



Merkblatt 137

Zerspanen von Stahl



Stahl-Informations-Zentrum

Das Stahl-Informations-Zentrum ist eine Gemeinschaftsorganisation Stahl erzeugender und verarbeitender Unternehmen. Markt- und anwendungsorientiert werden firmenneutrale Informationen über Verarbeitung und Einsatz des Werkstoffs Stahl bereitgestellt.

Verschiedene **Schriftenreihen** bieten ein breites Spektrum praxisnaher Hinweise für Konstrukteure, Entwickler, Planer und Verarbeiter von Stahl. Sie finden auch Anwendung in Ausbildung und Lehre.

Vortragsveranstaltungen schaffen ein Forum für Erfahrungsberichte aus der Praxis.

Messebeteiligungen und Ausstellungen dienen der Präsentation neuer Werkstoffentwicklungen sowie innovativer, zukunftsweisender Stahlanwendungen.

Als **individueller Service** werden auch Kontakte zu Instituten, Fachverbänden und Spezialisten aus Forschung und Industrie vermittelt.

Die **Pressearbeit** richtet sich an Fach-, Tages- und Wirtschaftsmedien und informiert kontinuierlich über neue Werkstoffentwicklungen und -anwendungen.

Das Stahl-Informations-Zentrum zeichnet besonders innovative Anwendungen mit dem **Stahl-Innovationspreis** aus. Er ist einer der bedeutendsten Wettbewerbe seiner Art und wird alle drei Jahre ausgelobt (www.stahlinnovationspreis.de).

Die **Internet-Präsentation** (www.stahl-info.de) informiert u. a. über aktuelle Themen und Veranstaltungen und bietet einen Überblick über die Veröffentlichungen des Stahl-Informations-Zentrums. Schriftenbestellungen sowie Kontaktaufnahme sind online möglich.

Impressum

Merkblatt 137
„Zerspanen von Stahl“
Ausgabe 2008
ISSN 0175-2006

Herausgeber:

Stahl-Informations-Zentrum
Postfach 10 48 42
40039 Düsseldorf

Autoren:

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h.
Fritz Klocke,
Dr.-Ing. Klaus Gerschwiler
Lehrstuhl für Technologie der
Fertigungsverfahren,
Werkzeugmaschinenlabor (WZL)
der RWTH Aachen
52074 Aachen

Redaktion:

Stahl-Informations-Zentrum

Die dieser Veröffentlichung zugrunde liegenden Informationen wurden mit größter Sorgfalt recherchiert und redaktionell bearbeitet. Eine Haftung ist jedoch ausgeschlossen.

Ein Nachdruck - auch auszugsweise - ist nur mit schriftlicher Genehmigung des Herausgebers und bei deutlicher Quellenangabe gestattet.

Mitglieder des Stahl-Informations-Zentrums:

- AG der Dillinger Hüttenwerke
- ArcelorMittal Bremen GmbH
- ArcelorMittal Commercial RPS S.à.r.l.
- ArcelorMittal Duisburg GmbH
- ArcelorMittal Eisenhüttenstadt GmbH
- Benteler Stahl/Rohr GmbH
- Gebr. Meiser GmbH
- Georgsmarienhütte GmbH
- Rasselstein GmbH
- Remscheider Walz- und Hammerwerke Böllinghaus GmbH & Co. KG
- Saarstahl AG
- Salzgitter AG Stahl und Technologie
- ThyssenKrupp Electrical Steel GmbH
- ThyssenKrupp GfT Bautechnik GmbH
- ThyssenKrupp Steel AG
- ThyssenKrupp VDM GmbH
- Wickedder Westfalenstahl GmbH

Titelbild:

Plandrehen
Foto: Seco Tools GmbH

Inhalt

	Seite		Seite		Seite
1	Allgemeine Grundlagen	4	3.3	Zerspanbarkeit unterschiedlicher Stahlwerkstoffe	20
1.1	Spanbildungsvorgang	4	3.3.1	Automatenstähle	21
1.2	Schneidteilgeometrie und ihr Einfluss auf den Zerspanvorgang ..	4	3.3.2	Einsatzstähle	21
1.3	Verschleiß am Schneidteil	6	3.3.3	Vergütungsstähle	21
			3.3.4	Nitrierstähle	21
			3.3.5	Werkzeugstähle	22
			3.3.6	Nichtrostende Stähle ..	22
			3.3.7	Gehärtete Stähle	23
2	Schneidstoffe zur Stahlzerspanung	8	4	Zerspanverfahren	24
2.1	Schnellarbeitsstahl	8	4.1	Drehen	24
2.2	Klassifizierung der harten Schneidstoffe ...	9	4.1.1	Allgemeines	24
2.3	Hartmetalle	11	4.1.2	Verfahrensvarianten ...	24
2.3.1	WC-Co-Hartmetalle	11	4.1.2.1	Runddrehen	24
2.3.2	WC-(Ti,Ta,Nb)C-Co-Hartmetalle	12	4.1.2.2	Plandrehen	24
2.3.3	TiC/TiN-Co,Ni-Hartmetalle (Cermets) .	12	4.2	Fräsen	24
2.3.4	Beschichtete Hartmetalle	12	4.2.1	Allgemeines	24
2.4	Schneidkeramik	13	4.2.2	Verfahrensvarianten	26
2.5	Polykristallines kubisches Bornitrid	13	4.2.2.1	Stirnfräsen	26
			4.2.2.2	Umfangfräsen	26
			4.2.2.3	Schaftfräsen	27
			4.2.2.4	Profilfräsen	27
			4.3	Bohren	27
			4.3.1	Allgemeines	27
			4.3.2	Verfahrensvarianten ...	27
			4.3.2.1	Bohren mit Spiralbohrern	27
			4.3.2.2	Bohren mit Wendeschneidplattenbohrern	28
			4.3.2.3	Tiefbohren	29
			4.4	Hobeln, Stoßen	30
			4.5	Feinbearbeitung	30
			4.5.1	Reiben	30
			4.5.2	Feinbohren	31
			4.6	Gewindeherstellung ...	31
			4.6.1	Gewindedrehen	31
			4.6.2	Gewindebohren	31
			4.6.3	Gewindefräsen	31
			4.6.4	Gewindeformen	31
5	Hochleistungs-Zerspanprozesse	32	5.1	Trockenbearbeitung ...	32
5.1	Trochkenbearbeitung ...	32	5.2	Hochleistungs-/Hochgeschwindigkeitsbearbeitung	34
5.2	Hochleistungs-/Hochgeschwindigkeitsbearbeitung	34	5.3	Hartdrehen	37
5.3	Hartdrehen	37	6	Anhang: Verfahrensabhängige Richtwerte	40
6	Anhang: Verfahrensabhängige Richtwerte	40	6.1	Drehen	40
			6.2	Fräsen	41
			6.2.1	Messerkopfstirnfräsen .	41
			6.2.2	Schaftfräsen	41
			6.3	Bohren	44
			6.3.1	Bohren mit Spiralbohrern	44
			6.3.2	Bohren mit HM-Wendeschneidplattenbohrern	48
7	Literatur	48			

1 Allgemeine Grundlagen

Zum besseren Verständnis der technologischen Zusammenhänge werden zunächst am Beispiel des Drehverfahrens die Grundbegriffe der Zerspansung hinsichtlich Spanbildung, Schneidteilgeometrie und Werkzeugverschleiß erläutert. Sie lassen sich jedoch auf andere Zerspanverfahren mit geometrisch bestimmter Schneide übertragen.

1.1 Spanbildungsvorgang

Während des Spanbildungsvorgangs dringt die Werkzeugschneide in den Werkstoff ein, der dadurch elastisch und plastisch verformt wird. Die Spanbildung erfolgt nach Überschreiten einer maximalen, werkstoffabhängigen Schubspannung in der Scherebene.

Dieser Vorgang ist in **Abb. 1** schematisch (links) und anhand einer Spanwurzelaufnahme (rechts) dargestellt.

Die Werkstofftrennung geht nach entsprechender Verformung in der Scherzone vor sich. Je nach Verformungsfähigkeit des Werkstoffs erfolgt sie bereits nach geringer Verformung in der Scherebene (spröde Werkstoffe) oder erst nach starker Verformung vor der Schneidkante im Bereich 3 (duktiler Werkstoffe). Das führt zur Bildung verschiedener Spanarten (**Abb. 2**).

Der Fließspan (1) entsteht bei der Zerspansung eines duktilen Werkstoffs, der nach kontinuierlicher Scherverformung als gleichförmiger Span über die Spanfläche des Werkzeugs abläuft.

Der Lamellenspan (2) entsteht bei ungleichmäßigem Gefüge oder Schwankungen der Spannungsdicke (Schwingungserscheinungen im Prozess).

Scherspäne (3) bestehen aus Spanteilen, die in der Scherebene getrennt werden und wieder zusammenschweißen. Sie entstehen bei der Bearbeitung von Werkstoff

fen mit geringer Verformungsfähigkeit. Eine weitere Ursache können auch Versprödungen sein, die z. B. durch Verformung im Werkstoffgefüge hervorgerufen werden.

1.2 Schneidteilgeometrie und ihr Einfluss auf den Zerspanvorgang

Bei allen spanabhebenden Fertigungsverfahren werden die Prozesskenngrößen wie Spanbildung und Spanablauf, Zerspankraft, Werkzeugverschleiß sowie die Oberflächengüte wesentlich durch die Schneidteilgeometrie beeinflusst. Die im Folgenden dargestellten Begriffe und Bezeichnungen zur Beschreibung der Schneidteilgeometrie sind an die Norm DIN 6581 und DIN 6582 angelehnt.

Die Definitionen werden am Beispiel des Drehmeißels erläutert, lassen sich aber auf alle Verfahren mit definierter Schneide übertragen.

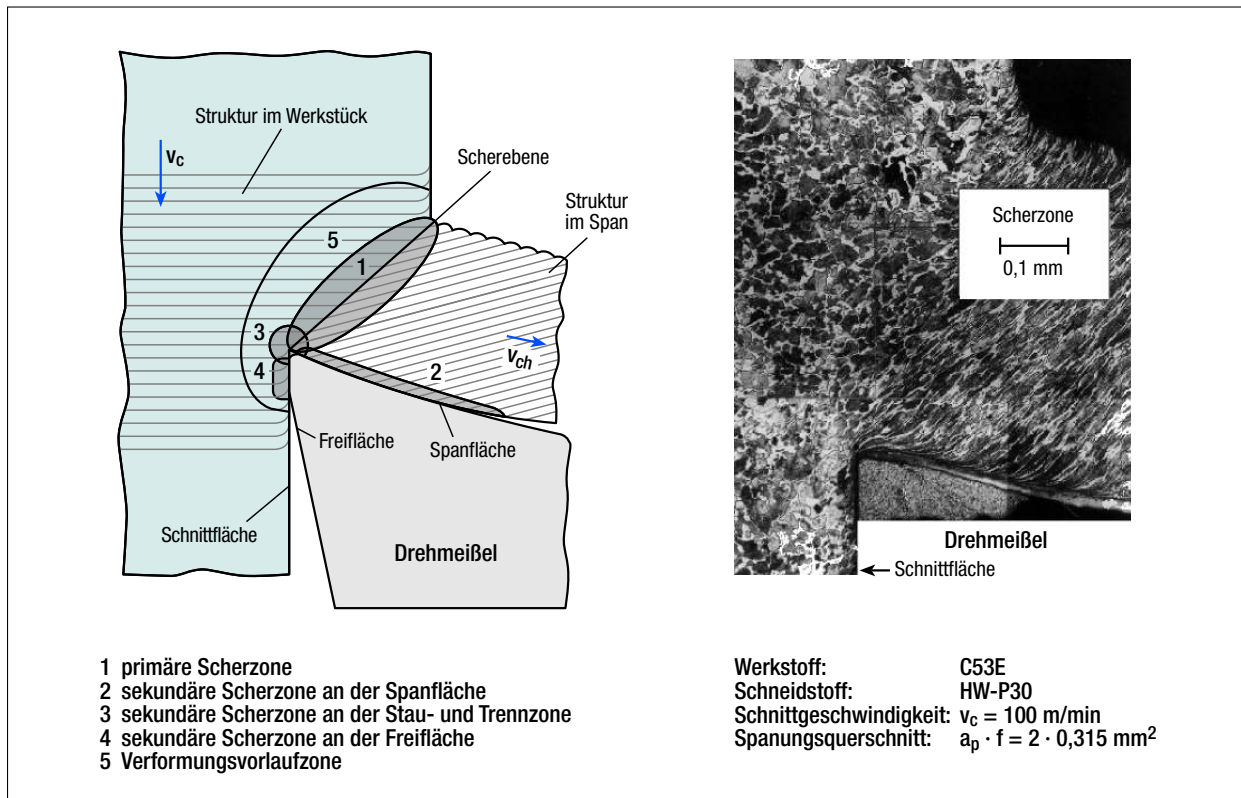


Abb. 1: Wirkzonen bei der Spanentstehung (nach [65])

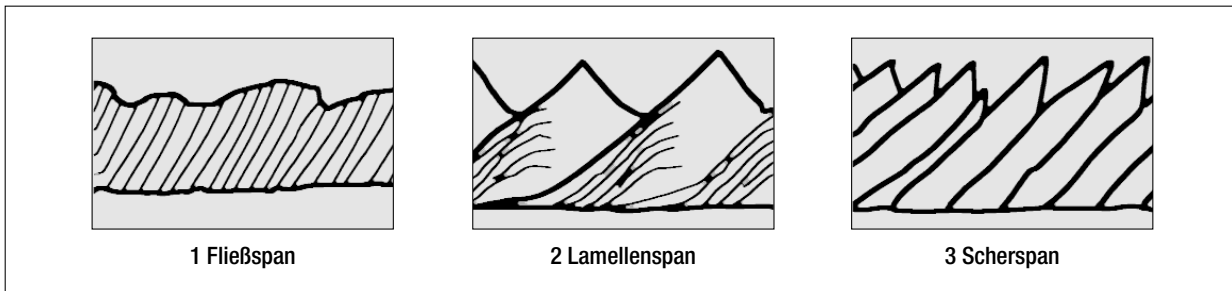


Abb. 2: Spanarten bei der Stahlzerspanung [64]

gen. Komplexere Werkzeuge wie Bohrer und Fräser benötigen weitere Größen, die in den Kapiteln über die jeweiligen Verfahren beschrieben werden.

Abb. 3 erläutert die an einem Drehmeißel definierten Flächen, Schneiden, Fasen und die Schneidenecke. Hinsichtlich der Werkzeugschneiden unterscheidet man die in Vorschubrichtung weisende Hauptschneide und die Nebenschneide. Die Übergangsstelle zwischen den beiden Schneiden wird als Schneidenecke definiert, die im Allgemeinen einen Radius aufweist.

Die Schneidteilgeometrie wird durch die Winkel der Flächen zueinander und zur Schnittfläche am Werkstück festgelegt. Je nach Zerspanungsaufgabe wählt man zur Erzielung optimaler Arbeitsergebnisse sehr unterschiedliche Schneidteilgeometrien. Diese hängen in erster Linie ab von Werkstoff, Schneidstoff, Schnittbedingungen und Werkstückgeometrie. Im Folgenden wird der Einfluss der einzelnen Winkel auf den Zerspanvorgang erläutert.

Frei-, Keil- und Spanwinkel ergänzen sich zu 90° (**Abb. 4**):

$$\alpha_0 + \beta_0 + \gamma_0 = 90^\circ$$

Wird der Freiwinkel α_0 kleiner, so nimmt der Freiflächenverschleiß (siehe Kapitel 1.3) zu, weil infolge der zunehmenden Reibung zwischen Freifläche und Werkstück verstärkt Pressschweißungen auftreten. Mit zunehmendem Spanwinkel bzw. Freiwinkel wird der Keilwinkel kleiner und somit erhöht sich die Gefahr, dass die Schneidkante ausbricht.

Der Keilwinkel β_0 ist der Winkel zwischen der Hauptfreifläche und der Spanfläche.

Ein positiver Spanwinkel γ_0 begünstigt den Spanablauf, führt jedoch häufig zu ungenügender Spanbrechung (Fließspan). Vorteile sind die geringeren Zerspankräfte sowie in den meisten Fällen eine Verbesserung der Werkstückoberfläche. Stark positive Spanwinkel können jedoch durch eine Schwächung des Schneidteils zu

frühzeitigem Werkzeugbruch führen. Negative Spanwinkel erhöhen die Schneidenstabilität, rufen jedoch durch die starke Verformung des ablaufenden Spans und die hohen Schnittkräfte eine starke Temperaturbelastung des Schneidteils hervor. Dadurch entsteht erhöhter Kolkverschleiß, der zu niedrigeren Werkzeugstandzeiten führen kann.

Der Eckenwinkel ε_r (**Abb. 4**) ist der Winkel zwischen Haupt- und Nebenschneide. Ein möglichst großer Eckenwinkel trägt zur hohen Werkzeugstabilität bei. Da die Lage der Hauptschneide vorgegeben ist und der Winkel zwischen Nebenschneide und Vorschubrichtung zur Vermeidung eines Nachschabens der Nebenschneide mindestens 2° betragen soll, ist der maximale Eckenwinkel begrenzt.

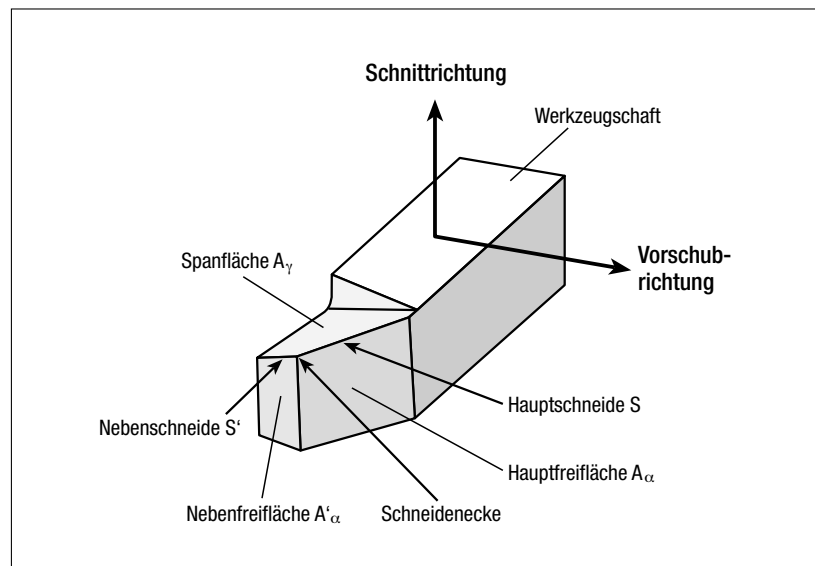


Abb. 3: Flächen, Schneiden und Schneidenecke am Drehmeißel (nach DIN 6581 und DIN 6582)

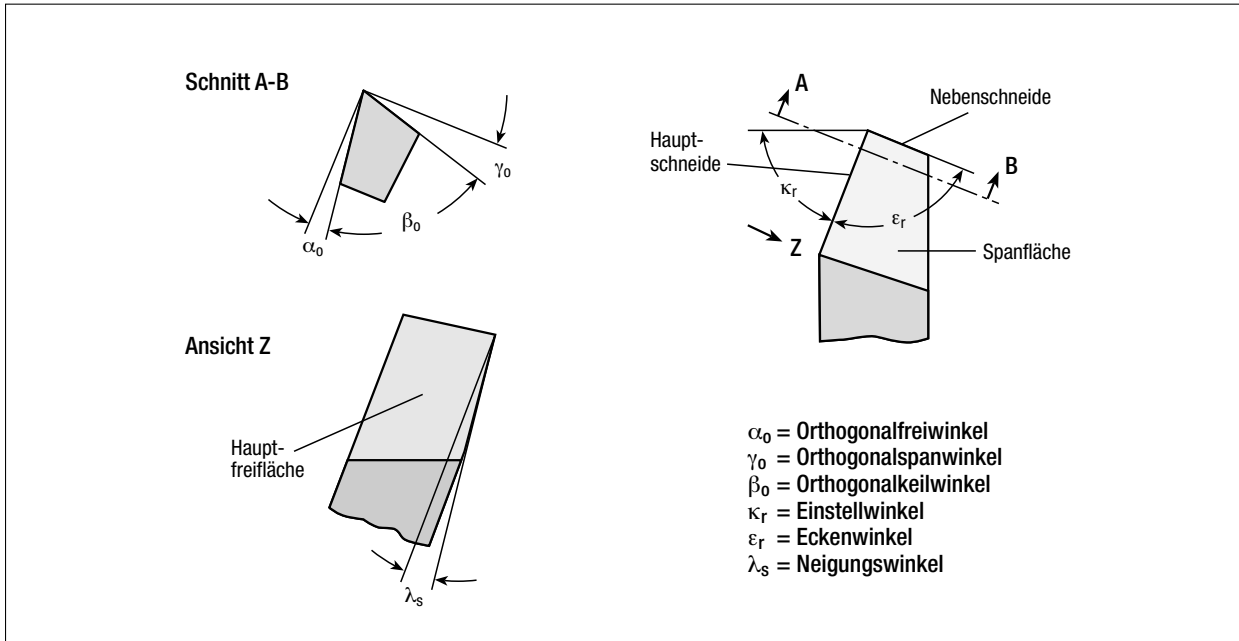


Abb. 4: Wichtigste Winkel am Schneidteil (nach DIN 6581)

Durch einen negativen Neigungswinkel λ_s (Abb. 4) kann die Schneide stabilisiert werden, so dass die Gefahr des Schneidensbruchs infolge örtlicher Überlastung vermindert wird. Dies ist besonders im unterbrochenen Schnitt wichtig. Negative Neigungswinkel rufen jedoch hohe Passivkräfte (Kapitel 3.1.2) hervor, die eine hohe Steifigkeit der Werkzeugmaschine erfordern. Ein weiterer Nachteil kann in einer Ablenkung des Spans auf die Werkstückoberfläche liegen, was zum Verkratzen der Oberflächen führt.

Der Einstellwinkel κ_r (Abb. 4) ist der Winkel zwischen Hauptschneide und unbearbeiteter Werkstückoberfläche. Mit kleiner werdendem Einstellwinkel wächst die Eingriffslänge der Hauptschneide und die spezifische Schneidenbelastung sinkt. Der Nachteil kleiner Einstellwinkel sind hohe Passivkräfte, die zu Ratterschwingungen führen können.

Der Eckenradius r_e ist der Radius der Schneidenecke zwischen Haupt- und Nebenschneide. Er beeinflusst zusammen mit dem gewählten Vorschub f wesentlich die erreichbare Oberflächengüte.

Diese ist umso höher, je größer der Eckenradius ist; zusätzlich wird die Schneidenstabilität erhöht. Nachteilig sind jedoch auch hier die hohen Passivkräfte.

1.3 Verschleiß am Schneidteil

Je nach Art und Dauer der Belastung des Schneidteils treten während der Zerspaltung verschiedene, unterschiedlich stark ausgeprägte Verschleißerscheinungen am Schneidteil auf (Abb. 5). In der Praxis werden in erster Linie die Verschleißausbildung an der Freifläche, bezeichnet als Verschleißmarkenbreite VB , und auf der Spanfläche der sogenannte Kolkverschleiß als Verschleißkriterien herangezogen. Dem Oxidationsverschleiß auf der Nebenfreesfläche kommt nur eine untergeordnete Bedeutung zu. Die in der Zerspaltungslehre üblichen Verschleißformen und Verschleißmessgrößen sind in der ISO 3685 festgehalten.

Die den verschiedenen Verschleißformen zugeordneten Messgrößen sind in Abb. 5 dargestellt.

Die Verschleißmarkenbreite wird von der ursprünglichen Schneidkante aus gemessen. Da die Verschleißzone an der Freifläche oft unregelmäßig ausgebildet ist, wird sie in mehrere Bereiche (A, B, C und N) aufgeteilt, in denen dann jeweils die mittlere Breite ausgemessen wird. Zur Kennzeichnung des jeweiligen Bereichs wird das zugehörige Kurzzeichen als Index festgehalten, z.B. VB_B . Auf der Spanfläche unterscheidet man die Kolkentiefe KT (größte Tiefe des Kolk) und den Kolkmittenabstand KM (Abstand der Kolkentiefe KT von der ursprünglichen Schneidkante), aus denen das Kolkverhältnis $K = KT/KM$ gebildet wird. Der Abstand zwischen der verschlissenen Schneidkante und dem Kolkbeginn wird, parallel zur Werkzeug-Spanfläche gemessen, als Kolkklippenbreite KF bezeichnet. Der Versatz der verschlissenen gegenüber der ursprünglichen Schneidkante wird als Schneidkantenversatz SV_α und SV_γ in Richtung der Frei- bzw. Spanfläche gekennzeichnet.

Ursachen für den Verschleiß sind vornehmlich die mechanischen und thermischen Beanspru-

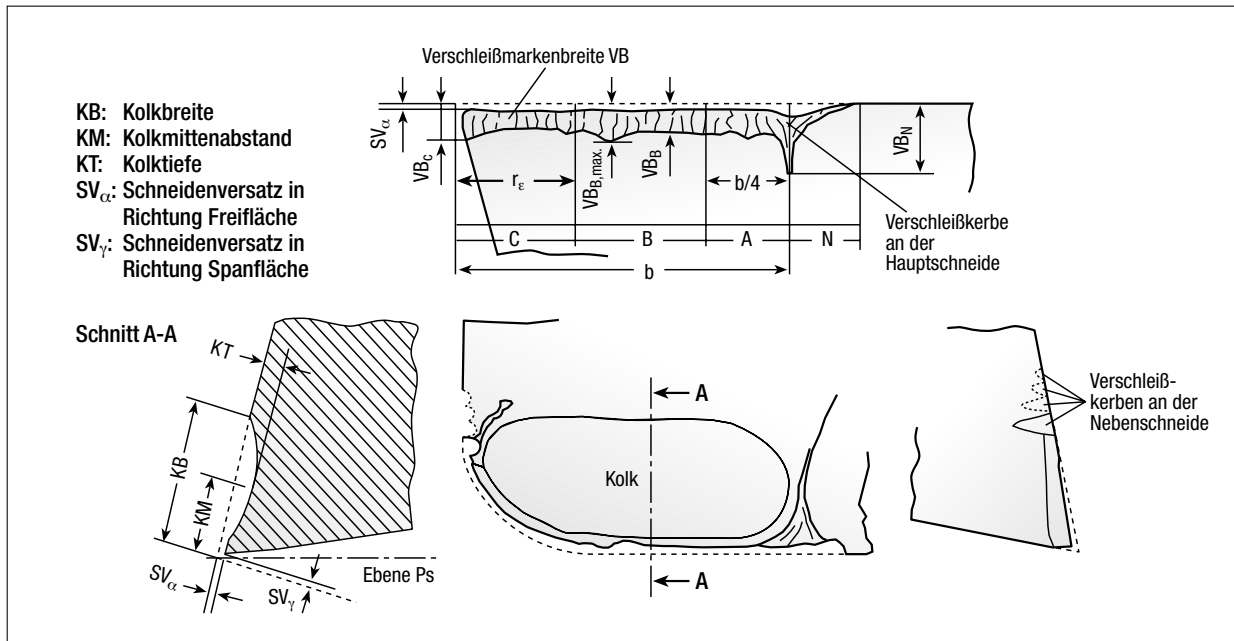


Abb. 5: Verschleißformen und Verschleißmessgrößen am Schneidteil (nach ISO 3685)

chungen durch die Verformungs- und Reibungsvorgänge in den Kontaktzonen zwischen Werkzeug und Werkstück.

Für den Sammelbegriff „Verschleiß“ werden heute folgende Einzelursachen angegeben ([31], [42], [58], ISO 3685):

- Beschädigung der Schneidkante infolge mechanischer und thermischer Überbeanspruchung,
- mechanischer Abrieb,
- Adhäsion (Abscheren von Pressschweißstellen),
- Diffusion,
- Verzunderung.

Die Vorgänge überlagern sich in weiten Bereichen und sind sowohl in ihrer Ursache als auch in ihrer Auswirkung auf den Verschleiß nur zum Teil voneinander zu trennen.

Thermische und mechanische Überbeanspruchungen können an der Schneidkante Ausbrüche, Quer- und Kammrissen sowie plastische Verformungen verursachen. Ausbrüche treten bei hohen Schnittkräften und zu kleinem Keil- oder Eckenwinkel sowie bei spröden Schneidstoffen auf. Sie sind vor allem im unterbrochenen

Schnitt und als kleinere Ausbröckelungen bei der Zerspaltung von Werkstoffen mit harten, nichtmetallischen Einschlüssen sowie bei Fertigungsverfahren mit kleinen Spanungsquerschnitten zu beobachten. Unterliegt die Schneide starken mechanischen Wechselbeanspruchungen (z. B. beim Fräsen), können Querrisse entstehen, die auf der Freifläche parallel zur Hauptschneide verlaufen. Kammrissen, die senkrecht zur Hauptschneide verlaufen, treten bei Zerspanoperationen mit unterbrochenem Schnitt infolge der thermischen Wechselbelastung bei schneller Aufheizung im Schnitt und anschließendem Abkühlen durch Kühlschmierstoff oder an Luft auf.

Als mechanischer Abrieb werden Schneidstoffteilchen bezeichnet, die sich unter dem Einfluss äußerer Kräfte lösen. Der Abrieb wird hauptsächlich durch harte Teile im Werkstück wie Carbide und Oxide verursacht. Eine plastische Verformung der Schneidkante tritt auf, wenn der Schneidstoff einen zu geringen Verformungswiderstand, aber eine ausreichende Zähigkeit besitzt oder die Tempe-

ratur der Schneide so hoch wird, dass der Schneidstoff erweicht.

Unter Adhäsionsverschleiß versteht man das Abscheren von Pressschweißungen zwischen Werkstoff und Schneidstoff, wobei die Scherstelle auch im Schneidstoff liegen kann. Die Pressschweißungen entstehen direkt nach der Trennung des Werkstoffs, wenn der Span mit oxidfreier Oberfläche unter hohem Druck, hoher Temperatur und starker plastischer Verformung über die Spanfläche reibt.

Erhöhter Verschleiß durch Pressschweißungen ergibt sich bei rauer Werkzeugoberfläche sowie bei unterbrochenem Kontakt zwischen Werkstoff und Werkzeug. Dies gilt insbesondere bei niedrigen Schnittgeschwindigkeiten. Hier bilden sich sogenannte Aufbauschneiden. Das sind hochverfestigte Schichten des zerspantenen Werkstoffs, die als Verklebungen am Schneidteil die Funktion der Werkzeugschneide übernehmen. Dies ist möglich bei Werkstoffen, die sich infolge plastischer Verformungen verfestigen. Je nach Schnittbedingungen gleiten Aufbauschneideteile periodisch zwischen Freifläche und Schnittfläche

ab. Sie führen zu einem erhöhten Freiflächenverschleiß und verschlechtern erheblich die Oberflächengüte des Werkstücks. Außerdem bewirkt die Aufbauschneide einen Schneidkantenversatz und damit Form- und Maßungenaugigkeiten des gefertigten Werkstücks. Die Aufbauschneidenbildung ist, sofern die Warmhärte des Schneidstoffs es zulässt, durch eine Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit und die dadurch bedingte Temperaturerhöhung vermeidbar.

Diffusionsverschleiß tritt bei hohen Temperaturen und gegenseitiger Löslichkeit der Partner Werkstoff und Schneidstoff auf. Bei Schneidstoffen mit relativ niedriger Warmhärte (Werkzeugstahl, Schnellarbeitsstahl) ist dieser Effekt nicht zu beobachten, da vorher eine Erweichung des Schneidstoffs eintritt.

Die Verzunderung des Werkzeugs (Oxidationsverschleiß) ist je nach Schneidstofflegierung und Schneidentemperatur unterschiedlich stark. Hartmetall beginnt bereits bei 700 bis 800 °C zu oxidieren. Die Verzunderung entsteht aufgrund der hohen Schnitttemperaturen in der Nähe der Schneidkanten, wo der Luft-sauerstoff freien Zutritt hat.

2 Schneidstoffe zur Stahlzerspannung

2.1 Schnellarbeitsstahl

Schnellarbeitsstähle (HSS) sind hochlegierte Stähle, die als Hauptlegierungselemente Wolfram, Molybdän, Vanadium, Cobalt und Chrom enthalten. Sie verfügen über eine verhältnismäßig hohe Biegebruchfestigkeit und damit über günstige Zähigkeitseigenschaften. Ihre Härte von etwa 60 bis 67 HRC behalten sie bis zu Temperaturen von 600 °C bei. Hieraus sowie aufgrund ihrer guten Bearbeitbarkeit ergibt sich ein breites Einsatzgebiet für Schnellarbeitsstähle im Bereich der spannenden Formgebung. Vor allem die Verwendung für Werkzeuge mit scharfen Schneidkanten und kleinen Keilwinkeln, wie z.B. Räumwerkzeuge, Spiralbohrer, Gewindegewindeschneidwerkzeuge, Reibahlen, Fräser und Drehwerkzeuge für Ein- und Abstechoperationen, sowie für die Feinbearbeitung ist hier zu nennen ([8], [18], [19], [29], [40], [50], [63]).

Die Bezeichnung der Schnellarbeitsstähle, z.B. HS10-4-3-10, die nach DIN EN 10027-1 bzw. nach DIN EN ISO 4957 erfolgt, gibt die prozentualen Massenanteile an Wolfram, Molybdän, Vanadium und Cobalt an. Nach DIN ISO 11054 werden die Schnellarbeitsstähle in Abhängigkeit vom Her-

stellverfahren und vom Massenanteil an Cobalt und Vanadium in zwei Gruppen unterteilt (**Tabelle 1**). Demnach wird ein konventionell hergestellter Schnellarbeitsstahl mit der Bezeichnung HS6-5-2-5 nach DIN EN ISO 4957, der 5% Cobalt und 1,8% Vanadium enthält, als HSS-E bezeichnet. In **Tabelle 2** sind die Hauptanwendungsgebiete einiger Schnellarbeitsstähle aufgelistet.

Schnellarbeitsstähle können auf schmelzmetallurgischem oder auf pulvermetallurgischem Weg hergestellt werden. Für die pulvermetallurgisch hergestellten Schnellarbeitsstähle existieren bislang keine eigenen Werkstoffnummern. Ihre Bezeichnung erfolgt meist firmenspezifisch. Zur Unterscheidung von den schmelzmetallurgisch erzeugten Schnellarbeitsstählen erhalten die pulvermetallurgisch hergestellten gemäß DIN ISO 11054 zusätzlich die Kennbuchstaben PM (**Tabelle 1**). Zur leichteren Einordnung wird häufig auch die amerikanische Nomenklatur verwendet.

Pulvermetallurgisch erzeugte Schnellarbeitsstähle haben in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen. Gegenüber den schmelzmetallurgisch hergestellten Schnellarbeitsstählen weisen sie in der Regel einen etwas höheren Legierungsgehalt auf. PM-Stähle zeichnen sich durch ein homogenes Gefüge (keine Carbid-

Herstellungsverfahren	Bezeichnungscod	Chemische Zusammensetzung Klasse
Konventionelle Schnellarbeitsstähle	HSS	Schnellarbeitsstähle mit weniger als 4,5% Cobalt und weniger als 2,6% Vanadium
	HSS-E	Schnellarbeitsstähle mit mindestens 4,5% Cobalt oder mindestens 2,6% Vanadium
Pulvermetallurgische Schnellarbeitsstähle	HSS-PM	Schnellarbeitsstähle mit weniger als 4,5% Cobalt und weniger als 2,6% Vanadium
	HSS-E-PM	Schnellarbeitsstähle mit mindestens 4,5% Cobalt oder mindestens 2,6% Vanadium

Tabelle 1: Schnellarbeitsstahlgruppen gemäß DIN ISO 11054:2006-09

Stahlsorte Kurzname nach DIN EN ISO 4957:2001	Werkstoff- nummer	Hauptsächlicher Verwendungszweck
HS6-5-2	1.3339	Standard-Schnellarbeitsstahl für alle Zerspanungswerkzeuge zum Schruppen oder Schlichten, Gewinde- und Spiralbohrer, Fräser aller Art, Räumnadeln, Reibahlen, Schneideisen, Senker, Hobelwerkzeuge, Kreissägen, Umformwerkzeuge
HS6-5-3	1.3344	Hochbeanspruchte Gewindebohrer und Reibahlen, Hochleistungsfräser, Räumwerkzeuge, Spiralbohrer, Schneid- und Schabräder
HS6-5-2-5	1.3243	Hochleistungsfräser, Dreh- und Hobelwerkzeuge aller Art, hochbeanspruchte Spiral- und Gewindebohrer, Räumnadeln, Holzbearbeitungs- und Kaltarbeitswerkzeuge, Schruppwerkzeuge mit hoher Zähigkeit
HS10-4-3-10	1.3207	Universell einsetzbar für Schrupp- und Schlichtarbeiten, Dreh- und hochbeanspruchte Fräswerkzeuge, Automatenarbeiten, Holzbearbeitungswerkzeuge
HS2-9-2	1.3348	Spiral- und Gewindebohrer, Fräser, Reibahlen, Räumwerkzeuge
HS2-9-1-8	1.3247	Schafffräser, Drehwerkzeuge für Automatenarbeiten, Spiralbohrer, Gewindebohrer

Tabelle 2: Hauptanwendungsgebiete der wichtigsten Schnellarbeitsstähle (nach [42], [8], [63])

seigerungen) mit gleichmäßiger Verteilung feiner Carbide aus. Aufgrund ihres Gefügebau weisen die PM-Stähle eine bessere Schleifbarkeit und höhere Zähigkeit auf. Hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit als Zerspanwerkzeuge werden die pulvermetallurgisch hergestellten Schnellarbeitsstähle zum Teil unterschiedlich bewertet. Zahlreiche Zerspanversuche haben gezeigt, dass sie konventionellen Schnellarbeitsstählen mit gleicher nomineller Zusammensetzung mindestens gleichwertig sind. Vorteile für PM-Stähle ergeben sich bei hohen mechanischen Belastungen infolge großer Vorschübe, insbesondere bei der Bearbeitung schwer zerspanbarer Werkstoffe wie Nickelbasis- und Titanlegierungen.

Im PVD-Verfahren (Physical Vapour Deposition) beschichtete HSS-Werkzeuge vereinigen die hohe Zähigkeit des HSS-Grundkörpers mit den günstigen Verschleißseigenschaften der aufgetragten Hartstoffschicht aus z.B. TiN, TiAlN oder TiB₂. Die zum Teil deutlichen Leistungssteigerungen sind abhängig vom zu bearbeitenden Werkstoff.

2.2 Klassifizierung der harten Schneidstoffe

Nach DIN ISO 513 werden Bezeichnung und Anwendung der harten Schneidstoffe aus Hartmetall, Schneidkeramik, Diamant und Bornitrid mit Kennbuchstaben gemäß **Tabelle 3** klassifiziert. Unbeschichtete Hartmetalle auf der Basis von Wolframcarbid erhalten bei einer Wolframcarbid (WC)-Korngröße von $\geq 1 \mu\text{m}$ das Kürzel HW und bei Korngrößen $< 1 \mu\text{m}$ die Kennzeichnung HF. Cermets - Hartmetalle auf der Basis von Titancarbonitrid - werden mit dem Kürzel HT, beschichtete Hartmetalle und beschichtete Cermets mit HC gekennzeichnet. Für die übrigen harten Schneidstoffe auf der Basis von Keramik, Diamant oder Bornitrid gelten die entsprechenden Kurzzeichen aus **Tabelle 3**.

Ziel der DIN ISO 513 ist neben der Bezeichnung der Schneidstoffe vor allem deren Zuordnung zu Werkstoffen, für deren Zerspanung sich die verschiedenen Schneidstoffe besonders eignen. In Erweiterung früherer Normen sieht die DIN ISO 513 sechs Hauptanwendungsgruppen und damit sechs

Klassen von Werkstück-Werkstoffen vor, die mit den Kennbuchstaben P, M, K, N, S und H bezeichnet und farblich gekennzeichnet werden (**Tabelle 4**). Die DIN ISO 513 behält damit die für unbeschichtete Hartmetalle seit Jahren in der Praxis etablierten Kennbuchstaben P, M und K bei, wendet sie jedoch nun auf alle harten Schneidstoffe an. Ferner begrenzt sie die Werkstoffpalette der Hauptanwendungsgruppe K auf Guss-eisen und teilt die restlichen der ehemaligen Zerspanungs-Hauptgruppe K zugeordneten Werkstoffe auf die drei neuen Hauptanwendungsgruppen N, S und H auf.

Jede Hauptanwendungsgruppe ist ferner in Anwendungsgruppen unterteilt (**Tabelle 4**). Diese werden mit dem Kennbuchstaben der Hauptanwendungsgruppe, zu der sie gehören, und mit einer Kennzahl bezeichnet. Die Kennzahl weist auf die Zähigkeit und die Verschleißfestigkeit des Schneidstoffes hin. Je höher die Kennzahl innerhalb jeder Hauptanwendungsgruppe ist, desto niedriger ist die Verschleißfestigkeit und desto größer ist die Zähigkeit des Schneidstoffes. Die Kennzahlen sind hier-

	Kennbuchstabe	Werkstoffgruppe
Hartmetalle	HW	Unbeschichtetes Hartmetall, Hauptbestandteil Wolframcarbid (WC) mit Korngröße $\geq 1 \mu\text{m}$
	HF	Unbeschichtetes Hartmetall, Hauptbestandteil Wolframcarbid (WC) mit Korngröße $< 1 \mu\text{m}$
	HT ¹⁾	Unbeschichtetes Hartmetall, Hauptbestandteil Titancarbid (TiC) oder Titanitrid (TiN) oder beides
	HC	Hartmetalle wie oben, jedoch beschichtet
Schneidkeramik	CA	Schneidkeramik, Hauptbestandteil Aluminiumoxid (Al ₂ O ₃)
	CM	Mischkeramik, Hauptbestandteil Aluminiumoxid (Al ₂ O ₃), zusammen mit anderen Bestandteilen als Oxiden
	CN	Siliciumnitridkeramik, Hauptbestandteil Siliciumnitrid (Si ₃ N ₄)
	CR	Schneidkeramik, Hauptbestandteil Aluminiumoxid (Al ₂ O ₃), verstärkt
	CC	Schneidkeramik wie oben, jedoch beschichtet
Diamant	DP	Polykristalliner Diamant
	DM	Monokristalliner Diamant
Bornitrid	BL	Kubisch-kristallines Bornitrid mit niedrigem Bornitridgehalt
	BH	Kubisch-kristallines Bornitrid mit hohem Bornitridgehalt
	BC	Kubisch-kristallines Bornitrid wie oben, jedoch beschichtet

¹⁾ Diese Werkstoffsorten werden auch „Cermets“ genannt.

Tabelle 3: Bezeichnung der harten Schneidstoffe (nach DIN ISO 513)

Hauptanwendungsgruppen			Anwendungsgruppen			Hauptanwendungsgruppen			Anwendungsgruppen		
Kennbuchstabe	Kennfarbe	Werkstück-Werkstoff	Harte Schneidstoffe			Kennbuchstabe	Kennfarbe	Werkstück-Werkstoff	Harte Schneidstoffe		
P	Blau	Stahl: Alle Arten von Stahl und Stahlguss, ausgenommen nichtrostender Stahl mit austenitischem Gefüge	P01 P10 P20 P30 P40 P50	P05 P15 P25 P35 P45	↑ ↓	N	Grün	Nichteisenmetalle: Aluminium und andere Nichteisenmetalle, Nichtmetallwerkstoffe	N01 N10 N20 N30	N05 N15 N25	↑ ↓
M	Gelb	Nichtrostender Stahl: Nichtrostender austenitischer und austenitisch-ferritischer Stahl und Stahlguss	M01 M10 M20 M30 M40	M05 M15 M25 M35	↑ ↓	S	Braun	Speziallegierungen und Titan: Hochwarmfeste Speziallegierungen auf der Basis von Eisen, Nickel und Cobalt, Titan und Titanlegierungen	S01 S10 S20 S30	S05 S15 S25	↑ ↓
K	Rot	Gusseisen: Gusseisen mit Lamellengraphit, Gusseisen mit Kugelgraphit, Temperguss	K01 K10 K20 K30 K40	K05 K15 K25 K35	↑ ↓	H	Grau	Harte Werkstoffe: Gehärteter Stahl, gehärtete Gusseisenwerkstoffe, Gusseisen für Kokillenguss	H01 H10 H20 H30	H05 H15 H25	↑ ↓

↑ Zunehmende Schnittgeschwindigkeit, zunehmende Verschleißfestigkeit des Schneidstoffes
 ↓ Zunehmender Vorschub, zunehmende Zähigkeit des Schneidstoffes

Tabelle 4: Anwendung und Klassifikation der harten Schneidstoffe (nach DIN ISO 513)

bei lediglich Ordnungsnummern, die auf eine gewisse Reihenfolge hinweisen. Sie haben keinerlei Ausagekraft in Bezug auf die Größe der Verschleißfestigkeit oder die Zähigkeit eines Schneidstoffs. Die Schneidstoffhersteller sollen ihre Schneidstoffe in Abhängigkeit von Verschleißfestigkeit und Zähigkeit der geeigneten Anwendungsgruppe zuordnen. Beispiele: HW-P10, HC-K20, CA-K10. Eine Anwendungsgruppe umfasst somit vergleichbare Schneidstoffe verschiedener Hersteller, die sich allerdings in ihrem Verschleiß- und Leistungsverhalten unterscheiden können. Es ist auch möglich, dass ein Schneidstoff von einem Hersteller mehreren Anwendungsgruppen zugeordnet wird, wenn er sich hierfür eignet.

2.3 Hartmetalle

Hartmetalle sind Verbundwerkstoffe. Sie bestehen aus Carbiden oder Carbonitriden, die in eine weiche metallische Bindephase aus Cobalt und/oder Nickel eingebettet sind. Die Hartstoffe sind die Träger der Härte und Verschleißfestigkeit, Aufgabe der Bindephase ist es, die spröden Carbide und Nitride zu einem relativ festen Körper zu verbinden.

Die Vorteile der Hartmetalle bestehen in der guten Gefügleichmäßigkeit aufgrund der pulvermetallurgischen Herstellung, der hohen Härte, Druckfestigkeit und Warmverschleißfestigkeit. Hartmetall besitzt bei 1.000 °C die gleiche Härte wie Schnellarbeitsstahl bei Raumtemperatur. Ferner besteht die Möglichkeit, Hartmetallsorten mit unterschiedlichen Eigenschaften durch gezielte Änderung des Hartstoff- und Bindemittelanteils herzustellen ([31], [43], [44], [58]).

Die Hartmetall-Schneidstoffe können in drei Gruppen unterteilt werden, und zwar in Hartmetalle auf der Basis von

- WC-Co,
- WC-(Ti,Ta,Nb)C-Co und
- TiC/TiN-Co,Ni.

Für die Hartmetalle auf der Basis von TiC/TiN-Co,Ni hat sich die Bezeichnung Cermets eingebürgert.

2.3.1 WC-Co-Hartmetalle

Die Hartmetalle dieser Gruppe bestehen fast ausschließlich aus dem hexagonalen Wolframmonocarbide und der Bindephase Cobalt. Sie können bis 0,8% Massenanteil VC und/oder Cr₃C₂ und/oder bis zu 2% Massenanteil (Ta,Nb)C als Dotierungszusätze zur Steuerung der Gefügefinesse und Gleichmäßigkeit enthalten.

Die WC-Co-Hartmetalle zeichnen sich durch eine hohe Abriebfestigkeit aus. Aufgrund der starken Diffusionsneigung des Wolframcarbids sind sie für die Bearbeitung weicher Stahlwerkstoffe nicht geeignet. Sie finden vor allem bei kurzspanenden Werkstoffen, Gusswerkstoffen, Nichteisen- und Nichtmetallen, hochwarmfesten Werkstoffen sowie bei der Gestein- und Holzbearbeitung Verwendung, Tabelle 4 (bisher: Zerspanungshauptgruppe K, nach DIN ISO 513 Zuordnung zu den Hauptanwendungsgruppen K, N, S und/oder H).

Nach der bisherigen Terminologie werden die WC-Co-Hartmetalle in Abhängigkeit von der durchschnittlichen WC-Korngröße im gesinterten Gefüge in Fein-(0,8-1,3 µm), Feinst-(0,5-0,8 µm) und Ultrafeinkornhartmetalle (0,2-0,5 µm) unterteilt. Abweichend hiervon unterscheidet die DIN ISO 513 nur zwischen Hartmetallen mit Korngrößen ≥ 1 µm (HW) und solchen mit WC-Korngrößen < 1 µm (HF).

Konventionelle Feinkornhartmetalle

Die konventionellen unbeschichteten WC-Co-Feinkornhartmetalle (fine grain carbides) mit einem durchschnittlichen Korndurchmesser von 0,8 bis 1,3 µm (nach DIN ISO 513 Korngröße ≥ 1 µm) haben ihren festen Einsatzbereich in der Zerspantechnik immer noch dort, wo hohe Anforderungen an Schneidenschärfe und Zähigkeit gestellt werden, wie z.B. beim Fräsen von Stahl, bei der Feinbearbeitung, bei Ein- und Abstechoptionen oder bei der Gewindeherstellung ([5], [16], [17], [57]).

Feinst- und Ultrafeinkornhartmetalle (HF)

Als Feinst- (submicron grain carbides) bzw. Ultrafeinkornhartmetalle (ultrafine grain carbides) werden bislang in Literatur und Praxis WC-Co-Hartmetalle mit einem durchschnittlichen WC-Korndurchmesser von 0,5 bis 0,8 µm bzw. 0,2 bis 0,5 µm im gesinterten Gefüge bezeichnet. Die kleine Korngröße verleiht diesen Hartmetallen eine besondere Eigenschaftskombination. Die Verringerung der WC-Kristallitgröße unter 1 µm führt bei gleichbleibendem Bindergehalt sowohl zur Erhöhung der Härte als auch der Biegefestigkeit. Diese Eigenschaft eröffnet den Feinst- und Ultrafeinkornhartmetallen ein weites Anwendungsfeld ([15], [17], [27], [55]).

Hochwertige Feinst- und Ultrafeinkornhartmetalle sind den konventionellen Feinkornhartmetallen in Härte, Kantenfestigkeit und Zähigkeit überlegen. Sie besitzen zudem nur eine geringe Neigung zum Kleben und zum Verschleiß durch Diffusion. Diese Eigenschaften sind erforderlich, wenn die Aufgabe besteht, gehärtete Materialien mit kleinsten Aufmaßen in Schleifqualität fertig zu bearbeiten.

Das Anwendungsgebiet der feinst- und ultrafeinkörnigen Hartmetalle liegt dort, wo eine hohe Zähigkeit, hohe Verschleißfestig-

keit sowie höchste Kantenfestigkeit der Schneide gefordert werden, z.B. beim Räumen, Fräsen und Wälzstoßen vergüteter und gehärteter Stähle, bei der Gusszerpannung sowie bei der Bearbeitung von Faserverbundwerkstoffen und Nichteisenmetallen ([15], [17], [27], [43], [55]).

2.3.2 WC-(Ti,Ta,Nb)C-Co-Hartmetalle

Die Hartmetalle dieser Gruppe enthalten neben Wolframcarbid noch Mischcarbide (MC) aus Titan-, Tantal-, Niob- und/oder Zirkoncarbid. Gegenüber den WC-Co-Hartmetallen zeichnen sie sich durch verbesserte Hochtemperatureigenschaften aus. Dies gilt insbesondere für die Warmhärte, bzw. Warmfestigkeit, die Oxidationsbeständigkeit und Diffusionsbeständigkeit gegenüber Eisenwerkstoffen. Hauptanwendungsbereich ist die Bearbeitung langspanender Stahlwerkstoffe. Aufgrund des Gehaltes an Mischcarbiden können die Hartmetalle dieser Gruppe hinsichtlich ihres Einsatzgebietes in zwei Untergruppen unterteilt werden.

Gruppe A: Mischcarbidmassenanteil > 10 %. Die Hartmetalle dieser Gruppe zeichnen sich aufgrund ihres Gehaltes an Mischcarbiden durch eine hohe Warmverschleißfestigkeit und geringe Diffusionsneigung zu Eisenwerkstoffen bei geringem Abrieb aus. Sie finden vor allem bei der Zerspannung von Stahl- und Stahlgusswerkstoffen, mit Ausnahme der nichtrostenden Stähle mit austenitischem Gefüge, Anwendung.

Gruppe B: Mischcarbidmassenanteil < 10 %. Die dieser Gruppe zugeordneten Hartmetalle haben eine relativ gute Warmverschleißfestigkeit und Abriebfestigkeit. Sie sind besonders geeignet für die Zerspannung von nichtrostenden und hitzebeständigen Stählen mit austenitischem Gefüge sowie für legierte oder harte austenitische/ferritische Gusswerkstoffe.

2.3.3 TiC/TiN-Co,Ni-Hartmetalle (Cermets)

Cermets (gebildet aus ceramic + metal) sind Hartmetalle auf der Basis von Titancarbonitrid in einer Nickel-Cobalt-Bindephase (Kennzeichnung nach DIN ISO 513: HT). Die heutigen Cermets sind komplexe Vielstoffsysteme, die als Hartstoffphase noch eine Reihe von Carbonitriden weiterer Elemente, wie Wolfram, Tantal, Niob und Molybdän, oder Komplexcarbide enthalten können ([20], [24]).

Cermets eignen sich aufgrund ihrer Eigenschaften besonders zum Schlichten von Stahlwerkstoffen. Sie erlauben die Anwendung hoher Schnittgeschwindigkeiten bei kleinen Spannungsquerschnitten. Die Entwicklung zäherer Cermet-Sorten führte zur Erweiterung des Anwendungsbereiches hin zu mittleren Schruppbedingungen. Haupteinsatzgebiete sind heute sowohl das Drehen als auch das Fräsen. Sie eignen sich ebenfalls zum Einstechen, Gewindedrehen und als Reibwerkzeuge. Die große Verschleißfestigkeit der Schneiden führt bei der Schlicht- und Feinstbearbeitung zu langen Standzeiten und ausgezeichneten Oberflächenqualitäten. Zähere Cermet-Sorten, die etwa dem Bereich P15 bis P25 konventioneller Hartmetalle auf der Basis von WC-(Ti, Ta, Nb)C-Co entsprechen, werden mit Erfolg bei mittleren Schruppdrehoperationen und beim Fräsen eingesetzt. Analog zu den konventionellen Hartmetallen kann auch bei Cermets durch eine Hartstoffbeschichtung das Verschleiß- und Leistungsverhalten weiter verbessert werden ([20], [24]).

2.3.4 Beschichtete Hartmetalle

Zu den Meilensteinen bei der Weiterentwicklung der Hartmetalle zählt deren Beschichtung mit dünnen, hochverschleißfesten Hartstoffschichten. Beschichtete Hartmetalle bestehen aus einem

relativ zähen Grundkörper, z.B. P20, K20, auf den eine 5 bis 20 µm dicke Hartstoffschicht aus Carbiden (z.B. Titancarbid, TiC), Nitriden (z.B. Titannitrid, TiN), Carbonitriden (Titancarbonitrid, Ti(C,N) und/oder Oxiden (z.B. Aluminiumoxid, Al₂O₃) aufgebracht wird. Nach DIN ISO 513 werden beschichtete Hartmetalle mit HC (z.B. HC-K20) gekennzeichnet.

Die Beschichtung der Zerspanwerkzeuge erfolgt nach dem CVD- (Chemical Vapour Deposition = chemische Abscheidung aus der Dampfphase) oder nach dem PVD-Verfahren (Physical Vapour Deposition = physikalische Abscheidung aus der Dampfphase), siehe VDI 3824. Mit den zur Verfügung stehenden CVD-Prozessen (Hochtemperatur [HT]-, Mitteltemperatur [MT]- und plasmaunterstütztes PA-CVD-Verfahren) lassen sich Hartstoffe wie TiC, TiCN, TiN, HfC, HfN, ZrC, ZrN, Al₂O₃ als Einzelbeschichtungen oder wie heute üblich in verschiedenen Kombinationen als Gradienten-, Composite- und Mehrlagenbeschichtungen abscheiden. Der PVD-Prozess, zunächst aufgrund der niedrigeren Beschichtungstemperaturen für die Beschichtung von HSS-Werkzeugen erschlossen, wird heute auch für die Beschichtung von Hartmetallen und Cermets eingesetzt. Nach diesem Verfahren werden Hartstoffbeschichtungen auf der Basis von TiN, TiAlN, AlTiN, AlCrN, Al₂O₃ als Einzel-, Composite- oder Viellagenschichten, harte amorphe Kohlenstoffschichten (DLC-Schichten) mit geringem Reibungskoeffizienten (VDI-Richtlinien VDI 3824 Teil 1-4 und VDI 2840:2004) oder weiche Schutzschichten wie z.B. WC/C oder MoS₂ hergestellt. Sowohl mit dem Plasma-CVD- als auch mit dem PVD-Verfahren können sogenannte Nanolayer-Beschichtungen oder Schichten mit Superlattice-Strukturen abgeschieden werden. Hierbei handelt es sich um Schichtsysteme, die aus bis zu 2.000 Schichtlagen mit Einzelschichtdicken zwischen 10 und

80 nm bestehen können. Ein weiterer Ansatz, die Schichteigenschaften zu verbessern, ist die Erzeugung sogenannter Nanocomposites. Hierbei handelt es sich um nanokristalline, isotrope Mehrphasensysteme, bei denen zwei ineinander nicht lösliche Phasen (z. B. Al, Ti, Si) während des Beschichtungsprozesses auf der Werkzeugoberfläche abgetrennt werden. Beispiele hierfür sind die Einbettung von nanokristallinem kubischem TiN in einer AlN-Matrix, von nanokristallinem TiAlN bzw. von AlCrN in einer amorphen Si₃N₄-Matrix oder von nanokristallinem (Ti,Al)N in einer Matrix aus (Al,Ti)N ([3], [11], [13], [26], [42]).

Der Einsatz beschichteter Hartmetalle ist heute Stand der Technik. Die Hauptanwendungsbereiche beschichteter Hartmetalle liegen vor allem beim Drehen, Fräsen und Bohren von Stahl- und Gusswerkstoffen. Beim Drehen sind mittlerweile fast alle Wendeschneidplatten beschichtet. Die Verbesserung des Verschleiß- und Leistungsverhaltens beschichteter Hartmetalle im Vergleich zu unbeschichteten Schneidstoffen ist signifikant. Die Beschichtung führt bei gleichen Schnittbedingungen zu einer Standzeiterhöhung bzw. ermöglicht bei gleicher Standzeit die Anwendung wesentlich höherer Schnittwerte ([3], [6], [7], [11], [13], [26], [42]).

2.4 Schneidkeramik

Die keramischen Schneidstoffe können in oxidische und nichtoxidische Schneidkeramiken eingeteilt werden. Zu den oxidischen Schneidkeramiken zählen alle Schneidstoffe auf der Basis von Aluminiumoxid (Al₂O₃). Man unterscheidet zwischen den Oxidkeramiken (Kennzeichnung nach DIN ISO 513: CA), die außer Al₂O₃ als weitere Komponenten nur Oxide (z. B. ZrO₂) enthalten, den Mischkeramiken (CM), die neben

Al₂O₃ noch metallische Hartstoffe (TiC und TiN) aufweisen, sowie den whiskerverstärkten Keramiken (CR), bei denen in die Al₂O₃-Matrix SiC-Whisker eingelagert sind [42].

Keramische Schneidstoffe auf der Basis von Al₂O₃ zeichnen sich durch eine hohe Warmhärte, gute chemische Beständigkeit und durch ein hervorragendes Verschleißverhalten aus. Den ausgesprochen günstigen Verschleißigenschaften der oxidkeramischen Schneidstoffe steht jedoch ihre Empfindlichkeit gegen Zug-, Biege-, Schlag- und thermische Schockbeanspruchung gegenüber. Aufgrund der geringen Zähigkeit ist die sorgfältige Anpassung von Schnittbedingungen und Schneidteilgeometrie Voraussetzung für einen erfolgreichen Einsatz der Schneidkeramiken. Keramische Schneidstoffe kommen daher vorwiegend in der Massenfertigung zum Einsatz. Hier rechtfertigt die Reduzierung von Bearbeitungszeit den hohen Aufwand bei der Auswahl und Anpassung der Schneidstoffe.

Hohe Schnittgeschwindigkeiten und Zerspanleistungen bei gutem Standvermögen kennzeichnen die spanende Bearbeitung mit Schneidkeramikwerkzeugen. Hauptanwendungsbereich der Oxidkeramiken ist das Schrupp- und Schlichtdrehen von Grauguss. Mischkeramiken werden aufgrund ihrer hohen Kantenfestigkeit bevorzugt beim Feindrehen von gehärteten Stahlwerkstoffen, zum Hartdrehen von Walzen und zur Feinbearbeitung von Grauguss durch Drehen und Fräsen eingesetzt. Whiskerverstärkte Oxidkeramiken eignen sich vorwiegend für das Drehen hochwarmfester Nickelbasislegierungen [42].

Von den nichtoxidischen Keramiken haben in den letzten Jahren vor allem Schneidstoffe auf der Basis von Siliciumnitrid (Si₃N₄) große Bedeutung erlangt. Klassisches Einsatzgebiet von Si₃N₄-Schneidstoffen (Kennzeichnung nach DIN ISO 513: CN) ist die Graugussbearbeitung.

2.5 Polykristallines kubisches Bornitrid

Kubisch-kristallines Bornitrid (cBN) ist nach Diamant der zweithärteste Schneidstoff. Es wird synthetisch aus Bor und Stickstoff in einem Hochdruck-Hochtemperaturprozess hergestellt. In einem Hochdruck-Hochtemperaturprozess werden die cBN-Körner mit Hilfe einer Bindephase zu einer 0,5 mm dicken polykristallinen kubischen Bornitridschicht (PCBN) versintert und gleichzeitig auf einer Hartmetallunterlage aufgebracht. Heute steht eine Vielzahl von PCBN-Schneidstoffsorten zur Verfügung, die sich im cBN-Gehalt (niedrig- und hoch-cBN-haltige Sorten), in der cBN-Korngröße und in der chemischen Zusammensetzung des Binders unterscheiden. Auch bei den PCBN-Schneidstoffen wird versucht, durch eine Beschichtung deren Verschleiß- und Leistungsverhalten noch weiter zu steigern ([4], [9], [45], [51]).

Schneidstoffe aus PCBN eignen sich hervorragend für das Drehen, Bohren und Fräsen vergüteter und gehärteter Stahlwerkstoffe mit einer Härte von 55 bis 68 HRC sowie für das Drehen hochwarmfester Legierungen auf Nickel- und Cobaltbasis. Es sind sowohl Schrupp- als auch Schlichtoperationen möglich. Beim Fräsen beschränkt sich der Einsatz von PCBN noch vorwiegend auf das Messerkopfstrichfräsen. Vor allem beim Drehen können dem Schleifen vergleichbare Oberflächenqualitäten erzielt werden. Für die Bearbeitung von Stahlwerkstoffen mit Härten unter 55 HRC ist PCBN nicht zu empfehlen ([42], [45], [54]).

3 Zerspanbarkeit der Stahlwerkstoffe

3.1 Bewertungsgrößen der Zerspanbarkeit

Zur Beschreibung und Prüfung der Zerspanbarkeit sind vier Bewertungsgrößen zu beachten. Je nach Anwendungsfall können die Kriterien

- Standzeit (bzw. Standweg, Standmenge, Bohrungszahl etc.),
- Schnittkräfte,
- Oberflächengüte und
- Spanform

einzelnen oder in unterschiedlichen Kombinationen charakteristisch für die Zerspanbarkeit sein.

Die Zerspanbarkeitskennwerte liefern die Basisdaten für eine Schnittwertermittlung. Um solche Daten in der geforderten Qualität zur Verfügung stellen zu können, sind die Versuchsbedingungen für Zerspanbarkeitsuntersuchungen präzise festgelegt, z.B. in ISO 3685:1993 Tool-life testing with single-point turning tools [42].

3.1.1 Standzeit

Die Standzeit T_c ist die Zeit, in der ein Werkzeug vom ersten Anschnitt bis zum Unbrauchbarwerden aufgrund eines vorgegebenen Standzeitkriteriums unter gegebenen Zerspanungsbedingungen Zerspanarbeit leistet. Standzeitkriterien sind dabei hauptsächlich Verschleißkenngrößen wie Freiflächen- oder Kolkverschleiß. Die Standzeit eines Werkzeuges gilt als beendet, wenn der Freiflächen- oder der Kolkverschleiß einen vorher als maximal zulässig definierten Wert erreicht.

Soll das Standzeitverhalten einer Werkstoff-Schneidstoff-Paarung untersucht werden, so sind während des Verschleißstandzeit-Drehversuches mindestens drei einzelne Standzeiten für unterschiedliche Schnittgeschwindigkeiten zu ermitteln. Dies erfolgt bei gleichbleibendem Vorschub,

gleicher Schnitttiefe und konstanten Randbedingungen. Die ermittelten Standzeiten T_c werden über den jeweiligen Schnittgeschwindigkeiten in einem doppeltlogarithmischen Koordinatennetz gleicher Teilung aufgetragen. Es ergibt sich in der Regel eine leicht gekrümmte Kurve (Abb. 6).

Der Kurvenverlauf in derartigen Diagrammen lässt sich in einem bestimmten Bereich durch eine Gerade annähern:

$$\bullet \log T_c = k \cdot \log v_c + \log C_v$$

Nach dem Entlogarithmieren ergibt sich die bekannte Taylor-Gleichung:

$$\bullet T_c = C_v \cdot v_c^k$$

Hierbei entspricht die Konstante C_v der Standzeit bei der Schnittgeschwindigkeit $v_c = 1$ m/min, während der Exponent k die Steigung der Geraden ($k = \tan \alpha$) angibt.

Die Steigung der Standzeitkurve erlaubt Rückschlüsse auf die überwiegende Ursache für den Verschleiß des Werkzeuges. So lässt ein sehr steiler Verlauf der Standzeitgeraden auf dominierenden Einfluss der Temperatur

schließen, während ein flacherer Verlauf großen Einfluss von mechanischem Abrieb nahelegt.

Die ermittelten Konstanten und Exponenten sind Zerspanbarkeitskennwerte für jeweils eine Werkstoff-Schneidstoff-Kombination. Sie sind ohne Einschränkung nur für die Zerspanbedingungen gültig, für die sie bestimmt werden. Daher ist die Übertragbarkeit in die betriebliche Praxis nur dann zulässig, wenn sich die Bedingungen weitgehend gleichen.

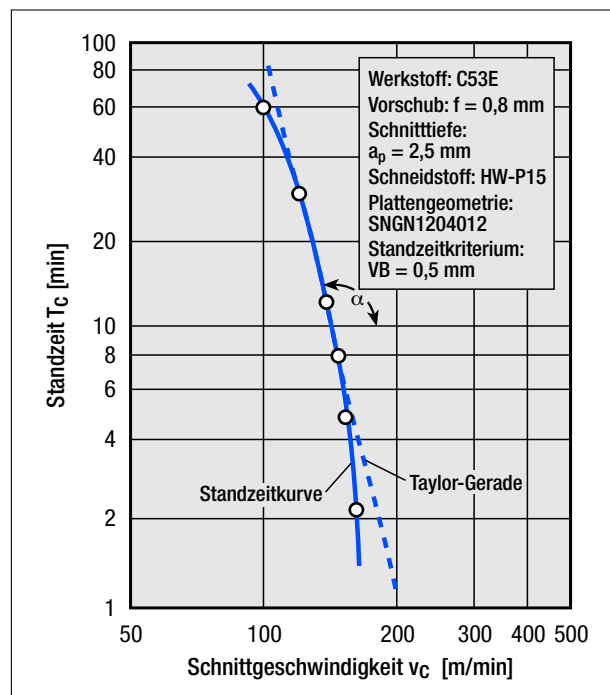
3.1.2 Zerspankraft

Die Zerspankraft F_z wird beim Drehen in drei Komponenten gemäß den Bewegungsrichtungen von Werkzeug und Werkstück aufgeteilt (Abb. 7), und zwar in

- die Schnittkraft F_c ,
- die Vorschubkraft F_f und
- die Passivkraft F_p .

Beim Fräsen erfolgt die Aufteilung in Vorschubkraft (F_f), Vorschubnormalkraft (F_{fn}) und Passivkraft (F_p). Messgrößen beim Bohren und Reiben sind die Vorschubkraft und das Drehmoment,

Abb. 6: Annäherung der Standzeitkurve durch eine Standzeitgerade (nach ISO 3685)



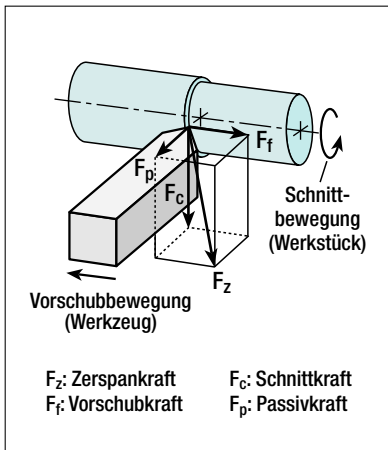


Abb. 7: Kräfte am Zerspanwerkzeug (nach DIN 6584 und ISO 3002/4)

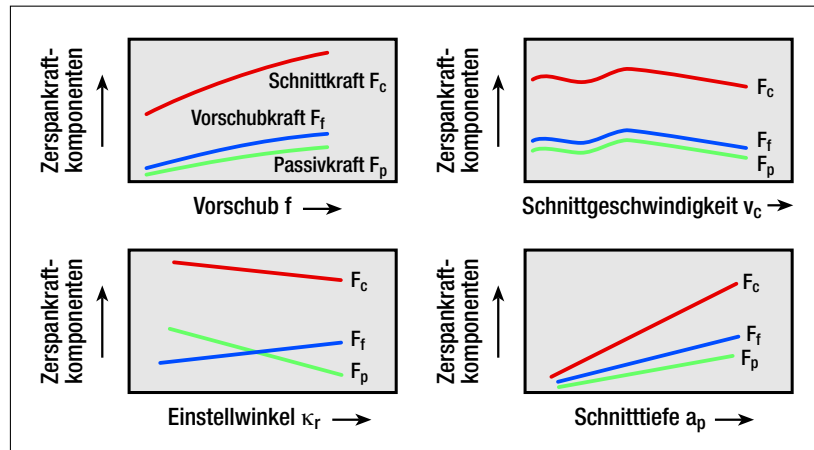


Abb. 8: Qualitative Abhängigkeit der Zerspankraftkomponenten von Vorschub, Schnittgeschwindigkeit, Einstellwinkel und Schnitttiefe

beim Gewindebohren und Gewindefurchen die Axialkraft beim Anschneiden und das Drehmoment. Die Bezeichnung der Kräfte ist in den Normen ISO 3002/4 und DIN 6584 ausführlich dargestellt.

Außer durch die Eigenschaften des Werkstoffs selbst werden die Zerspankraftkomponenten noch durch eine Anzahl weiterer Bearbeitungsparameter unterschiedlich stark beeinflusst. **Abb. 8** zeigt die tendenzmäßigen Einflüsse von Vorschub, Schnittgeschwindigkeit, Einstellwinkel und Schnitttiefe. Weiterhin wirken sich Art und Größe des Werkzeugverschleißes stark auf die Zerspankräfte und auf die Drehmomente aus.

Die Schnittkraft wird anhand der Kienzle-Gleichung

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

bestimmt. Der Spanungsquerschnitt wird in dieser Gleichung durch die Spanungsbreite b und die Spanungsdicke h beschrieben. Die spezifische Schnittkraft $k_{c1.1}$ ist im Wesentlichen vom Werkstoff, von den Zerspanbedingungen, vom Werkzeug und von verfahrensspezifischen Einflüssen abhängig. Der Anstiegswert $1-m_c$ kennzeichnet den Schnittkraftverlauf für eine Werkstoff-Schneidstoff-Kombination in Abhängigkeit von der Spanungsdicke [42].

Für die Berechnung der Vorschubkraft und der Passivkraft gelten analoge Gleichungen wie für die Berechnung der Schnittkraft.

3.1.3 Oberflächengüte

Die Qualität spanend hergestellter Oberflächen wird durch die kinematische Rauheit und durch die Schnittflächenrauheit bestimmt.

Die kinematische Rauheit spanend erzeugter Oberflächen ergibt sich durch die Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück und durch das Profil der Schneidkante. Das Schneidkantenprofil ändert sich durch den Verschleiß an den im Eingriff befindlichen Schneiden.

Die Schnittflächenrauheit ist der kinematischen Rauheit überlagert. Sie wird im Wesentlichen durch den Verformungs- und Trennmechanismus an der Schneidkante, aber auch durch die verschleißbedingte Verschlechterung der Schnittfläche am Eckenradius und an der Nebenflechte erzeugt.

Weiterhin wird die Werkstückoberfläche durch Schwingungen des Werkzeug-Werkstück-Maschine-Systems beeinträchtigt.

Zur Bewertung der Oberflächenrauheit werden in der Praxis meist die Kenngrößen

- maximale Rautiefe R_{max} ,
- Mittenrauwert R_a und
- Rautiefe R_z

herangezogen (**Abb. 9**).

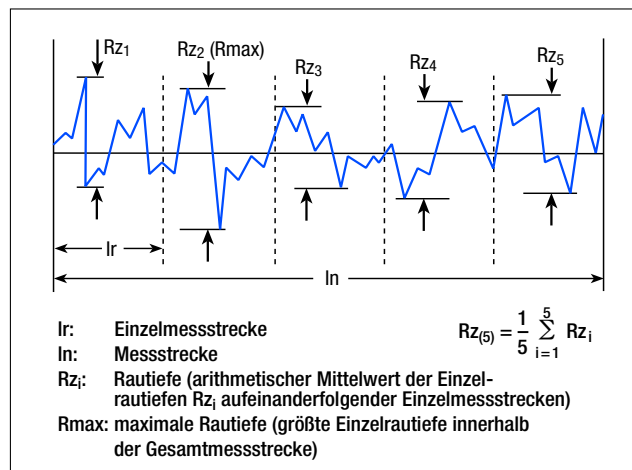


Abb. 9: Oberflächenkenngrößen R_z und R_{max} (nach Mahr und DIN EN ISO 4287)

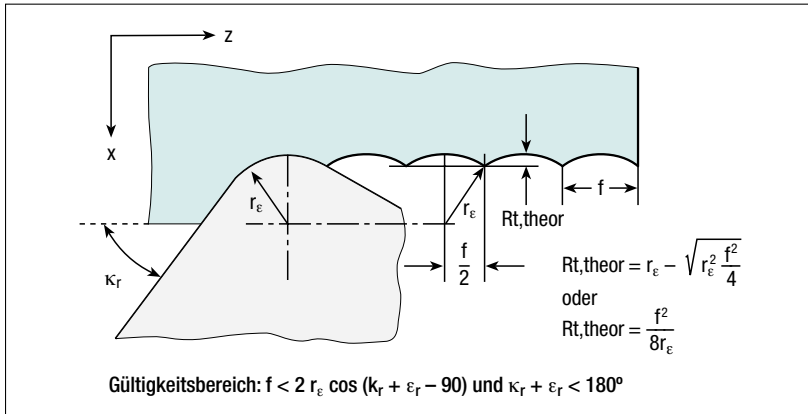


Abb. 10: Geometrische Eingriffsverhältnisse beim Drehen

Die theoretische Rautiefe R_t lässt sich beim Drehen aus den geometrischen Eingriffsverhältnissen ableiten und in Abhängigkeit vom Vorschub und vom Eckenradius bestimmen (Abb. 10). Durch eine Vergrößerung des Eckenradius zur Nebenschneide hin (Wiper-Geometrie) lässt sich bei gegebenem Vorschub die Rauheit verringern oder bei gegebener Rauheit der Vorschub und damit die Produktivität erhöhen.

Die Schnittgeschwindigkeit hat vor allem bei Stählen, die zur Aufbauschneidenbildung neigen, großen Einfluss auf die Oberflächengüte der Werkstücke. Diese ist bei Anwendung niedriger

Schnittgeschwindigkeiten (Aufbauschneidengebiet) schlecht und verbessert sich erst wieder oberhalb von Schnittgeschwindigkeiten $v_c = 60$ bis 80 m/min.

Die Schnitttiefe besitzt keinen Einfluss auf die Oberflächenqualität, solange eine bestimmte Mindestschnitttiefe nicht unterschritten wird. Diese hängt u. a. von der Größe der Schneidkantenverrundung ab.

Von Seiten der Schneidteilgeometrie wirkt sich neben dem Einstellwinkel der Spanwinkel am stärksten auf die Oberflächenrauhheit aus. Mit wachsendem positivem Spanwinkel verringert sich die Rautiefe.

3.1.4 Spanbildung

Der Beurteilung der Spanbildung (Abb. 11) kommt eine große Bedeutung zu, da bestimmte Spanformen Unfallgefahr und Störungen des Prozessablaufes hervorrufen.

Als wichtigste Einflussgrößen in Bezug auf die Spanbildung sind die Schnittbedingungen und die Schneidteilgeometrie zu nennen. Grundsätzlich wird angestrebt, möglichst kurzbrüchige Späne zu erzielen. Dazu stehen zwei Wege offen:

Maßnahmen, die das Umformvermögen des zu zerspanenden Werkstoffs erschöpfen, wie z. B. Wärmebehandlung auf gröberes Korn, Kühlung im Prozess.

Erhöhung des Umformgrades im Prozess, z. B. durch Steigerung des Vorschubs, durch Verringerung des Spanwinkels oder Anbringung einer Spanleitstufe, wodurch der ablaufende Span stark gekrümmt wird und beim Auftreffen auf ein Hindernis bricht.

Um im Rahmen von Schnittwertvorgaben auch Aussagen über die Spanformen machen zu können, werden diese üblicherweise durch das Prüfverfahren „Spanbeurteilung“ bestimmt. Hierbei wird der Spanungsquerschnitt

ungünstig			brauchbar		gut			brauchbar	
Bandspan	Wirrspan	Flachwendelspan	Schrägwendelspan	lange zylind. Wendelspan	kurze zylind. Wendelspan	Spiralwendelspan	Spiralspan	Spanlocken	Brückelspan

Abb. 11: Spanformen beim Drehen und ihre Beurteilung (nach [37])

($a_p \cdot f$) bei sonst gleichbleibenden Schnittbedingungen variiert, um Bereiche günstiger Spanformen für eine Werkstoff-Schneidstoff-Kombination festzulegen.

3.2 Beeinflussung der Zerspanbarkeit

Werkstoffseitig wird die Zerspanbarkeit der Stähle durch das Gefüge bestimmt. Für die Ausbildung des Gefüges sind in erster Linie

- der Kohlenstoffmassenanteil,
- die Legierungselemente und
- die durchgeführte Wärmebehandlung von Bedeutung.

3.2.1 Kohlenstoff

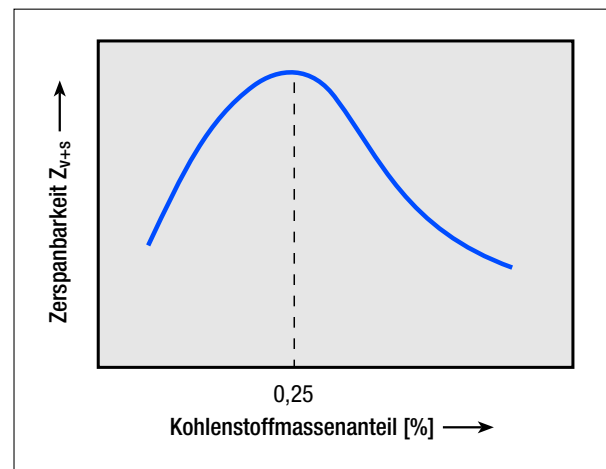
Die Zerspanbarkeit von Stählen wird in entscheidendem Maße durch die Gefügeausbildung beeinflusst. Das Stahlgefüge setzt sich hauptsächlich aus folgenden Bestandteilen zusammen:

- Ferrit,
- Zementit,
- Perlit,
- Austenit,
- Bainit und
- Martensit.

Je nach Kohlenstoffmassenanteil, Anteil an Legierungselementen und durchgeführter Wärmebehandlung überwiegt einer oder mehrere dieser Gefügebestandteile, deren mechanische Eigenschaften die Zerspanbarkeit eines vorliegenden Stahls prägen.

Der **Ferrit** (α -Eisen) zeichnet sich durch niedrige Festigkeit und Härte, jedoch durch hohe Verformungsfähigkeit aus. Vor allem bei Stählen mit einem C-Massenanteil $< 0,25\%$ werden die Zerspaneigenschaften im Wesentlichen durch den Ferrit bestimmt. Bei der Zerspannung bereitet der Ferrit Schwierigkeiten aufgrund seiner großen Neigung zum Verkleben und zur Bildung von Aufbauschneiden. Um die Aufbauschneidenbildung zu vermeiden, muss die Schnittge-

Abb. 12: Schematischer Zusammenhang zwischen Zerspanbarkeit Z_{v+s} und Massenanteil Kohlenstoff bei unlegiertem Stahl (nach Vieregge)



schwindigkeit auf Werte oberhalb von $v_c = 100$ m/min gesteigert werden. Die Werkzeuge sollten einen positiven Spanwinkel (z. B. beim Drehen $\gamma_0 > 6^\circ$) aufweisen. Können diese Bedingungen, z. B. bei Verfahren wie Bohren, Reiben und Gewindeschneiden, nicht realisiert werden, ist mit schlechten Werkstückoberflächen zu rechnen. Ferner tritt verstärkt Gratbildung auf. Aufgrund der hohen Verformungsfähigkeit des Ferrits entstehen außerdem unerwünschte Band- und Wirrspäne; die Verschleißwirkung auf das Werkzeug jedoch ist gering. Eine Kaltverformung (+CR) wirkt sich insbesondere bei Stählen mit niedrigem C-Massenanteil günstig auf die Spanbildung aus.

Der Gefügebestandteil **Zementit** (Eisencarbid, Fe_3C) ist hart und spröde und lässt sich praktisch nicht zerspanen. In Abhängigkeit vom Kohlenstoffgehalt des Stahls und von der Wärmebehandlung kann der Zementit frei oder als Bestandteil des Perlits auftreten.

Perlit ist eine (eutektoide) Mischung aus Ferrit und Zementit. Überwiegend tritt lamellarer Zementit im Perlit auf. Durch Weichglühen kann jedoch auch globularer (kugelig) Zementit entstehen.

Der Anteil des Perlits nimmt bei höheren Massenanteilen an Kohlenstoff ($0,25\% < C < 0,4\%$) zu.

Dadurch gewinnen auch die besonderen Zerspaneigenschaften

des Perlits stärkeren Einfluss auf die Zerspanbarkeit des Werkstoffs. Die Verformungsfähigkeit nimmt ab.

Daraus folgt:

- Eine Verringerung der Klebneigung und Verschiebung der ABS (Aufbauschneiden)-Bildung zu niedrigeren Schnittgeschwindigkeitsbereichen
- Infolge der größeren Belastung der Kontaktzone steigen die Schneidentemperatur und der Werkzeugverschleiß
- Die Oberflächengüte, die Spanbildung und die Spanform werden besser

Eine weitere Steigerung des Kohlenstoffgehaltes bewirkt ein weiteres Abnehmen des Ferritanteiles zugunsten des Perlits, bis bei $0,8\%$ C ausschließlich Perlit vorliegt. Die Auswirkungen auf die Zerspanbarkeit folgen den bereits bei den Stählen mit geringen C-Massenanteilen erkennbaren Tendenzen.

Bereits bei niedrigen Schnittgeschwindigkeiten entstehen hohe Schneidentemperaturen. Gleichzeitig bedingt der zunehmende Druck auf die Kontaktzone erhöhten Verschleiß, insbesondere Kolkverschleiß; die Spanbildung wird begünstigt. **Abb. 12** zeigt schematisch den Zusammenhang zwischen der Zerspanbarkeit Z_{v+s} hinsichtlich Verschleiß sowie

Spanbildung und dem Kohlenstoffgehalt. Mit steigendem Kohlenstoffgehalt wird die Spanbildung besser, gleichzeitig nimmt der Verschleiß zu. Eine gute Zerspanbarkeit weisen Kohlenstoffstähle bei etwa 0,25 % C auf.

Stähle mit C-Massenanteilen zwischen 0,4 und 0,8% gelten im Allgemeinen nur hinsichtlich der Spanbildung und Oberflächengüte als gut zerspanbar. Um dem raschen Verschleißfortschritt aufgrund der höheren thermischen und mechanischen Schneidenbelastung zu begegnen, sollte man beschichtete Werkzeuge einsetzen und die Schnittgeschwindigkeit so wählen, dass eine plastische Verformung der Schneiden vermieden wird. Weiterhin sollten bei der spanenden Bearbeitung Werkzeuge mit ausreichend stabilen Schneidteilen eingesetzt werden.

Liegt der C-Massenanteil deutlich über 0,8%, scheidet sich Zementit schalenförmig an den Korngrenzen aus. Derartige Stähle rufen bei Zerspanprozessen sehr starken Verschleiß hervor. Neben der stark abrasiven Wirkung der harten und spröden Gefügebestandteile führen die auftretenden hohen Drücke und Temperaturen zu einer zusätzlichen Belastung der Schneide. Bereits bei vergleichsweise niedrigen Schnittgeschwindigkeiten treten starker Kolk- und Freiflächenverschleiß auf.

Die Schneidteile zur Zerspannung derartiger Werkstoffe müssen genügend stabil ausgebildet sein (z.B. beim Drehen Spanwinkel $\gamma_0 = 6^\circ$, Neigungswinkel $\lambda_s = -4^\circ$), zumal für die Bearbeitung niedrige Schnittgeschwindigkeiten, aber große Spanungsquerschnitte empfohlen werden.

Als **Austenit** werden die γ -Mischkristalle des Eisens bezeichnet. Austenit besitzt eine kubisch-flächenzentrierte Struktur. Die maximale Löslichkeit für Kohlenstoff beträgt 2,06%. Das Gefüge weist eine nur geringe Härte auf, die Festigkeit kann jedoch durch

Kaltverformung gesteigert werden. Austenit ist der Hauptgefügebestandteil vieler nichtrostender Stähle und ist nicht ferromagnetisch. In unlegierten und in niedriglegierten Stählen wird unterhalb von etwa 723 °C Austenit zu Perlit und abhängig vom Kohlenstoffanteil zu Ferrit oder Zementit umgewandelt. Austenit kommt daher bei Raumtemperatur nur in Legierungen vor. Austenitbildner sind beispielsweise Nickel (Ni), Mangan (Mn) und Stickstoff.

Bainit bildet sich im Temperaturbereich zwischen der Perlit- und Martensitstufe: Die Eisendiffusion ist nicht mehr möglich, die Kohlenstoffdiffusion schon erheblich erschwert. Man unterscheidet zwischen nadeligem Bainit (bei kontinuierlicher Abkühlung und bei isothermer Umwandlung) sowie körnigem Bainit (nur bei kontinuierlicher Abkühlung). Unabhängig von der Form besteht Bainit aus an Kohlenstoff übersättigtem Ferrit, wobei der Kohlenstoff zum Teil in Form von Carbiden (z.B. Fe_3C) ausgeschieden ist, deren Größe (von grob bis extrem fein) durch die Umwandlungstemperatur bestimmt wird. Bei den nadeligen Bainitformen unterscheidet man je nach Umwandlungstemperatur zwischen unterem Bainit (große Ähnlichkeit mit dem Martensit) und oberem Bainit (große Ähnlichkeit mit dem Perlit).

Martensit entsteht bei einer raschen Abkühlung eines Stahlwerkstoffes mit einem Kohlenstoffmassenanteil von $> 0,2\%$ aus dem Austenitgebiet auf eine Temperatur unterhalb der Martensitstarttemperatur. Aufgrund der schnellen Abkühlung bleibt der im Austenit gelöste Kohlenstoff im Mischkristall zwangsgelöst. Durch einen diffusionslosen Umklappvorgang entsteht aus dem kubisch-flächenzentrierten Gitter des Austenits ein tetragonal verzerrtes, raumzentriertes Martensitgitter. Martensit ist ein feinnadeliges, sehr hartes und sprödes Gefüge, das

sich schlecht zerspanen lässt. Die eingesetzten Zerspanwerkzeuge unterliegen einem erhöhten abrasiven Verschleißangriff sowie einer hohen mechanischen und thermischen Belastung.

3.2.2 Legierungselemente und ihr Einfluss auf die Zerspanbarkeit

Legierungs- und Spurenelemente können die Zerspanbarkeit der Stähle durch eine Veränderung des Gefüges oder durch die Bildung von schmierenden sowie von abrasiven Einschlüssen beeinflussen. Im Folgenden wird der Einfluss einiger wichtiger Elemente auf die Zerspanbarkeit der Stahlwerkstoffe beschrieben.

Mangan verbessert die Härtebarkeit und steigert die Festigkeit der Stähle (ca. 100 MPa je 1% Legierungselemente). Aufgrund der hohen Affinität zu Schwefel bildet Mangan mit dem Schwefel Sulfide. Mangangehalte bis zu 1,5% begünstigen bei Stählen mit niedrigen Kohlenstoffgehalten infolge der guten Spanbildung die Zerspanbarkeit. Bei Stählen mit höheren Kohlenstoffgehalten wird die Zerspanbarkeit durch den höheren Werkzeugverschleiß jedoch negativ beeinflusst.

Schwefel besitzt nur eine geringe Löslichkeit im Eisen, bildet aber je nach den Legierungsbestandteilen des Stahls verschiedene stabile Sulfide. Eisensulfide (FeS) sind unerwünscht, da sie einen niedrigen Schmelzpunkt aufweisen und sich vorwiegend an den Korngrenzen ablagern. Dies führt zur gefürchteten „Rotbrüchigkeit“ des Stahls. Erwünscht sind dagegen Mangansulfide (MnS), die einen wesentlich höheren Schmelzpunkt als Eisensulfide haben. Die positive Wirkung von (MnS) auf die Zerspanbarkeit liegt in der geringeren Neigung zur Aufbauschneidenbildung, in besseren Werkstückoberflächen und in kurzbrüchigen Spänen begründet. Höhere Anteile

an MnS verschlechtern aber die mechanischen Eigenschaften der Stähle, insbesondere in Querrichtung.

Blei ist in der Matrix des Eisens nicht löslich, es liegt in Form submikroskopischer Einschlüsse vor. Aufgrund des niedrigen Schmelzpunktes bildet sich ein schützender Bleifilm zwischen Werkzeug und Werkstoff und verringert so den Werkzeugverschleiß. Die spezifischen Schnittkräfte können bis zu 50% sinken. Die Späne werden kurzbrüchig. Aufgrund umweltrelevanter Aspekte wird der Einsatz bleilegiertes Stähle jedoch zunehmend fragwürdiger.

Calcium kann zur Verbesserung der Zerspanbarkeit von Automaten-, Einsatz- und Vergütungsstählen sowie von rostfreien Stählen verwendet werden. Mittels einer Calciumnachbehandlung von Al-desoxidierten Stählen lassen sich die meist scharfkantigen Aluminiumoxide in globulare, vergleichsweise niedrigschmelzende Calciumaluminat umwandeln. Diese können mit einem Mantel

aus MnS bzw. aus (Mn,Ca)S umgeben sein. Die Reduzierung der abrasiv wirkenden Aluminiumoxide und Silikate führt zusammen mit der Bildung verschleißhemmender Beläge in der Kontaktzone der Werkzeuge zu einer Verschleißminderung. Dieser Effekt ist allerdings nur bei Schnittgeschwindigkeiten oberhalb von etwa 150 m/min wirksam.

Mangan, Schwefel und Blei sind die „klassischen“ Legierungselemente von Automatenstählen. Ein leicht erhöhter Gehalt an Schwefel kann auch Einsatzstählen (z.B. 16MnCrS5, 20CrMoS2), Vergütungsstählen (z.B. 38MnSiVS5, 54NiCrMoS6) und Stählen anderer Anwendungsgruppen zur Verbesserung der Zerspanbarkeit zulegiert sein.

3.2.3 Wärmebehandlung

Durch gezielt durchgeführte Wärmebehandlungen kann das Gefüge hinsichtlich der Menge, Form und Anordnung seiner Be-

standteile beeinflusst und damit neben den mechanischen Eigenschaften die Zerspanbarkeit den Anforderungen angepasst werden. Die verschiedenen Wärmebehandlungsverfahren sind in DIN EN 10052 definiert.

Im Wesentlichen können drei Gruppen der Wärmebehandlung unterscheiden werden [2]:

- Einstellen eines gleichmäßigen Gefüges im ganzen Querschnitt, das sich weitgehend im thermodynamischen Gleichgewicht (z.B. Weichglühgefüge) oder im thermodynamischen Ungleichgewicht (z.B. Perlit, Bainit, Martensit) befindet
- Einstellen eines auf kleinere Teile des Querschnitts beschränkten Härtingsgefüges bei unveränderter chemischer Zusammensetzung (insbesondere Randschichthärtung)
- Einstellen von Gefügen, die über den Querschnitt, speziell im Randbereich, stark unterschiedlich sind infolge einer Änderung der chemischen Zusammensetzung (Aufkohlung, Einsatzhärtung)

Unterschiedliche Wärmebehandlungsverfahren, mit denen, je nach chemischer Zusammensetzung des Stahls, die Zerspanbarkeit etwa in Bezug auf die Spanform und den Werkzeugverschleiß gezielt beeinflusst werden kann, finden breite praktische Anwendung. Die Temperaturbereiche der einzelnen Wärmebehandlungsarten können **Abb. 13** entnommen werden.

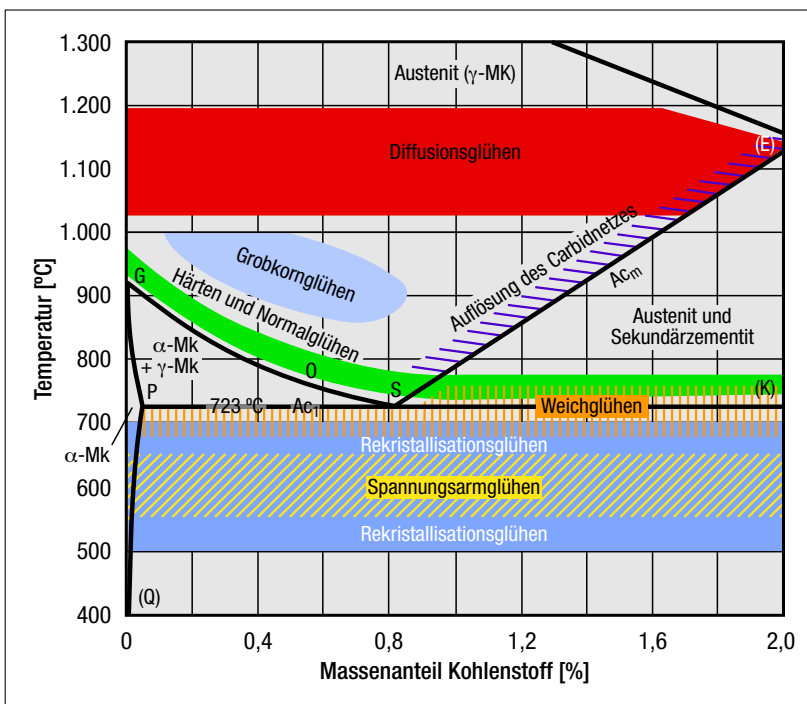


Abb. 13: Eisen-Kohlenstoff-Teildiagramm mit Angabe der Wärmebehandlungsbereiche für Stahl

Beim **Grobkornglühen** eines ferritisch-perlitischen Stahls wird die Bildung eines grobkörnigen Gefüges mit einem Ferritnetz, das die Perlitkörner umrandet, angestrebt. Der Werkzeugverschleiß beim Zerspanen eines solchen Gefüges ist relativ gering, die Spanbildung in der Regel gut und es können hohe Oberflächengüten erreicht werden.

Durch **Normalglühen** (+N) erreicht man ein annähernd gleichmäßiges und feinkörniges Gefüge, dessen Zerspanbarkeit je nach Kohlenstoffgehalt von dem überwiegenden Gefügeanteil, entweder vom Ferrit (geringer Verschleiß, schlechte Spanbildung) oder vom Perlit (höherer Verschleiß, bessere Spanbildung), bestimmt wird [59].

Das **Weichglühen** (+A) wird durchgeführt, wenn einem Gefüge die hohe Härte und die geringe Verformbarkeit zu nehmen sind. Die Zerspanbarkeit eines solchen Gefüges wird hinsichtlich der Verschleißwirkung auf das Werkzeug günstiger. Die Spanbildung verschlechtert sich in dem Maße, wie der Ferritanteil im Gefüge überwiegt. Als eine weitere Art einer solchen Glühung kann man das Glühen auf kugelige Carbide (+AC) bezeichnen.

Unter **Rekristallisationsglühen** versteht man das Glühen nach einer Kaltumformung bei einer Temperatur unterhalb von A_{c1} , die bei Stahl üblicherweise zwischen 500 und 700 °C liegt, ohne eine α - γ -Umwandlung des Kristallgitters zu verursachen. Ist bei einer Kaltumformung das Material an seiner Umformgrenze angelangt, muss durch eine Rekristallisation eine Kornneubildung vorgenommen werden. Bei der Rekristallisationsglühung findet keine Neubildung der Gefügeszusammensetzung statt, sondern es werden nur die Körner neu gebildet.

Das **Spannungsarmglühen** wendet man vornehmlich bei Werkstücken an, die infolge ungleichmäßiger Abkühlung nach

dem Gießen, Schweißen, Schmieden oder anderer thermischer Verfahren oder aber nach starker mechanischer Bearbeitung durch Fräsen, Drehen, Hobeln, Tiefziehen usw. hohe innere Spannungen aufweisen. Das Spannungsarmglühen dient dem Abbau dieser Spannungen. Dadurch wird verhindert, dass bei der Weiterverarbeitung solcher Bauteile vorhandene innere Spannungen freigesetzt werden und zu geometrischen Abweichungen aufgrund von Verzug führen. Übliche Temperaturen für das Spannungsarmglühen von Werkstücken aus Stahl liegen bei 550–650 °C. Eine Gefügeumwandlung findet dabei nicht statt.

Einer sogenannten **Wärmebehandlung auf Ferrit-Perlit-Gefüge** (+FP) werden Einsatzstähle unterzogen. In diesem Zustand kann ihnen eine ähnlich gute Zerspanbarkeit wie niedriggekohlten Automatenstählen zugeschrieben werden, sowohl den niedrigen Werkzeugverschleiß als auch die gute Spanbildung betreffend.

Die Festigkeitswerte eines Stahls können durch Härten (+Q) (Martensitgefüge) oder **Vergüten** (+QT) (im Allgemeinen angelassener Martensit) erhöht werden. Diese Gefüge lassen sich schlechter zerspanen, da sie eine höhere Festigkeit aufweisen. Die Spanbildung ist hierbei jedoch als gut zu bezeichnen. Die Schneidkeile müssen möglichst stabil ausgebildet sein.

Aus Gründen der Energieeinsparung werden heute gezielte Wärmebehandlungen direkt aus der Schmiedewärme durchgeführt, z.B. das gesteuerte Abkühlen aus der Schmiedewärme (BY-Glühen) [21]. Zerspanbarkeitsuntersuchungen [69] haben ergeben, dass die aus der Schmiedewärme gesteuert abgekühlten Vergütungsstähle (z.B. C45E+BY) einen geringeren Werkzeugverschleiß verursachen als die gleichen Werkstoffe im vergüteten oder normalisierten Zustand. Unterschiede in Bezug auf

die Spanbildung konnten hierbei nicht festgestellt werden.

Trotz des Einflusses auf die Zerspanbarkeit wird sich die Wärmebehandlung von Stählen primär an den geforderten Bauteileigenschaften orientieren.

3.3 Zerspanbarkeit unterschiedlicher Stahlwerkstoffe

Die Stahlwerkstoffe werden nach ihren Legierungselementen, ihren Gefügebestandteilen und ihren mechanischen Eigenschaften in Gruppen eingeteilt. Eine solche Klassifizierung der Stahlwerkstoffe gibt Hilfestellung bei der Wahl eines Werkstoffs mit den hinsichtlich seiner späteren Funktion erforderlichen Eigenschaften und bei der Festlegung von Bearbeitungsbedingungen.

Die Einteilung, abhängig vom Legierungsgehalt, führt zu den Gruppen der

- unlegierten Stähle,
- niedriglegierten Stähle (Legierungsgehalt < 5 %)
- hochlegierten Stähle (Legierungsgehalt > 5 %).

Bei den unlegierten Stählen ist weiterhin zu unterscheiden zwischen solchen Stahlwerkstoffen, die nicht für eine Wärmebehandlung infrage kommen (allgemeine Baustähle), und solchen, die für eine Wärmebehandlung (Qualitäts- und Edeltähle) bestimmt sind.

Neben der Einteilung der Stahlwerkstoffe nach ihren Legierungsgehalten werden die Stähle praxisgerecht nach Einsatzbereichen und Verwendung klassifiziert. Es wird unterschieden in

- Automatenstähle,
- Einsatzstähle,
- Vergütungsstähle,
- Nitrierstähle,
- Werkzeugstähle und
- nichtrostende, hitzebeständige und warmfeste Stähle.

3.3.1 Automatenstähle

Die Automatenstähle (genormt in EN 10087) sind Werkstoffe, die sich aufgrund ihrer guten Zerspanbarkeit besonders zur spanabhebenden Bearbeitung in Automaten eignen. Geringer Werkzeugverschleiß, kurzbrechende Späne und hohe Oberflächengüten kennzeichnen die Zerspaneigenschaften der Automatenstähle. Diese Eigenschaften werden durch Zulegieren von Schwefel, Blei und Phosphor, zum Teil auch Selen, Wismut oder Tellur, erreicht.

Gebäuchliche Automatenstähle sind z.B. 11SMn30, 11SMnPb30, 35S20, 46S20.

3.3.2 Einsatzstähle

Zu den Einsatzstählen (genormt in EN 10084) zählen unlegierte Baustähle, Qualitäts- und Edelstähle sowie legierte Edelstähle. Allen gemeinsam ist der relativ niedrige Massenanteil an Kohlenstoff, der die Grenze von 0,2% nicht wesentlich überschreitet.

Diese Werkstoffe werden fast ausschließlich vor der Einsatzbehandlung spanabhebend bearbeitet. Die für den Gebrauch des Einsatzstahls erwünschte Eigenschaft der relativ hohen Zähigkeit in nahezu allen Festigkeitsbereichen ist oft nachteilig für das Zerspanverhalten. Es kommt zur Bildung von Aufbauschneiden und zu schlechten Oberflächengüten, insbesondere bei Verfahren mit niedrigen Schnittgeschwindigkeiten, z.B. Gewindebohren, Bohren, Räumen und Stoßen. Der Verschleißangriff auf die Werkzeuge ist dagegen gering, da das Gefüge der Einsatzstähle vorwiegend Ferrit und nur wenig Perlit enthält. Zur Verbesserung der Zerspanbarkeit werden die Stähle je nach ihren Legierungselementen auf ein bestimmtes Ferrit-Perlit-Gefüge (+FP) oder auf bestimmte Festigkeit wärmebehandelt.

Nach der spanenden Bearbeitung folgt der Einsatzhärtevorgang: Die Randzonen der Werkstücke werden auf 0,6 bis 0,9% Kohlenstoff aufgekohlt, die Härtewerte steigen bis auf 60 HRC. Vorwiegend finden diese Werkstoffe bei der Herstellung verschleiß- und wechselbeanspruchter Teile wie Zahnräder, Getriebewellen, Gelenke, Buchsen usw. Verwendung. Infolge des durch die Einsatzhärtung auftretenden Verzugs der Bauteile muss in manchen Fällen noch eine spanende Nachbearbeitung erfolgen.

Häufige Vertreter der Einsatzstähle sind z.B. C15E, 16MnCr5, 20MoCr4, 18CrNi8.

3.3.3 Vergütungsstähle

Die Vergütungsstähle (genormt in EN 10083) weisen Kohlenstoffmassenanteile zwischen 0,2 und 0,6% auf und besitzen daher höhere Festigkeiten als die Einsatzstähle. Die Hauptlegierungselemente sind Silicium, Mangan, Chrom, Molybdän, Nickel und Vanadium.

Zur Verbesserung der Zerspanbarkeit vor dem Vergüten sollte auf niedrige Festigkeit und relativ geringe Zähigkeit wärmebehandelt werden. Bei unlegierten Vergütungsstählen bis etwa 0,5% C haben sich gleichmäßig ausgebildete Perlit-Ferrit-Gefüge bewährt. Mit Zunahme des Perlitanteils im Gefüge nimmt der Werkzeugverschleiß zu; die anwendbaren Schnittgeschwindigkeiten sind deshalb zu verringern. Bei Stählen mit höheren C-Massenanteilen ist eine zunehmende Eiformung des Zementits zweckmäßig. Nahezu weichgeglühte Vergütungsstähle mit einer Mischung aus lamellarem und körnigem Zementit sind auch bei höheren Schnittgeschwindigkeiten gut zerspanbar.

In vielen Fällen erfolgt das Vergüten zwischen der Schrump- und der Schlicht- bzw. Feinbearbeitung. Beim Zerspanen von vergüteten

Gefügen (überwiegend angelassener Martensit) wird ein stärkerer Verschleiß am Werkzeug hervorgerufen, als dies bei noch nicht vergüteten Gefügen der Fall ist.

Eine deutliche Verbesserung der Zerspanbarkeit von Vergütungsstählen beim Drehen, Fräsen und Bohren erreicht man durch Zulegieren von geringen Massenanteilen Schwefel (0,05 bis 0,1%).

Zu den häufig in der Praxis spanabhebend zu bearbeitenden Vergütungsstählen zählen u.a. C45E, 42CrMo4, 30CrMoV9 oder 36CrNiMo4. Diese Stahlsorten werden für Bauteile mittlerer und höherer Beanspruchung, insbesondere im Automobil- und Flugzeugbau (Pleuelstangen, Achsen, Achsschenkel, Läufer- und Kurbelwelle), verwendet.

3.3.4 Nitrierstähle

Der Massenanteil an Kohlenstoff der Nitrierstähle (genormt in EN 10085) liegt bei 0,2 bis 0,45%. Nitrierstähle sind vergütbar und werden mit Chrom und Molybdän (zur besseren Durchvergütbarkeit) sowie mit Aluminium oder Vanadium (Nitridbildner) legiert. Die harte, verschleißfeste Oberfläche wird vor allem durch Einlagerung von spröden Metallnitriden in die Randschicht erzielt.

Die spanende Bearbeitung dieser Werkstoffe erfolgt jedoch vor dem Nitrieren meist im vergüteten Zustand. Dieser für die nachfolgende Nitrierung günstige Gefügestand (d.h. feine, gleichmäßig verteilte Carbide, angelassener Martensit) weist ungünstige Zerspaneigenschaften auf. Insbesondere bei hohen Schnittbedingungen führen die zu erwartenden hohen Zerspankräfte zu starkem Werkzeugverschleiß und folglich zu kürzeren Standzeiten. Im unvergüteten Zustand treten Schwierigkeiten während der Bearbeitung hinsichtlich brauchbarer Spanformen und Gratbildung auf.

Nitrierstähle mit erhöhtem Nickelgehalt, z.B. 34CrAlNi7-10 mit ca. 1 % Ni, sind im Allgemeinen schlecht zerspanbar. Grundsätzlich sind aluminiumhaltige Nitrierstähle schwerer zu bearbeiten als aluminiumfreie, wie z.B. 31CrMo12, der eine geringere Klebneigung aufweist. Günstig auf die Zerspanbarkeit wirkt sich das Zulegieren von Schwefel (34CrAlS5) aus.

Die Nitrierstähle haben ein ähnliches Anwendungsgebiet wie die Einsatzstähle (Zahnräder, Führungsleisten).

3.3.5 Werkzeugstähle

Werkzeugstähle sind nach DIN EN ISO 4957 Edelmetalle, die zum Be- und Verarbeiten von Werkstoffen sowie Handhaben und Messen von Werkstücken geeignet sind. Generell wird zwischen unlegierten und legierten Werkzeugstählen unterschieden. Hinsichtlich ihrer Zerspaneigenschaften ist eine Einteilung in

- Kaltarbeitsstähle,
- Warmarbeitsstähle und
- Schnellarbeitsstähle (HSS) hilfreich.

Unlegierte Werkzeugstähle mit einem C-Massenanteil zwischen 0,5 und 1,5 % werden im weichgeglühten Zustand spanend bearbeitet. Bei untereutektoiden Stählen ($C < 0,8\%$) besteht außerdem die Möglichkeit, sie im normalgeglühten Zustand oder im Lieferzustand nach der Warmumformung zu zerspanen. Nachteilig wirkt sich dann jedoch die erhöhte Klebneigung und die damit größere Neigung zur Aufbauschneidenbildung aus, so dass eine relativ schlechte Zerspanbarkeit vorliegt.

Um Oberflächenhärte, Einhärtetiefe, Anlassbeständigkeit, Zähigkeit und Verschleißwiderstand zu erhöhen, werden bei den legierten Werkzeugstählen u.a. Wolfram, Molybdän, Vanadium und Cobalt zulegiert.

Wie die unlegierten Werkzeugstähle neigen auch die legierten, insbesondere die hochlegierten Schnellarbeitsstähle, beim Zerspanen im geglähten Zustand stark zu Verklebungen sowie Aufbauschneidenbildung und müssen deshalb als schlecht zerspanbar eingestuft werden. Die Folge dieser Klebneigung sind raue Oberflächen. Weiterhin können beim Werkzeugaustritt Ausbrüche auftreten. Abhilfe lässt sich in Grenzen durch Vergüten auf höhere Festigkeiten schaffen. Die anwendbaren Schnittgeschwindigkeiten bei der spanenden Bearbeitung der Werkzeugstähle sind in der Regel relativ niedrig.

3.3.6 Nichtrostende Stähle

Nichtrostende Stähle enthalten mindestens 10,5 % Chrom und höchstens 1,2 % Kohlenstoff. Ihre Hauptlegierungselemente sind Chrom und Nickel. Bei Anteilen von über 12 % bewirkt Chrom die Korrosionsbeständigkeit des Stahlwerkstoffes. Nickel erweitert das γ -Gebiet und führt in hochchromhaltigen Stählen zur Stabilisierung des austenitischen Gefüges, das bei niedriglegierten Kohlenstoffstählen in der Regel nicht stabil ist und unterhalb der A_{c1} -Temperatur in Ferrit und Zementit zerfällt. Die Wärmeleitfähigkeit des Stahlwerkstoffes wird durch Nickel stark vermindert. „Chromstahl“ ist die übliche Bezeichnung für ferritische und „CrNi-Stahl“ für austenitische Stahlsorten. Entsprechend ihren wesentlichsten Gebrauchseigenschaften werden nach DIN EN 10088 die nichtrostenden Stähle eingeteilt in:

- korrosionsbeständige Stähle,
- hitzebeständige Stähle und
- warmfeste Stähle.

Korrosionsbeständige Stähle zeichnen sich durch eine gute Beständigkeit gegenüber chemisch aggressiven Stoffen aus. Im Allgemeinen weisen sie einen Massenanteil an Chrom von wenigstens

12 % auf. Hinsichtlich ihrer Gefügebestandteile werden die korrosionsbeständigen Stähle in ferritische, austenitische, martensitische und ferritisch-austenitische Stähle gegliedert. Bei den ferritischen Stählen handelt es sich vorwiegend um reine Chromstähle mit Cr-Massenanteilen von 12,5 bis 18 % und C-Massenanteilen unter 0,1 % (z.B. X6Cr13, Werkstoff-Nr.: 1.4000; X6Cr17, Werkstoff-Nr.: 1.4016). Sie sind magnetisch und nicht härtbar. Martensitische Stähle sind vorwiegend Chromstähle mit Chromgehalten von 12 bis 18 % bei einem C-Gehalt von 0,1 bis 1,2 % (z.B. X12Cr13, Werkstoff-Nr.: 1.4006; X39Cr13, Werkstoff-Nr.: 1.4031). Die mit Abstand am meisten verwendeten korrosionsbeständigen Stähle sind die austenitischen Stahlwerkstoffe. Sie enthalten ca. 17 bis 26 % Cr, 7 bis 26 % Ni, weniger als 0,12 % C und zum Teil geringe Anteile von Si, Mo, V, Nb, Ti, Al oder Co (z.B. X5CrNi18-10, Werkstoff-Nr.: 1.4301). Eine weitere Gruppe der korrosionsbeständigen Stähle sind die ferritisch-austenitischen Stahlwerkstoffe, die auch als Duplex- (z.B.: X2CrNiMoN22-5-3, Werkstoff-Nr.: 1.4462) oder Superduplexstähle (z.B. X2CrNiMoCuWN25-7-4, Werkstoff-Nr.: 1.4501) bezeichnet werden. Ihren Namen verdanken diese Stähle ihrem zweiphasigen Gefüge, das aus Ferrit und Austenit besteht.

Hitzebeständige Stähle sind hauptsächlich ferritische und austenitische Stähle mit guter Beständigkeit gegen Oxidation sowie gegen den Einfluss von heißen Gasen und Verbrennungsprodukten oberhalb von 550 °C. In oxidierender Atmosphäre wird eine schützende Schicht aus Chrom-, Silicium- und Aluminiumoxiden auf der Stahloberfläche gebildet (DIN EN 10088). Die hitzebeständigen ferritischen Stähle enthalten mindestens 12 % Cr sowie Al und Si (z.B. X10CrAlSi13, Werkstoff-Nr.: 1.4724; X10CrAlSi25, Werkstoff-Nr.: 1.4762). Die hitzebe-

ständigen austenitischen Stähle sind zusätzlich mit mindestens 9% Ni legiert (z.B. X15CrNiSi25-21, Werkstoff-Nr.: 1.4841).

Bei den warmfesten Stählen handelt es sich hauptsächlich um martensitische und austenitische Stahlsorten mit einer hohen Zeitstandfestigkeit bei mechanischer Langzeitbeanspruchung oberhalb von 500 °C. Aus warmfesten martensitischen Stählen (z.B. X20CrMoV11-1, Werkstoff-Nr.: 1.4922; X20CrMoWV12-1, Werkstoff-Nr.: 1.4935) werden z.B. Bauteile für Wärmekraftanlagen, Dampfkessel und Turbinen, für die chemische Industrie und für die Reaktortechnik hergestellt.

Die nichtrostenden Stähle mit ferritischem Gefüge sind verhältnismäßig gut zerspanbar. Der Verschleißangriff durch Abrasion und Adhäsion ist vergleichsweise gering. Die Zerspanbarkeit der martensitischen Stähle richtet sich nach der Härte als Folge der jeweils durchgeführten Wärmebehandlung. Je nach Wärmebehandlung besteht das Gefüge aus Martensit (gehärtet) oder angelassenem Martensit mit Chromcarbiden und Ferrit (vergütet). Die Duplexstähle gelten als außerordentlich schlecht zerspanbar. Kennzeichnend hierfür sind eine ausgeprägte Neigung zur Adhäsion, eine starke Kaltverfestigung der Werkstückrandzone und eine ungünstige Spanbildung.

Austenitische Stahlwerkstoffe werden im abgeschreckten oder im lösungsgeglühten Zustand zerspannt. Gegenüber ferritisch-perlitischen oder vergüteten Stählen sind sie deutlich schlechter zerspanbar. Ursache hierfür sind ihre hohe Verformungsfähigkeit und Zähigkeit, ihre Neigung zur Kaltverfestigung und zur Adhäsion mit dem Schneidstoff sowie ihre gegenüber unlegierten Stählen um ca. ein Drittel niedrigere Wärmeleitfähigkeit. Diese verschlechtert die Wärmeabfuhr über den Span und erhöht die Temperaturbelastung der Schneide. Folgen dieser

spezifischen Werkstoffeigenschaften sind trotz der vergleichsweise geringen Zugfestigkeit der austenitischen CrNi-Stähle eine hohe thermische Belastung der Werkzeugschneide, ausgeprägter Frein- und/oder Spanflächenverschleiß, Materialverklebungen, Kerbenverschleiß, Schneidstoffausbröckelungen, Schneidkantenausbrüche und ungünstige Spanformen. Bei vielen Bearbeitungsaufgaben ist eine spanende Bearbeitung nur bei vergleichsweise niedrigen Schnittgeschwindigkeiten möglich [25]. Spezielle nichtrostende Automatenstähle (z.B. X8CrNiS18-9) mit Schwefelgehalten von 0,15 bis 0,35% nutzen die positive spanbrechende Wirkung von gleichmäßig und in größerer Menge verteilten Mangansulfiden.

3.3.7 Gehärtete Stähle

Hochbeanspruchte Stahlbauteile werden zur Verbesserung ihrer Festigkeits- und Verschleiß-eigenschaften gehärtet. Während früher die Bearbeitung solcher Bauteile mit Härten oberhalb von 50 HRC nur durch Schleifen möglich war, können heute aufgrund besserer Prozesskenntnisse und der konsequenten Ausnutzung der Schneidstoffe die Fertigungsverfahren Drehen, Fräsen, Räumen, Drehräumen, Bohren sowie der Feinbearbeitung von Verzahnungen (Schälwälzfräsen, Schälwälzstoßen, Hartschneiden) eingesetzt werden. Ein erst in jüngerer Zeit erschlossenes Anwendungsgebiet für die Hartzerspanung ist der Werkzeug- und Formenbau.

Durch die Fertigbearbeitung im gehärteten Zustand lassen sich Maß- und Formabweichungen infolge des Härtens korrigieren und gleichzeitig gute Oberflächenqualitäten erzielen. Die Hartzerspanung beansprucht die Schneidstoffe und Werkzeuge nahe ihrer Leistungsgrenze. Die Bereiche optimaler Schnittbedingungen sind sehr schmal. Deshalb sind die

Schnittparameter und die Werkzeuggeometrien sehr sorgfältig an die jeweilige Bearbeitungsaufgabe anzupassen. Startwerte beim Schruppdrehen gehärteter Stähle liegen z.B. im Bereich $v_c = 90\text{--}200$ m/min, $f = 0,1\text{--}0,35$ mm und $a_{p,max} = 0,5$ mm, beim Schlichten im Bereich $v_c = 90\text{--}150$ m/min, $f = 0,05\text{--}0,1$ mm und $a_p = 0,05\text{--}0,2$ mm.

Beim Hartdrehen werden die Schneidstoffe PCBN und Mischkeramik zur Bearbeitung von durch- und randschichtgehärteten Werkstoffen (Wälzlagerstähle, Werkzeugstähle, Einsatzstähle, Nitrierstähle) mit Härten von 55 bis 68 HRC eingesetzt. Die Fräsbearbeitung erfolgt mit Werkzeugen aus Feinstkornhartmetall oder aus PCBN. Beim Hartbohren mit Wendeschneidplatten-Werkzeugen werden vorwiegend PCBN-Schneidstoffe bei durchgehärteten Kalt- und Warmarbeitsstählen bis 62 HRC eingesetzt. Das Durchbohren der harten Randzonen von Nitrier- und Einsatzstählen kann auch mit Keramiken und Feinstkornhartmetallen erfolgen. Unbeschichtete und beschichtete Feinstkornhartmetalle werden auch zur Nachbearbeitung komplexer Bauteilgeometrien beim Räumen angewendet.

4 Zerspanverfahren

4.1 Drehen

4.1.1 Allgemeines

Drehen ist ein spanabhebendes Verfahren zur Erzeugung rotationssymmetrischer Bauteile. In der Praxis wird je nach Zielsetzung zwischen Schrupp- und Schlichtdrehen unterschieden. Während die Schruppbearbeitung eine möglichst hohe Zerspanrate zum Ziel hat, werden beim Schlichten eine hohe Maß- und Formgenauigkeit sowie eine hohe Oberflächengüte angestrebt. Über dem Bereich des Schruppdrehens liegt die Schwerzerspannung, bei der mit Spanungsquerschnitten $a_p \cdot f$ von bis zu $80 \cdot 3$ mm gearbeitet wird [42].

4.1.2 Verfahrensvarianten

4.1.2.1 Runddrehen

Das Verfahrensprinzip und die Eingriffsverhältnisse des Längs-Runddrehens zeigt **Abb. 14**. Hierbei wird zwischen der Bearbeitung von außenliegenden und innenliegenden Werkstückflächen unterschieden. Bei Innendrehoperationen an tiefen Bohrungen können aufgrund von großen Auskräglängen oder kleinen Schaftdurchmessern Stabilitätsprobleme auftreten. Durch die Wahl günstiger Schnittwerte und den Einsatz geeigneter Werkzeuge (z. B. schwingungs-

gedämpfte Bohrstangen) können diese Probleme vermieden werden. Zum Einsatz kommen fast ausschließlich Werkzeuge mit Wendeschneidplatten, die mit Klemmvorrichtungen auf dem Werkzeugträger befestigt sind. Ca. 80% der beim Drehen eingesetzten Wendeschneidplatten sind heute beschichtet.

Bezeichnungssysteme für Wendeschneidplatten und Werkzeughalter sind in den Normen DIN ISO 1832 und DIN 4983 festgelegt.

4.1.2.2 Plandrehen

Das Plandrehen wird zur Bearbeitung einer Stirnfläche oder eines Wellenabsatzes angewendet. Die Vorschubbewegung ist meist von außen nach innen gerichtet.

Ein Abtrennen von Werkstücken und Werkstückteilen ermöglicht das Abstechdrehen. Besonders häufig eingesetzt wird dieses Verfahren auf Drehautomaten bei der Fertigung kleiner Bauteile „von der Stange“. Um den Materialverlust möglichst gering zu halten, müssen die Abstechwerkzeuge schmal ausgeführt werden. Zur Minimierung des beim Abstechdrehen entstehenden Restbutzens wird ein Einstellwinkel von $\kappa_r < 90^\circ$ gewählt. Übliche Werte liegen im Bereich von $82^\circ < \kappa_r < 88^\circ$.

Zu beachten ist bei den genannten Plandrehverfahren allerdings, dass die Schnittgeschwindigkeit

bei der Bearbeitung mit konstanter Drehzahl zur Werkstückmitte hin abnimmt. Die Einhaltung eines bestimmten Schnittgeschwindigkeitsbereiches kann entweder durch eine stufenweise Anpassung der Drehzahl an den Werkstückdurchmesser oder durch eine stufenlose Drehzahlregelung erfolgen.

4.2 Fräsen

4.2.1 Allgemeines

Fräsen ist das hinsichtlich der erzeugbaren Konturen vielseitigste spanende Fertigungsverfahren. Am häufigsten werden die Fräsverfahren zur Erzeugung ebener Flächen (bei geradliniger Vorschubbewegung: Planfräsen) angewendet. **Abb. 15** zeigt die wichtigsten, nach Kinematik und Eingriffsverhältnissen unterschiedlichen Planfräsverfahren und bezeichnet die zugehörigen Fräswerkzeuge. In der Praxis benennt man die Fräsverfahren meist nach Art und Form der eingesetzten Fräswerkzeuge, wie z. B. Walzenfräsen, Schaftfräsen, Scheibenfräsen, Stirnfräsen. Ein kinematisches Unterscheidungsmerkmal ergibt sich aus den Richtungen der Schnittgeschwindigkeit v_c und der Vorschubgeschwindigkeit v_f (**Abb. 16**). Sind diese Geschwindigkeiten gleichsinnig orientiert, spricht man vom Gleichlauffräsen. Sind sie gegensinnig orientiert, liegt Gegenlauffräsen vor. Beim Gleichlauf-Umfangsfräsen wirkt die Schnittkraft auf das Werkstück, vgl. **Abb. 16**, während sie beim Gegenlauf-Umfangsfräsen vom Werkstück weggerichtet ist, so dass hierbei ein labiles Werkstück (z. B. dünne Blechplatte) von der Aufspannfläche abgehoben oder zum Rattern angeregt werden kann. Der Fräsprozess kann aus Gleich- und Gegenlaufanteilen zusammengesetzt sein, was üblicherweise der Fall ist.

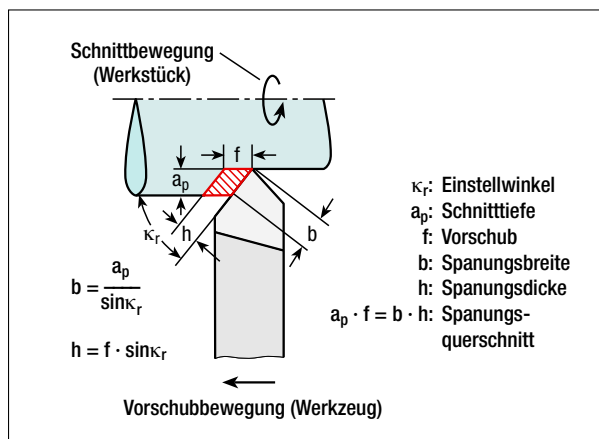


Abb. 14: Eingriffsverhältnisse beim Längs-Runddrehen (nach DIN 6580)

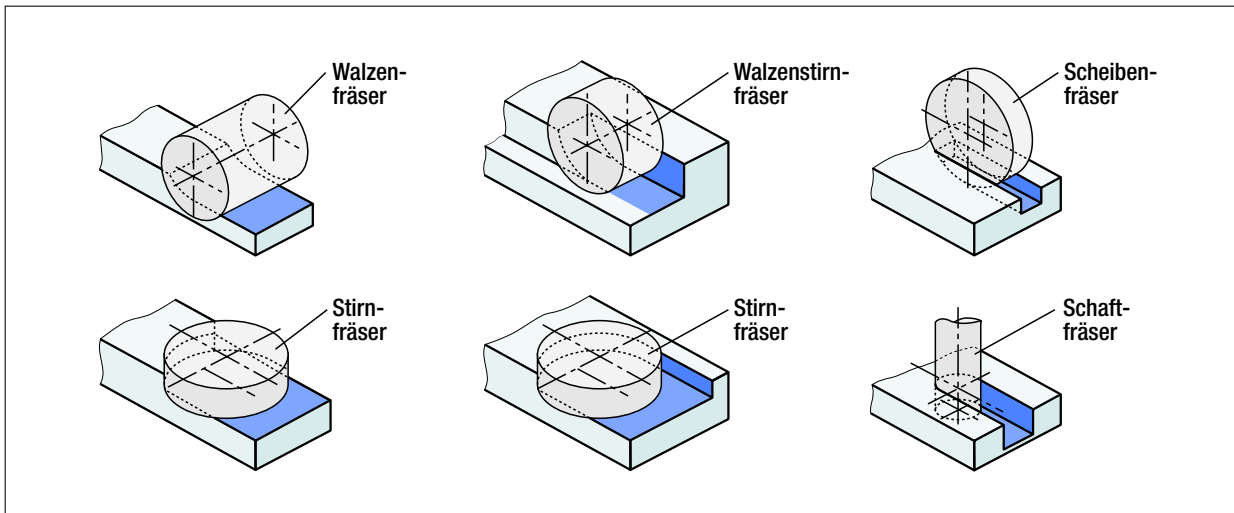


Abb. 15: Eingriffsgrößen und Verfahren beim Planfräsen (nach [42])

Charakteristisch für alle Fräsprozesse ist, dass je Werkzeugumdrehung der Eingriff jeder Schneide mindestens einmal unterbrochen wird. Aus diesem unterbrochenen Schnitt resultiert eine mechanische und thermische Wechselbeanspruchung des Werkzeugs, die wesentlich das Standvermögen des Fräasers bestimmt und hohe Anforderungen an die Steifigkeit des Gesamtsystems Maschine - Werkzeug - Werkstück stellt. Insbesondere den Kontaktbedingungen, d.h. der Art der ersten und letzten Berührung zwischen

dem Werkzeug und dem Werkstück, kommt in diesem Zusammenhang besondere Bedeutung zu. Als günstig werden jene Kontaktarten angesehen, bei denen die empfindliche Schneidenspitze nicht zuerst auf das Werkstück trifft und bei denen ein sanfter Austritt der Schneide sichergestellt wird ([14], [47], [53]).

Die Spanungsdicke h verändert sich beim Fräsen längs des Schnittbogens mit dem Eingriffswinkel φ und erreicht ihren maximalen Wert bei $\varphi = 90^\circ$ (Abb. 17). Hieraus resultieren schwelende

Belastungszyklen, die in Verbindung mit den Schnittunterbrechungen besonders hohe Anforderungen an die Zähigkeit, die Temperaturwechselbeständigkeit und die Kantenfestigkeit der einzusetzenden Schneidstoffe stellen. Für die Stahlbearbeitung werden im Allgemeinen Schnellarbeitsstähle und zähe Hartmetalle der Anwendungsgruppe P 15 bis P 40 eingesetzt. Schneidkeramik wird beim Feinstfräsen von Einsatz- und Vergütungsstahl sowie gehärtetem Stahl mit Erfolg angewendet. Der Einsatz beschichteter Hartmetalle in der Stahlbearbeitung ist heute Stand der Technik. Die notwendige hohe Stabilität der Schneidkörper kann mit großen Radien oder Fasen an der Schneidenecke und gefassten Schneidkanten erreicht werden.

Im Folgenden werden die in der Praxis häufig angewandten Verfahrensvarianten näher erläutert. Diese sind das:

- Stirnfräsen (Stirn-Planfräsen),
- Umfangsfräsen (Umfangs-Planfräsen),
- Schaftfräsen (hier Stirn-Umfangs-Planfräsen) und das
- Profilfräsen.

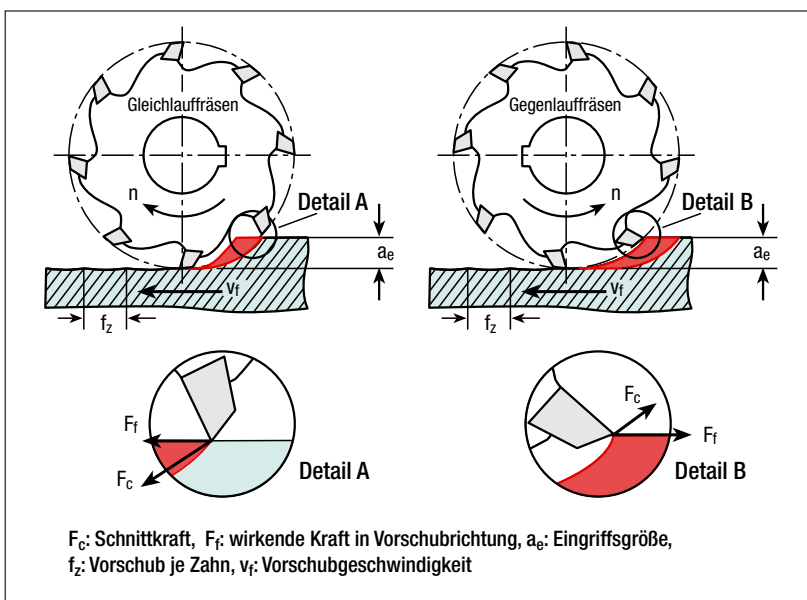


Abb. 16: Umfangsfräsen im Gleich- und Gegenlauf

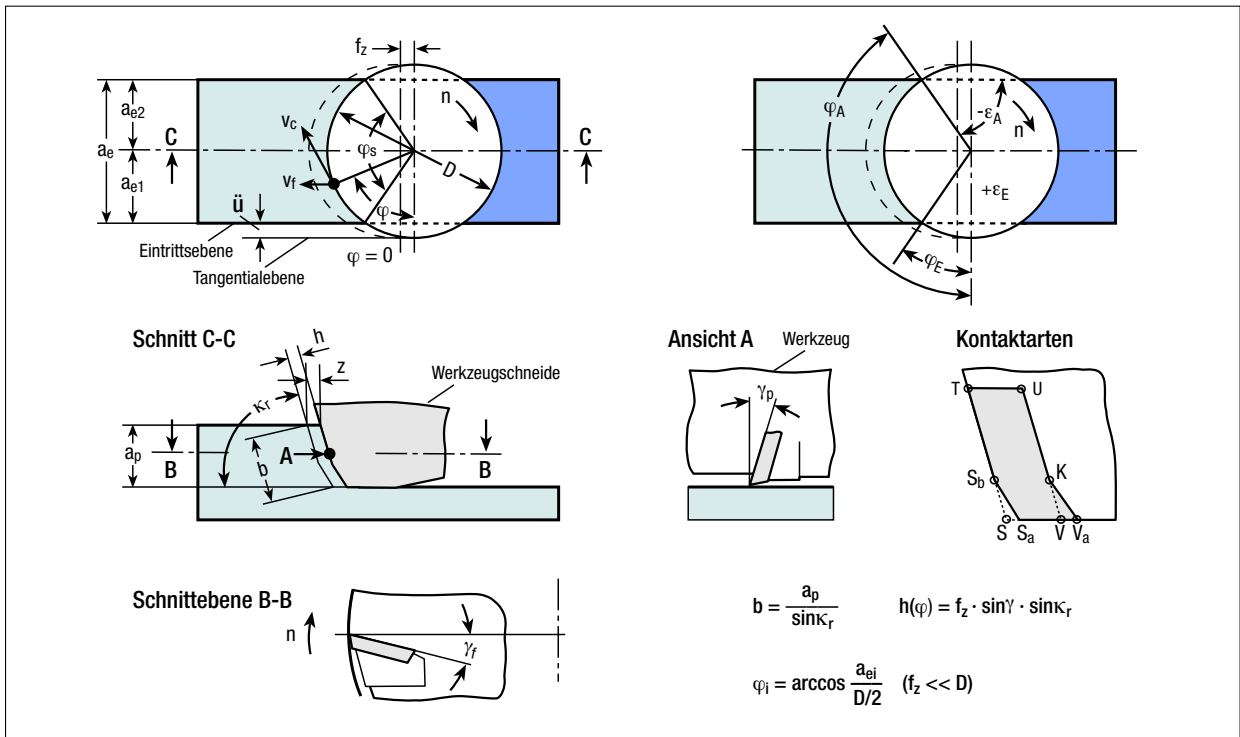


Abb. 17: Eingriffsverhältnisse beim Stirnfräsen (nach [42])

Zur vollständigen Beschreibung der Zerspanbedingungen beim Fräsen sind neben den bereits bekannten Größen die Parameter Eingriffsgröße a_e , Überstand \ddot{u} , Ein- bzw. Austrittswinkel φ_E bzw. φ_A , Fräserdurchmesser D sowie die Zähnezahl z notwendig (Abb. 17). Der Spanwinkel setzt sich aus einem radialen (γ_r) und einem axialen Anteil (γ_p) zusammen, womit insbesondere der Spanabfluss und die Schneidenstabilität beeinflusst werden können [47].

4.2.2 Verfahrensvarianten

4.2.2.1 Stirnfräsen

Beim Stirnfräsen ist die Eingriffsgröße a_e wesentlich größer als die Schnitttiefe a_p . Die weit überwiegende Zerspanarbeit wird durch die Umfangsschneiden geleistet, wohingegen die Stirn- oder auch Nebenschneiden im Wesentlichen die Werkstückoberfläche erzeugen. Damit hängt die Qualität der Oberflächen unmittelbar

von der Lagegenauigkeit der einzelnen Schneidkörper untereinander ab, was insbesondere für Messerkopffräser mit Wendeschneidplatten von größter Bedeutung ist. Eine sorgfältige Voreinstellung derartiger Werkzeuge ist auch im Hinblick auf das Standvermögen wichtig, da einzelne vorstehende Schneiden schneller verschleifen und damit das Standzeitende bestimmen. Bei extremen Anforderungen an die Werkstückoberfläche wird das Breitschichtfräsen eingesetzt, wobei nur ein Zahn mit überlanger, balliger Stirnschneide die Oberfläche erzeugt. Um günstige Eingriffsverhältnisse beim Messerkopfstirnfräsen zu erhalten, sollte die Eingriffsgröße a_e etwa 50 bis 75% des Fräserdurchmessers betragen. Hierdurch wird auch der gleichzeitige Eingriff mehrerer Schneiden erreicht, was zu einer deutlichen Prozessberuhigung führt. Zur Vermeidung von Ratterschwingungen sollten die Fräser ungleichmäßig geteilt sein.

Bei der Stahlzerspanung wird im Allgemeinen mit positiver

Schneidteilgeometrie gearbeitet, hingegen bei erhöhten Anforderungen an die Schneidenstabilität besser mit negativer Geometrie. Als besonders ungünstig gilt es, wenn die stoßempfindliche Schneidenecke als erster Punkt der Schneide auf das Werkstück trifft. Dieser sogenannte S-Kontakt kann durch eine entsprechende Variation der Schneidengeometrie und der Zustellgrößen vermieden werden. Die günstigste Kontaktart ist der U-Kontakt, bei dem der von Neben- und Hauptschneide am weitesten entfernte Schneidenpunkt als Erster mit dem Werkstück in Kontakt kommt. Alle anderen Punkt- sowie Linienkontakte werden hinsichtlich der Stoßempfindlichkeit als Zwischenstufe zwischen S-Kontakt und dem U-Kontakt angesehen.

4.2.2.2 Umfangsfräsen

Beim Umfangsfräsen ist die Schnitttiefe a_p wesentlich größer als die Eingriffsgröße a_e . Die Werkstückoberfläche wird durch die Hauptschneiden erzeugt. Im Ge-

gensatz zum Stirnfräsen tritt beim Umfangsfräsen entweder reines Gegenlauf- oder Gleichlauffräsen auf (Abb. 16). Beim Gegenlauffräsen tritt das Werkzeug mit Nullspannungsdicke ($h = 0$) ein, wobei infolge der Unterschreitung der Mindestspannungsdicke überwiegend Quetsch- und Reibvorgänge ablaufen. Die Folge ist eine schlechte Oberflächengüte. Der sich im weiteren Zerspanverlauf aufbauende Spannungsquerschnitt führt zu steigenden Schnittkräften, die vom Maschinentisch weggerichtet sind und labile Werkstücke (z. B. dünne Bleche) von der Aufspanfläche abheben oder zum Rattern anregen können. Beim Gleichlauf-Umfräsen erfolgt der Anschnitt annähernd mit dem vollen Spannungsquerschnitt.

4.2.2.3 Schaftfräsen

Das Schaftfräsen zeichnet sich insbesondere durch den Schlankheitsgrad der Werkzeuge aus (Abb. 15). Es wird besonders vorteilhaft zur Erzeugung von Formflächen, wie z. B. im Gesenkbau, sowie bei der Herstellung von Nuten, Taschen, Schlitzten und Aussparungen eingesetzt [39].

Schaftfräser sind zum Spannen mit einem Zylinder- oder Kegelschaft versehen. Man unterscheidet rechtsschneidende und linkschneidende sowie rechtsgedrallte,

linksgedrallte und geradverzahnte Werkzeuge. Bei der Konstruktion eines Schaftfräasers müssen zum Teil sich widersprechende Forderungen erfüllt werden, z. B. ein möglichst großer tragender Querschnitt bei gleichfalls großen Spanräumen.

Die große Auskraglänge des Werkzeugs führt zu Instabilitäten, insbesondere zum Verbiegen des Werkzeugs, was mit entsprechenden Formfehlern des Werkstücks verbunden sein kann.

Schaftfräser werden in erster Linie aus Schnellarbeitsstahl und Vollhartmetall gefertigt. Ab einem Fräserdurchmesser von $d = 12$ mm sind je nach Bearbeitungsaufgabe auch Werkzeuge mit geklemmten HM-Wendeschneidplatten vorteilhaft einsetzbar.

4.2.2.4 Profilfräsen

Bei diesem Verfahren wird ein profiliertes Fräserwerkzeug eingesetzt, dessen Kontur beim Bearbeitungsprozess auf dem Werkstück abgebildet wird. Das Profilfräsen eignet sich insbesondere zur Erzeugung von Schwalbenschwanz-Nuten, T-Nuten, Radien, Zahnstangen sowie Führungsprismen. In den meisten Fällen erfolgt die Bearbeitung als Stirnumfangsfräsen. Die Werkzeuge sind einteilig (Formfräser) oder auch mehrteilig (Satzfräser) ausgeführt. Zu-

meist finden Schnellarbeitsstahlwerkzeuge oder Werkzeuge mit aufgelöteten Hartmetallschneiden Anwendung. Einfache Geometrien, z. B. rechteckige Nuten, werden auch mit Werkzeugen mit geklemmten HM-Wendeschneidplatten hergestellt.

4.3 Bohren

4.3.1 Allgemeines

Unter dem Begriff Bohren werden spanende Bearbeitungsverfahren zur Herstellung von Durchgangs- oder Sacklöchern verstanden. Diese Verfahren unterscheiden sich insbesondere in der Art der verwendeten Werkzeuge sowie in den zu bearbeitenden Bohrtiefen. Besondere Merkmale des Bohrens sind

- die bis auf null abfallende Schnittgeschwindigkeit in der Bohrermitte,
- der mit zunehmender Bohrtiefe schwierigere Abtransport der Späne,
- die ungünstige Wärmeverteilung in der Schnittstelle,
- der erhöhte Verschleißangriff auf die scharfkantige Schneid-ecke sowie
- Stabilitäts- und Schwingungsprobleme des Werkzeugs mit zunehmender Bohrtiefe.

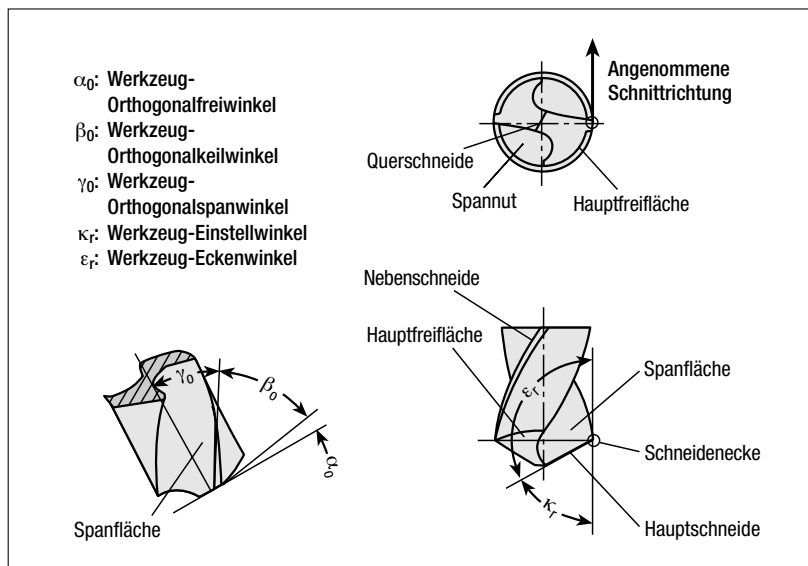
4.3.2 Verfahrensvarianten

In den folgenden Kapiteln wird beispielhaft das Bohren ins Volle mit den gebräuchlichsten Werkzeugen beschrieben.

4.3.2.1 Bohren mit Spiralbohrern

Der Spiralbohrer ist das am häufigsten eingesetzte Werkzeug zur spanenden Lochbearbeitung. Die Benennung und Definition der geometrischen Formelemente

Abb. 18: Schneidteilgeometrie am Spiralbohrer (nach DIN 6581)



an handelsüblichen Spiralbohrern ist in DIN ISO 5419 genormt. Die Schneidteilgeometrie dieses Werkzeugs zeigt **Abb. 18**.

Kennzeichnend für den Spiralbohrer sind die wendelförmig verlaufenden Spannuten. Die Größe und Form des Nutenquerschnittes - und damit des Bohrerprofils - sowie die Steigung der Nuten bestimmen in hohem Maße sowohl die Spanentsorgung aus der Bohrung als auch die Stabilität des Bohrers. Zum Bohren von Stahlwerkstoffen werden Spiralbohrer mit Seitenspanwinkel (Drallwinkel) $\gamma_f = 18$ bis 30° eingesetzt.

Zu den Schneiden des Bohrers zählen die Hauptschneiden, die Querschneide und die Nebenschneiden (Abb. 18). Die Hauptschneiden schließen den Spitzenwinkel ($2\kappa_R$) ein, der bei der Stahlzerspannung im Allgemeinen 118° beträgt. Der Spanwinkel γ_0 entlang der Hauptschneide nimmt abhängig von der Form und Steigung der Drallnuten von dem Maximalwert an der Schneidenecke zur Bohrermitte hin ab. Im Bereich der Querschneide ist der Spanwinkel stark negativ $\gamma_0 = -55^\circ$. Da zudem die Schnittgeschwindigkeiten im Zentrum gegen null gehen, schneidet die Querschneide kaum noch. Es kommt vielmehr zum Quetschen und Reiben, wodurch hohe Vorschubkräfte entstehen [70].

Durch speziellen Anschlag der Bohrer Spitze können diese negativen Einflüsse vermindert und kann der Bohrer der jeweiligen Bearbeitungsaufgabe angepasst werden. Insbesondere die in DIN 1412 standardisierten Anschlagformen A bis E finden breite Anwendung (**Abb. 19**). Wesentlich ist dabei eine Verkürzung der Querschneide durch das sogenannte Ausspitzen. Beim Kreuzschliff (Form C) wird eine extreme Ausspitzung realisiert, da die Querschneide auf einen Punkt reduziert ist. Neben geringeren Vorschubkräften führt dies zu einer verbesserten Zentrierfähigkeit. Die Korrektur der Hauptschneiden (Form B) führt zu einer

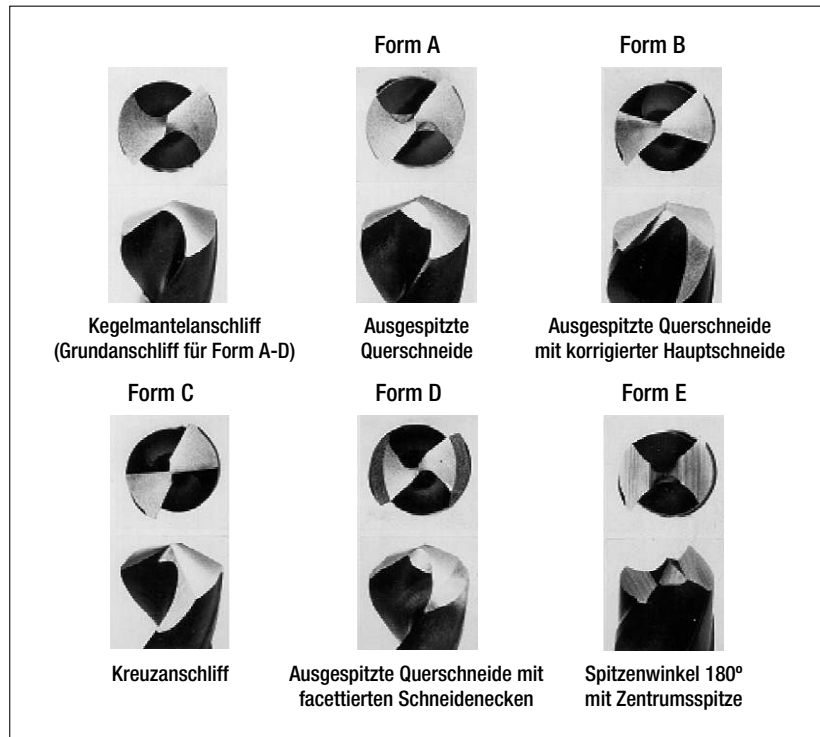


Abb. 19: Spiralbohrer-Spitzenanschliffe (nach DIN 1412)

Stabilisierung der Schneiden, jedoch auch zu höheren Zerspankräften. Fasen am Umfang des Bohrers (Form D) schützen die Schneidenecken vor frühzeitigem Verschleiß vor allem beim Bohren von harten Stahlwerkstoffen oder von Bauteilen mit harter Randzone. Die Anschlagform E mit Zentrumschneide wird beim Bohren von Blechen eingesetzt, wenn zentrisches Anbohren und geringe Gratbildung beim Ausbohren sichergestellt werden müssen.

Beim Anschleifen ist auf die Symmetrie der Schneiden größter Wert zu legen. Jede Ungleichmäßigkeit spiegelt sich direkt im Verschleißverlauf und in der schlechteren Bohrungsqualität wider. Bei sorgfältigem Anschlag können je nach Schnittbedingung und Werkstückstoff Bohrungstoleranzen bis IT 12 und Oberflächenqualitäten von $R_t = 20 \mu\text{m}$ erreicht werden. Die spezifischen Beanspruchungen des Spiralbohrers, verbunden mit dem hohen Schlankheitsgrad, insbesondere bei großen Bohrtiefen, erfordern eine extrem hohe Zähigkeit des Werk-

zeugs. Deshalb ist bei der Stahlzerspannung Schnellarbeitsstahl in den Qualitäten HS 6-5-2 und HS 6-5-2-5 der zumeist eingesetzte Schneidstoff. Überwiegend werden heute Vollhartmetallbohrer verwendet. Außerdem finden hartstoffbeschichtete Schnellarbeitsstahlbohrer verbreitete Anwendung, da sie durch die verschleißfeste und reibungsgünstigere Beschichtung aus beispielsweise Titanitrid (TiN) oder Titanaluminiumnitrid (TiAlN) bei bestimmten Stahlwerkstoffen erhebliche Standzeit- oder Schnittwertsteigerungen erzielen können.

4.3.2.2 Bohren mit Wendeschneidplattenbohrern

Die im Vergleich zu Hartmetall geringe Warmverschleißfestigkeit des Schnellarbeitsstahls und der zunehmende Einsatz standardisierter HM-Wendeschneidplatten führte zur Konzeption des Wendeschneidplattenbohrers. Derartige Werkzeuge können im Durchmesserbereich von $d = 12$ bis über 120 mm eingesetzt werden, wo-

bei die Bohrungstiefe nicht größer als dreimal der Durchmesser sein sollte. Dabei kann mit bis zu 15-fach höherer Schnittgeschwindigkeit gegenüber HSS-Werkzeugen gearbeitet werden, wobei der Vorschub allerdings reduziert werden muss. Werkzeuge mit größeren Durchmessern sind mit mehr als einer bzw. zwei Wendeschneidplatten bestückt. Die Schneidplatten sind so im Grundkörper angeordnet, dass die Zentrumschneide minimal über die Mitte des Bohrerquerschnittes ragt, eine Schnittüberdeckung gewährleistet ist und die Zerspankraftanteile sich in Betrag und Richtung möglichst ausgleichen.

Die außenliegenden Schneidplatten sollten aufgrund der hohen Schnittgeschwindigkeiten warmfest sein. Die Schneidplatte im Bohrerzentrum muss infolge der durch die niedrigen Schnittgeschwindigkeiten hervorgerufenen Quetschvorgänge eine hohe Zähigkeit aufweisen.

Die derzeit erreichbaren Kennwerte sowohl für die Rundheitsabweichung als auch für die Oberflächenqualität liegen bei etwa $20\ \mu\text{m}$ und werden in erster Linie durch die Stabilität des gesamten Werkzeug - Werkstück - Maschine-Systems bestimmt.

4.3.2.3 Tiefbohren

Bohrungen bis zu einer Tiefe vom Drei- bis Fünffachen des Durchmessers lassen sich problemlos mit konventionellen Spiral-

bohrern in einem Arbeitsgang herstellen. Größere L/D-Verhältnisse werden bereits als „tiefe Bohrung“ bezeichnet. Ihre Bearbeitung erfordert entweder besonders ausgelegte Spiralbohrer und ein häufiges Unterbrechen des Schnittvorgangs zum Entspannen oder aber den Einsatz eines Tiefbohrverfahrens.

Mit dem Tiefbohren, das oberhalb eines Bohrtiefenverhältnisses von $L/D = 20$ grundsätzlich verwendet wird, werden zwischenzeitlich Bohrungstiefen bis zum 150-Fachen des Durchmessers realisiert. Die hierbei erzielbare hohe Oberflächenqualität macht weitere Bearbeitungsgänge meist überflüssig. Durch die erreichbaren Bohrungsqualitäten werden die Tiefbohrverfahren häufig auch für Bohrtiefen von $L/D < 20$ eingesetzt.

Vom herkömmlichen Bohren unterscheidet sich das Tiefbohren außer durch eine unsymmetrische Schneidenanordnung am Werkzeug dadurch, dass der Kühlschmierstoff unter Druck direkt zu den Schneiden geführt wird und dass seine Spülwirkung den alleinigen Transportmechanismus für die anfallenden Späne darstellt. Darüber hinaus besteht die Schneide aus Hartmetall, so dass hohe Schnittgeschwindigkeiten erreicht werden können, die wiederum eine Erhöhung der Zeitspannungsvolumina ermöglichen. Eine Übersicht über die Werkzeuge gibt **Abb. 20**.

Beim Tiefbohren unterscheidet man mehrere Verfahren und Werkzeuge [48]. Beim Einlippenbohr (ELB)-Verfahren ist als charak-

teristisches Merkmal und Hauptvorteil zu nennen, dass bei diesen Tiefbohrwerkzeugen die Kühlmittelzufuhr durch den Werkzeugschaft und die sichere Abführung der Späne in einer V-förmigen Aussparung am Umfang erfolgt. Der typische Durchmesserbereich dieser Werkzeuge liegt zwischen 1 und 32 mm. Die verbleibenden Querschnitte für die Ölzuführungskanäle werden bei Durchmessern unter 1 mm so klein, dass sie ihre Funktion nicht mehr erfüllen können. Die obere Grenze der Einlippenbohrer ergibt sich dadurch, dass andere Tiefbohrverfahren, wie etwa das BTA-Verfahren, zweckmäßiger und wirtschaftlicher werden.

Das BTA-Verfahren wurde Ende der 30er Jahre erfunden, als man sich Gedanken machte, wie beim Transport das Kratzen der Späne an der Bohrlochwand und die daraus resultierende Beeinträchtigung der Oberflächengüte vermieden werden könne. Der Versuch, die Spannt des Einlippenbohrers nach außen hin abzudecken, hatte jedoch eine starke Verminderung des zur Verfügung stehenden Spanraums zur Folge, was wiederum die Zeitspannungsvolumina begrenzte. Die Lösung wurde schließlich von der „Boring and Trepanning Association“ gefunden, die die Verfahrenscharakteristik des Einlippenbohrens umkehrte und den Kühlschmierstoff von außen durch den ringförmigen Spalt zwischen Bohrrohr und Wandung zuführte. Der Rückfluss erfolgt dann zusammen mit den

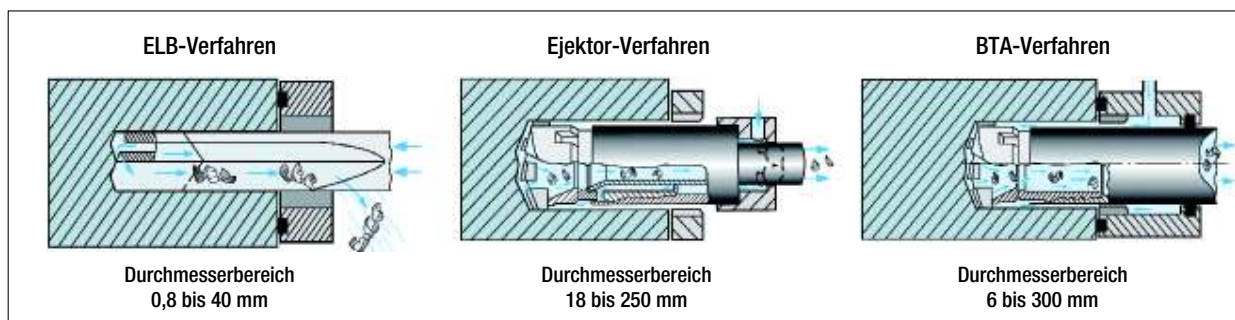


Abb. 20: Verfahren zum Tiefbohren

Spänen durch das Spanmaul und das Bohrrrohr, dessen Durchmesser nicht unter 6 mm betragen sollte. Der obere Durchmesser liegt für Vollbohrwerkzeuge bei ca. 300 mm und für Aufbohrwerkzeuge bei ca. 1.000 mm, wobei diese Grenzen maßgeblich von der verfügbaren Maschinenleistung abhängen.

Das Verfahren bedarf jedoch eigens eingerichteter Maschinen, die sich wesentlich von Standard-Bohrmaschinen unterscheiden. Um das Tiefbohren auch auf nicht besonders dazu hergerichteten Maschinen vornehmen zu können, wurde der Ejektorbohrer entwickelt. Er arbeitet mit einem Doppelrohr, durch das der Kühlschmierstoff an die Wirkstelle herangeführt wird, d.h., der Ringraum für die Zuführung wird nicht mehr durch die Bohrlochwandung abgegrenzt, sondern durch ein zweites Rohr [12]. Daraus resultiert der Vorteil, dass der Bohrlözföhrungsapparat, wie er für das BTA-Verfahren benötigt wird, entfällt. Jedoch ist auch hier eine Ejektor-Bohrlözföhrung notwendig.

Das Ejektorwerkzeug ist zusätzlich dadurch gekennzeichnet, dass besondere Düsenöffnungen vorhanden sind, durch die ein Teil des Öls bereits vor dem Erreichen der Wirkstelle vom Ringraum in das Innere des Werkzeugs eintritt und dadurch einen Unterdruck im Bohrkopf erzeugt. Die dadurch entstehende Saugwirkung unterstützt den öflflussbedingten Transport der Späne.

4.4 Hobeln, Stoßen

Hobeln und Stoßen sind spanende Fertigungsverfahren mit schrittweise wiederholter, meist geradliniger Schnittbewegung und schrittweiser Vorschubbewegung. In der Regel werden durch diese Verfahren größere, ebene Flächen auf Maß gebracht (DIN 8589-4).

Analog zu den anderen spanenden Fertigungsverfahren mit

geometrisch bestimmter Schneide wird zwischen Plan-, Rund-, Schraub-, Wälz-, Profil-, Form- und Ungeradhobeln bzw. -stoßen unterschieden. Auf eine getrennte Behandlung der einzelnen Verfahren soll in diesem Rahmen verzichtet werden. Anhand des Planhobeln und -stoßens werden die Zusammenhänge erläutert, die sich auf die Varianten Rund-, Schraub-, Profil- und Formhobeln bzw. -stoßen übertragen lassen.

Beim Hobeln föhrt das Werkstück die Schnittbewegung (Arbeitshub) mit der Geschwindigkeit v_c sowie die Rückbewegung (Leer- oder Rückhub) mit v_R aus, während die Zustellung a_p und der Vorschub f am Ende des Rückhubes vom Werkzeug vorgenommen werden.

Beim Planstoßen (Waagerecht- sowie Senkrechtstoßen) wird im Unterschied zum Hobeln der Arbeits- und Rückhub (v_c , v_R) vom Werkzeug ausgeföhrt werden. Die Zustellbewegung kann sowohl durch das Werkstück (durch Heben oder seitliches Verschieben des Tisches) wie auch durch den Meißel (durch Heben und Senken des Stößelkopfs) erfolgen. Der Vorschub f wird durch den Werkstücktisch realisiert. Um beim Rückhub v_R eine Kollision zwischen Werkstück und Werkzeug zu vermeiden, föhrt das Werkzeug eine Abhebewegung aus.

In der Praxis werden die Begriffe Hobeln und Stoßen nicht immer exakt getrennt. Zum Beispiel bezeichnet man eine Shapingmaschine oft als Kurzhobler, obwohl sie dem Arbeitsablauf nach eine Waagrecht-Stoßmaschine ist.

4.5 Feinbearbeitung

Bei erhöhten Anforderungen hinsichtlich der Bohrungstoleranz und der Oberflächengüte von Bohrungen kommen die Feinbearbeitungsverfahren Reiben und Feinbohren zum Einsatz.

4.5.1 Reiben

Reiben zählt zu den Feinbearbeitungsverfahren und dient zur Verbesserung der Bohrungsqualität, wobei Lage- und Formfehler nicht beeinflusst werden können. Bezüglich der Kinematik entspricht das Reiben dem Aufbohren mit geringer Spanungsdicke. Nach DIN 8589-2 wird zwischen Reiben mit einschneidigen und mehrschneidigen Werkzeugen unterschieden. Die Einschneidenreibahle erhält ihre Führung durch am Umfang angeordnete Führungsleisten, wobei die Funktionen Zerspanung und Führung auf unabhängige Wirkelemente aufgeteilt sind (Abb. 21). Das mehrschneidige Reibwerkzeug wird durch die am Umfang angeordneten Nebenschneiden geföhrt. Die Schneiden der mehrschneidigen Reibahlen können achsparallel oder auf einer Schraubenlinie angeordnet sein. Bohrungen mit Nut werden mit gedrahten Werkzeugen gerieben, um einen Eingriffsstoß der Schneide zu vermeiden. Üblicherweise werden Reibahlen mit gerader Zähnezahl hergestellt, wobei sich jeweils zwei Schneiden gegenüberliegen, was eine Durchmesserbestimmung wesentlich erleichtert. Um das Auftreten von Ratterschwingungen zu verhindern, wird eine ungleiche Teilung der Schneidenabstände gewählt, die sich nach dem halben Umfang wiederholt. Erreichbare Bohrungsqualitäten sind IT7 und besser.

Es wird auch zwischen Handreiben und Maschinenreiben unterschieden. Bei Handreibahlen wird als Schneidstoff vorwiegend Werkzeugstahl oder HSS verwendet. Für Maschinenreibahlen kommen Schnellarbeitsstähle oder Hartmetalle als Schneidstoff zum Einsatz. Leistungssteigerungen sind auch beim Reiben durch den Einsatz beschichteter Werkzeuge möglich. Die Auswechselbarkeit der Schneidplatte ermöglicht durch geeignete Wahl von Substrat, Beschichtung und Geometrie eine



Abb. 21: Ein-, Zwei- und Mehrschneidenreibahnen mit PKD- oder PCBN-Bestückung (Quelle: Mapal)

Anpassung des Werkzeugs an die unterschiedlichen Werkstoffe und Bearbeitungsaufgaben.

4.5.2 Feinbohren

Beim Feinbohren kommen hochgenaue Bohrstangen zum Einsatz, die ohne Selbstführung oder mit Führungsleisten ähnlich wie Einschneidenreibahnen ausgeführt sind. Die Zerspanung übernimmt eine Wendeschneidplatte aus Hartmetall oder polykristallinem Diamanten (PKD). Aufgrund hoher Schnittwerte und da die Führungsaufgabe nicht zwangsläufig vom Werkzeug übernommen wird, kommt der Genauigkeit der Werkzeugmaschine beim Feinbohren eine besondere Bedeutung zu.

4.6 Gewindeherstellung

Die Herstellung von Außen- und Innengewinden kann durch Urformen, Umformen oder spanende Fertigungsverfahren erfolgen.

4.6.1 Gewindedrehen

Beim Gewindedrehen wird mit einem einschneidigen, profilierten Werkzeug ein Gewinde gedreht, wobei der Vorschub je Umdrehung der Steigung des Gewindes entspricht [64]. Aufgrund der hohen Schneidenbelastung kann

ein Gewinde nicht in einem einzigen Überlauf fertiggestellt werden, sondern es sind stets mehrere Überläufe erforderlich.

4.6.2 Gewindebohren

Die Fertigung von Innengewinden wird vorrangig mittels Gewindebohren realisiert. Beim Gewindebohren wird ein Kernloch so aufgebohrt, dass durch die schraubenförmige Bewegung der Schneiden die raumgeometrische Gewindeform erzeugt wird. Die erzeugte Steigung des Gewindes entspricht der Steigung des Gewindebohrwerkzeuges. Gewindebohrer werden fast ausschließlich aus Schnellarbeitsstahl hergestellt und häufig im PVD-Verfahren beschichtet.

4.6.3 Gewindefräsen

Das Gewindefräsen ist ein spanendes Fertigungsverfahren zur Herstellung von Außen- und Innengewinden. Es werden hohe Oberflächengüten an den Gewindeflanken erreicht und es können große Stückzahlen wirtschaftlich gefertigt werden. Als Schneidstoffe kommen vornehmlich Hartmetalle zum Einsatz [23]. Da es sich beim Gewindefräsen um einen Zirkularfräsprozess handelt, können mit einem Werkzeug Gewinde gleiche Steigung, jedoch unterschiedlicher Nenndurchmesser erzeugt werden.

4.6.4 Gewindeformen

Gewindeformen ist nach DIN 8583-5 ein spanloses (umformendes) Verfahren, bei dem das Innengewinde durch Eindrücken eines Werkzeugs, dem Gewindeformer bzw. -furcher, in das Werkstück erzeugt wird [22]. Der Querschnitt eines Gewindeformers ist im Gegensatz zum runden Querschnitt eines Gewindebohrers ein Polygon mit drei oder mehr abgeflachten Eckenbereichen. An diesen Formgebungskanten erfolgt die Verdrängung des Werkstoffs. Ausgangssituation beim Gewindeformen ist ebenfalls eine Vorbohrung mit einem Durchmesser, der in etwa dem Flankendurchmesser des Gewindes entspricht. Während die Formgebungskanten des Werkzeuges in das Werkstückmaterial eindringen und die Gewindeflanken auf Nennmaß ausformen, fließt der verdrängte Werkstoff in die Zahnücken des Gewindeformers. Dabei entstehen die für geformte Gewinde typischen Zipfel im Bereich der Gewindespitzen. Im Vergleich zum Gewindebohren entsteht beim Gewindeformen ein Gewinde höherer Festigkeit. Ursache ist die Kaltverfestigung beim Umformen.

5 Hochleistungs-Zerspanprozesse

5.1 Trockenbearbeitung

Durch die Wahrnehmung ihrer Hauptaufgaben, Kühlen und Schmieren der Bearbeitungsstelle sowie Abtransport der Späne, tragen moderne Kühlschmierstoffsysteme maßgeblich zum hohen Leistungsniveau zahlreicher Fertigungsprozesse bei. Erreicht wird dies durch die Abfuhr der Prozesswärme aus der Kontaktstelle Werkzeug - Werkstück durch Kühlung und die Reduktion der Wärmeentstehung durch Schmierung. Bei der Zerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide werden heute überwiegend Emulsionen eingesetzt. Emulsionen zeichnen sich durch eine Vielzahl von Eigenschaften aus, die sie als Kühlschmierstoff (KSS) prädestinieren. Hierzu zählen vor allem ihre gute Kühl- und Spülwirkung sowie der geringe Reinigungsaufwand für Werkstücke, Werkzeuge und Späne.

Neben den technologischen Vorteilen, die die Kühlschmierstoffe und hier insbesondere Emulsionen bei ihrem Einsatz bieten, stellen sie eine nicht unerhebliche Gefährdung für die damit umgehenden Menschen sowie für die Umwelt dar. KSS-Bestandteile wie Bakterizide und Fungizide, im Kühlschmierstoff entstehende Reaktionsprodukte sowie eingeschleppte Fremdstoffe können Auslöser für Erkrankungen sein. Leckage- und Ausschleppverluste, Emissionen, Waschwasser und die Entsorgung verbrauchter Kühlschmierstoffe stellen eine Belastung von Boden, Wasser und Luft dar.

Ferner verursachen der Einsatz, die Pflege und die Entsorgung von Kühlschmierstoffen hohe Kosten. Die Erkenntnis, dass die werkstückbezogenen Aufwendungen für den Kühlschmierstoff um ein Mehrfaches höher als die Werkzeugkosten sein können und einen

immer größeren Anteil an den Gesamtherstellkosten einnehmen, hat bereits bei vielen Anwendern zu einer neuen Bewertung des Kühlschmierstoff-Einsatzes geführt. Bei einer Vielzahl von Bearbeitungsaufgaben, bei denen heute noch große Mengen an Kühlschmierstoffen eingesetzt werden, ist deren Einsatz technologisch nicht erforderlich. Bei jeder bestehenden oder zukünftigen Bearbeitungsaufgabe sollte deshalb grundsätzlich die Frage gestellt werden, ob nicht auf Kühlschmierstoffe verzichtet werden kann. Eine wirtschaftlich vertretbare Trockenbearbeitung erfordert allerdings eine sehr eingehende Analyse der gegebenen Randbedingungen sowie das Verständnis der komplexen Wirkzusammenhänge (Abb. 22), die Prozess, Schneidstoff, Bauteil und Werkzeugmaschine miteinander verbinden ([1], [32], [41], [52], [66]).

Das Drehen und Fräsen von Stahl und Gusswerkstoffen kann aufgrund der hohen Warmverschleißfestigkeit der heute zur Verfügung stehenden beschichteten

Hartmetallwerkzeuge weitestgehend völlig trocken erfolgen. Bei vielen Bearbeitungsaufgaben kann jedoch nicht vollständig auf die Zuführung eines Kühlschmiermediums verzichtet werden. Hierzu zählen das Bohren, Feinbohren oder Reiben sowie das Gewindebohren bzw. -formen in Stahlwerkstoffe (Abb. 23). In diesen Fällen kommt der Minimalmengenkühschmierung (MMKS) eine Schlüsselrolle zu. Das klassische Einsatzgebiet der MMKS-Technik ist seit vielen Jahren das Sägen von Stahlwerkstoffen.

Unter Minimalmengenkühschmierung versteht man die gezielte Zuführung geringster Mengen eines Kühlschmiermediums zur Zerspanstelle bzw. zum Werkzeug. Bei der Minimalmengenschmierung (MMS) finden als Medien primär Öle (Fettalkohole und Esteröle) und bei der Minimalmengenkühlung (MMK) Emulsionen oder Luft Verwendung (Abb. 24). Die Auswahl des Mediums richtet sich nach der Art der Zuführung, nach dem Werkstoff, dem Bearbeitungsverfahren und

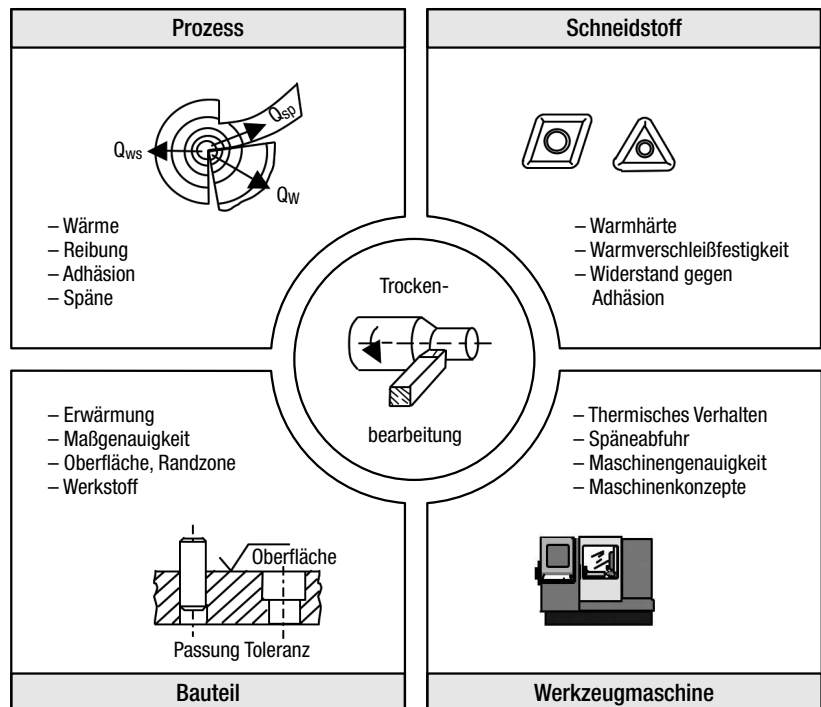


Abb. 22: Trockenbearbeitung – Anforderungen und Randbedingungen

Verfahren	Werkstoff				
	Aluminium		Stahl		Guss
	Guss- legierungen	Knet- legierungen	Hochlegierte Stähle Wälzlagerstahl	Automatenstahl Vergütungs- stahl	GG20 – GGG70
Bohren	MMS	MMS	MMS	Trocken/MMS	Trocken/MMS
Reiben	MMS	MMS	MMS	MMS	MMS
Gewindeschneiden	MMS	MMS	MMS	MMS	MMS
Gewindeformen	MMS	MMS	MMS	MMS	MMS
Tiefbohren	MMS	MMS	–	MMS	MMS
Fräsen	MMS/Trocken	MMS	Trocken	Trocken	Trocken
Drehen	MMS/Trocken	MMS/Trocken	Trocken	Trocken	Trocken
Walzfräsen	–	–	Trocken	Trocken	Trocken
Sägen	MMS	MMS	MMS	MMS	MMS
Räumen	–	–	MMS	MMS/Trocken	Trocken

Abb. 23: Anwendungsgebiete der Minimalmengenschmierung MMS (nach WZL, ISF, GFE, wbk)

– ≙ keine Anwendung

nach der Bauteilnachbehandlung (Glühen, Beschichten, Lackieren). Der mengenmäßige Verbrauch an MMS-Medium hängt von der Bearbeitungsaufgabe ab. In der Regel beträgt er deutlich weniger als 50 ml Medium pro Prozessstunde [33].

Besondere Bedeutung kommt im Hinblick auf die Realisierung

einer Trockenbearbeitung vor allem der Beherrschung der Bohrungsherstellung und der entsprechenden Folgeoperationen ohne Kühlschmierstoff zu. In Stahlwerkstoffen können heute mit hinsichtlich Substrat, Beschichtung und Geometrie auf die besonderen Anforderungen der Trockenbearbeitung abgestimmten Vollhart-

metallbohrern Bohrungen bis zu L/D-Verhältnissen von drei in der Serie völlig trocken prozesssicher eingebracht werden (Abb. 25). Vielfach erbringen die hinsichtlich Substrat, Beschichtung und Geometrie an die besonderen Anforderungen des Trockenbearbeitungsprozesses optimal angepassten Werkzeuge gegenüber den konventionellen Nassbohrern bei gleichen oder gesteigerten Schnittwerten deutlich höhere Leistungen.

Größere Bohrungstiefen erfordern den Einsatz eines MMS-Mediums. Mit Minimalmengenschmierung sind beim Einsatz geeigneter trockenbearbeitungstauglicher Bohrwerkzeuge in Stahl Bohrungen mit L/D-Verhältnissen von drei bis fünf problemlos herstellbar. Beim Reiben mit leistungsgestützten Ein- oder Zweischneidenreibahlen bzw. mit Mehrschneidenreibahlen wie auch beim Gewindebohren in Guss- und Stahlwerkstoffe ist der Einsatz einer Minimalmengenschmierung bislang noch unverzichtbar. Das Gleiche gilt auch für das Gewindeformen. Schneidstoff- und verfahrensbedingt erfolgen das Gewinde-

Minimalmengenkühlschmierung (MMKS)

Minimalmengenkühlung (MMK)	Minimalmengenschmierung (MMS)
Emulsion Wasser (c_{Wasser}) = 4,18 kJ/kgK Luft ($c_{p, \text{Luft}}$) = 1,05 kJ/kgK	Öl ($c_{\text{Öl}}$) = 1,92 kJ/kgK

c = spezifische Wärmekapazität

Medium	Kühlung	Schmierung	Spantransport
Emulsion	sehr gut	gut	sehr gut
Öl	gut	sehr gut	gut
Druckluft	bedingt	keine	bedingt

Abb. 24: Definition des Begriffs „Minimalmengenkühlschmierung“

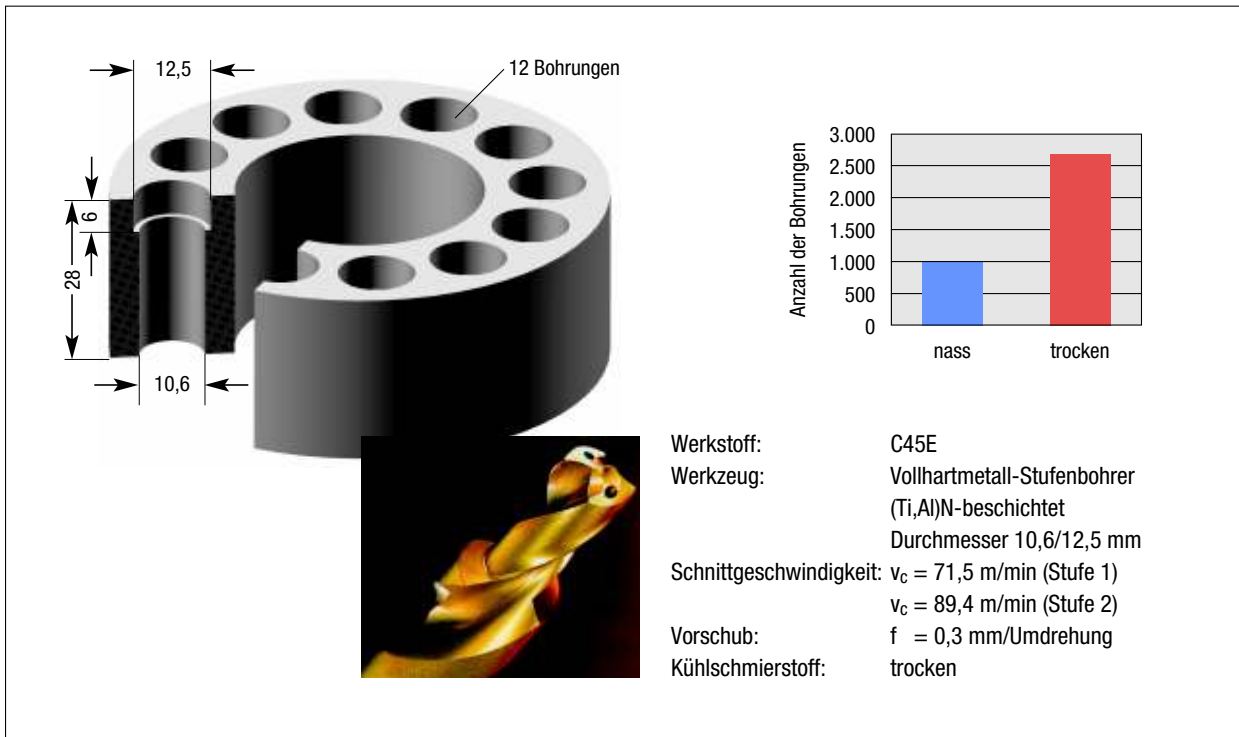


Abb. 25: Trockenbohren von Stahl in der Serie (nach Kennametal)

bohren und -formen bei vergleichsweise niedrigen Schnittgeschwindigkeiten. Eine leistungsfähige Alternative hierzu stellt das Gewindefräsen dar. Die hierfür eingesetzten Hartmetallwerkzeuge ermöglichen nicht nur die Anwendung höherer Schnittgeschwindigkeiten und eine enorme Reduzierung der Fertigungszeit, sondern auch den Verzicht auf eine Minimalmengenschmierung.

Bei vielen Bauteilen ermöglicht die Trocken- bzw. MMS-Bearbeitung bei gleicher Bauteilqualität und Prozesssicherheit gegenüber der Nasszerspannung eine Reduzierung der Fertigungszeiten (Abb. 26). Viele Anwender befürchten jedoch, dass sie bei einer Umstellung auf eine Trockenbearbeitung ihre bislang eingesetzten Werkzeuge durch neue Werkzeuge ersetzen müssen. Diese Befürchtung gilt, wie Abb. 26 verdeutlicht, nicht für alle Werkzeuge und Bearbeitungsoperationen. Für die Fertigung der in Abb. 26 gezeigten Stahlleiste werden insgesamt zwölf Werkzeuge benötigt. Fünf Stan-

dardwerkzeuge konnten direkt aus der Nasszerspannung bei der Trockenbearbeitung eingesetzt werden. Lediglich die Bohrungsbearbeitung erforderte optimierte trockenbearbeitungstaugliche Werkzeuge sowie beim Reiben und Gewindebohren die Verwendung einer Minimalmengenschmierung. Der Einsatz dieser Werkzeuge bei angepassten, gegenüber der bisherigen Nasszerspannung deutlich höheren Schnittbedingungen führte zu einer signifikanten Reduzierung der Prozesszeiten.

Die Umstellung einer Nass- auf eine Trockenbearbeitung bietet gleichzeitig auch die Chance, bisherige Vorgehensweisen zu hinterfragen und zu neuen innovativen Lösungen zu gelangen, die bis hin zur Elimination oder Substitution des betreffenden Prozesses führen können. Beispiele hierfür sind der Einsatz von Kombi- anstelle von Monowerkzeugen oder die Herstellung von Bohrungen oder Gewinden durch Zirkularfräsen. Die Trockenbearbeitung kann auch zu einer Einsparung aufwen-

diger und kostenintensiver Waschvorgänge führen. Die Einsparung von Werkzeugen, Werkzeugwechseln oder von Waschvorgängen kann zu einer Verkürzung der Prozesskette und damit zu Kosteneinsparungen führen, die weit über den eigentlichen KSS-Kosten liegen. Eine höhere Motivation der Mitarbeiter durch eine größere Arbeitsplatzqualität und geringere Krankenstände sind weitere nicht zu unterschätzende ökonomische Vorteile einer Trockenbearbeitung. Eine sauberere und umweltverträglichere Fertigung kann auch zu einem Imagegewinn für das Unternehmen führen ([35], [36]).

5.2 Hochleistungs-/Hochgeschwindigkeitsbearbeitung

Nachdem über einen Zeitraum von fast zwei Jahrzehnten die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung (HSC = High Speed Cutting) als Synonym für hochproduktive Prozesse betrachtet wur-

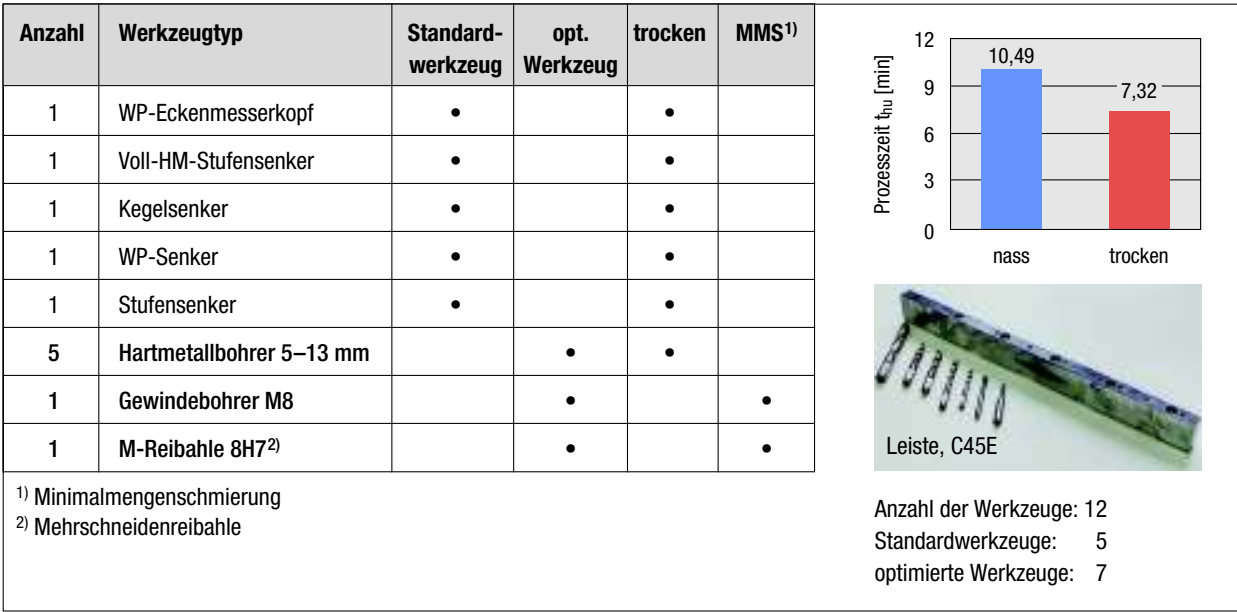


Abb. 26: Vergleich Nass-/Trockenbearbeitung (nach Heidelberger Druckmaschinen)

de, treten nun die Begriffe High Performance Cutting oder High Productive Cutting (HPC) in den Vordergrund. Initialzündung hierfür waren die Erfolge bei der Entwicklung und Anwendung der Trockenbearbeitung. Der Begriff HPC, für den derzeit noch keine exakte Definition besteht, lässt sich umschreiben als die Zielsetzung, das Zeitspanvolumen beträchtlich, d.h. in einer Größen-

ordnung von 200 bis 500 % im Vergleich zur konventionellen Bearbeitung zu steigern. Der Begriff HPC steht aber auch für Gesamtanalyse und Optimierung der Prozesskette, die darauf abzielt, die Fertigungskosten um 10 bis 30 % zu reduzieren (High Productive Cutting) ([34], [61]).

Die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung (HSC = High Speed Cutting) kann als ein Element der

Hochleistungszerspanung angesehen werden. Bezogen auf die Stellgröße Schnittgeschwindigkeit kann dabei auf die für die HSC-Bearbeitung entwickelte und allgemein anerkannte Zuordnung von Werkstoffen und Verfahren zu Schnittgeschwindigkeitsfeldern zurückgegriffen werden (Abb. 27). Sie bietet Anhaltspunkte für erreichbare Schnittgeschwindigkeiten [60].

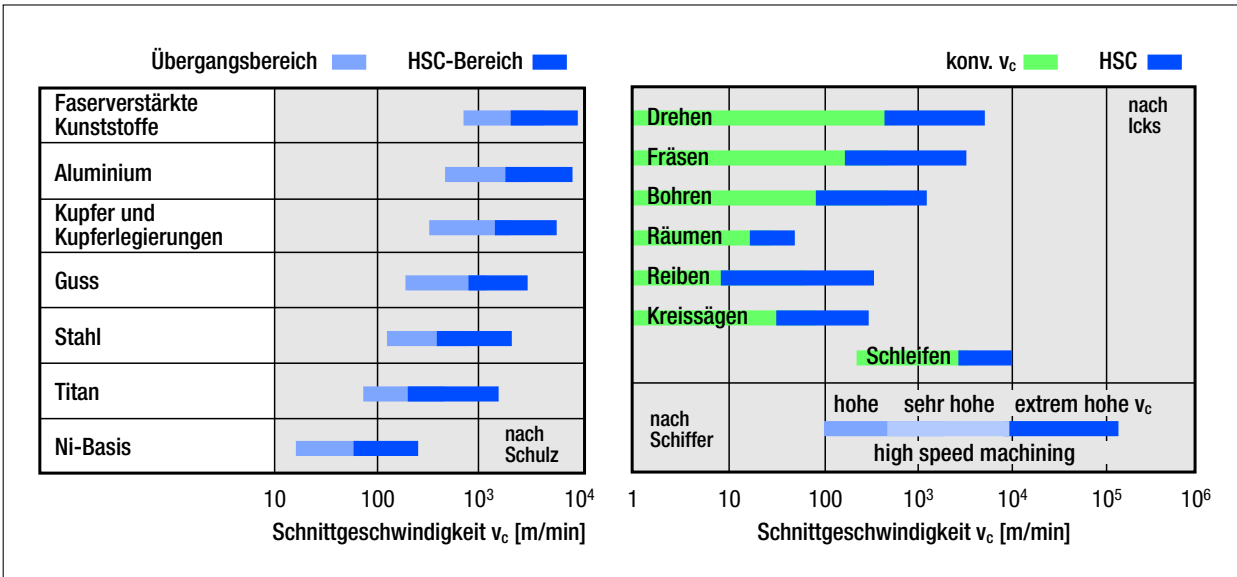


Abb. 27: Definitionen von HSC

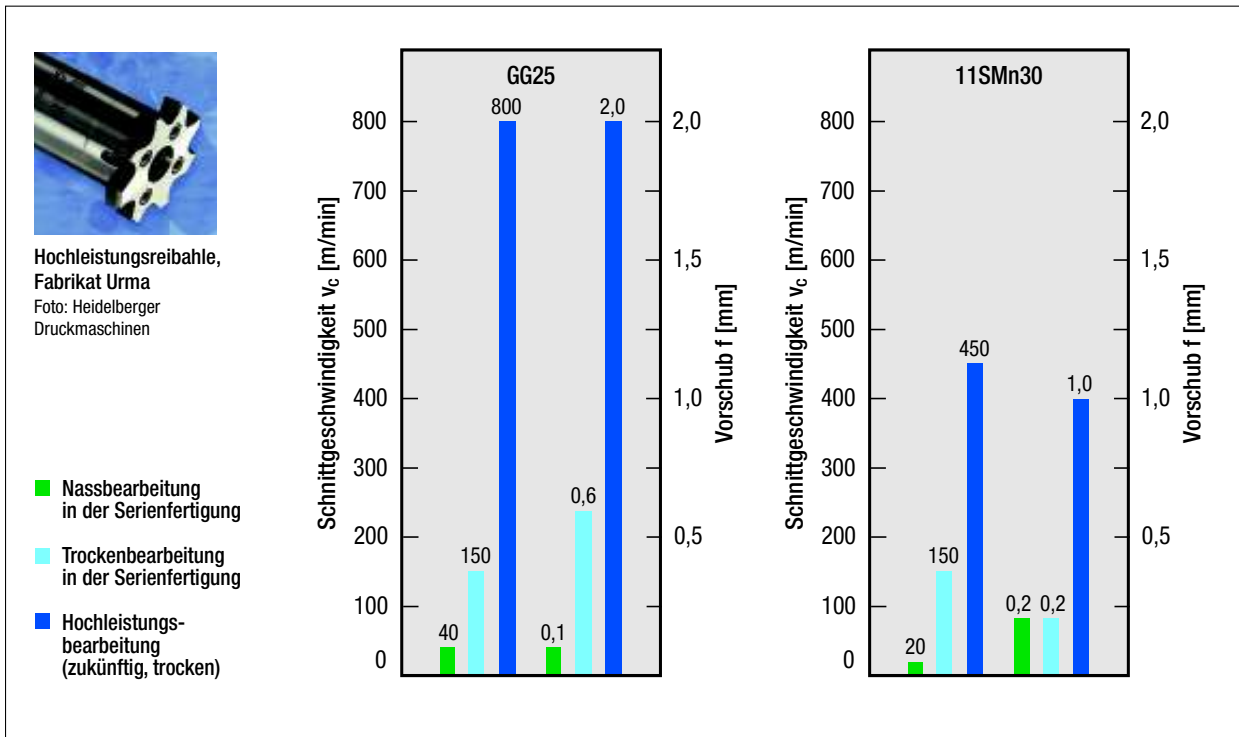


Abb. 28: Hochleistungsreiben, aktuell und projiziert (nach Heidelberger Druckmaschinen)

Das Schaftfräsen im Formenbau ist ein Beispiel für die Anwendung von HSC bei der Bearbeitung von Stahl- und Gusswerkstoffen. Im Formenbau sind vor allem beim Schlichten hohe Schnittgeschwindigkeiten erforderlich, um in kürzester Zeit Gravuren mit so präzisen Endkonturen und so hohen Oberflächengüten herstellen zu können, dass keine manuelle Nacharbeit mehr erforderlich ist. Das setzt voraus, dass die Fräsprozesse dynamisch stabil ablaufen und die Zerspankräfte keine unzulässig großen radialen Fräserabdrängungen verursachen. Derartige Forderungen schränken die Größe der radialen und der axialen Schnitttiefen sowie des Vorschubes pro Zahn im Einzelfall stark ein. Die Steigerung des Zeitspanvolumens und damit die Verkürzung der Hauptzeit muss deshalb über die Anwendung möglichst hoher Schnittgeschwindigkeiten erfolgen. Der Einsatz von Feinst- und Ultrafeinstkornhartmetallen mit Beschichtung erlaubt Schnittgeschwindigkeiten bis in den Bereich

von $v_c = 1.000$ m/min bei vergüteten Stahlwerkstoffen mit Zugfestigkeiten bis $R_m = 1.100$ N/mm² und bei Gusswerkstoffen mit Härten bis 220 HB. Gefräst wird im Trockenschnitt.

Zielgröße der Hochleistungszerspannung ist die Maximierung des Zeitspanvolumens. Dieses errechnet sich aus der Schnittgeschwindigkeit und aus dem Spanungsquerschnitt und somit aus Stellgrößen des Zerspanungsprozesses. Die Möglichkeiten zur Variation dieser Stellgrößen hängen vom Bearbeitungsverfahren und von der Bearbeitungsaufgabe ab. Hohe Schnittgeschwindigkeiten und große Spanungsquerschnitte belasten die Werkzeuge extrem. Die HPC-Bearbeitung erfordert daher Werkzeuge, die hinsichtlich Substrat, Schichtsystem und Geometrie auf diese Belastung ausgelegt sind. Die Potentiale, die HPC eröffnet, sind, wie am Beispiel des Hochleistungsreibens in **Abb. 28** gezeigt, außerordentlich beeindruckend.

Eine weitere Möglichkeit, die Durchlaufzeiten zu reduzieren, ist die Substitution von konventionellen Prozessen durch Zirkularprozesse. So kann z. B. beim Messerkopfstirnfräsen der Übergang von einer linearen Schnittführung, die zwei oder mehr Überläufe erfordert, auf einen Zirkularprozess die Hauptzeit beträchtlich verkürzen. Die Erhöhung von Schnittgeschwindigkeit und Vorschub pro Zahn führt zu einer weiteren Zeiteinsparung. Hinzu kommt, dass die Bearbeitung trocken erfolgen kann.

Bei der Innenbearbeitung stehen Zirkularprozesse im Wettbewerb mit Bohr- und Aufbohroperationen. Sie schaffen die Flexibilität, mit einfachen Werkzeugen verschieden dimensionierte Geometrielemente erzeugen zu können. So führen die Vorteile extrem kurzer Hauptzeiten beim Arbeiten mit formgebundenen Werkzeugen nicht unbedingt zu vergleichbar drastischen Verkürzungen der Durchlaufzeiten der bearbeiteten Teile. Das gilt besonders dann, wenn an einem Bauteil viele ver-

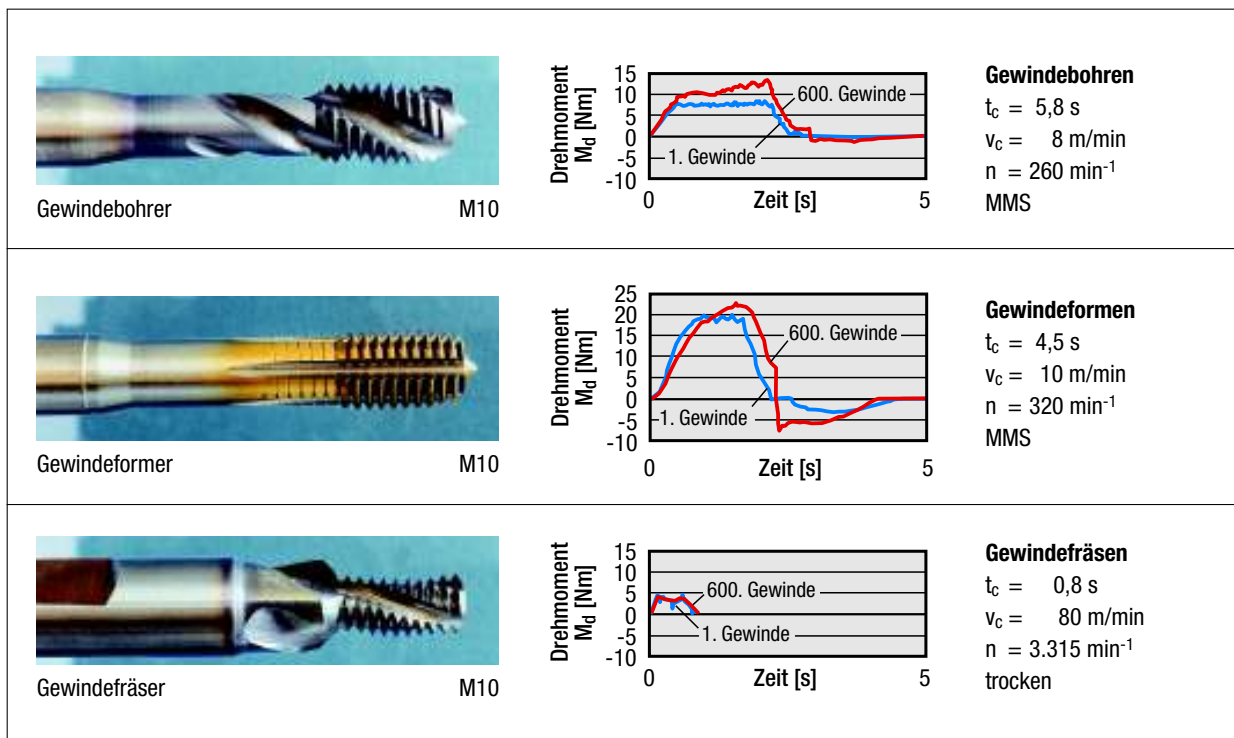


Abb. 29: Verfahrensvergleich bei der Gewindeherstellung, Werkstoff 38MnSiVS5+BY ($R_m = 830\text{--}900 \text{ N/mm}^2$)

schiedene Formelemente den Einsatz zahlreicher Werkzeuge erfordern. Die notwendigen Werkzeugwechsel, die auch bei modernen Maschinen teilweise noch mehrere Sekunden benötigen, bestimmen dann mehr und mehr die Durchlaufzeit und nicht die weitere Optimierung von Prozessen, die teilweise ohnehin nur wenige Zehntelsekunden in Anspruch nehmen. Die Entscheidung, Sonderwerkzeug oder Zirkularprozess, wird von mehr als nur dem Zeitvergleich beeinflusst. Welches die beste Vorgehensweise ist, muss die Analyse des Einzelfalls ergeben. Eine in ihrer Bedeutung zunehmende Einflussgröße ist dabei die Flexibilität, die einer Fertigung abverlangt wird.

Bei der Substitution des Gewindebohrers und des Gewindefurchens durch das Gewindefräsen findet eine Entkopplung der Umfangsgeschwindigkeit des Werkzeugs von der Vorschubgeschwindigkeit statt. Die Schnittgeschwindigkeit und der radiale Vorschub sind frei wählbar. Sie können ge-

trennt für die jeweilige Anwendung optimiert werden. Aus dem kontinuierlichen Kontakt zwischen Werkzeug und Werkstück beim Gewindebohren und beim Gewindefurchen wird beim Gewindefräsen ein diskontinuierlicher Kontakt. Dies kommt einer Umstellung auf Trockenbearbeitung entgegen. Im Vergleich zum Gewindebohren bietet das Gewindefräsen vor allem bei Sacklochgewinden Vorteile bei der Spanabfuhr.

Der Vergleich von Hauptzeiten und Drehmomenten beim Gewindebohren, Gewindefurchen und Gewindefräsen in Vergütungsstahl spricht eindeutig für das Gewindefräsen. Die hohe anwendbare Schnittgeschwindigkeit reduziert in dem in **Abb. 29** gezeigten Beispiel die Hauptzeit gegenüber dem Gewindebohren um 86%.

Die Vielfalt von Zirkularprozessen ist mit dem Stirn- und Schafffräsen sowie dem Gewindefräsen keinesfalls erschöpft. In der Anwendung befinden sich weitere Verfahren wie das Bohrfräsen und

das Bohrgewindefräsen. Letzteres erfolgt mit nur einem Werkzeug, das zunächst die Vorbohrung erzeugt und anschließend das Gewinde fräst. Damit können im Vergleich zum Gewindefräsen ein Werkzeug und ein Werkzeugwechsel eingespart werden.

5.3 Hartdrehen

Ausgehend von der Entwicklung hochharter Schneidstoffe wie PCBN und Mischkeramik haben sich Hartbearbeitungsverfahren mit geometrisch bestimmter Schneide seit Beginn der 80er Jahre für die Vor- und Endbearbeitung gehärteter Stahlwerkstoffe etabliert. Als Hartdrehen wird im Allgemeinen das Drehen von Stählen mit einer Härte von 55 bis 68 HRC bezeichnet. Die prinzipbedingten Vorteile des Hartdrehens gegenüber klassischen Hartbearbeitungsverfahren mit undefinierter Schneide bestehen in der hohen Flexibilität des Verfahrens, was insbesondere eine vereinfachte Bearbeitung

komplexer rotationssymmetrischer Konturen und Mehrseitenbearbeitungen ermöglicht. Weiterhin ist so die Möglichkeit zur Trockenbearbeitung gegeben. Darüber hinaus können je nach Bauteilgeometrie Bearbeitungszeitvorteile durch die Anwendung höherer Zeitspanvolumina realisiert werden.

Nachteile gegenüber dem Schleifen bestehen meist dann, wenn Bauteile mit großem Durchmesser mit breiten Schleifscheiben mittels Einstechschleifen bearbeitet werden können. Da die Bearbeitungszeit beim Hartdrehen proportional mit dem zu bearbeitenden Bauteildurchmesser ansteigt und der Werkzeugverschleiß direkt von der abgewickelten Drehlänge abhängt, ist das Hartdrehen zur Endbearbeitung großflächiger Bauteile mit einfacher Geometrie nur dann wirtschaftlich, wenn aufgrund kleiner Losgrößen die durch die hohe Flexibilität bedingten niedrigeren Rüstzeiten Kosteneinsparungen ermöglichen. Weitere Einschränkungen für den Einsatz des Hartdrehens bestehen bei der Bearbeitung von Werkstücken mit großen Längen/Durchmesser-Verhältnissen (L/D-Verhältnissen) sowie stark unwuchtigen Bauteilen. Neben der Gefahr von Ratter-

schwingungen kann beispielsweise bei einer Bearbeitung langer schlanker Werkstücke die Bauteilabdrängung durch Prozesskräfte zu nicht akzeptablen Formfehlern führen. Im Extremfall unterbleibt eine Zerspanung durch Unterschreiten der notwendigen Schnitteinsetztiefe. Für die Futterbearbeitung sind Bauteile mit L/D-Verhältnissen bis etwa 4, für die Bearbeitung mit Reitstock L/D-Verhältnisse bis ca. 8 geeignet. Bei der Innenbearbeitung langer Bohrungen mit geringem Durchmesser stellt hingegen die Stabilität des Werkzeugs den limitierenden Faktor dar. Ab einem Längen/Durchmesser-Verhältnis von 5 muss trotz optimaler Prozessauslegung mit Prozessinstabilitäten aufgrund von Rattern gerechnet werden.

Hartdrehprozesse können sowohl für die Zerspanung im kontinuierlichen Schnitt als auch im unterbrochenen Schnitt eingesetzt werden. Obwohl bereits einige Untersuchungen zum Hartdrehen mit Schnittunterbrechungen durchgeführt wurden, in denen die grundsätzliche Machbarkeit gezeigt und zum Teil gute Bearbeitungsergebnisse erzielt wurden ([10], [28], [62], [71]), ist die

Akzeptanz solcher Prozesse in der Industrie deutlich geringer als für das Hartdrehen im kontinuierlichen Schnitt. So werden heute in der industriellen Praxis Bauteile mit Schnittunterbrechungen überwiegend mittels Schleifen bearbeitet. Grund hierfür sind vielfach Unsicherheiten hinsichtlich der erreichbaren Bauteilqualitäten sowie einer geeigneten Werkzeug- und Prozessauslegung beim Hartdrehen im unterbrochenen Schnitt.

Das volle Potential des Hartdrehens kann in der Regel nur dann genutzt werden, wenn die gesamte Prozesskette an das neue Endbearbeitungsverfahren angepasst wird. Hier ist insbesondere die Verwendung von endformnahen (near-net-shape) Bauteilen bei gleichzeitigem Verzicht auf eine Weichbearbeitung zu nennen. Die einfache Substitution von Schleifprozessen durch das Hartdrehen unter Beibehaltung aller vorgelagerten Schritte führt hingegen oft nur zu einer unvollkommenen Nutzung der Möglichkeiten, die Hartdrehprozesse bieten.

Beim Hartdrehen muss zwischen unterschiedlichen Einsatzfällen unterschieden werden. In **Abb. 30** wird eine Einordnung der

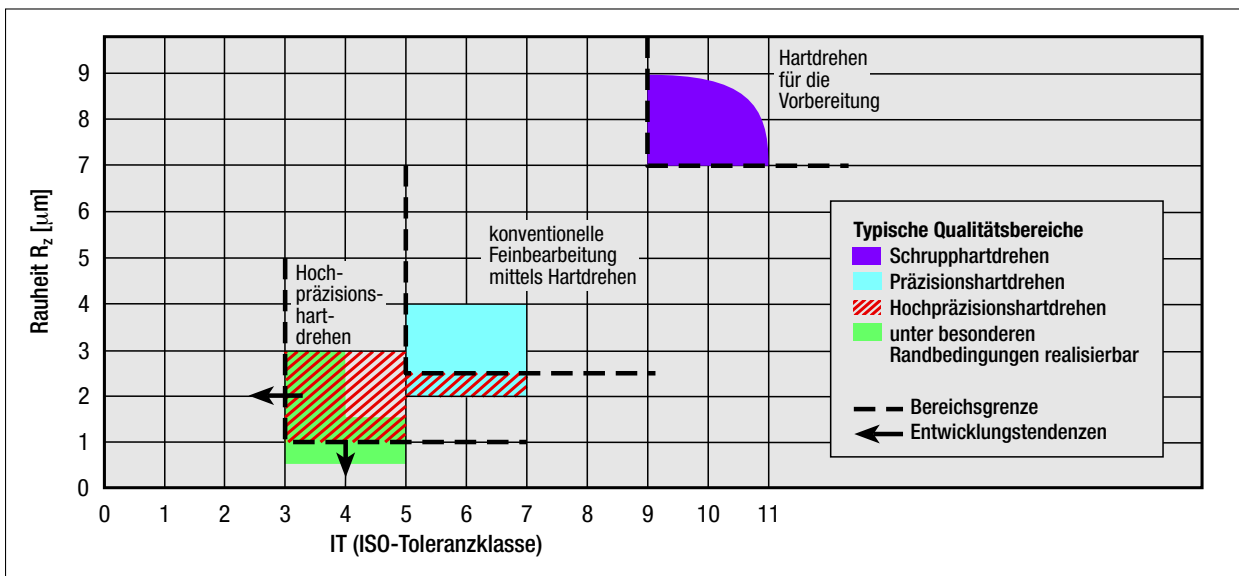


Abb. 30: Einordnung von Hartdrehprozessen hinsichtlich der erzielbaren Qualität (nach [30])

derzeit verwendeten Hartdrehprozesse vorgenommen. Beurteilungskriterien sind die erzielbaren Maßgenauigkeiten und Oberflächengüten [30].

Das **Schrupphartdrehen** ($v_c \approx 50\text{--}150$ m/min, $f \approx 0,1\text{--}0,3$ mm, $a_p \approx 0,5\text{--}3$ mm) stellt ein Vorbearbeitungsverfahren dar, bei dem z.B. geschmiedete oder gewalzte Stahlbauteile in gehärtetem Zustand bearbeitet werden können [68], wobei die Bearbeitungsaufgabe darin besteht, große und stark schwankende Aufmaße abzutragen. Weitere Anwendungen finden sich bei der Grobzerspannung von Stahl- und Hartgusswalzen oder Aufschweißlegierungen. Maßgebliche Beurteilungskriterien sind die Zerspanleistung und das Standverhalten der Werkzeuge. Zum Schrupphartdrehen werden stabile Maschinen eingesetzt, die hohe Zerspankräfte (≤ 5.000 N) aufnehmen können und die über eine ausreichende Antriebsleistung verfügen. Als Schneidstoffe kommen vorwiegend zähe, hoch-cBN-haltige Sorten zum Einsatz. Die mittels Schrupphartdrehen erzielbaren Toleranzen sind mit denen konventionell weichgedrehter Bauteile ohne besondere Genauigkeitsanforderungen vergleichbar und entsprechen der für anschließende Schleif- oder Präzisionshartdrehprozesse benötigten Vorbearbeitungsqualität.

Das **Präzisionshartdrehen** ($v_c \approx 100\text{--}200$ m/min, $f \approx 0,05\text{--}0,15$ mm, $a_p \approx 0,1\text{--}0,5$ mm) hat die Herstellung einsatzfertiger Bauteile zum Ziel. Die realisierbaren Toleranzen liegen im Bereich der ISO-Toleranzklassen IT6-IT7, in Ausnahmefällen IT5, entsprechend den absoluten Durchmesser-toleranzen $\Delta D_w \geq 10\text{--}15$ μm . Hierbei können in der Serienfertigung Oberflächenrauheiten im Bereich $R_z = 2,5\text{--}4$ μm prozesssicher erzielt werden [67]. Zum Präzisionshartdrehen werden in der Regel konventionelle Drehmaschinen eingesetzt, die durch speziell an das Hartdrehen angepasste Kom-

ponenten, wie z.B. hochwertige Werkstückspindeln und Wegmesssysteme, aufgewertet werden. Als Schneidstoffe werden sowohl PCBN-Sorten mit mittlerem bis geringem cBN-Gehalt als auch keramische Schneidstoffe eingesetzt.

Präzisionshartdrehprozesse stehen damit in direkter Konkurrenz zu konventionellen Schleifverfahren und sind in der Industrie sowohl für die Einzel- und Kleinserienfertigung als auch für die Großserien- und Massenfertigung bereits weit verbreitet. Ein typisches Anwendungsgebiet ist die Endbearbeitung von Komponenten der Antriebstechnik, wie Wellen, Flansche, Antriebsräder und -ritzel.

Eine konsequente Weiterentwicklung in Richtung höherer Bauteilqualitäten stellt das **Hochpräzisionshartdrehen** ($v_c \approx 150\text{--}220$ m/min, $f \approx 0,01\text{--}0,1$ mm, $a_p \approx 0,02\text{--}0,3$ mm) dar, das Potential zur Realisierung von Bauteilgenauigkeiten im Toleranzbereich IT3-IT5 bei Oberflächenrauheiten deutlich unterhalb der von konventionellen Präzisionshartdrehprozessen bietet. Die unter Verwendung spezieller Werkzeugmaschinen erreichbaren absoluten Maßgenauigkeiten liegen im Bereich weniger Mikrometer. In zugehörigen Untersuchungen wird die Möglichkeit zur Erzeugung von Oberflächenrauheiten $R_z \leq 1$ μm aufgezeigt, allerdings gleichzeitig eine Verschlechterung der Oberflächengüte mit steigendem Werkzeugverschleiß festgestellt. Das Verfahren zeigt wohl eher ein Potential zur Erzielung von Oberflächen mit $R_z \leq 3$ μm über längere Werkzeugstandzeiten [38]. Einsatzgebiete des Hochpräzisionshartdrehens sind die Wälzlager- und Hydraulikindustrie sowie Anwendungen im Werkzeugbau, für die die bislang mit konventionellen Hartdrehprozessen erzielbaren Genauigkeiten nicht ausreichen. Das Verfahren steht damit vor allem in Konkurrenz zum Feinschleifen.

Mittels Präzisions- und Hochpräzisionshartdrehen endbearbeitete Bauteile unterliegen im Betrieb typischerweise hohen Belastungen. In diesem Zusammenhang kommt dem Einsatzverhalten hartgedrehter Funktionsflächen große Bedeutung zu. Unsicherheiten bezüglich des Funktionsverhaltens werden immer wieder als Argument gegen die Einführung von Hartdrehprozessen angeführt. In den letzten Jahren wurden zahlreiche Arbeiten zu dieser Thematik durchgeführt, wobei insbesondere der Einfluss der Oberflächen- und Randzoneneigenschaften auf die Wälz- und Biege-wechselfestigkeit betrachtet wurde ([49], [56]).

In den meisten Untersuchungen konnte kein negativer Einfluss der beim Hartdrehen erzeugten Randzone auf das Funktionsverhalten festgestellt werden. Es zeigte sich vielmehr, dass die Dauerfestigkeit hartgedrehter Bauteile vergleichbar mit der geschliffener Bauteile ist. Selbst Veränderungen des Randzonengefüges oder Zug-eigen-spannungen unmittelbar an der Bauteiloberfläche hatten bei den durchgeführten Tests keine signifikante Senkung der Dauerfestigkeit zur Folge.

Kritischer sind im Hinblick auf die Funktionseigenschaften hingegen die derzeit mittels Hartdrehen realisierbaren Oberflächengüten einzuschätzen. So wurden an hartgedrehten, wälzbelasteten Oberflächen Schädigungen durch Mischreibung bei Überschreiten von Oberflächenrauheiten von $R_z \approx 1,5$ μm bzw. $R_a \approx 0,33$ μm nachgewiesen. Diese Werte liegen deutlich unterhalb der mit konventionellen Präzisionshartdrehprozessen erreichbaren Oberflächengüten.

Auch die Einschätzungen hartgedrehter Oberflächen bezüglich der Dichtwirkung sind angesichts vorliegender Forschungsergebnisse tendenziell positiv.

6 Anhang: Verfahrensabhängige Richtwerte

Ein wirtschaftlicher Einsatz der verfügbaren Fertigungsmittel setzt die Kenntnis der einzustellenden Schnittparameter voraus. Bei der Wahl dieser Schnittwerte sind in erster Linie das Bearbeitungsverfahren, das Werkstück (Werkstoff, Abmessungen etc.) und das Werkzeug (Schneidteilgeometrie, Schneidstoffe etc.) zu berücksichtigen. Bei den folgenden Schnittwerten handelt es sich um Anhaltswerte, die sich auf ideale Prozessbedingungen wie vorbearbeitete Werkstückoberfläche, stabiles Werkstück, ausreichende Steifigkeit von Maschine und Werkzeug beziehen. Die Stahlwerkstoffe werden in den folgenden Richtwerttabellen entweder nach Zerspanbarkeitsklassen oder Werkstoffgruppen unterteilt.

Werkstoff	Schnittgeschwindigkeit v_c [m/min]	Vorschub f_z [mm]	Schnitttiefe a_p [mm]
Unlegierter Stahl bis 600 N/mm ²	195–485	0,1–0,8	0,2–6
Niedriglegierter Stahl und Stahlguss bis 900 N/mm ²	160–435	0,1–0,8	0,2–6
Niedriglegierter Stahl und Stahlguss > 900 N/mm ²	100–280	0,1–0,8	0,2–6
Hochlegierter Stahl und Stahlguss bis 1.000 N/mm ²	180–380	0,1–0,8	0,2–6
Hochlegierter Stahl und Stahlguss > 1.000 N/mm ²	90–190	0,1–0,8	0,2–6
Nichtrostender Stahl und Stahlguss, ferritisch/martensitisch	100–250	0,1–0,6	0,2–6
Nichtrostender Stahl und Stahlguss, austenitisch	110–250	0,1–0,6	0,2–6

Tabelle A1: Richtwerte für das Außenlängsdrehen im nichtunterbrochenen Schnitt (nach Sandvik Coromant, Walter Hartmetall, Ceratizit)

6.1 Drehen

In **Tabelle A1** sind Richtwerte für das Drehen von Stahlwerkstoffen angegeben. Die Richtwerttabellen gelten für das Außenlängsdrehen im nichtunterbrochenen Schnitt.

Die empfohlenen Schnittgeschwindigkeiten beziehen sich auf die angegebenen Bereiche für Vorschub und Schnitttiefe. Sollten diese Bereiche über- oder unterschritten werden, so ist die Schnittgeschwindigkeit zu reduzieren bzw. zu erhöhen.

Eine Anpassung der Schnittgeschwindigkeit an

- unterschiedliche Werkstück-Randzonen,
- den jeweiligen Maschinenzustand oder
- andere Drehverfahren

erfolgt mit Korrekturfaktoren (**Tabelle A2**). Die angepasste Schnittgeschwindigkeit erhält man durch Multiplikation der für das Außendrehen empfohlenen Schnittgeschwindigkeit (Tabelle A1) mit dem jeweiligen Korrekturfaktor.

Einfluss	Korrekturfaktor
Gusshaut <ul style="list-style-type: none"> • Grauguss • Stahlguss • Hartguss Schmiede- und Walzhaut	$K_{FGG} = 0,70–0,80$ $K_{FGS} = 0,55–0,70$ $K_{FGH} = 0,45–0,55$ $K_{FSW} = 0,70–0,80$
Maschinenzustand <ul style="list-style-type: none"> • gut • befriedigend • ausreichend 	$K_{FM} = 1,00$ $K_{FM} = 0,90–0,95$ $K_{FM} = 0,80–0,90$
Plandrehen	$K_{FP} = 1,00$
Innendrehen <ul style="list-style-type: none"> • $D > 150$ mm • $D = 70–150$ mm • $D < 70$ mm Konturdrehen	$K_{FI} = 1,00$ $K_{FI} = 0,90$ $K_{FI} = 0,8$ $K_{FK} = 1,00$

Tabelle A2: Korrekturfaktoren (nach INFOS)

Werkstoff	Schnittgeschwindigkeit v_c [m/min]	Vorschub f_z [mm]
Unlegierter Stahl bis 600 N/mm ²	130–415	0,09–0,5
Unlegierter Stahl > 600 N/mm ²	120–312	0,06–0,5
Niedriglegierter Stahl und Stahlguss bis 900 N/mm ²	100–240	0,06–0,4
Niedriglegierter Stahl und Stahlguss > 900 N/mm ²	90–221	0,06–0,4
Hochlegierter Stahl und Stahlguss bis 1.000 N/mm ²	90–221	0,06–0,3
Hochlegierter Stahl und Stahlguss > 1.000 N/mm ²	30–208	0,06–0,3
Nichtrostender Stahl und Stahlguss, ferritisch/martensitisch	125–295	0,06–0,3
Nichtrostender Stahl und Stahlguss, austenitisch	95–250	0,06–0,25

Tabelle A3: Richtwerte für das Messerkopfstrirfräsen (nach Kennametal, Walter, Seco)

6.2 Fräsen

6.2.1 Messerkopfstrirfräsen

Tabelle A3 zeigt Richtwerte für das Messerkopfstrirfräsen von Stahlwerkstoffen mit beschichteten Hartmetall-Wendeschneidplatten. Es ergeben sich große Bereiche von anwendbaren Schnittgeschwindigkeiten durch die Vielzahl unterschiedlicher Hartmetalle und Beschichtungen.

6.2.2 Schafffräsen

Beim Schafffräsen werden neben HSS-Werkzeugen auch zunehmend Vollhartmetallfräser eingesetzt. In Abhängigkeit vom Werkzeugdurchmesser ist der Vorschub pro Zahn (f_z) zu begrenzen. Richtwerte für das Schafffräsen mit unbeschichteten HSS-Werkzeugen sind den **Tabellen A4 bis A6** zu entnehmen. Richtwerte für das Schafffräsen mit beschichteten HSS-Fräsern sind in den **Tabellen A7 bis A9** aufgeführt. Durch den Einsatz von Hartmetallwerkzeugen können die Schnittparameter erhöht werden (**Tabelle A10**).

Werkstoff	Schnittgeschwindigkeit v_c [m/min]	Fräserdurchmesser d [mm]	
		4–10	> 10–20
		Vorschub f_z [mm]	
Stahl bis 400 N/mm ²	30–40	0,013–0,037	0,037–0,079
Stahl > 400 bis 600 N/mm ²	29–33	0,013–0,037	0,037–0,079
Stahl > 600 bis 850 N/mm ²	26–31	0,012–0,034	0,034–0,073
Stahl > 850 bis 1.100 N/mm ²	20–26	0,011–0,031	0,031–0,066
Stahl > 1.100 bis 1.400 N/mm ²	15–20	0,010–0,028	0,028–0,059
Rost-/säure-/hitzebeständige Stähle bis 850 N/mm ²	10–18	0,011–0,031	0,031–0,066
Rost-/säure-/hitzebeständige Stähle > 850 bis 1.100 N/mm ²	9–14	0,010–0,028	0,028–0,059
Rost-/säure-/hitzebeständige Stähle > 1.100 bis 1.400 N/mm ²	7–12	0,009–0,025	0,025–0,053

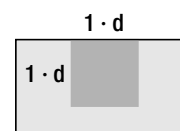


Tabelle A4: Richtwerte für das Schafffräsen mit unbeschichteten HSS-Werkzeugen (nach Emuge – Franken)

Werkstoff	Schnittgeschwindigkeit v_c [m/min]	Fräserdurchmesser d [mm]	
		4–10	> 10–20
		Vorschub f_z [mm]	
Stahl bis 400 N/mm ²	30–40	0,016–0,042	0,042–0,092
Stahl > 400 bis 600 N/mm ²	29–33	0,016–0,042	0,042–0,092
Stahl > 600 bis 850 N/mm ²	26–31	0,014–0,039	0,039–0,085
Stahl > 850 bis 1.100 N/mm ²	20–26	0,013–0,035	0,035–0,077
Stahl > 1.100 bis 1.400 N/mm ²	15–20	0,012–0,032	0,032–0,069
Rost-/säure-/hitzebeständige Stähle bis 850 N/mm ²	10–18	0,013–0,035	0,035–0,077
Rost-/säure-/hitzebeständige Stähle > 850 bis 1.100 N/mm ²	9–14	0,012–0,032	0,032–0,069
Rost-/säure-/hitzebeständige Stähle > 1.100 bis 1.400 N/mm ²	7–12	0,010–0,028	0,028–0,062

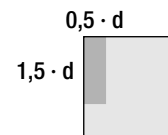


Tabelle A5: Richtwerte für das Schafffräsen mit unbeschichteten HSS-Werkzeugen (nach Emuge – Franken)

Werkstoff	Schnittgeschwindigkeit v_c [m/min]	Fräserdurchmesser d [mm]	
		4–10	> 10–20
		Vorschub f_z [mm]	
Stahl bis 400 N/mm ²	30–40	0,017–0,044	0,044–0,091
Stahl > 400 bis 600 N/mm ²	29–33	0,017–0,044	0,044–0,091
Stahl > 600 bis 850 N/mm ²	26–31	0,015–0,041	0,041–0,084
Stahl > 850 bis 1.100 N/mm ²	20–26	0,014–0,037	0,037–0,076
Stahl > 1.100 bis 1.400 N/mm ²	15–20	0,013–0,033	0,033–0,068
Rost-/säure-/hitzebeständige Stähle bis 850 N/mm ²	10–18	0,014–0,037	0,037–0,076
Rost-/säure-/hitzebeständige Stähle > 850 bis 1.100 N/mm ²	9–14	0,013–0,033	0,033–0,068
Rost-/säure-/hitzebeständige Stähle > 1.100 bis 1.400 N/mm ²	7–12	0,011–0,030	0,030–0,061

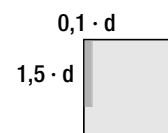


Tabelle A6: Richtwerte für das Schafffräsen mit unbeschichteten HSS-Werkzeugen (nach Emuge – Franken)

Werkstoff	Schnittgeschwindigkeit v_c [m/min]	Fräserdurchmesser d [mm]	
		4–10	> 10–20
		Vorschub f_z [mm]	
Stahl bis 400 N/mm ²	60–80	0,014–0,041	0,041–0,088
Stahl > 400 bis 600 N/mm ²	54–66	0,014–0,041	0,041–0,088
Stahl > 600 bis 850 N/mm ²	50–62	0,013–0,037	0,037–0,080
Stahl > 850 bis 1.100 N/mm ²	45–53	0,012–0,034	0,034–0,073
Stahl > 1.100 bis 1.400 N/mm ²	28–35	0,011–0,031	0,031–0,066
Rost-/säure-/hitzebeständige Stähle bis 850 N/mm ²	20–30	0,012–0,034	0,034–0,073
Rost-/säure-/hitzebeständige Stähle > 850 bis 1.100 N/mm ²	14–20	0,011–0,031	0,031–0,066
Rost-/säure-/hitzebeständige Stähle > 1.100 bis 1.400 N/mm ²	10–14	0,010–0,027	0,027–0,058



Tabelle A7: Richtwerte für das Schafffräsen mit beschichteten HSS-Werkzeugen (nach Emuge – Franken)

Werkstoff	Schnittgeschwindigkeit v_c [m/min]	Fräserdurchmesser d [mm]	
		4–10	> 10–20
		Vorschub f_z [mm]	
Stahl bis 400 N/mm ²	60–80	0,017–0,047	0,047–0,101
Stahl > 400 bis 600 N/mm ²	54–66	0,017–0,047	0,047–0,101
Stahl > 600 bis 850 N/mm ²	50–62	0,015–0,043	0,033–0,092
Stahl > 850 bis 1.100 N/mm ²	45–53	0,014–0,039	0,039–0,084
Stahl > 1.100 bis 1.400 N/mm ²	28–35	0,013–0,035	0,035–0,076
Rost-/säure-/hitzebeständige Stähle bis 850 N/mm ²	20–30	0,014–0,039	0,039–0,084
Rost-/säure-/hitzebeständige Stähle > 850 bis 1.100 N/mm ²	14–20	0,013–0,035	0,035–0,076
Rost-/säure-/hitzebeständige Stähle > 1.100 bis 1.400 N/mm ²	10–14	0,011–0,031	0,031–0,067

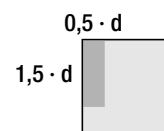


Tabelle A8: Richtwerte für das Schafffräsen mit beschichteten HSS-Werkzeugen (nach Emuge – Franken)

Werkstoff	Schnittgeschwindigkeit v_c [m/min]	Fräserdurchmesser d [mm]	
		4–10	> 10–20
		Vorschub f_z [mm]	
Stahl bis 400 N/mm ²	60–80	0,018–0,038	0,038–0,100
Stahl > 400 bis 600 N/mm ²	54–66	0,018–0,038	0,038–0,100
Stahl > 600 bis 850 N/mm ²	50–62	0,017–0,035	0,035–0,091
Stahl > 850 bis 1.100 N/mm ²	45–53	0,015–0,032	0,032–0,083
Stahl > 1.100 bis 1.400 N/mm ²	28–35	0,014–0,029	0,029–0,075
Rost-/säure-/hitzebeständige Stähle bis 850 N/mm ²	20–30	0,015–0,032	0,032–0,083
Rost-/säure-/hitzebeständige Stähle > 850 bis 1.100 N/mm ²	14–20	0,014–0,029	0,029–0,075
Rost-/säure-/hitzebeständige Stähle > 1.100 bis 1.400 N/mm ²	10–14	0,012–0,026	0,026–0,066

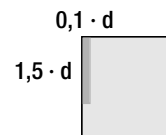


Tabelle A9: Richtwerte für das Schafffräsen mit beschichteten HSS-Werkzeugen (nach Emuge – Franken)

Werkstoff	Schnittgeschwindigkeit v_c [m/min]	Fräserdurchmesser d [mm]		
		5	8	12
		Vorschub f_z [mm]		
Stahl bis 1.000 N/mm ²	70–180	0,020–0,090	0,030–0,140	0,036–0,220
Stahl bis 1.400 N/mm ²	50–140	0,020–0,080	0,030–0,130	0,036–0,200
Stahl bis 54 HRC	50–100	0,020–0,065	0,030–0,100	0,036–0,160
Hochwarmfeste Werkstoffe	30– 80	0,020–0,045	0,030–0,095	0,036–0,130



Tabelle A10: Richtwerte für das Schafffräsen mit beschichteten HM-Werkzeugen (nach Emuge – Franken)

6.3 Bohren

6.3.1 Bohren mit Spiralbohrern

Richtwerte für die Schnittgeschwindigkeit und für den Vorschub in Abhängigkeit vom Bohrerdurchmesser sind für das Spiralbohren in den **Tabellen A11 bis A13** zusammengefasst. Diese Richt-

werte gelten für folgende Arbeitsbedingungen:

- Eine ausreichende Kühlschmierstoffzufuhr ist gewährleistet.
- Ein- und Austrittsflächen am Werkstück liegen senkrecht zur Bohrerachse.
- Die Spanabfuhr wird nicht durch Vorrichtungen (z. B. Bohrbuchse) beeinträchtigt.

Die angegebenen Schnittwerte gelten für Bohrungstiefen bis zum Dreifachen des Bohrerdurchmessers. Werden die Bohrungstiefen erhöht, sollten Schnittgeschwindigkeit und Vorschub entsprechend verringert werden.

Werkstoff	Beispiele	Schnittgeschwindigkeit v_c [m/min]	Bohrerdurchmesser d [mm]					
			2	4	6	8	10	20
			Vorschub f [mm]					
Niedriglegierter Stahl und Stahlguss bis 700 N/mm²	S235JR; C10+A; GE200; C35; C10E+A; 16MnCr5+A; 20MnCr5+A	20–50	0,03–0,05	0,06–0,10	0,08–0,15	0,07–0,20	0,13–0,23	0,25–0,375
Niedriglegierter Stahl und Stahlguss > 700 bis 1.000 N/mm²	E360; C45+QT; 60S22; 36Mn5+QT; C45E+QT; 34Cr4+QT	20–36	0,02–0,05	0,04–0,1	0,06–0,15	0,08–0,20	0,10–0,23	0,175–0,34
Niedriglegierter Stahl und Stahlguss > 1.000 bis 1.300 N/mm²	G46MnSi4; 36CrNiMo4+QT; 42CrMo4+QT; 50CrMo4+QT	8–22	0,02–0,035	0,04–0,065	0,06–0,105	0,08–0,14	0,10–0,16	0,175–0,24
Stahl 1.300 bis 1.600 N/mm², Federstahl federhart, verschleißfester Stahl 360–440 HB	60SiMn5; 55NiCrMoV6+QT; 58CrV4; 16CrMo5-2	4–19	0,030	0,04–0,06	0,06–0,09	0,06–0,12	0,10–0,135	0,175–0,205
Werkzeugstahl gegläht, unlegiert	C110U; C135U; C85U	10–26	0,02–0,04	0,4–0,08	0,06–0,12	0,08–0,16	0,10–0,18	0,175–0,27
Werkzeugstahl, niedriglegiert, gegläht, Kugellagerstahl, gegläht	51CrV4; 60WCrV8; 55NiCrMoV6; 100Cr6	8–24	0,02–0,04	0,04–0,08	0,06–0,12	0,08–0,16	0,10–0,18	0,175–0,27
Werkzeugstahl, hochlegiert, gegläht	HS6-5-2C; X210Cr12; X38CrMo16; X37CrMoV5-1	6–17	0,02–0,04	0,04–0,08	0,06–0,12	0,08–0,16	0,10–0,18	0,175–0,27
Rost-, säure- und hitzebeständiger Stahl und Stahlguss	X6CrAl13; X12Cr13; GX7CrNiMo12-2; X46Cr13+A; X17CrNi16-2	10–17	0,02–0,045	0,04–0,09	0,06–0,13	0,08–0,17	0,10–0,2	0,175–0,3
Rost-, säure- und hitzebeständiger Stahl und Stahlguss, austenitisch, geschwefelt	X8CrNiS18-9	10–20	0,02–0,03	0,04–0,06	0,06–0,09	0,08–0,12	0,10–0,135	0,175–0,205
Rost-, säure- und hitzebeständiger Stahl und Stahlguss (Ni > 4%), austenitisch	X5CrNi18-10; GX10CrNi18-8; X6CrNiTi18-10	9,5–14	0,020	0,040	0,060	0,080	0,091–0,10	0,175–0,145

Tabelle A11: Richtwerte für das Bohren mit unbeschichteten HSS-Spiralbohrern (nach Titex Plus und Garant)

Werkstoff	Beispiele	Schnittgeschwindigkeit v_c [m/min]	Bohrerdurchmesser d [mm]					
			2	4	6	8	10	20
			Vorschub f [mm]					
Niedriglegierter Stahl und Stahlguss bis 700 N/mm²	S235JR; C10+A; GE200; C35; C10E+A; 16MnCr5+A; 20MnCr5+A	31–67	0,03–0,06	0,06–0,12	0,10–0,18	0,11–0,24	0,14–0,275	0,275–0,41
Niedriglegierter Stahl und Stahlguss > 700 bis 1.000 N/mm²	E360; C45+QT; 60S22; 36Mn5+QT; C45E+QT; 34Cr4+QT	25–60	0,02–0,06	0,04–0,12	0,06–0,18	0,09–0,24	0,11–0,275	0,187–0,41
Niedriglegierter Stahl und Stahlguss > 1.000 bis 1.300 N/mm²	G46MnSi4; 36CrNiMo4+QT; 42CrMo4+QT; 50CrMo4+QT	7,5–42	0,02–0,04	0,04–0,08	0,06–0,12	0,09–0,16	0,11–0,18	0,187–0,27
Stahl 1.300 bis 1.600 N/mm², Federstahl federhart, verschleißfester Stahl 360–440 HB	60SiMn5; 55NiCrMoV6+QT; 58CrV4; 16CrMo5-2	6–19	0,02–0,025	0,04–0,05	0,06–0,075	0,09–0,1	0,11–0,115	0,185–0,17
Werkzeugstahl geölt, unlegiert	C110U; C135U; C85U	13–45	0,02–0,05	0,04–0,1	0,06–0,15	0,09–0,2	0,11–0,23	0,187–0,34
Werkzeugstahl, niedriglegiert, geölt, Kugellagerstahl, geölt	51CrV4; 60WCrV8; 55NiCrMoV6; 100Cr6	10–45	0,050	0,04–0,1	0,06–0,15	0,09–0,2	0,11–0,23	0,187–0,34
Werkzeugstahl, hochlegiert, geölt	HS6-5-2C; X210Cr12; X38CrMo16; X37CrMoV5-1	7,5–28	0,050	0,04–0,1	0,06–0,15	0,09–0,2	0,11–0,23	0,187–0,34
Rost-, säure- und hitzebeständiger Stahl und Stahlguss	X6CrAl13; X12Cr13; GX7CrNiMo12-2; X46Cr13+A; X17CrNi16-2	13–28	0,02–0,06	0,04–0,12	0,06–0,18	0,240	0,11–0,275	0,187–0,41
Rost-, säure- und hitzebeständiger Stahl und Stahlguss, austenitisch, geschwefelt	X8CrNiS18-9	13–34	0,02–0,035	0,04–0,065	0,06–0,105	0,140	0,11–0,16	0,187–0,24
Rost-, säure- und hitzebeständiger Stahl und Stahlguss (Ni > 4%), austenitisch	X5CrNi18-10; GX10CrNi18-8; X6CrNiTi18-10	10–19	0,02–0,025	0,04–0,05	0,060–0,075	0,100	0,11–0,115	0,187–0,17

Tabelle A12: Richtwerte für das Bohren mit beschichteten HSS-Spiralbohrern (nach Titex Plus und Garant)

Werkstoff	Beispiele	Schnittgeschwindigkeit v_c [m/min]	Bohrerdurchmesser d [mm]				
			4	6	8	10	20
			Vorschub f [mm]				
Niedriglegierter Stahl und Stahlguss bis 700 N/mm²	S235JR; C10+A; GE200; C35; C10E+A; 16MnCr5+A; 20MnCr5+A	60–200	0,06–0,18	0,08–0,24	0,10–0,29	0,13–0,39	0,20–0,57
Niedriglegierter Stahl und Stahlguss > 700 bis 1.000 N/mm²	E360; C45+QT; 60S22; 36Mn5+QT; C45E+QT; 34Cr4+QT	60–130	0,06–0,17	0,09–0,23	0,11–0,29	0,15–0,39	0,20–0,57
Niedriglegierter Stahl und Stahlguss > 1.000 bis 1.300 N/mm²	G46MnSi4; 36CrNiMo4+QT; 42CrMo4+QT; 50CrMo4+QT	50–80	0,06–0,17	0,09–0,23	0,11–0,28	0,15–0,37	0,20–0,50
Stahl 1.300 bis 1.600 N/mm², Federstahl federhart, verschleißfester Stahl 360–440 HB	60SiMn5; 55NiCrMoV6+QT; 58CrV4; 16CrMo5-2	26–50	0,03–0,09	0,05–0,12	0,06–0,14	0,07–0,18	0,10–0,25
Werkzeugstahl gegläht, unlegiert	C110U; C135U; C85U	70–110	0,04–0,11	0,05–0,19	0,07–0,20	0,09–0,27	0,13–0,40
Werkzeugstahl, niedriglegiert, gegläht, Kugellagerstahl, gegläht	51CrV4; 60WCrV8; 55NiCrMoV6; 100Cr6	70–80	0,04–0,12	0,05–0,20	0,07–0,21	0,09–0,28	0,13–0,41
Werkzeugstahl, hochlegiert, gegläht	HS6-5-2C; X210Cr12; X38CrMo16; X37CrMoV5-1	60–70	0,04–0,13	0,05–0,21	0,07–0,22	0,09–0,29	0,13–0,42
Rost-, säure- und hitzebeständiger Stahl und Stahlguss	X6CrAl13; X12Cr13; GX7CrNiMo12-2; X46Cr13+A; X17CrNi16-2	50–80	0,04–0,14	0,05–0,22	0,07–0,23	0,09–0,30	0,13–0,43
Rost-, säure- und hitzebeständiger Stahl und Stahlguss, austenitisch, geschwefelt	X8CrNiS18-9	50–70	0,03–0,12	0,05–0,18	0,06–0,21	0,07–0,25	0,10–0,38
Rost-, säure- und hitzebeständiger Stahl und Stahlguss (Ni > 4%), austenitisch	X5CrNi18-10; GX10CrNi18-8; X6CrNiTi18-10	40–60	0,03–0,10	0,05–0,14	0,05–0,17	0,05–0,22	0,07–0,32

Tabelle A13: Richtwerte für das Bohren mit beschichteten HM-Spiralbohrern (nach Titex Plus und Kennametal)

Werkstoff	Bohrerdurchmesser [mm]			
	d = 12,7–17	d = 17,5–41,3	d = 42–80	d = 12,7–80
	Vorschub f [mm/U]			Schnittgeschwindigkeit v _c [m/min]
Unlegierter Stahl, nicht vergütet, 0,05–0,1% C	0,04–0,08	0,04–0,10	0,08–0,12	230–380
Unlegierter Stahl, nicht vergütet, > 0,1–0,25% C	0,04–0,08	0,04–0,12	0,08–0,14	225–345
Unlegierter Stahl, nicht vergütet, > 0,25–0,55% C	0,04–0,10	0,04–0,20	0,12–0,24	190–290
Unlegierter Stahl, nicht vergütet, > 0,55–0,80% C	0,04–0,10	0,06–0,20	0,12–0,24	170–275
Unlegierter Stahl mit hohem C-Gehalt und Werkzeugstahl	0,04–0,10	0,06–0,20	0,12–0,24	200–275
Niedriglegierter Stahl, nicht vergütet	0,04–0,10	0,06–0,18	0,12–0,22	180–290
Niedriglegierter Stahl, vergütet	0,04–0,10	0,06–0,20	0,12–0,24	90–230
Hochlegierter Stahl, geglüht	0,08–0,10	0,04–0,20	0,12–0,24	160–275
Hochlegierter Stahl, gehärtet	0,04–0,10	0,06–0,18	0,12–0,22	80–200

Tabelle A14: Richtwerte für das Bohren mit HM-Wendeschneidplatten-Werkzeugen (nach Sandvik Coromant 2008)

6.3.2 Bohren mit HM-Wendeschneidplattenbohrern

Richtwerte für die Bearbeitung von unterschiedlichen Stählen mit Wendeschneidplattenbohrern sind in **Tabelle A14** verzeichnet. Die Werte gelten für die Bearbeitung mit Hartmetallschneiden, wobei eine ausreichende Zufuhr von Kühlschmierstoff vorausgesetzt wird.

7 Literatur

- [1] Adams, Ch.:
Trockenbearbeitung in der industriellen Anwendung.
In: Perspektiven der Zerspantechnik - Entwicklung und Integration der Fertigungsprozesse von morgen, Oktober 2002.
Hrsg.: Lehrstuhl für Technologie der Fertigungsverfahren, WZL, RWTH Aachen, ISBN 3-926690-10-0.
- [2] Autorengruppe:
Werkstoffkunde Stahl, Band 1: Grundlagen.
1984, VDEh, Springer-Verlag.
- [3] Leistungsfähigere und zuverlässigere Präzisionsbauteile.
2003, Balzers AG, Liechtenstein.

[4] Barry, J., et al.:
Application Areas of PCBN Materials. Industrial Diamond Review 66 (2006) 3, pp. 46–53.

[5] Berg, H. van den, u. a.:
Moderne Fertigungstechnologien in der Hartmetallindustrie.
In: Pulvermetallurgie in Wissenschaft und Praxis, Band 19: Pulvermetallurgie Material - Prozeß - Anwendung. 2003.
Hrsg.: H. Kolaska, Fachverband Pulvermetallurgie, Hagen, ISBN 3-933842-67-0.

[6] Bobzin, K., Lugscheider, E., Pintero, C.:
Neue PVD-Schichtkonzepte für hochbeanspruchte Werkzeuge für umweltverträgliche Fertigungsprozesse.
In: Materialwissenschaft und Werkstofftechnik Wiley-VCH, Bd. 35, S. 851–857, 2004, Weinheim, Berlin.

- [7] Bobzin, K., Lugscheider, E., Maes, M., Pinero, C.: Relation of hardness and oxygen flow of Al₂O₃ coatings deposited by reactive bipolar pulsed magnetron sputtering. In: Thin Solid Films Elsevier Db. 494. San Diego (USA), pp. 255-262, November 2005.
- [8] Böhler Edelstahl Handbuch. 1998, Böhler Gesellschaft M. B. H., Kapfenberg, Österreich.
- [9] Bömcke, A.: Ein Beitrag zur Ermittlung der Verschleißmechanismen beim Zerspanen mit hochharten polykristallinen Schneidstoffen. Dissertation, RWTH Aachen, 1989.
- [10] Borbe, C., Schmidt, J.: Hartdrehen im unterbrochenen Schnitt. Mav 12 (1997).
- [11] Beschichtungslösungen für Ihre Werkzeuge. 2004, Produktinformation der Fa. CemeCon, Würselen.
- [12] Cronjäger, L.: Technologie des Tiefbohrens. Vortragstexte der VDI-Tagung „Tiefbohren in der spanenden Fertigung“. 1974, Heidelberg.
- [13] Cselle, T.: Coating for Tooling - Quo Vadis 2005? Proceedings of the 3rd International Conference „Coatings and Layers“. 7.-8. Oktober 2004, Rosnow (CZ).
- [14] Dammer, L.: Ein Beitrag zur Prozeßanalyse und Schnittwertvorgabe beim Messerkopfstrichfräsen. Dissertation, RWTH Aachen, 1982.
- [15] Daub, H. W., u. a.: Leistungspotentiale von Feinst- und Ultrafeinstkorn-Hartmetallen und ihre Herstellung. Pulvermetallurgie in Wissenschaft und Praxis, Band 11: Pulvermetallurgische Wege in die Zukunft. 1995, Hrsg.: H. Kolaska, DGM Informationsgesellschaft, Oberursel, ISBN 3-88355-216-X.
- [16] Dreyer, K., u. a.: Trends in der Hartmetallfertigung: Legierungen, Verfahren, Produkte. In: Pulvermetallurgie in Wissenschaft und Praxis, Band 13: Hartstoffe, Hartstoffschichten, Werkzeuge, Verschleißschutz. 1997, Hrsg.: R. Ruthardt, Werkstoff-Informationsgesellschaft, Frankfurt, ISBN 3-88355-252-6.
- [17] Dreyer, K., Westphal, F., Klocke, F. Gerschwiler, K.: Konzepte für die Bearbeitung schwerzerspanbarer Werkstoffe. In: Pulvermetallurgie in Wissenschaft und Praxis, Band 17: Pulvermetallurgie - Schlüssel zur Effizienzsteigerung. 2001, Hrsg.: H. Kolaska, Fachverband Pulvermetallurgie, Hagen, ISBN 3-933842-60-3.
- [18] Schnellarbeitsstähle Thyrapid. Produktinformation der Fa. Edelstahl-Witten auf der Internetseite www.dew-stahl.de.
- [19] Powder Metallurgy HSS. Produktinformation der Fa. Era-steel, Paris.
- [20] Ettmayer, P., Kolaska, H., Lengauer, W., Dreyer, K.: Cermetlegierungen - Metallurgie und Eigenschaften. Proceedings of the 13th International Plansee Seminar. Vol. 4, S. 191/208, 1993, Hrsg.: H. Bildstein und R. Eck, Plansee, Reutte.
- [21] Fascher, P., Klemz, R., Hüskes, H.-J., Schmidt, R., Bender, W.: Vereinfachte Wärmebehandlung. VDI-Z 21 (1980), S. 939-947.
- [22] Fieber, M.: Die Kontaktbedingungen in der Wirkfläche beim Einsatz beschichteter Werkzeuge als Grundlage zur Prozeßoptimierung am Beispiel der Innengewindefertigung. Dissertation, RWTH Aachen, 1995.
- [23] Foshag, S.: Kinematik und Technologie des Gewindefräsborens. Dissertation, TH Darmstadt, 1994.
- [24] Gerschwiler, K.: Untersuchungen zum Verschleißverhalten von Cermets beim Drehen und Fräsen. Dissertation, RWTH Aachen, 1997, Shaker Verlag Aachen, Band 27/98, ISBN 3-8265-4346-7.
- [25] Gerschwiler, K.: Untersuchung der Verschleißphänomene und Verschleißursachen in Zerspan- und Analogieverfahren. Schlussbericht zum BMBF-Verbundprojekt 03N5031B, 2004, Technische Informationsbibliothek, Hannover.
- [26] Gey, C., Kalss, W., Jungblut, F.: Neue Schichtsysteme für das High Performance Cutting. Tagungsband 4. Chemnitzer Produktionstechnisches Kolloquium „Technologische Innovationen für die Antriebs- und Bewegungstechnik“. S. 649-660, Verlag Wissenschaftliche Scripten, Zwickau, 2004.
- [27] Gille, G., et al.: Submicron and ultrafine grained hardmetals for microdrills and metal cutting inserts. 15th International Plansee Seminar, HM97, Reutte, 2001.

- [28] Großmann, G.:
Bevorzugte Anwendungsgebiete für PKB-Schneidstoffe.
VDI-Z, Special Werkzeuge, April 1997.
- [29] Hellmann, P.:
Verwertung von PM-Stählen.
In: Pulvermetallurgie in Wissenschaft und Praxis, Band 13: Hartstoffe, Hartstoffsichten, Werkzeuge, Verschleißschutz, 1997, Hrsg.: R. Ruthardt, Werkstoff-Informationsgesellschaft, Frankfurt, ISBN 3-88355-252-6.
- [30] Jochmann, S.:
Untersuchungen zur Prozess- und Werkzeugauslegung beim Hochpräzisionsharddrehen.
Dissertation, RWTH Aachen, 2001.
- [31] Kiefer, R., Benesovski, F.:
Hartmetalle.
1965, Springer-Verlag Wien, New York.
- [32] Klocke, F., Schulz, A., Gerschwiler, K., u. a.:
Saubere Fertigungstechnologien – Ein Wettbewerbsvorteil von morgen?
In: Aachener Perspektiven, 1996, Hrsg.: AWK Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium, VDI Verlag Düsseldorf, ISBN 3-18-401592-0.
- [33] Klocke, F., Eisenblätter, G.:
Systeme, Werkzeuge und Medien für die Minimalmenge.
In: VDI Berichte 1458, Praxis und Trockenbearbeitung, 1999, VDI Verlag Düsseldorf.
- [34] Klocke, F., Lung, D., Fritsch, R.:
Technologie der Hochleistungsbearbeitung.
In: Perspektiven der Zerspantechnik – Entwicklung und Integration der Fertigungsprozesse von morgen, Oktober 2002, Hrsg.: Lehrstuhl für Technologie der Fertigungsverfahren, WZL, RWTH Aachen, ISBN 3-926690-10-0.
- [35] Klocke, F., Gerschwiler, K.:
Trockenzerspanung von Schmiedeteilen – Chancen zur Kostensenkung nutzen.
VDI-Z 145 (2003) 5, S. 33–37.
- [36] Klocke, F., Gerschwiler, K.:
Das Technologienetz Trockenbearbeitung wird fortgesetzt – Bilanz einer erfolgreichen Beratungstätigkeit.
VDI-Z 145 (2003) 7/8, S. 37–40.
- [37] Kluft, W., König, W., Lutervelt, C. A. van, Nakayama, K., Pekelharing, A. J.:
Present Knowledge of Chip Control.
Annals of the Cirp 28 (1979) 2, pp. 441/455.
- [38] Koch, K.-F.:
Technologie des Hochpräzisionsharddrehens.
Dissertation, RWTH Aachen, 1996, Shaker Verlag.
- [39] Kölling, H.-D.:
Prozessoptimierung und Leistungssteigerung beim Schaftfräsen.
Dissertation, RWTH Aachen, 1986.
- [40] Kölker, W., Knoche, H.-J.:
Schneidstofftendenzen zum trockenen Wälzfräsen.
Werkstatt und Betrieb 4, 1999.
- [41] König, W., Gerschwiler, K., Osterhaus, G., u. a.:
Kühlschmierstoff – Eine ökologische Herausforderung an die Fertigungstechnik.
In: Aachener Perspektiven, 1993, Hrsg.: AWK Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium, VDI Verlag Düsseldorf, ISBN 3-18-401348-0.
- [42] König, W., Klocke, F.:
Fertigungsverfahren Drehen, Fräsen, Bohren.
8. neu bearbeitete Auflage, 2008, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, ISBN 978-3-540-23458-6.
- [43] Kolaska, H.:
Pulvermetallurgie der Hartmetalle.
1992, Hrsg.: Fachverband für Pulvermetallurgie, Hagen.
- [44] Kolaska, H., Dreyer, K.:
Hartmetalle, Cermets und Keramiken als verschleißbeständige Werkstoffe.
Metall 45 (1991) 3, S. 224–235.
- [45] Kratz, H.:
Belastungsoptimierte Werkzeuge in wichtigen Anwendungsgebieten der CBN Schneidstoffe.
Industrie Diamanten Rundschau Jg. 40 (2006) 3, S. 62–67.
- [46] Krieg, T.:
Eigenschaftsprofile von PVD-Werkzeugbeschichtungen für den Einsatz von umweltverträglichem Kühlschmierstoff beim Drehen und Bohren von Stahlwerkstoffen.
Dissertation, RWTH Aachen, 2001, Shaker Verlag Aachen, ISBN 3-8265-8391-4.
- [47] Kronenberg, M.:
Grundzüge der Zerspanungslehre, Band 1–3, 1963, Springer-Verlag, Berlin.
- [48] Leiseder, L.:
Industrielle Werkstückbearbeitung mit Werkzeugen zum Tiefbohren.
Maschinenmarkt 84 (1978) 42, S. 839–841.
- [49] Liermann, J.:
Harddrehen wälzbelasteter Bauteile.
Dissertation, RWTH Aachen, 1997, Shaker Verlag Aachen, Band 6/98, ISBN 3-8265-3456-5.
- [50] Lux, S.:
Einfluß von Oberflächenstrukturen auf den Verschleiß von Verzahnwerkzeugen aus Schnellarbeitsstahl.
Dissertation, RWTH Aachen, 1997.
- [51] Neises, A.:
Einfluß von Aufbau und Eigenschaften hochharter nichtmetallischer Schneidstoffe auf Leistung

- und Verschleiß im Zerspanprozeß mit geometrisch bestimmter Schneide.
Dissertation, RWTH Aachen, 1995.
- [52] Palm, I.:
Trockenbearbeitung in der industriellen Fertigung.
Vortragsband zum VDI-Seminar „Trockenbearbeitung von Metallen“, Stuttgart, 18. März 2003, Württembergischer Ingenieurverein.
- [53] Pekelharing, A. J.:
Unterbrochener Schnitt mit spröden Werkzeugen.
Technische Rundschau 71 (1979) 36, S. 21-24.
- [54] Reisner, S., Vogt, B.:
Prozessumstellung von Schleifen auf Hartfeindrehen.
IDR 36 (2002) 3, S. 182/184.
- [55] Richter, V., Ruthendorf, M. v.; Drobniewski, J.:
Perspektiven feinkörniger Hartmetalle.
In: Pulvermetallurgie in Wissenschaft und Praxis, Band 13: Hartstoffe, Hartstoffschichten, Werkzeuge, Verschleißschutz, 1997, Hrsg.: R. Ruthardt, Werkstoff-Informationsgesellschaft, Frankfurt, ISBN 3-88355-252-6.
- [56] Röttger, K.:
Walzen hartgedrehter Oberflächen.
Dissertation, RWTH Aachen, 2002, Shaker Verlag Aachen, 2003, ISBN 3-8322-177-2.
- [57] Handbuch der Zerspanung.
1996, Hrsg.: AB Sandvik Coromant, Sandviken, Schweden.
- [58] Schedler, W.:
Hartmetall für den Praktiker: Aufbau, Herstellung, Eigenschaften und industrielle Anwendung einer modernen Werkstoffgruppe.
1988, Hrsg.: Plansee Tizit, VDI Verlag Düsseldorf, ISBN 3-18-400803-7.
- [59] Schumann, H.:
„Metallographie“.
1980, 10. Aufl. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig.
- [60] Schulz, H. (Hrsg.), et al.:
Hochgeschwindigkeitsbearbeitung. WB Werkstatt und Betrieb 133 (2000) 9, HSC Sonderteil.
- [61] Schulz, H., Abele, E., Sahn, A.:
Technologie des HochgeschwindigkeitsfräSENS.
Seminarunterlagen zu „Hochleistungsverfahren für die rationelle Fertigung“ - VDI-Bildungswerk (33-07-14) Dresden, 10.-11. Mai 2001.
- [62] Schmidt, J.:
Mechanische und thermische Wirkungen beim Drehen gehärteter Stähle.
Dissertation, Universität Hannover, 1999, VDI Verlag.
- [63] Stahlschlüssel.
20. Auflage, Verlag Stahlschlüssel 2004, Wegst GmbH, Marbach, ISBN 3-922599-20-6.
- [64] Vieregge, G.:
Zerspanung der Eisenwerkstoffe.
1970, Verlag Stahleisen, Düsseldorf.
- [65] Warnecke, G.:
Spanbildung bei metallischen Werkstoffen.
1974, Technischer Verlag Resch, München.
- [66] Weinert, K., Thamke, D.:
Wirtschaftlichkeit der Trockenbearbeitung - Ermittlung der Kosten für unterschiedliche Kühlschmierstoffkonzepte.
wt Werkstattstechnik 88 (1998) 9/10.
- [67] Welk, R. W.:
Anforderungen an die Hartdrehmaschine; Vortrag, VDI-Seminar Hartbearbeitung im industriellen Einsatz.
Kassel, 30.09.-01.10.1999.
- [68] Winands, N.:
Hartdrehen aus der Umformwärme gehärteter Wälzlageringe.
Dissertation, RWTH Aachen, 1996.
- [69] Winkler, H.:
Zerspanbarkeit von niedriglegierten Kohlenstoffstählen nach gesteuerter Abkühlung.
1983, VDI Verlag Düsseldorf.
- [70] Witte, L.:
Spezifische Zerspankräfte beim Drehen und Bohren.
Dissertation, RWTH Aachen, 1980.
- [71] Yoshida, K., Saturo, K., Harada, T., Fukaya, T., Shiraishi, J., Nakai, T.:
High precision cutting and high speed interrupted cutting of hardened steel with PCBN tools.
Manufacturing Science and Engineering (1999) 10, pp. 825-830.

Mitverwendete Normen und Regelwerke

DIN ISO 513 und
DIN ISO 11054
sind auszugsweise wiedergegeben mit Erlaubnis des DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Maßgebend für das Anwenden der DIN-Normen ist deren Fassung mit dem neuesten Ausgabedatum, die bei der Beuth Verlag GmbH, Burggrafenstr. 6, 10787 Berlin, erhältlich ist.

VDI-Richtlinien VDI 3824
Qualitätssicherung bei der PVD- und CVD-Hartstoffbeschichtung. Blatt 1, März 2002, Blatt 2, Februar 1997, Blatt 3, Oktober 1999, Blatt 4, August 2001, Beuth Verlag Berlin.

VDI-Richtlinien VDI 2840
Kohlenstoffschichten. Grundlagen, Schichttypen und Eigenschaften. November 2005, Beuth Verlag Berlin.

- DIN 1412
Spiralbohrer aus Schnellarbeitsstahl.
März 2001, Beuth Verlag Berlin.
- DIN 4983
Klemmhalter mit Vierkantschaft und Kurzklemmhalter für Wendeschneidplatten - Aufbau der Bezeichnung.
Juli 2004, Beuth Verlag Berlin.
- DIN 6580
Begriffe der Zerspantechnik; Bewegung und Geometrie des Zerspanvorganges.
Oktober 1985, Beuth Verlag Berlin.
- DIN 6581
Begriffe der Zerspantechnik; Ergänzende Begriffe am Werkzeug, am Schneidkeil und an der Schneide.
Oktober 1985, Beuth Verlag Berlin.
- DIN 6582
Begriffe der Zerspantechnik; Bezugssysteme und Winkel am Schneidteil des Werkzeuges.
Oktober 1985, Beuth Verlag Berlin.
- DIN 6584
Begriffe der Zerspantechnik; Kräfte, Energie-Arbeit, Leistungen.
Oktober 1982, Beuth Verlag Berlin.
- DIN 8589-2
Fertigungsverfahren Spanen - Teil 2: Bohren, Senken, Reiben.
September 2003, Beuth Verlag Berlin.
- DIN 8589-4
Fertigungsverfahren Spanen - Teil 4: Hobeln, Stoßen, Einordnung, Unterteilung, Begriffe.
September 2003, Beuth Verlag Berlin.
- DIN EN 10027-1
Bezeichnungssysteme für Stähle. Teil 1: Kurznamen.
Oktober 2005.
Ersatz für DIN EN 10027-1, September 1992, und DIN V 17006-100:1999-04.
Beuth Verlag Berlin.
- DIN EN 10052
Begriffe der Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen.
Januar 1994, Beuth Verlag Berlin.
- DIN EN 10083
Vergütungsstähle - Teil 1: Allgemeine technische Lieferbedingungen.
Oktober 2006.
Teil 2: Technische Lieferbedingungen für unlegierte Stähle.
Oktober 2006.
Teil 3: Technische Lieferbedingungen für legierte Stähle.
Januar 2007.
Beuth Verlag Berlin.
- DIN EN 10085
Nitrierstähle - Technische Lieferbedingungen.
Juli 2001, Beuth Verlag Berlin.
- DIN EN 10087
Automatenstähle - Technische Lieferbedingungen für Halbzeug, warmgewalzte Stäbe und Walzdraht.
Januar 1999, Beuth Verlag Berlin.
- DIN EN 10088
Nichtrostende Stähle - Teil 1: Verzeichnis der nichtrostenden Stähle.
September 2005, Beuth Verlag Berlin.
- DIN ISO 513
Klassifizierung und Anwendung von harten Schneidstoffen für die Metallzerspanung mit geometrisch bestimmten Schneiden - Bezeichnung der Hauptgruppen und Anwendungsgruppen (ISO 513:2004).
November 2005, Beuth Verlag Berlin.
- DIN ISO 1832
Wendeschneidplatten für Zerspanwerkzeuge - Bezeichnung (ISO 1832:2004).
November 2005, Beuth Verlag Berlin.
- DIN ISO 5419
Spiralbohrer - Benennungen, Definition und Formen.
Juni 1998, Beuth Verlag Berlin.
- DIN ISO 11054
Schneidwerkzeuge - Bezeichnung der Schnellarbeitsgruppen (ISO 11054:2006).
September 2006, Beuth Verlag Berlin.
- DIN EN ISO 4287
Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren.
Oktober 1998, Beuth Verlag Berlin.
- DIN EN ISO 4957
Werkzeugstähle (ISO 4957:1999).
Februar 2001.
EN ISO 4957:1999, Ersatz für DIN 17350-10 und Bbl. 1 zu DIN 17350:1980-10,
Beuth Verlag Berlin.
- ISO 513
Classification and application of hard cutting materials for metal removal with defined cutting edges - Designation of the main groups and groups of application.
Oktober 2004, Beuth Verlag Berlin.
- ISO 3002/4
Basic quantities in cutting and grinding - Part 4: Forces, energy, power.
First edition, November 1984,
Beuth Verlag Berlin.
- ISO 3685
Tool-life testing with single-point turning tools.
Internationale Organization for Standardization, Genf, Schweiz.
November 1993, Beuth Verlag Berlin.

Anhang Werkstoffbezeichnungen

Frühere und heute gültige Kurznamen und Werkstoffnummern der in diesem Merkblatt genannten Stahl- und Stahlgussorten.

Kurzname nach DIN EN 10027-1	Werkstoffnummer	Überholter Kurzname	Kurzname nach DIN EN 10027-1	Werkstoffnummer	Überholter Kurzname
100Cr6	1.3505	–	C45+QT	1.0503	C 45V
11SMn30	1.0715	–	C45E	1.1191	Ck 45
11SMnPb30	1.0718	–	C45E+BY	1.1191	–
16MnCr5	1.7131	–	C45E+QT	1.1191	Ck 45V
16MnCr5+A	1.7131	16MnCr5G	C53E	1.1210	–
16MnCrS5	1.7139	–	C85U	1.1830	C 85 W
18CrNi8	1.5920	–	E360	1.0070	St70-2
20CrMoS2	1.7311	–	G46MnSi4	1.5121	46MnSi4V
20MnCr5+A	1.7147	20MnCr5G	GE200	1.0420	GS-38
20MoCr4	1.7321	–	GX10CrNi18-8	1.4312	G-X10CrNi18-8
30CrMoV9	1.7707	–	GX7CrNiMo12-1	1.4008	G-X8CrNi13
31CrMo12	1.8515	–	HS6-5-2	1.3243	S 6-5-2-5
34Cr4+QT	1.7033	34Cr4V	HS6-5-2-5	1.3243	S 6-5-2-5
34CrAlNi7-10	–	–	HS10-4-3-10	1.3207	S 10-4-3-10
34CrAlS5	1.8506	–	HS2-9-1-8	1.3247	S 2-10-1-8
35S20	1.0726	–	HS2-9-2	1.3348	S 2-9-2
36CrNiMo4	1.6511	–	HS6-5-2	1.3339	–
36CrNiMo4+QT	1.6511	36CrNiMo4V	HS6-5-2-5	1.3243	S 6-5-2-5
36Mn5+QT	1.1167	36Mn5V	HS6-5-2C	1.3343	S 6-5-2
38MnSiVS5	–	–	HS6-5-3	1.3344	S 6-5-3
38MnSiVS5+BY	–	–	S235JR	1.0038	S235JRG2
42CrMo4	1.7225	–	X10CrAlSi13	1.4724	X 10 CrAl 13
42CrMo4+QT	1.7225	42CrMo4V	X10CrAlSi25	1.4762	X 10 CrAl 24
46S20	1.0727	–	X12Cr13	1.4006	X10Cr13
50CrMo4+QT	1.7228	50CrMo4V	X15CrNiSi25-21	1.4841	X 15 CrNiSi 25 20
51CrV4	1.8159	50 CrV 4	X20CrMoV11-1	1.4922	X20CrMoV12-1
54NiCrMoS6	–	–	X20CrMoWV12-1	1.4935	–
55NiCrMoV6	1.2713	–	X210Cr12	1.2080	–
55NiCrMoV6+QT	1.2713	55NiCrMoV6V	X2CrNiMoCuWN25-7-4	1.4501	–
58CrV4	1.8161	–	X2CrNiMoN22-5-3	1.4462	–
60S22	1.0728	60 S 20	X37CrMoV5-1	1.2343	X 38 CrMoV 5 1
60SiMn5	1.5142	60 SiMn 5	X38CrMo16	1.2316	X 36 CrMo 17
60WCrV8	1.2550	60 WCrV 7	X39Cr13	1.4031	–
16CrMo5-2	1.8709	–	X46Cr13+A	1.4043	X46Cr13G
C10+A	1.0301	C 10G	X5CrNi18-10	1.4301	X 5 CrNi 18 9
C10E+A	1.1121	Ck 10G	X6Cr13	1.4000	–
C110U	1.1554	C 110 W	X6Cr17	1.4016	–
C135U	1.1573	–	X6CrAl13	1.4002	–
C15E	1.1141	Ck 15	X6CrNiTi18-10	1.4541	–
C35	1.0501	–	X8CrNiS18-9	1.4305	X8 CrNiS 18 9



Stahl-Zentrum

Stahl-Informations-Zentrum

Postfach 10 48 42
40039 Düsseldorf
E-Mail: siz@stahl-info.de
Internet: www.stahl-info.de