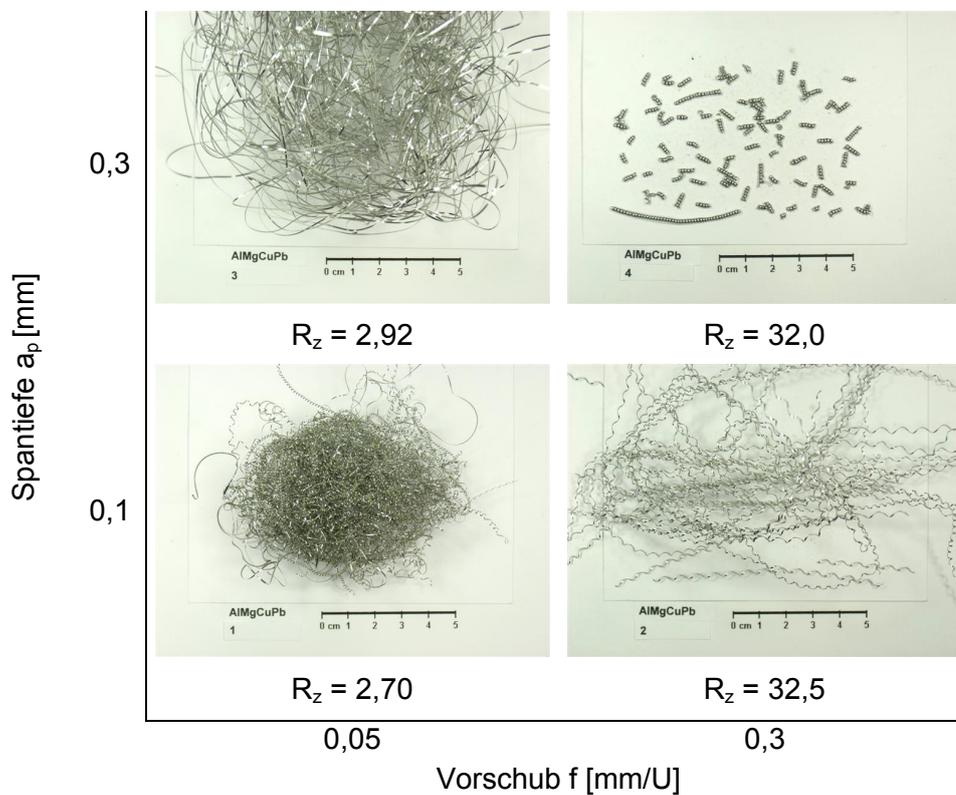
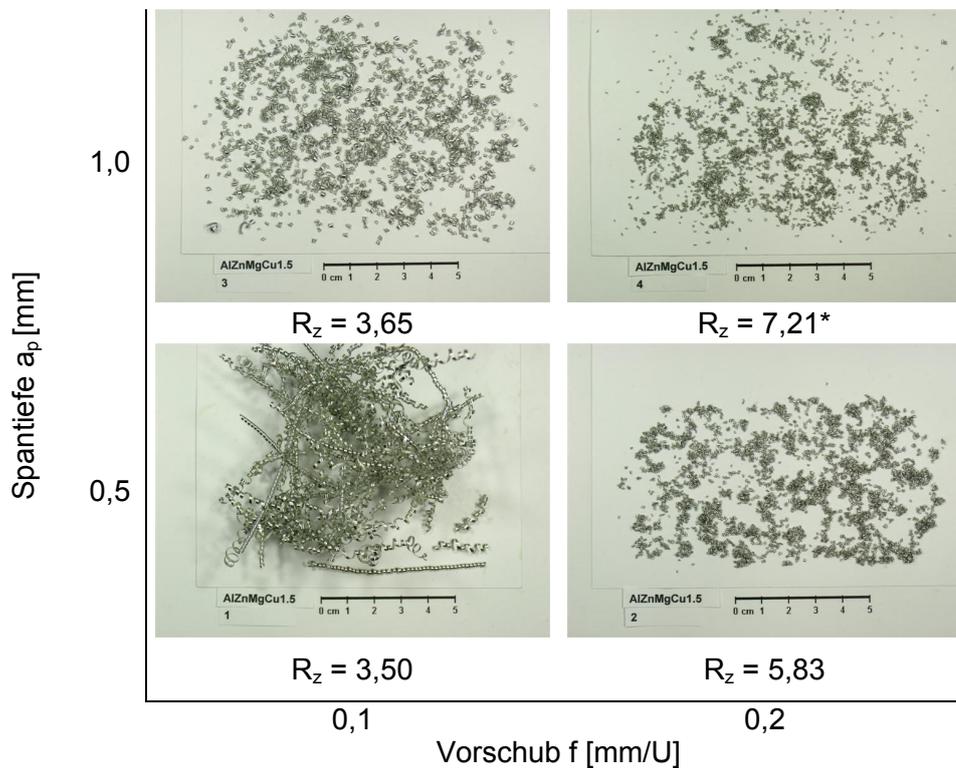


Abbildung 55: Spanformen im f - a_p -Diagramm AlCuPbMg – Schichten

Legierung: AlZnMgCu1.5

Schnittgeschwindigkeit: 1100 m/min



*Bildung einer Aufbauschneide

Abbildung 56: Spanformen im f - a_p -Diagramm AlZnMgCu1.5 – Schruppen

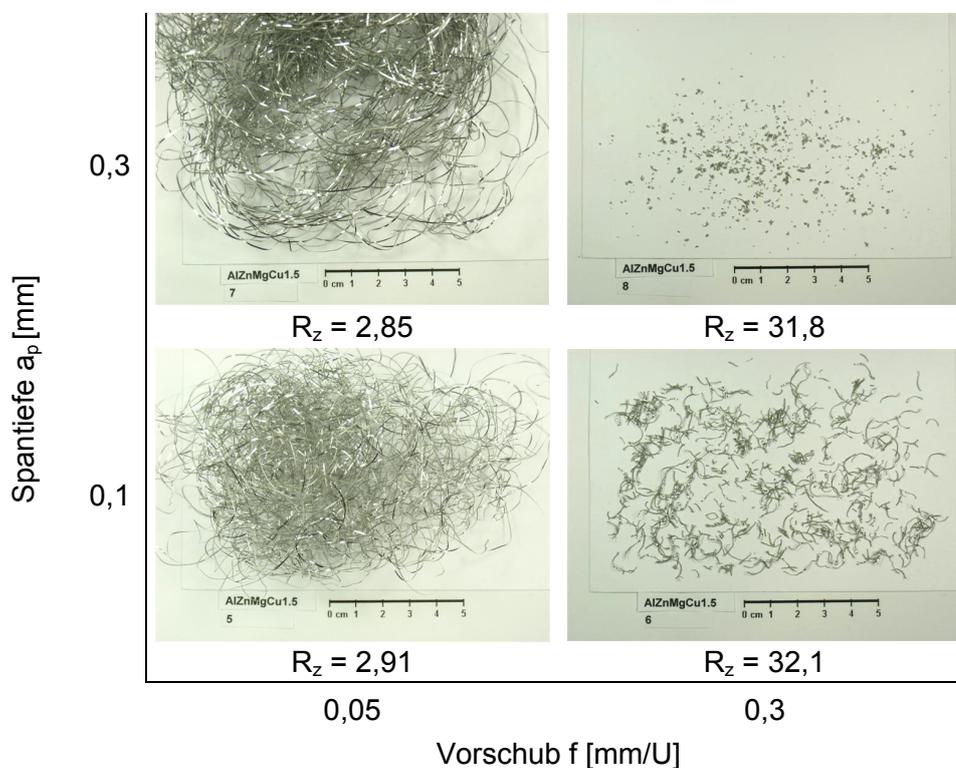
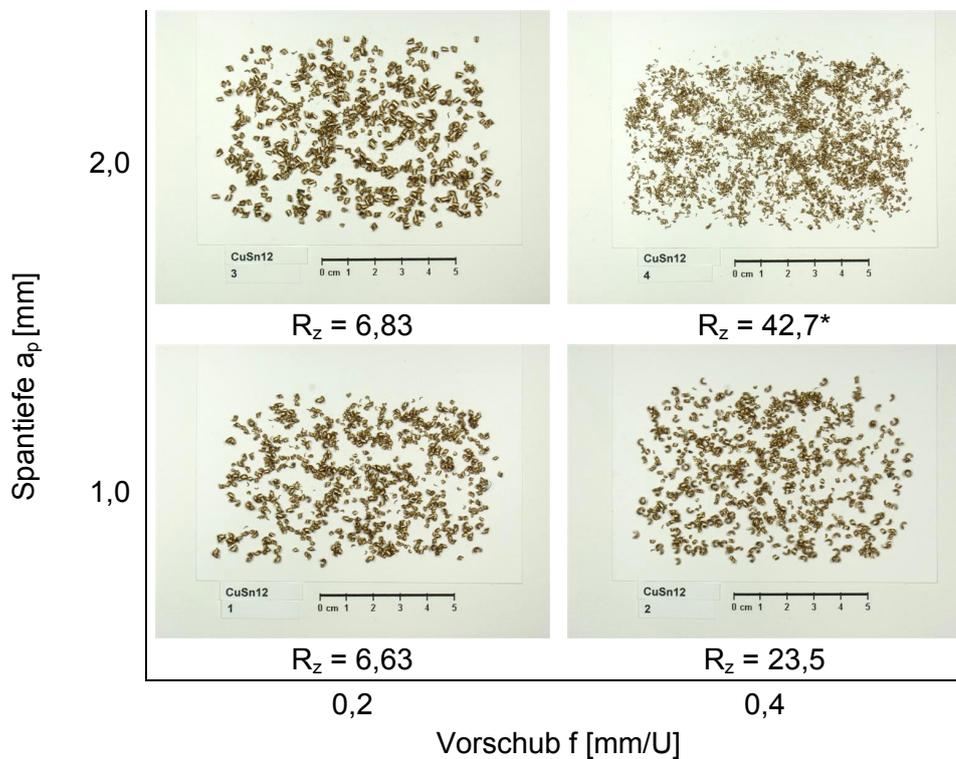


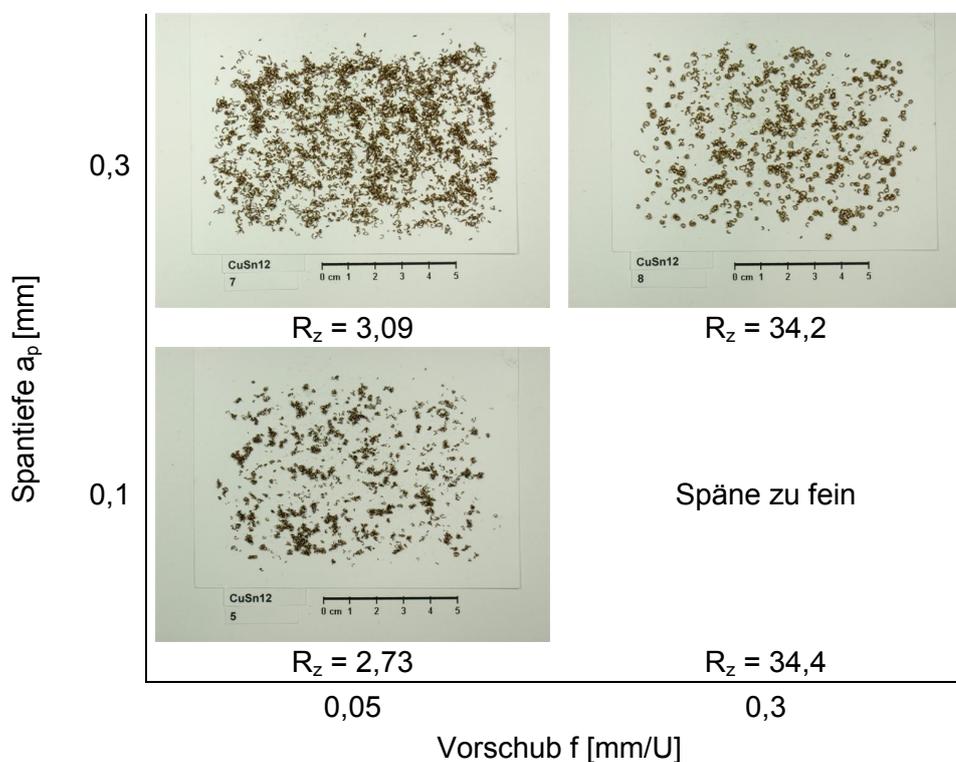
Abbildung 57: Spanformen im f - a_p -Diagramm AlZnMgCu1.5 – Schichten

Legierung: CuSn11Pb2

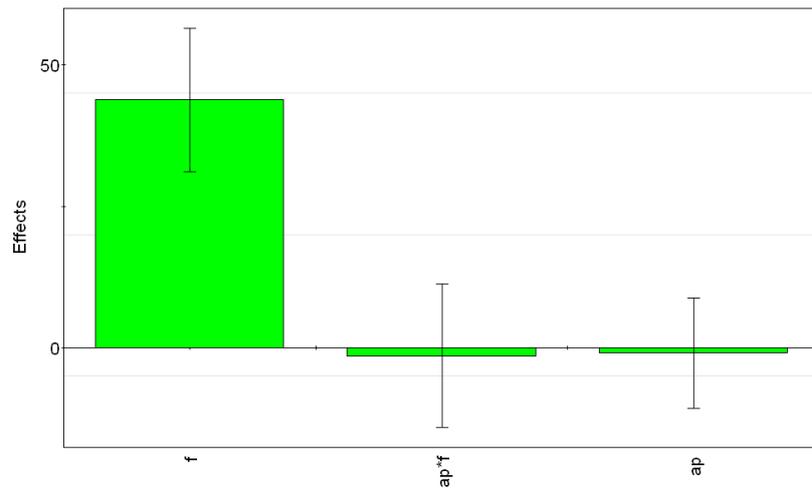
Schnittgeschwindigkeit: 1500 m/min



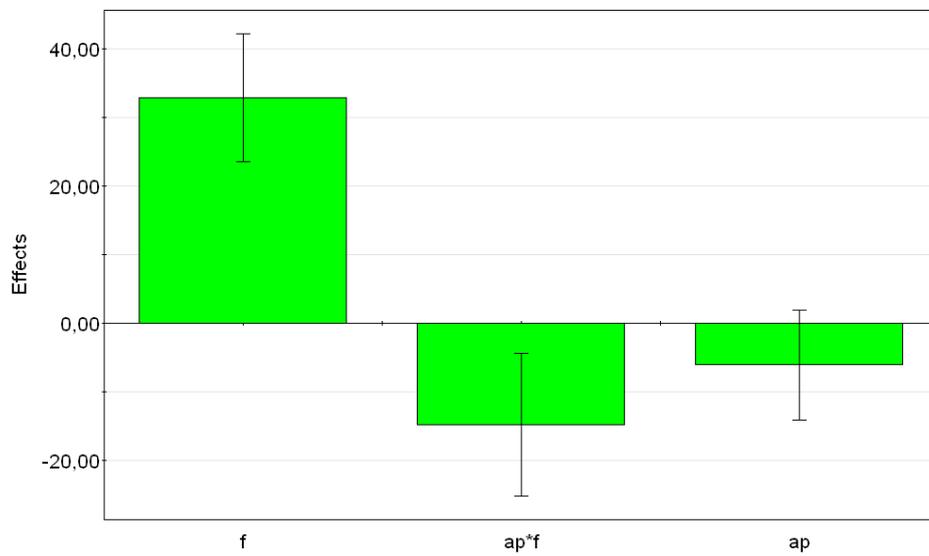
* Bruch der Wendeschneidplatte

Abbildung 58: Spanformen im f - a_p -Diagramm CuSn11Pb2 – SchruppenAbbildung 59: Spanformen im f - a_p -Diagramm CuSn11Pb2 – Schichten

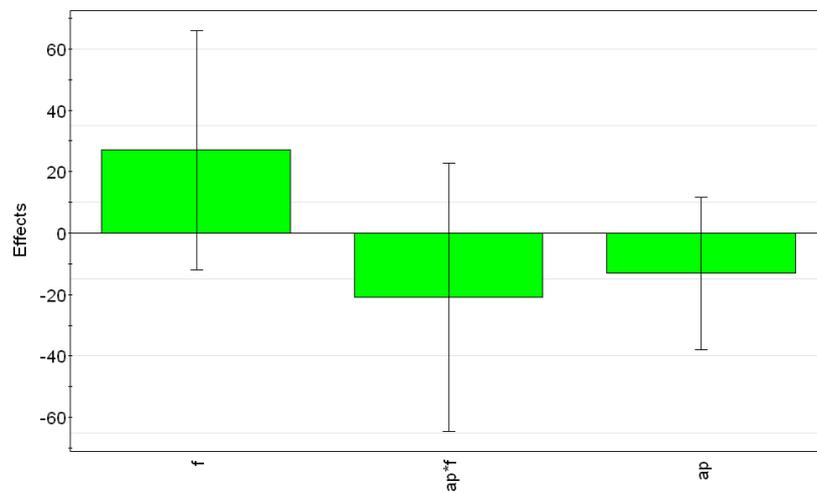
AICu4PbMgMn – Innenseite



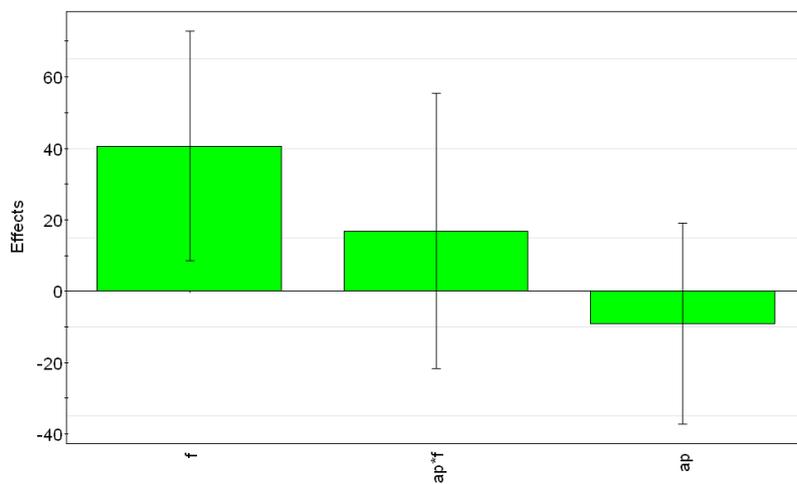
AICu4PbMgMn – gesamt



AICuPbMg

Abbildung 60: Effects Plots für R_z

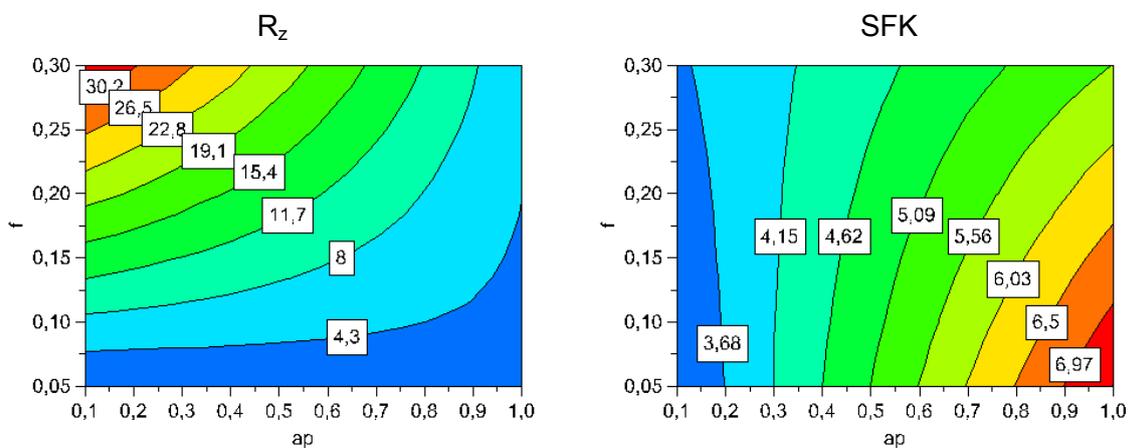
CuSn11Pb2



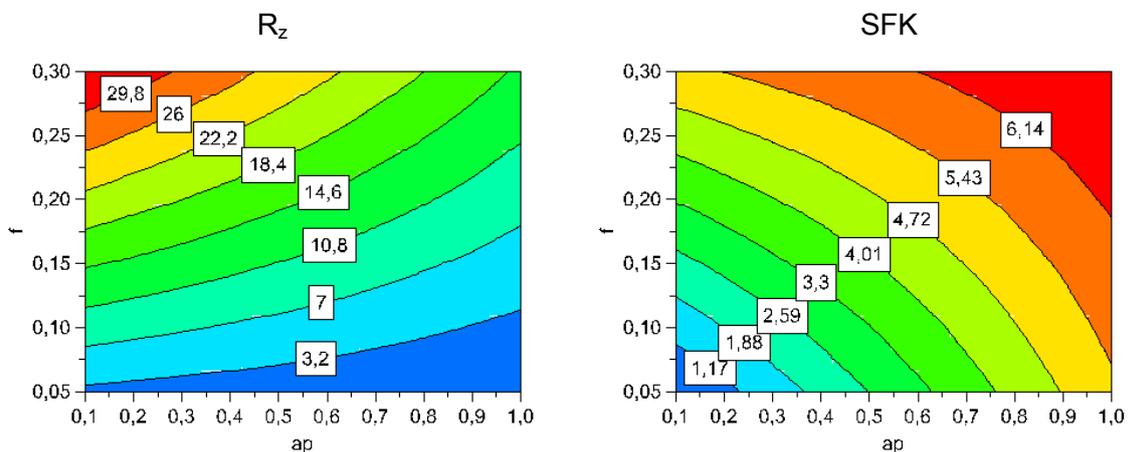
Fortsetzung Abbildung 60: Effects Plots für Rz

Die Abbildung 61 stellt die erreichten R_z -Werte und Spanformklassen in f - a_p -Diagrammen dar.

AlCuPbMg



AlZnMgCu1.5



CuSn11Pb2

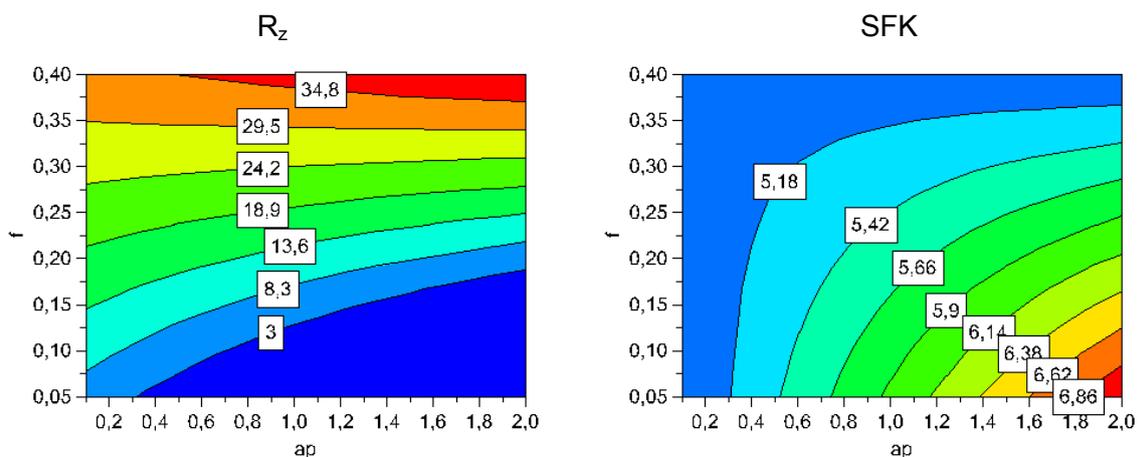
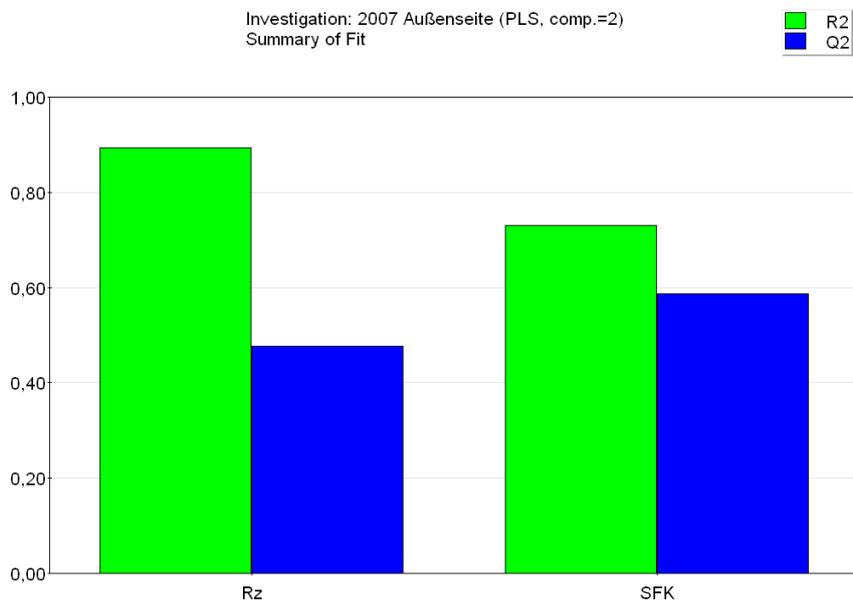


Abbildung 61: Contour Plots: Abhängigkeit der Rautiefe R_z bzw. Spanformklasse SFK von Spantiefe a_p und Vorschub f

Abbildung 62 zeigt die statistischen Kenngrößen R^2 und Q^2 für die verschiedenen Legierungen in Form von Balken.

AlCu4PbMgMn-Außenseite



AlCu4PbMgMn-Innenseite

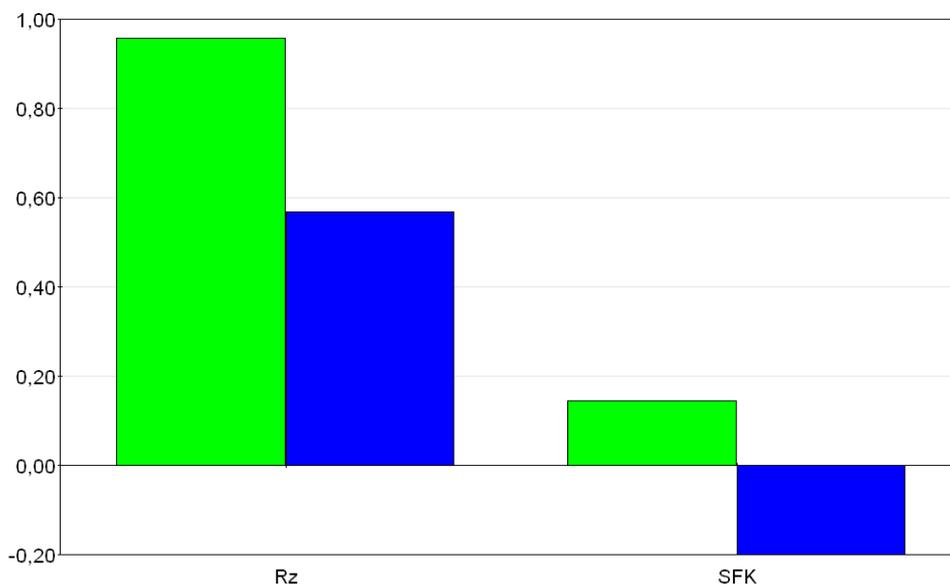
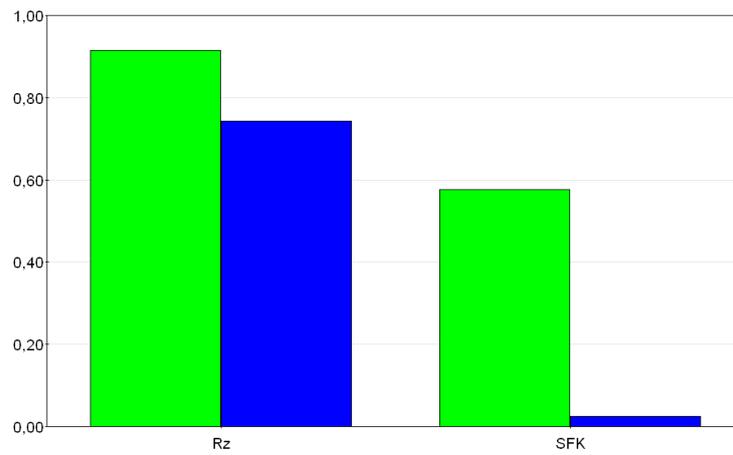
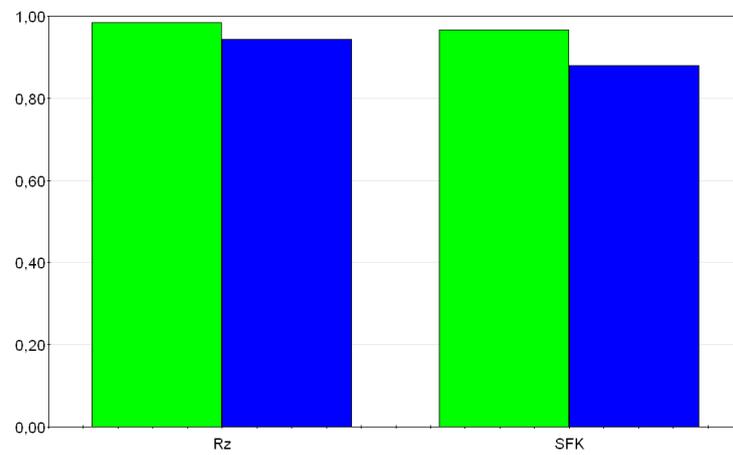


Abbildung 62: Statistische Kenngrößen: R^2 (grün) und Q^2 (blau) für AlCu4PbMgMn beim Drehen an der Außenseite (oben) bzw. Innenseite (unten)

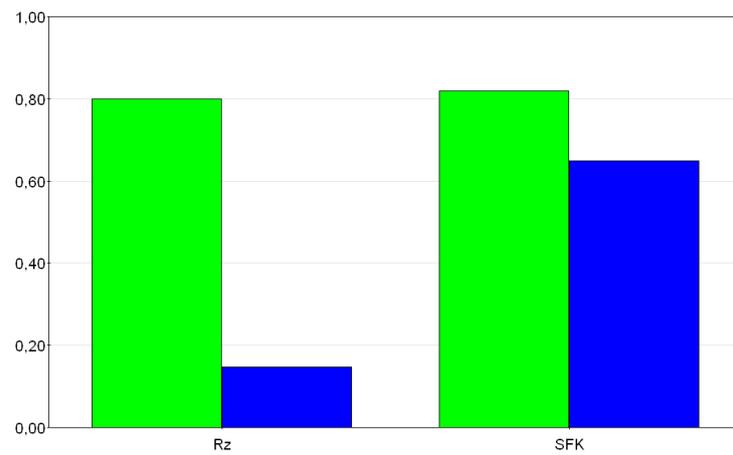
AlCuPbMg



AlZnMgCu1.5



CuSn11Pb2



Fortsetzung Abbildung 62: Statistische Kenngröße R2 (grün) und Q2 (blau)
für AlCuPbMg, AlZnMgCu1.5 und CuSn11Pb2 – Drehen

10.4 Fräsen

Abbildung 63 und Abbildung 64 zeigen die Spanbilder und die erzielte mittlere Rautiefe R_z in Abhängigkeit des Vorschubes f und der Spantiefe a_p . Die Schnittgeschwindigkeit ist für die jeweilige Legierung konstant.

Legierung: AlCuPbMg

Schnittgeschwindigkeit: $v_c = 12000 \text{ U/min} = 3000 \text{ m/min}$

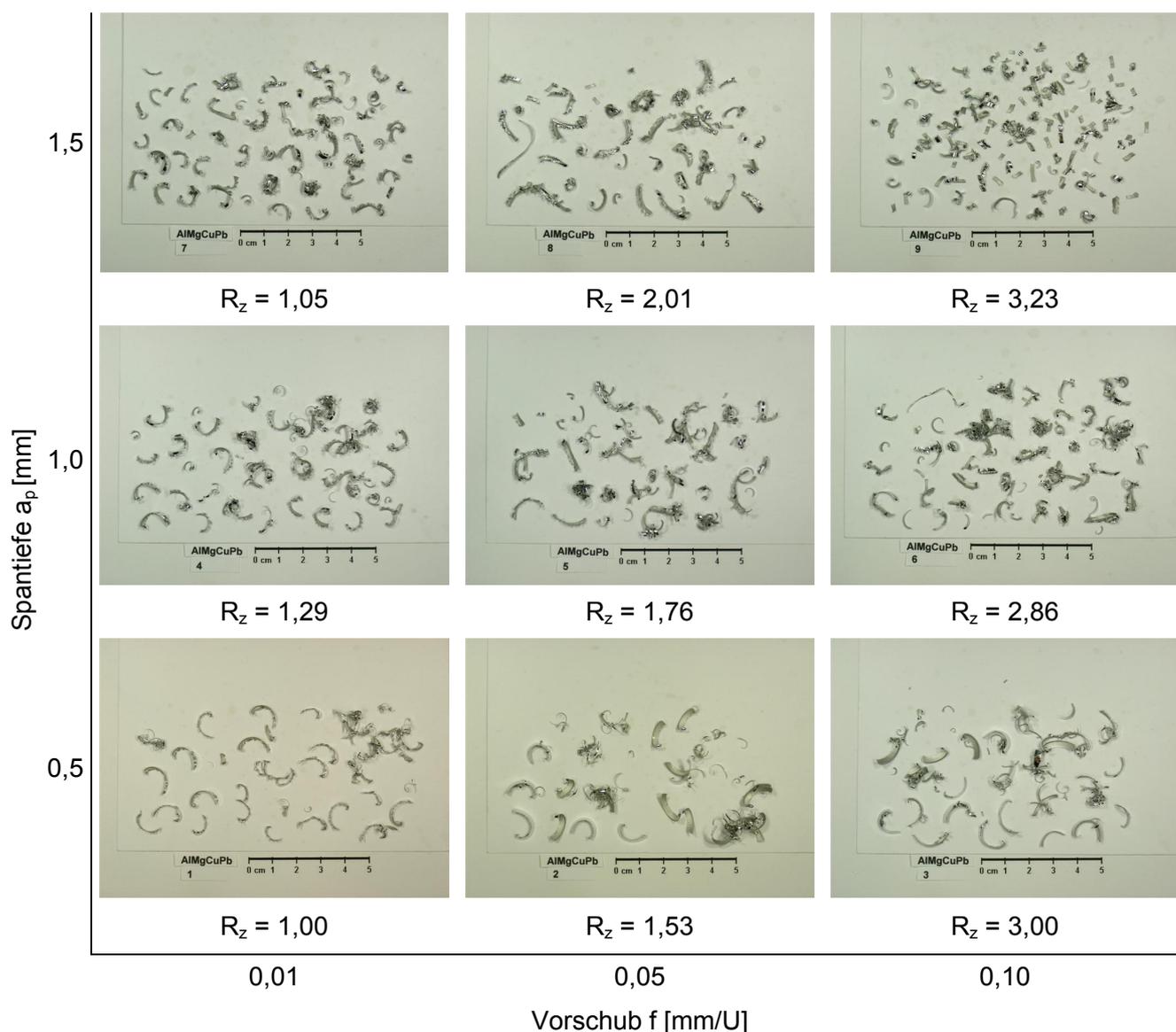


Abbildung 63: Spanformen im f - a_p -Diagramm AlCuPbMg

Legierung: CuSn11Pb2

Schnittgeschwindigkeit: $v_c = 8000 \text{ U/min} = 2000 \text{ m/min}$

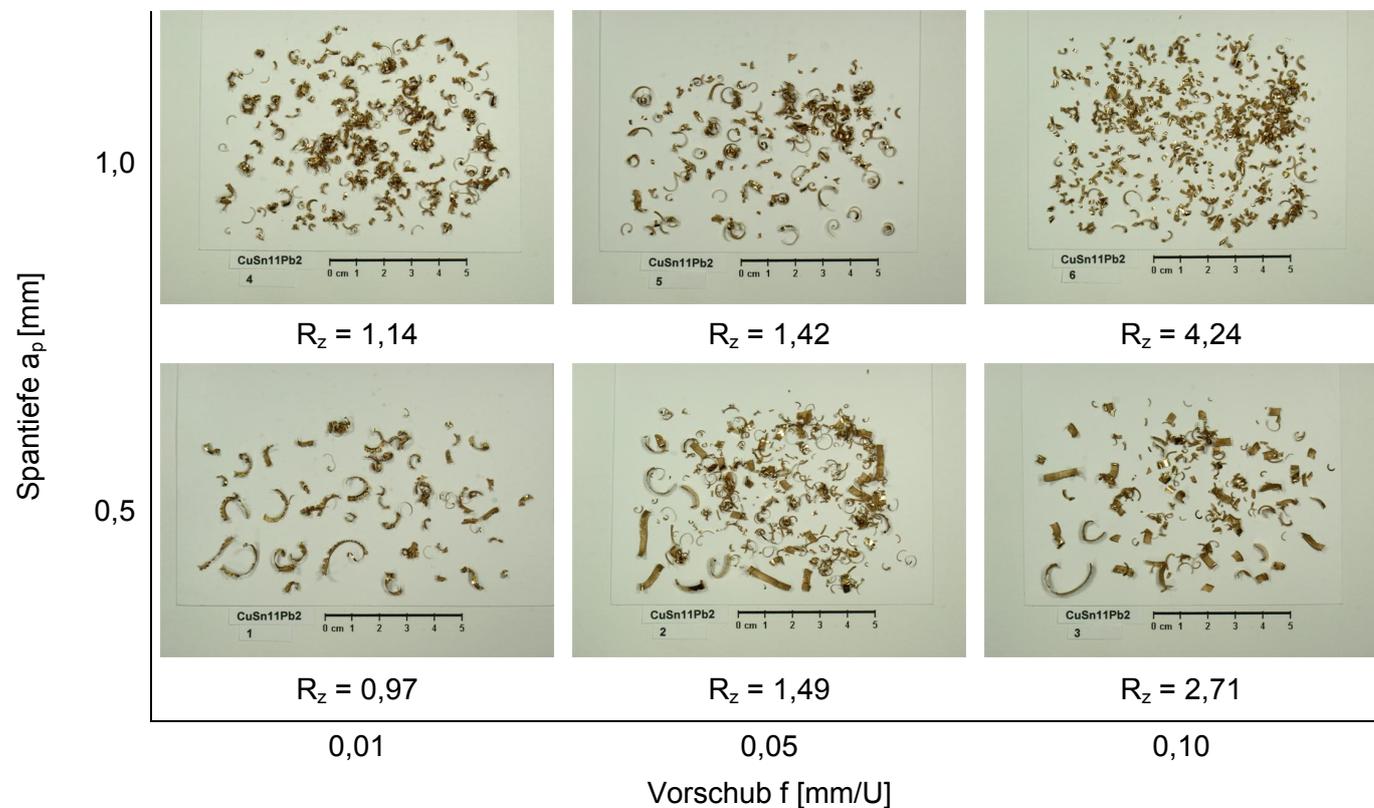
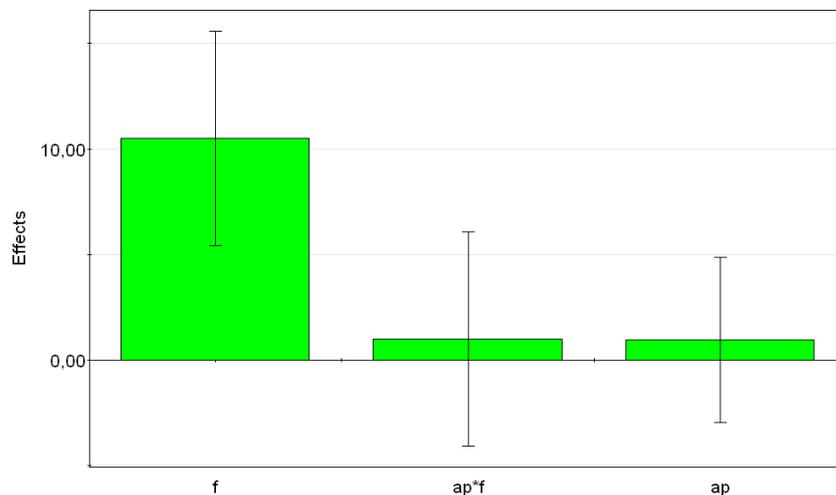


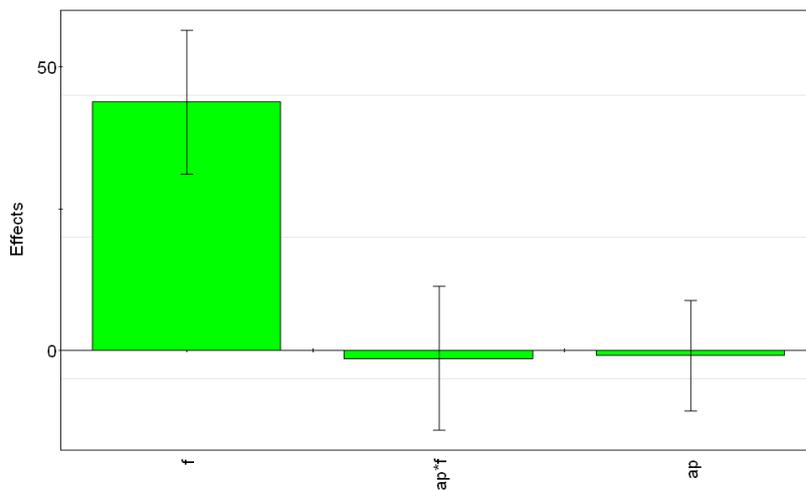
Abbildung 64: Spanformen im f - a_p -Diagramm CuSn11Pb2

In Abbildung 65 ist die mit der Versuchsplanungssoftware Modde® 7.0 dargestellten „Effects Plots“, welche den Zusammenhang der verschiedenen Parameter (Vorschub f , Spantiefe a_p , Produkt $f \cdot a_p$) mit der gemittelten Rautiefe R_z in Form von Balken wiedergegeben.

AlCu4PbMgMn – Außenseite

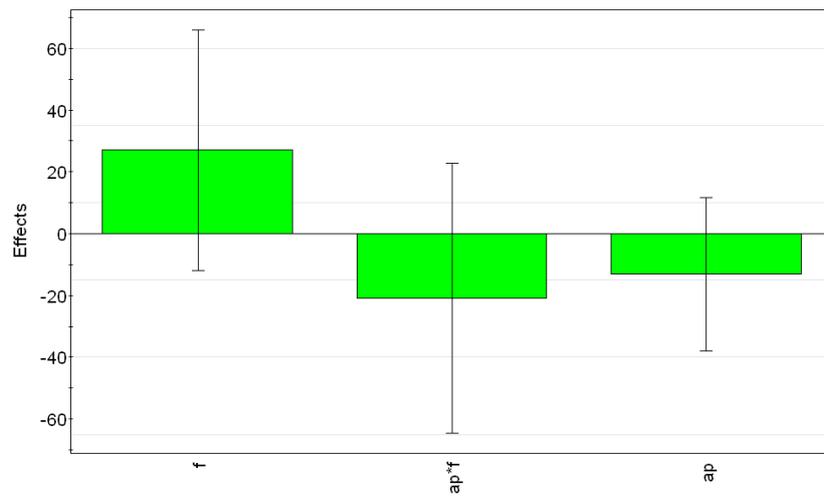


AlCu4PbMgMn – Innenseite

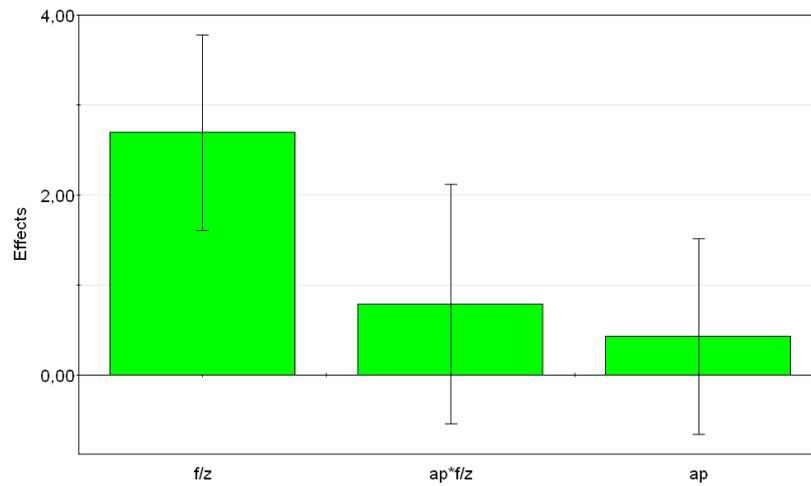


Fortsetzung Abbildung 65: Effects Plots für R_z für AlCuPbMg, AlZnMgCu1.5 und CuSn11Pb2)

AlCuPbMg



AlZnMgCu1.5



CuSn11Pb2

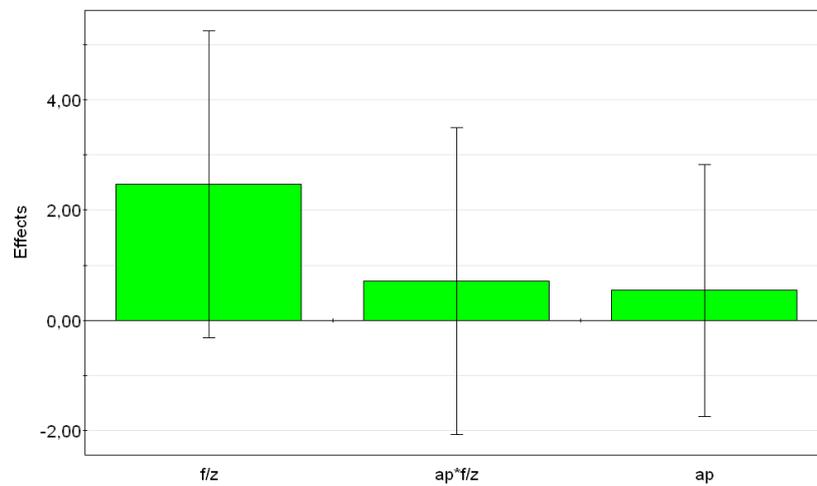
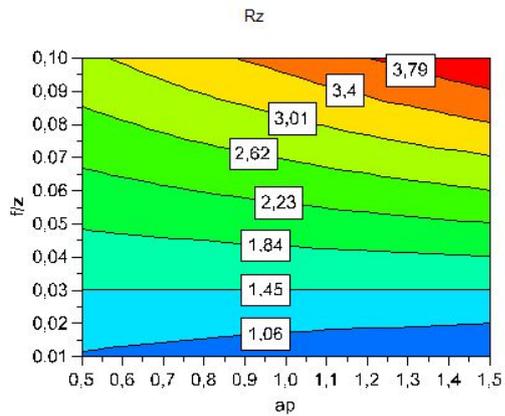
Abbildung 65: Effects Plots für R_z für AlCuPbMg, AlZnMgCu1.5 und CuSn11Pb2

Abbildung 66 stellt die erreichten R_z -Werte in f - a_p -Diagrammen dar. Diese wurden für die einzelnen Legierungen für das Planfräsen mittels Modde® 7.0 berechnet.

AlZnMgCu1.5



CuSn11Pb2

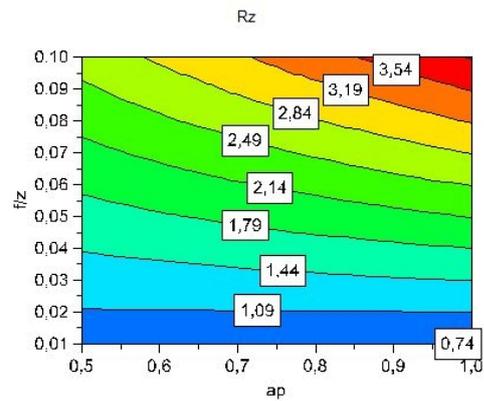
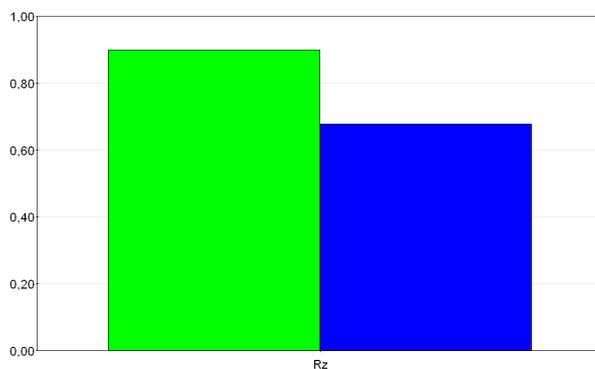


Abbildung 66: Contour Plots: Abhängigkeit der Rautiefe R_z von Spantiefe a_p und Vorschub f – Fräsen

Abbildung 67 zeigt die statistischen Kenngrößen R2 und Q2 für die verschiedenen Legierungen in Form von Balken.

AlZnMgCu1.5



CuSn11Pb2

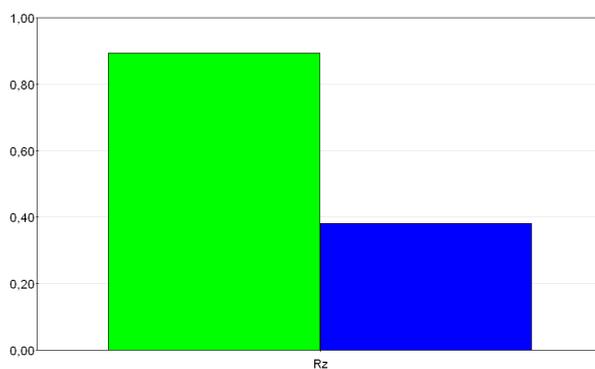


Abbildung 67: Statistische Kenngrößen R2 (grün) und Q2 (blau) für AlZnMgCu1.5 und CuSn11Pb2 – Fräsen