

Richtwerte für die spanende Bearbeitung von Kupfer und Kupferlegierungen

Herausgeber:

Deutsches Kupferinstitut
Auskunfts- und Beratungsstelle
für die Verwendung von
Kupfer und Kupferlegierungen

Am Bonneshof 5
40474 Düsseldorf
Telefon: (0211) 4 79 63 00
Telefax: (0211) 4 79 63 10
info@kupferinstitut.de
www.kupferinstitut.de

Alle Rechte, auch die des
auszugsweisen Nachdrucks und
der photomechanischen oder
elektronischen Wiedergabe,
vorbehalten.

Auflage 2010

Überarbeitet durch:
Werkzeugmaschinenlabor
WZL der RWTH Aachen
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing E.h. Dr. h.c. Fritz Klocke
Dipl.-Ing. Dieter Lung
Dr.-Ing. Klaus Gerschwiler
Dipl.-Ing. Patrik Vogtel
Dipl.-Ing. Susanne Cordes
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie
IPT in Aachen
Dipl.-Ing. Frank Niehaus

Bildnachweis:
TORNOS, Pforzheim; Wieland-Werke, Ulm

Wir danken der ICA (International Copper
Association) New York, für die besondere
Unterstützung zur Herausgabe dieser Broschüre.

Inhalt

Inhaltsverzeichnis	1
Vorwort	2
1 Stand der Technik	3
2 Allgemeine Grundlagen	5
2.1 Schneidteilgeometrie und ihr Einfluss auf den Zerspanvorgang	5
2.1.1 Schneidteilgeometrie	5
2.1.2 Einfluss der Schneidteilgeometrie auf den Zerspanungsvorgang	6
2.2 Verschleiß am Schneidteil	10
2.3 Spanbildung	11
3 Der Begriff Zerspanbarkeit	13
3.1 Bewertungsgröße Standzeit	13
3.2 Zerspankraft	15
3.3 Bewertungsgröße Oberflächengüte	18
3.4 Bewertungsgröße Spanform	21
4 Einteilung der Kupferwerkstoffe nach Zerspanbarkeitsgruppen	23
4.1 Normung der Kupferwerkstoffe	23
4.2 Bewertungskriterien der Zerspanbarkeit	23
4.3 Beeinflussung der Zerspanbarkeit durch Gießen, Kaltumformung und Aushärtung	24
4.4 Beeinflussung der Zerspanbarkeit durch Legierungselemente	25
4.5 Einteilung der Kupferwerkstoffe in Hauptgruppen der Zerspanbarkeit	28
5 Schneidstoffe	32
5.1 Schnellarbeitsstahl	32
5.2 Hartmetalle (HM)	32
5.3 Diamant als Schneidstoff	33
5.4 Wahl des Schneidstoffs	34
6 Schneidengeometrie	35
6.1 Span- und Freiwinkel	35
7 Kühlschmierstoffe	37
8 Angaben zur Berechnung der Bearbeitungskosten	38
9 Ultrapräzisionszerspanung von Kupfer	40
9.1 Grundlagen der Ultrapräzisionszerspanung ...	40
9.2 Anwendungsbeispiele von Kupferlegierungen	40
9.3 Werkstoffeigenschaften und Einflüsse	41
10 Richtwerte für die zerspanende Bearbeitung von Kupfer und Kupferlegierungen	43
10.1 Drehen von Kupferwerkstoffen	43
10.2 Bohren und Senken von Kupferwerkstoffen ...	44
10.3 Reiben von Kupferwerkstoffen	46
10.4 Gewindebohren und Gewindefräsen von Kupferwerkstoffen	46
10.5 Fräsen von Kupferwerkstoffen	47
11 Zerspanungsmusteranwendungen	49
12 Formeln	56
12.1 Gleichungen	56
12.2 Formelzeichen / Symbole und Abkürzungen ..	58
13 Literatur / Normen und Richtlinien	61
14 Verlagsprogramm	64

Mit den „Richtwerten für die spanende Bearbeitung von Kupfer und Kupferlegierungen“ setzt das Deutsche Kupferinstitut eine alte Tradition fort. Erstmals wurde 1938 die Druckschrift „Das Bearbeiten von Kupfer und Kupferlegierungen“ herausgegeben. Die von J. Witthoff damals völlig neu gestaltete Broschüre „Die spanabhebende Bearbeitung von Kupfer und Kupferlegierungen“ erschien 1956. Die Druckschrift umfasste erstmals eine Gesamtdarstellung aller genormten Kupferwerkstoffe und der bis dahin bekannten Zerspanungsdaten. Neben dem sehr gut zerspanbaren Automatenmessing wurden auch die für spezielle Anwendungsfälle entwickelten und häufig schwer zerspanbaren Kupferlegierungen berücksichtigt. 1987 wurde die Broschüre mit dem Titel „Richtwerte für die spanende Bearbeitung von Kupfer und Kupferlegierungen“ neu aufgelegt und dabei zu wesentlichen Teilen von den Diplomingenieuren Hans-Jörn Burmester und Manfred Kleinau neu strukturiert und überarbeitet. Die Broschüre beinhaltet für alle relevanten Fertigungsverfahren Richtwerte zur spanenden Bearbeitung für ein weites Spektrum an Kupferlegierungen.

Um der technischen Weiterentwicklung Rechnung zu tragen, wurde die Broschüre unter Beibehaltung des Titels „Richtwerte für die spanende Bearbeitung von Kupfer und Kupferlegierungen“ aktualisiert und überarbeitet.

Wie Ihre Vorgänger richtet sich auch diese Broschüre im Wesentlichen an den Praktiker. Sie soll ihm helfen Zerspanungsaufgaben möglichst produktiv und wirtschaftlich zu lösen. Darüber hinaus soll sie den Konstrukteur und Entwicklungsingenieur dabei unterstützen, verschiedene Werkstoffe hinsichtlich ihrer Zerspanbarkeit zu vergleichen und so die entsprechenden Fertigungskosten für ein Bauteil abzuschätzen. Dazu wurde das Tabellenwerk um einen Zerspanbarkeitsindex ergänzt. Dieser ist in der Literatur bereits weit verbreitet und hilft nicht nur beim Vergleich der Kupferwerkstoffe untereinander, sondern ermöglicht auch einen Vergleich mit anderen metallischen Werkstoffen wie Stahl oder Aluminium.

Zusätzlich wurden die Tabellen mit den Werkstoffnormen aktualisiert und die Richtwerttabellen zu den einzelnen Fertigungsverfahren überarbeitet und ergänzt. Da die Zerspanbarkeit sehr komplex und von einer ganzen Reihe von Randbedingungen abhängig ist, können die angegebenen Richtwerte lediglich als Orientierungswerte dienen. Um die optimale Zerspanparameter für die eigene Produktion zu finden und so das höchstmögliche Maß an Produktivität und Wirtschaftlichkeit zu erreichen, ist es nach wie vor unablässig, zusätzliche Zerspanversuche unter den tatsächlich herrschenden Randbedingungen durchzuführen.

1. Stand der Technik

Im Vergleich zu anderen metallischen Konstruktionswerkstoffen sind die meisten Werkstoffe auf Kupferbasis leicht zerpanbar. Für die Fertigung von Formdrehteilen aller Art hat sich CuZn39Pb3, das Automatenmessing, bestens bewährt. Die guten Zerspanungseigenschaften dieser Kupfer-Zink-Legierung sind so allgemein bekannt, dass sie oft als Vergleichsmaßstab für die Beschreibung der Zerspanungseigenschaften von Kupfer und Kupferlegierungen herangezogen werden.

Verglichen mit Stählen und Aluminiumlegierungen gleicher Festigkeit ist die Zerspanbarkeit der Kupferlegierungen um ein Vielfaches günstiger, Abb. 1. Dies spiegelt sich auch in den deutlich niedrigeren Zerspankräften wider, Abb. 2. Sofern nicht spezifische technische Anforderungen den Einsatz von CuZn39Pb3 ausschließen, setzen Lohndrehereien, Fasson- und Automattendrehereien diesen Werkstoff bevorzugt ein. Kupferwerkstoffe werden in

der Regel für in Serie gefertigte Bauteile verwendet. Um die verschiedensten technischen Anforderungen erfüllen zu können, wurden im Laufe der Zeit eine Vielzahl von Kupferwerkstoffen entwickelt, beispielsweise niedriglegierte Kupferlegierungen, Kupfer-Nickel-Legierungen und neue siliciumhaltige Kupferlegierungen. Dabei reicht die Palette der Werkstoffe von den hochfesten Kupfer-Aluminium-Legierungen bis zu den sehr weichen, reinen Kupfersorten mit hoher Bruchdehnung.

Aufgrund der unterschiedlichen mechanischen und physikalischen Eigenschaften ist die Zerspanbarkeit von Werkstoff zu Werkstoff verschieden. Über das Zerspanungsverhalten der seltener verwendeten Kupferwerkstoffe liegen bei vielen Verarbeitern nur lückenhafte Kenntnisse vor. Deshalb unterscheiden sich die für ein und denselben Werkstoff angewendeten Zerspanungsdaten oft von einem Fertigungsbetrieb zum anderen erheblich. Die Nachfrage nach Richt-

werten und Bearbeitungsvorschlägen für die spanende Fertigung ist – nicht zuletzt auch wegen der Fortschritte auf dem Schneidsektor – nach wie vor groß. Darüber hinaus hat die Optimierung der Zerspanungsaufgaben durch die richtige Wahl und Abstimmung der Zerspanungsdaten in der Serienfertigung, das heißt bei hohen Stückzahlen, große wirtschaftliche Bedeutung. Werkstoffentwicklungen sind darauf gerichtet, die Werkstoffeigenschaften ständig zu verbessern. Um die Kosten einer erforderlichen spanenden Bearbeitung zu senken, werden häufig Werkstoffe mit verbesserten Zerspanungseigenschaften verlangt, ohne dabei die mechanischen oder physikalischen Eigenschaften wesentlich zu beeinflussen. Als Beispiel sei hier die Entwicklung von CuTeP und CuSP genannt. Da reines Kupfer zwar sehr hohe Leitfähigkeitswerte aufweist, aber andererseits wegen langer Wendel- bzw. Wirrspäne schwierig spanend zu bearbeiten ist, wurden dem reinen Kupfer Tellur, Schwefel

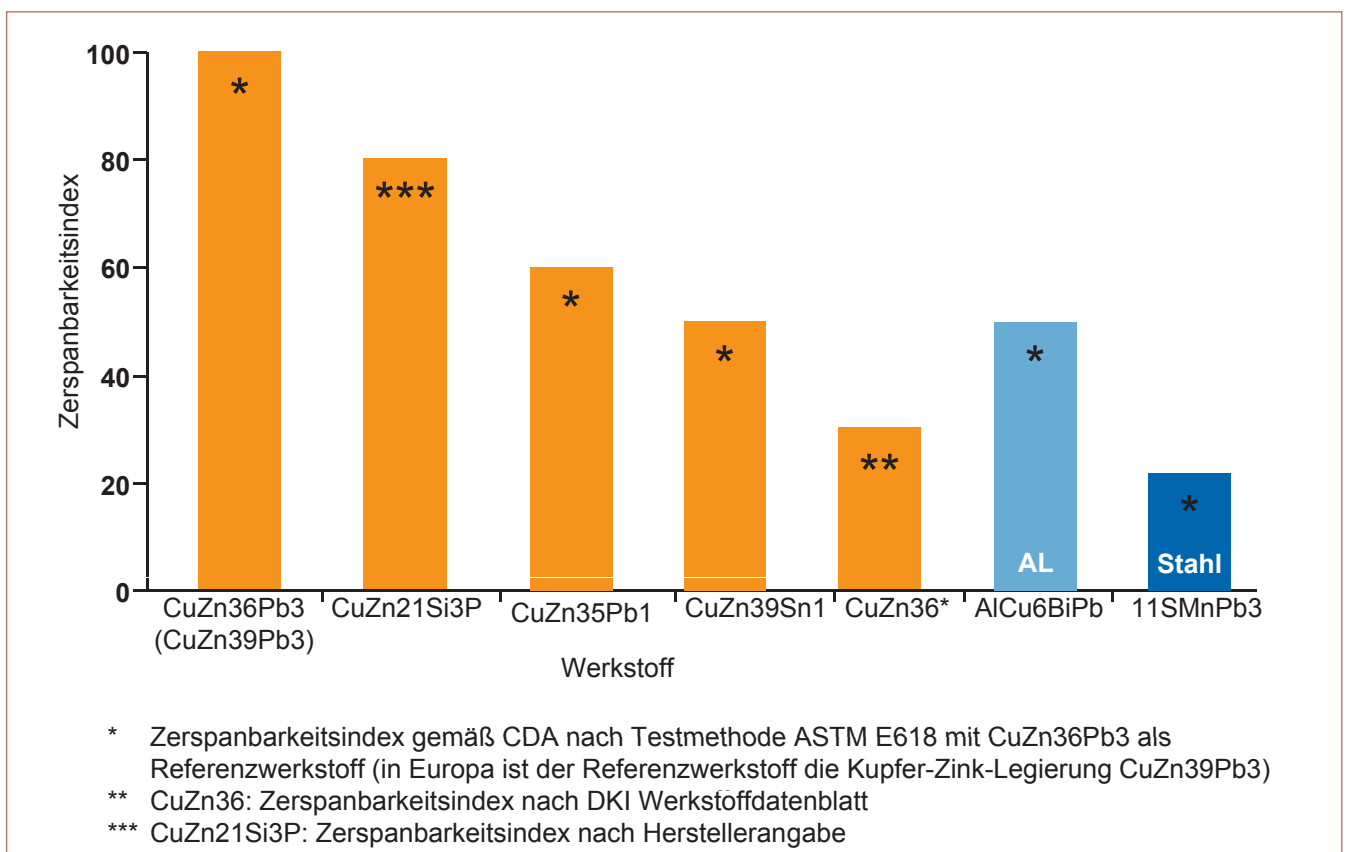


Abb. 1: Vergleich der Zerspanbarkeit von Kupferwerklegierungen mit einem Automatenstahl und einer Aluminiumlegierung [1, 2, 3]

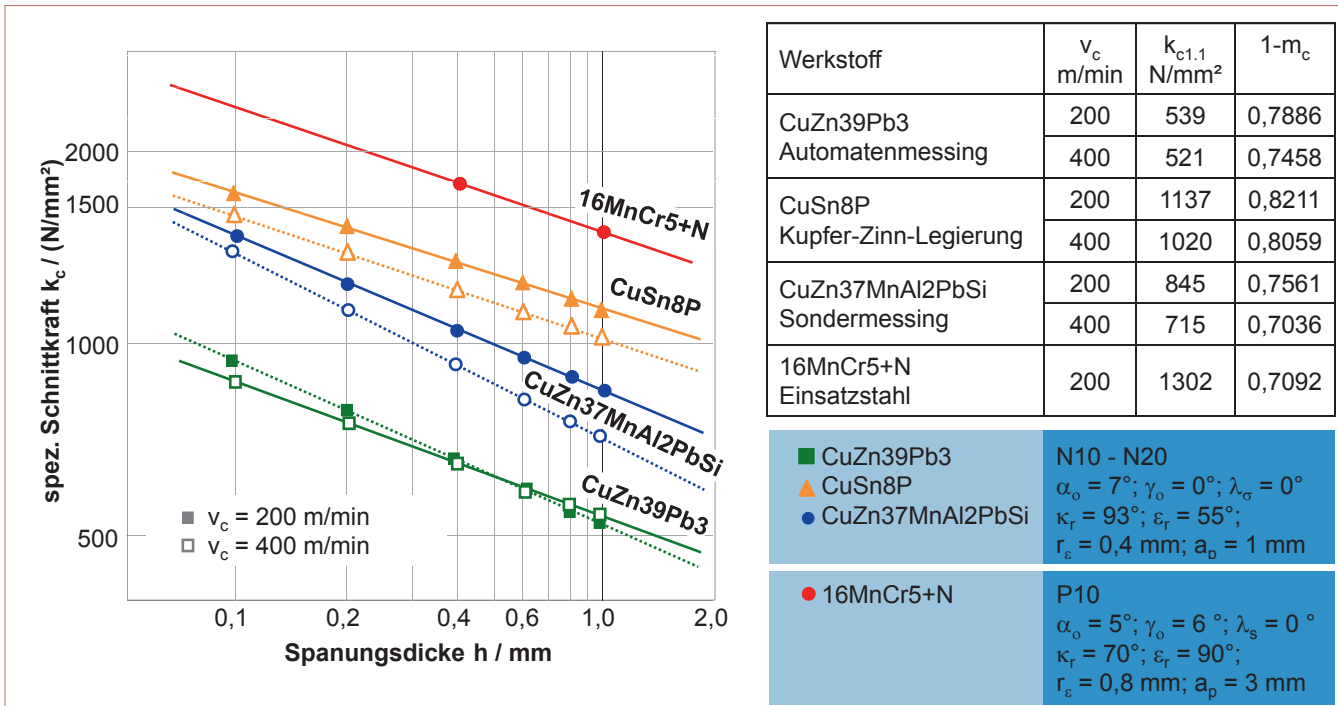


Abb. 2: Vergleich der spezifischen Schnittkraft von drei Kupferlegierungen mit einem Einsatzstahl nach Untersuchungen des DKI und [4]

oder Blei als spanbrechende Legierungselemente zugesetzt. So wird die spanende Bearbeitung auch auf Automaten möglich, wobei nur geringfügig abfallende Leitfähigkeiten akzeptiert werden müssen.

Die laufend erzielten Verbesserungen auf dem Werkstoff- und Werkzeug-

(Schneidstoff-) Sektor machen es heute den Herstellern schwer, Schnittwertempfehlungen oder Richtwerte über einen längeren Zeitraum vorzugeben. Die in dieser Arbeit vorgelegten Richtwerte sollen es ermöglichen, unterstützt bzw. überprüft durch einige spezifische Zerspanversuche, sich an optimale Spanungsbedingungen her-

anzutasten. Bei kleineren Produktionsmengen sollten die Richtwerte bereits genügen, um die Zerspanungsaufgaben zufriedenstellend zu lösen.

2. Allgemeine Grundlagen

Im Folgenden werden die Grundbegriffe der Zerspaltung hinsichtlich Schneidteilgeometrie, Werkzeugverschleiß und Spanbildung am Beispiel des Drehwerkzeugs erläutert. Sie gelten analog für jedes andere Zerspanungsverfahren mit definierter Schneide. Die Kenntnis der Grundbegriffe ist das Rüstzeug zum Verständnis der Zerspaltungseigenschaften von Kupfer und Kupferlegierungen.

2.1 Schneidteilgeometrie und ihr Einfluss auf den Zerspaltungsvorgang

Die grundlegenden Begriffe der Zerspaltungstechnik sind in DIN 6580, DIN 6581, DIN 6583 und DIN 6584 genormt. Die Flächen und Schneiden am Drehwerkzeug zeigt und erläutert Abb. 3.

2.1.1 Schneidteilgeometrie

Der Schneidteil eines spanenden Werkzeugs wird, wie Abb. 3 zeigt, aus Span-, Hauptfrei- und Nebenfriefläche gebildet. Durch die Stellung dieser Flächen zueinander werden die Werkzeugwinkel bestimmt.

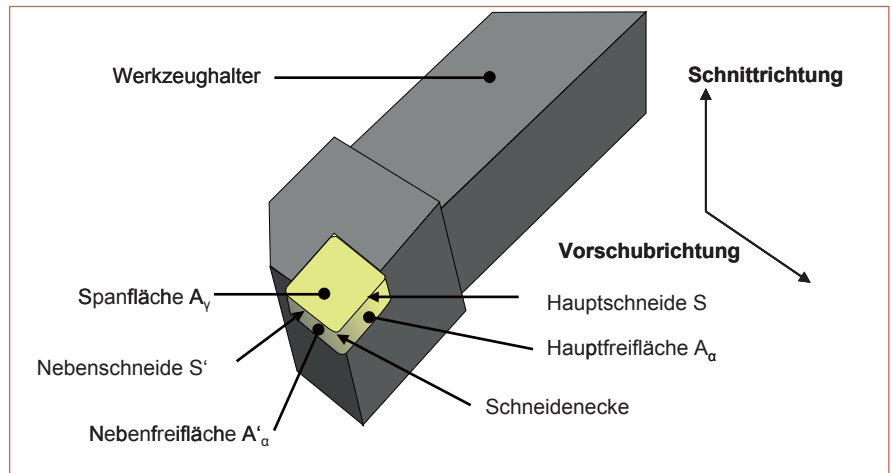


Abb. 3: Flächen, Schneiden und Schneidenecke am Drehmeißel (nach DIN 6581)

Um Begriffe und Winkel am Schneidteil zu erläutern, ist es hilfreich zwischen dem Werkzeug-Bezugssystem und dem Wirk-Bezugssystem zu unterscheiden (Abb. 4). Diese Systeme bauen auf unterschiedlichen, zueinander rechtwinkligen Bezugsebenen auf.

Dem Wirk-Bezugssystem liegen die während des Zerspaltungsvorganges auf-

tretenden Relativgeschwindigkeiten zwischen Schneidteil und Werkstück zugrunde. Die Wirk-Bezugsebene P_{re} geht durch einen ausgewählten Punkt auf der Schneide und ist senkrecht zur Wirktrichtung. Die Richtung der Wirktrichtung ergibt sich aus der Resultierenden von Schnitt- und Vorschubgeschwindigkeit.

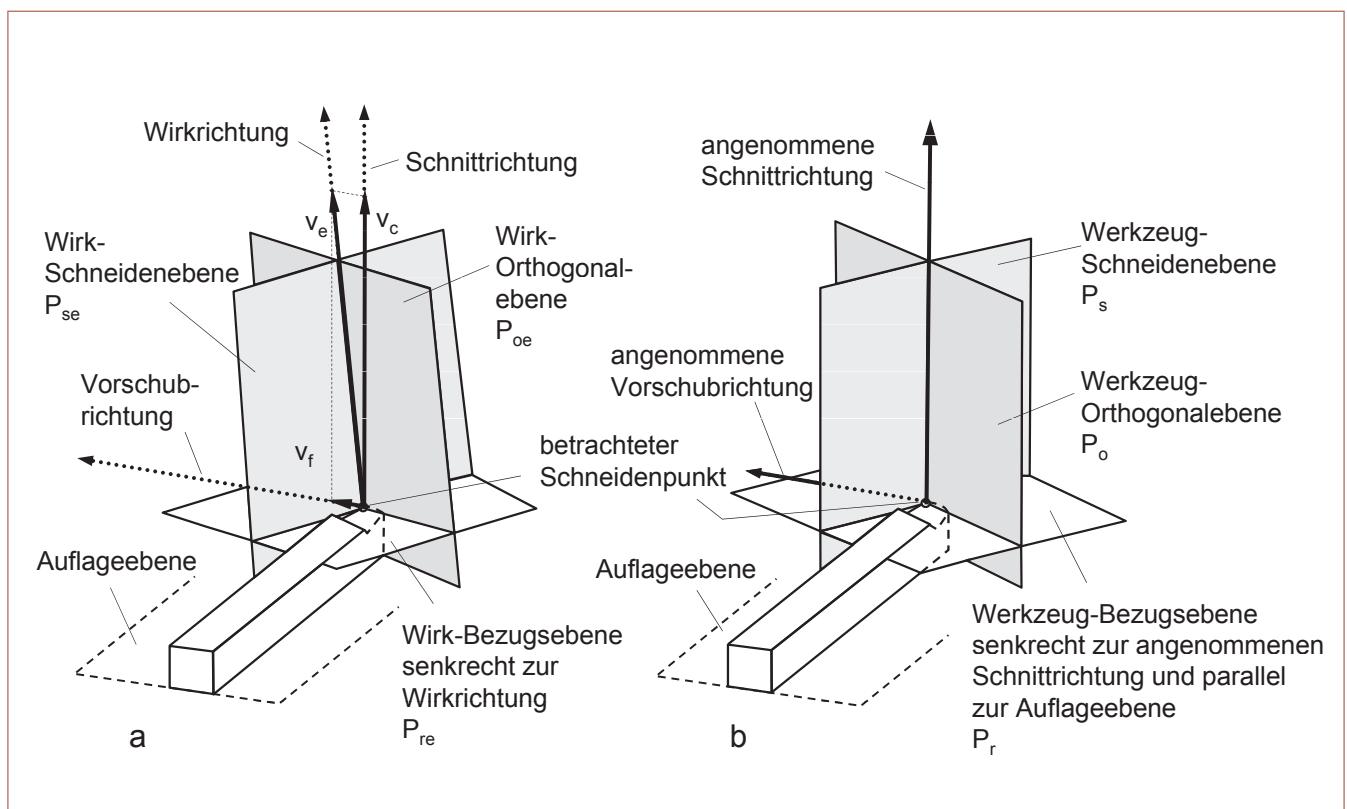


Abb. 4: (a) Wirk- und (b) Werkzeug-Bezugssystem (nach DIN 6581)

Im Werkzeug-Bezugssystem liegt die Werkzeug-Bezugsebene P_r parallel zur Auflagefläche des Werkzeugs. Die Werkzeugschneidenebene P_s verläuft tangential zur Werkzeugschneide und steht senkrecht auf der Werkzeug-Bezugsebene P_r . Die Messung der Scheidteilgeometrie erfolgt in der Werkzeug-Orthogonalebene P_o .

Diese verläuft durch den ausgesuchten Schneidpunkt, senkrecht zur Werkzeug-Bezugsebene P_r und senkrecht zur Werkzeug-Schneidenebene P_s .

Im Werkzeug-Bezugssystem gelten für die Winkel am Schneidkeil folgende Definitionen Abb. 5:

- Der Freiwinkel α_o liegt zwischen der Freifläche A_α und der Schneidenebene P_s gemessen in der Werkzeug-Orthogonalebene P_o .
- Der Keilwinkel β_o liegt zwischen der Freifläche A_α und der Spanfläche A_γ , gemessen in der Werkzeug-Orthogonalebene P_o .

- Der Spanwinkel γ_o liegt zwischen der Spanfläche A_γ und der Werkzeug-Bezugsebene P_r , gemessen in der Werkzeug-Orthogonalebene P_o .

Für diese drei Winkel gilt immer folgende Beziehung:

$$\alpha_o + \beta_o + \gamma_o = 90^\circ \quad (1)$$

- Der Einstellwinkel κ_r ist der Winkel zwischen der angenommenen Vorschubrichtung und der Werkzeug-Schneidenebene P_s , gemessen in der Bezugsebene P_r .

- Der Eckenwinkel ε_r ist der Winkel zwischen den Werkzeug-Schneidenebenen (P_s, P_s') von Haupt- und Nebenschneide, gemessen in der Bezugsebene P_r .

- Der Werkzeug-Neigungswinkel λ_s ist der Winkel zwischen der Hauptschneide S und der Werkzeug-Bezugsebene P_r , gemessen in der Werkzeug-Schneidenebene P_s .

Zur Darstellung der Begriffe und Winkel am Schneidteil wurde die Geometrie eines Drehmeißels gewählt, da sich die Größen hier am anschaulichsten zeigen lassen. Prinzipiell können die aufgeführten Definitionen auf alle Werkzeuge mit geometrisch bestimmter Schneide übertragen werden.

2.1.2 Einfluss der Schneidteilgeometrie auf den Zerspanungsvorgang

Für das Ergebnis der spanenden Bearbeitung und für die Standzeit der Werkzeuge ist die Wahl der Schnittwinkel von großer Bedeutung. Je mehr die Wirtschaftlichkeit der Bearbeitung im Vordergrund steht, desto wichtiger wird die Festlegung einer optimalen Schneidteilgeometrie. Die Stabilität des Schneidteils lässt sich durch zweckmäßige Schnittwinkel, Schneidfasen und Schneidkantenverrundungen erhöhen. Eine optimale Schneidkeilgeometrie ist unter Berücksichtigung der Anforderungen und Arbeitsbedingungen festzulegen.

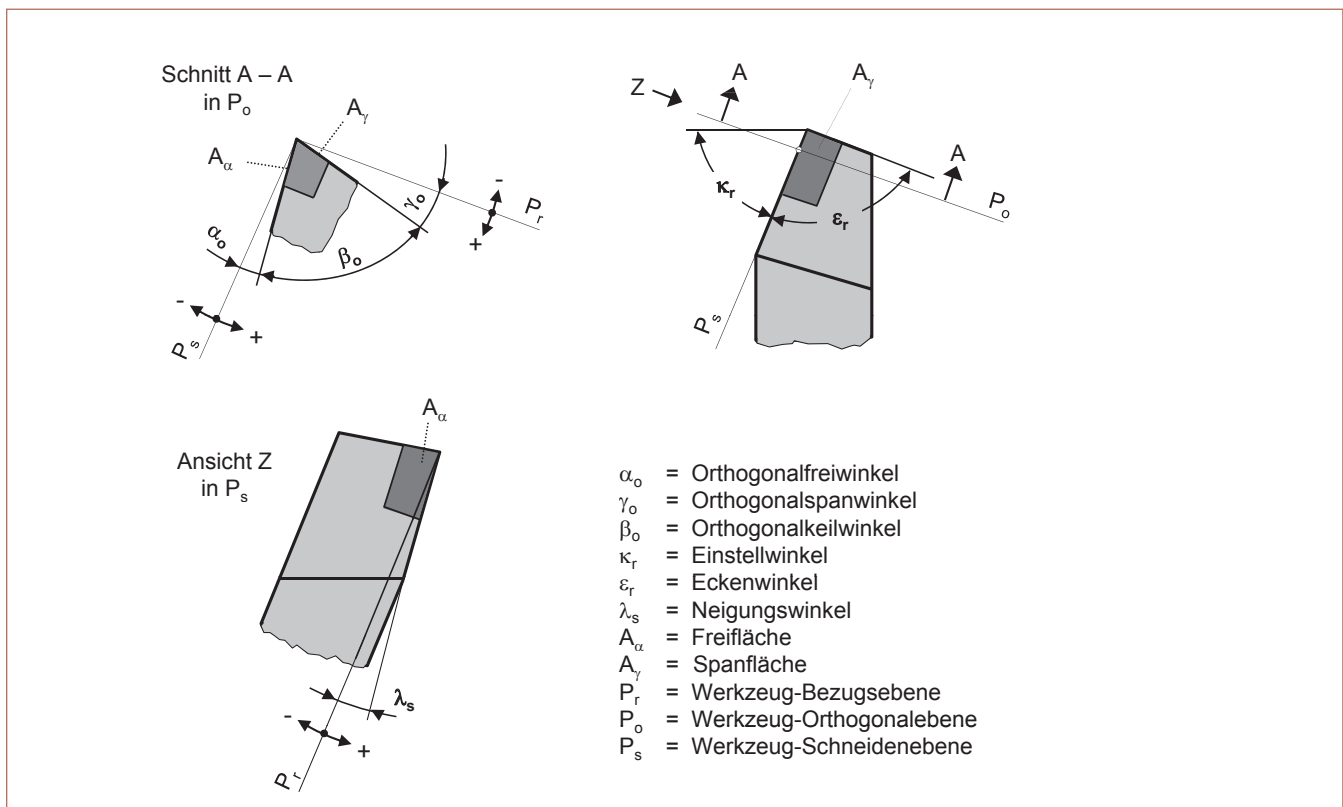


Abb. 5: Wichtigste Winkel am Schneidteil (nach DIN 6581)

Es ist zu beachten, dass alle Winkeländerungen am Werkzeug eine zweifache Wirkung ausüben. Werden Schneidkeilwinkel geändert, um die Stabilität des Schneidkeils zu erhöhen, so wird die Spanbildung beeinträchtigt und Schnittkräfte und Werkzeugverschleiß nehmen zu. Verbessert man die Spanbildung durch geänderte Winkel, so nimmt die Stabilität des Schneidkeils ab. Jede Festlegung eines Werkzeugwinkels stellt daher einen Kompromiss dar, der den verschiedenen Anforderungen nur bedingt gerecht wird. Nur so sind auch die in Richtwerttabellen gegebenen Empfehlungen zur Schneidkeilgeometrie zu verstehen. Die empfohlene Schneidkeilgeometrie muss immer dann nach betrieblichen Erfahrungen abgewandelt werden, wenn weitere Einflüsse berücksichtigt werden sollen. Für solche Fälle ist es

wichtig zu wissen, in welche Richtung Schnittwinkeländerungen die Zerspanbarkeitskenngrößen beeinflussen. Wegen großer Fortschritte auf dem Gebiet der Schneidstoffe haben heute jedoch Änderungen der Schneidkeilgeometrie mit dem Ziel, das Verschleißverhalten zu verbessern, nur noch untergeordnete Bedeutung. Im Vordergrund stehen Winkeländerungen zur Verbesserung der Spanbildung bzw. Spanabfuhr.

Für Kupferwerkstoffe liegen die Freiwinkel üblicherweise bei Schnellarbeitsstahl zwischen 6° und 8° und bei Hartmetall zwischen 8° und 10°. Dabei mindern große Freiwinkel den Freiflächenverschleiß und ermöglichen ein leichteres Eindringen des Schneidkeils in das Werkstück. Bei konstant gehaltener Verschleißmarkenbreite VB erhöhen kleine Vergrößerungen des

Freiwinkels die Standzeit der Schneide, da das Verschleißvolumen zunimmt. Für die Abtragung eines größeren Verschleißvolumens wird mehr Zeit gebraucht, sodass die Standzeit zunimmt. Die Möglichkeit der Vergrößerung des Freiwinkels wird jedoch durch die Schwächung des Schneidkeils begrenzt. Das führt zum Wärmestau in der Schneidenspitze und damit zur Gefahr des Schneidenausbruchs, auch das Widerstandsmoment gegen Biegung nimmt mit zunehmendem Freiwinkel stark ab.

Dem Spanwinkel γ_0 kommt von allen Werkzeugwinkeln die größte Bedeutung zu. Vom Spanwinkel hängt die Größe der Verformungs- und Trennarbeit bei der Spanbildung ab. Die Spanwinkel werden bei Kupferwerkstoffen im weiten Bereich zwischen 0° und 25° variiert.

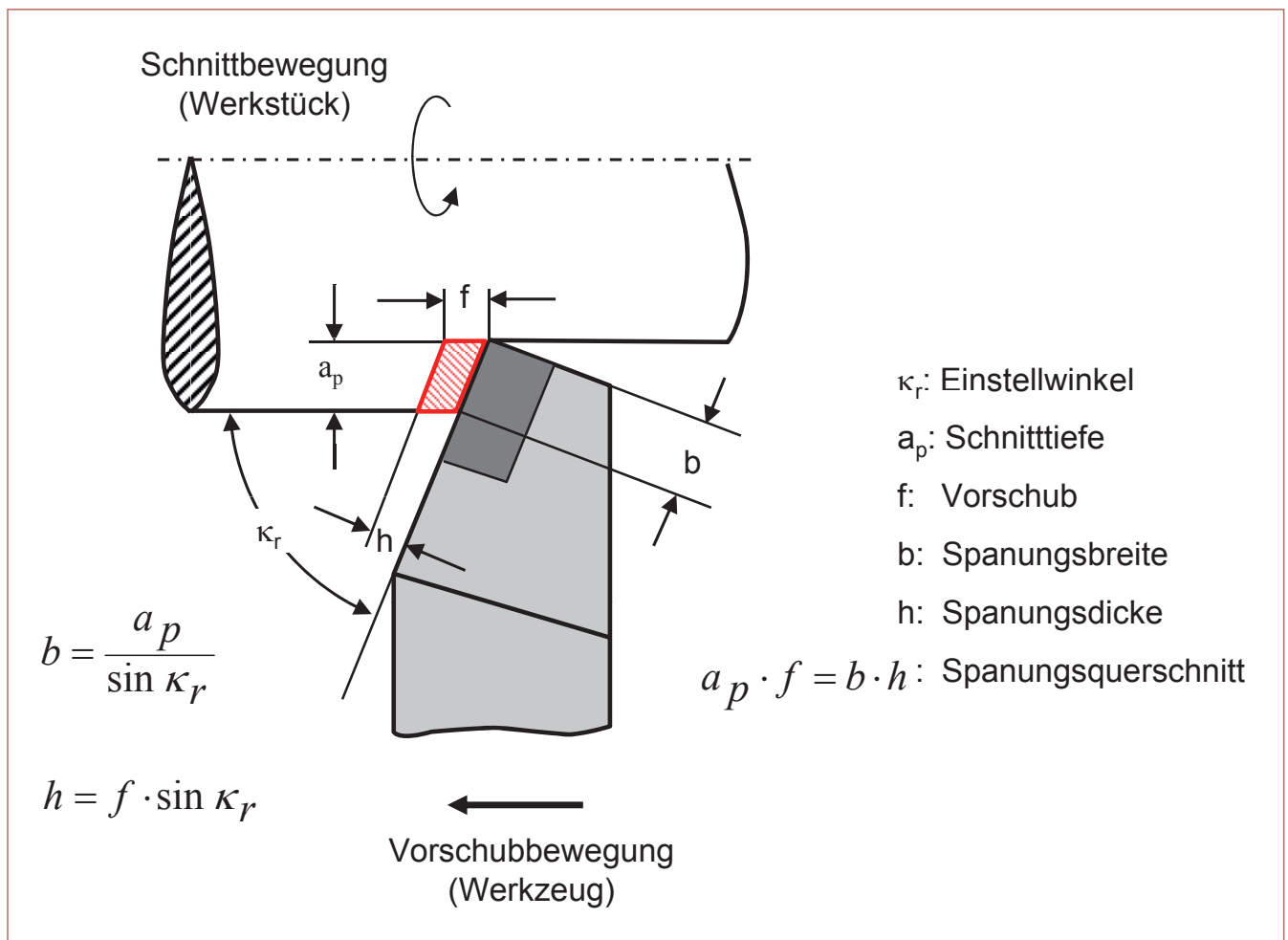


Abb. 6: Eingriffsverhältnisse beim Längs-Runddrehen (nach DIN 6580)

Die größten Spanwinkel werden dabei bei den weichsten Werkstoffen mit den niedrigsten Schnittkräften (Reinkupfer, CuZn10) für die spanenden Bearbeitungen mit Hartmetall gewählt, da nur bei diesen Werkstoffen die Schneiden nicht überlastet werden.

Je größer der Spanwinkel, umso geringer sind die Verformungs- und Trennarbeit und damit der Druck auf die Schneide. Die Schnittkräfte werden geringer und die Schneidentemperatur sinkt. Die Spanstauchung wird verringert, sodass die Oberflächenqualität zunimmt. Große Spanwinkel begünstigen den Spanfluss bei zähen Kupferwerkstoffen aber auch die Bildung von Band- und Wirrspänen.

Mit zunehmender spezifischer Schnittkraft, mit der Vergrößerung der

Spannungsdicke und mit abnehmender Biegefestigkeit des Schneidstoffs muss der Spanwinkel kleiner werden. Damit wird der Schneidkeil stabiler und die Gefahr eines Schneidenbruchs reduziert. Bei den Kupferwerkstoffen werden die kleinsten Spanwinkel bei der Zerspaltung hochfester Kupferwerkstoffe angewendet. Stabile Schneidkeile gestatten das Drehen mit höheren Schnittgeschwindigkeiten. Nachteilig ist jedoch, dass mit kleiner werdendem Spanwinkel die Schnittkräfte und damit auch die Antriebsleistung steigen.

Bei gegebenen Werten für Schnitttiefe a_p und Vorschub f sind die Spannungsbreite b und die Spannungsdicke h vom Einstellwinkel κ_r abhängig (Abb. 6). Kleine Einstellwinkel führen wie große Eckenradien bei labilen Werkstücken aufgrund hoher Passivkräfte leicht

zur Verformung und zu Ratterschwingungen. Meistens werden Kupfer und Kupferlegierungen mit großen Einstellwinkeln κ_r von 70° bis 95° spanend bearbeitet. Für schmierende Werkstoffe, wie reines Kupfer oder weiches CuZn10, werden Einstellwinkel von $\kappa_r = 90^\circ$ bevorzugt. Andererseits nimmt mit kleiner werdendem Einstellwinkel bei gleichbleibender Schnitttiefe die Spannungsbreite b zu; die Beanspruchung wird auf eine größere Schneidenlänge verteilt. Dementsprechend steigt die Werkzeugstandzeit, so dass die Schnittgeschwindigkeiten etwas gesteigert werden können. Die in den Richtwerttabellen genannten Zerspanungsdaten gelten für große Einstellwinkel von etwa 70° bis 90° .

Der Neigungswinkel λ_s (Abb. 5/Abb. 7) bietet ein einfaches Mittel, um die

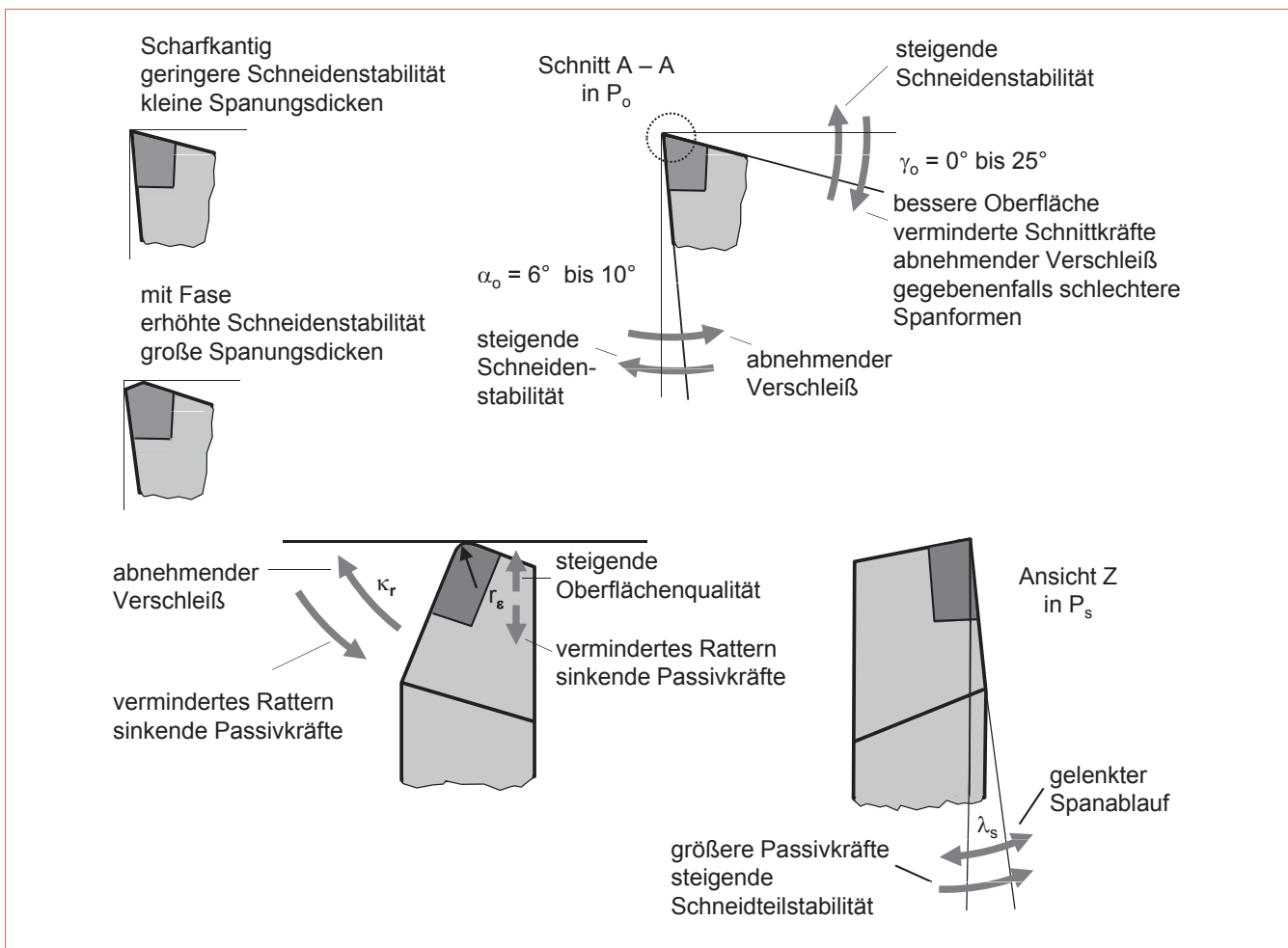


Abb. 7: Einfluss der Schneidengeometrie auf den Zerspanvorgang

Schneide beim unterbrochenen Schnitt zu stabilisieren und um den Spanablauf zu beeinflussen. Bei negativem Neigungswinkel erfolgt die erste Berührung zwischen Werkstück und Werkzeug oberhalb der Schneidenspitze, die als empfindlichster Teil der Schneide somit geschont wird. Da bei Kupferwerkstoffen mit hohen Stoßbelastungen der Schneide nicht zu rechnen ist, wird oft, insbesondere bei leichten Schnitten, mit $\lambda_s = 0^\circ$ gearbeitet. Negative Neigungswinkel werden für Schrappwerkzeuge und für unterbrochenen Schnitt bei hochfesten Kupferlegierungen bevorzugt. Da ein positiver Neigungswinkel den Spanablauf verbessert, werden zum Kleben oder zur Kaltverfestigung neigende Werkstoffe wie Reinkupfer mit positivem Neigungswinkel zerspannt. Der Eckenwinkel ε_r (Abb. 5/Abb. 7) wird von der Haupt- und Nebenschneide eingeschlossen. Seine Größe

hat großen Einfluss auf die Beanspruchbarkeit der Schneidenecke. Je kleiner der Eckenwinkel, umso geringer ist die mechanische Belastbarkeit der Schneide. Zudem wird die entstehende Zerspanwärme schlechter aus der Schneidenecke abgeleitet, so dass insgesamt die thermische Belastung des Werkzeuges steigt. Der Eckenwinkel sollte so groß wie möglich sein. Für die meisten spanenden Bearbeitungen an Kupferwerkstoffen beträgt er 90° . Bei der Bearbeitung rechteckiger Ecken muss der Eckenwinkel jedoch $< 90^\circ$ gewählt werden. Einstell- und Eckenwinkel müssen oft als Kompromiss festgelegt werden.

Die Größe des Eckenradius r_ε (Abb. 5/Abb. 7) muss auf die Bearbeitungsaufgabe abgestimmt sein. Ist der Eckenradius zu klein, bricht die Schneidenecke schneller aus. Kleine Eckenradien sind also der Feinbearbeitung vorbehalten.

Wird der Eckenradius zu groß gewählt, so neigt das Werkzeug zum Schaben der Nebenschneide auf der Werkstückoberfläche, so dass an der Freifläche der Nebenschneide Verschleißkerben entstehen, Abb. 8, die die Oberflächenqualität nachteilig beeinflussen können. Für den Eckenradius r_ε gibt es einen Optimalwert, der abhängig von der Spanungsdicke h , das heißt abhängig vom Vorschub f , ist. Der Eckenradius r_ε sollte im Allgemeinen das 1,2 bis 2-fache, bei Kupfer weniger als das 1,5-fache des Vorschubes betragen.

Für weiche Kupferwerkstoffe, wie z.B. CuSn2, hängt die Oberflächengüte entscheidend vom Eckenradius r_ε ab. Kleinere Eckenradien verbessern bei sehr zähen Werkstoffen den Trennvorgang im Bereich der Nebenschneide. Der Werkstoff wird durch die größere Mindestspanungsdicke besser getrennt und schmiert weniger. Dadurch

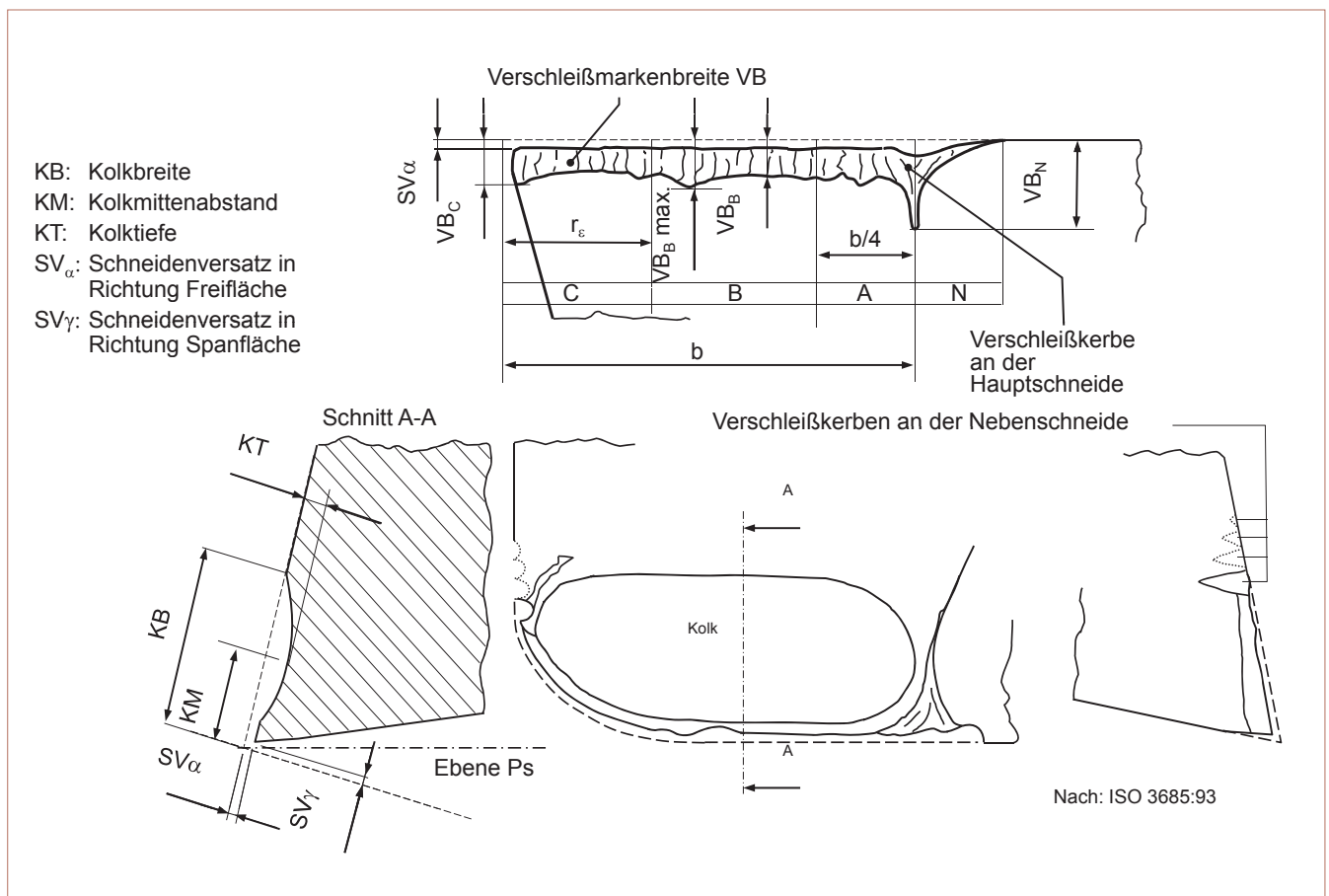


Abb. 8: Verschleißformen und Verschleißmessgrößen am Schneidteil (nach ISO 3685)

werden die Schnittflächenrauheit und die Oberflächenqualitäten verbessert. In der Regel führen größere Eckenradien bei konstantem Vorschub zur Ausbildung flacherer Vorschubmulden auf dem Werkstück. Die kinematische Rauheit nimmt ab und die Oberflächenqualität, ausgedrückt durch die Oberflächenkennwerte R_a und R_z , wird verbessert. Diesen Effekt macht man sich bei der sog. Wiper-Geometrie zu nutzen. Bei Platten mit dieser Geometrie schließen sich im Bereich der Nebenschneide an den Eckenradius mehrere größere Radien an. Im Vergleich zu Platten mit konventionellem Eckenradius erzeugen Wiper-Platten bei konstantem Vorschub bessere Oberflächenkennwerte bzw. können zur Erzielung gleicher Oberflächenkennwerte bei höhern Vorschüben eingesetzt werden [5].

2.2 Verschleiß am Schneidteil

Während des Zerspanprozesses treten in Abhängigkeit von der Belastung an den Werkzeugen unterschiedlich stark ausgeprägte Verschleißerscheinungen auf. Betroffen hiervon sind die Zonen, mit denen das Werkzeug mit dem Werkstück an Frei- und Nebenfreifläche und mit dem ablaufenden Span auf der Spanfläche in Kontakt steht. Mit zunehmendem Verschleiß steigt in der Regel die mechanische und thermische Belastung der Werkzeugschneide an. Bei Werkzeugstahl kommt es bei 300° und bei Schnellarbeitsstahl bei ca. 600° in Folge von Anlassvorgängen im Schneidstoff zum Verlust der Schneidstoffhärte und zu einem plötzlichen Versagen der Werkzeugschneide durch sog. Blankbremsen. Bei Hartmetallen, die bei 1000°C noch die gleiche Härte wie Schnellarbeitsstahl bei Raumtemperatur aufweisen, tritt vorwiegend abrasiver Verschleiß an der Schneide auf. In der Praxis wird in

erster Linie die Verschleißausbildung an der Freifläche und auf der Spanfläche als Kriterien zur Beurteilung der Werkzeugstandzeit herangezogen. Die Verschleißausbildung an der Freifläche wird als Verschleißmarkenbreite VB bezeichnet. Dabei gilt ein Werkzeug als verschlissen und damit am Ende seiner Arbeitsfähigkeit, wenn eine vorgegebene Verschleißmarkenbreite VB erreicht ist (Abb. 8). Die Größe der zulässigen Verschleißmarkenbreite hängt von den Anforderungen an das Werkstück ab. Dabei führt eine große Verschleißmarkenbreite VB zu einem großen Schneidkantenversatz SV_γ und damit zu Maßungenaugigkeiten. Ferner resultieren aus der größeren Reibfläche zwischen Schneide und Werkstück eine Verschlechterung der Oberflächengüte und eine erhöhte Schnitttemperatur. Bei Zerspanungsarbeiten auf Drehautomaten werden für Hartmetalle Verschleißmarkenbreiten von maximal $0,2\text{ mm}$, für Schruppbearbeitungen

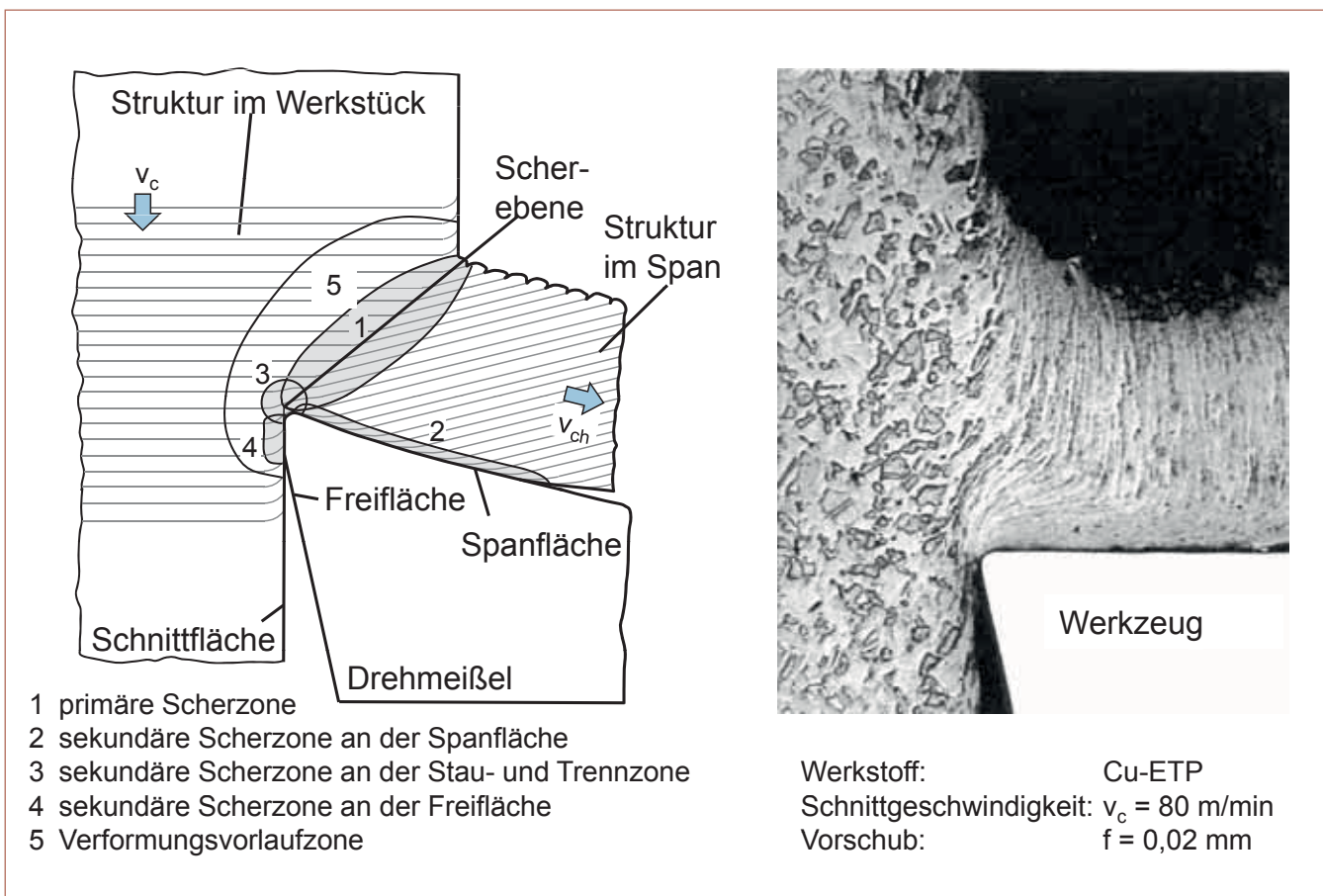


Abb. 9: Wirkzonen bei der Spanentstehung [6]

je nach Bauteildurchmesser, einzu- haltender Toleranz und geforderter Oberflächengüte von 0,4 bis 0,6 mm vorgegeben (Abb. 8). Bei der Schwer- zerspanung mit Vorschüben von 1,0 – 1,8 mm und Schnitttiefen von 10 – 20 mm treten durchaus Ver- schleißmarkenbreiten von 1 mm und mehr auf. Der sich auf der Spanfläche ausbildende Verschleiß (Abb. 8) hat im Allgemeinen gegenüber dem Freiflä- chenverschleiß eine geringere Bedeu- tung und wird durch das Kolkverhält- nis $K = KT/KM$ angegeben. K ist ein Maß für die Schwächung des Schneidkeils infolge der Auskolkung der Spanfläche und sollte den Wert $K = 0,1$ nicht wesentlich überschreiten.

2.3 Spanbildung

Die Spanbildung und eine gute Spanabfuhr sind wichtig für Bear- beitungsverfahren, bei denen der

Spanraum begrenzt ist. Das betrifft beispielsweise Verfahren wie Bohren, Räumen und Fräsen sowie alle Zersp- anungsarbeiten auf Drehautomaten. Die Vorgänge der Spanbildung sind am einfachsten zu sehen, wenn der Orthogonalschnitt der Fließspanbil- dung betrachtet wird. Dabei läuft die Spanbildung als zweidimensionaler Vorgang in einer Ebene senkrecht zur Schneide ab, wie Abb. 9 bildlich und schematisch zeigt.

Beim Zerspanungsvorgang dringt die Schneide in den Werkstoff ein, der dadurch elastisch und plastisch verformt wird. Nach Überschreiten der werkstoffabhängigen maximal zulässi- gen Schubspannung in der Scherzone beginnt der Werkstoff zu fließen. In Abhängigkeit von der Schneidkeil- geometrie bildet sich der verformte Werkstoff zu einem Span aus, der über die Spanfläche abläuft.

Durch Reibung zwischen den Kon- takflächen der Schneide und der Spanunterseite bzw. der neu entstan- denen Werkstückoberfläche werden in den sekundären Scherzonen (Abb. 9) Schubspannungen wirksam. Diese führen zu einer plastischen Verformung in den sekundären Scherzonen und damit zur Spanstauchung. Dabei geht die Spannungsdicke h in die Spandicke h_{ch} (Spannungsdickenstauchung) und die Spannungsbreite b in die Spanbreite b_{ch} (Spanbreitenstauchung) über.

Spandickenstauchung: $\frac{h_{ch}}{h} > 1$ (2)

Spanbreitenstauchung: $\frac{b_{ch}}{b} > 1$ (3)

Es lassen sich grundsätzlich vier Spanarten unterscheiden: Fließspan, Lamellenspan, Scherspan und Reißspan (Abb. 10).

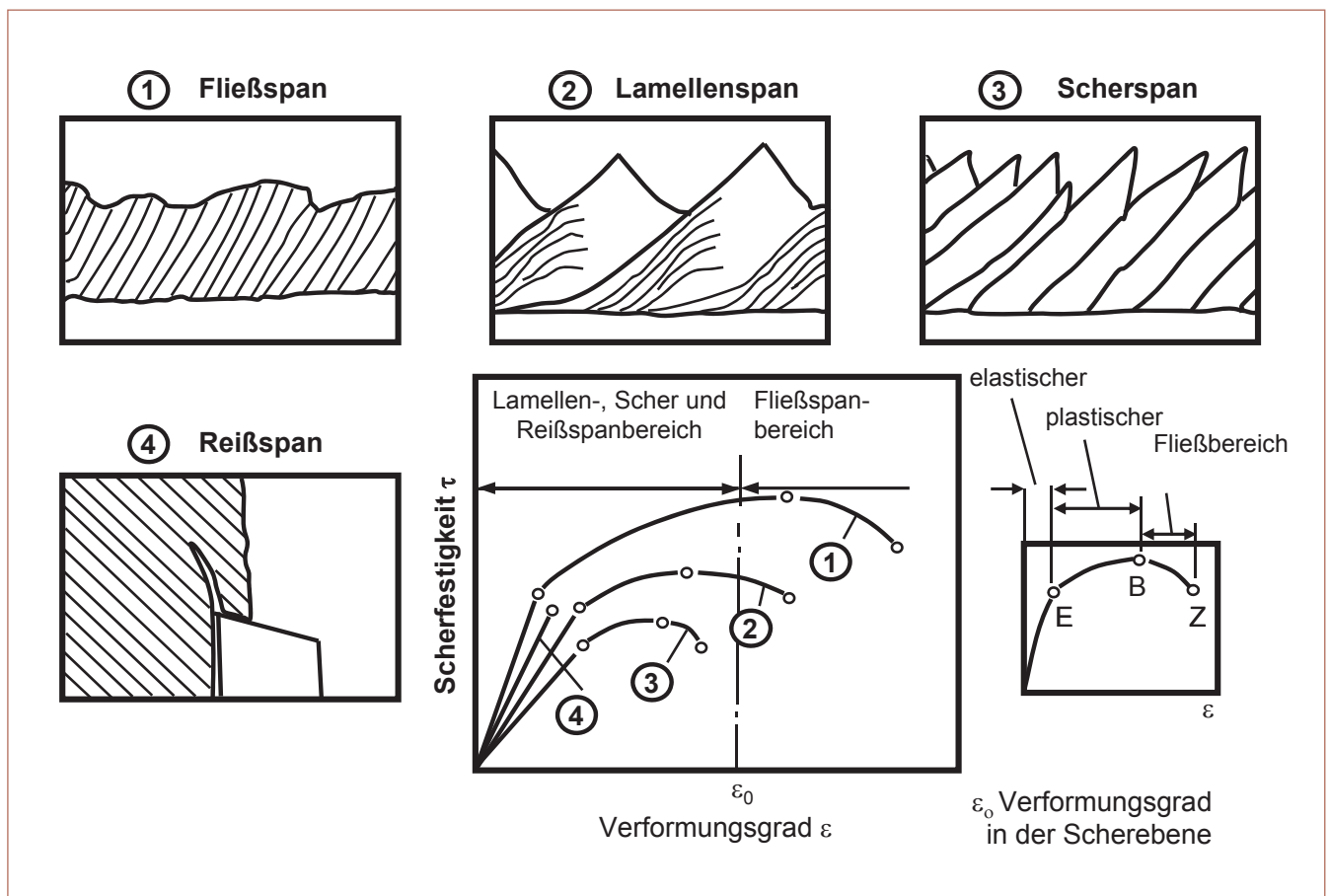


Abb. 10: Spanarten in Abhängigkeit von den Werkstoffeigenschaften [7]

Beim Fließspan fließt der Werkstoff stetig ab. Die einzelnen Spanlamellen sind zwar gegeneinander verschoben, ohne dass jedoch die Scherfestigkeit überschritten wird.

Fließspäne entstehen bei der spanabhebenden Bearbeitung von Werkstoffen mit ausreichendem Formänderungsvermögen, sofern der Zerspanungsvorgang nicht durch äußere Schwingungen beeinträchtigt wird.

Bei Werkstoffen mit geringerem Formänderungsvermögen oder ungleichmäßigem Gefüge oder äußeren Schwingungen entstehen Lamellenspäne. Die Spanoberseite zeigt im Vergleich zum Fließspan eine ausgeprägte Lamellenbildung. Lamellenspäne können sowohl bei hohen Vorschüben als auch bei hohen Schnittgeschwindigkeiten entstehen.

Scherspäne bestehen dagegen aus Spanteilen, die in der Scherzone vollständig getrennt waren. Diese Spanart entsteht, wenn die Verformung in der Scherzone das Formänderungsvermögen des Werkstoffs übersteigt. Das gilt

nicht nur bei spröden Werkstoffen, sondern auch dann, wenn die Verformung Versprödungen im Gefüge hervorruft. Scherspäne können auch bei extrem niedrigen Schnittgeschwindigkeiten entstehen.

Reißspäne entstehen meist beim Spanen von spröden Werkstoffen mit ungleichmäßigem Gefüge. Die Späne werden nicht abgetrennt, sondern von der Oberfläche abgerissen, wodurch die Werkstückoberfläche häufig durch kleine Ausbrüche beschädigt wird.

Bei der spanenden Bearbeitung von Werkstoffen mit hohem Formänderungsvermögen, also bei duktilen Werkstoffen wie z.B. Cu-ETP, Cu-DHP kann sich bei niedrigen Schnittgeschwindigkeiten am Werkzeug eine sogenannte Aufbauschneide (ABS) bilden. Aufbauschneiden sind hochverfestigte Schichten aus dem Werkstoff, die sich an der Schneide festsetzen, ihre Funktion übernehmen und der Schneide eine irreguläre Form verleihen. Je nach Schnittbedingungen gleiten Aufbauschneiden periodisch zwischen Freifläche und

Schnittfläche oder mit dem Span ab. Die Oberflächengüte des Werkstücks wird verschlechtert, der Werkzeugverschleiß steigt an, die Maßhaltigkeit des bearbeiteten Werkstücks nimmt ab und die dynamischen Schnittkraftanteile nehmen zu.

Das Auftreten von Aufbauschneiden ist temperaturabhängig. Bei der Zerspanung von Kupfer und hochkupferhaltigem Werkstoff erfolgt die ABS-Bildung stets in einem bestimmten Bereich von Schnittgeschwindigkeit v_c und Spanungsdicke h . Sie ist ferner von der Größe des Spanwinkels abhängig. Daraus ergibt sie die Möglichkeit zur Abhilfe: Größere Spanungsdicke h wählen, Schnittgeschwindigkeit v_c erhöhen und/oder den Spanwinkel γ vergrößern. Ist das nicht möglich so ist v_c solange herabzusetzen, bis die untere Grenze für die Aufbauschneidenbildung unterschritten ist (z. B. Reiben, Gewindebohren). Im letzteren Fall sollte für eine möglichst intensive Kühlschmierung des Werkzeugs gesorgt werden.

3. Der Begriff Zerspanbarkeit

Unter dem Begriff Zerspanbarkeit werden die Eigenschaften eines Werkstoffs zusammengefasst, die die spanende Bearbeitung eines Werkstücks nach verschiedenen Zerspanungsverfahren bestimmen. Dieser Begriff ist nicht eindeutig. Die Zerspanbarkeit eines Werkstoffs kann je nach Schneidstoff, Schneidkeilgeometrie, Zerspanungsverfahren, verwendeter Maschine und anderen Zerspanbedingungen sehr unterschiedlich sein. Das Hauptziel einer Zerspanaufgabe ist die Herstellung eines geometrisch einwandfreien Werkstücks. Die Bewertung nach einem einheitlichen Zerspanbarkeitskriterium ist wegen der komplexen Zusammenhänge nicht möglich.

Zur Beurteilung der Zerspanbarkeit von Kupfer und Kupferlegierungen werden die vier Zerspanbarkeitskriterien Werkzeugverschleiß, Spanbildung, Zerspanungskräfte und Oberflächengüte verwendet. Trotz der gegenseitigen Abhängigkeit der einzelnen Größen ist wegen der zusätzlichen Einflüsse von Werkstoffzustand, Zerspanverfahren, Maschine, Werkzeug und Schmier- bzw. Kühlmitteln die Bildung eines einzigen und eindeutigen Zerspanbarkeitskriteriums nicht möglich.

Unter Werkzeugverschleiß versteht man den fortschreitenden Materialverlust aus der Werkzeuoberfläche. Die Vorgänge, die bei der Zerspanung zur Verschleißausbildung führen, sind Abrasion, Adhäsion, Verzunderung, Diffusion, thermomechanische Überlastung und Oberflächenzerrüttung.

Der Spanbildung und damit der Spanform kommt im Hinblick auf eine gute Spanabfuhr, eine hohe Prozesssicherheit und hohe Produktivität eine herausragende Bedeutung zu. Dies gilt vor allem für solche Bearbeitungsverfahren, bei denen der Spanraum begrenzt ist. Das ist beim Spanen mit gehemtem Spanfluss, z. B. beim Bohren, Gewindebohren, Einstechen, Räumen, Nutfräsen und allen Zerspanungsarbeiten auf Automaten der Fall. Lange Band- und Wendespäne sind schwieriger aus dem Arbeitsbereich abzuführen als kurze Spiralspäne, Spanlocken und Bröckelspäne. Sie können Späneknäuel im Maschinenraum

bilden, damit Prozessstörungen und Beschädigungen an Werkstück und Werkzeug verursachen. Sie können das Bedienungspersonal an den Maschinen gefährden. Band- und Wirrspäne müssen meist manuell von Werkzeug oder Werkstück entfernt werden. Dies führt zu Maschinenstillstandszeiten und verringert die Produktivität. Die Bildung langer Band- und Fließspäne, die zur Bildung von Wirrspänen neigen, sollte daher nach Möglichkeit unter allen Umständen vermieden werden. Aber auch sehr feine Nadelspäne können Probleme bereiten. Sie können die KSS-Filter verstopfen oder unter Maschinenabdeckungen gelangen und dort verstärkten Verschleiß verursachen.

Die Zerspanungskräfte bestimmen die erforderliche Antriebsleistung und die Steifigkeit der Maschine. Sie haben einen erheblichen Einfluss auf den Werkzeugverschleiß und damit auf die Standzeit der Werkzeuge. Im Allgemeinen treten bei der Bearbeitung schwerer zerspanbarer Werkstoffe auch höhere Kräfte auf. Tendenziell nehmen die Zerspankräfte mit steigender Schnittgeschwindigkeit ab. Die Ursache hierfür ist darin zu sehen, dass mit steigender Schnittgeschwindigkeit die Zerspantemperatur zunimmt, was wiederum eine Abnahme der Werkstofffestigkeit zur Folge hat. Die Zerspankraftkomponenten steigen über der Schnitttiefe proportional und mit zunehmendem Vorschub degressiv an.

Bei der spanenden Bearbeitung von Kupfer und Kupferlegierungen wird oft neben guter Maßhaltigkeit eine hohe Oberflächengüte gefordert. Die erreichbare Güte der erzeugten Fläche (Rauheit) am Werkstück ist in vielen Fällen das wichtigste Zerspanbarkeitskriterium.

Die Gewichtung der vier Hauptbewertungskriterien zur Beurteilung der Zerspanbarkeit richtet sich nach dem Ziel der Bearbeitungsaufgabe. So kommt z.B. bei der Schruppbearbeitung dem Werkzeugverschleiß, gefolgt von den Zerspanungskräften und der Spanform bzw. Spanbildung, die größte Bedeutung zu. Beim Schlichten kommt es dagegen mehr auf die erreichbare

Oberflächengüte und in zweiter Linie auf die Spanform und Spanausbildung an. Bei Zerspanungsarbeiten auf Drehautomaten kann dagegen die Spanform und Spanbildung allein für die Beurteilung der Zerspanbarkeit eines Werkstoffs ausschlaggebend sein.

3.1 Bewertungsgröße Standzeit

Unter der Standzeit T wird die Zeit in Minuten verstanden, während der ein Werkzeug unter gegebenen Zerspanbedingungen vom Anschnitt bis zum Unbrauchbarwerden aufgrund eines vorgegebenen Standzeitkriteriums Zerspanarbeit leistet.

Die Standzeit ist von zahlreichen Einflüssen abhängig, insbesondere von:

- dem zu zerspanenden Werkstoff,
- dem Schneidstoff,
- der Schnittgeschwindigkeit, dem Vorschub und der Schnitttiefe,
- der Schneidkeilgeometrie,
- der Schneidengüte,
- den Schwingungen und Ungenauigkeiten von Werkstück, Werkzeug
- und Bearbeitungsmaschine,
- dem Standzeitkriterium, d.h. dem zulässigen Verschleiß an der Schneide, meist bestimmt als Verschleißmarkenbreite VB.

Von den Schnittdaten hat die Schnittgeschwindigkeit den größten Einfluss auf den Verschleiß. Der Einfluss des Vorschubs auf den Verschleiß und damit auf die Standzeit ist noch deutlich. Bei der Schnitttiefe ist ein Einfluss vorhanden, aber sehr gering.

Die Abhängigkeit der Standzeit von der Schnittgeschwindigkeit lässt sich als Standzeitkurve darstellen. In einem doppeltlogarithmischen Koordinatensystem gleicher Teilung wird auf der Abszisse die Schnittgeschwindigkeit v_c in m/min und auf der Ordinate die Standzeit T in min aufgetragen, Abb.11.

Die sich ergebende Kurve lässt sich über einen großen Bereich durch eine Gerade, die sogenannte Standzeit-Gerade oder „Taylor-Gerade“ annähern, die sich ausgehend von der Geradengleichung

$$y = m \cdot x + n \quad (4)$$

unter Berücksichtigung der doppellogarithmischen Darstellung wie folgt darstellt:

$$\log T = \log C_v + k \cdot \log v_c \quad (5)$$

Nach dem Entlogarithmieren ergibt sich dann die sog. "Taylor-Gleichung"

$$T = v_c^k \cdot C_v \quad (6)$$

Darin bedeuten:

T: die Standzeit in min

v_c : die Schnittgeschwindigkeit in m/min

k: die Steigung der Geraden im Standzeitdiagramm ($k = \tan \alpha$)

C_v : die Standzeit T für $v_c = 1$ m/min.

Durch Umstellen der Taylor-Gleichung ergibt sich

$$v_c = T^{\frac{1}{k}} \cdot C_T \quad (6a)$$

dabei ist

$$C_T = C_v^{-\frac{1}{k}} \quad (7)$$

C_T , C_v und k sind kennzeichnende Größen der Schnittbedingungen, die sich mit dem Werkstoff, dem Schneidstoff, der Schneidkeilgeometrie, dem Spanungsquerschnitt und dessen Aufteilung in Vorschub und Schnitttiefe usw. ändern (nach VDI Richtlinie 3321).

Der Exponent k, das Maß der Steigung der Geraden, ist besonders wichtig für die Praxis. Er drückt die Veränderungen der Standzeit in Abhängigkeit von der Schnittgeschwindigkeit v_c aus.

Je größer die Neigung der Geraden ist, also je kleiner der Neigungswinkel ist, desto mehr verändert sich die Standzeit mit der Schnittgeschwindigkeit. Bei niedrigen Schnittgeschwindigkeiten wird der geradlinige Verlauf der Standzeitbeziehung dadurch gestört, dass sich Aufbauschneiden an der Werkzeugschneide bilden.

Für die Belange der Praxis ist die einfache Taylor-Gleichung meist völlig ausreichend. Diese recht einfach zu handhabende Standzeitbeziehung besitzt allerdings keine allgemeine Gültigkeit. So werden z.B. beim Fräsen Standzeitbeziehungen gefunden, die sich nur in Ausnahmefällen mit „Taylor“ annähern lassen.

Es gibt daher noch die sog. erweiterten Taylor-Gleichungen, die weitere – die Standzeit eines Werkzeuges beeinflussende – Größen berücksichtigen. Ein Beispiel hierfür ist die den Vorschub und die Schnitttiefe enthaltende erweiterte Taylor-Gleichung

$$T = \frac{C_1}{a_p^{c_a} \cdot f^{c_f} \cdot v_c^{-k}} \quad (8)$$

Mit:

T Werkzeugstandzeit in min

v_c Schnittgeschwindigkeit in m/min

f Vorschub (pro Umdrehung) in mm

a_p Schnitttiefe in mm

k die Steigung der Geraden im Standzeitdiagramm ($k = \tan \alpha$)

C_1 dimensionsbehaftete, empirisch ermittelte Konstante

c_a dimensionslose Konstante: Exponent der Schnitttiefe

c_f dimensionslose Konstante: Exponent des Vorschubs

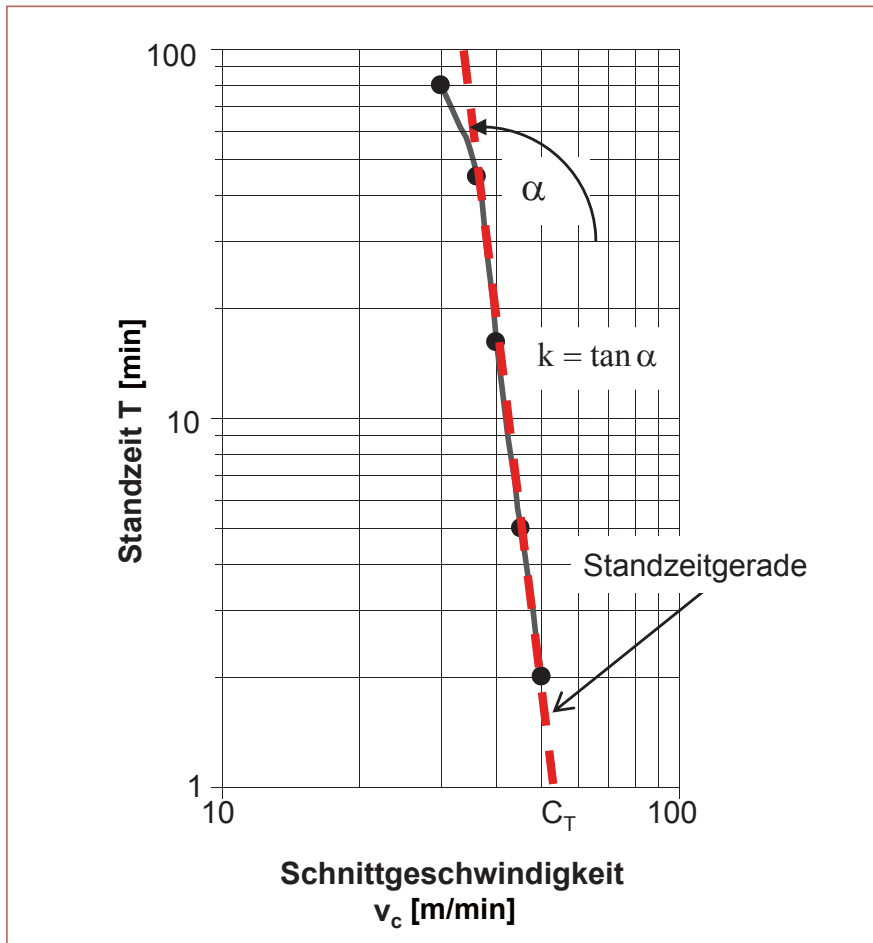


Abb. 11: Standzeit-Schnittgeschwindigkeits-Diagramm im doppellogarithmischen System mit Standzeit bzw. Taylor-Geraden

Den Einflüssen entsprechend ist der Exponent $-k$ relativ groß, während C_a und insbesondere C_f nur kleine Werte annehmen. In der Zahlenwertgleichung ist C_1 eine dimensionsbehaftete Konstante, die von Werkstoff, Schneidstoff und Zerspanungsverfahren abhängt.

3.2 Zerspankraft

Zur Beurteilung der Zerspanbarkeit eines Werkstoffs wird als weitere Kenngröße die entstehende Zerspankraft herangezogen. Die Kenntnis der Zerspankräfte ist Grundlage für die Werkzeugmaschinen-, die Werkzeug- und die Vorrichtungskonstruktion. Außerdem erlaubt die Kenntnis der Zerspankräfte, anfallende Zerspanauf-

gaben leistungsgerecht auf vorhandene Werkzeugmaschinen zu verteilen. Dabei genügt für den Betrieb im Allgemeinen eine überschlägige Abschätzung der Zerspankräfte, um z. B. die erforderliche Leistung zu errechnen oder das Werkzeugspannsystem zu dimensionieren.

Die Zerspankraft F kann, wie in Abb. 12 dargestellt, in drei Komponenten – in die Schnittkraft F_c , die Vorschubkraft F_f und die Passivkraft F_p – zerlegt werden. Die Bezeichnung der Kraftkomponenten erfolgt dabei nach der DIN 6584 „Begriffe der Zerspantechnik – Kräfte, Energie, Arbeit, Leistungen“.

Die für die Zerspanung erforderliche Maschinenleistung wird maßgeblich

durch die Schnittkraft F_c beeinflusst.

Nach Kienzle und Victor lässt sich die Schnittkraft F_c wie folgt berechnen:

$$F_c = k_{c1.1} \cdot b \cdot h^{(1-m_c)} \quad (9)$$

Mit:

F_c Schnittkraft in N

b Spanungsbreite in mm

h Spanungsdicke in mm

m_c dimensionsloser Anstiegswert der spezifischen Schnittkraft

$1-m_c$ Steigung der Geraden $F_c' = f(h)$ im doppeltlogarithmischen System

$k_{c1.1}$ spezifische Schnittkraft in N/mm² für $b = h = 1$ mm

wobei $h^{(1-m_c)}$ mit der Dimension mm einzusetzen ist. Für die Zerspankraftkomponenten F_f und F_p lassen sich entsprechende Gleichungen definieren.

Die graphische Bestimmung der spezifischen Schnittkraft $k_{c1.1}$ bzw. der werkstoffabhängigen Faktoren m_c oder $(1-m_c)$ entsprechend Abb. 13 ist in der Literatur [8,9,10] detailliert beschrieben. Neben den direkt in das Spankraftgesetz eingehenden Parametern müssen aus Gründen der Übersichtlichkeit weitere Einflussgrößen wie Spanwinkel γ , Schnittgeschwindigkeit v_c , Werkzeugverschleiß und Werkstückform unberücksichtigt bleiben bzw. werden in den sog. erweiterten Victor-Kienzle-Gleichungen durch Korrekturfaktoren berücksichtigt.

Beim Drehen mit Hartmetall haben neben der Spanungsdicke h praktisch nur der Spanwinkel γ , der Neigungswinkel λ_s und der Werkzeugverschleiß Einfluss auf die Größe der spezifischen Schnittkraft. Man rechnet bei zunehmendem, d.h. positiver werdendem Spanwinkel γ mit einer Abnahme der spezifischen Schnittkraft k_c von 1,5 % je Grad Winkeländerung. Diese Angabe gilt für einen Bereich von ± 10 % des ursprünglich der Messung zugrunde liegenden Spanwinkels. Größeren Einfluss hat der Verschleiß.

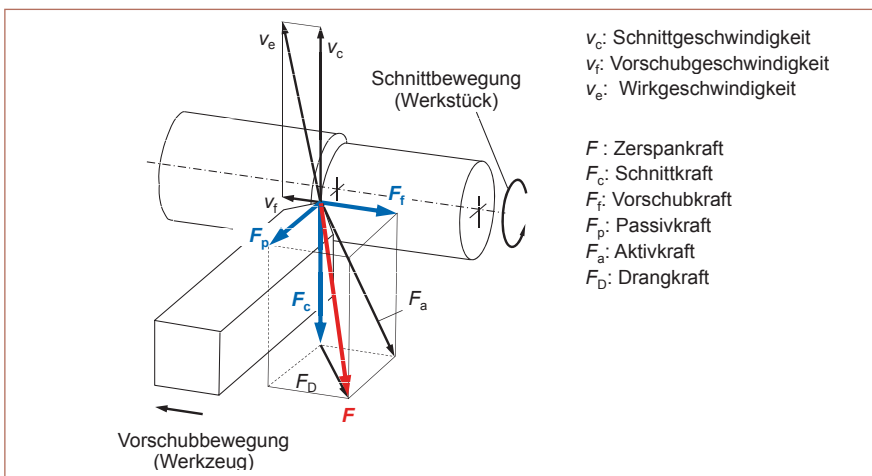


Abb. 12: Zerlegung der Zerspankraft (nach DIN 6584)

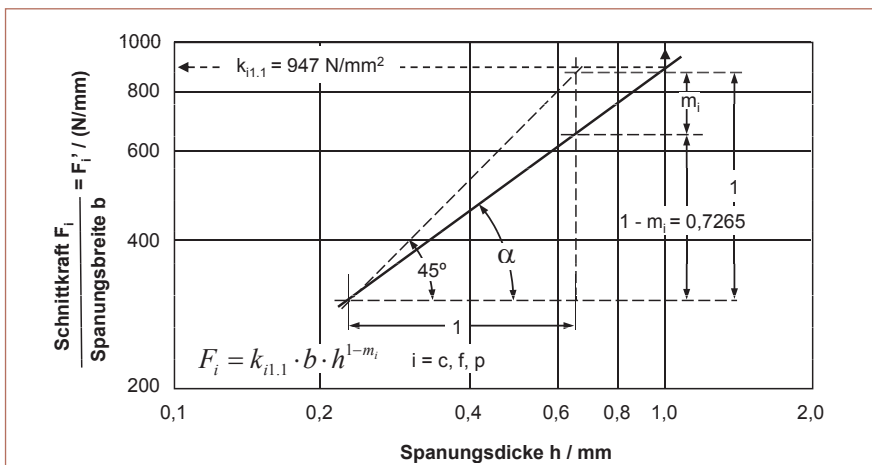


Abb. 13: Graphische Ermittlung der Kennwerte $k_{i1.1}$ und $(1-m_c)$ mit $i = c, f$ oder p [8]

Die Kennwerte der mechanischen Eigenschaften der Knetwerkstoffen in den folgenden Tabellen sind hauptsächlich von Stangenprodukten nach DIN EN 12164-1998-09, DIN EN 12163:1998-04,

DIN EN 13601-2002-10, DIN EN 12166:1998-04, Bandprodukten nach DIN EN 1652-1997-03 und DIN EN 1654-1997-03 und Rohren nach DIN 12449:10. Die Werte für die Gusslegierungen sind nach

DIN EN 1982-2008-08. Die Reihenfolge der Darstellung der Legierungsgruppen erfolgte nach DIN CEN/TS 13388:2008-08.

Zerspanbarkeitsgruppe	Werkstoff			Hauptwerte der spezif. Schnittkraft $k_{c1.1}$ [N/mm ²]	Anstiegswert $1-m_c$	Hinweis zu den Versuchsbedingungen Tab. 2	
	Bezeichnung	EN Nummer	UNS Nummer				
I	CuSP	CW114C	C14700	820	0,93	1)	
	CuTeP	CW118C	C14500	910	0,88	1)	
	CuTeP	CW118C	C14500	544	0,7755	8)	
	CuZn35Pb2	CW601N	C34200	835	0,85	4)	
	CuZn39Pb3	CW614N	C38500	450	0,68	1)	
	CuZn39Pb3	CW614N	C38500	389	0,69	8)	
	CuZn40Pb2	CW617N	C37700	500	0,68	1)	
	CuSn4Zn4Pb4	CW456K	C54400	758	0,91	8)	
	CuSn5Zn5Pb5-C	CC491K	C83600	756	0,86	6)	
	CuSn7Zn4Pb7-C	CC493K	C93200	1400	0,76	7)	
	CuSn5Zn5Pb2-C	CC499K	-	756	0,86	6)	
	CuSn5Zn5Pb2-C	CC499K	-	724	0,82	8)	
CuNi7Zn39Pb3Mn2	CW400J	-	459	0,70	8)		
II	CuNi18Zn19Pb1	CW408J	C76300	1120	0,94	1)	
	CuZn35Ni3Mn2AlPb	CW710R	-	1030	0,82	1)	
	CuZn37Mn3Al2PbSi	CW713R	-	470	0,53	3)	
	CuZn38Mn1Al	CW716R	-	422	0,62	5)	
	CuAl10Fe5Ni5-C	CC333G	C95500	1065	0,71	6)	
	CuSn12Ni2-C	CC484K	C91700	940	0,71	6)	
	CuZn33Pb2-C	CC750S	-	470	0,53	3)	
	CuZn40	CW509L	C28000	802	0,80	8)	
	CuAg0,10	CW013A	C11600	1100	0,61	2)	
	CuNi1Pb1P	-	C19160	696	0,8095	8)	
	III	CuNi2Si	CW111C	C64700	1120	0,81	1)
		CuAl8Fe3	CW303G	C61400	970	0,82	1)
CuAl10Ni5Fe4		CW307G	C63000	1300	0,88	1)	
CuSn8		CW453K	C52100	1180	0,90	1)	
CuSn8P		CW459K	-	1131	0,88	8)	
CuZn37		CW508L	C27400	1180	0,85	1)	
CuZn20Al2As		CW702R	C68700	470	0,53	3)	
CuMn20		-	-	1090	0,81	8)	

Tab. 1: Spezifische Schnittkräfte $k_{c1.1}$ und Anstiegswerte $1-m_c$ für Kupfer und Kupferlegierungen nach verschiedenen Quellen

Eine quantitative Aussage über den Kraftanstieg mit zunehmendem Werkzeugverschleiß ist wegen der Vielzahl an Einflussgrößen nur näherungsweise möglich. Als Anhaltswerte für den Kraftanstieg bis zum Erreichen einer Verschleißmarkenbreite von $VB = 0,5$ mm können für die Schnittkraft ca. 20 %, für die Vorschubkraft ca. 90 % und für die Passivkraft ca. 100 % überschlägig angenommen werden.

Die Schnittkraft F_c kann mit der Gleichung (9) und den in Tab. 1 zusammengestellten $k_{c1.1}$ -Werten berechnet werden. Für Werkstoffe, die nicht in Tab. 1 aufgeführt sind, genügt es meist die $k_{c1.1}$ -Werte für

eine überschlägige Berechnung anhand vergleichbarer Werkstoffe abzuschätzen.

Tab. 2 enthält Hinweise zu den Versuchsbedingungen.

In Tab. 3 sind spezifische Schnittkräfte in Abhängigkeit von der Spannungsdicke h aus verschiedenen Quellen und für verschiedene Versuchsbedingungen zusammengestellt.

In manchen Fällen sind noch die bei den anderen Komponenten der Zerspankraft F_p , die Vorschubkraft F_f , und die Passivkraft F_p (Abb. 12) interessant. Die beiden letztgenannten Kräfte sind sehr viel kleiner

als die Schnittkraft F_c , die Passivkraft F_p verursacht keine Arbeit, die von einem Antrieb aufgebracht werden müsste, weil in ihrer Richtung keine der Hauptbewegungen verläuft.

Das Verhältnis der Vorschubkraft F_f zur Schnittkraft F_c hängt vom Einstellwinkel κ_f ab. Unter der Voraussetzung, dass man den Einfluss des Eckenradius r_e vernachlässigt, wird bei einem Einstellwinkel $\kappa_f = 90^\circ$ F_f kaum größer als 30 % von F_c . Da die Spankräfte bei den Kupferwerkstoffen im Allgemeinen niedrig liegen, genügt für überschlägige Berechnung die Beziehung:

$$F_f \approx 0,3 F_c \quad (10)$$

Nr.	Spannungsverfahren	Schneidstoff	Vorschubbereich bzw. Spandicke f bzw. h [mm]	Schnitttiefe bzw. Spannbreite a_p bzw. b [mm]	Schnittgeschwindigkeit v_c [m/min]	Schneidkeilgeometrie		Bemerkungen	Quelle
						Spannungsgruppen	$\alpha-\gamma-\lambda-\varepsilon-\kappa; r$ [grad mm]		
1	Längsdrehen	HM-K 10	$f = 0,05-0,315$	$a_p = 2,5$	180	I II III	6-0-0-ε-90/75/45; 0,5 8-5-0-ε-90/75/45; 0,5 10-20-0-ε-90/75/45; 0,5	Trockenschnitt	[7]
2	Längsdrehen	HSS (M2-AISI)	$h = 0,05-0,28$	$a_p = 2,54$	15-90	-	$\alpha-20-\lambda-\varepsilon-90; r$	Trockenschnitt	[11]
3	Drehen	SS u. HM	$f = 0,1-0,8$	$a_p : f = 2:1 \text{ bis } 10:1$	-	I u. II SS HM III SS HM	8-0-0/8-90-45; 0,5/2 5-6-0/8-90-45; 0,5/2 8-14/18-0/8-90-45; 0,5/2	Trockenschnitt	[12]
4	Längsdrehen	HM	$h = 0,04-0,6$	$a_p = 2,5$	200	-	5-15-λ-ε-90; r	Trockenschnitt	[13]
5	Einzahnfräsen	HSS	$f = 0,08-0,6$	$a_p = 8-9$ $b = 4-12$	40	-	5-10-0-90-90; r	-	[14]
6	Längsdrehen	HM-K 10	$f = 0,08-0,32$	$a_p = 2,5$	200	-	5-6-0-90-70; 0,4	Trockenschnitt	[15]
7	Längsdrehen	HSS u. HM	$f = 0,1-0,6$	$a_p = 1 \text{ u. } 2$	32	HSS HM	8-0-0/8-90-45; 0,5/2 5-6-0/8-90-45; 0,5/2	Trockenschnitt	[16]
8	Langdrehen	HM	$f = 0,05-0,14$	$a_p = 1$	200	HM	8-10-0-84-96; 0,4	Öl	DKI

Tab. 2: Hinweise zu den Versuchsbedingungen der in Tabelle 1 angegebenen spezifischen Schnittkräfte

Bei den heute üblichen Schnittgeschwindigkeiten von $v_c = 200$ m/min und mehr beim Drehen mit Hartmetall genügt für die überschlägige Berechnung F_p in gleicher Größenordnung anzusetzen.

$$F_p \approx F_f \approx 0,3 F_c \quad (11)$$

Während die Größe der Kräfte für die Dimensionierung von Spanneinrichtungen, Werkzeughaltern etc. interessiert, ist die überschlägige Berechnung der Zerspanungsleistung wichtig für die Ermittlung der Maschinenantriebsleistung, wobei der Maschinenwirkungsgrad zusätzlich zu berücksichtigen ist.

Die Wirkleistung der Zerspanung ist entsprechend DIN 6584 das Produkt aus Wirkkraft F_e und Wirkgeschwindigkeit v_e und gleichzeitig die Summe aus Schnittleistung P_c und Vorschubleistung P_f .

$$P_e = F_e \cdot v_e = P_c + P_f \quad (12)$$

$$P_c = F_c \cdot v_c \quad (13)$$

$$P_f = F_f \cdot v_f \quad (14)$$

Da die Vorschubgeschwindigkeit in der Regel im Vergleich mit der Schnittgeschwindigkeit sehr klein und die Vorschubkraft ebenfalls weitaus kleiner als die Schnittkraft ist, darf für die überschlägige Berechnung der Netto-Zerspanungsleistung die Vorschubleistung vernachlässigt werden. Damit errechnet sich die Netto-Antriebsleistung wie folgt:

$$P_e' = \frac{F_c \cdot v_c}{60000} \quad (15)$$

Mit:

P_e' Netto-Antriebsleistung in kW

F_c Schnittkraft in N

v_c Schnittgeschwindigkeit in m/min

60000 Umrechnungsfaktor in (N · m)/(kW · min)

Mehrschneidige Werkzeuge arbeiten i. A. mit kleineren Spanndicken h als einschneidige. Bei ihnen kann die

Netto-Antriebsleistung aus dem je Zeiteinheit zu zerspanenden Werkstoffvolumen, dem Zeitspannungsvolumen V_w in cm^3/min und einem auf Zeit und Leistung bezogenen Zeit-Leistungs-Spannungsvolumen V_{wp} in $\text{cm}^3 / \text{min} \cdot \text{kW}$, errechnet werden.

Für die oben angegebenen mehrschneidigen Werkzeuge gilt folgende Beziehung:

$$P_e' = \frac{V_w}{V_{wp}} \quad (16)$$

P_e' Netto-Antriebsleistung in kW

V_w Zerspantes Werkstoffvolumen in cm^3/min

V_{wp} Spezifisches Zerspanvolumen in $\text{cm}^3/\text{min} \cdot \text{kW}$

Das spezifische Zerspanvolumen V_{wp} ist direkt proportional zu der spezifischen Schnittkraft, wie folgende Ableitung zeigt:

Werkstoff			Spannungsdicke h in [mm]														Hinweis zu den Versuchsbedingungen Tab. 2
Bezeichnung	Nummer	Nummer (UNS)	0,08	0,1	0,125	0,16	0,20	0,25	0,315	0,4	0,5	0,63	0,8	1,0	1,25	1,6	
Zerspanbarkeitsgruppe I																	
CuSP	CW114C	C14700	979	963	948	932	918	904	889	874	861	847	833	820	807	793	1)
CuTeP	CW118C	C14500	1232	1200	1168	1134	1104	1075	1045	1016	989	962	935	910	886	860	1)
CuZn35Pb2	CW601N	C34200	1349	1293	1240	1183	1134	1087	1040	994	953	912	871	835	800	764	4)
CuZn39Pb3	CW614N	C38500	1010	940	875	809	753	701	651	603	562	522	483	450	419	387	1)
CuZn40Pb2	CW617N	C37700	1122	1045	973	899	837	779	724	670	624	580	537	500	466	430	1)
CuSn5Zn5Pb5-C*)	CC491K	C83600	1114	1065	1019	969	927	887	847	807	772	737	703	672	643	612	7)
CuSn7Zn4Pb7-C	CC493K	C93200	2567	2433	2307	2173	2060	1953	1847	1744	1653	1564	1477	1400	1327	1251	7)
CuSn5Zn5Pb2-C	CC499K	C92220	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zerspanbarkeitsgruppe II																	
CuNi18Zn19Pb1	CW408J	C76300	1303	1286	1269	1250	1234	1217	1200	1183	1168	1151	1135	1120	1105	1089	1)
CuZn35Ni3Mn2AlPb	CW710R	-	1623	1559	1498	1433	1376	1322	1268	1215	1167	1119	1072	1030	989	946	1)
CuZn37Mn3Al2PbSi	CW713R	-	1542	1432	1330	1227	1140	1059	981	907	842	780	721	670	622	574	3)
CuZn38Mn1Al	CW716R	-	1102	1012	930	847	778	715	655	598	549	503	459	422	388	353	5)
CuAl10Fe5Ni5-C	CC333G	-	2215	2077	1946	1812	1698	1592	1489	1389	1302	1218	1136	1065	998	929	6)
CuSn12Ni2-C	CC484K	C95500	1955	1833	1718	1599	1499	1405	1314	1226	1149	1075	1003	940	881	820	6)
CuZn33Pb2-C	CC750S	C91700	1540	1387	1249	1112	1001	902	809	723	651	584	522	470	423	377	3)
Zerspanbarkeitsgruppe III																	
CuAg0,10	CW013A	C11600	2946	2700	2475	2248	2061	1889	1726	1573	1441	1317	1200	1100	1008	916	2)
CuNi2Si	CW111C	C64700	1810	1735	1663	1586	1521	1458	1395	1333	1278	1223	1169	1120	1074	1024	1)
CuAl8Fe3	CW303G	C61400	1528	1468	1410	1349	1296	1245	1194	1144	1099	1054	1010	970	932	891	1)
CuAl10Ni5Fe4	CW307G	C63000	1760	1714	1668	1620	1577	1535	1493	1451	1413	1374	1335	1300	1266	1229	1)
CuSn8	CW453K	C52100	1519	1486	1453	1417	1386	1355	1325	1293	1265	1236	1207	1180	1154	1126	1)
CuZn37	CW508L	C27400	1907	1828	1752	1671	1602	1536	1470	1404	1346	1288	1231	1180	1131	1079	1)
CuZn20Al2As	CW702R	C68700	1540	1387	1249	1112	1001	902	809	723	651	584	522	470	423	377	3)

*) Der niedrige Wert des Werkstoffes erklärt sich aus der niedrigen Schnittgeschwindigkeit $v_c = 32$ m/min der Versuche.

Tab. 3: Spezifische Schnittkraft k_c in N/mm² in Abhängigkeit von der Spannungsdicke h in mm für die in der Tabelle 1 aufgenommenen Werkstoffe nach verschiedenen Quellen. (Es ist zu beachten, dass wegen unterschiedlicher Versuchsbedingungen Daten verschiedener Quellen nicht direkt vergleichbar sind)

$$V_{wp} = \frac{V_w}{P_c} = \frac{A \cdot v_c}{F_c \cdot v_c} = \frac{A \cdot v_c}{k_c \cdot A \cdot v_c} = \frac{1}{k_c} \quad (17)$$

Auf die Einheit cm³/min · kW umgerechnet ergibt sich folgendes:

$$V_{wp} = \frac{V_w}{P_c} = \frac{60000}{k_c} \quad (18)$$

V_{wp} spezifische Spanungsleistung in cm³/min · kW

V_w zerspantes Werkstoffvolumen in cm³/min

P_c Schnittleistung in kW

k_c spezifische Schnittkraft in N/mm²

60000 Konstante in cm³ · N/mm² · min · kW

Für die in Tab. 1 aufgeführten Werkstoffe nennt Tab. 4 V_{wp} -Werte für die bei mehrschneidigen Zerspanungswerkzeugen üblichen Spannungsdicken $h = 0,08$ bis $0,315$ mm.

3.3 Bewertungsgröße Oberflächen-güte

Bei der spanenden Fertigbearbeitung von Kupfer und Kupferlegierungen soll – wie bei anderen Werkstoffen auch – in der Regel die bearbeitete Fläche eine bestimmte Qualität aufweisen, d.h. eine bestimmte Rauheit darf nicht überschritten werden. Insbesondere bei Drehteilen aus Automatenmessing (z. B. aus CuZn39Pb3) werden oft dekorative Oberflächen gefordert, die ein Schlichten oder Feinschlichten des Drehteils bedingen. Daher ist für die Beurteilung der Zerspanbarkeit von Automatenwerkstoffen, wie z. B.

Werkstoff			Spanungsdicke h in [mm]							Hinweis zu den Ver- suchs- bedin- gungen Tab. 2
Bezeichnung	Nummer	Nummer (UNS)	0,08	0,1	0,125	0,16	0,20	0,25	0,315	
Zerspanbarkeitsgruppe I										
CuSP	CW114C	C14700	61,3	62,3	63,3	64,4	65,4	66,4	67,5	1)
CuTeP	CW118C	C14500	48,7	50,0	51,4	52,9	54,4	55,8	57,4	1)
CuZn35Pb2	CW601N	C34200	44,5	46,4	48,4	50,7	52,9	55,2	57,7	4)
CuZn39Pb3	CW614N	C38500	59,4	63,8	68,6	74,2	79,7	85,6	92,2	1)
CuZn40Pb2	CW617N	C37700	53,5	57,4	61,7	66,7	71,7	77,0	82,9	1)
CuSn5Zn5Pb5-C *)	CC491K	C83600	20,5	21,7	23,0	24,5	26,0	27,5	29,2	7)
CuSn7Zn4Pb7-C	CC493K	C93200	23,4	24,7	26,0	27,6	29,1	30,7	32,5	7)
CuSn5Zn5Pb2-C	CC499K	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zerspanbarkeitsgruppe II										
CuNi18Zn19Pb1	CW408J	C76300	46,1	46,7	47,3	48,0	48,6	49,3	48,2	1)
CuZn35Ni3Mn2AlPb	CW710R	-	37,0	38,5	40,1	41,9	43,6	45,4	47,3	1)
CuZn37Mn3Al2PbSi	CW713R	-	65,9	71,9	78,4	86,3	94,2	102,7	112,4	3)
CuZn38Mn1Al	CW716R	-	54,5	59,3	65,4	70,8	77,1	83,9	91,6	5)
CuAl10Fe5Ni5-C	CC333G	-	27,1	28,9	30,8	33,1	35,3	37,7	40,3	6)
CuSn12Ni2-C	CC484K	C95500	30,7	32,7	34,9	37,5	40,0	42,7	45,7	6)
CuZn33Pb2-C	CC750S	C91700	39,0	43,3	48,0	54,0	59,9	66,5	74,2	3)
Zerspanbarkeitsgruppe III										
CuAg0,10	CW013A	C11600	20,3	22,2	24,2	26,7	29,1	31,8	34,8	2)
CuNi2Si	CW111C	C64700	33,2	34,6	36,1	37,8	39,5	41,2	43,0	1)
CuAl8Fe3	CW303G	C61400	39,3	40,9	42,6	44,5	46,3	48,2	50,3	1)
CuAl10Ni5Fe4	CW307G	C63000	34,1	34,5	36,0	37,0	38,1	39,1	40,2	1)
CuSn8	CW453K	C52100	39,5	40,4	41,3	42,3	43,3	44,3	45,3	1)
CuZn37	CW508L	C27400	31,5	32,8	34,3	35,9	37,5	39,1	40,8	1)
CuZn20Al2As	CW702R	C68700	39,0	43,3	48,0	54,0	59,9	66,5	74,2	3)

*) Die niedrigen Werte des Werkstoffes erklärt sich aus der niedrigen Schnittgeschwindigkeit $v_c = 32$ m/min der Versuche.

Tab. 4: Spezifisches Zerspanvolumen V_{wp} in (cm³/min) · kW in Abhängigkeit von der Spanungsdicke h in mm für die in Tabelle 1 aufgenommenen Werkstoffe nach verschiedenen Quellen.

CuZn39Pb3, CuZn39Pb2, CuZn40Pb2, CuZn30Pb3, CuNi18Zn19Pb1, CuTeP, CuPb1P und CuSP, die Beurteilung der erreichbaren Oberflächenqualität als das wichtigste Zerspanbarkeitskriterium anzusehen. Zur quantitativen Beurteilung der Oberflächengüte spanend bearbeiteter Flächen wird die Rauheit, meist gemessen in µm, herangezogen. Dabei interessiert vor allem die Querrauheit (kinematische Rauheit), gemessen in Vorschubrichtung, weil sie meist größer ist als die in Richtung der Schnittgeschwindigkeit gemessene Längsrauheit (Schnittflächenrauheit). Die kinema-

tische Rauheit ergibt sich aus dem Eckenradius und der Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück.

Die theoretisch erzielbare Rautiefe $R_{t,th}$ bei einschneidigem Werkzeug (z. B. beim Drehen) lässt sich aus dem Vorschub f und dem Eckenradius r_ϵ (Abb. 14) nach folgender Formel errechnen:

$$R_{t,th} = r_\epsilon - \sqrt{r_\epsilon^2 - \frac{f^2}{4}} \quad (19)$$

Tabelle 5 enthält Vorschubwerte in Abhängigkeit von $R_{t,th}$ und r_ϵ

Über eine Reihenentwicklung nach Taylor lässt sich der Ausdruck vereinfachen, sodass überschlüssig gilt:

$$R_{t,th} \approx \frac{f^2}{8 \cdot r_\epsilon} \quad (20)$$

Weil für die spanende Bearbeitung die Rautiefe meist vorgegeben ist, ist zu ermitteln, mit welchem Vorschub f bei gegebenem Eckenradius gedreht werden muss. Deshalb wird obige Beziehung nach dem Vorschub aufgelöst:

$$f \approx \sqrt{8 \cdot r_\epsilon \cdot R_{t,th}} \quad (21)$$

Für vorgegebene Rautiefen können die theoretisch erforderlichen Vorschübe bei gegebenem Eckenradius r_ϵ Tab. 5 entnommen werden. An der Drehmaschine ist, wenn der theoretische Wert nicht eingestellt werden kann, der nächst kleinere Vorschubwert zu wählen.

In der Praxis ergeben sich jedoch oftmals erhebliche Abweichungen von der theoretischen Rautiefe, die im Wesentlichen auf drei Ursachen zurückgeführt werden können:

- Bei der Feinbearbeitung – insbesondere mit niedrigen Vorschüben ($f < 0,1 \text{ mm/U}$) – können sich im Bereich der Nebenschneide und des Schneidenradius Verschleißriefen ausbilden, die eine Abweichung vom theoretischen Drehprofil bewirken.
- Im Bereich größerer Vorschübe ($f > 0,1 \text{ mm/U}$) führt der stetig wachsende Freiflächenverschleiß insbesondere am Eckenradius zu einer Verschlechterung der Oberflächengüte.
- Im Schnittgeschwindigkeitsbereich der Aufbauschneidenbildung ergibt sich durch die Abwanderung von Aufbauschneideteilen, wie bereits im Kapitel 2.3 Spanbildung behandelt, eine erhebliche Verschlechterung der Oberflächenbeschaffenheit des Werkstücks. Aufbauschneiden bedeuten, dass sich Werkstoffteile vorübergehend am Schneidkeil festsetzen, ihm

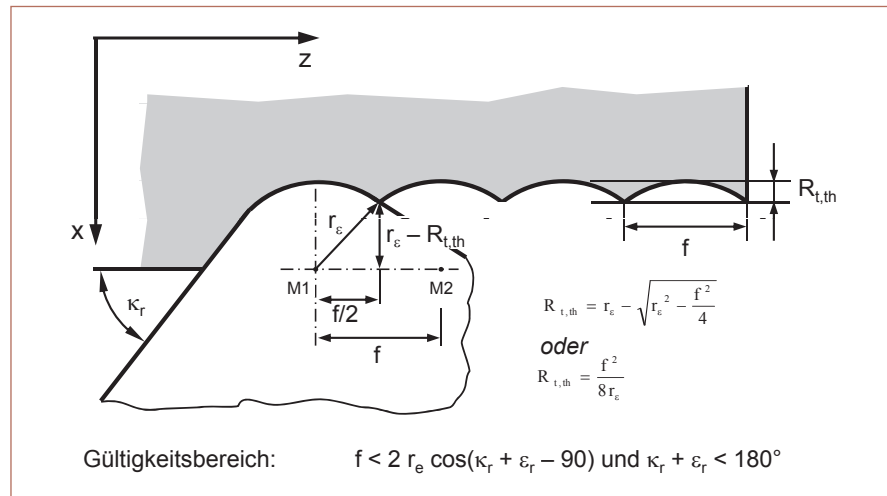


Abb. 14: Geometrische Eingriffsverhältnisse beim Drehen

dadurch eine irreguläre Form verleihen und beim Abreißen mit dem Span bzw. Werkstück verschweißen.

Die erzielbare Querrauheit ist außerdem noch von den Werkzeugwinkeln, besonders vom Spanwinkel, abhängig. Seine Vergrößerung ergibt eine Verbesserung der Oberfläche. Der theoretische Wert kann bei Kupfer und Kupferlegierungen leichter als bei anderen Metallen angenähert erreicht werden. Eine Vergrößerung des Spanwinkels bewirkt jedoch wegen der Verringerung des Schneidkeils eine Verminderung der Standzeit. Selbstverständlich gilt auch bei Kupfer und Kupferlegierungen, dass hohe Schnittgeschwindigkeiten bessere Oberflächen ergeben als niedrige.

In Abbildung 15 sind Rauheitsmessgrößen dargestellt.

Voraussetzung für die angenäherte Gültigkeit der Beziehungen (19), (20), (21), ist ein feinkörniger Werkstoff, weil anderenfalls die tatsächlichen maximalen Rautiefen R_t wesentlich größer als die errechneten sind [17, 18]. In grober Näherung kann unterstellt werden, dass die kleinste praktisch erreichbare Rautiefe beim Spanen mit definierter Schneidenform (d. h. außer beim Schleifen, Läppen, Honen usw.) in etwa der Korngröße entspricht. Bei hohen Anforderungen an die Oberflächengüte des Werkstücks empfiehlt sich die Verwendung eines Diamantwerkzeugs bei höchster Schnittgeschwindigkeit und kleinem Vorschub. Es können spiegelnd blanke Flächen erzeugt werden.

Beim Spanen mit mehrschneidigen Werkzeugen (z.B. beim Fräsen) überlagert sich der Rautiefe R_t ein als „Well-

Eckenradius r_ϵ [mm]	Vorschub f in mm/U = $f(R_{t,th}, r_\epsilon)$					
	Freidrehen		Schlichten		Schruppen	
	$R_{t,th} \ 4 \ \mu\text{m}$	$R_{t,th} \ 6,3 \ \mu\text{m}$	$R_{t,th} \ 16 \ \mu\text{m}$	$R_{t,th} \ 25 \ \mu\text{m}$	$R_{t,th} \ 63 \ \mu\text{m}$	$R_{t,th} \ 100 \ \mu\text{m}$
0,5	0,13	0,16	0,26	0,32	0,50	0,63
1,0	0,18	0,22	0,36	0,45	0,71	0,89
1,5	0,22	0,27	0,44	0,55	0,87	1,10
2,0	0,25	0,31	0,50	0,63	1,00	1,26
3,0	0,31	0,38	0,62	0,77	1,22	1,55

Tab. 5: Vorschub f in mm/U in Abhängigkeit von der geforderten theoretischen Rauigkeit $R_{t,th}$ und dem Eckenradius r_ϵ

ligkeit“ bezeichneter Formfehler. Die „Wellenlänge“ entspricht dabei dem Vorschub je Umdrehung, die Wellenhöhe ergibt sich aus dem Rundlauffehler des Werkzeugs, wenn dieser größer ist als etwa 10 µm. Eine Verbesserung der Oberfläche bringen beim Messerkopfstirnfräsen mit Wendeschneidplatten Werkzeuge mit „aktiver Nebenschneide“ – d.h. die Platten besitzen an der Nebenschneide ein Fase (Nebenschneidenfase, Breitschlichtfase), die mit einem Einstellwinkel von $\kappa_r = 0^\circ$ parallel zur Werkstückoberfläche liegt. Die Länge der Nebenschneidenfase kann mehrere Millimeter betragen. Der Vorschub je Zahn sollte 2/3 der Länge der aktiven Nebenschneidenfase nicht überschreiten. Ist die Nebenschneide größer als der Vorschub je Umdrehung, wird der unvermeidbare Rundlauffehler überdeckt.

3.4 Bewertungsgröße Spanform

Neben der Spanart ist die Spanform ein wichtiges Beurteilungskriterium für die Zerspanbarkeit eines Werkstoffes. Je nach entstehender Spanform wird dabei zwischen kurz- und langspanen-

den Werkstoffen unterschieden. Die erste Gruppe bietet, vielleicht mit Ausnahme der Bröckel- und Nadelspäne, weniger Schwierigkeiten hinsichtlich Spanform und Spanablauf. Die zweite Gruppe, zu der die reinen Kupfersorten und die homogenen, hochkupferhaltigen Kupferlegierungen zählen, bilden bei freiem Spanablauf vorwiegend lange, ungebrochene Späne. Sie sind meist nicht problemlos zerspanbar.

Die Einordnung in ungünstige, brauchbare und gute Spanformen (Abb. 16) erfolgt nach den aufgeführten Gesichtspunkten:

- **Transportierbarkeit:** Die Späne sollten so geformt sein, dass sie einerseits problemlos aus dem Bearbeitungsraum der Maschine abgeführt werden können und andererseits nicht so klein sind, dass sie Späneförderungsanlagen bzw. die KSS-Filter zusetzen können.
- **Unfallgefahr:** Eine Unfallgefahr des Bedienungspersonals, z.B. durch scharfkantige Wirr- oder Flachwendel-späne, sollte vermieden werden.

- **Beschädigungsgefahr:** Werkstück, Werkzeug und Werkzeugmaschine sollten durch Späne nicht beschädigt werden können.

Die ersten fünf der in Abb. 16 zusammengestellten Spanformen, die Band-, Wirr-, Flachwendel-, Schrägwendel- und langen zylindrischen Wendel-späne, sind nicht optimal. Sie erschweren den Abtransport der Späne. Flachwendel-späne wandern bevorzugt über die Freifläche ab und verursachen dadurch Beschädigungen am Werkzeughalter und an der Schneidkante außerhalb ihrer Eingriffslänge. Band-, Wirr- und Bröckel-spänen stellen eine erhöhte Verletzungsgefahr für die sich im Maschinenbereich aufhaltenden Personen auf. Beim Zerspanen von Automatenmessing können sehr feine Nadelspäne entstehen, die ebenfalls als ungünstig anzusehen sind, da sie zum Zusetzen der Spanförderungs-systeme und der KSS-Filter neigen und für die Maschinenbediener die Verletzungs-gefahr erhöhen.

Bei homogenen Kupferwerkstoffen, wie z.B. bei Kupfer und hochkupferhaltigen

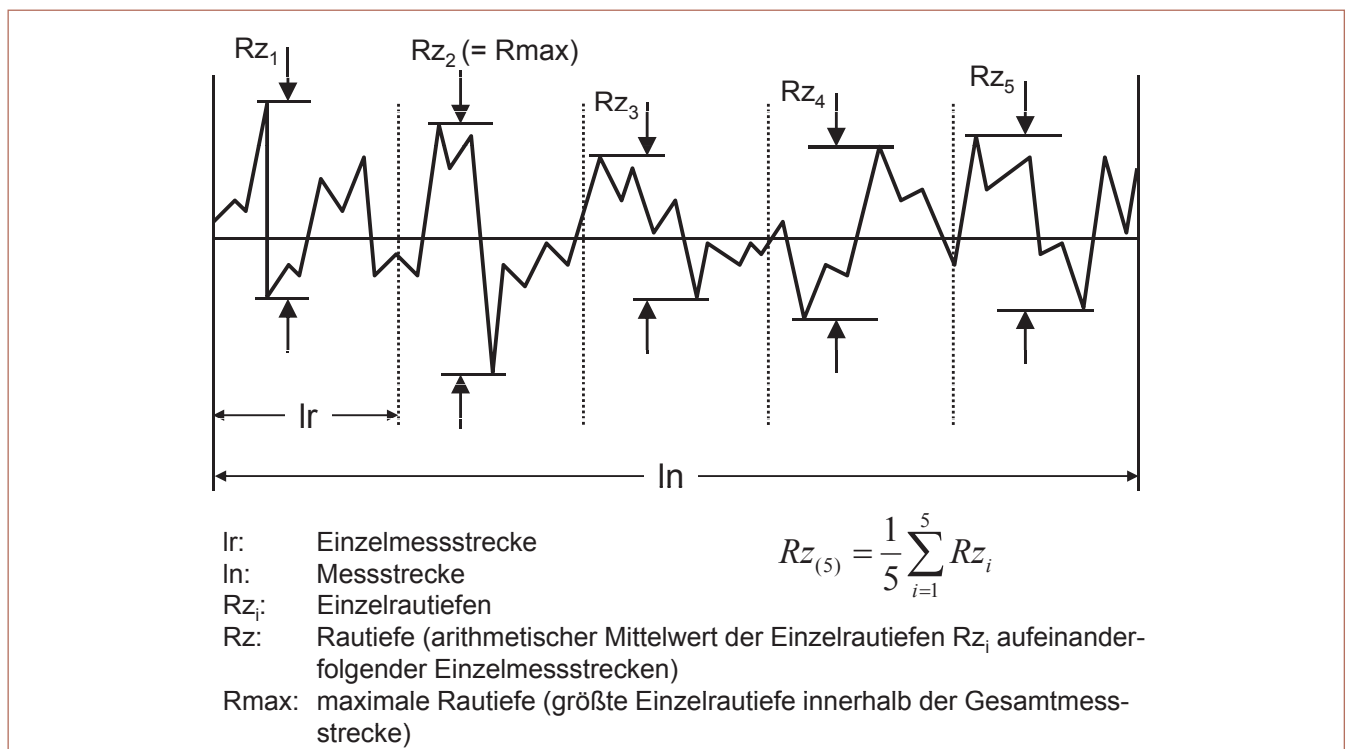


Abb. 15: Rauheitsmessgrößen (nach Mahr und DIN EN ISO 4287)

Kupfer-Zink-Legierungen, bilden sich bei größeren Spanungsquerschnitten und freiem Spanablauf lang ablaufende Bandspäne. Wirrspäne entstehen bevorzugt bei mittleren und kleinen Vorschüben, wogegen Flachwendel-späne bei kleinen Eckenradien, kleinen Schnitttiefen und großen Einstellwinkeln auftreten. Flache Wendel-späne sind wegen ihrer Scharfkantigkeit und der damit verbundenen Unfallgefahr gefürchtet. Bei kleinen Schnitttiefen und dann, wenn nur der Eckenradius im Eingriff ist, muss man mit Schrägwendel-spänen rechnen. Mit größer werdender Schnitttiefe treten dann lange zylindrische Wendel-späne auf.

Wegen ihrer Sperrigkeit, der damit verbundenen schwierigen Spanabfuhr und wegen des schwierigen Transports derartiger Späne sind diese Spanformen nicht erwünscht.

Ideal sind dagegen kurzbrechende Späne wie kurze zylindrische Wendel-späne, Spiralwendel-späne und Spiralspäne. Bei Automatenwerkstoffen, wie z. B. bei den Automatenmessingen, werden auch Spanlocken, Bröckel- und Nadelspäne als günstig angesehen, sofern Filter von Späneförderungs-

systemen durch derartige Späne nicht zugesetzt werden.

Beeinflusst werden kann die Spanform durch die folgenden Einflussgrößen: Werkstoff, Schneidstoff, Werkzeugmaschine, Spanleitstufen, Kühlschmierstoff, Schnittbedingungen und Schneidkeilgeometrie. Bei den Empfehlungen zur Schneidkeilgeometrie wird auf Spanleitstufen und deren Gestaltung noch näher eingegangen.

Bei gleichbleibenden Schnittbedingungen entstehen im Allgemeinen mit zunehmender Festigkeit bei gleichzeitig abnehmender Dehnung kürzerbrechende Späne, das heißt, dass Werkstoffe auf Kupferbasis im kaltverfestigten Zustand besser spanend zu bearbeiten sind. Ein grobkörniges Gefüge kann ebenfalls beim Drehen zu günstigeren Spanformen führen. Aus dem gleichen Grunde weisen meistens Gussgefüge, insbesondere Gefüge von Sandgussteilen, verglichen mit Knetwerkstoffen bessere Spanbildungseigenschaften auf.

Innerhalb der Schnittbedingungen beeinflusst vor allem der Vorschub die Spanform. Mit zunehmendem Vorschub

wird der Span kurzbrüchiger.

Ein negativer Spanwinkel führt zu einem größeren Spanstauchungsgrad, so dass sich im Allgemeinen günstigere Spanformen ausbilden. Steigende Schnittgeschwindigkeiten führen zu höheren Schnitttemperaturen. Die damit einhergehende bessere Umformbarkeit des Werkstoffes begünstigt die Bildung von Band- und Fließspänen.

Die Beeinflussung der Spanformen durch Änderung der Schnittbedingungen ist nur bedingt möglich, da die Bedingungen oft durch andere Kriterien festgelegt werden. In diesen Fällen besteht nur eine Beeinflussung der Spanbildung durch Spanleitstufen.

Die Spanausbildung von reinem Kupfer und homogenen hochkupferhaltigen Kupferlegierungen ist verhältnismäßig ungünstig. Der beim Schervorgang plastisch verformte Span hat noch eine hohe Bruchdehnung und bricht nicht, sodass es zu Störungen im Arbeitsablauf kommen kann. Durch spanbrechende Zusätze von Legierungselementen, wie Blei, Tellur, oder Schwefel kann die Spanform wesentlich beeinflusst werden (siehe Kap. 4.4).

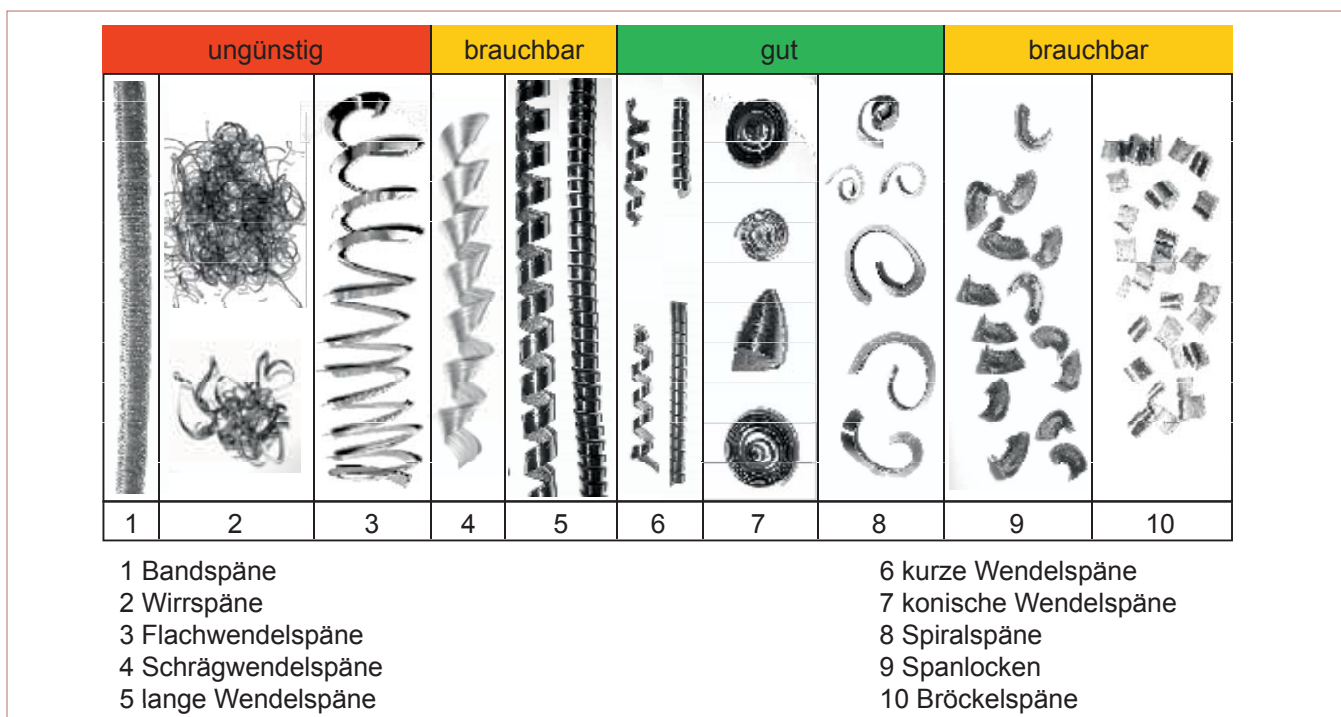


Abb. 16: Spanformen beim Drehen und deren Beurteilung nach [19]

4. Einteilung der Kupferwerkstoffe nach Zerspanbarkeitsgruppen

4.1 Normung der Kupferwerkstoffe

Die DIN-Blätter geben Auskunft über die Zusammensetzung, die Eigenschaften und hauptsächlich Anwendungsgebiete von Kupferlegierungen, wobei zwischen Normen für Knet- und Normen für Gusswerkstoffe unterschieden wird. Innerhalb dieser beiden Gruppen erfolgt die Unterteilung nach Legierungsgruppen (Tab. 6 und Tab. 7). Obwohl die Eigenschaften der Kupferwerkstoffe wesentlich durch die Legierungszusammensetzung bestimmt werden, eignet sich dieses

Ordnungsschema wegen unterschiedlicher Zerspanbarkeitseigenschaften von Werkstoffen gleicher Legierungsgruppe für die Einteilung nach Zerspanbarkeitsgruppen nicht.

4.2 Bewertungskriterien der Zerspanbarkeit

Wie bereits in Abschnitt 3 ausgeführt, ist die Zerspanbarkeit eine sehr komplexe Eigenschaft und lässt sich daher nicht mit einem Begriff oder mit einer Kennzahl, wie dies z.B. für die

Festigkeit oder Härte möglich ist, allein beschreiben. Es sind immer mehrere Bewertungskriterien zu berücksichtigen. Für den einzelnen Bearbeitungsfall sind diese von unterschiedlicher Bedeutung, weshalb eine allgemein gültige Reihenfolge nicht angegeben werden kann.

Es genügt auch nicht, ein oder zwei Bewertungskriterien allein zu betrachten, da zwischen diesen immer Wechselbeziehungen sehr unterschiedlicher Art bestehen können. Dabei sind

Bezeichnung	Bezeichnung (nicht genormt)	weitere Unterteilung
Kupfer	-	sauerstoffhaltig sauerstofffrei, nicht desoxidiert silberhaltig sauerstofffrei, mit P desoxidiert
Kupfer, niedriglegiert (Legierungselemente < 5%)	-	nicht aushärtbar aushärtbar
Kupfer-Aluminium-Legierungen	Aluminiumbronze	binär (ohne weitere Zusätze)
	Mehrstoff-Aluminiumbronze	mit Zusätzen von Fe, Mn, Ni
Kupfer-Nickel-Legierungen	-	-
Kupfer-Nickel-Zink-Legierungen	Neusilber	ohne Zusätze mit Bleizusätzen (für Zerspanung)
Kupfer-Zinn-Legierungen	Zinnbronze	binär
	Mehrstoff-Zinnbronze	mit Zusätzen von Zink
Kupfer-Zink-Legierungen, Zweistoff	Messing	ohne weitere Zusätze
	Zerspanungsmessing	mit Zusätzen von Blei
Kupfer-Zink-Legierungen, Mehrstoff	Sondermessing	mit anderen Zusätzen

Tab. 6: Kupfer-Knetwerkstoffe nach CEN/TS 13388

Bezeichnung	Bezeichnung (nicht genormt)
Kupfer	unlegiert
Kupfer-Chrom-Gusslegierungen	Kupfer-Chrom
Kupfer-Zink-Gusslegierungen	Messing, Sondermessing
Kupfer-Zinn-Gusslegierungen	Zinnbronze
Kupfer-Zinn-Zink-Blei-Gusslegierungen	Rotguss
Kupfer-Aluminium-Gusslegierungen	Aluminiumbronze
Kupfer-Mangan-Aluminium-Gusslegierung	-
Kupfer-Nickel-Gusslegierungen	-

Tab. 7: Kupfer-Gusslegierungen nach DIN EN 1982

– wie in Abschnitt 3 behandelt – der Werkzeugverschleiß bzw. die Werkzeugstandzeit, die Spanbildung, die Zerspankräfte und die Oberflächengüte als Hauptbewertungskriterien anzusehen.

In der Literatur und in Firmenbroschüren hat sich trotzdem ein Zerspanbarkeitsindex für Kupferlegierungen etabliert, um in der Praxis einen ersten Überblick über die Zerspanbarkeit der Werkstoffe zu ermöglichen. Referenzwerkstoff für den Vergleich ist in Europa das bleilegierte Automatenmessing CuZn39Pb3 und in den USA die Legierung CuZn36Pb3. Diese Referenzwerkstoffe haben einen Zerspanbarkeitsindex von 100. Der Index erstreckt sich von dem Wert 100 für sehr gut zerspanbare bis zu einem Wert von 20 für schlecht bearbeitbare Kupferlegierungen.

Die Zuordnung eines Zerspanbarkeitsindex zu einer Kupferlegierung erfolgt hauptsächlich auf der Basis von Erfahrungswerten aus der Praxis. Eine Reihe experimenteller Untersuchungen stützen diese Erfahrungswerte. So hat 1977 die Normungsstelle ASTM in den USA einen Test entwickelt, der einen Vergleich der Zerspanbarkeit verschiedener Stahlwerkstoffe unter Pro-

duktionsbedingungen ermöglicht. Dieser Test wurde von der Copper Development Association auf eine Reihe von Kupferwerkstoffen angewandt, um diese untereinander sowie mit Stahl und anderen Legierungen zu vergleichen, Abb. 1. Der Test – bekannt unter ASTM E618 – basiert auf der Produktion eines Standardwerkstücks, Abb. 17. Das Werkstück ist so ausgelegt, dass die am häufigsten gebrauchten Operationen an Drehautomaten abgedeckt sind: Schruppdrehen, Schlichtdrehen und Bohren. Ziel des Tests ist es, die maximale Anzahl an Standardwerkstücken zu ermitteln, die sich innerhalb von acht Stunden produzieren lassen. Die Bearbeitungsparameter werden in mehreren Versuchsreihen dahingehend optimiert, dass erst nach acht Stunden ein Werkzeugwechsel nötig wird. Die Bewertungskriterien sind die Formgenauigkeit und die Oberflächengüte des Werkstücks. Die maximale Teilezahl wird für alle zu vergleichenden Werkstoffe ermittelt und zueinander ins Verhältnis gesetzt. Der so ermittelte Zerspanbarkeitsindex ist ein Maß für die erreichbare Produktivität, die mit einem Werkstoff in der Serienfertigung im direkten Vergleich mit einem anderen Werkstoff erreicht werden kann. Da der Test sehr zeit- und materialintensiv ist, liegen jedoch

nicht für alle Kupferlegierungen Daten vor.

Für die Kupferlegierungen werden in Europa das Automatenmessing CuZn39Pb3 und in den USA die Legierung CuZn36Pb3 als Referenzwerkstoff zu 100 gesetzt, da diese als am besten zu zerspanen gelten. Mit abnehmender Zerspanbarkeit sinkt der Zerspanbarkeitsindex in 10er Schritten bis auf einen Wert von 20.

Zerspanbarkeitsindizes werden für Kupferlegierungen vom Deutschen Kupferinstitut in den Werkstoffdatenblättern, von der amerikanischen Copper Development Assoziation und von Werkstoffherstellern angegeben. Den Indizes liegen in der Regel keine festen Messwerte zu Grunde. Sie stellen eine primär den Werkzeugverschleiß und die Spanbildung berücksichtigende Einstufung dar. In Abhängigkeit von der jeweiligen Quelle können die Zerspanbarkeitsindizes daher geringfügig nach oben oder unten abweichen.

4.3 Beeinflussung der Zerspanbarkeit durch Gießen, Kaltumformung und Aushärtung

Bei der Zerspanung gegossener Kupferwerkstoffe ist zu beachten, dass die Gusshaut wesentlich andere Eigenschaften als der Werkstoff selbst aufweist. Festigkeit und Härte der Gusshaut liegen im Allgemeinen sehr viel höher, wodurch der Verschleiß der Werkzeuge ungünstig beeinflusst wird. Oberflächengüte und auch die Maßhaltigkeit der Werkstücke können dadurch deutlich verschlechtert werden.

Härte und Zugfestigkeit gegossener Werkstücke sind im Allgemeinen niedriger als bei gleichartig zusammengesetzten Walz- und Ziehfabrikaten. Dabei schwanken die Dehnungswerte innerhalb weiter Grenzen. Allgemein gilt, dass die Gusshaut außer Betracht gelassen wird – aufgrund ihres Gefüges besser zerspanbar sind als die Knetwerkstoffe.

Im Werkstoff enthaltene Gefügeinhomogenitäten, Poren und nichtmetallische Einschlüsse bringen für die Werkzeugschneide eine zusätzliche

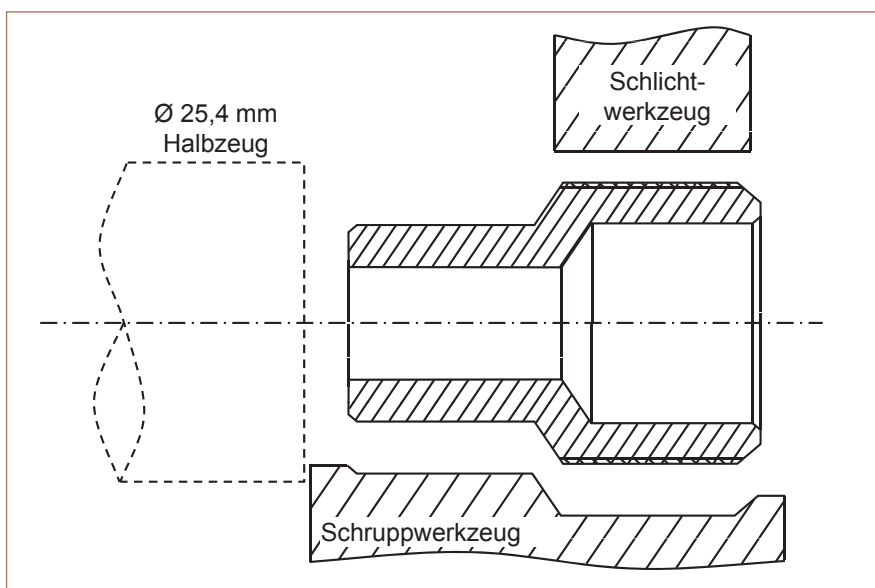


Abb. 17: Musterbauteil nach ASTM E618 und die Position der Formwerkzeuge. Für die Untersuchung an den Kupferlegierungen wurde der Halbzugdurchmesser auf 19 mm reduziert und die Geometrie angepasst. Dies ist laut ASTM E618 zulässig wenn die Modifikation für alle zu vergleichenden Werkstoffe gleich ist. [1]

dynamische Beanspruchung, die zu Schneidenausbrüchen und hohen Standzeiteinbußen führen kann. Hier sind insbesondere Einschlüsse von Aluminiumoxid (Korund, Spinell), von Siliziumkarbid, Siliziden, wie Eisen-silizid und Quarzeinschlüsse bei der spanenden Bearbeitung gefürchtet. Der Einfluss von Porositäten, wie z.B. Gasporosität, von kleinen Lunkern etc. auf den Werkzeugverschleiß dürfte ähnlich negativ aber nicht so ausgeprägt wie der Einfluss des mehrfach unterbrochenen Schnittes sein.

Durch Kaltumformung von Kupferwerkstoffen steigen Härte und Zugfestigkeit bei abnehmender Dehnung an. Hierdurch werden die Werkstoffeigenschaften für die spanende Bearbeitung günstig beeinflusst. Insbesondere kann – verglichen mit dem unverfestigten Material – eine bessere Spanbrechung erreicht werden.

Durch eine mehr oder weniger starke Kaltumformung der Knetwerkstoffe können innere Spannungen auftreten, da die Umformung häufig nicht über den gesamten Querschnitt erfolgt. So setzt z. B. das Kaltziehen einer Stange die äußeren Schichten unter Zug- und die inneren unter Druckspannungen. Ähnliche Verhältnisse liegen bei kalt nachgewalzten Halbzeugformen vor. Das Entfernen der äußeren Werkstoffschichten, wie es beim Drehen erfolgt, kann u. U. eine Verlängerung des Stabes zur Folge haben, während das Fräsen von Nuten, Rillen oder Keilnuten, wie überhaupt jeder Arbeitsgang, bei dem eine Werkstoffschicht nur teilweise entfernt wird, ein Verdrehen oder Verbiegen verursachen kann. Derartige Schwierigkeiten können auch bei der Bearbeitung unrunder Rohre, z.B. beim Formdrehen, ferner bei Hobel- und Fräsarbeiten an kaltgewalzten Platten auftreten.

Störungen dieser Art sind durch eine Entspannungsglühung von etwa einer Stunde Dauer zu beseitigen. Die anzuwendende Temperatur liegt für Kupfer bei 150 bis 180°C, für Kupfer-Zink-Legierungen zwischen 250 und 300°C. Diese Behandlung entspricht dem Verfahren, Kupfer-Zink-Legierungen unempfindlich gegen Spannungsrisskorrosion zu machen; es beeinträchtigt

die Festigkeitseigenschaften nicht, verbessert aber im Allgemeinen die elastischen Eigenschaften.

Bei der spanenden Bearbeitung stark kaltgeformter und daher federnder Werkstücke sind wegen des niedrigen Elastizitätsmoduls der Kupferwerkstoffe Maschinen ohne jedes Spiel zu verwenden. Gegebenenfalls muss das Werkstück abgestützt werden. Sofern man wählen kann, wird wegen der besonders ausgeprägten Kaltverfestigung der Kupferwerkstoffe die Verwendung von Werkstoffen im verfestigten Zustand bevorzugt. Dies ist unter anderem auch ein Grund dafür, dass bei gleichem Werkstoff manchmal große Unterschiede der Zerspanbarkeit beobachtet werden.

Bei aushärtbaren Kupferlegierungen erfolgt die spanende Bearbeitung zweckmäßig am kaltumgeformten Material vor der Wärmebehandlung, da nach der Aushärtung ein zu hoher Werkzeugverschleiß auftreten würde. Lediglich Schleif- und Polierarbeiten werden durch den harten Werkstoffzustand begünstigt. Um infolge hoher Schnitttemperaturen eine Aushärtung zu vermeiden, ist für eine gute Kühlung während der spanenden Bearbeitung zu sorgen.

4.4 Beeinflussung der Zerspanbarkeit durch Legierungselemente

Reines Kupfer ist aufgrund seiner großen Zähigkeit und hohen Kaltverformbarkeit schlecht zerspanbar. Der Werkzeugverschleiß ist sehr hoch, die Spanbildung sehr schlecht. Aufgrund der großen Spanstauchung unterliegt die Werkzeugschneide einer hohen Belastung. Die langen Wendespäne des reinen Kupfers sind schlecht zu handhaben bzw. abzuführen. Wegen des gleichbleibenden Schnittdrucks neigt dieser Werkstoff nicht zur Bildung von Rattermarken. Jedoch besteht bei der spanenden Bearbeitung von reinem Kupfer die Gefahr der Bildung von Aufbauschneiden, was zu einer schlechten Oberflächenausbildung führt. Die Neigung zur Aufbauschneidbildung nimmt mit steigender Schnittgeschwindigkeit und steigenden Vorschüben ab.

Da Kupferoxidul sich nicht im Kupfer löst, weisen die sauerstoffhaltigen Kupfersorten eine gewisse Inhomogenität auf, was in geringem Umfang die Spanbildung im günstigen Sinne und das Standzeitverhalten im ungünstigen Sinne beeinflusst. Da die Unterschiede nicht groß sind, jedoch die sauerstofffreien Kupfersorten mehr zum Kleben neigen, werden sauerstoffhaltige Kupfersorten in der Regel für die spanende Bearbeitung bevorzugt.

Durch den Zusatz spanbrechender Elemente wie Blei, Schwefel, Tellur und Selen lässt sich die Spanbildung verbessern. Die Späne zerbrechen zu feinen nadelartigen Bruchstücken und werden aus der Schneidzone herausgeschleudert. In Deutschland haben sich dafür die Werkstoffe CuSP mit 0,2 – 0,7 % S und CuTeP mit 0,4 – 0,7 % Te, international CuPb1P mit 0,7 – 1,5 % Blei durchgesetzt. Die elektrische Leitfähigkeit wird durch den Zusatz von Te nur etwa 5 – 8 % herabgesetzt. In der Elektrotechnik werden diese Werkstoffe bei Teilen eingesetzt, bei denen es auf gute Leitfähigkeit und gleichzeitig gute Zerspanbarkeit ankommt.

Da Tellur schon in Spuren die Warmumformungseigenschaften von Kupferlegierungen erheblich herabsetzen kann, müssen Späne von CuTeP sorgfältig von anderen Kupferspänen getrennt gehalten werden. Dasselbe gilt für CuSP, da Schwefelverunreinigungen die Kaltformbarkeit beeinträchtigen.

Ähnliche Spannungseigenschaften wie reines Kupfer haben hinsichtlich der Spanbildung und Werkzeug-Standzeit Legierungen des Kupfers mit Zink, Zinn, Nickel und Aluminium, sofern ihr Gefüge aus homogenen Mischkristallen besteht.

Ein anderes Zerspanungsverhalten zeigen heterogene Kupferlegierungen ohne spanbrechende Zusätze. Die Werkstoffgruppe der heterogenen Kupferlegierungen umfasst Legierungen, die Anteile der Legierungselemente Zink, Zinn, Nickel und Aluminium enthalten, die so groß sind, dass ein zweiter Mischkristall auftritt. Der zweite Mischkristall, meist härter und

spröder als der primäre Mischkristall, bewirkt eine Steigerung der Zugfestigkeit und Härte auf Kosten der Dehnung und Umformbarkeit, vor allem der Kaltumformbarkeit. Zu nennen sind hier auch die mehr als zwei Legierungskomponenten enthaltenden Kupfer-Mehrstoff-Legierungen.

Die Spanungseigenschaften der heterogenen Kupferlegierungen sind verglichen mit den homogenen Kupferlegierungen bereits erheblich verbessert. Bei Werkstoffen mit geringer Dehnung, wie z.B. bei gegossenen Kupfer-Zinn-Legierungen, zerbrechen die Späne zu kurzen Spiralspänen.

Bei Werkstoffen mit höherer Dehnung, z. B. bei CuZn40Mn2, bilden sich je nach Vorschub kurze Spiralspäne oder lange zylindrische Wendelspäne. Dabei bilden sich bei kleinem Vorschub die letztgenannten zusammenhängenden in sich gewundenen Späne. Die Späne sind relativ brüchig oder können mit Hilfe von Spanleitstufen gebrochen werden.

Die Art der Spanbildung führt zu Schwingungen des Werkzeugs, die bei genügender Größe Rattermarken erzeugen können. Dem kann man entgegenwirken, indem stabilste Werkzeuge und Werkzeughalter verwendet werden und die Ausladung so gering wie möglich gehalten wird.

Die Zerspanbarkeit der heterogenen Kupferlegierungen wird durch das Auftreten eines härteren zweiten Mischkristalls herabgesetzt. Steigende Zinngehalte z. B. in Kupfer-Zinn-Gusslegierungen bedingen eine Herabsetzung der Schnittgeschwindigkeit bei gleicher Standzeit. Auch Eisen und Nickel in größeren Gehalten und Aluminium beeinträchtigen die Zerspanbarkeit. Die Zerspanungseigenschaften der Mehrstoff-Kupfer-Aluminium-Legierungen nähern sich bereits denen von Stahl.

Wie bereits für reines Kupfer behandelt, steigern spanbrechende Zusätze die Zerspanbarkeit der Kupferwerkstoffe. Für Kupferlegierungen wird ausnahmslos Blei als spanbrechendes Legierungselement zugesetzt. Zusätze

von Blei haben nur einen geringen Einfluss auf die Festigkeitseigenschaften. Das Kaltumformungsvermögen und die Beanspruchbarkeit durch Stoß und Schlag werden jedoch erheblich herabgesetzt. Aus diesen Gründen und da vor allem die Warmformbarkeit beeinträchtigt wird, ist bei den hoch- und stoßfesten Kupfer-Aluminium-Legierungen ein Bleizusatz nicht üblich.

Wenn Werkstücke später noch gelötet oder geschweißt werden sollen, ist die Verwendung von bleihaltigen Kupferwerkstoffen eingeschränkt.

Das gilt auch für Werkstücke, die neben einer spanenden Bearbeitung stark kalt umgeformt werden müssen.

Bei Legierungen mit spanbrechenden Zusätzen zerbrechen die Späne zu feinen, nadelartigen Spänen oder zu Bröckelspänen. Die Art der Spanbildung erhöht bei bleihaltigen verglichen mit bleifreien Kupferlegierungen gleicher Zugfestigkeit, die Gefahr der Bildung von Rattermarken. Dem sollte durch Verwendung spielfreier Maschinen und stabiler Werkzeuge und Werkzeughalter entgegengewirkt werden. Andererseits sind die aufzuwendenden Schnittkräfte gering, wie man aus Tab. 3 ersehen kann. Die Leichtigkeit, mit welcher der Kupferwerkstoff in kleine Bruchstücke zerteilt wird, begründet die ausgezeichnete Zerspanbarkeit der bleihaltigen Kupferlegierungen. Nicht nur die Schnittkräfte sind gering, sondern auch die Standzeiten sind groß. Die Standzeit wird ausschließlich durch den mittleren Freiflächenverschleiß begrenzt.

In diesem Zusammenhang sei auch darauf hingewiesen, dass feine Nadelspäne nachteilig sein können, da sie möglicherweise z. B. Filter der Kühlschmierstoffsystems verstopfen können. Auch beim Bohren verhalten sich unter Umständen länger spanende Werkstoffe besser, da sie die Spanabfuhr aus dem Bohrloch erleichtern.

Nachstehend wird noch etwas näher auf die Zerspanbarkeit der einzelnen Legierungsgruppen der Kupferwerkstoffe eingegangen, um das Verständnis der Einteilung der Kupferwerkstoffe

in drei Hauptgruppen der Zerspanbarkeit zu erleichtern.

Bei den Kupfer-Zink-Legierungen ist zwischen homogenen α -Kupfer-Zink-Legierungen, mit Kupfergehalten größer als 63 % und heterogenen ($\alpha+\beta$)-Kupfer-Zink-Legierungen mit Kupfergehalten von 54 bis 63 % zu unterscheiden. Die homogenen α -Kupfer-Zink-Legierungen im weichen Zustand verhalten sich hinsichtlich Spanbildung und Standzeit ähnlich wie reines Kupfer. Mit steigendem Zinkgehalt oder durch Kaltverfestigung nehmen Härte und Zugfestigkeit zu. Dadurch verbessert sich die Zerspanbarkeit etwas.

Eine bessere Zerspanbarkeit weisen heterogene Kupfer-Zink-Legierungen wie z. B. CuZn40 auf. Die Kupfer-Zink-Legierungen mit weiteren Zusätzen – Blei sei hier ausgenommen –, die sogenannten Sondermessinge, haben ebenfalls etwas bessere Zerspanungseigenschaften als die homogenen Kupfer-Zink-Legierungen. Das gilt insbesondere für die Spanbildung, während die Standzeit der Werkzeuge durch die härteren Komponenten des zweiten Mischkristalls (Zinn, Aluminium, Nickel, Silizium, Mangan) negativ beeinflusst wird.

Optimale Zerspanungseigenschaften hinsichtlich Spanbildung (Abb. 18 c) und Standzeit haben die heterogenen bleihaltigen Kupfer-Zink-Legierungen. Für Dreharbeiten, insbesondere auf Drehautomaten, weisen die Werkstoffe CuZn39Pb3 und CuZn40Pb2 die beste Zerspanbarkeit auf.

Das praktisch unlösliche Blei wirkt in feindisperser Verteilung als ausgezeichneter Spanbrecher und teilweise sogar als reibungsvermindernder Schmierstoff. Bleizusätze von mehr als 3,5 % sind nicht üblich, da es schwierig ist, bei höheren Bleigehalten in Kupfer-Zink-Legierungen eine feindisperse Verteilung zu erreichen. Darüber hinaus rechtfertigt es die geringe zu erreichende Verbesserung der Zerspanbarkeit nicht, die mit höheren Bleigehalten einhergehenden schlechteren mechanischen Eigenschaften in Kauf zu nehmen. Müssen Kupfer-Zink-Legierungen nicht nur spanend

bearbeitet sondern auch kalt oder warm umgeformt werden, so wird der Bleigehalt auf ca. 1,5 % begrenzt. Zu hohe Bleigehalte beeinträchtigen auch die Polierfähigkeit.

Desweiteren beschränkt die EU-Richtlinie 2000 / S3 / EG die Verwendung von Schwermetallhaltigen Fahrzeugteilen sowie die EU-Richtlinie 2002 / 95/ EG jene für Elektro- und Elektronikgeräte. Allerdings erlaubt eine Ausnahmeregelung die Verwendung von Bauteilen aus Kupferlegierungen mit bis zu 4 % Bleianteilen. Die Deutsche Trinkwasserverordnung (TrinkwV 2001) erlaubt für Installationswerkstoffe eine maximale Bleiabgabe von 25 µgPb/l und ab 2013 höchstens noch von 10 µgPb/l an das Trinkwasser.

In dem Bemühen, Blei in den Kupferwerkstoffen durch geeignete Legierungselemente zu substituieren, wurden für den Sanitärbereich neue bleifreie siliziumhaltige Cu-Legierungen entwickelt. Diese Werkstoffe weisen eine den bleihaltigen Messingen vergleichbar gute Spanbildung (Zerspanungsgruppe I / Abb. 18 b) auf. Im Gefüge wirken siliziumreiche Phasen (kappa-Phasen) als Spanbrecher. Im Vergleich zu Blei sind sie "harte" Spanbrecher [20]. Da das Silizium die Festigkeit des Werkstoffes erhöht und die κ-Phase abrasiv wirkt, bildet sich an den Werkzeugen ein im Vergleich zur Bearbeitung der bleilegierten Werkstoffe höherer Verschleiß aus.

Bei Kupfer-Zinn-Legierungen liegt zwar die Grenze zwischen homogenen und heterogenen Legierungen bei ca. 8 %,

dennoch weisen auch die heterogenen Kupfer-Zinn-Gusslegierungen mit höheren Zinngehalten eine hinsichtlich Werkzeugverschleiß und Spanbildung (Abb. 18 a) schlechtere Zerspanbarkeit auf. Die Kupfer-Zinn-Gusslegierungen lassen sich zwar besser als homogene Kupfer-Zinn-Knetlegierungen zerspannen, dennoch wirkt die mit steigendem Zinngehalt ansteigende Zugfestigkeit und Härte auf das Werkzeug verschleißfördernd, so dass – verglichen mit anderen Kupferwerkstoffen – die Schnittgeschwindigkeit entsprechend herabgesetzt werden muss.

Die Kupfer-Zinn-Zink-Gusslegierungen sind heterogen und haben, soweit sie Blei enthalten, eine gute Zerspanbarkeit. Das trifft gleichermaßen für die bleihaltige Kupfer-Zinn-Gusslegierung CuSn11Pb2-C zu. Bei diesen Werkstoffen handelt es sich um Gleitwerkstoffe, denen zur Verbesserung der Gleit- und Gießigenschaften zum Teil erheblich über 3 % hinausgehende Bleigehalte zugesetzt sind.

Ähnlich gute bzw. noch bessere Zerspanbarkeit weisen die heterogenen Kupfer-Blei-Zinn-Gusslegierungen auf, die bis maximal 26 % Blei zur Verbesserung der Gleiteigenschaften enthalten.

Die heterogenen, aber bleifreien Kupfer-Nickel-Zink-Legierungen (Neusilber) haben wegen des verfestigenden Einflusses des Nickels ebenfalls niedrige Werkzeugstandzeiten. Die bleihaltigen Kupfer-Nickel-Zink-Legierungen stehen dagegen in ihrer Zerspanbarkeit den Automatenmessingen kaum nach.

Allerdings werden wegen der höheren Härten die Werkzeugstandzeiten erheblich herabgesetzt.

Die homogenen Kupfer-Nickel-Legierungen sind schwer zerspanbar. Sie bilden starke Grate und sehr lange, zähe Späne. Eine spanende Bearbeitung auf Automaten ist praktisch ausgeschlossen.

Kupfer-Aluminium-Legierungen haben praktisch bis 8 % Aluminium ein homogenes Gefüge. Das Gefüge der binären homogenen Kupfer-Aluminium-Legierungen besteht aus relativ weichen α-Mischkristallen. Wie alle homogenen Kupferwerkstoffe sind diese Legierungen schwer zerspanbar. Sie ergeben lange, zähe Späne. Etwas besser zerspanbar sind die heterogenen Kupfer-Aluminium-Legierungen und die Mehrstoff-Kupfer-Aluminium-Legierungen. Wegen ihrer hohen Zugfestigkeit und Härte wirken sie auf die Werkzeuge stark verschleißend. Verglichen mit Kupfer-Zinn-Gusslegierungen muss bei CuAl10Fe5Ni5-C bei gleicher Werkzeugstandzeit die Schnittgeschwindigkeit erheblich herabgesetzt werden. Siliziumhaltige Kupfer-Aluminium-Legierungen, z. B. CuAl7Si, können infolge von Eisenverunreinigungen harte Einschlüsse (Eisensilicide) aufweisen. Deshalb empfiehlt es sich, für die Zerspanung Hartmetalle zu verwenden. In ihrer Zerspanbarkeit entsprechen die heterogenen Kupfer-Aluminium-Legierungen eher den mittelharten Stahlqualitäten als anderen Kupferwerkstoffen.



Abb. 18 Spanformen

4.5 Einteilung der Kupferwerkstoffe in Hauptgruppen der Zerspanbarkeit

Hinsichtlich ihrer Zerspanbarkeit werden Kupferwerkstoffe klassischerweise in drei Hauptgruppen eingeteilt. Dabei werden ähnlich zerspanbare Werkstoffe zu einer Hauptgruppe zusammengefasst. Die grobe Unterteilung in die Hauptgruppen erfolgt durch eine Abschätzung der in Abschnitt 3 behandelten Bewertungskriterien der Zerspanbarkeit, wobei für Kupferwerkstoff die Kriterien Spanform und Verschleiß als wesentliche Größen herangezogen werden. Neben diesen Bewertungsgrößen wird ferner die Gefügestruktur, die einen wesentlichen Einfluss auf die Zerspanbarkeit hat, als Merkmal für die Einteilung in die Hauptgruppen herangezogen. Die Ausprägungen der Merkmale, die zur Einteilung in die Hauptgruppen führt, sind in Tab. 8 zusammengefasst.

Zerspanungshauptgruppe I

umfasst blei-, tellur- oder schwefellegierte Kupferwerkstoffe mit homogenem oder heterogenem Gefüge. Durch die Zulegierung spanbrechender Elemente erhalten die Werkstoffe der ersten Hauptgruppe ihre sehr gute Zerspanbarkeit.

Zerspanungshauptgruppe II

enthält mäßig bis gut zerspanbare (meist bleifreie) Kupferwerkstoffe höherer Festigkeit und besserer Kaltformbarkeit als Werkstoffe der Hauptgruppe I

mit heterogenem Gefüge. Verglichen mit den Werkstoffen der Hauptgruppe I hat die größere Kaltformbarkeit in der Regel längere Späne zur Folge.

Zerspanungshauptgruppe III

fasst die relativ zu I und II schwerer zerspanbaren Kupferwerkstoffe zusammen. Aus dem homogenen Gefüge und der ausgezeichneten Kaltformbarkeit dieser Werkstoffe folgen höhere Schnittkräften und lange, zähe Späne.

Die guten Kaltformungseigenschaften der niedrig legierten Kupferwerkstoffe führen zu einer sehr schlechten Spanbildung und hohem Werkzeugverschleiß. Kupferlegierungen mit Zink, Zinn, Nickel und Aluminium weisen ebenfalls eine vergleichbar schlechte Spanbildung und niedrige Standzeiten auf, sofern sie aus einem Gefüge mit homogenem Mischkristall bestehen. Außerdem enthält diese Hauptgruppe heterogene Werkstoffe wie die hochfesten Cu-Al-Legierungen und die niedrig legierten Kupferwerkstoffe in ausgehärtetem Zustand.

Eine Einordnung der genormten Kupferwerkstoffe in die Hauptgruppen I, II und III der Zerspanbarkeit zeigen die Tab. 9, Tab. 10 und Tab. 11. Vorwiegend wurde die Unterteilung anhand der zu erwartenden Spanbildung vorgenommen, während bei den schwer zerspanbaren Werkstoffen der Hauptgruppe III für einige Werkstoffe die große Verschleißwirkung auf das Werkzeug für die Einteilung entscheidend war.

Da die Spanbildung stark vom Bleigehalt abhängt, haben Werkstoffe mit tolerierten Bleigehalten je nach Bleianteil unterschiedliche Zerspaneigenschaften. Dies kann unter Umständen dazu führen, dass eine Umgruppierung von Hauptgruppe II in Hauptgruppe I oder umgekehrt gerechtfertigt wäre.

In den jeweiligen Hauptgruppen wird zwischen Knet- und Gusslegierungen unterschieden. Trotz der Zusammenfassung in einer Hauptgruppe unterscheiden sich die entsprechenden Kupferwerkstoffe teilweise noch erheblich in ihren Zerspaneigenschaften. Das Tabellenwerk wurde um den zuvor beschriebenen Zerspanbarkeitsindex ergänzt, um so eine weitere Differenzierung hinsichtlich der Zerspanbarkeit innerhalb einer Hauptgruppe zu ermöglichen. Dabei erstreckt sich der Index in Hauptgruppe I von 100 – 70, in Hauptgruppe II von 60 – 40 und in Hauptgruppe III von 30 – 20. Der Zerspanbarkeitsindex beruht teilweise auf Experimenten, teilweise auf Erfahrungswerten. Bei der Bewertung der Zerspanbarkeitsindex ist zu beachten, dass diese aufgrund unterschiedlicher Randbedingungen und Kriterien, die ihrer Bestimmung zu Grunde liegen, mit einer gewissen Unsicherheit und Ungenauigkeit behaftet sind und daher nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit, die beim Drehen bei ca. 70 % liegt, zutreffend sind.

Merkmale	Hauptgruppe		
	I	II	III
Gefüge	Homo-/heterogen mit spanbrechenden Teilchen (Pb, S, Te)	Heterogene (grobdisperse Phase) ohne Pb-Teilchen	a) homogen b) heterogen (feindisperse Ausscheidungen)
Spanform	kurz (Bröckelspan)	mittel (Wendelspan)	lang+ zäh (Wendel-, Wirr-Bandspan)
Verschleiß	gering	mittel	hoch
Kaltumformbarkeit der Knetwerkstoffe	im allgemeinen schlecht	im allgemeinen gut	a) sehr gut b) gering
Warmformbarkeit der Knetwerkstoffe	im allgemeinen gut	mäßig	c) mäßig d) gut

Tab. 8: Schema der klassischen Einteilung von Kupferwerkstoffen in Hauptgruppen der Zerspanbarkeit

Zerspanungshauptgruppe I		Werkstoff			Zugfestigkeit R_m [N/mm ²]	0,2% Dehngrenze $R_{p0,2}$ [N/mm ²]	Bruchdehnung A [%]	Härte [HB]	Kennzeichnung Schneiden- geometrie	Zerspanbarkeitsindex/ Machinability Rating
		Bezeichnung	Nummer (EN)	Nummer (UNS)						
Kupfer-knetwerkstoffe	Kupferlegierungen, niedrig legiert – nicht aushärtbar	CuPb1P	CW113C	C18700	250 – 360	200 – 320	5 – 7	90-110	–	80
		CuSP	CW114C	C14700					C*	80
		CuTeP	CW118C	C14500					C*	80
	Kupfer-Nickel-Zink- Legierungen	CuNi7Zn39Pb3Mn2	CW400J	–	510 – 680	400 – 600	5 – 12	150 – 200	–	90
		CuNi10Zn42Pb2	CW402J	C79800	510 – 590	350 – 450	5 – 12	160 – 190	A / A*	80
		CuNi12Zn30Pb1	CW406J	C79300	420 – 650	280 – 600	8 – 20	130 – 180	A / A*	70
	Kupfer-Zinn-Zink- Legierungen	CuSn4Zn4Pb4	CW456K	C54400	450 – 720	350 – 680	10	150 – 210	–	80
	Kupfer-Zinn- Legierungen	CuSn5Pb1	CW458K	C53400	450 – 720	350 – 680	10	150 – 210	–	70
	Kupfer-Zink- Legierungen Zweistoff mit Blei	CuZn35Pb2	CW601N	C34200	330 – 440	150 – 340	14 – 30	90 – 130	A	90
		CuZn36Pb2As	CW602N	C35330	280 – 430	120 – 200	15 – 30	80 – 110	–	80
		CuZn36Pb3	CW603N	C35600	340 – 550	160 – 450	8 – 20	90 – 150	A	100
		CuZn38Pb1	CW607N	C37000	360 – 550	150 – 420	8 – 25	90 – 150	A	80
		CuZn38Pb2	CW608N	C37700					A	90
		CuZn39Pb0,5	CW610N	C36500					A	70
		CuZn39Pb2	CW612N	–					A	90
		CuZn39Pb3	CW614N	C38500	360 – 550	150 – 420	8 – 20	90 – 150	A	100
		CuZn40Pb2	CW617N	C37700					–	90
	CuZn43Pb2Al	CW624N	–	Wie gefertigt			–	80		
	Kupfer-Zink- Legierungen Mehrstoff	CuZn40Mn1Pb	CW720R	–	390 – 560	200 – 500	10 – 20	110 – 160	A	60
CuZn21Si3		–	C69300	530 – 700	300 – 450	10 – 20	–	–	80*	
Kupfer-Gusswerkstoffe	Kupfer-Zinn- Gusslegierungen	CuSn11Pb2-C	CC482K	–	240 – 280	130 – 150	5	80 – 90	A	70
	Kupfer-Zinn- und Kupfer Zinn-Zink- Gußlegierungen	CuSn3Zn8Pb5-C	CC490K	–	180 – 220	85 – 100	12 – 15	60 – 70	A	90
		CuSn3Zn9Pb7-C	–	C84400	200 – 234	–	16 – 26	55	–	90
		CuSn5Zn5Pb5-C	CC491K	C83600	180 – 220	85 – 100	12 – 15	60 – 70	A	90
		CuSn7Zn4Pb7-C	CC493K	C93200	230 – 260	120	12 – 15	60 – 70	A	90
		CuSn5Zn5Pb2-C	CC499K	–	200 – 250	90 – 110	6 – 13	60 – 65	–	90
	Kupfer-Blei – und Kupfer-Zinn- Gußlegierungen	CuPb10Sn10-C	CC495K	C93700	180 – 220	80 – 110	3 – 8	60 – 70	A	90
		CuSn7Pb15-C	CC496K	CC93800	170 – 200	80 – 90	7 – 8	60 – 65	A	90
	Kupfer-Zink- Gußlegierungen	CuZn33Pb2-C	CC750S	–	180	70	12	45 – 50	A	80
CuZn39Pb1Al-C		CC754S	–	220 – 350	80 – 250	4 – 15	65 – 110	–	80	
CuZn16Si4-C		CC761S	C87800	400 – 530	230 – 370	5 – 10	100 – 150	A*	70*	

* es wird empfohlen Schneiden mit einer Spanleitstufe einzusetzen

Tab. 9: Einteilung der genormten Kupferwerkstoffe nach ihrer Zerspanbarkeit. Hauptgruppe I: Sehr gut zerspanbare Kupferwerkstoffe

Zerspanungshauptgruppe II		Werkstoff			Zugfestigkeit R_m [N/mm ²]	0,2% Dehngrenze $R_{p0,2}$ [N/mm ²]	Bruchdehnung A [%]	Härte [HB]	Kennzeichnung Schneidengeometrie	Zerspanbarkeitsindex/Machinability Rating
		Bezeichnung	Nummer (EN)	Nummer (UNS)						
Kupfer-Knetwerkstoffe	Kupferlegierungen, niedrig, aushärtbar im kaltverfestigten und ausscheidungsgehärtetem Zustand	CuNi2SiCr	–	C81540	–	–	–	–	–	40*
		CuNi3Si1	CW112C	C70250	700 – 800	630 – 780	10	180 – 200	A*	40*
	Kupfer-Nickel-Zink-Legierungen	CuNi18Zn19Pb1	CW408J	C76300	420 – 650	280 – 600	8 – 20	130 – 180	A / A*	60
	Kupfer-Zink-Legierungen Zweistoff	CuZn40	CW509L	C28000	340	260	25	80	A*	40
	Kupfer-Zink-Legierungen Zweistoff mit Blei	CuZn37Pb0,5	CW604N	C33500	300 – 440	200 – 320	10 – 45	55 – 115	A	60
	Kupfer-Zink-Legierungen Mehrstoff	CuZn31Si1	CW708R	C69800	460 – 530	250 – 330	12 – 22	115 – 145	A*	40
		CuZn35Ni3Mn2AlPb	CW710R	–	490 – 550	300 – 400	10 – 20	120 – 150	A*	50
		CuZn37Mn3Al2PbSi	CW713R	–	540 – 640	280 – 400	5 – 15	150 – 180	A / A*	50
		CuZn38Mn1Al	CW716R	–	210 – 280	–	10 – 18	120 – 150	A*	40
		CuZn39Sn1	CW719R	C46400	340 – 460	170 – 340	12 – 30	80 – 145	A*	40
CuZn40Mn2Fe1		CW723R	–	460 – 540	270 – 320	8 – 20	110 – 150	A*	50	
Kupfer-Gusswerkstoffe	Kupfer-Aluminium-Gusslegierungen	CuAl10Ni3Fe2-C	CC332G	–	500 – 600	180 – 250	18 – 20	100 – 130	C*	50
		CuAl10Fe5Ni5-C	CC333G	C95500	600 – 650	250 – 280	7 – 13	140 – 150	–	50
	Kupfer-Zinn-Gusslegierungen	CuSn12-C	CC483K	C90800	260 – 300	140 – 150	5 – 7	80 – 90	A*	50
		CuSn12Ni2-C	CC484K	C91700	280 – 300	160 – 180	8 – 12	85 – 95	A	40
	Kupfer-Zink-Gusslegierungen	CuZn32Al2Mn2Fe1-C	CC763S	–	430 – 440	150 – 330	3 – 10	100 – 130	A*	40*
		CuZn34Mn3Al2Fe1-C	CC764S	–	600 – 620	250 – 260	10 – 15	140 – 150	A*	40*
		CuZn37Al1-C	CC766S	–	450	170	25	105	A*	40
		CuZn38Al-C	CC767S	–	380	130	30	75	A*	40

* es wird empfohlen Schneiden mit einer Spanleitstufe einzusetzen

Tab. 10: Einteilung der genormten Kupferwerkstoffe nach ihrer Zerspanbarkeit. Hauptgruppe II: Gut bis mäßig zerspanbare Kupferwerkstoffe

Zerspanungshauptgruppe III		Werkstoff			Zugfestigkeit R_m [N/mm ²]	0,2% Dehngrenze $R_{p0,2}$ [N/mm ²]	Bruchdehnung A [%]	Härte [HB]	Kennzeichnung Schneidengeometrie	Zerspanbarkeit- index/ Machbarkeit Rating
		Bezeichnung	Nummer (EN)	Nummer (UNS)						
Kupfer-Knetwerkstoffe	Kupfer	Cu-OFE	CW009A	C10100	200 - 350	120 - 320	5 - 35	35 - 110	C*	20
		CuAg0,10	CW013A	C11600	200 - 350	120 - 320	5 - 35	35 - 100	C*	20
		CuAg0,1P	CW016A	-	260	220	-	12	C*	20
		Cu-HCP	CW021A	-					C*	20
		Cu-DHP	CW024A	C12200	200 - 350	80 - 330	5 - 35	35 - 110	C*	20
	Kupferlegierungen, niedrig legiert, aushärtbar, Lösungsgeglüht, kaltumgeformt und ausscheidungsgehärtet	CuBe1,7	CW100C	C17000	-	-	-	-	A	20
		CuBe2	CW101C	C17200	1150 - 1300	1000 - 1150	2	320 - 350	A	30
		CuCo2Be	CW104C	C17500	700 - 800	630 - 730	5	200 - 220	A	30
		CuCr1Zr	CW106C	C18150	400 - 470	310 - 380	8 - 12	135 - 180	A*	30
		CuNi1Si	CW109C	-	500 - 590	420 - 570	10 - 12	140 - 160	A*	30
		CuNi2Be	CW110C	C17510	700 - 800	630 - 730	5	200 - 220	-	30
		CuNi2Si	CW111C	C64700	550 - 640	430 - 620	10	155 - 180	B*	30
		CuZr	CW120C	C15000	280 - 350	180 - 260	18 - 20	90 - 130	-	20
	Kupferlegierungen, niedrig legiert, aushärtbar, lösungsgeglüht, kaltverfestigt	CuBe2	CW101C	C17200	580 - 650	450 - 500	8 - 10	155 - 240	B / B*	20
		CuCo2Be	CW104C	C17500	400 - 500	330 - 430	8 - 10	110 - 175	B	30
		CuNi1Si	CW109C	-	300 - 410	210 - 320	9 - 16	85 - 150	B*	20
		CuNi2Si	CW111C	C64700	320 - 410	230 - 370	8 - 15	90 - 165	A*	30
		CuNi3Si1	CW112C	C70250	450 - 580	390 - 550	8 - 10	135 - 210	A	30
	Kupferlegierungen, niedrig legiert, aushärtbar, lösungsgeglüht	CuCr1Zr	CW106C	C18150	200	60	30	65 - 90	B*	20
	Kupferlegierungen, niedrig legiert, nicht aushärtbar	CuSi3Mn1	CW116C	C65500	380 - 900	260 - 890	8 - 50	85 - 210	-	30
		CuSn0,15	CW117C	C14200	250 - 420	320 - 490	2 - 9	60 - 120	-	20
	Kupferaluminiumlegierungen	CuAl10Fe3Mn2	CW306G	-	590 - 690	330 - 510	6 - 12	140 - 180	-	30
		CuAl10Ni5Fe4	CW307G	C63000	680 - 740	480 - 530	8 - 10	170 - 210	-	30
	Kupfer-Nickel-Legierungen	CuNi25	CW350H	C71300	290	100	-	70 - 100	-	20
		CuNi10Fe1Mn	CW352H	C70600	280 - 350	90 - 150	10 - 30	70 - 100	A / A*	20
		CuNi30Mn1Fe	CW354H	C71500	340 - 420	120 - 180	14 - 30	80 - 110	A / A*	20
	Kupfer-Nickel-Zink-Legierungen	CuNi12Zn24	CW403J	C75700	380 - 640	270 - 550	5 - 38	90 - 190	A / A*	20
		CuNi18Zn20	CW409J	-	400 - 650	280 - 580	11 - 35	100 - 210	A / A*	20
	Kupfer-Zinn-Legierungen	CuSn4	CW450K	C51100	320 - 450	140 - 160	55	80 - 130	-	20
		CuSn5	CW451K	C51000	330 - 540	220 - 480	20 - 45	80 - 170	-	20
		CuSn6	CW452K	C51900	340 - 550	230 - 500	4 - 35	15 - 45	A*	20
		CuSn8	CW453K	C52100	390 - 620	260 - 550	15 - 45	90 - 190	A*	20
		CuSn8P	CW459K	-	390 - 620	260 - 550	15 - 45	90 - 190	A*	30
		CuZn5	CW500L	C21000	240 - 350	60 - 310	15 - 30	55 - 115	A*	20
		CuZn10	CW501L	C22000	270 - 380	80 - 350	14 - 28	60 - 125	A*	20
	Kupfer-Zink-Legierungen Zweistoff	CuZn15	CW502L	C23000	290 - 430	100 - 390	12 - 27	75 - 135	A*	30
		CuZn20	CW503L	C24000	300 - 450	110 - 410	10 - 27	80 - 140	B*	30
		CuZn28	CW504L	-					B*	30
		CuZn30	CW505L	C26000	310 - 460	120 - 420	10 - 27	85 - 145	B*	30
		CuZn33	CW506L	C26800					B*	30
CuZn36		CW507L	C27200					A / B*	30	
CuZn37		CW508L	C27400	310 - 440	120 - 400	12 - 30	70 - 140	A / B*	30	
Kupfer-Zink-Legierungen Mehrstoff		CuZn20Al2As	CW702R	C68700	340 - 390	120 - 150	40 - 45	65 - 95	A	30
		CuZn28Sn1AS	CW706R	C44300	320 - 360	100 - 140	45 - 55	60 - 110	A*	30
Kupfer-Gusswerkstoffe		Kupfer-Aluminium-Gusslegierungen	CuAl10Fe2-C	CC331G	C95200	500 - 600	180 - 250	15 - 20	100 - 130	B*
	Kupfer-Nickel-Gusslegierungen	CuNi10Fe1Mn1-C	CC380H	C96200	280	100 - 120	20 - 25	70	A*	20
		CuNi30Fe1Mn1NbSi-C	CC383H	C96400	440	230	18	115	A*	20
Kupfer-Zink-Gusslegierungen	CuZn25Al5Mn4Fe3-C	CC762S	C86100	440	450 - 480	5 - 8	180 - 190	A*	30*	

* es wird empfohlen Schneiden mit einer Spanleitstufe einzusetzen

Tab. 11: Einteilung der genormten Kupferwerkstoffe nach ihrer Zerspanbarkeit. Hauptgruppe III: Mäßig bis schwer zerspanbare Kupferwerkstoffe

5. Schneidstoffe

5.1 Schnellarbeitsstahl

Schnellarbeitsstähle sind hochlegierte Stähle. Sie werden häufig auch mit der Abkürzung HSS (engl.: High-Speed-Steels) benannt. Schnellarbeitsstähle unterscheiden sich von anderen Stählen durch ihren hohen Gehalt an Karbiden, die ihnen eine relativ hohe Verschleißfestigkeit und Warmhärte verleihen. Ihre Hauptlegierungselemente sind Wolfram, Molybdän, Vanadium, Cobalt und Chrom. Die Härte der Schnellarbeitsstähle wird sowohl durch die Härte der Grundmasse – des Martensits – als auch durch die Karbide beeinflusst. Die Anlassbeständigkeit wird durch die in der Matrix gelösten Legierungselemente bestimmt.

Die Bezeichnung der Schnellarbeitsstähle erfolgt nach einem festgelegten Schema: Sie werden mit der Buchstabenkombination „HS“ und den darauf folgenden prozentualen Anteilen der Legierungselemente in der Reihenfolge Wolfram, Molybdän, Vanadium und Cobalt gekennzeichnet. So enthält beispielsweise der Schneidstoff HS18-1-2-10 18% W, 1% Mo, 2 % V und 10% Co. Die Bezeichnungen „HSS“, „HSS-Co“ oder sonstige Sonderbezeichnungen von Werkzeugherstellern sind wenig aussagefähig, wenn der Schneidstoff nicht eindeutig benannt ist.

Die für die Kupferzerspanung relevanten, schmelzmetallurgisch hergestellten HSS-Schneidstoffe sind nach DIN EN ISO 4987 in die hoch wolframlegierten Stähle, die W-Gehalte von über 12% aufweisen

a) HS18-1-2-10	1.3265
b) HS18-1-2-5	1.3255
c) HS18-0-1	1.3355
d) HS12-1-4-5	1.3202
e) HS12-1-4	1.3302
f) HS12-1-2	1.3318

und in molybdänlegierten Stähle

g) HS10-4-3-10	1.3207
h) HS2-9-1-8	1.3247
i) HS6-5-2-5	1.3243
j) HS2-9-1	1.3346
k) HS2-9-2	1.3348
l) HS6-5-3	1.3344
m) HS6-5-2C	1.3343

zu unterscheiden.

Zur Verbesserung der Warmhärte und Anlassbeständigkeit wird diesen Stählen z. T. Cobalt (Co) zulegiert, zur Erhöhung der Verschleißfestigkeit Vanadium (V). Ferner sind einige dieser Stähle mit erhöhtem Kohlenstoffgehalt üblich (z. B. HS6-5-2C, Werkstoff-Nr. 1.3343), wodurch das Standzeitverhalten verbessert wird.

In vielen Bearbeitungsfällen empfiehlt sich der Einsatz des unter g) aufgeführten Schnellarbeitsstahls HS10-4-3-10 (Werkstoff-Nr. 1.3207), der eine hohe Warm- und Verschleißhärte und daher ein gutes Standzeitverhalten aufweist.

Erfordert die Bearbeitungsaufgabe oder die Werkzeuggeometrie eine hohe Zähigkeit, sollte ein anderer Schnellarbeitsstahl gewählt werden. Die höchste Zähigkeit der konventionellen HSS-Legierungen besitzt der Werkstoff HS2-9-1 (Werkstoff-Nr. 1.3346), weshalb z. B. häufig kleine Spiralbohrer, Langlochfräser, usw. aus diesem oder einem ähnlichen Schnellarbeitsstahl gefertigt sind. Fräser und Senker werden überwiegend aus HS6-5-2 (Werkstoff-Nr. 1.3243) gefertigt, Reibahlen meist aus HS6-5-3 (Werkstoff-Nr. 1.3344).

Neben den erschmolzenen sind auch pulvermetallurgisch hergestellte Schnellarbeitsstähle auf dem Markt. Gegenüber den schmelzmetallurgisch hergestellten weisen sie in der Regel einen etwas höheren Legierungsgehalt auf. Die pulvermetallurgisch erzeugten HSS-Legierungen zeichnen sich wegen ihrer wesentlich feineren Karbidverteilung im Gefüge gegenüber den konventionell Erschmolzenen durch eine wesentlich bessere Schneidkantenfestigkeit aus. Des Weiteren sind sie auf Grund ihres feineren Korns und des Fehlens von Seigerungszeilen besser schleifbar. Beide Einflussgrößen wirken standzeitverbessernd bei schwierigen Zerspanungsverfahren, z. B. Gewindebohren, Räumen von Profilen, Wälzfräsen oder -stoßen usw. Bei diesen Bearbeitungsfällen ist die Kantenfestigkeit des Schneidstoffs wichtig, weil z.B. der Spanabfluss gehemmt ist oder die Schneide stoßartig in Eingriff kommt. In solchen Fällen sollten daher pulvermetallurgisch erzeugte HSS-Schneidstoffe bevorzugt werden.

5.2 Hartmetalle (HM)

Hartmetalle sind gesinterte Verbundwerkstoffe. Sie bestehen aus einer Bindephase (meist Cobalt), in die Karbide (WC, TiC, TaC,..) eingebettet sind. Die Aufgabe der Bindephase ist die Verbindung der spröden Karbide zu einem relativ festen Körper. Die Aufgabe der Karbide ist die Erzielung einer hohen Warmhärte und Verschleißfestigkeit.

Die spanende Bearbeitung von Kupferlegierungen erfolgt mit unbeschichteten Hartmetallen auf der Basis von Wolframkarbid (WC) und Cobalt (Co) oder mit beschichteten Hartmetall-Werkzeugen. WC-Co-Hartmetalle bestehen fast ausschließlich aus Wolframkarbid (WC) als Härte Träger und Cobalt (Co) als Bindephase. Sie können in geringen Mengen noch Vanadiumkarbid (VC), Chromkarbid (Cr₃C₂) oder Tantal-/Niobkarbid ((Ta,Nb)C) enthalten. Hartmetalle auf der Basis von WC-Co zeichnen sich durch eine hohe Abriebfestigkeit aus. Sie unterscheiden sich hinsichtlich ihres Anteils an Co-Bindephase und in der WC-Korngröße. Mit steigendem Gehalt an Bindephase nimmt die Zähigkeit zu, Härte und Verschleißfestigkeit nehmen ab. Für Schlicht- und mittlere Schruppdrehoperationen mit unbeschichteten Hartmetallen finden meist HM-Sorten mit ca. 6 Massen-% Cobalt (WC-6Co) Verwendung. Bei schwereren Schruppschnitten oder bei unterbrochenen Schnitten werden zähere Sorte mit einem höheren Cobaltgehalt (z. B.: WC-9Co) eingesetzt.

Hinsichtlich der WC-Korngröße unterscheidet man zwischen den konventionellen Feinkornhartmetallen mit einem durchschnittlichen Korndurchmesser von 0,8-1,3 µm, den Feinst-(0,5-0,8 µm) und den Ultrafeinkornhartmetallen (0,2-0,5 µm). Die Verringerung der WC-Korngröße führt bei gleichem Bindegehalt zu einer Erhöhung der Härte und der Biegefestigkeit. Hochwertige Feinst- und Ultrafeinkornhartmetalle sind den konventionellen Feinkornhartmetallen in Härte, Kantenfestigkeit und Zähigkeit überlegen [21]. Aus diesen Hartmetallen werden im Allgemeinen Formwerkzeuge, wie Bohrer oder Schaftfräser hergestellt. Schneidplatten

für das Drehen bestehen üblicherweise aus Feinkornhartmetall mit Korngrößen > 0,8 µm.

Nach DIN ISO 513 sind die Kupferwerkstoffe der Hauptanwendungsgruppe N zugeordnet, Abb. 19. Jede Hauptanwendungsgruppe (DIN ISO 513 unterscheidet insgesamt 6 Hauptanwendungsgruppen) ist nochmals in Anwendungsgruppen (Abb. 19) unterteilt. Die Zahl hinter dem Kennbuchstaben N weist auf die Zähigkeit und Verschleißfestigkeit des Schneidstoffes hin. Je höher die Kennzahl innerhalb der Anwendungsgruppe ist, desto höher ist die Zähigkeit und desto niedriger ist die Verschleißfestigkeit des Schneidstoffes. In Abhängigkeit von den Eigenschaften einer beschichteten oder unbeschichteten Hartmetallsorte, ordnen die Schneidstoffhersteller diese einer oder mehreren geeigneten Anwendungsgruppen zu. Unbeschichtete Hartmetalle werden hierbei noch mit den Kennbuchstaben HW, beschichtete mit HC bezeichnet. Bezeichnungsbeispiel sind: HW-N10 oder HC-N20.

Das breiteste Anwendungsspektrum zum Zerspanen von Kupferwerkstoffen haben die Hartmetalle der Anwendungsgruppe N10. Bei Bearbeitungsoperationen, die höhere Anforderun-

gen an die Zähigkeit des Schneidstoffes stellen, z. B. beim Drehen mit sehr filigranen Werkzeugen oder beim Drehen mit großen Spanungsquerschnitten bzw. im unterbrochenen Schnitt kommen Hartmetalle der Anwendungsgruppen N15–N20 zum Einsatz. Gegenüber den Hartmetallen der Anwendungsgruppe N10 weisen sie einen höheren Co-Gehalt und damit eine höhere Zähigkeit auf.

Beschichtungen

Eine Möglichkeit, das Leistungsverhalten von (Hartmetall-)Werkzeugen weiter zu verbessern, stellen Beschichtungen dar. Beschichtungen ermöglichen das Zerspanen mit erhöhten Schnittgeschwindigkeiten und können die Standzeiten von Werkzeugen deutlich verbessern. Beschichtete Hartmetalle waren ein Meilenstein in der Entwicklung zugleich verschleißfester und zäher Schneidstoffe. Die wichtigsten Beschichtungswerkstoffe sind Titankarbid (TiC), Titanitrid (TiN), Titanaluminiumnitrid (TiAlN), Aluminiumoxid (Al₂O₃), Titankarbonitrid (TiCN), Diamondlike Carbon (DLC) und Diamant. Die Beschichtungen weisen in Abhängigkeit vom Beschichtungswerkstoff, Schichtaufbau, Schichtdicke und Beschichtungsverfahren unterschied-

liche Eigenschaften auf und können so der Zerspanaufgabe individuell angepasst werden.

Beschichtungen vermeiden Verschleiß durch eine Steigerung der Verschleißfestigkeit (Hartstoffschicht), durch die Verminderung der Adhäsionsneigung, sie wirken als Diffusionssperre und ermöglichen zudem eine Steigerung der thermischen und chemischen Stabilität. Für die Schneidstoffe der Gruppe N kommen verschiedene Beschichtungen zum Einsatz z.B. TiAlN, TiN, AlCrN, CrN, AlTiCrN, DLC (a-C:H, a-C:Me) sowie Diamantschichten..

5.3 Diamant als Schneidstoff

Diamant besteht aus reinem Kohlenstoff und ist der härteste aller bekannten Werkstoffe. Wegen seiner hohen Härte ist er jedoch sehr spröde und daher stark stoß- und wärmeempfindlich. Im Wesentlichen folgen hieraus schon die Anwendungsgebiete des Diamanten als Schneidstoff. In der Zerspantechnik werden sowohl natürlich vorkommende als auch synthetisch hergestellte Diamanten verwendet. Sie können sowohl in mono- (Kennbuchstabe nach DIN ISO 513: DM) als auch in polykristalliner (Kennbuchstabe DP) Form vorliegen können. Häufig findet

Hauptanwendungsgruppen			Anwendungsgruppen			
Kennbuchstabe	Kennfarbe	Werkstück-Werkstoff	Harte Schneidstoffe			
N	Grün	Nichteisenmetalle: Aluminium und andere Nichteisenmetalle, Nichtmetallwerkstoffe	N01 N10 N20 N30	N05 N15 N25	↑	↓
↑ Zunehmende Schnittgeschwindigkeit, zunehmende Verschleißfestigkeit des Schneidstoffs						
↓ Zunehmender Vorschub, zunehmende Zähigkeit des Schneidstoffs						

Abb. 19: Hauptanwendungsgruppe N der harten Schneidstoffe nach DIN ISO 513

sich für Werkzeuge aus polykristallinem Diamant auch die Abkürzung PKD.

Monokristalline Diamanten eignen sich besonders zur Feinbearbeitung, sie finden große Anwendung im Bereich der Ultrapräzisionsbearbeitung.

Der Anwendungsbereich der polykristallinen Diamanten umfasst neben der Fein- auch die Schruppbearbeitung. In manchen Bearbeitungsfällen ist hiermit sogar eine Zusammenfassung der Vor- und Endbearbeitung zu einem einzigen Arbeitsschritt möglich [22]

5.4 Wahl des Schneidstoffs

Die Wirtschaftlichkeit eines Schneidstoffs hängt von mehreren Einflussgrößen ab. Bei einer uneingeschränkten Wahl der Spanungsdicke ergibt sich die schneidstoffspezifische Mengenrate (d. h. bearbeitete Werkstücke je Zeiteinheit) aus dem Produkt $h \cdot v_c$, wobei h die Spanungsdicke und v_c die anwendbare Schnittgeschwindigkeit bezeichnet.

Soweit größere Zugaben zu spanen sind, tritt als direkter Faktor noch die mögliche Schnitttiefe a_p hinzu, die geringfügig vom Schneidstoff beeinflusst wird.

In der überwiegenden Mehrzahl der Bearbeitungsfälle ist die Schnitttiefe a_p durch die entsprechende Zugabe fest vorgegeben und die Spanungsdicke h bzw. der Vorschub f entweder durch die Starrheit des Systems Maschine/Werkstück/Werkzeug oder bestimmte Forderungen an die Rauheit der bearbeiteten Fläche, unabhängig vom Schneidstoff, nach oben begrenzt. In diesen Fällen reduziert sich der Einfluss des Schneidstoffs auf die anwendbare Schnittgeschwindigkeit v_c .

Eine weitere Einflussgröße für die Wahl des Schneidstoffs stellen die Werkzeugkosten je Standzeit K_{WT} dar. Sie ergeben sich angenähert nach VDI 3321 aus der Gleichung:

$$K_{WT} = \frac{K_{Wa}}{n_T} + K_{Ww} (+K_{Ws}) \quad (22)$$

worin bedeuten:

K_{WT}	Werkzeugkosten je Standzeit in €
K_{Wa}	Anschaffungskosten des Werkzeugs in €
n_T	Anzahl der Standzeiten (bei Wendepplatten Anzahl der Schneidkanten)
K_{Ww}	Kosten für das Wechseln des verschlissenen Werkzeugs in €
K_{Ws}	Kosten für das Nachschleifen des Werkzeugs (entfällt bei Wendepplatten) in €

Die Gleichung (22) zeigt, dass die Anschaffungskosten K_{Wa} in der Regel nur einen relativ kleinen Anteil der Werkzeugkosten je Standzeit K_{WT} ausmachen. Die beiden anderen Summanden sind meist größer.

Die Werkzeugkosten je Werkstück K_W folgen dann der Gleichung

$$K_W = \frac{K_{WT}}{n_{WT}} \quad (23)$$

wobei bedeuten:

K_W	Werkzeugkosten je Werkstück in €
n_{WT}	Standmenge, d. h. Anzahl der pro Standzeit bearbeiteten Werkstücke

Die vom Schneidstoff abhängigen Bearbeitungskosten je Werkstück K_1 sind dann

$$K_1 = t_{h1} \cdot R + K_{fix} + K_W = K_{th1} + K_{fix} + K_W \quad (24)$$

worin bedeuten:

K_1	Spanungskosten je Werkstück in €
t_{h1}	Spanungszeit des Werkzeugs je Werkstück in min
K_{fix}	Fixkosten (unabhängig von v_c) in €
K_{th1}	Hauptzeitkosten in €

R Restkostensatz, d. h. Kostensatz des Arbeitsplatzes ohne Werkzeugkosten in €/min

Ohne diese Überlegungen ist eine korrekte Wahl des Schneidstoffes kaum möglich. So kann z. B. ein in der Anschaffung wesentlich teureres Werkzeug entweder durch eine größere Standmenge n_{WT} oder durch eine höhere Mengenrate den Wert für K_1 erheblich reduzieren.

Generell führen diese Überlegungen dazu, Hartmetall als Schneidstoff (d. h. in der Regel N10) gegenüber HSS eindeutig zu bevorzugen; das gilt auch dann, wenn Hartmetall – etwa wegen begrenzter Schnittgeschwindigkeit – keine höhere Mengenrate gegenüber HSS bewirkt. In diesem Fall ist zu prüfen, ob nicht das überlegene Standzeitverhalten von Hartmetall in der Gleichung (23) die Standmenge n_{WT} entsprechend erhöht. Soweit Wendeschneidplatten Verwendung finden, wirkt dabei außerdem in der Gleichung (22) der Wegfall des dritten Summanden K_{Ws} kostensenkend.

Die Anwendungsgrenzen für Hartmetall als Schneidstoff ergeben sich meist aus der Werkzeuggeometrie: Filigrane Werkzeuge verlangen vielfach einen extrem zähen Schneidstoff, geometrisch komplexe Werkzeugformen sind aus Hartmetall u. U. nicht oder nur zu nicht vertretbaren Kosten herstellbar oder der Zerspanungsvorgang stellt sehr hohe Anforderungen an die Schneidstoffzähigkeit. Ein Beispiel dafür ist das Gewindebohren, wobei der Gewindebohrer entgegen der Schneidrichtung wieder aus der Bohrung gedreht werden muss. Hier finden üblicherweise Werkzeuge aus HSS Verwendung.

6. Schneidengeometrie

6.1 Span- und Freiwinkel

Die großen Unterschiede in der Zerspanbarkeit der verschiedenen Kupferlegierungen bedingen eine Anpassung der Werkzeuggeometrie an die werkstoffspezifischen Eigenschaften. Insbesondere im Hinblick auf eine günstige Spanbildung empfiehlt sich daher eine auf den jeweiligen Werkstoff abgestimmte Schneidengeometrie zu wählen. Eine Einteilung der Schneidengeometrien in Anlehnung an die Zerspanungshauptgruppen I – III ist unbefriedigend, da dies eine zu weitgehende Vereinfachung darstellt.

Für eine Klassifizierung der Schneidengeometrie wurde daher eine feinere Einteilung in drei Gruppen mit den Kennbuchstaben A, B und C vorgenommen, Tab. 12. Soweit Spannungswerkzeuge mit mehr oder weniger unveränderbarer Schneidengeometrie verwendet werden (z. B. Fräser), unterscheidet die DIN-Norm 1836 die Zahnformen H, N und W. Die Zahnform H entspricht dabei etwa der Klasse A, die Zahnform N der Klasse B und die Zahnform W der Klasse C.

Die Kennbuchstaben für die Schneidengeometrie sind in den Tab. 9 bis Tab. 11 den Werkstoffen zugeordnet. Die Zerspanbarkeit von Kupferlegierung kann dann wie folgt klassifiziert werden. Z. B.: Werkstoff CuZn39Pb3 = I.A.100 (I: Zerspanungshauptgruppe, A. Kennbuchstaben Schneidengeometrie, 100: Zerspanbarkeitsindex).

Beim Drehen im kontinuierlichen Schnitt von Kupferwerkstoffen, die zur Bildung langer zäher Späne neigen, ist in vielen Fällen ein Formen der Späne zu Wendeln unerlässlich, weil andernfalls die auftretenden Band- oder Wirrspäne sowohl die Unfallgefahr steigern, als auch den Arbeitsablauf stören. Abhilfe bringt hier das Anwenden von Spanleitstufen (Abb. 20), die dem ablaufenden Span eine bestimmte Form aufzwingen, soweit er eine Mindestdicke von etwa 0,2 – 0,3 mm aufweist. In Tab. 12 sind die Kennbuchstaben für die Schneidenformen, die eine Spanleitstufe aufweisen, mit einem Sternchen gekennzeichnet (A*, B*, C*). Ferner ist der Rückenwinkel der Spanleitstufe angegeben.

Durch Spanleitstufen vergrößert sich die Stauchung des Spans. Dies bewirkt höhere Zerspankräfte und verringert die Standzeit. Das gilt umso mehr, je widerstandsfähiger der ablaufende Span ist und je stärker er verformt wird.

Wieweit das letztere geschieht, hängt einerseits von der Breite der Spanleitstufe ab, andererseits von dem Winkel zwischen der wirksamen Spanfläche und der Rückenkonte [23]: Je tiefer die Spanleitstufe ist und je steiler die Rückenkonte ausgeführt ist, desto stärker wird der Span gestaucht. Als allgemeine Empfehlung für Spanleitstufen können etwa 0,8 mm Höhe und ein Winkel von 70° bzw. 50° zwischen

Rückenkonte und wirksamer Spanfläche dienen. Der Übergang von der Spanfläche zur Rückenkonte soll einen Radius von etwa 0,3 – 0,5 mm aufweisen. Die Breite der Spanleitstufe richtet sich nach der Spanungsdicke h , die sich aus Vorschub f und Einstellwinkel κ_r ergibt ($h = f \cdot \sin \kappa_r$); einen zusätzlichen geringeren Einfluss übt die Spanungsbreite b aus: Ein breiterer Span benötigt eine breitere Stufe. In guter Näherung gilt [23]:

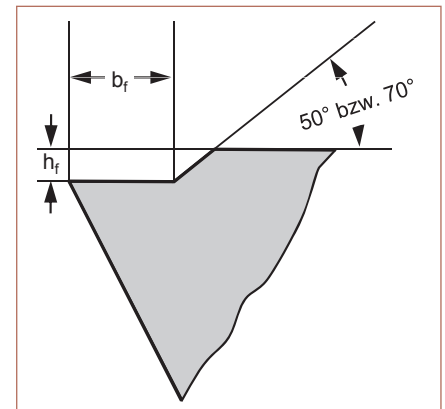


Abb. 20: Querschnitt einer eingeschlifften Spanleitstufe

Spanungsbreite b in mm	Breite der Spanleitstufen b_s in mm
0,4 ... 1,5	$5 \cdot h$
1,6 ... 7	$8 \cdot h$
7,5 ... 12	$12 \cdot h$

Die Spanleitstufe kann ferner parallel zur Schneide verlaufen oder so ausgeführt sein, dass sie sich zur Schneidenecke hin vergrößert oder verkleinert („Spanleitwinkel“ Abb. 21).

Parallel zur Schneidkante verlaufende Spanleitstufen (Spanleitwinkel = 0°) führen den Span neutral ab und begünstigen damit uhrfederartige Spiralspäne. Nimmt die Breite der Spanleitstufe zur Schneidenecke ab (positiver Spanleitwinkel > 0°), so wird der ablaufende Span vom Werkstück weg geführt und damit die Bildung von Wendelspänen begünstigt.

Kennbuchstabe der Schneidenform	HM		HSS		Rückenwinkel der Spanleitstufe ¹⁾ (°)
	γ (°)	α (°)	γ (°)	α (°)	
A A*	0 – 8	6	5 – 10	8	50
B B*	8 – 12	6	10 – 14	8	70
C C*	20	6	25	8	50 – 70

¹⁾ Mit * gekennzeichnete Schneidenform haben eine Spanleitstufe.
Anmerkung: Die Angaben für Spanleitstufen beziehen sich nur auf Drehmeißel bzw. Wendeplatten zum Drehen oder Bohren; sie gelten also nicht für Fräser, Bohrwerkzeuge usw.

Tab. 12: Einteilung der Schneidengeometrien

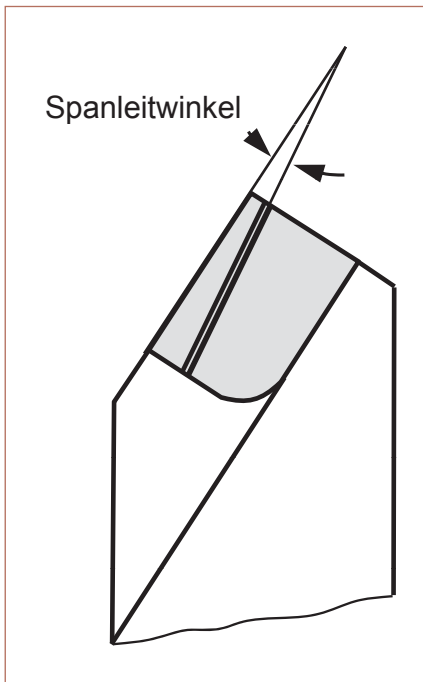


Abb. 21: Spanleitwinkel der Spanleitstufe

Eine Ausbildung der Spanleitstufe mit zunehmender Breite zur Schneidenecke (negativer Spanleitwinkel $< 0^\circ$) führt den Span in Richtung der Bearbeitungsfläche und begünstigt damit das Entstehen kurzer Spanlocken, solange der Span nicht zu zäh ist. Nachteilig ist dabei die Gefahr, dass der Span die bearbeitete Fläche beschädigt.

Die Wirksamkeit der Spanleitstufe hängt aber generell davon ab, wie zäh der ablaufende Span ist. Das wiederum ergibt sich einerseits aus den Eigenschaften des zu zerspanenden Werkstoffs, andererseits aus den Maßen des abgehobenen Spanes: Je dünner dieser ist, desto schlechter kann er geformt oder gebrochen werden.

Zwingt der Bearbeitungsvorgang zu einer kleinen Spanungsdicke – etwa wegen der Rauheit der zu bearbeitenden Fläche, einem labilem Werkstück oder Werkzeug usw. – so kann der Spanlauf nicht mehr sicher beherrscht werden.

In diesem Fall lassen sich Wirrspäne, wie sie bei zähen Kupferwerkstoffen auftreten, so gut wie nicht vermeiden. Um die von ihnen hervorgerufenen Störungen des Arbeitsablaufs zu begrenzen, bleibt nur der Weg diese Arbeitsstufen mit kleiner Schnitttiefe zu spanen, um die Festigkeit des abgehobenen Spans durch eine Verringerung seiner Breite herabzusetzen.

Unabhängig hiervon gilt, dass sich eine Spanleitstufe dann erübrigt, wenn sie entweder wirkungslos bliebe (kleine Spanungsdicke) oder deshalb überflüssig ist, weil verfahrenstechnisch ein unterbrochener Schnitt vorliegt (z. B. beim Fräsen) bzw. der Span durch die verfahrensbedingte Geometrie ohnehin zu einem bestimmten Ablauf gezwungen ist (z. B. beim Bohren oder Gewindebohren).

7. Kühlschmierstoffe

Kupferwerkstoffe werden zum Teil trocken zerspannt, teilweise unter Verwendung eines Kühlschmiermittels. Bei verschiedenen Arten von Werkzeugmaschinen ist der Gebrauch eines Kühlschmiermittels unumgänglich, weil der Kühlschmierstoff zusätzlich bewegte Teile der Maschine schmieren soll.

Beim Zerspanen erreicht das Kühlschmiermittel normalerweise nicht die Spanwurzel, so dass der Schneidkeil im Bereich der Kontaktzone nicht direkt beeinflusst werden kann. Eine indirekte Beeinflussung ist aber in diesem Bereich dadurch gegeben, dass das Werkstück und Werkzeug gekühlt werden, wodurch das den Wärmeabfluss begünstigende Temperaturgefälle zunimmt. Ferner schreckt das Kühlschmiermittel die Oberseite des Spanes ab und begünstigt damit seine Krümmung bzw. den Spanbruch. Zudem spült das Kühlschmiermittel den Arbeitsbereich sauber.

Die Aufgabe des Kühlschmiermittels liegt je nach Zerspanungsverfahren und Werkzeug mehr in der Kühl- oder in der Schmierwirkung. Werkzeuge aus HSS bleiben nur bis zu ihrer Anlass-temperatur (~550–600°C) warmhart,

so dass bei ihnen die Kühlwirkung im Vordergrund steht. Bei HM-Schneiden mit ihrer im Vergleich höheren Warmhärte ist dies nicht der Fall.

Hat das Werkzeug hingegen viele Bereiche, die zwar mit dem Werkstück beim Bearbeiten in direktem Kontakt stehen, aber nicht zum Zerspanungsprozess beitragen (z.B. Reibahlen, Gewindebohrer), so ist die Schmierwirkung wichtiger als die Kühlwirkung.

Sofern der Kühlschmierstoff (KSS) nicht maschinenseitig vorgegeben ist, wird eine KSS Emulsion bevorzugt, wenn vorwiegend gekühlt werden soll. Dies begründet sich in der hohen spezifischen Wärmekapazität von Wasser.

Soll dagegen intensiv geschmiert werden, so ist ein Schneidöl günstiger als eine Emulsion. Für eine bessere Zu- und Abfuhr sollte dieses dünnflüssig sein.

Geschwefelte Schneidöle können dazu neigen, mit Kupfer chemisch zu reagieren. Entweder ist daher auf den Schwefelzusatz zu verzichten oder die Werkstücke sind unmittelbar nach der Bearbeitung zu spülen [24].

Bei Bearbeitungsfällen, bei denen die normale Kühlschmierung durch einen Flüssigkeitsstrahl nicht anwendbar ist, kann auf „Sprühkühlung“ ausgewichen werden. Dabei nimmt ein Druckluftstrahl das Kühlschmiermittel mit und setzt es als Nebel im Arbeitsbereich ab. Die expandierende Luft unterstützt dabei durch ihren Temperaturabfall die Kühlwirkung (z.B. beim Gewindebohren mit Schneidöl auf Mehrstationenmaschinen, die normalerweise mit Emulsion betrieben werden).

Neben der konventionellen Überflutungskühlung können Kupferwerkstoffe auch unter Einsatz einer Minimalmengenschmierung (MMS) oder trocken zerspannt werden [25]. Technologisch gesehen, ist beides in einer Vielzahl von Zerspanungsoperationen von Kupferlegierungen möglich.

Welche Kühlschmierung in der Praxis zum Einsatz kommt, hängt neben der technologischen Machbarkeit häufig auch von maschinenseitigen Faktoren, wie beispielsweise der Späne- oder Wärmeabfuhr, der Schmierung von Maschinenteilen, aber auch der Möglichkeit, den Spanbruch zu beeinflussen, ab.

8. Angaben zur Berechnung der Bearbeitungskosten

Bei der Optimierung der Schnittparameter können rein rechnerische Methoden Anwendung finden, sofern nur ein Faktor optimiert wird [26]. Wenn aber, wie in der Praxis häufig, mehrere Schnittparameter wählbar sind, ist eine rein mathematisch basierte Optimierung in der Regel nicht möglich.

Üblicherweise wird bei der Schnittparameterbestimmung und -optimierung schrittweise vorgegangen [26]: Hierzu werden im ersten Schritt die nicht änderbaren Faktoren ermittelt. Je nach Bearbeitungsaufgabe kann dies z.B. die Schnitttiefe a_p sein, die durch ein vorgegebenes Aufmaß bestimmt sein kann. Häufig ist auch die Schnittgeschwindigkeit v_c durch den Drehzahlbereich der Maschine und den Bearbeitungsdurchmesser beschränkt. Ein weiteres Beispiel ist die Schneidanzahl eines vorhandenen Fräasers. Diese fest vorgegebenen Größen werden dann ohne weitere Betrachtung übernommen.

Die nicht fest vorgegebenen Faktoren werden im nächsten Schritt nach steigender Größe ihrer Exponenten in der erweiterten Taylor-Gleichung (Gl. 8) geordnet.

$$T = \frac{C_1}{a_p^{c_a} \cdot f^{c_f} \cdot v_c^{-k}} \quad (8)$$

Meist folgt hieraus die Reihenfolge Schnitttiefe a_p , Vorschub f (bzw. Spannungsdicke h) und Schnittgeschwindigkeit v_c .

Die Schnitttiefe a_p sollte zunächst so groß wie möglich gewählt werden, sofern sie nicht im ersten Schritt z.B. durch ein bestimmtes Aufmaß vorgegeben ist. Die weitere Auslegung erfolgt unter Berücksichtigung der durch das Werkzeug, den Werkstoff und die Maschine vorgegebenen Grenzen. Mit Wahl der maximal möglichen Schnitttiefe wird die Anzahl der notwendigen Schnitte reduziert. Nach Bestimmung der Schnitttiefe a_p sollte auch der Vorschub f so groß wie möglich ausgelegt werden. Dieser wird analog zur Schnitttiefe a_p auch durch werkzeug-, maschinen- und werkstoffseitige Faktoren begrenzt.

Die Schnittwertoptimierung ist nun auf eine Bestimmung der Schnittgeschwindigkeit v_c in Abhängigkeit der vorgegebenen Standzeit T des Werkzeuges

zurückgeführt worden. In der Regel ist eine Bestimmung der Standzeit T mit Hilfe der einfachen Taylor-Gleichung (Gl. 6) möglich:

$$T = C_v \cdot v_c^k \quad (6)$$

Im normalen Schnittgeschwindigkeitsbereich beeinflusst die Schnittgeschwindigkeit v_c die erreichbare Standzeit T des Werkzeuges folgendermaßen: Wird die Schnittgeschwindigkeit v_c erhöht, so sinkt die Standzeit T und umgekehrt. Gleichzeitig reduziert eine höhere Schnittgeschwindigkeit v_c die Bearbeitungszeit t_h und damit die hierbei entstehenden Kostenanteile je Werkstück, erhöht aber durch eine kürzere Standzeit T die Werkzeugkosten je Werkstück K_W . Da die beiden Einflüsse gegenläufig sind, hat die Summe der beiden Kostenarten je Werkstück bei einer bestimmten Schnittgeschwindigkeit v_{oK} ein Minimum. In Abb. 22 sind die verschiedenen Kosten in Abhängigkeit von der Schnittgeschwindigkeit und die graphische Ermittlung der kostenoptimalen Schnittgeschwindigkeit v_{oK} dargestellt. Ein Abweichen von der kostenoptimalen Schnittgeschwindigkeit v_{oK} erhöht die Zerspanungskosten je Werkstück, da ent-

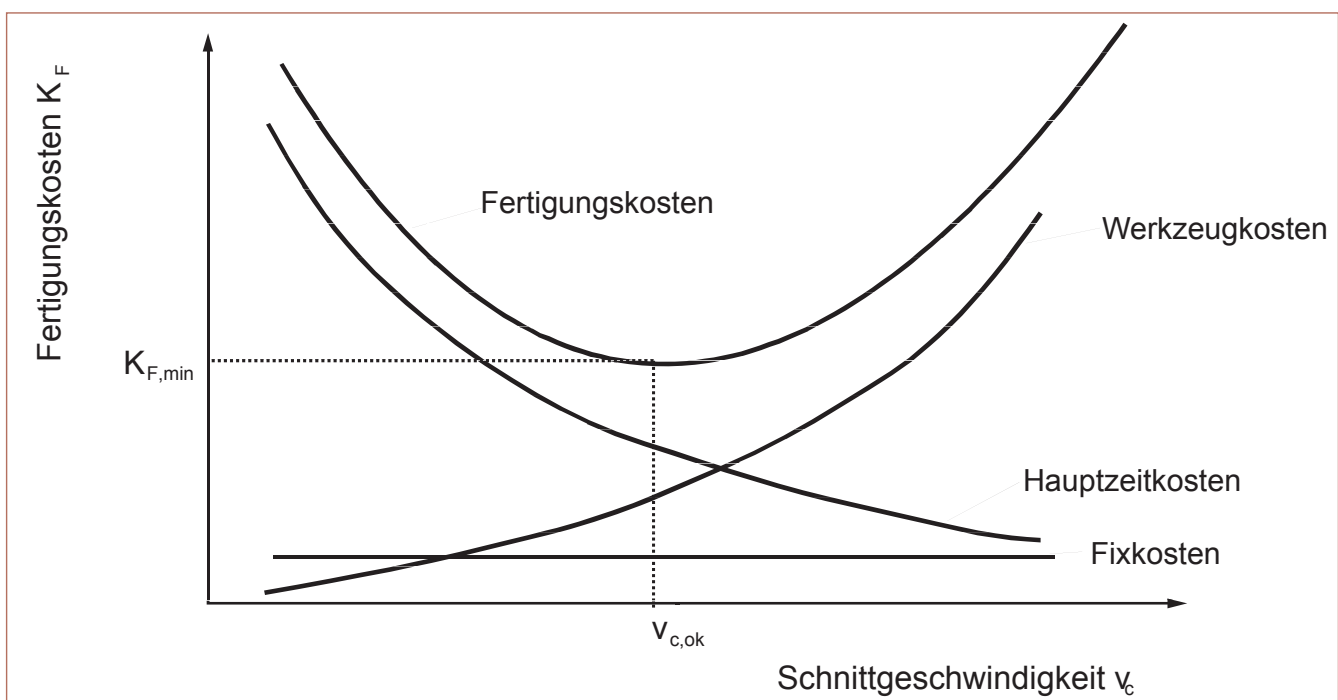


Abb. 22: Kosten in Abhängigkeit der Schnittgeschwindigkeit (nach VDI 3321)

weder die spanende Bearbeitungszeit oder aber die Werkzeugkosten steigen.

Rechnerisch lässt sich die kostenoptimale Standzeit T_{oK} mit Hilfe der Gleichungen 6 und 24 ermitteln. Durch Differentiation und Umformen folgt die Gleichung 25:

$$T_{oK} = \frac{(-k - 1) \cdot K_{WT}}{R} \quad (25)$$

worin bedeuten

- T_{oK} = kostenoptimale Standzeit in min
- k = Steigungswert der logarithmischen v_c -T-Funktion
- K_{WT} = Werkzeugkosten je Standzeit nach Gleichung (22) in €
- K_{ML} = Maschinen-, Lohn-, Lohnneben- und Restfertigungsgemeinkosten in €/h
- t_w = Werkzeugwechselzeit

Aus der Gleichung 25 folgt, dass die kostenoptimale Standzeit T_{oK} von dem Exponenten $-k$, den Werkzeugkosten je Standzeit K_{WT} und den Maschinen-, Lohn-, Lohnneben- und Restfertigungsgemeinkosten K_{ML} sowie der Werkzeugwechselzeit t_w abhängig ist. Der Wert des Exponenten $-k$ wird von der Werkstoff/Schneidstoffpaarung und dem Zerspanungsverfahren beeinflusst.

Der Exponent $-k$ ist bei Schnellarbeitsstahl (HSS) und/oder schwer zerspanbaren Werkstoffen groß. Bei Hartmetall und/oder gut zerspanbaren Werkstoffen ist k kleiner. Daraus folgt, dass ein schwer zerspanbarer Werkstoff bei gleichen Verhältnissen eine größere Standzeit T_{oK} verlangt. Dieser Forderung kann jedoch in der Praxis nicht immer entsprochen werden.

Liegt der berechnete Wert für T_{oK} und damit v_{oK} außerhalb des in der Praxis verwendbaren Bereichs, so stellt die größte Annäherung an ihn das in der Praxis erreichbare Optimum dar.

Im Allgemeinen sollten teure Werkzeuge auf (kostengünstigen Maschinen) mit niedrig gewählten Schnittwerten eingesetzt werden. Andererseits sollten kostengünstige Werkzeuge auf kostenintensiven Maschinen mit den technologisch maximal möglichen Schnittwerten eingesetzt werden.

Für die zeitgünstigste Schnittgeschwindigkeit v_{ot} existieren vergleichbare rechnerische Vorgehensweisen [26].

Hierauf wird nicht weiter eingegangen, da der Unterschied zwischen v_{oK} und v_{ot} in der Regel eher gering ist.

Soweit in „simultan zerspanenden Werkzeugkollektiven“ mehrere, eventuell auch unterschiedliche Werkzeuge gleichzeitig zerspanen, ändert sich die Gleichung 25, da für K_{WT} nun die Summe der Werkzeugkosten der gleichzeitig zerspanenden Werkzeuge einzusetzen ist. Der Wert der kostenoptimalen Standzeit T_{oK} wird damit größer als beim einfachen zerspanenden Werkzeug [27, 28].

9. Ultrapräzisionszerspanung von Kupfer

Der Werkstoff Kupfer findet in optischen Systemen weite Verbreitung. Spiegelnde Oberflächen an Bauteilen aus Kupfer lassen sich durch die Ultrapräzisionszerspanung mit hoher Form- und Oberflächengüte erzeugen. Dazu werden im Folgenden kurz die Grundlagen der Ultrapräzisionszerspanung und deren Anwendungen erläutert. Anschließend werden die erreichbaren Qualitäten und Grenzen bei der Zerspanung aufgezeigt.

9.1 Grundlagen der Ultrapräzisionszerspanung

Die Ultrapräzisionszerspanung (UP-Zerspanung) oder auch Diamantzerspanung unterscheidet sich von konventionellen Fertigungsverfahren vor allem durch den verwendeten Schneidstoff. Monokristalliner Diamant ermöglicht die Herstellung von Werkzeugen mit präziser Schneidengeometrie und geringem Verschleiß. Typische Schneidkantenradien liegen im Bereich von 50 nm. Die Diamantschneide in Verbindung mit der UP-Maschinenteknik ermöglicht die Herstellung von optischen Oberflächen mit Rauheiten von wenigen Nanometern Ra (siehe Abb. 23).

Ein Vorteil der Kupferlegierungen und auch anderer Nichteisenmetalle ist es,

dass sie sich sehr gut mit monokristallinem Diamant bearbeiten lassen. Die Bearbeitung von Stahl ist aufgrund der Kohlenstoffaffinität des Eisens nicht möglich [21, 29, 30].

Die Eigenschaften von UP-Maschinen sind vor allem durch fluidische Führungssysteme (Aerostatik, Hydrostatik), luftgelagerte Spindeln sowie lineare Direktantriebe bestimmt. Zum Erreichen einer hohen thermischen Stabilität und guter Dämpfungseigenschaften wird vorrangig Granit als Werkstoff für den Aufbau von UP-Maschinen verwendet.

Im Bereich der Diamantzerspanung werden hauptsächlich die Verfahren Drehen und Fly-Cutting eingesetzt. Das Drehen bietet eine hohe Geometrievielfalt, wobei zusätzlich durch Fast-Tool-Servo-Systeme die Fertigung von nichtrotationssymmetrischen, optischen Oberflächen ermöglicht wird. Beim Fly-Cutting handelt es sich um eine Art Einzahnfräsen. Am Außendurchmesser einer Scheibe rotiert in der Regel eine Diamantschneide. Das Verfahren wird sowohl zum Fertigen von Planflächen als auch zur Herstellung linearer Nutstrukturen eingesetzt. Die Geometrie der Nutstrukturen ist dabei durch die Form des Werkzeugs (Radius, Facette, V-Form) bestimmt.

Die Diamantzerspanung weist eine geringe Abhängigkeit der Oberflächenqualität von der Schnittgeschwindigkeit auf. Im Allgemeinen wird bei der Drehbearbeitung mit konstanter Drehzahl gearbeitet, sodass das Drehzentrum mit Schnittgeschwindigkeit Null bearbeitet wird. Schnittkräfte liegen bei der UP-Zerspanung im Bereich von weniger als einem Newton. Dennoch sind aufgrund der geforderten Formgenauigkeiten von kleiner 0,1 µm und zur Vermeidung von Schwingungen hohe Steifigkeiten in der Maschine gefordert.

Die Drehzahl wird in Abhängigkeit des Bauteildurchmessers und -werkstoffs sowie der Dynamik von Zusatzachsen gewählt. Typische Drehzahlen bei der Herstellung von Metalloptiken durch das UP-Drehen liegen im Bereich bis 2500 U/min. Wie in der Makrozerspannung orientiert sich der Vorschub am Werkzeugradius und der spezifizierten Oberflächenrauheit. Die Zustelltiefen sind werkstoffabhängig. Für Buntmetalle liegen empfohlene Zustelltiefen bei der Drehbearbeitung bei 20 – 50 µm für Schruppschnitte und bei etwa 3 µm für den Schlichtvorgang.

In der Regel wird beim UP-Drehen eine Minimalmengenschmierung eingesetzt. Isoparaffine werden mit Druckluft an die Bearbeitungsstelle gebracht und zerstäubt. Neben der Schmierung sorgt die Minimalmengenschmierung auch für den Abtransport der Späne. Die Schmierstoffe besitzen eine hohe Verdampfungsenergie und beeinflussen den Prozess nicht durch Verdunstungskühle [29].

9.2 Anwendungsbeispiele von Kupferlegierungen

Kupfer und Kupferlegierungen finden unterschiedliche Anwendungen in der Ultrapräzisionstechnik. Eine weite Verbreitung findet Kupfer in der Fertigung von Optiken für Lasersysteme. Hier ist neben der hohen erreichbaren Oberflächengüte die Wärmeleitfähigkeit des Werkstoffs ein wichtiges Kriterium bei der Wahl des Materials. Trotz der hohen Oberflächengüten und zusätzlicher Beschichtung kann es zu Erwärmung und somit Formänderung der Spiegel kommen. Dies ist nicht zulässig, so

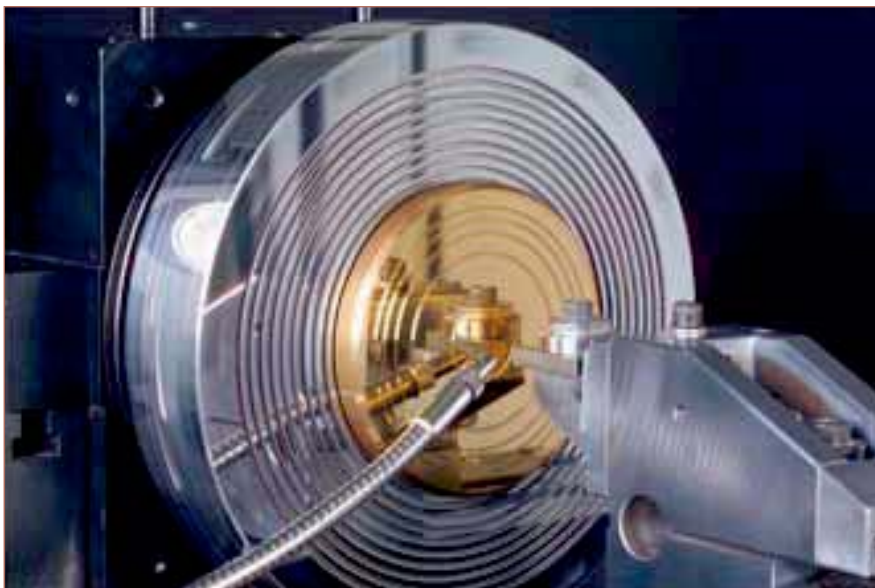


Abb. 23: Ultrapräzisionsdrehen von Messing am Beispiel einer strukturierten Planfläche

dass eine Kühlung der Spiegel durch interne Kühlkanäle durchgeführt wird. Um hohe Oberflächengüten bei der Fertigung der Spiegelflächen zu erreichen, muss für die UP-Zerspanung der Werkstoff eine möglichst hohe Reinheit besitzen. Daher wird in der Regel OFHC Kupfer verwendet (sauerstofffrei und hoch leitend, engl.: oxygen-free high-conductivity). Die hergestellten Spiegel werden nicht nur zur Strahlführung und Fokussierung eingesetzt, sondern auch zur Strahlformung. Durch den Einsatz von FTS-Systemen lassen sich nichtrotationssymmetrische Oberflächenstrukturen auf der Spiegeloberfläche erzeugen. Hierbei wird beispielsweise durch den Einsatz von facettierten Oberflächen eine Homogenisierung des Rohstrahls erreicht. Durch die Verwendung von freigeformten Spiegeloptiken ist weiterhin die Beeinflussung der Ausprägung des Fokus möglich.

Außer Spiegeloptiken werden Kupfer und Kupferlegierungen auch als Werkstoff für Werkzeuge zum Kunststoffspritzgießen von optischen Komponente eingesetzt. Wegen der höheren Härte werden auch Kupfer-Beryllium-Legierungen eingesetzt. Berylliumhaltige Bauteile sind jedoch nach der Richtlinie 2002/95/EG –ROHS– kennzeichnungspflichtig. Neben der Verwendung als Formeinsatz beim Kunststoffspritzgießen wird Messing auch zur Fertigung von mikrostrukturierten Mastern eingesetzt. Hier dienen Messingplatten als Ausgangsmaterial für Strukturmaster mit Abmessungen bis zu einem Quadratmeter. Die Bearbeitung derartiger Replikationsmaster mit Nut- oder Pyramidenstrukturen für die Displaytechnik geschieht durch die Anwendung von Fly-Cutting-Prozessen.

9.3 Werkstoffeigenschaften und Einflüsse

Neben den Faktoren Werkzeug und Maschine beeinflussen die Werkstoffeigenschaften das Bearbeitungsergebnis bei der UP-Zerspanung. Kupfer und Kupferlegierungen werden für technische Anwendungen meist mit einer polykristallinen Gefügestruktur eingesetzt. Dies ist zu berücksichtigen, wenn Genauigkeiten zunehmen

beziehungsweise Abmessungen der Oberflächenmerkmale abnehmen. Zur Untersuchung der erreichbaren Oberflächengüten und auftretenden Zerspankräfte sind verschiedene Forschungsarbeiten an polykristallinem Kupfer durchgeführt worden [29, 31].

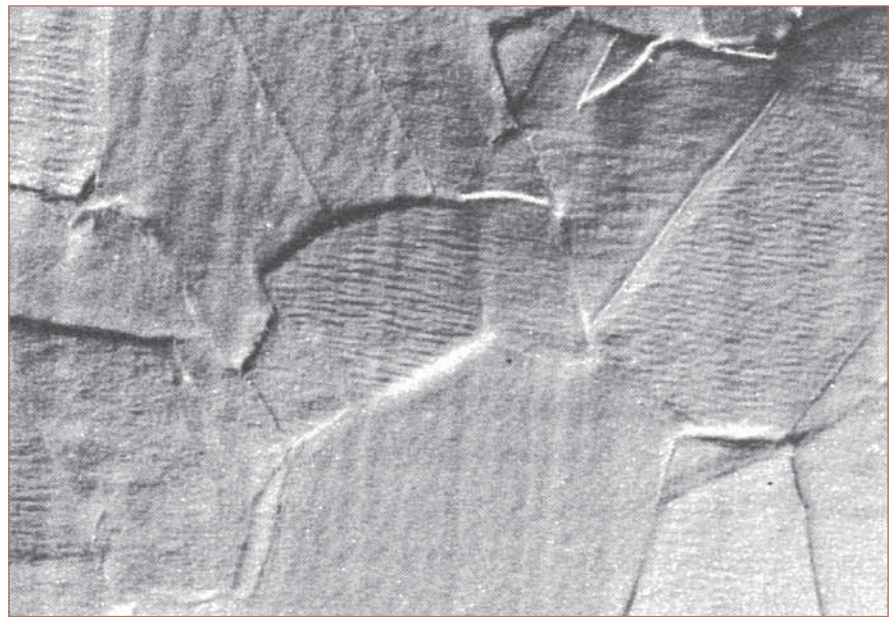


Abb. 24: Diamantzerspannte Oberfläche von OFHC-Kupfer [29]

Die entstehende Oberflächencharakteristik ist stark durch die Kornstruktur und die Korngrenzen begrenzt. Durch den so genannten »Spring-Back-Effekt« (Einfedern einzelner Körner während der Zerspanung) ergeben sich bei der Diamantzerspannung von Planfläche in OFHC-Kupfer Niveauunterschiede von bis zu 40 Nanometern zwischen zwei benachbarten Kristallen (siehe Abb. 24) [29].

Der Grund für die Ausbildung der Oberflächenstrukturen ist im anisotropen Werkstoffverhalten zu sehen. Bedingt durch die kubisch-flächenzentrierte (kfz) Gitterstruktur ergeben sich unterschiedliche Packungsdichten für die einzelnen Gitterebenen, woraus stark richtungsabhängige elastische und plastische Werkstoffeigenschaften resultieren. Beispielsweise variiert der E-Modul eines Kupfer-Einkristalls in Abhängigkeit der Belastungsrichtung zwischen 68 und 190 kN/mm². Die Auswirkungen verstärken sich durch die unterschiedlichen Orientie-

rungen der Gefügekörner im polykristallinen Gefüge. Somit kommt es während der Zerspanung zur unterschiedlichen Einfederung der Gefügekörner, was entsprechend zu den oben beschriebenen Niveauunterschieden führt.

Die Auswirkungen der Kornstruktur zeigen sich weiterhin bei der Mikrostrukturierung. Insbesondere in der Ausbildung von Graten entlang von Nutstrukturen. Abb. 25 zeigt V-Nuten mit einer Tiefe von 7 µm, die durch einen Einstechdrehprozess in OFHC-Kupfer gefertigt worden sind. Die Gratbildung entlang der Nuten variiert mit der Kornstruktur des Kupfers, welche durch einen Ätzprozess sichtbar gemacht worden ist.

An den Übergängen zwischen einzelnen Körnern ändern sich die Eigenschaften des Materials, sodass sich sowohl die Zerspanbedingungen als auch die Gratbildung ändert. Bei dem hier gezeigten Material liegt die Korngröße im Bereich von 50 – 80 µm. Die Homogenität kann durch geringere Korngrößen verbessert werden. Feinkristalline Kupferwerkstoffe lassen sich durch hochgradige, plastische Verformung herstellen. Ein SPD-Verfahren (Severe Plastic Deformation) ist das ECAP-Verfahren (Equal Channel Angular

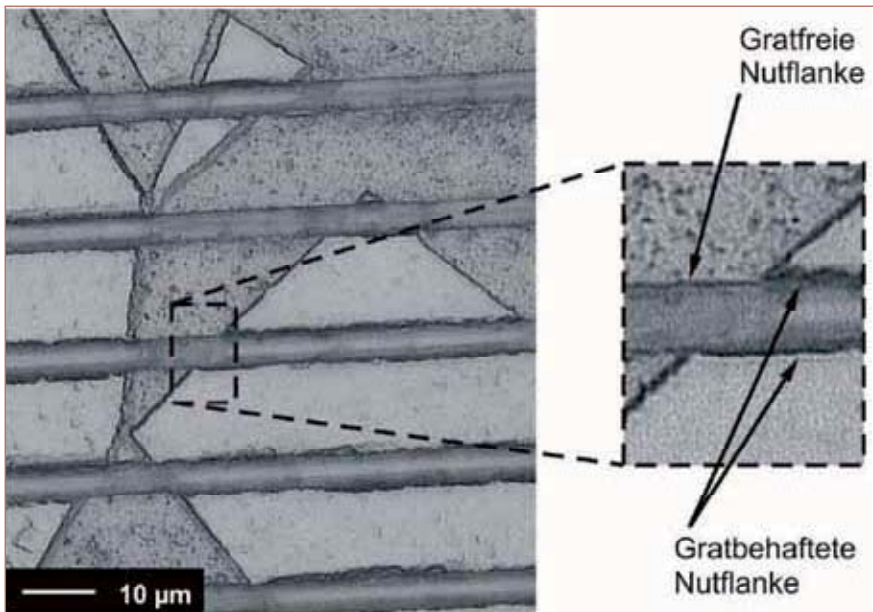


Abb. 25: Gratbildung in Abhängigkeit der Kornstruktur [32]

Pressing) mit dem sich hohe Umformgrade und somit starke Versetzungen erzielen lassen. Mit diesem Verfahren hergestellte Materialproben sind bereits mit Erfolg bei Mikrostrukturie-

rungsversuchen eingesetzt worden [32]. Nichtsdestotrotz lassen sich mit der Diamantzerspannung von OFHC-Kupfer Oberflächengüte von bis zu 3 nm Ra erzielen [29].

10. Richtwerte für die zerspanende Bearbeitung von Kupfer und Kupferlegierungen

In den Richtwerttabellen werden Empfehlungen für die Schnittgeschwindigkeiten, z.B. beim Drehen und Fräsen, in Abhängigkeit der Spanungsdicke gegeben. Zum Auffinden der Richtwerte empfiehlt es sich folgendermaßen vorzugehen:

Handelt es sich um einen genormten Werkstoff, so wird in den Tab. 9 bis Tab. 11 der Werkstoff gesucht und der Zerspanbarkeitsindex sowie der Kennbuchstabe für die Schneidengeometrie ermittelt. Bei nicht genormten Werkstoffen ist anhand der Hauptlegierungsbestandteile ein in der Zusammensetzung möglichst ähnlicher Werkstoff auszuwählen.

Mit Hilfe des Zerspanbarkeitsindex lassen sich dann aus den Tab. 13 bis Tab. 19 Richtwerte für das entsprechende spanende Fertigungsverfahren herausuchen.

Aus Tab. 12 kann mit Hilfe des Kennbuchstabens eine Empfehlung für die Schneidengeometrie ermittelt werden.

Da die Zerspanbarkeit vom Festigkeitszustand bzw. von der Härte abhängig ist, finden sich in den Tab. 9 bis Tab. 11 Angaben über die Festigkeit und Härte. Bei abweichenden Festigkeits- bzw. Härtezuständen muss der sich aus dem Zerspanbarkeitsindex ergebende Richtwert inter- bzw. extrapoliert werden.

Im Folgenden werden die für verschiedene spanende Fertigungsverfahren in Tabellen angegebenen Richtwerte erläutert.

10.1 Drehen von Kupferwerkstoffen

Die Richtwerte der Tab. 13 gelten mit einer Wahrscheinlichkeit von etwa 70 %. Sie legen eine Verschleißmarkenbreite von $VB \approx 0,6$ mm am Ende der Standzeit und eine Standzeit von $T = 30 \dots 60$ min bei HM-Schneiden der Gruppe N10 (N20), bzw. $T = 45 \dots 90$ min bei HSS-Schneiden (HS 10-4-3-10) zugrunde.

Für eine Verdoppelung der Standzeit T ist bei HM der Wert für v_c um etwa 16 % zu ermäßigen, bei HSS um etwa 10 %.

Eine Ausnahme hiervon bilden die zähen, hochkupferhaltigen Werkstoffe. Bei ihnen ist zur Verdoppelung der Standzeit T bei HM der Wert v_c um etwa 30 % zu senken.

Gilt als Standzeit $VB \approx 0,4$ mm, so ist für die gleiche Standzeit die Schnittgeschwindigkeit um etwa 35 % bei HM und um etwa 15 % bei HSS zu reduzieren.

Drehen im unterbrochenem Schnitt hat bei HSS kaum Einfluss auf das Standzeitverhalten; bei HM wird eine um etwa 10 % reduzierte Schnittgeschwindigkeit v_c empfohlen.

Eine normalsandige Gusshaut verlangt bei HM etwa 15 %, bei HSS etwa 20 % herabgesetzte v_c -Werte.

Werden Kupferwerkstoffe mit einer kaltverfestigten Haut bearbeitet, ist deren Zerspanbarkeit ausschlaggebend, die maßgeblich von deren Härte abhängt.

Beim Drehen mit gehemmten Spanfluss wie z.B. bei Profildrehmeißel, Ein- und Abstechen, und Gewindeschneiden, ist die Schnittgeschwindigkeit v_c bei HM um etwa 40 %, bei HSS um etwa 50 % herabzusetzen.

Soweit ein anderer HSS als HS10-4-3-10 verwendet wird, gelten folgende Korrekturfaktoren:

HSS	Faktor für v_c
HS10-1-4-5	0,82
HS12-1-4	0,76
HS6-5-2	0,72
HS2-9-1	0,65

Es ist oft möglich, dass sich die in Tab. 13 vorgeschlagenen Schnittgeschwindigkeiten aufgrund von Randbedingungen, wie z. B. einer Begrenzung der max. Maschinendrehzahl bzw. wenn sehr kleine Werkstückdurchmesser bearbeitet werden sollen, nicht erreichen lassen. In solchen Fällen sind die Zerspanparameter an die Bearbeitungsaufgabe und die gegebenen Randbedingungen anzupassen.

Zerspanbarkeitsindex	Spanungsdicke h [mm]					
	Hartmetalle			HSS		
	0,1	0,32	0,8	0,1	0,32	0,63
100	1260	1000	800	154	85	60
90	1150	910	730	142	79	57
80	1030	800	660	130	74	53
70	910	730	580	117	68	50
60	800	630	510	105	62	46
50	680	540	430	93	57	43
40	570	440	360	81	51	39
30	450	360	284	68	46	36
20	220	160	120	36	28	22

Tab. 13: Richtwerte für das Drehen von Kupferwerkstoffen
Empfohlene Schnittgeschwindigkeit v_c in m/min in Abhängigkeit von der Spanungsdicke h in mm und vom Zerspanbarkeitsindex

Zerspanbarkeitsindex	HSS	VHM D = 3 - 20 [mm]	HM Wendeplatten
	v_c [m/min]	v_c [m/min]	v_c [m/min]
100	80	250	400
90	74	239	373
80	69	228	345
70	63	216	318
60	58	205	290
50	52	194	263
40	46	183	235
30	41	171	208
20	35	160	180

Tab. 14: Richtwerte für das Bohren von Kupferwerkstoffen
Empfohlene Schnittgeschwindigkeit v_c in m/min für HSS, Vollhartmetall und Wendeplatten Bohrer in Abhängigkeit vom Zerspanbarkeitsindex

Durchmesser D [mm]						
		3 - 5	5 - 8	8 - 12	12 - 16	16 - 20
Vorschub f [mm]	HSS	0,1 - 0,16	0,16 - 0,25	0,25 - 0,32	0,32 - 0,4	0,4 - 0,5
	Hartmetall	0,08 - 0,12	0,12 - 0,18	0,18 - 0,23	0,24 - 0,29	0,3 - 0,35

Tab. 15: Vorschübe für das Bohren von Kupferwerkstoffen
Empfohlener Vorschub in Abhängigkeit des Bohrerdurchmessers

10.2 Bohren und Senken von Kupferwerkstoffen

Im Allgemeinen werden Kupferwerkstoffe mit HSS-Spiralbohrern gebohrt. Diese Werkzeuge werden ergänzt durch HM-Bohrer, Wendeplattenbohrer und Einlippen-Tieflochbohrer. Richtwerte für die anwendbaren Schnittgeschwindigkeiten bei HSS-, VHM- und Wendeplattenbohrern finden sich in Tab. 14.

Der anwendbare Vorschub hängt beim Bohren neben der Werkstoff-Schneidstoff-Paarung in erster Linie vom Bohrerdurchmesser ab. Dabei steigt der anwendbare Vorschub je Umdrehung mit zunehmendem Bohrerdurchmesser an. Richtwerte für anwendbare Vorschübe in Abhängigkeit des Durchmessers und des Schneidstoffs sind in Tab. 15 aufgelistet.

Die Spannweite der Eigenschaften von Kupferwerkstoffen verlangt je nach

Werkstoffart unterschiedliche Bauweisen bzw. Schneidengeometrien: Kurzspannende Werkstoffe werden mit dem Bohrer Typ H gebohrt (vgl. DIN 1414-1/2), mittlere Kupferwerkstoffe mit dem Typ N und extrem langspannende mit dem Typ W. HSS-Bohrer des Typs W mit polierten oder hartverchromten Spannkammern begünstigen das Abführen langer, zäher Späne.

In der hier vorgelegten Klassierung entspricht der Bohrer Typ H der Klasse A, Bohrer Typ N der Klasse B und Bohrer Typ W der Klasse C der Schneidengeometrie (Tab. 12).

Bei den HM-Bohrern sind Typen mit aufgelöteter Vollhartmetallkrone, Vollhartmetallbohrer und HM-Wendeplattenbohrer handelsüblich.

Bei Bohrungen ab etwa 18 mm \varnothing (bis etwa $L < 2,5 \cdot d$) sind HM-Wendeplat-

tenbohrer am wirtschaftlichsten. Sie können dann Bohrer der Typen N und H ersetzen, wenn die verwendete Maschine genügend steif und antriebsstark ist. Bei zähen langspannenden Kupferwerkstoffen hängt ihre Anwendbarkeit davon ab, ob Wendeschneidplatten mit geeigneter Spanleitrille verfügbar sind.

Wenn tiefe Bohrungen herzustellen sind, empfiehlt es sich einen Bohrer mit Innenkühlung zu wählen. Durch die Kühlkanäle kann das Kühlschmiermittel besser die Schneiden erreichen und das Abführen der Späne unterstützen.

Extrem tiefe Bohrungen ($L > 10 \cdot d$) werden bei hohen Ansprüchen an Toleranz, Flucht- und Oberflächengüte der Bohrungswand mit Einlippen-Tieflochbohrern erzeugt.

Für Einlippen-Tieflochbohrer gelten andere Regeln, die hier nicht weiter behandelt werden. Bei ihnen hängen Schneidengeometrie und Vorschub vor allem davon ab, dass eine gut abführbare Spanform erreicht wird.

Die Schnittgeschwindigkeit v_c richtet sich innerhalb des durch die Spanbildung gegebenen Bereichs vor allem nach den Werkzeugkosten je Standzeit K_{WT} , die ihrerseits von der Bauart des

Bohrers, seinem Durchmesser und seiner Länge abhängen. Zusätzlich wird sie dadurch beeinflusst, ob die Führungsfasen des Bohrers in einer Bohrbuchse reiben und ob das Kühlschmiermittel die Schneiden einwandfrei erreicht. Damit hat bei Bohren ohne Kühlkanäle die Tiefe der Bohrung ebenso Einfluss auf die Wahl von v_c , wie die Lage des Bohrers beim Arbeiten (horizontal oder vertikal).

Letztlich beeinflusst der Schneidstoff die Wahl von v_c . Ein Schneidstoff mit besserem Standzeitverhalten kann trotz der höheren Anschaffungskosten eine deutliche Senkung der Bearbeitungskosten je Bohrung mit sich bringen.

Neben diesen Einflussgrößen ist die Geometrie der zu erzeugenden Bohrung auf die Wahl von v_c und f zu berücksichtigen: Beim Bohren von Durchgangslochern ergibt sich durch

Zerspanbarkeitsindex	HSS		Bohrungsdurchmesser d [mm]					
	unbeschichtet	beschichtet	5	10	16	25	40	63
	v_c [m/min]		f [mm]					
100	14	19	0,15 – 0,2	0,2 – 0,3	0,25 – 0,35	0,4 – 0,5	0,4 – 0,5	0,6
90	13	18						
80	13	17						
70	12	16						
60	11	15						
50	10	14						
40	10	13						
30	9	12						
20	8	11						

Tab. 16: Richtwerte für das Reiben von Kupferwerkstoffen mit HSS-Reibahlen
Empfohlene Schnittgeschwindigkeit v_c in m/min in Abhängigkeit des Zerspanbarkeitsindex und empfohlener Vorschub f in mm in Abhängigkeit des Bohrungsdurchmessers

Zerspanbarkeitsindex	Hartmetall	Bohrungsdurchmesser d [mm]					
	HC – N10	5	10	16	25	40	63
	v_c [m/min]	f [mm]					
100	30	0,2 – 0,3	0,3 – 0,4	0,35 – 0,45	0,4 – 0,5	0,5 – 0,6	0,6
90	27						
80	25						
70	22						
60	19						
50	16						
40	14						
30	11						
20	8						

Tab. 17: Richtwerte für das Reiben von Kupferwerkstoffen mit Vollhartmetall-Reibahlen
Empfohlene Schnittgeschwindigkeit v_c in m/min in Abhängigkeit des Zerspanbarkeitsindex und empfohlener Vorschub f in mm in Abhängigkeit des Bohrungsdurchmessers

das Austreten des Bohrers zusätzlichen Verschleiß an den äußeren Schneid- ecken. Hier empfiehlt es sich die Werte für v_c und f um etwa 5 % zu reduzie- ren; bei Grundlöchern entfällt diese Beschränkung.

Für Senker nach DIN 343, 344, 222 bzw. DIN 8043, 8022 können die Schnitt- daten aus den für Bohrer angegebenen umgerechnet werden; es gilt hierbei für die Schnittgeschwindigkeit v_c ein um 30 % geringerer Wert, für den Vor- schub f ein um 100 % höherer Wert als beim Bohren mit HSS.

10.3 Reiben von Kupferwerkstoffen

Die Standzeit von Reibahlen hängt stärker von der Toleranz der zu erzeu- genden Bohrung ab als vom zu bear- beitenden Werkstoff. Die kostengün- stigste Standzeit T_{OK} wird bei günstigen Verhältnissen noch bis zu einer Toleranz von IT 8 erreicht, bei kleinerer Toleranz aber i. A.. unterschritten.

Die kostengünstigste Schnittgeschwin- digkeit v_{OK} liegt daher beim Reiben bei wesentlich niedrigeren Werten als die üblichen Empfehlungen vorgeben. Richtwerte für das Reiben enthalten Tab. 16 und Tab. 17.

Andererseits kann der Vorschub f beim Reiben recht hoch gewählt werden; denn sein Einfluss auf die Standzahl

(d. h. die Zahl der je Standzeit geriebe- nen Bohrungen), Toleranzhaltigkeit und Rauheit der Bohrungswand ist relativ gering.

Die Zugabe für das Reiben sollte nicht zu gering festgelegt werden. Sie sollte etwa dem üblichen Untermaß von Senkern entsprechen. Als Einstellwinkel κ_r bewährten sich etwa 45° für kurz-, etwa 30° für langspanende Werkstoffe.

Wesentlich kleinere Werte führen zum Klemmen der Reibahle und verringern die Standzeit, ohne die Rauheit der Bohrungswand zu verbessern. Wichtig ist, dass der Anschnitt genügend genau rund läuft und sein Übergang zur Füh- rungsfase leicht verrundet ist.

Das Ende der Standzeit sollte nicht von der Maßhaltigkeit der geriebenen Bohrung gekennzeichnet sein, sondern durch eine Verschleißmarkenbreite $VB \approx 0,3$ mm am Anschnitt. Andernfalls sinkt die Zahl der möglichen Nach- schriffe des Werkzeugs stark und damit steigen die Werkzeugkosten je Werk- stück wesentlich.

Die Rundheit geriebener Bohrungen neigt verfahrensbedingt zu einem Polygonprofil mit einer „Ecke“ mehr als der Schneidenzahl entspricht. Ungera- de Schneidenzahlen beseitigen diesen Fehler nicht, aber Reibahlen mit extrem ungleicher Teilung verringern ihn stark.

Bei zähem Werkstoff und Durchgangs- bohrungen begünstigt ein Drall der Schneiden entgegen der Schnittrichtung ein Abführen der Späne vor dem Werk- zeug, was die Oberfläche der Bohrung verbessert.

Als Kühlschmiermittel sollte beim Rei- ben Schneidöl verwendet werden.

Wegen der durch sie bewirkten Ver- besserung der Wirtschaftlichkeit sollte jeweils geprüft werden, ob anstelle mehrschneidiger Reibahlen solche mit einer Wendeplatte verwendet werden können.

10.4 Gewindebohren und Gewinde- fräsen von Kupferwerkstoffen

Für den Erfolg beim Gewindebohren ist die Wahl eines geeigneten Gewin- debohrer-Typs ausschlaggebend. Für die Auswahl ist neben dem zu zersp- anenden Werkstoff die Geometrie des zu erzeugenden Gewindes maßgeblich. Richtwerte für die Schnittgeschwindig- keit enthält Tab. 18.

Kurzspanender Werkstoff wird i. A. mit geradgenuteten Gewindebohrern bearbeitet und bei Durchgangsbohrun- gen in der Regel ein Schälanschnitt zur Abfuhr der Späne vor dem Werkzeug angeschliffen. Grundlöcher erlauben das letztere nicht. Bei ihnen erhalten die Gewindebohrer einen normalen Anschnitt.

Für Durchgangsbohrungen oder tiefere Bohrungen in langspanenden Werk- stoffen werden im Bereich bis zu etwa 2 mm Steigung ebenfalls geradegenu- tete Gewindebohrer mit Schälanschnitt bevorzugt, für Grundlöcher dagegen rechtsgedallte Gewindebohrer (bei Rechtsgewinde). Handelsüblich sind Drallwinkel von etwa 15° , 35° und 45° . Je größer das Verhältnis L / d ist und je zäher die abgehobenen Späne sind, desto größer ist der Drallwinkel zu wählen.

Eine Alternative zum Gewindebohren ist das Gewindefräsen. Dabei kön- nen mit beschichtetem Hartmetall in Messing Schnittgeschwindigkeiten von 200–400 m/min angewendet werden. Für unbeschichtete Werkzeuge sind die

Zerspanbarkeitsindex	Hartmetall N10	HSS	
		unbeschichtet	beschichtet
v_c [m/min]			
100	40	20	30
90	39	19	29
80	38	19	28
70	36	18	26
60	35	17	25
50	34	17	24
40	33	16	23
30	32	15	22
20	30	15	20

Tab. 18: Richtwerte für das Gewindebohren von Kupferwerkstoffen

Schnittgeschwindigkeiten um 25 % zu reduzieren. Der Vorschub pro Zahn liegt in einem Bereich von $f_z = 0,05-0,15\text{mm}$. Bei langspanenden Messingsorten sind die niedrigeren Werte zu wählen. Außerdem sind Schnittgeschwindigkeiten und Vorschub beim Gewindefräsen vom Gewindedurchmesser abhängig.

Mit steigendem Durchmesser lassen sich Schnittgeschwindigkeit und Vorschub pro Zahn steigern. Bei unlegiertem Kupfer lassen sich ca. 25 % höhere Schnittgeschwindigkeiten und doppelt so hohe Vorschübe anwenden.

10.5 Fräsen von Kupferwerkstoffen

Beim Stirnfräsen wird die Oberfläche von den Nebenschneiden erzeugt. Wird die Oberfläche durch die Umfangsschneiden erzeugt spricht man vom Umfangsfräsen. Sind diese nicht geradlinig, sondern profiliert, so spricht man

von „Profilfräsern“, die am Werkstück die profilierte Form erzeugen.

Soweit gewählt werden kann, ist Stirnfräsen wirtschaftlicher als Umfangsfräsen. Da bei diesem Verfahren i. A. nicht die Spannungsdicke $h = 0$ auftritt, die Verschleiß fördernde Vorreibwege der Schneide auf dem Werkstoff hervorruft. Außerdem stumpfen die Nebenschneiden langsamer ab, als die Hauptschneiden, deren Abnutzung beim Stirnfräsen für die Rauheit der gefrästen Fläche in erster Näherung unerheblich ist.

Demgegenüber hat das Umfangsfräsen den Vorteil, auch verwickelte Formen am Werkstück in einem Durchgang erzeugen zu können. Bei ihm bilden sich aber die Hauptschneiden unmittelbar auf der gefrästen Fläche ab, so dass deren Rauheit direkt vom Zustand der Hauptschneiden abhängt.

Beim Umfangsfräsen kann im „Gegenlauf“ gefräst werden, wobei in der Fräsfläche Drehrichtung des Fräasers und Vorschubbewegung gegeneinander gerichtet sind, oder im „Gleichlauf“, so dass Fräserdrehung und Vorschubbewegung in der Fräsfläche gleich gerichtet sind.

Soweit keine verschleißfördernde Haut am Werkstück vorliegt, ist normalerweise das Fräsen im Gleichlauf wegen der kleineren Vorreibwege der Schneiden und der günstigen Verteilung der Schnittkräfte vorzuziehen. Der Unterschied der Standzeiten bei Kupferwerkstoffen ist allerdings nicht groß.

Die üblichen Schneidstoffe beim Fräsen von Kupferwerkstoffen sind die HM-Anwendungsgruppen N10 bzw. N20, die HSS-Sorten HS6-5-2, HS6-5-2-5, HS2-9-1-8 und HS12-1-4-5. Der übliche Bereich praktisch angewendeter

Zerspanbarkeitsindex	Stirnfräsen mit Wendeschneidplatte			
	HM – N10 unbeschichtet		DP – N05	
	h_z in mm			
	0,1	0,2	0,1	0,2
100	580	540	1050	1000
90	554	516	1006	954
80	530	494	963	910
70	507	472	923	868
60	484	451	884	829
50	463	431	847	791
40	443	412	811	754
30	423	394	777	720
20	405	377	744	687

Tab. 19: Richtwerte für das Stirnfräsen von Kupferwerkstoffen mit Schneidplatten
Empfohlene Schnittgeschwindigkeit v_c in m/min in Abhängigkeit von der Spannungsdicke h_z in mm und vom Zerspanbarkeitsindex

Umfangsfräsen mit Schaftfräser								
Zerspanbarkeitsindex	Schneidstoff				f_z in mm			
	HSS		VHM		Fräserdurchmesser in mm			
	unbesch.	besch.	unbesch.	besch.	1	6	12	20
100	45	80	140	280	Schruppen			
90	41	73	120	230				
80	38	67	110	210	0,004-0,006	0,01-0,02	0,04-0,5	0,05-0,07
70	35	61	100	200				
60	32	56	96	190	Schlichten			
50	29	52	92	180				
40	27	47	87	175	0,004-0,006	0,01-0,02	0,04-0,5	0,05-0,07
30	24	43	85	165				
20	22	40	80	160				

Tab. 20: Richtwerte für das Umfangsfräsen von Kupferwerkstoffen mit Schaftfräsern
Empfohlene Schnittgeschwindigkeit v_c in m/min und Vorschübe pro Zahn f_z in mm in Abhängigkeit vom Fräserdurchmesser und vom Zerspanbarkeitsindex

Spannungsdicken je Schneide und Umdrehung liegt beim Fräsen etwa bei $h_z \approx 0,1 \dots 0,35$ mm, wobei Stirnfräser und kräftige Werkzeuge an dessen oberer Grenze, Umfangfräser und schwache Werkzeuge im mittleren bis unteren Bereich zerspanen. Die Spannungsdicke ergibt sich beim Stirnfräsen aus Vorschub je Schneide und Umdrehung f_z und Einstellwinkeln κ nach

$$h_m = \frac{114,6^\circ}{\varphi_s^\circ} \cdot f_z \cdot \sin(\kappa) \frac{a_e}{D} \quad (25)$$

Beim Umfangfräsen wird ein kommaförmiger Span abgehoben, der an einem Ende theoretisch die Dicke Null

hat. Als Spannungsdicke gilt hierbei ein mittlerer Wert nach der Gleichung

$$h_m = \frac{114,6^\circ}{\varphi_s^\circ} \cdot f_z \cdot \frac{a_e}{D} \quad (26)$$

Dabei bedeuten
 f_z = Vorschub je Schneide und Umdrehung
 κ_r = Einstellwinkel
 φ_s = Fräferschnittwinkel
 h_m = mittlere Spannungsdicke
 a_p = Schnitttiefe (Zustellung)
 a_e = Eingriffsgröße
 D = Fräserdurchmesser

Da Fräser hinsichtlich Schneidenzahl und Werkzeugkosten in einen großen Bereich variieren, können Empfehlungen zur Wahl der Schnittgeschwindigkeit v_c nur bedingt gegeben werden. Die Richtwerte in Tab. 19 beziehen sich auf das Strinfräsen mit Messerköpfen. Als Schneidstoffe sind hier unbeschichtetes Hartmetall und polykristalliner Diamant aufgeführt.

Die Richtwerte für das Umfangsfräsen sind in der Tab. 20 und die Fräsrichtungen in Abb. 26 dargestellt.

Um die Standzeit T zu verdoppeln, ist der Wert v_c um etwa 10 % zu senken, um sie zu halbieren um etwa 10 % zu erhöhen.

Bei einer normalen Sandgusshaut sind die v_c -Werte bei HM um etwa 15 %, bei HSS um etwa 20 % zu reduzieren.

Die Richtwerte gelten für eine Verschleißmarkenbreite $VB \approx 0,6$ mm am Standzeitende (Schrupfräsen). Für $VB \approx 0,4$ mm bei gleicher Standzeit sind die Tabellenwerte bei HM um etwa 50 %, bei HSS um ~ 30 % zu senken.

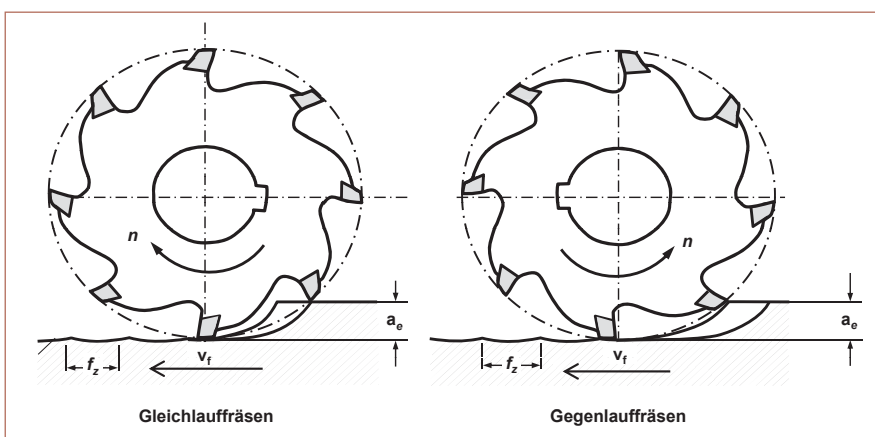


Abb. 26: Umfangsfräsen im Gleich- und Gegenlauf

11. Anhang

11.1 Zerspanungsmusteranwendungen

Legierungsgruppe	Werkstoff			Verarbeitungs- und Gebrauchseigenschaften	Typische Anwendungen	Zerspanbarkeitsindex/ Machinability Rating	
	Bezeichnung	Nummer (EN)	Nummer (UNS)				
Kupfer-Knetwerkstoffe	Kupfer-Knetlegierungen, niedrig legiert – nicht aushärtbar	CuPb1P	CW113C	C18700	–	–	85 (ohne P)
		CuSP	CW114C	C14700	gut spanbar, Automatenkupfer	Automatendrehteile, Schrauben, Mutter, Düsen für Schweiß- und Schneidbrenner, Ventilsitze für Fitting	85
		CuTeP	CW118C	C14500	gut spanbar, Automatenkupfer	Düsen für Schweiß- und Schneidbrenner, Schrauben	85
	Kupfer-Nickel-Zink-Legierungen	CuNi7Zn39Pb3Mn2	CW400J	–	–	–	–
		CuNi10Zn42Pb2	CW402J	C79800	–	–	–
		CuNi12Zn30Pb1	CW406J	C79300	–	–	–
		CuNi18Zn19Pb1	CW408J	C76300	–	–	–
	Kupfer Zinn-Zink-Legierungen	CuSn3Pb7Zn9		C84400	–	–	90
		CuSn4Zn4Pb4	CW456K	C54400	–	Allgemeine Gleitlager, Steckverbinder Kontakte Kniehebellager	80
	Kupfer-Zink-Legierungen Zweistoff mit Blei	CuZn35Pb2	CW601N	C34200	–	–	90
		CuZn36Pb2As	CW602N	C35330	–	Sanitärfittings	(85)
		CuZn36Pb3	CW603N	C35600	gut spanbar u. kaltumformbar	Automatendrehteile, Feinmechanik für Uhren/Optik	100
		CuZn37Pb0,5	CW604N	C33500	–	–	60
		CuZn39Pb0,5	CW610N	C36500	–	Steckerstift	60
		CuZn38Pb1	CW607N	C37000	–	–	70
		CuZn38Pb2	CW608N	C37700	–	Armaturenteile, Teile für Optik Feinmechanik	80 (90)
		CuZn39Pb2	CW612N	–	sehr gut spanbar, Bohr- u. Fräsqualität, gut stanzbar	Räderwerke für Uhren	(85)
		CuZn39Pb3	CW614N	C38500	sehr gut spanbar, Hauptlegierung für Bearbeitung auf Automaten, Formdrehteile	Formdrehteile aller Art, Feinmechanik, Uhr, Elektro	90 (100)
		CuZn40Pb2	CW617N	C37700	sehr gut spanbar, gut warmformbar, Strangpressprofile	Formdrehteile aller Art, Feinmechanik, Uhr	80 (95)
		CuZn43Pb2Al	CW624N	–	–	–	–
Kupfer-Zink-Legierungen Mehrstoff	CuZn40Mn1Pb	CW720R	–	–	Wälzlagerkäfige, Automatenteile	–	
	CuZn21Si3	–	–	–	Bleifreie Zerspanungslegierung	–	

Tab. 21 a: Einteilung der Kupferwerkstoffe nach ihrer Zerspanbarkeit

Hauptgruppe I: sehr gut spanbare Kupferwerkstoffe

Legierungsgruppe		Werkstoff			Verarbeitungs- und Gebrauchseigenschaften	Typische Anwendungen	Zerspanbarkeitsindex/ Machinability Rating
		Bezeichnung	Nummer (EN)	Nummer (UNS)			
Kupfer-Gusswerkstoffe	Kupfer-Zink-Gußlegierungen	CuZn33Pb2-C	CC750S	–	–	Gehäuse für Gas- und Wasserarmaturen	–
		CuZn39Pb1Al-C	CC754S	–	–	Armaturen für Gas-, Wasser-, und Sanitärinstallation	–
	Kupfer-Zinn- und Kupfer Zinn-Zink-Gußlegierungen	CuSn3Zn8Pb5-C	CC490K	–	Mittelharter Konstruktionswerkstoff, gut gießbar, korrosionsbeständig gegenüber Gebrauchswässern, auch bei erhöhten Temperaturen	Dünnwandige Armaturen (bis 12 mm Wanddicke), geeignet bis 225 °C	90
		CuSn5Zn5Pb5-C	CC491K	C83600	Konstruktionswerkstoff, gut gießbar, weich- und bedingt hartlötbar, gute Korrosionsbeständigkeit	Wasser- und Dampf-armaturengehäuse bis 226 °C, normal beanspruchte Pumpengehäuse und dünnwandige, verwinkelte Gussstücke	90
		CuSn7Zn4Pb7-C	CC493K	C93200	Mittelharter Werkstoff mit guten Notlaufeigenschaften, meerwasserbeständig	mäßig belastbare Gleitlager	70
		CuSn5Zn5Pb2-C	CC499K	–	Konstruktionswerkstoff, gut gießbar, weich- und bedingt hartlötbar, gute Korrosionsbeständigkeit	Fittings, Armaturen, Pumpengehäuse, insbesondere für Anwendungen im Trinkwasser	90
		CuPb10Sn10-C	CC495K	C93700	Gute Gleiteigenschaften	Gleitlager mit hohen Flächenpressung	80
	Kupfer-Blei – und Kupfer-Zinn-Gußlegierungen	CuSn7Pb15-C	CC496K	CC93800	–	Gleitlager, Verbundlager	80

Tab. 21 b: Einteilung der Kupferwerkstoffe nach ihrer Zerspanbarkeit

Hauptgruppe I: sehr gut spanbare Kupferwerkstoffe

Legierungsgruppe		Werkstoff			Verarbeitungs- und Gebrauchseigenschaften	Typische Anwendungen	Zerspanbarkeitsindex/ Machinability Rating
		Bezeichnung	Nummer (EN)	Nummer (UNS)			
Kupfer- Knetwerkstoffe	Kupfer, niedrig legiert (Legierungselemente < 5%) – aushärtbar im kaltverfestigten Zustand	CuBe2	CW101C	C17200	–	HochfesteTeile	20
		CuCo2Be	CW104C	C17500	Warmfestigkeit	Elektrode für Widerstandsschweißen	40
		CuCr1Zr Kein Zustand für gepresst kaltumgeformt in der Norm definiert	CW106C	C18150	Warmfestigkeit	Elektrode für Widerstandsschweißen, Kontaktteile	20
		CuNi1Si	CW109C	–	–	Hochbeanspruchte Schrauben, Mutter, Bolzen Wälzlagerkäfige, Spritzdüsen, Lagerbuchsen Anwendungen für ausgehärteten Zustand	–
		CuNi2Si	CW111C	C64700	hohe Zugfestigkeit	Einsatz im ausgehärteten Zustand	–
		CuNi3Si1	CW112C	C70250	hohe Zugfestigkeit	Formeinsätze	–
	Kupfer, niedrig legiert (Legierungselemente < 5%) –nicht aushärtbar	CuSi3Mn1	CW116C	C65500	–	–	30
	Kupfer-Zinn-Legierungen	CuSn5Pb1	CW458K	C53400	–	–	70
	Kupfer-Zink-Legierungen Zweistoff	CuZn36	CW507L	C27200	–	Tiefziehteile	–
		CuZn37	CW508L	C27400	Hauptlegierung für Kaltumformung, gut löt- und schweißbar	–	35
		CuZn40	CW509L	C28000	–	Uhrengehäuse	40
	Kupfer-Zink-Legierungen Mehrstoff	CuZn31Si1	CW708R	C69800	für gleitende Beanspruchung	Lagerbüchsen, Führungen	–
		CuZn35Ni3Mn2AlPb	CW710R	–	–	Bootsschraubenwellen	–
		CuZn37Mn3Al2PbSi	CW713R	–	Konstruktionswerkstoff hoher Festigkeit für Gleitzwecke	Synchronringe, Gleitlager, Ventillager, Getriebeteile, Kolbenringe	–
		CuZn38Mn1Al	CW716R	–	Konstruktionswerkstoff mittlerer Festigkeit für Gleitzwecke	Gleitlager, Gleitelemente	–
		CuZn39Sn1	CW719R	C46400	–	Rohrböden für Kondensatoren, Bootsschraubenwellen	30
		CuZn40Mn2Fe1	CW723R	–	–	Armaturen, Dämpferstäbe	–

Tab. 22 a: Einteilung der Kupferwerkstoffe nach Ihrer Zerspanbarkeit
Hauptgruppe II: Gut bis mäßig spanbare Kupferwerkstoffe

Legierungsgruppe		Werkstoff			Verarbeitungs- und Gebrauchseigenschaften	Typische Anwendungen	Zerspanbarkeitsindex/ Machinability Rating	
		Bezeichnung	Nummer (EN)	Nummer (UNS)				
Kupfer-Gusswerkstoffe	Kupfer-Zink-Gusslegierungen	CuZn16Si4-C	CC761S	C87800	hochfeste Teile für E-Technik	hochfeste auch dünnwandige Teile für E-Technik	40	
		CuZn25Al5Mn4Fe3-C	CC762S	C86100	–	Schneckenradkränze, Innenteile für Hochdruckarmaturen	30	
		CuZn32Al2Mn2Fe1-C	CC763S	–	–	–	–	
		CuZn34Mn3Al2Fe1-C	CC764S	–	–	–	Ventil-, Steuerungsteile, Kegel	–
		CuZn37Al1-C	CC766S	–	–	–	Kokillengussteile für Feinmechanik	–
		CuZn38Al-C	CC767S	–	–	–	Kokillengussteile für Elektrotechnik und Maschinenbau	–
	Kupfer-Zinn-Gusslegierungen	CuSn11Pb2-C	CC482K	–	Guter Notlaufeigenschaft	hoch belastbare Gleitlager mit hohen Lasten und Stoßbelastung	–	

Tab. 22 a: Einteilung der Kupferwerkstoffe nach Ihrer Zerspanbarkeit

Hauptgruppe II: Gut bis mäßig spanbare Kupferwerkstoffe

Legierungsgruppe		Werkstoff			Verarbeitungs- und Gebrauchseigenschaften	Typische Anwendungen	Zerspanbarkeitsindex/ Machinability Rating
		Bezeichnung	Nummer (EN)	Nummer (UNS)			
Kupfer-Knetwerkstoffe	Kupfer	Cu-OFE	CW009A	C10100	höchste Leitfähigkeit	Vakuum- und Elektronik-anwendungen	20
		Cu-HCP	CW021A	–	hohe Leitfähigkeit, gut schweiß- und hartlötbar	Ringe für Elektromotoren	–
		Cu-DHP	CW024A	C12200	gut schweiß- und hartlötbar	Brennstoff-, Ölleitungen	20
	Kupfer, niedriglegiert nicht aushärtbar	CuAg0,10	CW013A	C11600	–	Kontakte, Kollektoringe	20
		CuAg0,1P	CW016A	–	gut löt- und schweißbar	Kontakte, Kollektoringe	–
		CuSn0,15	CW117C	C14200	–	Steckverbinderstifte	20
	Kupfer, niedriglegiert (Legierungselemente < 5%) – aushärtbar im kaltverfestigten und ausscheidungsgehärtetem Zustand Mehrere Zustände – Änderungen in Anlehnung an die EN 12163 siehe nicht ausgehärteten Zustand	CuBe1,7	CW100C	C17000	–	–	20
		CuBe2	CW101C	C17200	–	hochfeste Federn	20
		CuCo2Be	CW104C	C17500	Warmfestigkeit	Elektrode für Widerstandsschweißen	40
		CuCr1Zr	CW106C	C18150	Warmfestigkeit	Elektroden für Widerstandsschweißen, Stranggießkokillen	20
		CuNi1Si	CW109C	–	Mittlere Zugfestigkeit bei guter elektrischer Leitfähigkeit	Identisch mit Tab. 22 a CuNi1Si	20
		CuNi2Be	CW110C	C17510	hohe Zugfestigkeit, gute elektrische Leitfähigkeit,	Komponenten für stromführende Teile im Oberleitungsbau, Schrauben Lagerbuchsen, Kontaktelemente	–
		CuNi2Si	CW111C	C64700	hohe Zugfestigkeit	Bolzen	30
		CuNi2SiCr	–	–	–	Schweisstechnik Al- und Mg- Druckguss	40
		CuNi3Si1	CW112C	C70250	Hohe Zugfestigkeit	Formeinsätze	–
		CuZr	CW120C	C15000	–	–	20
	Kupfer-Aluminium-Legierungen	CuAl5As	CW300G	C60800	Besonders beständig gegen Salzlösungen	–	20
		CuAl8Fe3	CW303G	C61400	Seewasserbeständig, widerstandsfähig gegen Schwefel- und Essigsäure, antimagnetisch	Ventilsitze und Verbrennungsmotoren	20
		CuAl10Fe3Mn2	CW306G	–	Schwingungs- oder verschleißbeanspruchte Teile im Motoren und Getriebebau, zunderbeständige Teile, hochfeste Schrauben und Mutter, Wellen, Spindeln, Schnecken, Zahnräder	Lagerbüchsen Maschinen- und Apparatebau	–
		CuAl10Ni5Fe4	CW307G	C63000	hart, stoßunempfindlich, hoch belastbar, gute Seewasserbeständigkeit	Kniebellager, Wellen Schrauben, Verschleißteile für Verbrennungsmotoren Formenbau	20
CuAl11Fe6Ni6		CW308G	–	hohe Zugfestigkeit	Zapfenlager, Ventile, Matrizen für Umformtechnik	–	

Tab. 23 a: Einteilung der Kupferwerkstoffe nach ihrer Zerspanbarkeit

Hauptgruppe III: Mäßig bis schwer spanbare Kupferwerkstoffe

Legierungsgruppe	Werkstoff			Verarbeitungs- und Gebrauchseigenschaften	Typische Anwendungen	Zerspanbarkeitsindex/ Machinability Rating	
	Bezeichnung	Nummer (EN)	Nummer (UNS)				
Kupfer-Knetwerkstoffe	Kupfer-Nickel-Legierungen	CuNi25	CW350H	C71300	Verschleißfest, silberweiße Farbe	–	–
		CuNi10Fe1Mn	CW352H	C70600	–	Bremsleitungsrohre, Ladeluftkühler	20
		CuNi30Mn1Fe	CW354H	C71500	–	Elektrische Kontakte	20
	Kupfer-Nickel-Zink-Legierungen	CuNi12Zn24	CW403J	C75700	Sehr gut umformbar	Teile für Optik und Feinmechanik	20
		CuNi18Zn20	CW409J	–	–	Brillenteile, Membrane, Steckverbinder	–
	Kupfer-Zinn-Legierungen	CuSn4	CW450K	C51100	–	Halbleitermontagerahmen (Lead frame), Steckverbinder,	20
		CuSn5	CW451K	C51000	–	Pleuellager, (Stahlstützschale)	20
		CuSn6	CW452K	C51900	–	Zahnräder, Buchsen, Pumpenteile, Uhrenteile, Steckverbinder, Schlauch- und Federrohre	20
		CuSn8	CW453K	C52100	–	Schnecken, Zahnräder, Bolzen, Schrauben Pleuelbuchsen, Gelenklager, Keile	20
		CuSn8P	CW459K	–	–	Schneckenräder, Getriebekomponenten Hochbeanspruchte Gleitlager, Kniehebel Ventilführungen in Abgassystemen Pleuellager Nockenwellenlager Gelenklager Lager in Hydraulikzylinder Pumpenteile	30
	Kupfer-Zink-Legierungen Zweistoff	CuZn5	CW500L	C21000	–	Installationsteile für E-Technik, Dämpferstäbe, Uhrindustrie	20
		CuZn10	CW501L	C22000	–	Uhrindustrie	20
		CuZn15	CW502L	C23000	sehr gut kaltformbar	Hülsen für Federungskörper	30
		CuZn20	CW503L	C24000	–	Manometer	30
		CuZn28	CW504L	–	–	Hülsen, Musikinstrumente	–
		CuZn30	CW505L	C26000	sehr gut kaltformbar	Steckverbinder, Kühlerbänder,	30
		CuZn33	CW506L	C26800	–	–	30
Kupfer-Zink-Legierungen Mehrstoff	CuZn20Al2As	CW702R	C68700	–	Rohre, Wärmetauscher, Kondensator	30	
	CuZn28Sn1AS	CW706R	C44300	–	Böden und Teile für Wärmetauscher	30	

Tab. 23 b: Einteilung der Kupferwerkstoffe nach ihrer Zerspanbarkeit

Hauptgruppe III: Mäßig bis schwer spanbare Kupferwerkstoffe

Legierungsgruppe	Werkstoff			Verarbeitungs- und Gebrauchseigenschaften	Typische Anwendungen	Zerspanbarkeitsindex/ Machinability Rating	
	Bezeichnung	Nummer (EN)	Nummer (UNS)				
Kupfer-Gusswerkstoffe	Kupfer-Gusswerkstoffe	CuCr1-C	CC140C	–	–	Schweißelektrodenfassung, Kontaktanschlüsse	–
	Kupfer-Zinn-Gusslegierungen	CuSn10-C	CC480K	C90700	seewasserbeständig	Armaturen- und Pumpengehäuse, Leit-, Lauf und Schaufelräder für Pumpen und Wasserturbinen	20
		CuSn12-C	CC483K	C90800	Seewasserbeständig verschleißbeständig	Gleitsteine, Gleitstücke, unter Last bewegte Spindelmutter, Schnecken- und Schraubenräder	–
		CuSn12Ni2-C	CC484K	C91700	Seewasserbeständig verschleißbeständig	Gleitsteine, Gleitstücke, unter Last bewegte Spindelmutter, Schnecken- und Schraubenräder, Kegelhäder, Schneckenradkränze	20
	Kupfer-Aluminium-Gusslegierungen	CuAl10Fe2-C	CC331G	C95200	–	Kegelhäder, Synchronringe, Schaltsegmente und Schaltgabeln	20
		CuAl10Ni3Fe2-C	CC332G		–	–	–
		CuAl10Fe5Ni5-C	CC333G	C95500	gute Seewasserbeständigkeit	hoch beanspruchte Kurbel- und Kniehebellager und Schnecken- und Schraubenräder, Teile für Schiffspropeller	50
	Kupfer-Nickel-Gusslegierungen	CuNi10Fe1Mn1-C	CC380H	C96200	–	–	10
		CuNi30Fe1Mn1NbSi-C	CC383H	C96400	–	–	20

Tab. 23 c: Einteilung der Kupferwerkstoffe nach ihrer Zerspanbarkeit

Hauptgruppe III: Mäßig bis schwer spanbare Kupferwerkstoffe

12. Formeln

12.1. Gleichungen

Bei Zahlenwertgleichungen sind die einzusetzenden Größen mit ihren Dimensionen angegeben

1) Geometrische Beziehung zwischen Frei-, Keil- und Spannungswinkel:

$$\alpha_0 + \beta_0 + \gamma_0 = 90^\circ \quad (1)$$

2) Spandickenstauchung:

$$\frac{h_{ch}}{h} > 1 \quad (2)$$

3) Spanbreitenstauchung

$$\frac{b_{ch}}{b} > 1 \quad (3)$$

4) Geradengleichung

$$y = m \cdot x + n \quad (4)$$

5) Taylor Gerade : Logarithmische v_c -T-Abhängigkeit:

$$\log T = \log C_v + k \cdot \log v_c \quad (5)$$

6) Taylor-Funktion:

$$T = C_v \cdot v_c^k \quad (6)$$

Darin bedeuten:

T: Standzeit in min

v_c : Schnittgeschwindigkeit in m/min

k: Steigung der Geraden im Standzeitdiagramm ($k = \tan(\alpha)$)

C_v : Standzeit T für $v_c = 1$ m/min.

Durch Umstellen der Taylor-Gleichung ergibt sich

$$v_c = T^{\frac{1}{k}} \cdot C_T \quad (6a)$$

7) C_T , C_v und k sind kennzeichnende Größen der Schnittbedingungen:

$$C_T = C \cdot \frac{1}{k} \quad (7)$$

8) Erweiterte Taylor-Gleichung:

$$T = \frac{C_1}{a^{c_a} \cdot f^{c_f} \cdot v_c^{-k}} \quad (8)$$

Darin bedeuten:

T : Werkzeugstandzeit in min

v_c Schnittgeschwindigkeit in m/min

f Vorschub (pro Umdrehung) in mm

a_p Schnitttiefe in mm

k Steigung der Geraden im Standzeitdiagramm ($k = \tan \alpha$)

C_1 dimensionsbehaftete, empirisch ermittelte Konstante

C_a dimensionslose Konstante: Exponent der Schnitttiefe

C_f dimensionslose Konstante: Exponent des Vorschubs

9) Schnittkraftformel nach Kienzle/ Victor:

$$F_c = b \cdot h^{(1-m_c)} k_{c1.1} \quad (9)$$

F_c Schnittkraft in N

b Spanungsbreite in mm

h Spanungsdicke in mm

$1-m_c$ dimensionsloser Anstiegswert der spezifischen Schnittkraft

$k_{c1.1}$ Hauptwert der spezifischen Schnittkraft in N/mm²

10) Überschlägige Größe der Vorschubkraft:

$$F_f \approx 0,3 F_c \quad (10)$$

11) Überschlägige Größe von Vorschub- und Passivkraft:

$$F_p \approx F_f \approx 0,3 F_c \quad (11)$$

12) Wirkleistung:

$$P_e = F_e \cdot v_e = P_c + P_f \quad (12)$$

13) Schnittleistung:

$$P_c = F_c \cdot v_c \quad (13)$$

14) Vorschubleistung:

$$P_f = F_f \cdot v_f \quad (14)$$

15) Netto-Antriebsleistung:

$$P'_e = \frac{F_c \cdot v_c}{60000} \quad (15)$$

P'_e Netto-Antriebsleistung in kW

F_c Schnittkraft in N

v_c Schnittgeschwindigkeit in m/min

60000 Konstante in N · m/kW · min

16) Überschlagsformel für die Netto-Antriebsleistung bei mehrschneidigen Spannungswerkzeugen:

$$P'_e = \frac{V_w}{V_{wp}} \quad (16)$$

P'_e Netto-Antriebsleistung in kW

V_w Zerspantes Werkstoffvolumen in cm³/min

V_{wp} Spezifisches Zerspanvolumen in cm³/min · kW

17) Spezifisches Spannungsvolumen (spezifische Spanungsleistung):

$$V_{wp} = \frac{V_w}{P_c} = \frac{A \cdot v_c}{F_c \cdot v_c} = \frac{A \cdot v_c}{k_c \cdot A \cdot v_c} = \frac{1}{k_c} \quad (17)$$

18) Spezifisches Spannungsvolumen (Zahlenwertgleichung):

$$V_{wp} = \frac{V_w}{P_c} = \frac{60000}{k_c} \quad (18)$$

V_{wp} spezifische Spanungsleistung in cm³/min · Kw

V_w zerspantes Werkstoffvolumen in cm³/min

P_c Schnittleistung in kW

k_c spezifische Schnittkraft in N/mm²

60000 Konstante in cm³ · N/mm² · min · Kw

19) Theoretische Rautiefe:

$$R_{t,th} = r_\epsilon - \sqrt{r_\epsilon^2 - \frac{f^2}{4}} \quad (19)$$

20) Theoretische Rautiefe, überschläglich:

$$R_{t,th} \approx \frac{f^2}{8 \cdot r_\epsilon} \quad (20)$$

21) Theoretisch einzustellender Vorschub bei vorgegebener Rautiefe und vorgegebenem Eckenradius:

$$f \approx \sqrt{8 \cdot r_\epsilon \cdot R_{t,th}} \quad (21)$$

22) Werkzeugkosten je Standzeit:

$$K_{WT} = \frac{K_{Wa}}{n_T} + K_{Ww} \quad (+ K_{Ws}) \quad (22)$$

worin bedeuten

K_{WT} Werkzeugkosten je Standzeit in €

K_{Wa} Anschaffungskosten des Werkzeugs in €

n_T Anzahl der Standzeiten (bei Wendepplatten Anzahl der Schneidkanten)

K_{Ww} Kosten für das Wechseln des verschlissenen Werkzeugs in €

K_{Ws} Kosten für das Nachschleifen des Werkzeugs (entfällt bei Wendepplatten) in €

23) Werkzeugkosten je Werkstück:

$$K_{W1} = \frac{K_{WT}}{z_T} \quad (23)$$

wobei bedeuten

K_{W1} Werkzeugkosten je Werkstück in €

n_{WT} Standmenge, d. h. Menge der je Standzeit bearbeiteten Werkstücke

24) Bearbeitungskosten je Werkstück:

$$K_1 = t_{h1} \cdot R + K_{fix} + K_{W1} = K_{th1} + K_{fix} + K_{W1} \quad (24)$$

worin bedeuten

K_1 Spanungskosten je Werkstück in €

t_{h1} Spanungszeit des Werkzeugs je Werkstück in min

K_{fix} Fixkosten (unabhängig von v_c) in €

K_{th1} Hauptzeitkosten in €

R Restkostensatz, d. h. Kostensatz des Arbeitsplatzes ohne Werkzeugkosten in €/min

25) Kostenoptimale Standzeit:

$$T_{oK} = \frac{(-k-1) \cdot K_{WT}}{R} \quad (25)$$

worin bedeuten

T_{oK} = kostenoptimale Standzeit in min

$-k$ = Steigungswert der logarithmischen v_c -T-Funktion

K_{WT} = Werkzeugkosten je Standzeit nach Gleichung (22) in €

R = Restkostensatz, d.h. Kostensatz des Arbeitsplatzes ohne Werkzeugkosten in €/min

26) Spanungsdicke beim Stirnfräsen:

$$h_m = \frac{114,6^\circ}{\varphi_s^\circ} \cdot f_z \cdot \sin(\kappa) \frac{a_e}{D} \quad (26)$$

27) Spanungsdicke beim Umfangfräsen:

$$h_m = \frac{114,6^\circ}{\varphi_s^\circ} \cdot f_z \cdot \frac{a_e}{D} \quad (27)$$

Dabei bedeuten

h_z = Spanungsdicke je Schneide und Umdrehung

f_z = Vorschub je Schneide und Umdrehung

κ = Einstellwinkel

φ_s = Fräaserschnittwinkel

h_m = mittlere Spanungsdicke

a_p = Schnitttiefe (Zustellung)

a = Eingriffsgröße

D = Fräserdurchmesser

12.2 Formelzeichen, Symbole und Abkürzungen

Größe	Einheit	Bezeichnung
a_p	mm	Schnitttiefe
a_e	mm	Eingriffsgröße
A	mm ²	Spanungsquerschnitt
ABS	-	Aufbauschneide
A_5	%	Bruchdehnung
b	mm	Spanungsbreite
b_{ch}	mm	Spanbreite
b_f	mm	Breite der Spanleitstufe
C_a	-	Konstante der erweiterten Taylorfunktion: Exponent der Schnitttiefe
C_f	min	Konstante der erweiterten Taylorfunktion: Exponent des Vorschubs
C_T	m/min	Konstante der Taylorgleichung: $\wedge v_c$ für $T = 1$ min
C_v	min	Konstante der Taylorgleichung: $\wedge T$ für $v_c = 1$ m/min
C_1	dimensionsbehaftet	Konstante der erweiterten Taylorfunktion
d	mm	Durchmesser z. B. Bohrungs-, Bohrer-, Fräserdurchmesser
ϵ	%	Verformungsgrad
E	N/mm ²	Elastizitätsmodul
f	mm/U	Vorschub pro Umdrehung
f_h	-	Korrekturfaktor der Schnittkraft für den Einfluss der Spanungsdicke
f_z	mm/Zahn	Vorschub pro Zahn
F	N	Zerspankraft
F_a	N	Aktivkraft
F_c	N	Schnittkraft
$F_{c,n}$	N	Schnitt-Normalkraft
F_e	N	Wirkkraft
$F_{e,n}$	N	Wirk-Normalkraft
F_f	N	Vorschubkraft
$F_{f,n}$	N	Vorschub-Normalkraft
F_n	N	Normalkraft
F_p	N	Passivkraft
F_t	N	Tangentialkraft
h	mm	Spanungsdicke
h_{ch}	mm	Spandicke
$h_{c,1}$	mm	normierte Spanungsdicke, $h_{c,1} = 1$ mm
h_f	mm	Tiefe der Spanleitstufe
h_m	mm	mittlere Spanungsdicke
h_{min}	mm	Mindestspandicke
h_z	mm/Zahn	Spanungsdicke je Zahn
HB	-	Brinellhärte
HM	-	Hartmetall
HM-PKD	-	Hartmetall mit polykristalliner Diamantaufgabe
HSS	-	Hochleistungs-Schnellarbeitsstahl

Größe	Einheit	Bezeichnung
HV	-	Vickershärte
HRC	-	Rockwellhärte
k	-	Steigung der Standzeitgeraden (Taylor-Gerade)
k_c	N/mm ²	spezifische Schnittkraft
$k_{c1,1}$	N/mm ²	Hauptwert der spezifischen Schnittkraft
K	-	Kolkverhältnis
KB	mm	Kolkbreite
KL	mm	Kolklippenbreite
KM	mm	Kolkmitte
KT	mm	Kolktiefe
K_{fix}	€	Fixkosten (von der Schnittgeschwindigkeit unabhängige Kosten)
K_M	dimensionsbehaftet	Konstante; abhängig von Bohrer, Schneidstoff und Werkstoff
K_{th1}	€	Hauptzeitkosten
K_{Wa}	€	Werkzeugbeschaffungswert
K_{Ws}	€	Kosten für das Nachschleifen des gewechselten Werkzeugs
K_{WT}	€	Werkzeugkosten je Standzeit
K_{WW}	€	Kosten für das Wechseln des gestumpften Werkzeugs
K_{W1}	€	Werkzeugkosten je Werkstück
K_1	€	Spannungskosten je Werkstück
L	mm	Bohrweg, Bohrlänge
M_D	Nm	Drehmoment
n	U/min	Drehzahl
n_T	-	Zahl der Standzeiten (bei Wendepplatten Zahl der Schneidkanten)
p	bar	Druck
P_c	kW	Schnittleistung
P_e	kW	Wirkleistung
$P_{e'}$	kW	Netto-Antriebsleistung
P_f	kW	Vorschubleistung
r_e	mm	Eckenradius der Schneide
R	€/min	Restkostensatz
R_a	µm	arithmetischer Mittenrauwert
R_e	N/mm ²	Streckgrenze
R_m	N/mm ²	Zugfestigkeit
$R_{p0,2}$	N/mm ²	0,2-Dehngrenze
R_t	µm	maximale Rautiefe
$R_{t,th}$	µm	theoretische Rautiefe
SV	mm	Schneidenversatz
SV_α	mm	Schneidenversatz in Richtung Freifläche
SV_γ	mm	Schneidenversatz in Richtung Spanfläche
t	min	Schnittzeit
t_{h1}	min	Schnittzeit des Werkzeugs je Werkstück

Größe	Einheit	Bezeichnung
T	min	Standzeit
T _{oK}	min	kostenoptimale Standzeit
v _c	m/min	Schnittgeschwindigkeit
v _e	m/min	Wirkgeschwindigkeit
v _f	m/min	Vorschubgeschwindigkeit
v _{oK}	m/min	kostenoptimale Schnittgeschwindigkeit
v _{ot}	m/min	zeitoptimale Schnittgeschwindigkeit
V	mm ³	Verschleißvolumen
VB	mm	Verschleißmarkenbreite
Q	cm ³ /min	Zeitspanvolumen (pro Zeiteinheit zerspantes Werkstoffvolumen)
V _{WP}	cm ³ /min · kW	spezifisches auf die Leistungseinheit bezogenes Zerspanvolumen (spezifische Spanungsleistung)
W _c	N · m	Zerspanarbeit
x	mm	Höhenversatz
Z	-	Zähnezahl eines Fräswerkzeugs
n _{WT}	-	Standzahl (Zahl der je Standzeit bearbeiteten Werkstücke)
α	Grad	Steigungswinkel der Standzeitgerade
α _o	Grad	Orthogonal-Freiwinkel
α _f	Grad	Fasenfreiwinkel
α _n	Grad	Freiwinkel der Nebenfleißfläche
α _x	Grad	Seitenfreiwinkel
β _o	Grad	Orthogonal-Keilwinkel
β _f	Grad	Fasenkeilwinkel
β _x	Grad	Seitenkeilwinkel
γ _o	Grad	Orthogonal-Spanwinkel
γ _f	Grad	Fasenspanwinkel
γ _x	Grad	Seitenspanwinkel
ε	Grad	Eckenwinkel
ε _o	%	Verformungsgrad in der Scherebene
κ _r	Grad	Einstellwinkel
κ _n	Grad	Einstellwinkel der Nebenschneide
λ	Grad	Neigungswinkel
σ	Grad	Bohrerspitzenwinkel
τ	da N/mm ²	Scherfestigkeit
φ	Grad	Vorschubrichtungswinkel
φ	Grad	Fräseeingriffswinkel
φ _s	Grad	Frässschnittwinkel
ψ	Grad	Querschneidenwinkel
ω	1/s	Winkelgeschwindigkeit

13. Literatur / Normen und Richtlinien

Literatur

- [1] Thiele Jr., Eugene W.; Kundig, Konrad J.A.: Comparative Machinability of Brasses Steels and Aluminum Alloys: CDA's Universal Machinability Index, SAE International, Dokumenten Nummer: 900365; Februar 1990
- [2] www.kupferinstitut.de
- [3] www.wieland.de
- [4] König, W. und Essel, K.: Spezifische Schnittkraftwerte für die Zerspanung metallischer Werkstoffe. Verlag Stahleisen M.B.H, Düsseldorf: 1973
- [5] Fleming, M.: Werkzeugkonzepte für das Drehen von Getrieben mit PCBN, Industrial Diamond Review 39 (2005) Nr. 1, S. 23/28
- [6] Warnecke, G.: Spanbildung bei metallischen Werkstoffen. München: Technischer Verlag. Resch: 1974
- [7] Vieregge, G.: Zerspanung der Eisenwerkstoffe. Band 16 der Stahl-Eisenbücher. Verlag Stahleisen Düsseldorf: 1970, 2. Aufl.
- [8] Victor, H. und Zeile, H.: Zerspanungsuntersuchungen und Schnittkraftmessungen an Kupferwerkstoffen. wt-Z. ind. Fert. 62 (1972) 663-665.
- [9] Victor, H.: Schnittkraftberechnungen für das Abspannen von metallen. wt-Z. ind. Fert. 59 (1969) 317-327.
- [10] Kienzle, O.: Die Bestimmung von Kräften und Leistungen an spanenden Werkzeugen und Werkzeugmaschinen. Z. VDI 94 (1952) S. 299-305.
- [11] N.N.: A Metal Cutting Investigation of Silver-Bearing VS. Silver-Free- Copper, Copper Range Company: New York 1964.
- [12] Ausschuss für wirtschaftliche Fertigung: „Arbeitsergebnisse – AWF-Betriebsblatt 158“. Beuth-Verlag, Berlin, Köln und Frankfurt/Main.
- [13] Sadowy, M.: Untersuchungen zur Theorie der Fließspanbildung. III. Schnittkräfte, Spanformen und Spanstauchung (Fortsetzung). Maschinenmarkt 73 (1967) 10, S. 167-174
- [14] Philipp, H.: Über Messungen der spezifischen Schnittkräfte beim Walzenfräsen. Werkstatt und Betrieb 92 (1959) 4, S. 179-187
- [15] König, W. und Erinski, D.: Untersuchung der Zerspanbarkeit von Kupfer-Gusslegierungen. Forschungsvorhaben AIF-Nr. 4572. Laboratorium für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre der RWTH Aachen, 1982
- [16] Schallbroch, H.: Die Beurteilung der Zerspanbarkeit von Metallen. Z. VDI 77 (1933) 965-971
- [17] Djaschenko: Die Beschaffenheit der Oberfläche bei der Zerspanung mit Hartmetall. VEB-Verlag Technik, Berlin 1953.
- [18] Burmester und Burmester: Maßgebliche Einflussgrößen beim Drehen von Flächen mit kleinen Rautiefewerten. Maschinenmarkt 86 (1980) Nr. 60, S. 1163 ff.
- [19] Kluft, W., König, W., Luttermelt, C. A. van, Nakayama, K., Pekelharig, A. J.: Present Knowledge of Chip Control. Annals of the Cirp 28 (1979) 2, S. 441/455.
- [20] N. N.: Ecobrass Stangen – Drähte – Profile – Rohre. Firmenschrift der Wieland-Werke AG, Ulm, 2006
- [21] Klocke, F.; König, W.: Fertigungsverfahren 1 – Drehen, Fräsen, Bohren. Aufl. 8, Springer, Berlin: 2008
- [22] N.N.: Messingzerspanung mit PKD. Diamond Business 34 (2008) 3, S. 34/35
- [23] Dawihl und Dinglinger: Handbuch der Hartmetallwerkzeuge, Bd. 1. Berlin, Göttingen, Springer-Verlag, Heidelberg: 1953.
- [24] Krist, T.: Metallindustrie – Zerspantechnik- Verfahren Werkzeuge Einstelldaten, Hoppenstedt Technik Tabellen Verlag Darmstadt: 1993, 22. Auflage
- [25] Paulo Davim, J.; Sreejith, P. S.; Silva, J.: Turning of Brasses Using Minimum Quantity of Lubricant (MQL) and Flooded Lubrication Conditions. Materials and Manufacturing Processes, 22, 2007, S. 45-50
- [26] Witthoff, J. Die Ermittlung der günstigsten Arbeitsbedingungen bei der spanabhebenden Formung. Werkstatt und Betrieb 85 (1952) H. 10, S. 521 ff
- [27] Voss: Optimierung spanender Fertigung. Technischer Verlag Resch KG, Gräfelfing: 1976
- [28] Burmester und Burmester: Schnittdatenoptimierung an simultan spanenden Werkzeug-Kollektiven. Technisches Zentralblatt für Metallbearbeitung, 1981
- [29] Spenrath, N. M.: Technologische Aspekte zum Feinstdrehen von Kupferspiegeln. Dissertation RWTH Aachen, 1991

[30]

Linke, B.: Wirkmechanismen beim Abrichten von keramisch gebundenen Schleifscheiben. Dissertation RWTH Aachen: 2007

[31]

Riemer, O.: Trennmechanismen und Oberflächenfeingestalt bei der Mikrozerspannung kristalliner und amorpher Werkstoffe.
Dissertation Universität Bremen, 2001

[32]

Brecher, C. (Hrsg.); Niehaus, F.; et al.: Machine and Process Development for the Robust Machining of Microstructures on Free-Form Surfaces for Hybrid Optics.
Apprimus Aachen, 2009, ISBN 978-3-940565-79-2

Normen und Richtlinien

DIN 1414-1/2

Technische Lieferbedingungen für Spiralbohrer aus Schnellarbeitsstahl – Teil 1: Anforderungen.
Beuth-Verlag, Berlin

DIN 343

Aufbohrer (Spiralsenker) mit Morsekegelschaft. Beuth-Verlag, Berlin.

DIN 344

Aufbohrer (Spiralsenker) mit Zylinderkegelschaft, Beuth-Verlag, Berlin.

DIN 222

Aufsteck-Aufbohrer (Aufsteck-Senker), Beuth-Verlag, Berlin.

DIN 8022

Aufsteck-Aufbohrer (Aufsteck-Senker) mit Schneidplatten aus Hartmetall.
Beuth-Verlag, Berlin

DIN 8043

Aufbohrer mit Schneidplatten aus Hartmetall. Beuth-Verlag, Berlin.

CEN/TS 13388

Kupfer und Kupferlegierungen Übersicht über Zusammensetzungen und Produkte,
Berlin: Beuth Verlag

DIN EN 1982

Kupfer und Kupferlegierungen – Blockmetalle und Gussstücke, Berlin: Beuth Verlag

DIN 6580

Begriffe der Zerspantechnik; Bewegungen und Geometrie des Zerspanvorganges, Beuth Verlag, Berlin

DIN 6581

Begriffe der Zerspantechnik; Bezugssysteme und Winkel am Schneidteil des Werkzeuges,
Beuth Verlag, Berlin

DIN 6583

Begriffe der Zerspantechnik; Standbegriffe, Beuth Verlag, Berlin

DIN 6584

Begriffe der Zerspantechnik; Kräfte, Energie, Arbeit, Leistungen, Beuth Verlag, Berlin

DIN ISO 513

Klassifizierung und Anwendung von harten Schneidstoffen für die Bezeichnung der Hauptgruppen und Anwendungsgruppen Metallzerspanung mit geometrisch bestimmten Schneiden

DIN EN ISO 4957

Werkzeugstähle, Beuth Verlag, Berlin

DIN EN ISO 4287

Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit,
Beuth Verlag, Berlin

DIN 1837

Werkzeug Anwendungsgruppe zum Zerspanen,
Beuth Verlag, Berlin

ASTM E618

Standard Test Method for Evaluating Machining Performance of Ferrous Metals Using an Automatic Screw/Bar Machine,
ASTM, 2007

TrinkwV 2001

Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch

Richtlinie 2002/95/EG

Zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten.
–ROHS–

Richtlinie 2000/53/EG

Altautorichtlinie –ELV–

VDI Richtlinie 3321

Blatt 1: Optimierung des Spanens – Grundlagen.
VDI-Verlag GmbH Düsseldorf

14. Verlagsprogramm

Dach und Wand

Dachdeckung und Außenwandbekleidung mit Kupfer; Bestell-Nr. i. 30
.....
Ausschreibungsunterlagen für Klempnerarbeiten an Dach und Fassade
.....
Blau-Lila-Färbungen an Kupferbauteilen

Sanitärinstallation

Kupfer in Regenwassernutzungsanlagen; Bestell-Nr. s. 174
.....
Kupferwerkstoffe in der Trinkwasseranwendung – den Anforderungen an die Zukunft angepasst; Bestell-Nr. s. 196
.....
Metallene Werkstoffe in der Trinkwasser-Installation; Bestell-Nr. i. 156
.....
Die fachgerechte Kupferrohrinstallation; Bestell-Nr. i. 158
.....
Die fachgerechte Installation von thermischen Solaranlagen; Bestell-Nr. i. 160

Werkstoffe

Schwermetall-Schleuder- und Strangguss – technische und wirtschaftliche Möglichkeiten; Bestell-Nr. s. 165
.....
Zeitstandeigenschaften und Bemessungskennwerte von Kupfer und Kupferlegierungen für den Apparatebau; Bestell-Nr. s. 178
.....
Ergänzende Zeitstandversuche an den beiden Apparatewerkstoffen SF-Cu und CuZn20Al2; Bestell-Nr. s. 191
.....
Einsatz CuNi10Fe1Mn plattierter Bleche für Schiffs- und Bootskörper

Use of Copper-Nickel Cladding on Ship and Boat Hulls; Bestell-Nr. s. 201
Kupfer-Nickel-Bekleidung für Offshore-Plattformen
Copper-Nickel Cladding for Offshore Structures; Bestell-Nr. s. 202
.....
Werkstoffe für Seewasser-Rohrleitungssysteme
Materials for Seawater Pipeline Systems; Bestell-Nr. s. 203
.....
Kupfer-Zink-Legierungen (Messing und Sondermessing) Bestell-Nr. i. 5
.....
Kupfer-Aluminium-Legierungen
Eigenschaften, Herstellung, Verarbeitung, Verwendung
Bestell-Nr. i. 6
.....
Kupfer-Zinn-Knetlegierungen (Zinnbronzen)
Bestell-Nr. i. 15
.....
Kupfer-Zinn- und Kupfer-Zinn-Zink-Gusslegierungen (Zinnbronzen)
Bestell-Nr. i. 25
.....
Kupfer – Werkstoff der Menschheit
.....
Messing – Ein moderner Werkstoff mit langer Tradition
.....
Von Messing profitieren – Drehteile im Kostenvergleich
.....
Messing ja – Entzinkung muss nicht sein!
.....
Bronze – unverzichtbarer Werkstoff der Moderne

Verarbeitung

Kupfer-Zink-Legierungen für die Herstellung von Gesenkschmiedestücken; Bestell-Nr. s. 194
.....
Kleben von Kupfer und Kupferlegierungen; Bestell-Nr. i. 7
.....
Schweißen von Kupfer und Kupferlegierungen; Bestell-Nr. i. 12
.....
Trennen und Verbinden von Kupfer und Kupferlegierungen; Bestell-Nr. i. 16
.....
Richtwerte für die spanende Bearbeitung von Kupfer und Kupferlegierungen; Bestell-Nr. i. 18
.....
Chemische Färbungen von Kupfer und Kupferlegierungen

Elektrotechnik

Optimale Auswahl und Betriebsweise von Vorschaltgeräten für Leuchtstofflampen; Bestell-Nr. s. 180
.....
Verteiltransformatoren; Bestell-Nr. s. 182
.....
Energiesparen mit Spartransformatoren; Bestell-Nr. s. 183
.....
Wechselwirkungen von Blindstrom-Kompensationsanlagen mit Oberschwingungen; Bestell-Nr. s. 185
.....
Messungen und Prüfungen an Erdungsanlagen; Bestell-Nr. s. 190
.....
Sparen mit dem Sparmotor; Bestell-Nr. s. 192
.....
Bedarfsgerechte Auswahl von Kleintransformatoren; Bestell-Nr. s. 193
.....
Kupfer spart Energie

Umwelt / Gesundheit

Antibakterielle Eigenschaften von Kupfer;
Bestell-Nr. s. 130
.....
Versickerung von Dachablaufwasser;
Bestell-Nr. s. 195
.....
Kupfer in kommunalen Abwässern und Klärschlämmen;
Bestell-Nr. s. 197
.....
Sachbilanz einer Ökobilanz der Kupfererzeugung und -verarbeitung;
Bestell-Nr. s. 198
.....
Sachbilanz zur Kupfererzeugung unter Berücksichtigung der Endenergien;
Bestell-Nr. s. 199
.....
Untersuchung zur Bleiabgabe der Messinglegierung CuZn39PB3 an Trinkwasser – Testverfahren nach British Standards BS 7766 and NSF Standard 61;
Bestell-Nr. s. 200
.....
Recycling von Kupferwerkstoffen;
Bestell-Nr. i. 27
.....
Kupfer und Kupferwerkstoffe ein Beitrag zur öffentlichen Gesundheitsvorsorge;
Bestell-Nr. i. 28
.....
Kupfer – der Nachhaltigkeit verpflichtet
.....
Doorknobs: a source of nosocomial infection?

Spezielle Themen

Kupferwerkstoffe im Kraftfahrzeugbau;
Bestell-Nr. s. 160
.....
Die Korrosionsbeständigkeit metallischer Automobilbremsleitungen – Mängelhäufigkeit in Deutschland und Schweden;
Bestell-Nr. s. 161
.....
Ammoniakanlagen und Kupfer-Werkstoffe?;
Bestell-Nr. s. 210
.....
Kupferwerkstoffe in Ammoniakkälteanlagen;
Bestell-Nr. s. 211
.....
Kupferrohre in der Kälte-Klimatechnik, für technische und medizinische Gase
Bestell-Nr. i. 164

DKI-Fachbücher

Kupfer in der Landwirtschaft
.....
Kupfer im Hochbau
EUR 10,00
.....
Planungsleitfaden Kupfer – Messing – Bronze
EUR 10,00
.....
Architektur und Solarthermie
Dokumentation zum Architekturpreis
EUR 10,00

CD-ROM des Deutschen Kupferinstituts

Solares Heizen
EUR 10,00
.....
Neue Last in alten Netzen
EUR 10,00
.....
Faltpattern für Falzarbeiten mit Kupfer
Muster für Ausbildungsvorlagen in der Klempnertechnik
EUR 10,00
.....
Werkstofftechnik –
Herstellungsverfahren
EUR 10,00

Lernprogramm

Die fachgerechte Kupferrohr-Installation
EUR 10,00

Filmdienst des DKI

„Kupfer in unserem Leben“
Videokassette oder DVD, 20 Min.
Schutzgebühr EUR 10,00

.....
„Fachgerechtes Verbinden von Kupferrohren“
Lehrfilm, DVD, 15 Min.
Schutzgebühr EUR 10,00

.....
„Kupfer in der Klempnertechnik“
Lehrfilm, Videokassette, 15 Min.
Schutzgebühr EUR 10,00

Sonderkonditionen für Dozenten, Studenten und Berufsschulen

**Auskunfts- und Beratungsstelle
für die Verwendung von
Kupfer und Kupferlegierungen**

Am Bonneshof 5
40474 Düsseldorf
Telefon: (0211) 4 79 63 00
Telefax: (0211) 4 79 63 10
info@kupferinstitut.de

www.kupferinstitut.de

┌

┐

└

┘