

Info-Reihe Massivumformung, Extraausgabe

***Massivumformteile
wirtschaftlich
spanen***

Info
EXTRA

Vorwort des Verfassers

„In den Lücken liegen die Potenziale“ ist ein Leitsatz, der leicht gesagt, aber nicht leicht in die Praxis umzusetzen ist. Er bedeutet nämlich für ein produzierendes Unternehmen, dass eingefahrene Grenzen zwischen Unternehmen oder Unternehmensteilen, zwischen Betrieben oder Abteilungen in Frage gestellt und gewohnte technologische Verfahren und Zuständigkeiten kritisch überdacht werden. Das eben ist nicht immer einfach. Aber es ist notwendig, denn die moderne Industrielwelt ist hochgradig arbeitsteilig organisiert. Jede Schnittstelle, jede „Lücke“ birgt die Gefahr von Verlusten. Es kommt folglich darauf an, die Schnittstellen so zu gestalten und so zu positionieren, dass ein Optimum an Qualität, Kosten und Zeit erreicht wird. In diesem Sinne ist es weit-sichtig und verdienstvoll, dass der Industrieverband Massivumformung e. V. nicht allein seine Umformverfahren beherrscht und betrachtet, sondern auch den Bereich der Fertigung berücksichtigt, der eng mit den Umformverfahren zusammenwirken muss – die spanende Fertigung. Das Spanen ist der Umformung vorgelagert, wenn es darum geht, Gesenke, Formen und Werkzeuge zum Schmieden, Fließpressen, Schneiden und Einsenken herzustellen.

Das Spanen ist nachgelagert, wenn aus Umformteilen Bauteile mit hochge-nauen Funktionsflächen zu fertigen sind. Die vorliegende Schrift kann und soll den intensiven und frühzeitigen Dialog zwischen dem Konstrukteur, dem Umformer und dem Spaner nicht ersetzen. Sie kann aber diesen Dialog begründen und einleiten und die Bedeutung der technologischen Schnittstellen zwischen dem Umformen und Spanen erhellen: Jedes Fertigungsverfahren hat ein Spektrum von Formen, Werkstoffen und Qualitäten, die es einfacher oder schwerer beherrscht. Das Wissen darüber ist eine wichtige Basis für wirtschaftliches Fertigen.

Diese Schrift ist aus der engen Zusammenarbeit des Verfassers mit dem Redaktionsbeirat des Industrieverband Massivumformung e. V. entstanden. Der Mitwirkung des Redaktionsbeirats ist zu danken, wenn praktische Aspekte des Spanens besonders beachtet werden konnten.

Hans Kurt Tönshoff
Professor emeritus für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen der
Leibniz Universität Hannover

30823 Garbsen, im April 2010

Vorwort des Herausgebers

Die Massivumformung in Deutschland hat eine führende Position in der Welt. Sie verdankt dies der ständigen Bereitschaft, sich kritisch mit ihren Möglichkeiten und Grenzen auseinanderzusetzen. Der Vergleich mit konkurrierenden Verfahren, die ständige Überprüfung des Leistungsspektrums und die Entwicklung neuer und verbesserter Verfahren und Verfahrenskombinationen sind Schlüssel zum Erfolg. Entscheidend ist die Suche nach Lösungen, die den Anforderungen der Kunden entsprechen und sich nicht allein auf den Umformprozess beschränken. Es gilt, die wirtschaftlich und technisch optimalen Schnittstellen innerhalb der Wertschöpfungskette zu definieren. In den allermeisten Fällen bedürfen ur- wie umgeformte Teile einer weiteren Bearbeitung, um als funktionale Komponente in größeren Modulen oder Systemen ihre meist tragende Rolle zu spielen. Gleichzeitig ist die Massivumformung selbst ein werkzeuggebundenes Verfahren. Die im Umformprozess benötigten Werkzeuge werden in aller Regel durch leistungsfähige Zerspanungsprozesse hergestellt. Im gesamten Verantwortungsbereich der Massivumformung als wesentlichem Glied der Wertschöpfungskette, angefangen bei der Werkzeugentwicklung bis zur optimalen

Weiterverarbeitung und Funktion, spielt die Wechselwirkung zwischen Zerspanungsprozess und Bauteilgestaltung eine entscheidende Rolle. In einem so wichtigen Feld ist die Aktualität der Daten und Fakten von entscheidender Bedeutung. Die vorliegende Schrift stellt den neuesten Stand der Zerspanungstechnik dar. Sie gibt dem Konstrukteur ebenso wie dem Prozessverantwortlichen wertvolle Hinweise für den wirtschaftlich und technisch erfolgreichen Einsatz der spanenden Bearbeitung.

Der vorliegende Band setzt die erfolgreiche EXTRA-Info-Reihe fort. Wir freuen uns, damit den an der Produkt- und Prozessentwicklung Beteiligten eine praktische und wissenschaftlich fundierte Handreichung geben zu können. Der größte Dank an den Autor ist eine vielfache aktive Nutzung dieser Schrift.

Dipl.-Ing. Hans Ulrich Volz
Vorsitzender des Ausschusses Öffentlichkeitsarbeit/Technische Information des
Industrieverband Massivumformung e. V.

58093 Hagen, im April 2010

Massivumformteile

wirtschaftlich spanen

Herausgeber:

Infostelle Industrieverband Massivumformung e. V.

Telefon: +49 2331 958830

Telefax: +49 2331 958730

Goldene Pforte 1

58093 Hagen, Deutschland

Internet: www.metaform.de

E-Mail: orders@metaform.de

Inhalt

1. Was heißt wirtschaftlich Spanen?	Seite
1.1. Planung	8
1.2. Kriterien	9
1.3. Einflüsse auf die Zerspanbarkeit	12
1.4. Ansätze zur Rationalisierung	13
2. Grundlagen	
2.1. Einteilung der spanenden Verfahren, Schneidkeil, Bewegungen	15
2.2. Spanbildung	18
2.3. Energieumsetzung und Kraftbedarf	20
2.4. Oberflächeneigenschaften	23
2.5. Werkzeugverschleiß	27
2.6. Schneidstoffe	30
2.7. Werkstoffeinfluss auf den Verschleiß	32
2.8. Spanformung	35
2.9. Kühlschmierung	37
2.10. NE-Metalle	40
3. Drehen	
3.1. Verfahrensarten, Kenngrößen, Maschinen	43
3.2. Werkzeuge zum Drehen	43
3.3. Kräfte und Leistung beim Drehen	48
3.4. Werkzeugführung	49
3.5. Hochgeschwindigkeitsdrehen (HSC)	50
3.6. Hartdrehen	52
3.7. Werkzeugüberwachung	55
3.8. NE-Metalle	56
3.9. Drehprobleme und Praxistipps	58
4. Bohren	
4.1. Verfahrensarten, Spanbildung	61
4.2. Werkzeuge	62
4.3. Werkzeughalter für rotierende Bohrwerkzeuge	68
4.4. Kräfte, Momente und Leistungen	69
4.5. Hartbohren	70
4.6. Tieflochbohren	72
4.7. Gewindebohren	73
4.8. Reiben	74
4.9. NE-Metalle	75
4.10. Bohrprobleme und Praxistipps	75

5. Räumen	Seite
<hr/>	
5.1. Verfahrensgrundlagen	77
5.2. Räumprobleme, Praxistipps	81
6. Fräsen	
<hr/>	
6.1. Verfahren, Fräsvorgang	83
6.2. Werkzeuge	86
6.3. Werkzeugführung, Fräsbahnen	87
6.4. Gratbildung	90
6.5. Hochleistungsfräsen, Hochgeschwindigkeitsfräsen	91
6.6. Werkzeug- und Formenbau	94
6.7. NE-Metalle	96
6.8. Fräsprobleme, Praxistipps	99
7. Schleifen	
<hr/>	
7.1. Grundlagen des Verfahrens	100
7.2. Schleifwerkzeuge	101
7.3. Oberflächengüte	104
7.4. Randzonenbeeinflussung	106
7.5. Abrichten von Schleifscheiben	108
7.6. Schleifkosten	110
7.7. Wälzschleifen	111
7.8. Bearbeitungsbeispiel Kurbelwelle	111
7.9. Schleifprobleme, Praxistipps	114
8. Literatur	
<hr/>	
Literatur	116
Bildernachweis	119
Normennachweis	120

Formeln und Gleichungen dieser Schrift werden so weit wie möglich als Größengleichungen angeschrieben, die die physikalischen Größen miteinander verknüpfen. Der Nutzer muss mit einer Dimensionsprüfung die zutreffende Maßeinheit ermitteln, z. B. $v_c = \pi \times d \times n$; v_c [m/min], d [mm], n [min⁻¹] erfordert Division durch 1 000, um mm in m umzurechnen. Nicht dimensionsrichtige, empirische Formeln müssen als Zahlenwertgleichung dargestellt werden. Die benutzten Maßeinheiten werden jeweils angegeben. Sie sind vom Nutzer entsprechend zu verwenden: z. B. die Taylor-Gleichung $v_c = C \times T^{1/k}$, T ist in Minuten einzusetzen, wie im Text angegeben.

1. Was heißt wirtschaftlich spanen?

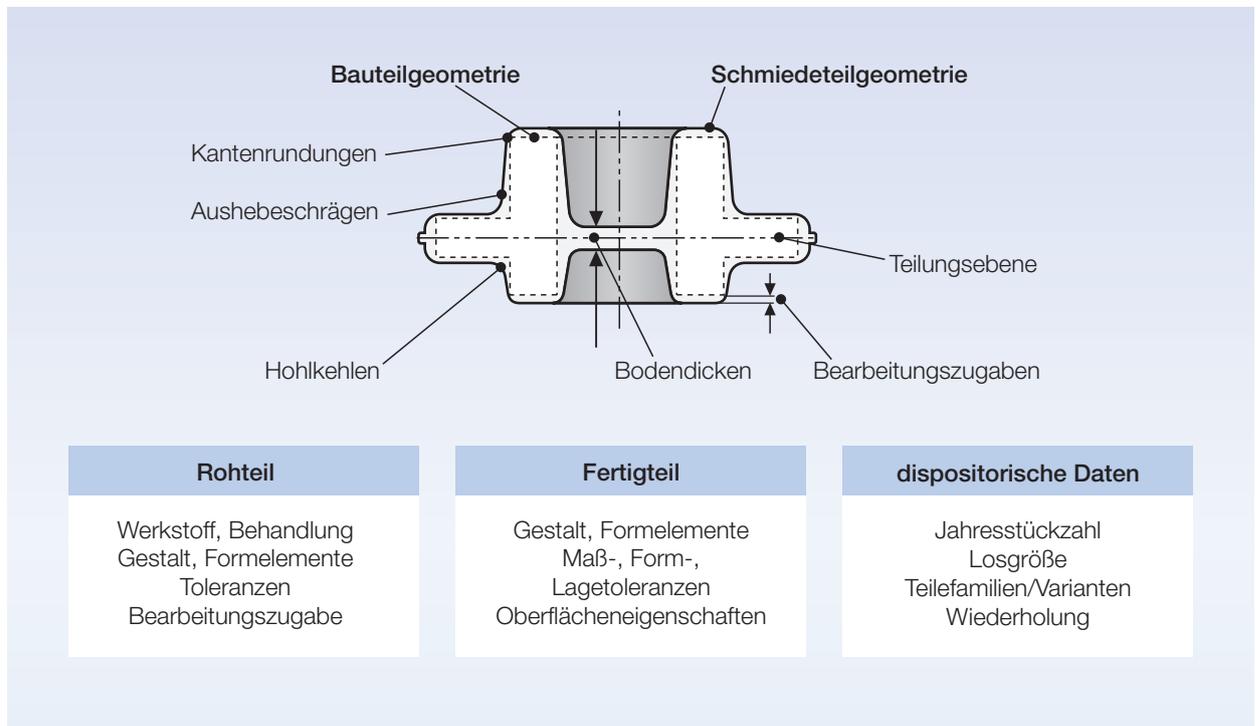


Bild 1.1: Eingangsgrößen der Planung.

1.1 Planung

Für die Planung einer Bearbeitungsaufgabe – so auch zur Planung einer spanenden Bearbeitung – müssen generell technologische und dispositorische Eingangsinformationen berücksichtigt werden (Bild 1.1).

Zu den technologischen Informationen gehören die Angaben über das Werkstück. Das Rohteil geht mit seinen geometrischen und stofflichen Eigenschaften in die Planung ein. Rohteildaten eines umgeformten Teils lassen sich nicht ohne weiteres aus dem Fertigteil, d. h. dem spanend bearbeiteten Teil, ableiten; vielmehr müssen die erforderlichen In-

formationen zwischen dem Umformer und Spaner abgestimmt werden. In der Literatur sind Angaben zur Gestaltung von Schmiedeteilen zu finden [AWIS89, IDS 95]. Von Interesse sind dabei neben geometrischen Solldaten, die die Größe und Form des Umformteils beschreiben, die möglichen Maß-, Form- und Lageabweichungen sowie die Oberflächenausprägung des Rohteils, weil diese Abweichungen sowohl bei der NC-Programmierung als geometrische Vorhalte als auch bei der Festlegung der technologischen Bearbeitungsvorgaben berücksichtigt werden müssen [DIN EN 10243 Teil 1 und 2].

Der Werkstoff, seine Zusammensetzung und sein Behandlungszustand bestimmen die für die spanende Bearbeitung anzusetzenden Schneidstoffe, die Schnittwerte und weitere Eingangsbedingungen der Bearbeitung. Die geometrische Beschreibung des Fertigteils oder seiner Zwischenzustände, wie sie in der zu planenden Bearbeitungsstufe erreicht werden sollen, werden nach Form und Größe vorgegeben. Dabei spielt für die Wahl der notwendigen Aufspannungen die Zugänglichkeit des Werkstücks bei der Bearbeitung eine wesentliche Rolle. Für die einzusetzenden Verfahren, Maschinen und Werk-

zeuge der spanenden Bearbeitung werden Informationen über die geometrischen Toleranzvorgaben des Fertigteils benötigt.

Zu den dispositiven Informationen gehört das Mengengerüst, mit dem ein Werkstück in der absehbaren Planungsphase gefertigt wird. Das sind die Gesamtstückzahl, mit der geplant wird, und die vorgesehenen Losgrößen, die voraussichtlich marktgängig sind oder nach interner Losgrößenoptimierung festgelegt werden. Die Möglichkeit von Teilfamilienbildungen, die zur Rationalisierung beitragen können, und die Varianten, in denen Werkstücke gefertigt werden, sowie die Wiederholhäufigkeiten dieser Varianten sollten bekannt sein und berücksichtigt werden; denn sie bergen interessante Rationalisierungspotenziale.

Mit den vorgenannten Eingangsinformationen kann dann eine wirtschaftliche Bearbeitung geplant werden (Tafel 1.1). Damit werden die Technologie, die einzusetzenden Maschinen, Werkzeuge und Vorrichtungen sowie die Arbeitsvorgaben festgelegt. Zur Technologie gehört die Wahl der einzusetzenden **Fertigungsverfahren**, die unmittelbar von den herzustellenden Formelementen, der Genauigkeit, mit der diese gefertigt werden müssen, von den Werkstoffeigenschaften und nicht zuletzt von der Verfügbarkeit im Betrieb abhängen. In dieser Phase der Planung wird auch festgelegt, in welchen **Aufspannungen** ein Werkstück gefertigt wird, die wieder wesentlich von der Zugänglichkeit und den **Formelementen** des Teiles bestimmt werden.

Im nächsten Planungsschritt werden die **Maschinen, Spannmittel** und **Werkzeuge** ermittelt, die die relevanten Fertigungsverfahren anwenden können. Dabei ist auch die Frage zu beantworten, ob eher mit einfachen nur über ein begrenztes Verfahrenspotenzial verfügbaren Maschinen und dafür auf einer größeren Zahl von Einzelmaschi-

nen gearbeitet wird, oder ob Maschinen für eine möglichst komplette Bearbeitung gewählt werden. Die Spannmittel werden den Maschinen und den Werkstücken entsprechend ausgewählt.

- die Fertigungsverfahren
- die Werkzeugmaschinen oder Maschinengruppen
- die Aufspannungen
- die zu bearbeitenden Formelemente
- die einzusetzenden Spannmittel
- die einzusetzenden Werkzeuge
- die Einstellbedingungen der Maschine
- die Mess- und Prüfmittel

Tafel 1.1: In der Arbeitsplanung festzulegende Daten.

Dann können im nächsten Planungsschritt die Arbeitsstufen bzw. Arbeitsschritte und die Maschineneinstellungen gewählt werden. Diese Informationen gehen schließlich in die Teilprogrammierung ein, also die Erstellung eines NC-Programms für jeden Arbeitsvorgang. Schließlich werden die Mess- und Prüfmittel festgelegt.

1.2 Kriterien

„Wirtschaftliches Spanen“ umfasst mehr als die Betrachtung von Kosten und Zeiten; gleichwohl sind Kosten- und Zeitrechnungen geeignet, die Wirtschaftlichkeit eines Verfahrens oder einer Bearbeitungstechnologie zahlenmäßig zu beschreiben. Fertigen zu geringen Kosten und in kurzen Zeiten sind wichtige Kriterien der Produktionstechnik. Von Interesse im Zusammenhang mit der Untersuchung eines oder mehrerer Fertigungsverfahren sind die Herstellkosten K_H und die Fertigungskosten K_F , denn die Herstellkosten setzen sich zusammen aus den Fertigungskosten und den Materialkosten K_{mat} .

$$K_H = K_{mat} + K_F \quad (1.1)$$

Für die spanende Bearbeitung von umgeformten Teilen zählen auch die Kosten für die Vorbearbeitung, also auch die Kosten für die Umformung zu den Materialkosten K_{mat} . Außerdem ist bei den Materialkosten zu berücksichtigen, dass der Schrottpreis für Späne (bei Stahl ca. 15 %) unter dem für das Rohmaterial aufgewandten Schrottschlag liegt. Da Schrottschläge meist auf Liefergewichte der Fertigteile gerechnet werden, kommt es durch die Zerspanung zu Negativerlösen. Diese müssen eingerechnet werden.

 **Bei den Materialkosten Differenz von Material- und Schrottpreisen beachten.**

Dass für Serienteile die spanende Bearbeitung einen wesentlichen Anteil an den Herstellkosten hat, zeigt Bild 1.2. Für drei typische Bauteile aus dem Fahr- und Triebwerk eines Personewagens sind die Material- und die Umformkosten sowie die Kosten für die spanende Bearbeitung, hier als mechanische Bearbeitung bezeichnet, aufgeführt. Die spanende Bearbeitung weist in diesen speziellen Beispielen 42 % bis 67 % der gesamten Herstellkosten aus. Allerdings hängen die zum Einsatz kommenden Technologien und, wie Gleichung (1.2) zeigt (Losgröße L im Nenner), auch die Herstellkosten entscheidend von den Stückzahlen ab, in denen gefertigt wird. So berichtet ein Serienhersteller für seine mechanische Bearbeitung von Bremsmontage-Flanschen, die in Jahresstückzahlen von ca. 130.000 mit einem hohen Automatisierungsgrad gefertigt werden, von Herstellkostenanteilen von nur 30 %.

Für die Bestimmung der Herstellkosten K_H wird die nachstehende Formel (1.2) angesetzt, die den Vorteil hat, den Haupteinfluss auf die Fertigungskosten, nämlich die Losgröße oder die Stückzahl, zu berücksichtigen, und die die Ab-

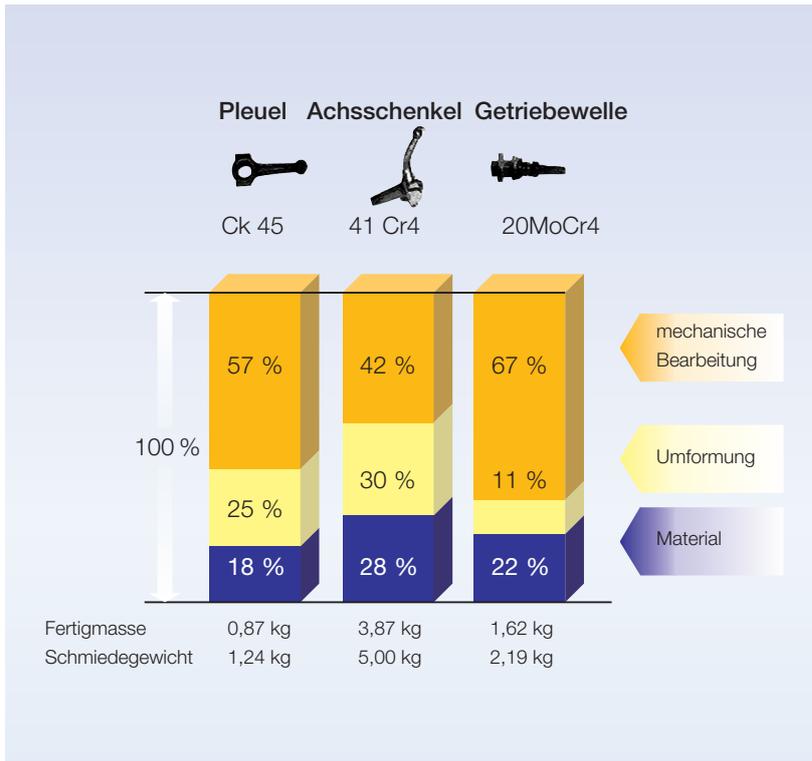


Bild 1.2: Herstellkosten von Serienteilen.

$$K_{wst} = K_{vo}/(A \times L) + K_{AW}/L + K_{HE} + K_{FO} \quad (1.2)$$

K_{wst}	[Euro/Stück]	Herstellkosten je Stück
K_{vo}	[Euro]	Vorbereitungskosten
K_{AW}	[Euro]	Auftragswiederholkosten
K_{HE}	[Euro/Stück]	Herstelleinzelkosten je Stück
K_{FO}	[Euro/Stück]	Folgekosten je Stück
A	[Anzahl]	Anzahl der Aufträge
L	[Anzahl]	Losgröße (Stück je Auftrag)

hängigkeit einzelner Kostenarten erkennen lässt [TÖNS95, S. 10-13].

Die Vorbereitungskosten K_{VO} berücksichtigen den Aufwand, der zu Beginn einer Fertigung eines neuen Werkstücks erbracht werden muss. Dazu gehören Kosten für die Planung dieser Fertigung, z. B. in der Arbeitsvorbereitung, für die Teileprogrammierung bei NC-Fertigung, für die Konstruktion und Herstellung werkstückspezifischer Vorrichtungen und Messmittel. Dieser Kostenanteil wird auf alle Werkstücke gleich

cher Art, die absehbar gefertigt werden, also auf $A \times L$ bezogen.

Auftragswiederholkosten K_{AW} fallen jedes Mal an, wenn ein an sich bereits geplantes Werkstück mit einem neuen Auftrag wieder in die Fertigung gegeben wird (1.3). Hierzu gehören die Kosten für die Erstellung der Arbeitspapiere und die Initiierung des Auftrags, die Rüstkosten der vorgesehenen Produktionseinheit, die während des Einrichtens für den Auftrag anfallen, sowie Rüstkosten, die außerhalb der Produktionseinheit, z. B.

im Rahmen der Werkzeugvoreinstellung oder beim Aufspannen von Paletten, entstehen. Dieser Kostenanteil wird auf alle Teile der Auftragslosgröße L verrechnet.

$$K_{AW} = (K_{MH} + K_{LH}) \times t_r \quad (1.3)$$

K_{MH}	[Euro/h]	Maschinenzeitsatz
K_{LH}	[Euro/h]	Lohn- und Lohnnebenkostenzeitsatz
t_r	[h]	Rüstzeit

Die Herstelleinzelkosten K_{HE} können direkt einem Werkstück zugeordnet werden (1.4). Das sind die Kosten für Material, z. B. für ein Schmiedeteil, Lohnkosten für den Maschinenführer, Kosten für die Belegung der Maschine, die sich aus dem Maschinenzeitsatz ergeben, und die Kosten für den Verbrauch von Werkzeugen je Zeiteinheit K_{WH} . Der Maschinenzeitsatz K_{MH} zusätzlich der Lohnkosten K_{LH} werden auch als Platzkosten K_{pl} bezeichnet.

$$K_{HE} = (K_{MH} + K_{WH}) \times t_c + K_{mat} \quad (1.4)$$

Der Maschinenzeitsatz K_{MH} berücksichtigt die Maschinen abhängigen Kosten. Zu diesen zählen die kalkulatorische Abschreibung, kalkulatorische Zinsen, Raum-, Instandhaltungs- und Energiekosten. Sehr überschlägig kann für die reinen Maschinenkosten ohne Lohn- und Werkzeugkosten mit **18 AW/10⁵ [Euro/h]** bei einschichtigem Betrieb gerechnet werden. Der Anschaffungswert AW (Anschaffung plus Nebenkosten) geht weitgehend linear ein. Bei zweischichtigem Betrieb und entsprechender Minderung der Abschreibungsdauer verringert sich der Zeitsatz auf **15 AW/10⁵ [Euro/h]**. Lohn- und Lohnnebenkosten sowie Werkzeugkosten sind hinzuzufügen.

$$K_{MH} = 15 \times AW \times 10^{-5} [\text{Euro/h}] \quad (1.5)$$

(Stand: 2008)

Zur genaueren Ermittlung wird auf die Literatur verwiesen [BMW08]. Ein Programm kann auch direkt heruntergeladen werden: www.softwarepaket.de/9.0/programme/stundenverrechnungssatz/

 **Maschinenstunde kostet €15 je € 100.000 Anschaffung + Lohn.**

Die Folgekosten K_{FO} ergeben sich durch Qualitätsprüfung, Ausschuss und durch Lagerung der Werkstücke im Zwischen- und Endlager.

Die Formel für die Werkstückkosten (1.2) enthält zwei mit der Losgröße gegenläufige Kostenanteile, die Auftragswiederholkosten und die Folgekosten. Daraus kann die kostenoptimale Losgröße nach Kurt Andler bestimmt werden (p : Zinssatz für Kapital und Bestände je Jahr):

$$L_{opt} = \sqrt{200 \times A \times K_{AW} / (p \times K_{wst})} \quad (1.6)$$

Das Ergebnis dieser Formel ist als obere Grenze für die Losgröße anzusehen; denn sie führt meist eher zu hohen Beständen und damit zu höheren indirekten Kosten.

Beispiel: Es sind $A = 10$ Aufträge in einer Planungsphase vorgesehen. Die Auftragswiederholkosten betragen das 1.000-fache der Herstellkosten je Teil $K_{AW} = 1.000 K_{wst}$ der Jahreszinssatz beträgt 6%. Damit ergibt sich eine optimale Losgröße von $L_{opt} = 577$ Stück je Auftrag.

Im Zusammenhang mit der Belegung einer Fertigungsanlage oder Werkzeugmaschine sind Zeitanteile der Belegung von Interesse [REFA93]. Die Belegungszeit T_B ergibt sich aus der

Summe von Zeitanteilen:

$$T_B = t_r + t_a \quad (1.7)$$

T_B Belegungszeit
 t_g Grundzeit
 t_a Ausführungszeit eines Auftrags
 t_v Verteilzeit
 $t_a = m \times t_e$
 t_h Hauptzeit
 m Losgröße
 t_n Nebenzeit
 t_r Rüstzeit
 t_b Ruhezeit

$$t_e = t_g + t_v \quad (1.8)$$

$$t_g = t_h + t_n + t_b \quad (1.9)$$

„Wirtschaftlich fertigen“ bedeutet häufig, dass Alternativen untersucht werden müssen. Die einfachste Methode neben anderen [TÖNS95, S.12] ist die Kostenvergleichsrechnung, in der die Stückkosten der Alternativen miteinander verglichen werden. Es wird also für zwei Alternativen I und II gefragt, welche Herstellkosten günstiger sind:

$$K_{HE I} < ? > K_{HE II} \quad (1.10)$$

Für spanende Bearbeitungen muss im Allgemeinen die Hauptzeit berechnet werden, wofür in den folgenden Abschnitten zu den einzelnen Verfahren die Grundlagen gelegt werden. Generell gilt, dass bei Schruppprozessen, wenn also ein Volumen V [cm³] von einem Ausgangsteil oder Rohteil – wie einem Schmiedeteil – abgespannt werden soll, die Hauptzeit t_h [min] aus dem Zeitspanvolumen QV [cm³/min] ermittelt wird nach:

$$t_h = V / QV \quad (1.11)$$

während sich die Hauptzeit t_h bei Schlichtprozessen einer Fläche von A [cm²] aus der Zeitspanfläche QA [cm²/min] ergibt nach:

$$t_h = A / QA \quad (1.12)$$

Für das Schruppen auf Drehmaschinen mittlerer Leistung (Nennleistung 25 kW) kann bei Hartmetallwerkzeugen mit $QV = 500$ cm³/min und für das Schlichten mit $QA = 250$ cm²/min gerechnet werden. Diese Werte können sich jedoch in weiten Grenzen ändern.

 **Schruppen ≤ 500 cm³/min, Schlichten ≤ 250 cm²/min.**

Für einen Verfahrensvergleich müssen neben der Wirtschaftlichkeit, die stark vom Verschleißverhalten der Werkzeuge abhängt, weitere Kriterien je nach Anwendung in Rechnung gestellt werden: Hohe Maß- und Formgenauigkeit setzt im Allgemeinen geringe Kräfte und niedrige Werkstücktemperaturen voraus. Für einen ungestörten Verlauf von Dreh- oder Bohrprozessen sind günstige Spanformen unerlässlich. Schlicht- und Feinschlichtprozesse sollen zu hohen Oberflächengüten führen. Generell und zunächst unabhängig von einer speziellen Bearbeitungsaufgabe wird daher die **Zerspanbarkeit** nach vier Kriterien beurteilt:

- Verschleißverhalten
- Kraft- und Leistungsbedarf
- Spanform
- Oberflächengüte.

Auf diese Kriterien wird im Folgenden vertieft eingegangen. Im speziellen Einzelfall muss jedoch geprüft werden, wo die anforderungsgerechten Grenzen und Optima eines spanenden Prozesses liegen.

1.3 Einflüsse auf die Zerspanbarkeit

Der **Werkstoff** eines Bauteils wird zunächst in der Konstruktion bestimmt, um den funktionalen Anforderungen an ein Bauteil zu genügen. Mechanische

macht deutlich, in welcher Weise Materialkosten K_{mat} und Bearbeitungskosten K_F komplementär sind; d. h. Einsparungen am Material und der Umformung auf Kosten der Zerspanbarkeit können sich durchaus negativ auf die Wirtschaftlichkeit auswirken. Daraus

schaftlichkeit hat der **Schneidstoff** des aktiven Werkzeugteils über seinen Verschleiß. Zwar liegen in der Serienfertigung die direkt durch den Verschleiß verursachten Werkzeugkosten häufig nur in der Größenordnung von 1/10 der gesamten Fertigungskosten, aber die durch begrenzte Standzeiten oder Standmengen verantworteten Kosten können ein Mehrfaches der direkten Werkzeugkosten sein. Daraus folgt, dass die Schneidstoffe sorgfältig an die Bearbeitungsaufgabe angepasst werden müssen.

Nach den Formeln (1.7) bis (1.9) gehen in die gesamte Belegungszeit T_B einer Fertigungsanlage für einen Auftrag neben den Hauptzeiten t_h die Nebenzeiten t_n und die Rüstzeiten t_r ein. Sämtliche Zeitanteile können erheblich durch die Art der **Werkzeuge** und ihrer Spann- und Haltersysteme und durch die **Maschinen** sowie ihrer Werkzeug-Speichersysteme beeinflusst werden.

Seit einiger Zeit sind die durch die **Kühlschmierung** von spanenden Prozessen verursachten Kosten in den Fokus gerückt [BYRS93]. Mit zentralen Kühlschmierstoffsystemen, wie sie in der Serienfertigung eingesetzt werden, können durchaus nennenswerte Kostenanteile an den Fertigungskosten verbunden sein (Bild 1.3). Das Ergebnis von Untersuchungen in der Automobilindustrie hat dazu geführt, dass ein erheblicher Entwicklungsfokus auf die Trockenbearbeitung und die Mindermengenkühlschmierung gelegt wurde. Derart große Kostenanteile, wie sie in Bild 1.3 wiedergegeben sind, werden allerdings von zuliefernden Serienherstellern, insbesondere kleineren und mittleren Betrieben, nicht annähernd in gleicher Höhe errechnet. Dort werden die Kosten für Kühlschmierstoffe im Bereich von weniger als 3 % gesehen.

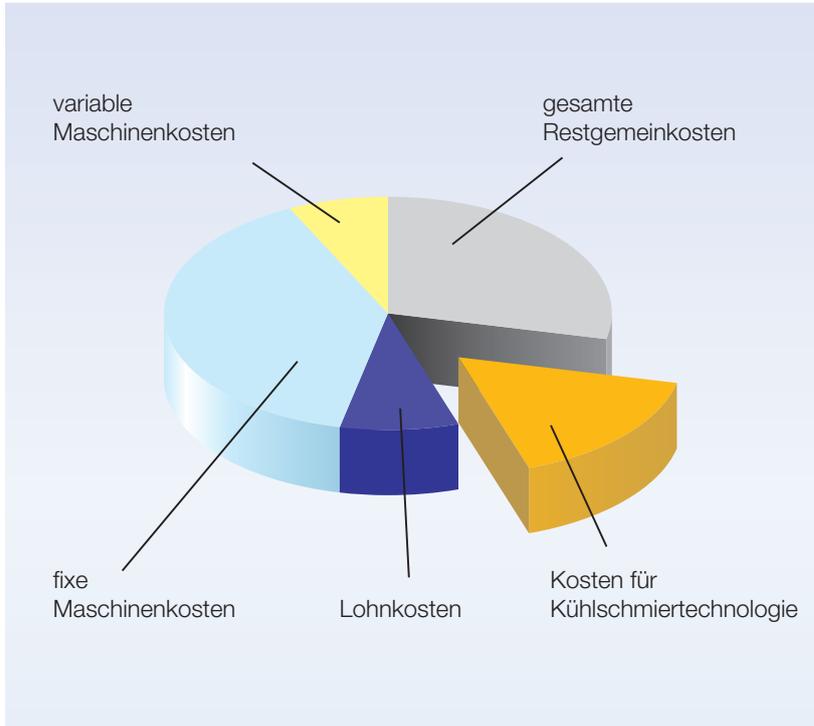


Bild 1.3: Kostengliederung für Kühlschmierstoffe (nach Byrne, Scholta).

Festigkeit unter statischen oder dynamischen Lasten, Härte und Verschleißfestigkeit eines Bauteils, seine Steifigkeit, sein Energieaufnahmevermögen und seine chemischen und thermischen Eigenschaften können hier maßgebend sein. Unter Wirtschaftlichkeitsaspekten ist allerdings die Zerspanbarkeit eines Werkstoffs von erstrangiger Bedeutung.

Bei Metallen hängt die Zerspanbarkeit ab von:

- der chemischen Zusammensetzung,
- dem Gefüge,
- der Erschmelzung,
- der Wärmebehandlung und
- der Randschicht des Rohteils.

Der oben erläuterte Zusammenhang der Herstellkosten K_H (Formel 1.1)

folgt, dass beim Einkauf von Materialien oder Rohteilen wie umgeformten Teilen fertigungstechnische Aspekte der nachfolgenden spanenden Bearbeitung berücksichtigt werden sollten. Es macht keinen Sinn, einen Euro am Schmiedeteil zu sparen, wenn dadurch drei Euro in der spanenden Bearbeitung zusätzlich aufgewandt werden müssen, wie man auch aus Bild 1.2 folgern kann.

Prüfen! Sind Bearbeitungskosten und Materialkosten gegenläufig?

Erheblichen Einfluss auf die Standzeit oder Standmenge eines spanenden Werkzeugs und damit auf die Wirt-

1.4 Ansätze zur Rationalisierung

Werkstücke werden in aller Regel in einer Folge von Arbeitsvorgängen oder Fertigungsstufen gefertigt. Rationalisierungsüberlegungen zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit und/oder der Qualität sollten daher nicht nur an einzelnen Arbeitsvorgängen oder Fertigungsstufen ansetzen, sondern sollten auf ein Gesamtoptimum über alle Stufen der Fertigung zielen. Dabei kann nach drei grundsätzlichen Alternativen in der Prozesskette gesucht werden, nach Adaption, Substitution und/oder Integration (A-S-I-Methode) [TÖNS87, TÖNS01] (Bild 1.4).

Adaption ist die günstige Abstimmung aufeinander folgender Prozesse wie z. B. die Abstimmung der Rohteilherstellung durch Schmieden und die anschließende spanende Bearbeitung. Jedes Fertigungsverfahren hat einen Katalog von Formen und Formelementen, die mit ihm einfach und kostengünstig herzustellen sind, und andere Formen, die nur mit größerem Aufwand gefertigt werden können. So sind z. B. durch Schmieden tiefe, steile Flanken aufwendig zu erzeugen, bei der anschließenden spanenden Bearbeitung bedeutet eine stärkere Konizität dagegen kaum Schwierigkeiten. Auch für die Einhaltung enger Toleranzen bei der Vorformung, z. B. durch Umformen, ist jeweils zu prüfen, ob der dadurch verursachte Aufwand mit Rücksicht auf die folgenden Prozesse zu rechtfertigen ist.

Die Entwicklung von Maschinen oder Werkzeugen oder geänderte Kostenstrukturen können Anlass für die **Substitution** eines Fertigungsverfahrens sein. Ein klassisches Beispiel ist das Hochgeschwindigkeitsfräsen im Formenbau etwa bei der Gesenkerstellung, das in weiten Bereichen die Bankarbeit, also die manuelle Nacharbeit

von Fräsrollen, abgelöst hat. Das Hochgeschwindigkeitsfräsen hat auch das Senkerodieren (auch Funkenerosion genannt) in den Fällen weitgehend abgelöst, wo es geometrisch möglich ist; denn das Senkerodieren kann neben möglichen Produktivitätsnachteilen auch

In Bild 1.5 sind eine konventionelle und eine durch mehrfache Substitution und Integration gewonnene stark verkürzte Prozesskette schematisch dargestellt. Die zitierte Methode wurde am Beispiel einer Zahradfertigung validiert. Der Erfolg dieses speziellen An-

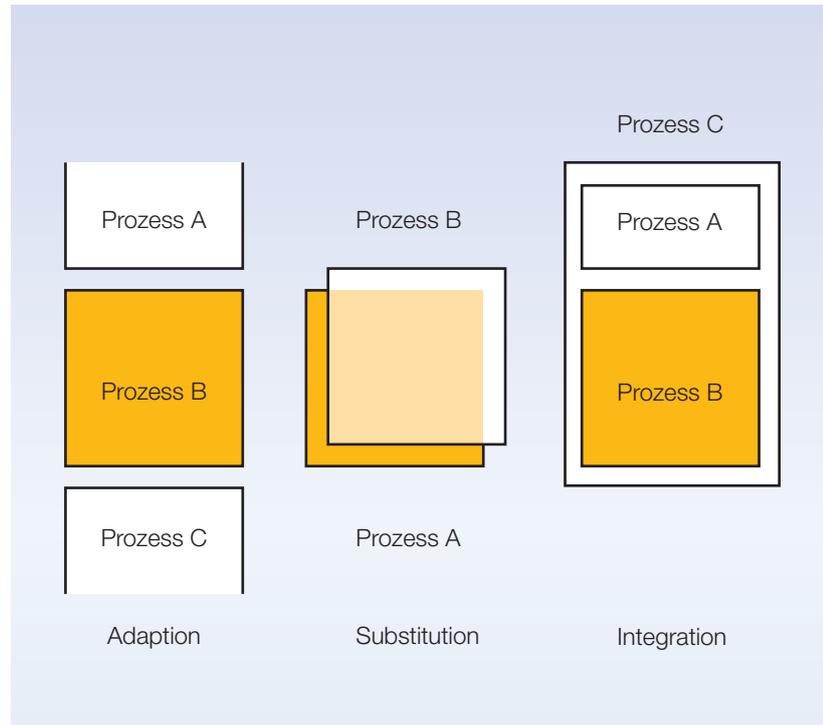


Bild 1.4: ASI-Methode zur Rationalisierung.

Probleme bei der Entsorgung des Erodierschlammes aufweisen.

Die **Integration** von Fertigungsstufen verkürzt die Arbeitsvorgangsfolge und ist häufig mit direkten Kosteneinsparungen, jedenfalls aber verkürzten Durchlaufzeiten durch eine Fertigung und mit verringertem Steuerungsaufwand, also mit geringeren indirekten Kosten, verbunden. Die Komplettbearbeitung von Werkstücken auf mehrachsigen Drehmaschinen oder Bearbeitungszentren sind aktuelle Beispiele für diesen Integrationsansatz.

In neuerer Zeit werden noch weitergehendere Ansätze verfolgt, die ein Gesamtoptimum einer ganzen Prozesskette zum Ziel haben [BRAN08].

satzes beruht auf der Substitution von Umform- und spanenden Weichbearbeitungsvorgängen durch eine Kombination des Präzisionsschmiedens, bei dem die Verzahnung ausgeprägt wird, und innovativen Hartbearbeitungen durch Drehen und Schleifen.

Zur Rationalisierung vor- und nachgelagerte Prozesse betrachten.

In der Konstruktionspraxis folgt die Methode **Design for Machining** dem eben erläuterten Ansatz der **Adaption** aufeinander folgender Prozesse. In aller Regel schließt sich an die umformtechnische Herstellung eines Formteils eine spanende Bearbeitung an. Die Ab-

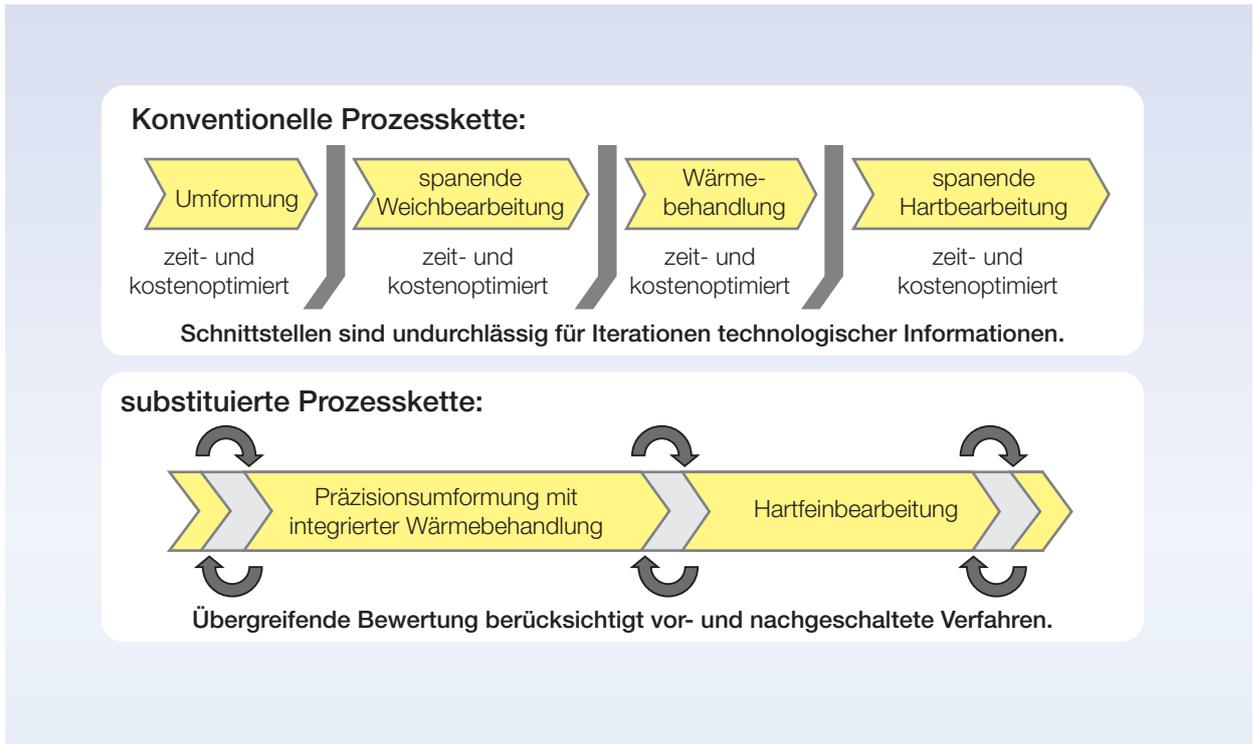


Bild 1.5: Prozesskettenoptimierung.

stimmung zwischen diesen Fertigungsprozessen kann interessante Ratio-Effekte enthalten.

Ein hervorragendes Beispiel für dieses Vorgehen gibt Bild 1.6 durch Auslegung der letzten Gravur im Schmiedegesenk derart, dass die anschließend durch Spanen zu bearbeitende Fläche freigestellt wird, lassen sich zwei Vorteile erreichen: Zum einen kann der Zapfen mit höherem Vorschub überdreht werden, weil am Vorschubende nicht in Materialanhäufung hineingefahren wird. Zum anderen wird durch den Ein- und Auslauf der spanend erzeugten Zylinderfläche in eine sich kegelig verjüngende Fläche das nach dem Spanen sonst notwendige Entgraten entbehrlich.

Auf Gratbildung wird in Abschnitt 6.4 im Zusammenhang mit dem Fräsen noch einmal eingegangen.

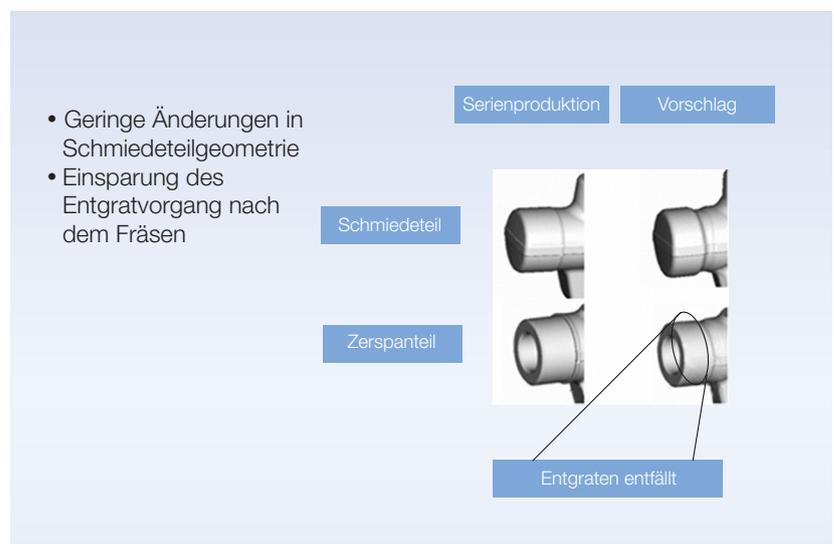


Bild 1.6: Optimierung eines Schmiedeteils (nach Hirschvogel Komponenten, Schongau).

2. Grundlagen

2.1 Einteilung der spanenden Verfahren, Schneidkeil und Bewegungen

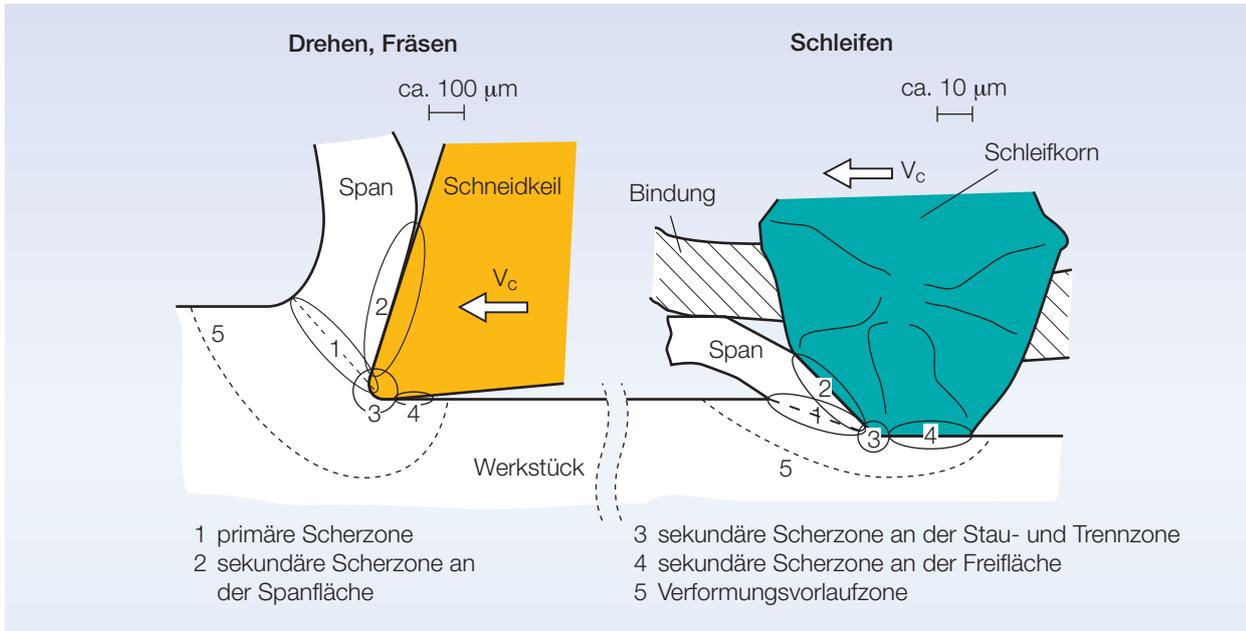


Bild 2.1: Schneidkeile beim Spanen mit geometrisch bestimmten und unbestimmten Schneiden.

Spanen ist Fertigen durch Stofftrennen. Von einem Rohteil werden durch die Schneiden eines Werkzeugs Stoffteile in Form von Spänen mechanisch getrennt, indem Schneidkeile in den Werkstückstoff eindringen. Beim Dre-

hen arbeitet man in der Regel mit einer Schneide, beim Fräsen mit mehreren und beim Schleifen mit einer Vielzahl von Schneiden. Beim Spanen mit bestimmten Schneiden (Drehen, Bohren, Fräsen, Räumen u. a.) sind die

Schneidkeile nach Form, Lage und Anzahl bekannt und beschreibbar. Beim Spanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden (Schleifen, Honen, Läppen u. a.) lassen sich nur statistische Größen wie Mittelwerte und Ver-

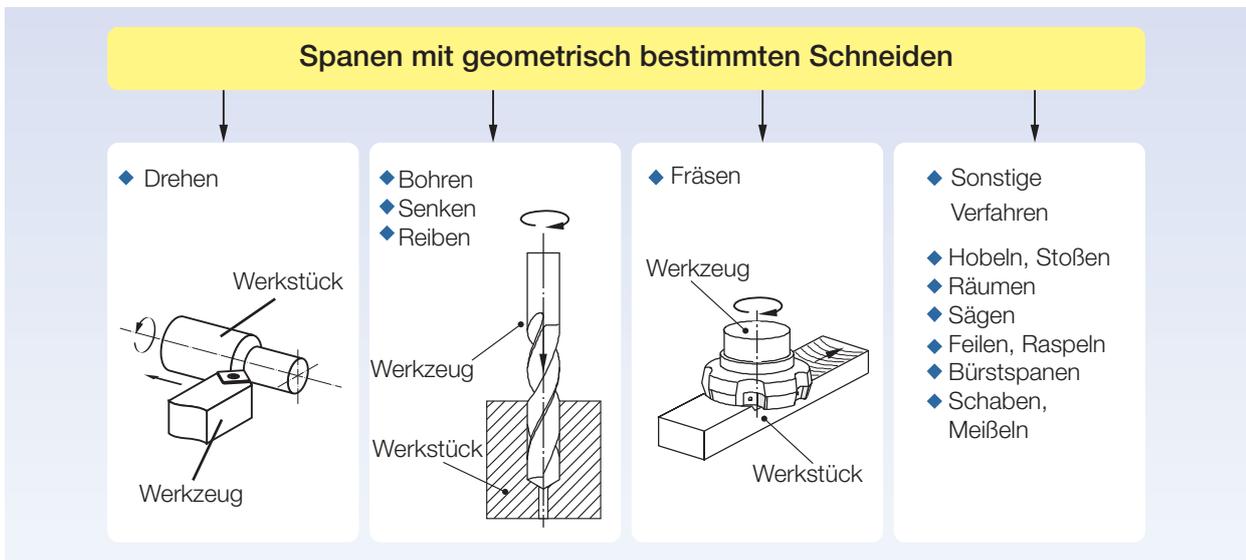


Bild 2.2: Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden (nach DIN 8589-0).

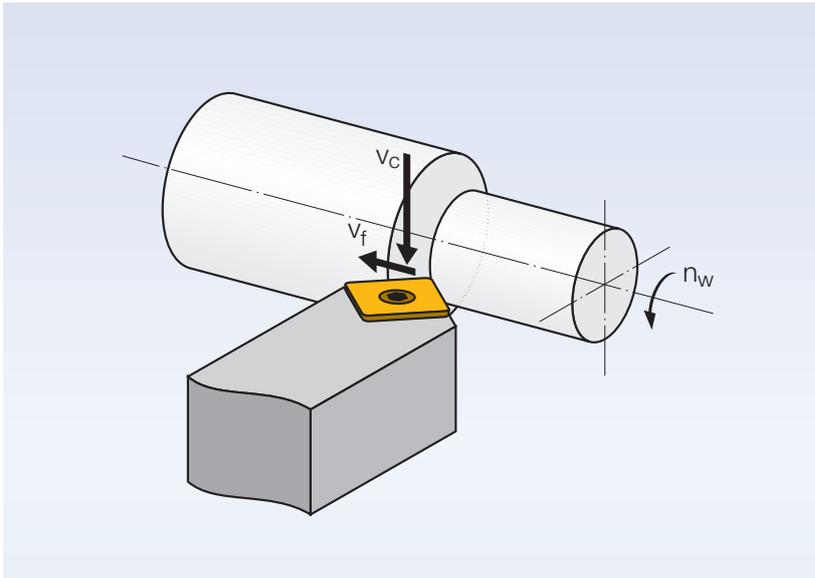


Bild 2.3: Geschwindigkeiten beim Spanen.

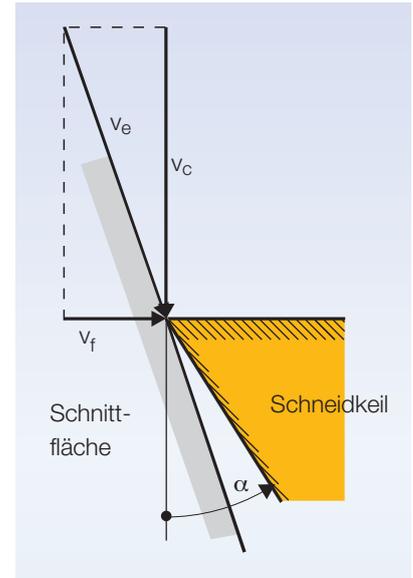


Bild 2.4: Wirkbewegungen und Freiwinkel.

teilungen über das Haufwerk von Schneiden angeben (Bild 2.1)

Wegen der erheblichen Unterschiede in den Spanbildungsvorgängen, den Einsatzbedingungen und Anwendungen werden Schleifverfahren später gesondert behandelt. Bild 2.2 gibt eine Einteilung der wichtigsten spanenden Verfahren mit geometrisch bestimmten Schneiden wieder.

Am Beispiel des Drehens werden die Bewegungen zwischen Werkstück und Werkzeug und die Winkel am Schneidkeil erläutert. Bei jedem spanenden Ver-

fahren gibt es grundsätzlich zwei Bewegungen: Die Schnittbewegung, die beim Drehen meist durch die Drehbewegung n_w des Werkstücks erzeugt wird und die Vorschubbewegung, mit der das Werkzeug verfahren wird (Bild 2.3).

Die entsprechenden Geschwindigkeiten sind in den Bildern 2.3 und 2.4 eingetragen als:

$$v_c = \pi \times d_w \times n_w \quad (2.1)$$

- v_c Schnittgeschwindigkeit
- v_f Vorschubgeschwindigkeit
- d_w Werkstückdurchmesser
- n_w Drehzahl
- v_e Wirkgeschwindigkeit

Aus dem Zusammenwirken der beiden Geschwindigkeiten v_c und v_f zur resultierenden Wirkgeschwindigkeit v_e folgt zwangsläufig, dass jeder Schneidkeil einen Freiwinkel haben muss (Bild 2.4).

Jedes spanende Werkzeug braucht einen Freiwinkel, sonst drückt es.

Auch die übrigen Winkel am Schneidkeil sind für den Zerspanvorgang von großer Bedeutung (Bild 2.5).

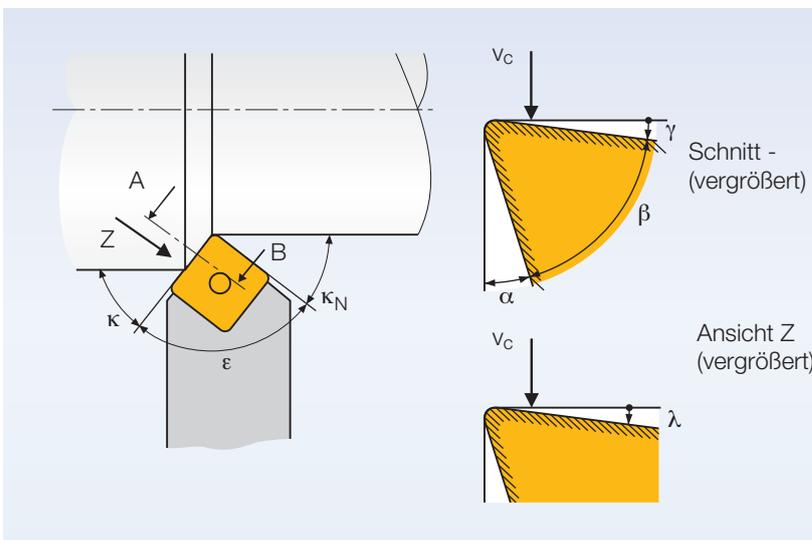


Bild 2.5: Winkel am Schneidkeil.

- Es sind:
- α Freiwinkel
 - β Keilwinkel $\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ$
 - γ Spanwinkel
 - ϵ Eckenwinkel
 - κ Einstellwinkel
 - κ_N Einstellwinkel der Nebenschneide
 - λ Neigungswinkel

Der Freiwinkel α ist, wie oben erläutert, notwendig, damit ein Werkzeug überhaupt schneidet. Er ist immer positiv und liegt meist zwischen 5° bis 8° . Der Spanwinkel γ wird in der eingezeichneten Richtung positiv gezählt, er kann auch negativ sein, womit der komplementäre Keilwinkel β vergrößert und damit das Werkzeug verstärkt wird. Bei negativem Spanwinkel wird allerdings der Zerspanvorgang kraftmäßig erschwert. Die Scherung und die Stoffverformung sind größer. Daher sollte der Spanwinkel an den Werkstoff und die übrigen Zerspanungsbedingungen angepasst werden. Die Hersteller von Wendeschneidplatten bieten entsprechende Werkzeugformen an, worauf im Zusammenhang mit den einzelnen Verfahren noch eingegangen wird.

Mit dem Einstellwinkel κ lässt sich die Eingriffslänge der Hauptschneide vergrößern, die spezifische Belastung der Schneide kann dadurch verringert werden. Daher wird bei schweren Schruppschnitten gern mit geringerem Einstellwinkel um 45° gearbeitet. Eine zu große Eingriffslänge der Schneide fördert allerdings die Ratterneigung, d. h. das Auftreten von selbsterregten Schwingungen, die zum Werkzeugbruch führen können und die Werkstückoberfläche unzulässig beeinträchtigen. Ein großer Eckenwinkel ϵ verstärkt den Schneidkeil. Er erleichtert zudem den Wärmeabfluss von der Wärmequelle an der Spitze des Werkzeugs und senkt damit das Temperaturniveau im Schneidkeil. Bei Schruppschnitten wird daher ein großer Eckenwinkel gewählt. Der Einstellwinkel der Nebenschneide κ_N wird meist durch die Form der Schneidplatte bestimmt. Für besondere Feinbearbeitungsaufgaben, wo bei höherem Vorschub eine hohe Oberflächengüte erzeugt werden soll, wird κ_N stark verkleinert und kann gegen Null gehen (Schleppschneide, Wiper-Technologie).

Der Schneidkeil ist der aktive Teil des Werkzeugs, das im Bild 2.6 als gebautes Werkzeug mit einer Wendeschneidplatte dargestellt ist. Der Schneidkeil wird durch drei Flächen gebildet, die Freifläche, die Spanfläche, über die der Span abgleitet, und die Nebenfrefläche, die zur neu entstandenen Fläche am Werkstück weist. Die Kante der Freifläche mit der Spanfläche wird als Hauptschneide bezeichnet, die Kante der Nebenfrefläche mit der Spanfläche als Nebenschneide. Die Bezugsebene liegt normal zur Schnittgeschwindigkeit

(im Bild 2.6 wurde der Einfachheit halber das Werkzeugbezugssystem gewählt).

Aus den Bewegungen des Werkzeugs gegen das Werkstück folgt das Vorrücken der Schneide je Umdrehung des Werkstücks um den Vorschub f . Es ist also $v_f = f \times n_w$. Daraus und aus der Zustellung oder der Schnitttiefe a_p ergibt sich der Spanungsquerschnitt $A = a_p \times f$ (Bild 2.7).

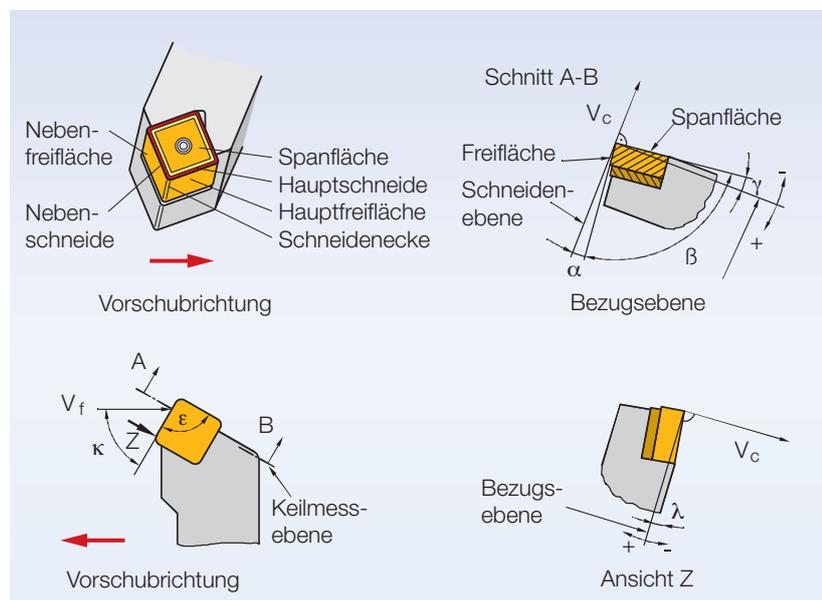


Bild 2.6: Bezeichnungen am Drehwerkzeug (nach DIN 6580 und 6581 bzw. ISO 3002-1 und 3002-3).

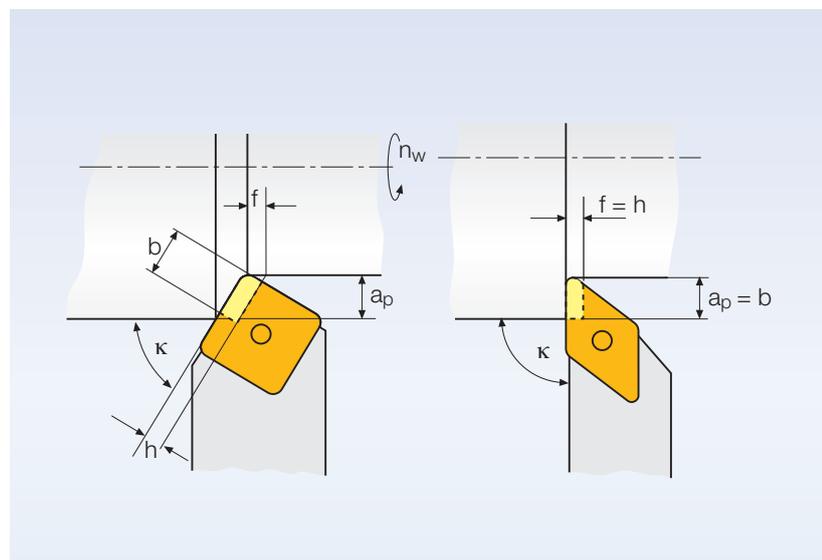


Bild 2.7: Schnitt- und Spanungsgrößen.

Dieser Spanungsquerschnitt kann auch durch die Spanndicke h und die Spannbreite b beschrieben werden: $A = h \times b$. Die Größen a_p und f werden als Schnittgrößen, h und b als Spanungsgrößen bezeichnet. Es gilt offenbar:

$$h = f \times \sin \kappa \quad (2.2)$$

$$b = a_p / \sin \kappa \quad (2.3)$$

Wenn der Verformungsvorgang vor der Spanfläche betrachtet wird, arbeitet man mit den Spanungsgrößen b und h , wenn es um die Maschineneinstellung geht, werden die Schnittgrößen f und a_p angesetzt.

2.2 Spanbildung

Beim Spanen dringt ein Schneidkeil in den Werkstoff ein, wodurch dieser plastisch verformt wird und als Span über die Spanfläche des Schneidkeils abgleitet. Dieser Vorgang lässt sich in der Keilmessebene, in welcher der Stofffluss stattfindet, darstellen (Bild 2.8).

Die Keilmessebene liegt senkrecht zur Schneide. Der Spanungsquerschnitt (im Bild schraffiert) wird durch Verschieben des Schneidkeils bei jeder Umdrehung des Werkstücks (wie z. B. beim Drehen) gebildet. Der Span wird mit der Drehbewegung des Werkstücks abgetrennt.

Bild 2.9 zeigt einen angeätzten Schliff durch eine Spanwurzel und einen Span. Durch das Schwarz-Weiß-Gefüge des Werkstoffs (schwarz: Perlit, weiß: Ferrit) sind die Verformungen sichtbar. Das Verformungsgeschehen lässt sich besonders gut in Filmaufnahmen verfolgen. Dazu wird eine polierte und geätzte Probe gegen eine Quarzglasplatte gepresst und durch Querdrehen bearbeitet. Durch die Quarzglasplatte lässt sich der Vorgang in Vergrößerung beobachten. Bewegungsscharfe Auf-

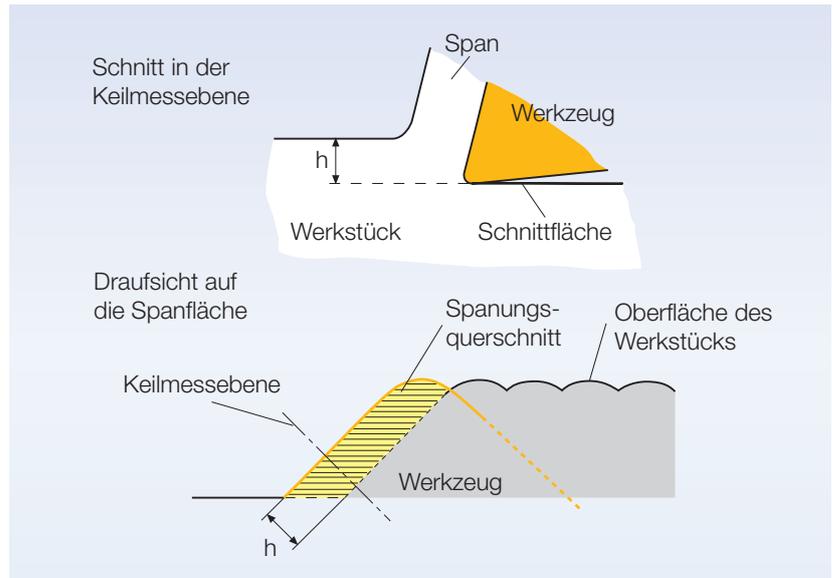


Bild 2.8: Spanungsquerschnitt und Schneidkeil.

nahmen sind allerdings nur bis zu Schnittgeschwindigkeiten von 1 m/min möglich [WARN88]. Der Film kann auf der Internetseite der IWF Wissen und Medien GmbH unter: www.iwf.de/iwf/do/mkat/details.aspx?Si gnatur=e+2949, angesehen werden.

Je nach Werkstoff und Zerspanungsbedingungen lassen sich folgende Spanbildungsarten unterscheiden (Bild 2.10):

- Fließspanbildung
- Lamellenspanbildung
- Scherspanbildung
- Reißspanbildung.

Fließspanbildung ist die kontinuierliche Spanentstehung. Der Span gleitet mit gleichmäßiger Geschwindigkeit in quasi-stationärem Fluss über die Spanfläche ab. Fließspanbildung wird durch gleichmäßiges, feinkörniges Gefüge und hohe Duk-

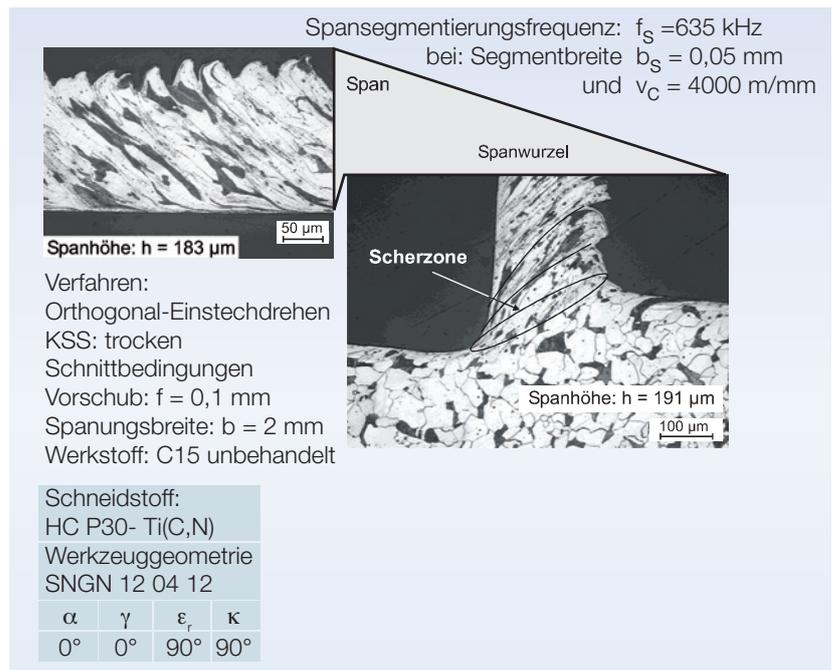


Bild 2.9: Spanwurzel von Stahl C 15 bei hoher Schnittgeschwindigkeit.

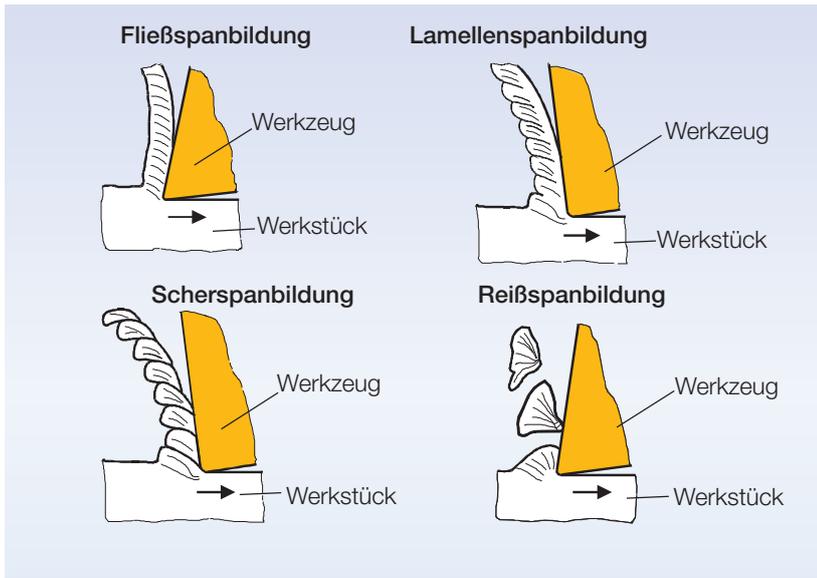


Bild 2.10: Spanbildungsarten.

tilität des Werkstoffs, durch hohe Schnittgeschwindigkeit und geringe Reibung auf der Spanfläche, durch positive Spanwinkel und geringe Spannungsdicke begünstigt.

Lamellenspanbildung ist ein gleichmäßiger, periodischer Spanbildungsvorgang, welcher der Fließspanbildung ähnelt. Allerdings bilden sich Formänderungsschwankungen, die im Span mehr oder weniger deutliche Lokalisierungen

oder sogar konzentrierte Scherbänder sichtbar werden lassen. Der Span weist durch thermische oder elastomechanische Vorgänge gebildete Lamellen mit hoher Bildungsfrequenz im kHz-Bereich auf. Solche Lamellenspäne sind bei gut verformbaren Werkstoffen höherer Festigkeit zu beobachten, insbesondere bei der Zerspanung mit hohen Schnittgeschwindigkeiten (s. a. Hochgeschwindigkeitszerspanung).

Scherspanbildung ist die diskontinuierliche Entstehung eines noch zusammenhängenden Spanes, der jedoch deutliche Unterschiede im Verformungsgrad entlang der Fließrichtung erkennen lässt. Zur Scherspanbildung kommt es vorzugsweise bei negativen Spanwinkeln, geringeren Schnittgeschwindigkeiten und größeren Spannungsdicken.

Reißspanbildung tritt auf, wenn der Werkstoff wenig plastisch verformbar ist oder aufgrund von starken Inhomogenitäten (z. B. Gusseisen mit Lamellengraphit) vorgegebene Gleitsysteme bildet. Teile des Werkstoffs werden weitgehend unverformt aus dem Stoffverbund herausgerissen. Die Oberfläche des Werkstücks wird dann weniger durch die Spuren des Werkzeugs als durch die Reißvorgänge während der Spanbildung bestimmt.

Bei kontinuierlicher Spanbildung, d. h. bei Fließspanbildung, lässt sich der Prozess durch fünf Verformungszonen beschreiben (Bild 2.11). Die hauptsächlich plastische Verformung findet in der primären Scherzone durch Schubverformung (Scherung) statt. In den sekundären Scherzonen vor der Span- und der Freifläche wird der Werkstoff zusätzlich unter dem Einfluss hoher Reibung verformt. Vor der Schneidkante bildet sich eine Stauzone (Zone hohen allseitigen Druckes), die gleichzeitig die Zone ist, in der der Werkstoff getrennt wird. Schließlich lässt sich noch eine Verformungsvorlaufzone beobachten, in der geringe, aber bleibende Verformungen auftreten. Diese Zone ist bestimmend für die Eindringtiefe plastischer Verformungen in das Werkstück, also für die Randzonenbeeinflussung.

Verschiedene Theorien zur rechnerischen Behandlung des Zerspanprozesses gehen von einem Scherebenenmodell aus (Bild 2.12). Die plastische Form-

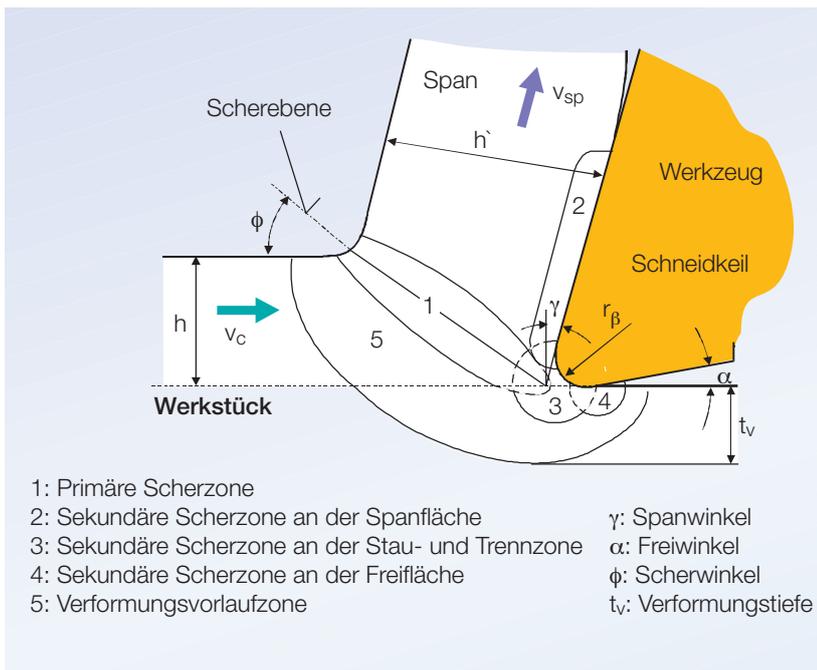


Bild 2.11: Zonen der Spanentstehung (WARN74).

änderung während der Spanbildung findet danach allein in der Scherebene statt. Je nach Verformungsverhalten des Werkstoffs und nach den Prozessbedingungen bildet das Modell die Realität ausreichend genau nach. Daraus lässt sich die Schergeschwindigkeit v_ϕ , also die Geschwindigkeit, mit der sich der Werkstoff vor der Scherebene gegen den Werkstoff hinter der Scherebene verschiebt, bestimmen:

$$v_\phi = v_c \times \cos \gamma / \cos (\phi - \gamma) \quad (2.4)$$

Die Spandickenstauchung λ_h (kurz auch Spanstauchung genannt) ist das Verhältnis von Spandicke h' (das ist die Dicke des Spanes nach Trennung vom Werkstück) zur Spanungsdicke h (das ist die Dicke des Spanungsquerschnitts im unverformten Zustand vor der Scherebene). Sie lässt sich durch Messen der Spandicke oder der Spanlänge (beim unterbrochenen Schnitt) und aus Vorschub f und Einstellwinkel κ nach (2.2) bestimmen. Damit kann der Scherwinkel ϕ ermittelt werden (siehe Bild 2.12).

Mit leistungsfähigen Rechenanlagen wurden rechnerische Simulationen der Spanbildung aufgrund numerischer Verfahren möglich. Auch sie beruhen sämtlich auf Modellen, die das reale Verhalten des zu untersuchenden Systems nur in Näherung wiedergeben. Bild 2.13 zeigt eine Momentaufnahme der Spanbildung, wie sie nach der Finite-Elemente-Methode errechnet wurde.

2.3 Energieumsetzung und Kraftbedarf

Der Werkstoff setzt dem Eindringen des Schneidkeils einen Widerstand entgegen, der durch Aufbringen einer Kraft, der Zerspankraft F_z , überwunden werden muss. Diese Zerspankraft steht im Allgemeinen schräg im Raum (Bild 2.14). Sie wird zweckmäßig in ei-

nem rechtwinkligen Koordinatensystem zerlegt, das zwei Achsen in die Richtungen der Schnitt- und Vorschubbewegung legt. Damit lassen sich die entsprechenden Kräfte und Leistungen unmittelbar den Bauteilen und Antrieben einer Maschine zuordnen. In der aus den Richtungspfeilen von Schnitt- und Vorschubgeschwindigkeit gebildeten Arbeitsebene liegt die Aktivkraft F_a , senkrecht dazu die Passivkraft F_p .

Die Passivkraft trägt nicht zur Leistungsumsetzung bei, da in ihrer Richtung keine Bewegung zwischen Werkzeug und Werkstück stattfindet. Sie ist jedoch für die Abdrängung von Werkzeug

und Werkstück und damit für Maß- und Formfehler wesentlich. Die Aktivkraft wird in die Schnittkraft F_c in Richtung der Schnittbewegung v_c und in die Vorschubkraft F_f in Richtung der Vorschubbewegung v_f zerlegt.

Die für das Spanen erforderlichen Leistungen ergeben sich als Produkt aus den Geschwindigkeitskomponenten und den in ihrer Richtung wirkenden Komponenten der Zerspankraft. Damit erhält man die Leistungen zu:

$$\text{Schnittleistung: } P_c = F_c \cdot v_c \quad (2.5)$$

$$\text{Vorschubleistung: } P_f = F_f \cdot v_f \quad (2.6)$$

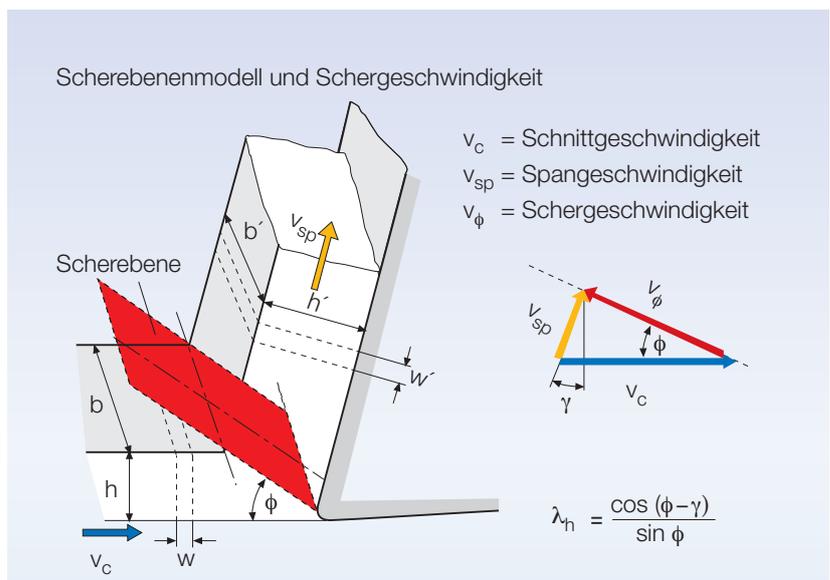


Bild 2.12. Scherebenenmodell und Schergeschwindigkeit.

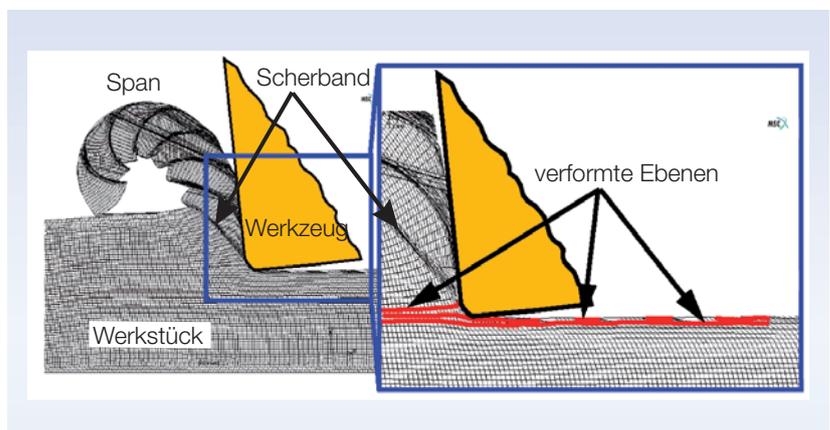


Bild 2.13: Simulation einer Scherspanbildung (JVI08).

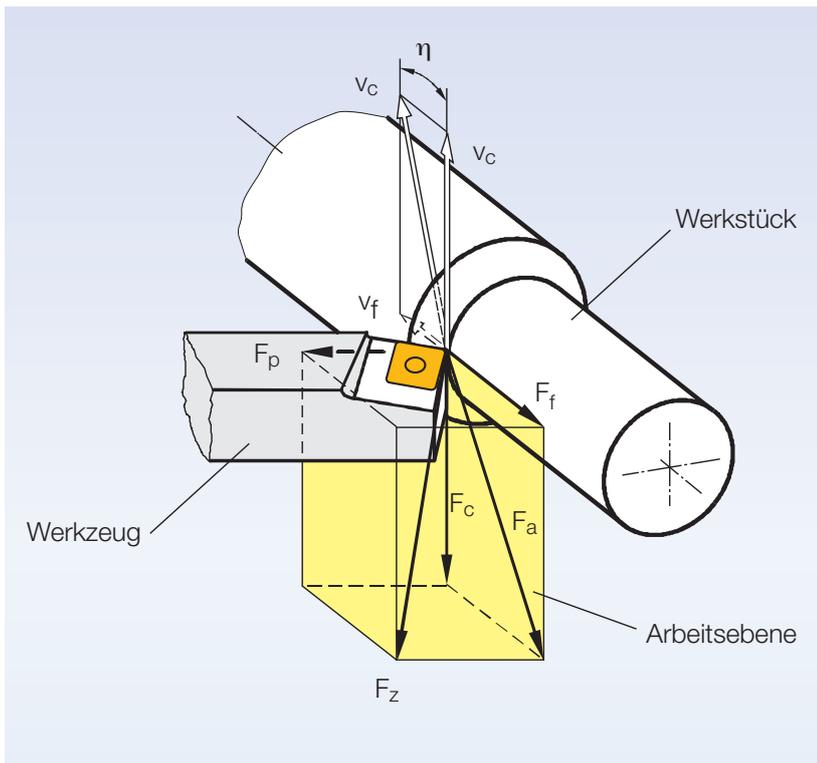


Bild 2.14: Komponenten der Zerspankraft beim Drehen (nach DIN 6584).

Im Allgemeinen ist die Schnittkraft größer als die Vorschubkraft. Da auch die Schnittgeschwindigkeit erheblich größer ist als die Vorschubgeschwindigkeit, ist die Schnittleistung wesentlich größer als die Vorschubleistung. Für die leistungsmäßige Auslegung des Hauptantriebs einer Werkzeugmaschine reicht daher die Bestimmung der Schnittleistung über die Schnittkraft aus.

Die zum Trennen einer Volumeneinheit notwendige Energie, die spezifische Energie u_c , ergibt sich aus Leistungs- oder Energiebetrachtungen (hier am Beispiel des Drehens):

$$u_c = \frac{P_c}{QV} = \frac{F_c \times v_c}{QV} \Rightarrow \text{mit } QV = b \times h \times v_c \quad (2.7)$$

Definiert man die auf den Spanungsquerschnitt bezogene Schnittkraft als spezifische Schnittkraft k_c , so gilt:

$$k_c = F_c / (b \times h) \\ u_c = k_c \times \frac{b \times h \times v_c}{b \times h \times v_c} = k_c \quad (2.8)$$

Die Schnittkraft F_c hängt von einer großen Zahl von Einflussgrößen ab:

- Werkstoff (Festigkeit τ),
- Vorschub f , Spanungsdicke h (τ),
- Schnitttiefe a_p , Spanungsbreite b (τ),
- Schneidkantenverrundung r_ϵ (τ),
- Spanwinkel γ (\downarrow),
- Einstellwinkel κ (τ),
- Schnittgeschwindigkeit v_c (\downarrow),
- Schneidstoff (-),
- Schmierung (\downarrow),
- Kühlung (τ) sowie
- Werkzeugverschleiß (τ)

Die spezifische Schnittkraft hat daher die Bedeutung einer energetischen Größe. Sie ist für praktische Leistungs- und Schnittkraftermittlungen wichtig. Für Übersichtsrechnungen zur Bestimmung der Schnittleistung reicht es häufig aus, die nachstehende Formel zu nutzen:

$$P_c = k_c \times QV \quad (2.8a)$$

Hinter den Einflussgrößen ist die Tendenz in Richtung steigender Schnittkraft angegeben (z. B.: „Werkstofffestigkeit τ “ (Festigkeit τ) bedeutet „Kraft steigt bei zunehmender Festigkeit“, „Spanwinkel (\downarrow)“ bedeutet „Kraft steigt bei abnehmendem Spanwinkel“). Den stärksten Einfluss haben der **Spanungsquerschnitt** $A = a_p \times f$ bzw. $A = h \times b$ und der Werkstoff. Diese Größen lassen sich nach Kienzle durch einen Potenzansatz erfassen (Bild 2.15).

$$F_c = k_c \times b \times h = k_{c1.1} \times b \times h_0 \times \left(\frac{h}{h_0}\right)^{1-m_c} \\ h_0 = 1 \text{ mm} \quad (2.9)$$

Die spezifische Schnittkraft für die Einheiten der Spanungsgrößen ($b = 1 \text{ mm}$, $h = 1 \text{ mm}$) wird als Hauptwert der spezifischen Schnittkraft $k_{c1.1}$ bezeichnet. m_c ist der Anstiegswert der spezifischen Schnittkraft. Für einige Werkstoffe sind spezifische Schnittkräfte (Hauptwert und Anstiegswert) in Tafel 2.1 angegeben.

Aus der Kienzle-Gleichung folgt, dass die spezifische Energie mit geringerer Spanungsdicke steigt. Die Ursache liegt im wachsenden Reibanteil (Bild 2.16).

Die Verkleinerung des Spanwinkels γ führt zu einer Reduzierung des Scherwinkels ϕ . Dadurch wird der Scherquerschnitt A_ϕ vergrößert. Bei gegebener Scherfestigkeit steigt also die Schnittkraft. Als Richtwert für die Praxis lässt sich angeben, dass eine Senkung des Spanwinkels γ um 1° eine Erhöhung der Schnittkraft F_c um 1,5% bis 2,0% bewirkt. Diese Angaben beziehen sich auf den üblichen Spanwinkelbereich für die Eisenwerkstoffe Stahl und Gusseisen.

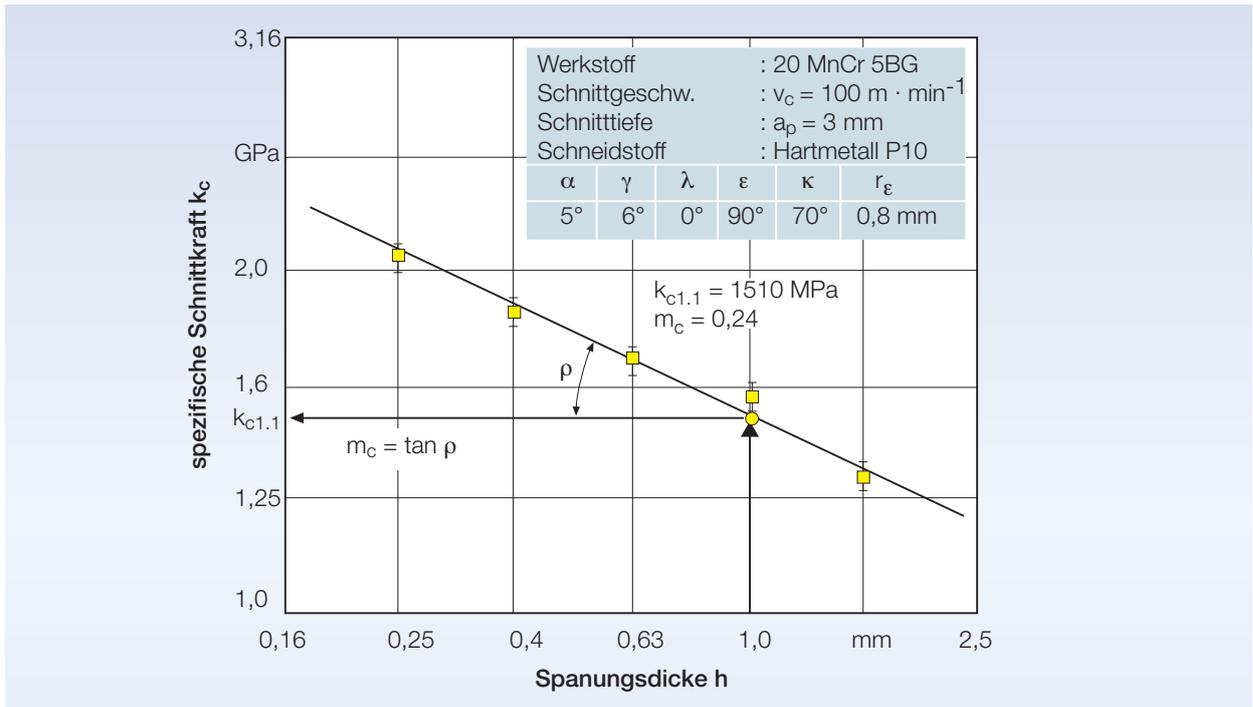


Bild 2.15. Spezifische Schnittkraft als Funktion der Spanungsdicke nach Kienzle.

💡 1° Spanwinkel ↓ ⇒ 1.5 bis 2.0% Schnittkraft ↑

Der Einfluss der Schnittgeschwindigkeit v_c auf die Schnittkraft wird durch die Spanbildung und den Wärmehaushalt in der Spanbildungszone

bestimmt. Im Bereich geringer Schnittgeschwindigkeiten kommt es beim Übergang von der Scher- zur Fließspanbildung zunächst zur Bildung von Aufbauschneiden, die den effektiven Spanwinkel vergrößern und damit die Schnittkraft verringern. Durch Geschwindigkeitserhöhung wird wegen

fehlender Kaltverfestigung die Aufbauschneidenbildung unterdrückt, die Schnittkraft steigt an. Mit weiterer Steigerung kommt es zur Erhöhung der Spanbildungstemperatur. Der Werkstoff verliert an Formänderungsfestigkeit und setzt dem eindringenden Schneidkeil geringeren Widerstand entgegen.

Schnittgeschwindigkeit: $v_c = 100 \text{ m/min}$
Schnitttiefe: $a_p = 3,0 \text{ mm}$

	α	γ	λ	ϵ	κ	r_ϵ
Stahl	5°	6°	0°	90°	70°	0,8 mm
Guss	5°	2°	0°	90°	70°	0,8 mm

Werkstoff	R_m MPa	Spezifische Zerspankräfte $k_{1.1}$ in MPa ($l = c, f, p$)						Schneidstoff
		$k_{c1.1}$	$1-m_c$	$k_{f1.1}$	$1-m_f$	$k_{p1.1}$	$1-m_p$	
St 52-2	559	1499	0,71	351	0,30	274	0,51	P10
Ck 45 N	657	1659	0,79	521	0,51	309	0,60	P10
Ck 60	775	1686	0,78	285	0,28	259	0,59	P10
16 MnCr 5	500	1411	0,70	406	0,37	312	0,50	P10
100 Cr 6	624	1726	0,72	318	0,14	362	0,47	P10
GG-30	HB = 206	899	0,59	170	0,09	164	0,30	K10
G-AlMg4SiMn*)	260	487	0,78					K10
X22CrNiMoNb1810**)	588	1397	0,76					K10

*) $v_c = 400 \text{ m/min}$, $\gamma = 15^\circ$ **) $v_c = 100 \text{ m/min}$, $\alpha = 8^\circ$

Tafel 2.1: Spezifische Zerspankräfte für das Drehen.

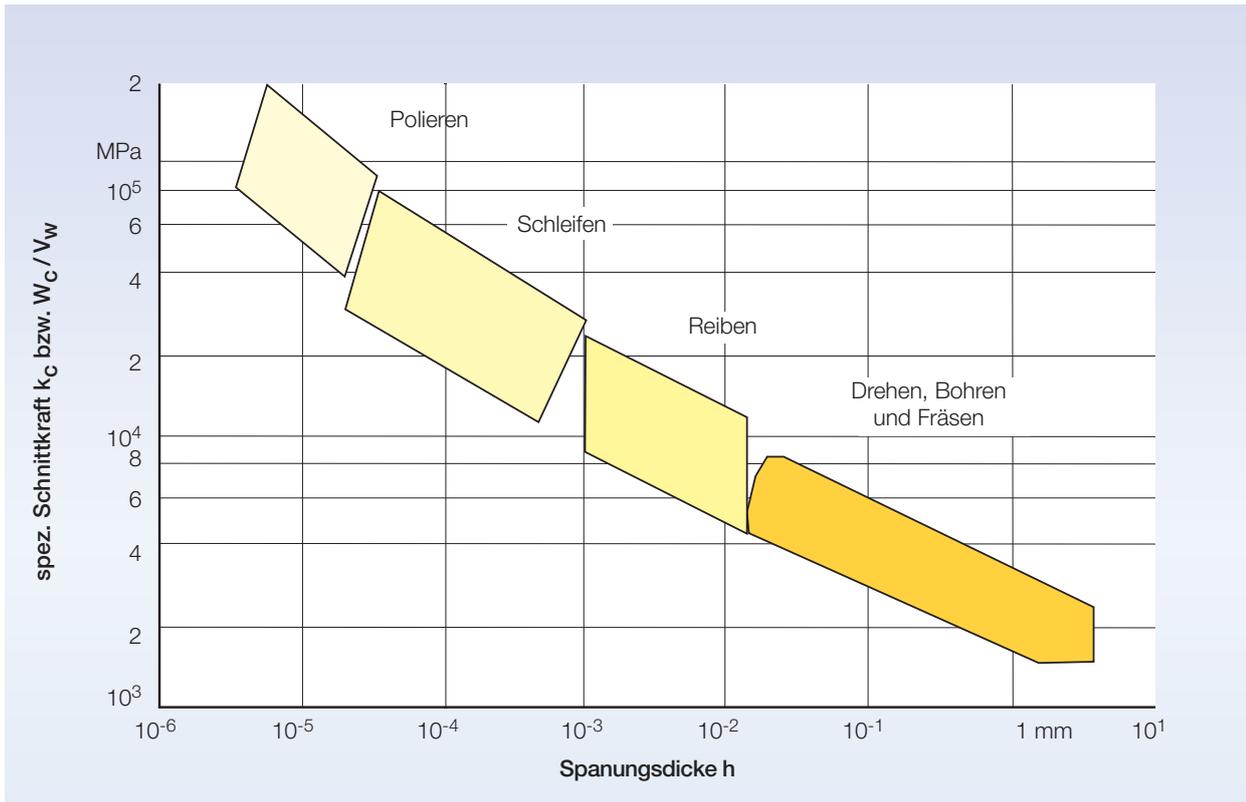


Bild 2.16: Spezifische Schnittkraft und Zerspanarbeit.

Diese Einflüsse sind allerdings stark werkstoffabhängig. Sie wurden hier für das Spanen von Stahl erläutert.

Die beiden übrigen Komponenten der Zerspankraft sind zur Auslegung von Maschinenbaugruppen und aus Genauigkeitsgründen von Interesse. Für die Bemessung von Vorschubantrieben muss die Vorschubkraft F_f abschätzbar sein. Die Passivkraft F_p geht – lineares Systemverhalten vorausgesetzt – proportional in die elastische Abdrängung von Werkzeug und Werkstück ein und bestimmt damit Maß- und Formfehler (c_x ist die Steifigkeit des Systems):

$$\Delta d = 2F_p/c_x \quad (2.10)$$

Die Drangkraft F_d ist die vektorielle Summe aus Passiv- und Vorschubkraft.

$$\vec{F}_d = \vec{F}_f + \vec{F}_p \quad (2.11)$$

Bei üblichen Einstellbedingungen (Schrupp/Schlichtbedingungen) ($h \ll b$) steht die Drangkraft aus Symmetriegründen senkrecht auf der Hauptschneide. Damit liegt das Verhältnis von Passiv- zu Vorschubkraft fest:

$$F_f / F_p = \tan \kappa \quad (2.12)$$

Als Richtwert zur Abschätzung der Drangkraft gilt:

$$F_d \approx 0.7 F_c \quad (2.13)$$

Wie für die Schnittkraft F_c lassen sich für genauere Rechnungen auch Potenzansätze für die Vorschub- und Passivkraft angeben:

$$F_f = k_{f1.1} \times b \times h_0 \left(\frac{h}{h_0}\right)^{1-m_f} \quad (2.14)$$

$$F_p = k_{p1.1} \times b \times h_0 \left(\frac{h}{h_0}\right)^{1-m_p} \quad (2.15)$$

Die Haupt- und Anstiegswerte der spezifischen Vorschub- und Passivkräfte für einige wichtige Metalle sind in Tafel 2.1 enthalten.

💡 Schruppen: Schnittkraft und Leistung!
Schlichten: Passivkraft und Abdrängung!

2.4 Oberflächeneigenschaften

Spanende Verfahren dienen dazu, funktionsfähige Oberflächen zu erzeugen. Die Eigenschaften dieser Oberflächen sind häufig ausschlaggebend für die Funktion des ganzen Bauteils. Beispiele für solche Eigenschafts-Funktions-Zusammenhänge sind das Aussehen von Oberflächen, die Beschichtungsfähigkeit (Lackieren, galvanisches Beschichten), das Korrosions- und Verschleißverhalten, die Dauerfestigkeit, die Kontaktsteifigkeit und das Dichtungsverhalten. Es wird zwischen

geometrischen und physikalischen Eigenschaften (chemische Eigenschaften werden den physikalischen zugerechnet und hier nicht getrennt betrachtet) von Oberflächen und Randzonen eines Bauteils unterschieden. Diese Eigenschaften lassen sich durch Größen beschreiben und messen. Der Konstrukteur eines Bauteils kann solche Größen vorschreiben. Der Fertigungstechniker muss wissen, durch

werden erzeugt z. B. durch Funkenerodieren, Druckstrahlen, Umformen oder Urformen. Gerichtete Oberflächen weisen in der Regel quer zur Schnittrichtung größere Rauheiten als in Schnittrichtung auf.

In Bild 2.17 sind die wichtigsten Rauheitsmaße erläutert. Nach DIN EN ISO 4287 ist R_z die gemittelte Rautiefe, die aus fünf Einzelmessungen über jeweils die

sichtigt. Zur Ermittlung werden im Abstand c vom Bezugsprofil ($z = 0$) Schnittlinien gelegt, die aus den werkstoffgefüllten Teilen des Profils die Elemente l_{ci} herauschneiden. Diese werden summiert und auf die Messlänge bezogen.

In der Praxis wird häufig die gemittelte Rautiefe R_z oder der Mittenrauwert R_a angesetzt. Beide Messgrößen stellen, wie

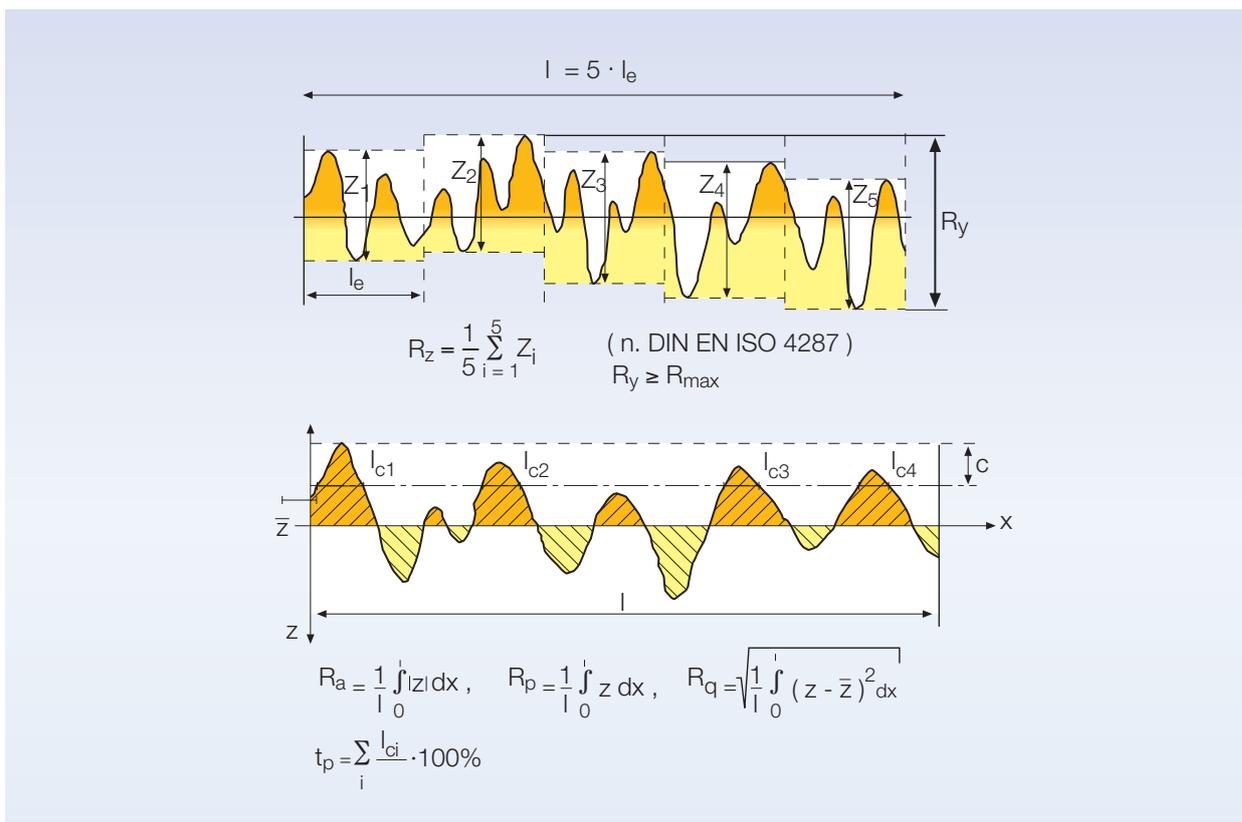


Bild 2.17: Rauheitsmessgrößen.

welche Verfahren und welche Eingangsgrößen des Prozesses die geforderten Oberflächen- und Randzoneneigenschaften erreicht werden.

Technische Oberflächen werden durch mikrogeometrische und physikalische Eigenschaften geprägt.

Durch spanende Verfahren, die eine ausgeprägte Schnittrichtung aufweisen, entstehen durchweg gerichtete, rillige Oberflächen. Nichtrillige Oberflächen

Messstrecke l_e arithmetisch gemittelt wird. Die maximale Rautiefe R_{max} ist die größte Rautiefe aus den fünf Messungen. Die maximale Profilhöhe R_y ist der Abstand des größten Berges vom tiefsten Tal über der Gesamtmessstrecke $l = 5 \times l_e$. Der Mittenrauwert R_a , die Glättungstiefe R_p und der quadratische Mittenrauwert (RMS: root mean square) R_q sind integrale Rauheitsgrößen, die eine Nivellierung und damit Verringerung der Rauheitsangaben mit sich bringen. Der Profiltraganteil t_p ist eine Messgröße, die die waagerechte Erstreckung des Rauheitsprofils berücksich-

aus Bild 2.17 zu erkennen ist, eine Mittelung oder Glättung des physikalischen Rauheitsgebirges dar. Für tribologisch anspruchsvolle Werkstücke werden zunehmend auch die maximale Profilhöhe innerhalb einer Einzelmessstrecke R_y oder die maximale Rautiefe R_{max} , also der maximale Abstand des höchsten zum tiefsten Punkt des Profils innerhalb der gesamten Messstrecke l , als Messgrößen vorgeschrieben.

Bei der Messung mit tastenden Oberflächenmessgeräten wird meist ein Wel-

lenfilter eingesetzt, der bestimmt, welche Anteile des physikalischen Profils erfasst oder dargestellt werden sollen. Um Welligkeiten aufzunehmen (W-Profil), wird ein Tiefpassfilter zwischengeschaltet, für Rauheiten (R-Profil), also höherfrequente Anteile, ein Hochpassfilter (siehe DIN 4768). Für die Aufnahme von Rauheiten wird üblicherweise eine Grenzwellenlänge (cut-off) von $\lambda = 75 \mu\text{m}$ verwendet, die

Man erkennt, dass der Vorschub in die Rauheit quadratisch eingeht, d. h. eine Verdopplung erhöht die Rauheit um das Vierfache, während der Eckenradius nur linear wirkt; eine Verdopplung halbiert die Rauheit. Tatsächlich ist durch (2.16) im Allgemeinen nur eine untere Grenze der Rauigkeit definiert; denn durch weitere Einflüsse wie Schwingungen, Werkstoffverhalten u. a. liegen die

Die Schnittgeschwindigkeit ist durch den Verschleiß begrenzt. Auch der Eckenradius kann nicht beliebig vergrößert werden, da mit r_ϵ die Reibung zwischen den Werkpartnern und damit ebenfalls der Verschleiß zunimmt und damit einer größeren Länge der Nebenschneide als Folge größeren Eckenradius Ratterschwingungen auftreten können und der Prozess instabil wird.

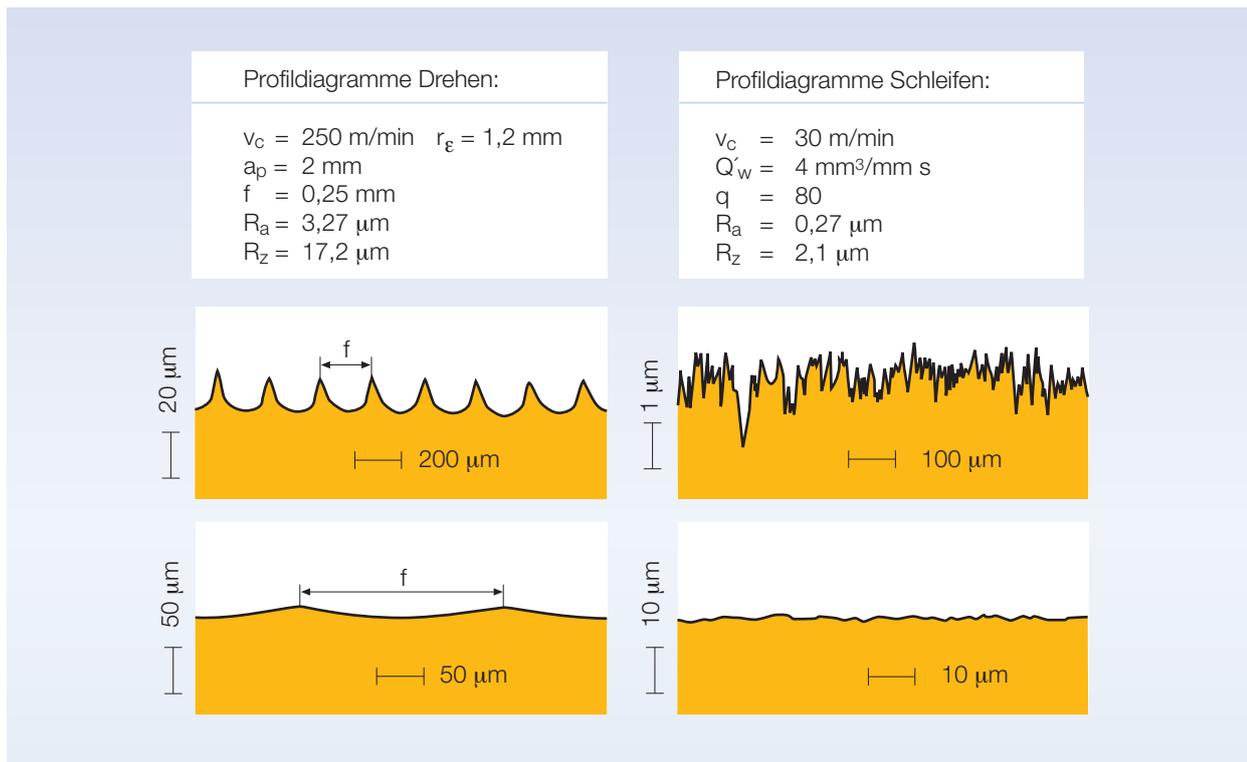


Bild 2.18: Profile beim Drehen und Schleifen.

also nur Wellenlängen durchlässt, die kleiner als $75 \mu\text{m}$ sind.

Bild 2.18 zeigt typische Profildigramme für das Drehen und Schleifen. Beide Verfahren erzeugen gerichtete Strukturen. Beim Drehen bildet sich die geometrisch bestimmte Schneide des Drehmeißels unmittelbar auf der Werkstückoberfläche ab. Daher lässt sich die theoretische Rauheit R_{th} aus dem Eckenradius r_ϵ und dem Vorschub f ableiten:

$$R_{th} = f^2 / (8 \times r_\epsilon) \quad (2.16)$$

Rauigkeiten höher. Durch Drehen lässt sich im Allgemeinen eine Rautiefe von $R_z > 2,5 \mu\text{m}$, durch Schleifen $R_z > 1 \mu\text{m}$ erreichen. Mit Sondermaßnahmen können die Grenzen weiter nach unten verschoben werden (siehe, z. B. Hartdrehen und Hochgeschwindigkeitsfräsen).

$$QA = v_c \times \sqrt{8 \times R_{th} \times r_\epsilon} \quad (2.17)$$

Beim Schlichten mit vorgeschriebener Rautiefe ist die Zeitspanfläche QA folglich von der Schnittgeschwindigkeit und dem Eckenradius abhängig.

Um die Rautiefe zu verringern, lassen sich folgende Maßnahmen nutzen:

- Vorschub verringern,
- Eckenradius erhöhen,
- Kühlschmierstoff mit höherer Schmierwirkung einsetzen,
- Schnittgeschwindigkeit erhöhen und
- Schwingungen mindern.

Hohe Oberflächengüten setzen Werkstoffe mit homogenem Gefüge voraus. Wenn Materialien eingesetzt werden, die Poren, Lunker oder stark ungleichmäßiges Gefüge aufweisen, ist die erreichbare Oberflächengüte prinzipiell begrenzt.

Neben der geometrischen Oberflächenausbildung werden durch einen spanenden Prozess die randnahen Schichten des Werkstücks verändert. Diese Beeinflussung der Randschichten ist für zahlreiche Funktionseigenschaften eines Bauteils bestimmend. Bei metallischen Bauteilen lassen sich die folgenden und in Bild 2.19 dargestellten Randzoneeigenschaften messen oder feststellen:

- Gefügeänderungen,
- plastische Verformungen,
- Härteänderungen,
- Eigenspannungen,
- Risse.

Randzonenbeeinflussungen können mechanische oder thermische Ursachen haben, häufig eine Kombination von beiden. Mechanische Einwirkungen ergeben sich durch Eindringen eines oder mehrerer Schneidkeile und die damit verbundenen plastischen Verformungen in den Randzonen des Werkstücks. Die Verformungsvorlaufzone und die sekundäre Scherzone vor der Freifläche (siehe Bild 2.1) dringen in die Zonen unterhalb der neu entstehenden Oberfläche eines Bauteils ein und führen dort zu bleibenden Formänderungen.

Die plastischen Verformungen der Randzonen entstehen im Wesentlichen durch Schubverformung als Folge der dem Schneidkeil vorlaufenden Scherung und der Reibung zwischen der Freifläche und dem Werkstoff. Diese Formänderungen können bei kristallin aufgebauten Werkstoffen deutlich an den Kornverformungen erkannt werden (Bild 2.20).

Mit der plastischen Verformung geht meist auch eine Kaltverfestigung einher. Diese bewirkt einen Härteanstieg allein auf Grund mechanischer Einwirkung. Dadurch kommt es außerdem zu Druckeigenstressungen als Folge der plastischen Dehnungen in den oberflächennahen Schichten.

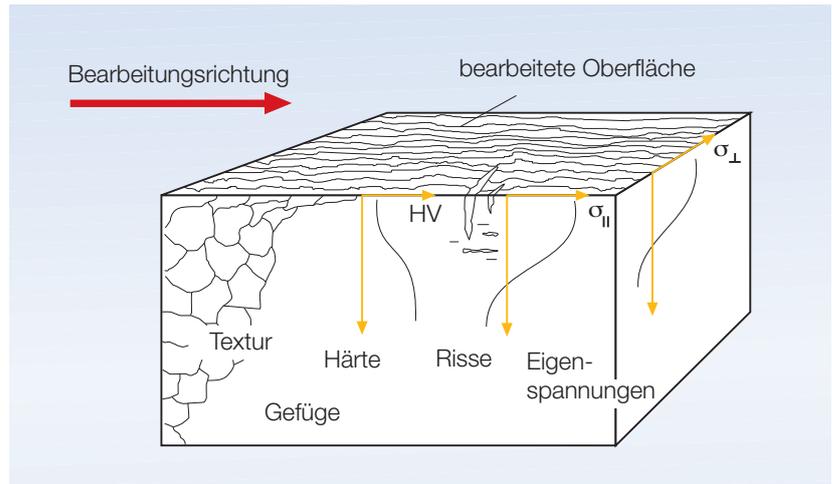
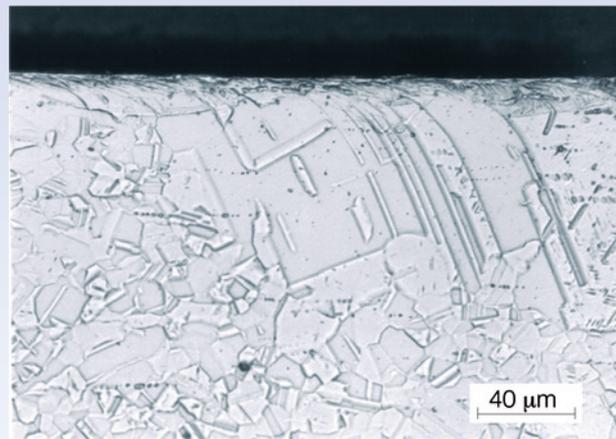


Bild 2.19: Randzoneeigenschaften nach dem Spanen (BRIN91).



Werkstoff:	X 10 Cr Ni Nb 18 9
Bearbeitung:	Flachschleifen $v_c = 35 \text{ m/s}$ $Q_w = 6 \text{ mm}^3/\text{mm}\cdot\text{s}$
Werkzeug:	A46 J7 V

Bild 2.20: Gefüge nach einer spanenden Bearbeitung.

Thermische Einwirkungen folgen aus der Leistungsumsetzung in Wärme. Die Werkstückrandzonen werden kurzzeitig hoch erhitzt. Durch Selbstabschreckung des Werkstoffs und durch Wärmeentzug über den Kühlschmierstoff tritt danach eine rasche Abkühlung ein. Mit diesem Temperaturverlauf können Gefügeänderungen, Härteerhöhungen durch Sekundärabschreckung und auch Anlasseeffekte, d. h. Härteminderungen verbunden sein.

Durch die thermische Wirkung des Spanens entstehen ebenfalls typische Eigenspannungen. Mit der Temperaturerhöhung dehnen sich die Randschichten. Es entstehen thermische Druckspannungen (Wärmespannungen), unter deren Wirkung sich die Randschichten bei durch Temperaturerhöhung herabgesetzter Fließgrenze plastisch verformen. Sie werden gestaucht. Nach Abkühlung auf Raumtemperatur sind die verkürzten Rand-

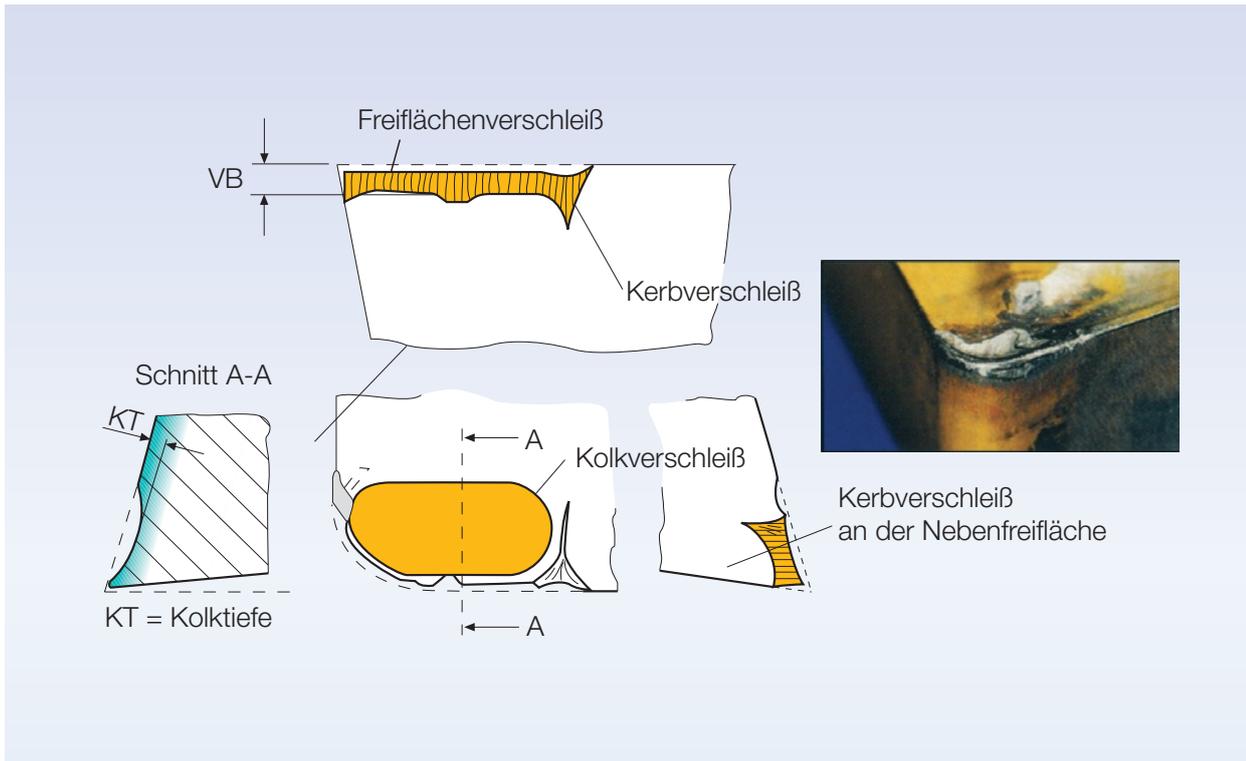


Bild 2.21: Verschleißformen.

schichten gleichsam zu kurz und müssen durch Zugeigenspannungen gelängt werden, um in den Körperzusammenhang zu passen. Dieser Effekt des thermischen Fließens kann von einem entgegengesetzten Vorgang überlagert werden, wenn Werkstoffe mit niedrigen Umwandlungstemperaturen und einer Volumenvergrößerung bei Übergang von hohen zu niedrigen Temperaturen bearbeitet werden. Stahl mit 12 % Nickel wandelt z. B. vom Austenit zum Ferrit (A_3 -Punkt) bei 330 °C um. Als Folge der raschen Selbstabschreckung entstehen Druckeigenspannungen, die als Umwandlungseigenspannungen bezeichnet werden.

Durch mechanische Einwirkung entstehen Druckeigenspannungen, durch thermischen Einfluss Zugeigenspannungen, durch Umwandlung auch Druckspannungen.

2.5 Werkzeugverschleiß

Werkzeuge verschleifen durch mechanische, thermische und chemische Einwirkung während des Spanens. Es kommt je nach Beanspruchung zu abrasivem (Abrieb) und adhäsivem (Kleb-) Verschleiß, zum Bruch des Schneidkeils, zur Abschieferung, zur Rissbildung, zu Diffusion und Oxidation. Die wichtigsten Verschleißformen sind in Bild 2.21 wiedergegeben.

Die Verschleißmarkenbreite VB und die Kolktiefe KT sind Messgrößen für den Verschleißfortschritt mit der Einsatzzeit eines Werkzeugs. Der Verschleiß hängt vom Werkstoff, dem Schneidstoff und den Einsatzbedingungen ab, wie Bild 2.22 exemplarisch zeigt.

Wann das Standzeitende für ein Werkzeug gegeben ist, wann es also gegen ein Werkzeug mit neuer Schneide ersetzt werden muss, hängt von den Anforderungen an den Prozess ab. Der angemessene Aufwand zur Bestimmung

des zu verwendenden Standzeitkriteriums ist vom Anwendungsfall und von der Art der Fertigung her zu beurteilen. Allgemein gilt:

- Großserienfertigung: Erprobung im Einsatzfall
 - Einzel- und Kleinserienfertigung: Erfahrungswerte
- Als ein Erfahrungswert für das Standzeitende gilt:
- $$V_{B \max} = 0,3 \text{ mm}$$

Diffusion ist typisch für Kolkverschleiß. Dieser kann bei starker Ausprägung die Schneidkante erheblich schwächen und so zum Bruch und damit zu katastrophalem Verschleiß führen. Daher versucht man diese Verschleißform möglichst zu vermeiden oder gering zu halten. Typische Verschleißformen zeigt Bild 2.23: Der Kugelgraphitguss neigt zu starker Kolkbildung. Im Vergleich zur Bearbeitung eines mikrolegierten Edelbaustahls 49 Mn V S 3 BY und den beiden Gussorten GGG-60 und GGG-70 konnte trotz vergleichbarer Härte mit mehr als

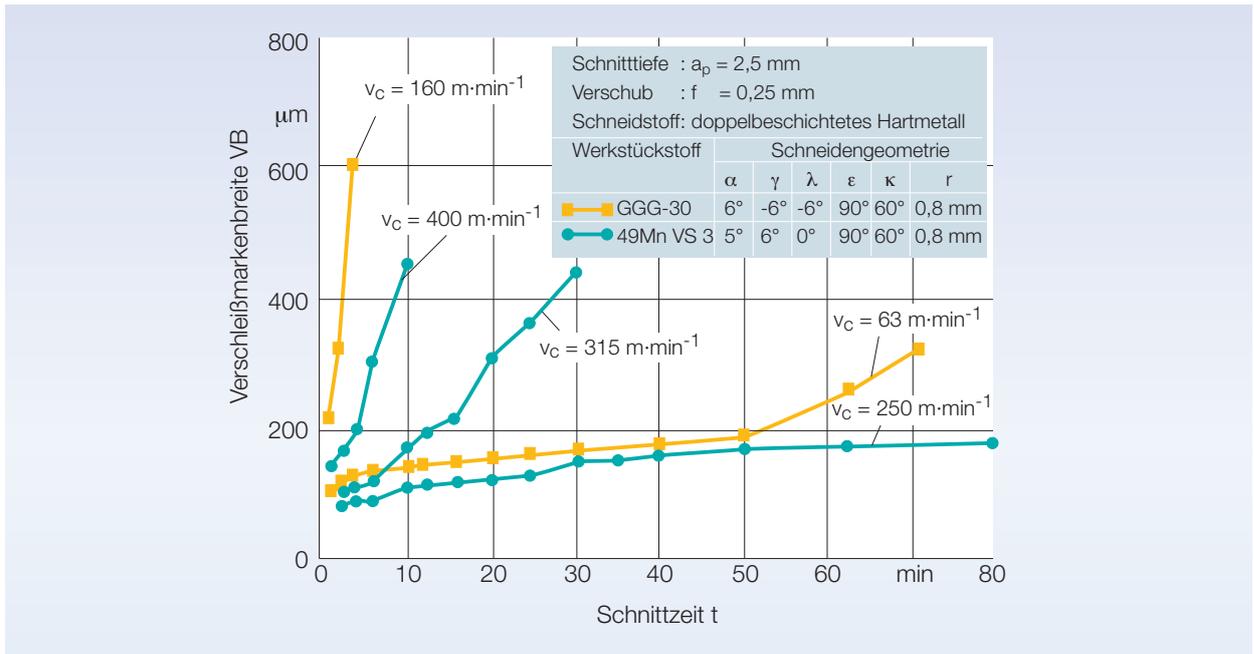


Bild 2.22: Verschleißfortschritt bei der Guss- und Stahlerspanung.

dreifacher Schnittgeschwindigkeit an Stahl gearbeitet werden bei deutlich geringerem Verschleiß. Wesentlich ist aber auch, dass bei Stahl die Verschleißform sehr viel unkritischer ist [WINK83].

Setzt man ein Standzeitkriterium, z. B. $VB = 0,3 \text{ mm}$, an, kann die Standzeit bestimmt werden. Trägt man die Standzeit über der wichtigsten Einflussgröße, über der Schnittgeschwindigkeit v_c auf, zeigt sich in einem doppelt logarithmischen Diagramm in sehr guter Näherung eine Gerade (Taylor-Gerade). Bild 2.24 zeigt solche Kurven für die oben beschriebene Bearbeitung an Guss und Stahl.

Die Geraden lassen sich analytisch beschreiben nach der Formel:

$$v_c \times T^{-1/k} = C \quad (2.18)$$

Darin ist v_c [m/min] die Schnittgeschwindigkeit, T [min] die Standzeit, $1/k$ ist der Anstiegswert der Geraden (negativ, da fallend) und C [m/min] die theoretische Schnittgeschwindigkeit bei einer Standzeit von 1 min. Für einige wichtige Eisenwerkstoffe sind die Koeffizienten in

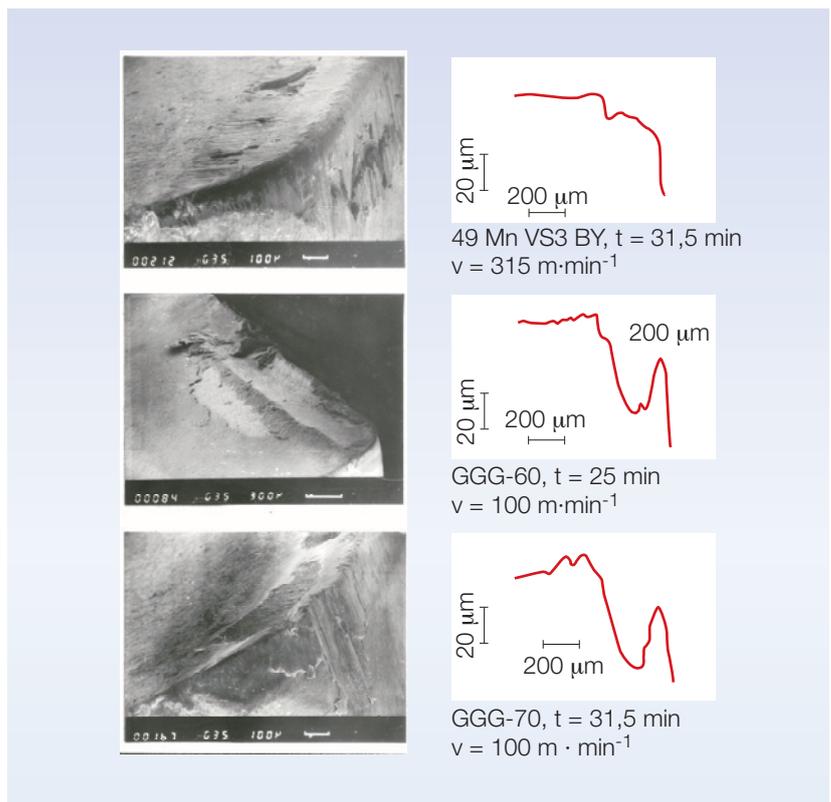


Bild 2.23: Verschleißformen beim Drehen eines mikrolegierten Stahls und eines Kugelgraphitguss.

Tafel 2.2 angegeben, wobei hier das Standzeitkriterium bei $VB = 0,4 \text{ lag}$.

Die Standzeit und die Schnittgeschwindigkeit lassen sich nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten optimieren.

Optimierungskriterien können sein:

- minimale Bearbeitungszeit,**
- minimale Stückkosten oder**
- minimale Periodenkosten.**

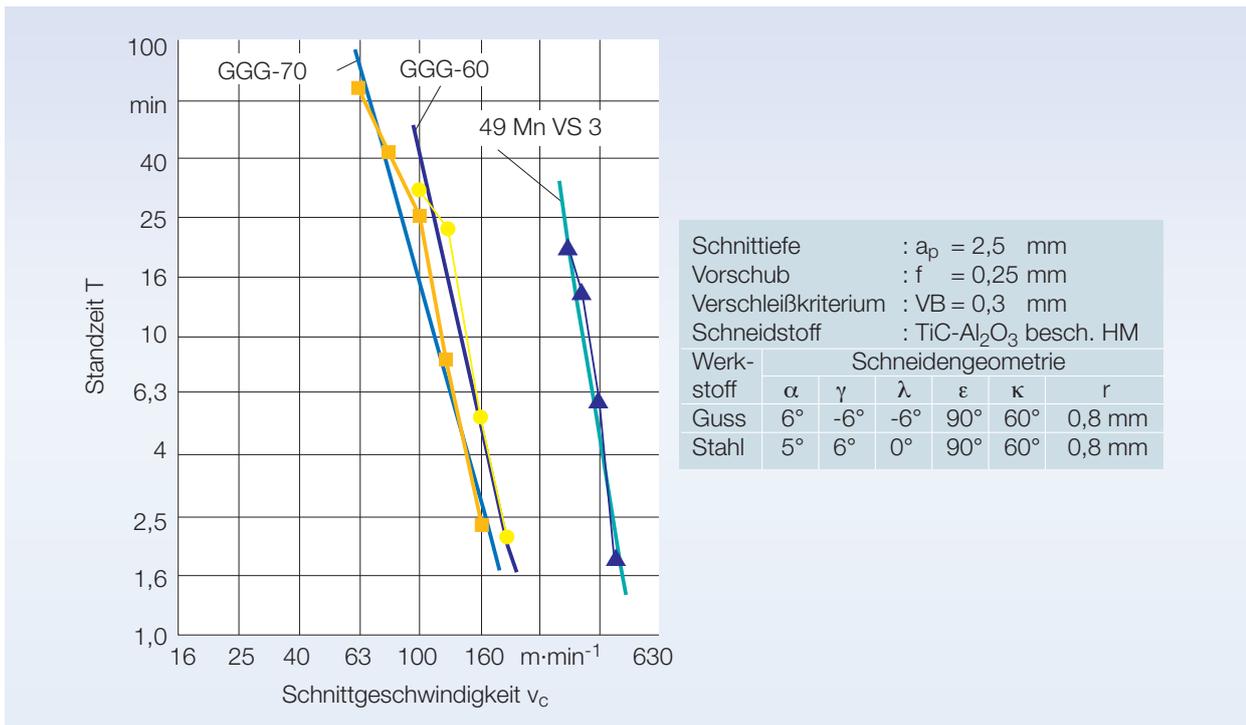


Bild 2.24: Taylor-Geraden für das Drehen von Stahl und Gusseisen.

Die Stückzeit-, Stückkosten- oder Periodenkostenoptima ergeben sich aus gegenläufigen Zeit- oder Kostenanteilen einerseits bezogen auf die Werkzeuge (mit v_c steigend) und andererseits bezogen auf die Maschinenbelegung (mit v_c fallend)

(Bild 2.25). Für die Stückkostenoptimierung gilt:

$$v_{cKopt} = C \times [(-k-1) \times (t_{wz} + K_{wz}/K_{pl})]^{1/k} \quad (2.19)$$

Beispiel: Ein Einsatzstahl 16MnCr5 werde zerspannt. Die Werkzeugwechselzeit eines automatisch gewechselten Werkzeugs betrage $t_{wz} = 10$ s, die Kosten je Schneide eines beschichteten Hartmetallwerkzeugs betragen

Taylor - Funktion $v_c = C \cdot T^{1/k}$	unbeschichtetes Hartmetall		beschichtetes Hartmetall		Oxidkeramik (Stahl) Nitridkeramik (Guss)	
	$C \left[\frac{m}{min} \right]$	k	$C \left[\frac{m}{min} \right]$	k	$C \left[\frac{m}{min} \right]$	k
St 50 - 2	299	-3,85	385	-4,55	1210	-2,27
St 70 - 2	226	-4,55	306	-5,26	1040	-2,27
Ck 45 N	299	-3,85	385	-4,55	1210	-2,27
16 MnCrS 5 BG	478	-3,13	588	-3,57	1780	-2,13
20 MnCr 5 BG	478	-3,13	588	-3,57	1780	-2,13
42 CrMoS 4 V	177	-5,26	234	-6,25	830	-2,44
X 155 CrVMoV 5 1 G	110	-7,69	163	-8,33	570	-2,63
X 40 CrMoV 5 1 G	177	-5,26	234	-6,25	830	-2,44
GG - 30	97	-6,25	184	-6,25	2120	-2,50
GG - 40	53	-10,0	102	-10,0	1275	-2,78

Tabellenwerte gelten für $a_p = 1$ mm, $f = 1$ mm, $VB = 0,4$ mm

Tafel 2.2: Koeffizienten der Taylor-Geraden.

$K_{WZ} = 9 \text{ Euro}$, die Platzkosten
 $K_{Pl} = 1,5 \text{ Euro/min}$. Dann ergibt sich mit
den Koeffizienten aus Tafel 2.2
 $v_{cKopt} = 271 \text{ m/min}$.

Die Schnittgeschwindigkeit für eine minimale Bearbeitungszeit v_{cTopt} folgt aus Gleichung (2.19) ohne Ansatz der Kostenterme. Die Schnittgeschwindigkeit für minimale Periodenkosten v_{cPoprt} liegt zwischen v_{cTopt} und v_{cKopt} . Die minimalen Periodenkosten ergeben sich aus einer Optimierung von Stückzeit und Stückkosten. Es bestehen folgende Reihungen zwischen den nach unterschiedlichen Kriterien optimierten Schnittgeschwindigkeiten:

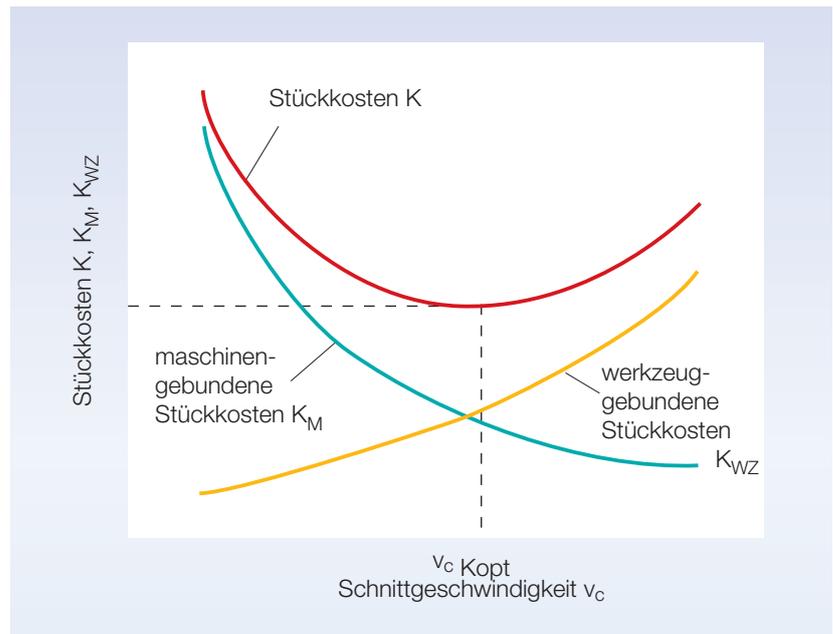


Bild 2.25: Fertigungskosten als Funktion der Schnittgeschwindigkeit.

v_{cKopt} Normalbeschäftigung (langfristig)	$< v_{cTopt}$ max. Gewinn bei geringer Markttransparenz (kurzfristig)	$< v_{cPoprt}$ Hochkonjunktur (Markt halten)
---	---	--

Bei schwacher Konjunktur ist es sinnvoll, die Schnittgeschwindigkeit zu senken, um die Werkzeugkosten zu minimieren, da die Maschine ohnehin nicht voll genutzt wird. Andere Kostenanteile, wie die Energiekosten gehen damit auch zurück. Die so u. U. steigenden Personalkosten müssen allerdings beachtet werden.

2.6 Schneidstoffe

Schneidstoffe bestimmen wesentlich die Wirtschaftlichkeit einer spanenden Operation. Die Entwicklung der Zerspantechnik ist daher unmittelbar mit der Entwicklung der Schneidstoffe verknüpft. Bild 2.26 zeigt die Entwicklung der Stundenschnittgeschwindigkeit, d. h. der Schnittgeschwindigkeit, bei der ein Werkzeug aus dem jeweiligen Schneidstoff über eine Stunde eingesetzt werden kann, seit Beginn des 20-sten Jahrhunderts. Je Dekade zeigt sich etwa eine Verdopplung der

möglichen Schnittgeschwindigkeit. Um den Fortschritt vollständig einzuschätzen, ist noch zu berücksichtigen, dass sich neben der Schnittgeschwindigkeit auch die möglichen Vorschübe und Schnitttiefen erheblich erhöht haben.

Die mechanischen, thermischen und chemischen Beanspruchungen der Schneidstoffe sind extrem. Daher sind folgende Eigenschaften je nach Einsatzfall zu fordern:

- Härte für hohe Verschleißfestigkeit (Freiflächenverschleiß),
- Zähigkeit für hohe Bruchfestigkeit (Plattenbruch),
- Thermoschockwiderstand für Stabilität bei unterbrochenem Schnitt,
- chemische Beständigkeit gegenüber dem Werkstückstoff (Diffusion),
- chemische Beständigkeit gegen Oxidation (Sauerstoff aus der Luft oder aus dem Werkstoff).

Die wichtigsten Schneidstoffe sind in Bild 2.27 den zwei grundlegenden Eigenschaften, Härte/Verschleißfestigkeit und Biegefestigkeit/Zähigkeit zugeordnet. (Die Kennzeichnung der Hartmetalle und der Schneidkeramik entspricht der DIN ISO 513 aus 11.2005.)

Die Schnellarbeitsstähle sind Schneidstoffe auf Eisenbasis. Sie sind hochlegierte Werkzeugstähle, die ihre Verschleißfestigkeit aus der martensitischen Grundhärte und eingelagerten Karbiden bei Legierungsgehalten bis 35 % beziehen. Da ein Hauptanwendungsgebiet bei den Bohr- und Gewin-deschneidwerkzeugen liegt, werden ihre Eigenschaften dort behandelt.

Die Eigenschaften der Hartmetalle folgen, wie auch die der Schnellarbeitsstähle und der Werkstückstoffe, aus ihrer chemischen Zusammensetzung; allerdings sind auch die Struktur, der Gefügebautbau und damit der Herstellprozess von Einfluss. Das hat dazu geführt, dass eine Klassifizierung anders als bei anderen metallischen Werkstoffen keinen expliziten Zusammenhang zur metallurgischen Zusammen-

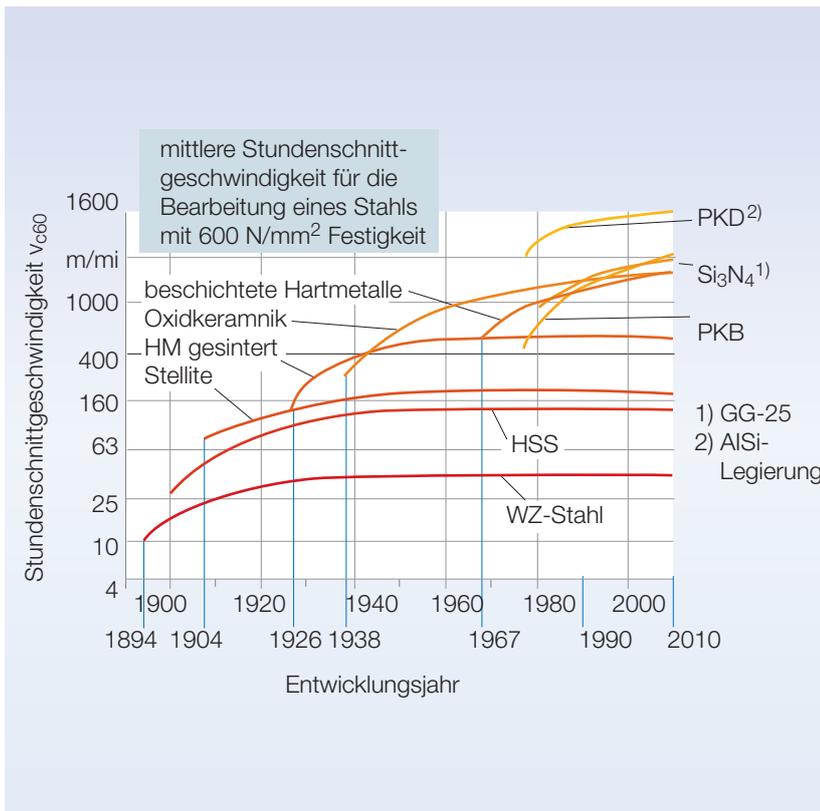


Bild 2.26: Entwicklung von Schneidstoffen.

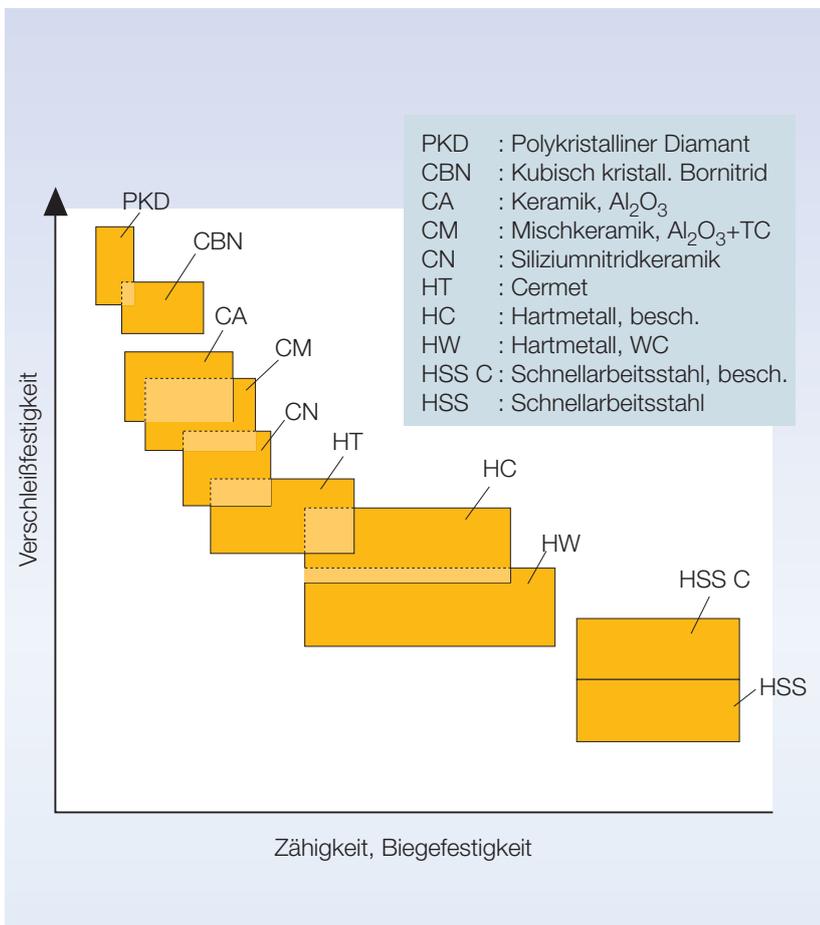


Bild 2.27: Eigenschaften der Schneidstoffe (schematisch).

setzung erkennen lässt. Vielmehr sieht die Norm DIN ISO 513 nur Anwendungsgruppen nach den zu zerspannenden Werkstoffen vor. Die Werkstoffe werden den Hauptanwendungsgruppen zugeordnet:

- P: Stahl und Stahlguss, außer nichtrostende Sorten mit austenitischem Gefüge,
- M: Nichtrostender Stahl, austenitisches und austenitisch-ferritisches Gefüge,
- K: Gusseisen mit Lamellengraphit und Kugelgraphit, Temperguss,
- N: Nichteisenmetalle, Nichtmetalle,
- S: Speziallegierungen und Titan,
- H: Harte Werkstoffe.

Die Hauptanwendungsgruppen sind weiter jeweils nach Anwendungsgruppen mit den Kennziffern 01 für hart und verschleißfest (für hohe Schnittgeschwindigkeit, Schlichten) bis 40 bzw. 50 für zäh und biegefest (für hohe Vorschübe, Schruppen) gegliedert. Die Hersteller von Schneidstoffen ordnen ihre Sorten in eigener Zuständigkeit in das Klassifizierungsschema ein, womit nach der Norm **keine Vergleichbarkeit der Angaben unterschiedlicher Hersteller** besteht. Dieser Zustand wird von Anwendern durchaus beklagt. Die Norm kann jedenfalls nur einen ersten Anhalt für die Wahl eines Schneidstoffes bieten. Da physikalisch oder technologisch messbare Kennwerte nicht existieren, kann selbst eine Sorte eines Herstellers in den Eigenschaften variieren.

Zuordnungsangaben der Zerspanungsanwendungsgruppen können von Hersteller zu Hersteller variieren; es gibt keine verbindliche Klassifizierung.

Entscheidenden Fortschritt in der Werkzeugentwicklung hat das Beschichten gebracht. Durch das Aufbrin-

	HV	VB	KT	Z	Bi	μ	Tr	Farbe
TiC	3000	+	O	+	+	+	O	grau
Al ₂ O ₃	2100	O	+	O	O	O	+	transp.
TiN	2400	O	O	+	+	+	+	gold
TiCN	3000	+	O	+	+	O	O	grau
(TiAl)N	2800	+	O	O	+	O	+	

HV: Vickershärte
 VB: Freiflächenverschleiß
 KT: Kolkverschleiß
 Z: Zähigkeit
 Bi: Bindungsfähigkeit
 μ : Reibwert
 Tr: Trennfunktion
 +: best geeignet
 O: geeignet

Bild 2.28: Eigenschaften von Schichtstoffen.

gen von harten und verschleißfesten Schichten auf ein zähes Substrat (auf eine Unterlage) konnte eine bis dahin metallurgisch vorgegebene Grenze – entweder verschleißfest und wenig zäh oder zäh und weniger verschleißfest – überwunden werden.

Durch Beschichten der Schneidstoffe konnten wesentliche Fortschritte erreicht werden. Durch die Schichten erhöht sich aber im Allgemeinen die Schneidkantenrundung.

Durch Beschichtungen mit unterschiedlichen Materialien können positive Eigenschaftskombinationen erreicht werden. Gebräuchliche Schichtmaterialien sind mit ihren hauptsächlichen Funktionen in Bild 2.28 eingetragen.

2.7 Werkstoffeinfluss auf den Verschleiß

Die Zerspanbarkeit eines Werkstoffs wird nach den Kriterien Werkzeugverschleiß, Zerspankräfte, Spanform und Oberflächengüte (siehe Abschnitt 1.2) beurteilt. Sie hängt von der Werkstoffzusammensetzung, der Schmelzenführung, der Umformung und der Wärmebehandlung ab (Bild 2.29) [VIER70, WINK83]. Die Einflüsse auf den Verschleiß werden am Beispiel untereutektoider und niedriglegierter Kohlenstoffstähle erläutert.

Der wichtigste Begleiter des Stahls ist **Kohlenstoff**. Der Kohlenstoff liegt im Wesentlichen in gebundener Form im Eisenkarbid, dem Zementit (Fe₃C) vor. Zementit mit einem C-Gehalt von 6,67 % ist rhombisch kristallin und hat eine hohe Härte von HV \approx 1000. Ein weiterer Grundbestandteil ist das α -Mischkristall, das Ferrit, mit einem C-Gehalt von weniger als 0,02 %. Ferrit ist kubisch raumzentriert und hat nur geringe Härte um HV \approx 90. Das Eutektoid Perlit (0,86 % C) ist ein feines Gemenge aus Ferrit und Zementit. Untereutektoider Stähle bestehen aus einer Mischung von Ferrit und Perlit, übereutektoider aus Sekundärzementit und Perlit.

Die Menge an harten Bestandteilen geben einen Hinweis auf die Verschleißneigung der Stähle. Auch die Zerspankräfte nehmen mit dem C-Gehalt zu. Allerdings neigen Stähle mit geringen C-Gehalten (< 0,02 %) wie z. B. Einsatzstähle im weichgeglühten Zustand zum Kleben und zur Adhäsion, wodurch ihre Zerspanbarkeit wieder verschlechtert ist.

Sauerstoff gelangt bei der Herstellung in den Stahl. Er liegt ausschließlich in Form oxidischer Einschlüsse, z. B. Manganoxid, Siliziumoxide (Silikate) und Aluminiumoxid, vor. Alle Oxide haben verschleißende Wirkung, besonders Aluminiumoxid.

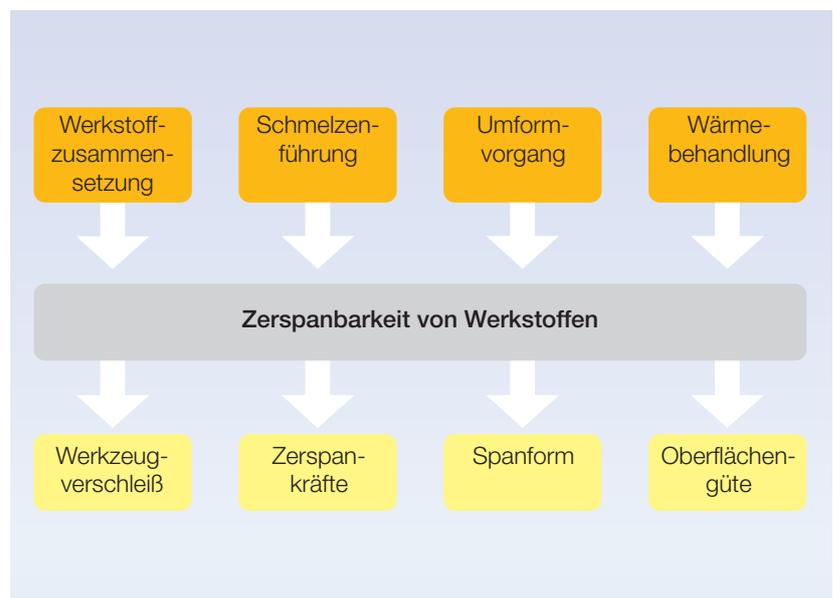


Bild 2.29: Einflussgrößen und Beurteilungskriterien der Zerspanbarkeit.

Werkstückstoff	Kräfte	Verschleiß	Spanform	Oberfläche	Beurteilung
Ck45 Hutchst BY	●●	●●●	●	●	 gut Zerspanbarkeit  schlecht
Ck45 mod BY	●●	●●●	●	●	
49 MnVS 3 BY	●	●●●	●	●	
Ck 45 BY	●	●●●	●	●	
49 MnVS 3 mod BY	●	●●	●	●	
Ck 45 N	●	●●	●	●	
Ck 35 V	●	●	●	●	
Ck 45 V	●	●	●	●	
CK 45 VS	●	○	●	●	
37 Cr 4 V	●	○	○	●●	

 sehr günstig ←   ungünstig

Bild 2.30: Zerspanbarkeit verschiedener Schmiedestähle.¹

Silizium verbindet sich mit Sauerstoff und ergibt harte Silikateinschlüsse. Es führt zu einer Steigerung der Ferritfestigkeit und erhöht den Werkzeugverschleiß.

Schwefel besitzt nur geringe Löslichkeit in Stahl und bildet stabile Sulfide. Seine Bindungsfreudigkeit gegenüber den Metallen nimmt in der Reihenfolge Nickel (Ni), Kobalt (Co), Molybdän (Mo), Eisen (Fe), Chrom (Cr), Mangan (Mn), Zirkonium (Zr), Titan (Ti) zu. Welche Sulfide entstehen, richtet sich daher nach den Legierungsbestandteilen des Stahls. Eisensulfid ist unerwünscht, weil es einen niedrigen Schmelzpunkt (1188 °C) hat und sich an den Korngrenzen ablagert. Bei der Warmumformung kann es so zu Rotbruch oder Heißbruch kommen. Durch Mangan, das eine größere Affinität zum Schwefel hat als Eisen, können Mangansulfide (MnS) gebildet werden, die einen höheren Schmelzpunkt als FeS aufweisen und daher die Rotbruch- und Heißbruchgefahr beseitigen. Mangansulfide wirken verschleißmindernd.

Mangan bindet den Schwefel und verhilft dem Stahl dadurch auch zu besseren mechanischen Eigenschaften. Bei einem Mangan/Schwefel-Verhältnis größer als $Mn/S = 1,7$ wird der gesamte Schwefel zu dem bei 1600 °C schmelzenden Mangansulfid oder zu anderen manganhaltigen Sulfiden abgebunden. Bei Fließspanbildung können Mangansulfide darüber hinaus eine Schutz- und Schmierwirkung auf dem Schneidkeil der Werkzeuge übernehmen.

Ein **Phosphor**-Gehalt bis zu 0,1 % wirkt sich günstig auf die Zerspanbarkeit dadurch aus, dass der Stahl versprödet wird und es damit zu günstigeren Spanformen kommt. Die Erhöhung der Härte kann jedoch die Werkzeugstandzeit mindern.

Die Zerspanbarkeit verschiedener Schmiedestähle, die so behandelt wurden, dass sie nahezu gleiche Festigkeit aufwiesen, wurde für das Drehen mit TiC/Al₂O₃ beschichtetem P 10-Hartmetall und das Bohren mit Schnellarbeitsstahl-Spiralbohrern in den vier vorn

angegebenen Kriterien verglichen. Bild 2.30 zeigt die Ergebnisse in vereinfachender Form. Die im Bild mit BY bezeichneten Stähle wurden aus der Schmiedewärme gesteuert abgekühlt (siehe auch Bild 2.32). Das Verfahren der gesteuerten Abkühlung ausscheidungshärtender ferritisch-perlitischer (AFP) Stähle – die Bezeichnung BY entspricht nicht mehr der Europäischen Norm – kann das bis dahin notwendige Vergüten geschmiedeter Bauteile ersetzen [HERT90]. Neben dem Einsparen der Energien und Kosten für das Härten und Anlassen beim Vergüten sowie dem häufig notwendigen Richten und spannungsarmglühen werden die Herstellkosten durch geringeren Härteausschuss, niedrigeren Prüf- und Handlingsaufwand und durch verbesserte Zerspanbarkeit, wie Bild 2.30 zeigt, entlastet.

Bild 2.31 zeigt eine Übersicht über die Wirkung der Stahlzusammensetzung auf den Werkzeugverschleiß bzw. die Standzeit beim Fräsen.

¹ BY-Behandlung oder auch P-Behandlung führt zu einem schmiedeperlitischen Gefüge. Eingesetzt werden ausscheidungshärtende Stähle (AFP-Stähle). Die Bezeichnung BY entspricht nicht mehr europäischer Norm.

Leg.-elem.	Wirkung	Ursache, Bedingung	Leg.-elem.	Wirkung	Ursache, Bedingung
C	T↓	wenn R _m über C eingestellt wird	Cr	T↓	
Si	T↓	Ferritfestigkeit ↑, Silikate	Mo	T↓	falls Carbide vorliegen
Ni	T↓	Zähigkeit steigt	W	T↓	
Mn	T↑	Bei Mn/S > 1,7 Bildung von Mangansulfid, Parallelverschiebung der Standzeitgerade	Pb	T↑	Bildung weicher nichtmetallischer Einschlüsse
S	T↑		Bi	T↑	Bildung weicher nichtmetallischer Einschlüsse
Ca	T↑	Bildung globularer nichtmetallischer Einschlüsse, Belagbildung	V	T↓	Festigkeit steigt durch feine Carbid und Carbonitridausscheidung
Te	T↑	Bildung globularer nichtmetallischer Einflüsse	Ti	T↓	
P	T↑	A _v nimmt ab	HB	T↓	Spanflächentemperatur steigt

Angenommen ist jeweils eine Zunahme des Legierungsgehalts bzw. der Härte.
T = Werkzeugstandzeit

Bild 2.31: Legierungselemente und Werkzeugstandzeit.

Über die Schmelzenführung werden die nichtmetallischen Einschlüsse im Stahl beeinflusst, die sich hauptsächlich auf den Verschleiß und die Spanformung auswirken. Durch die Zugabe von Desoxidationsmitteln wie z. B. Aluminium, Si-

lizi-umoxid sind harte Einschlüsse und nicht verformbar. Sie können verschleißend wirken. Der Verschleiß wird besonders dann erhöht, wenn die oxydischen Einschlüsse in größeren Mengen oder in Zeilenform im Stahl vorliegen.

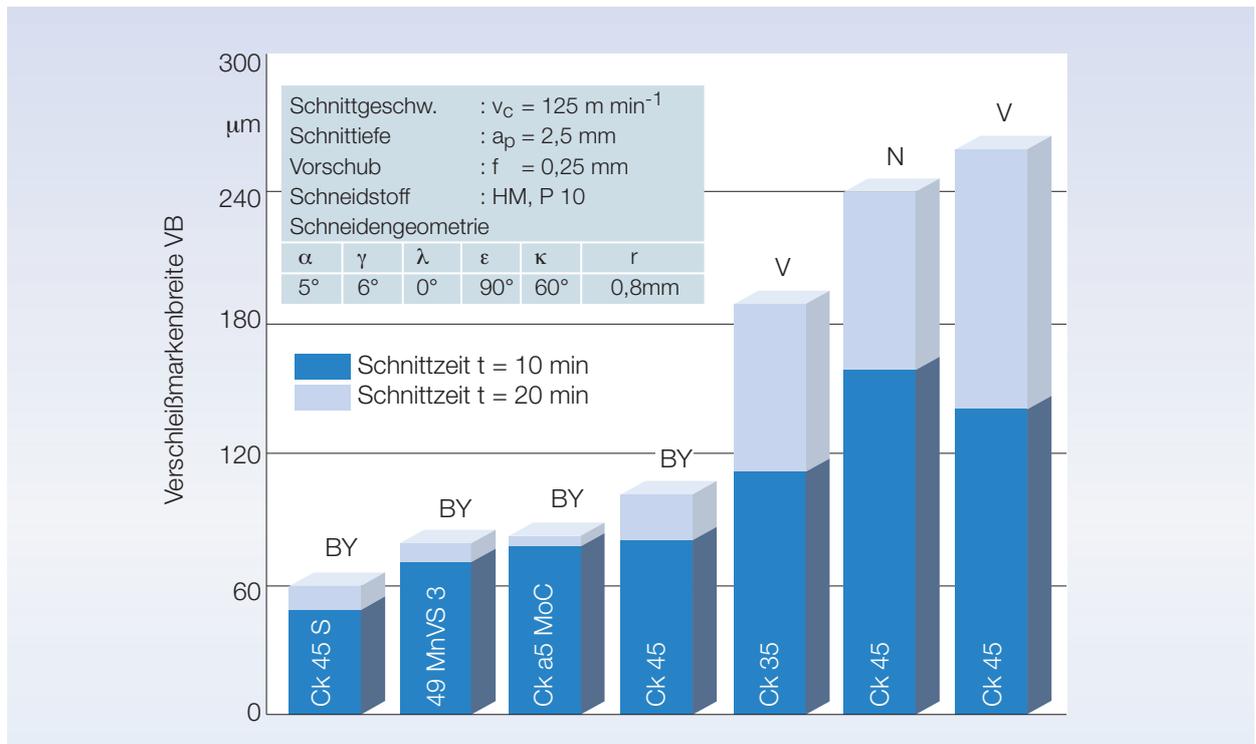


Bild 2.32: Einfluss von Werkstoffmodifikation und Wärmebehandlung auf den Verschleiß. ²

Durch die Wärmebehandlung lässt sich bei Stählen die Gefügeausbildung weitgehend beeinflussen. Die nachfolgend aufgeführten Gefügebestandteile beeinflussen den Verschleiß zunehmend ungünstig:

Ferrit, Perlit mit eingeformtem Zementit, grober Perlit, feiner Perlit, Bainit, Martensit, Zementit.

Auch bei gleicher Festigkeit lässt sich durch Grobkörnigkeit des Gefüges, wie sie z. B. durch gesteuerte Abkühlung aus der Schmiedewärme erreicht wird, eine deutliche Verringerung des Verschleißes erzielen (Bild 2.32). Diese Behandlung haben die Werkstoffe erfahren, die im Bild mit der inzwischen nicht mehr gültigen Bezeichnung BY gekennzeichnet sind. Als Ursache wird die grobe Kornstruktur des Gefüges angesehen.

2.8 Spanformung

Die Spanform ist eins der vier Kriterien der Zerspanbarkeit (s. Abschnitt 1.2). Gerade bei automatisierten Prozessen ist ein ungestörter Spanablauf wichtig, um nicht dem Werker die inhaltsleere und ermüdende Funktion der ständigen Überwachung der gesicherten Spanabfuhr zuzumessen und damit seine Bindung an die Maschine und den Prozess zu erzwingen. Das Problem der Spanform stellt sich nicht bei Verfahren, die prinzipbedingt mit unterbrochenem Schnitt arbeiten (Fräsen, Kreissägen, Schleifen). Bei kontinuierlichen Prozessen, wie beim Drehen und Bohren, kann die Spanform gegenüber anderen Zerspanbarkeitskriterien dominant sein, denn sie berührt entscheidend die Prozesssicherheit. Die Spanform kennzeichnet die nach dem Zerspanprozess vorliegende Form des Spanes. Sie ist das abschließende Ergebnis der Spanbildung und des Spanablaufs von

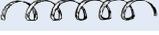
	Spanraumzahl RZ	Spanformklasse	Beurteilung
Bandspäne 	≥ 90	1	ungünstig
Wirrspäne 	≥ 90	2	
Flachwendel-späne 	≥ 50	3	gut
lange, zylindr. Wendelspanne 	≥ 50	4	
Wendelspanstücke 	≥ 25	5	
Spiralspäne 	≥ 8	6	brauchbar
Spiralspanstücke 	≥ 8	7	
Bröckelspäne 	≥ 3	8	

Bild 2.33: Spanformen (Stahl-Eisen-Prüfblatt 1 178-90/ISO 3685).

der Wirkstelle. Zur Quantifizierung der Spanformung wurden Spanformklassen und die Spanraumzahl eingeführt (Bild 2.33).

Die Spanraumzahl RZ ist das Verhältnis der Spanvolumenrate Q_{Span} zur Volumenrate des abgespannten massiven Werkstoffs (Zeitspanvolumen) Q_V :

Um günstige Spanformen zu erreichen, muss der Span in Stücke oder Partikel zerlegt werden. Dies kann geschehen durch

- primäre Spanformung oder
- sekundäre Spanformung.

$$RZ = Q_{Span} / Q_V \quad (2.20)$$

Primäre Spanformung hängt allein von der nicht kontinuierlichen Spanbildung ab. Zu den zur primären Spanformung neigenden Werkstoffen gehören spröde Werkstoffe, die nur ein geringes plastisches Verformungsvermögen haben und daher während der Spanbildung bereits reißen oder bre-

chen. Das Spanen erfolgt meist durch Reißspanbildung.

Bei Scherspan- oder Fließspanbildung muss eine sekundäre Spanformung nach der eigentlichen Spanbildung erzwungen werden, so bei den meisten Stahlwerkstoffen. Dazu wird der Spanablauf beeinflusst, sodass die Späne an der Schnittfläche des Werkstücks oder an der Freifläche des Werkzeugs anlaufen (Bild 2.34) und dadurch aufgebogen werden und brechen.

Stahlwerkstoffe neigen im Allgemeinen zur Fließ- oder Scherspanbildung. Allerdings hängt die Spanformung erheblich vom Gefüge des Werkstoffs und auch von den Schnittbedingungen ab. Bild 2.35 zeigt Spanformen einiger Vergütungsstähle mit unterschiedlicher Zusammensetzung und unterschiedlicher Wärmebehandlung.

Die kontinuierlich aus der Schmiedewärme kontrolliert abgekühlten Stähle Ck 45 weisen besonders günstige Späne auf (Bild 2.36)

² BY-Behandlung oder auch P-Behandlung führt zu einem schmiedeperlitischen Gefüge. Eingesetzt werden ausscheidungshärtende Stähle (AFP-Stähle). Die Bezeichnung BY entspricht nicht mehr europäischer Norm.

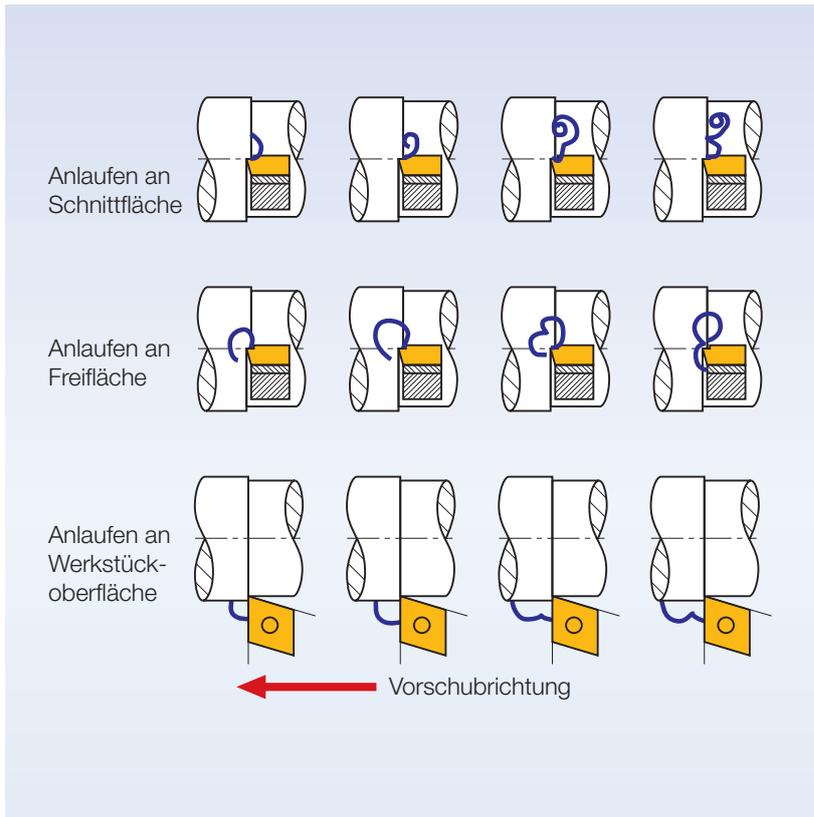


Bild 2.34: Wirkung der Spanleitung.

Als Anhalt für den Einfluss der Legierungsbestandteile im Stahl und der mechanischen Eigenschaften auf die Spanformen dient Bild 2.37.

Starken Einfluss auf die Brüchigkeit des Spanes hat der Vorschub. Je dicker der Span, umso leichter bricht er. Umgekehrt tritt häufig bei Schlichtoperationen, also bei geringen Vorschüben ein Problem in der Spanformung auf. Eine große Schnitttiefe wirkt sich günstig (wenn auch meist nicht so stark wie der Vorschub) auf die Spanformung aus. Wie und wohin der Span geleitet wird, hängt von der Plattengeometrie auf der Spanfläche ab, die herstellerspezifisch ist. Die Wendschneidplattenhersteller geben typische Einsatzbereiche für ihre Platten an, wie das in Bild 2.38 gezeigt ist (günstiger Arbeitsbereich im gestrichelten Feld).

Auch die übrigen Schnittbedingungen bestimmen die Spanform. Bild 2.39 gibt

<p>Ck 35 V</p> <p>HB₃₀:217-229 S: 0,03 %</p>	<p>Ck 45 V</p> <p>HB₃₀:223-229 S: 0,035 %</p>	<p>Ck 45 BY</p> <p>HB₃₀:223-225 S: 0,035 %</p>	<p>Schnittgeschwindigkeit: $v_c = 200 \text{ m min}^{-1}$</p> <p>Schnitttiefe: $a_p = 2,5 \text{ mm}$</p> <p>Vorschub: $f = 0,315 \text{ mm}$</p> <p>Schneidengeometrie</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>α</th> <th>γ</th> <th>λ</th> <th>ϵ</th> <th>κ</th> <th>r</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>5°</td> <td>6°</td> <td>0°</td> <td>90°</td> <td>60°</td> <td>0,8 mm</td> </tr> </tbody> </table> <p>10 mm</p>	α	γ	λ	ϵ	κ	r	5°	6°	0°	90°	60°	0,8 mm
α	γ	λ		ϵ	κ	r									
5°	6°	0°		90°	60°	0,8 mm									
<p>Ck 45 VS</p> <p>HB₃₀:212-229 S: 0,035 %</p>	<p>Ck 45 N</p> <p>HB₃₀:207-229 S: 0,035 %</p>	<p>Ck 45 mod BY</p> <p>HB₃₀:223-229 S: 0,056 %</p>													
<p>Ck 45 BY Sonderd</p> <p>HB₃₀:223-235 S: 0,031 %</p>	<p>49 Mn VS 3 BY</p> <p>HB₃₀:255-260 S: 0,061 %</p>	<p>37 Cr 4 V</p> <p>HB₃₀:277-285 S: 0,024 %</p>													

Bild 2.35: Vergleich von Spanformen. ³

³ BY-Behandlung oder auch P-Behandlung führt zu einem schmiedeperlitischen Gefüge. Eingesetzt werden ausscheidungshärtende Stähle (AFP-Stähle). Die Bezeichnung BY entspricht nicht mehr europäischer Norm.

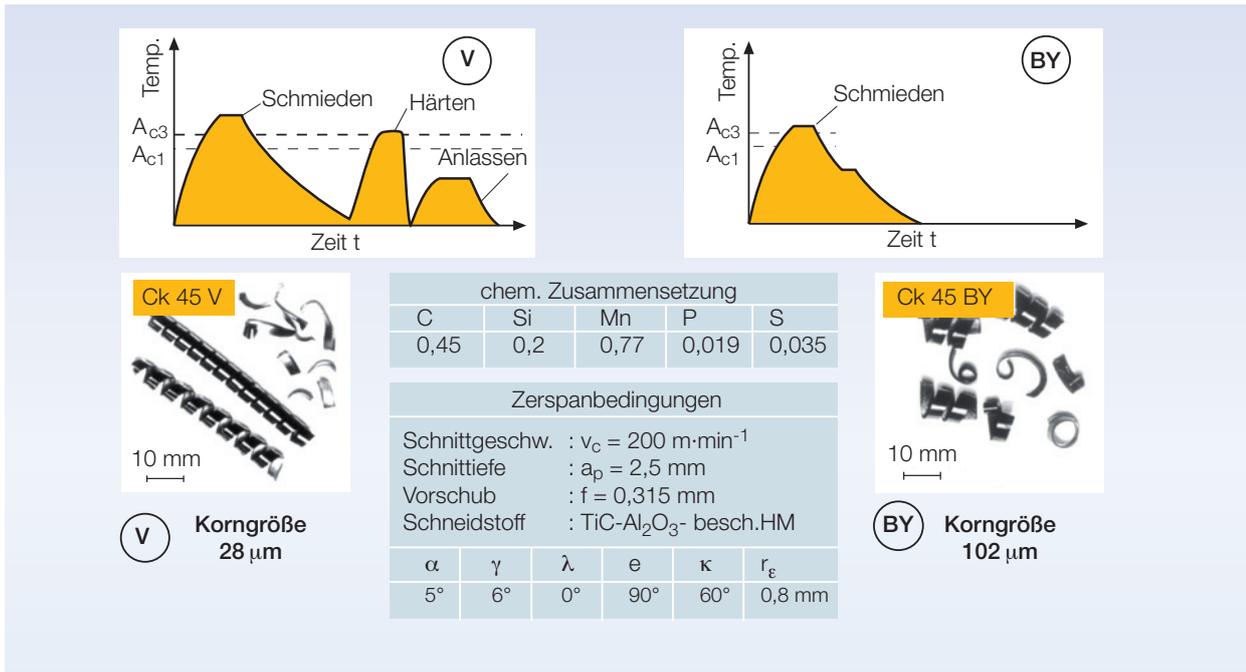


Bild 2.36: Gefüge und Spanform.

die Abhängigkeit der Spanformklassen wieder.

2.9 Kühlschmierung

Werkzeuge verschleifen als Folge mechanischer, thermischer und chemischer Beanspruchungen. Durch Zuführen geeigneter Kühlschmierstoffe lassen sich diese Beanspruchungen mindern. Dies kann sich Verschleiß ver-

ringernd auswirken. Die Wärmeabfuhr aus der Spanbildungszone kann zudem den physikalischen Randzonenzustand eines Werkstücks durch geringere Temperaturen in der Randzone günstig beeinflussen. Der Kraft- und Leistungsbedarf für den Zerspanprozess lässt sich durch bessere Schmierung mindern und durch Verringerung der Reibung und Klebeneigung zwischen Werkzeug und Werkstück lassen sich bessere

Werkstückoberflächen erzielen. Dies sind günstige Effekte. Andererseits können Kühlschmiersysteme erhebliche Kosten verursachen, wobei zunehmend Entsorgungskosten ins Gewicht fallen (siehe auch Abschnitt 1.3). Kühlschmieren muss auch kritisch unter Arbeitsplatz- und Umweltaspekten betrachtet werden. Kühlschmieren mit Flüssigkeiten verbietet sich zudem für Thermoschock empfindliche Schneid-

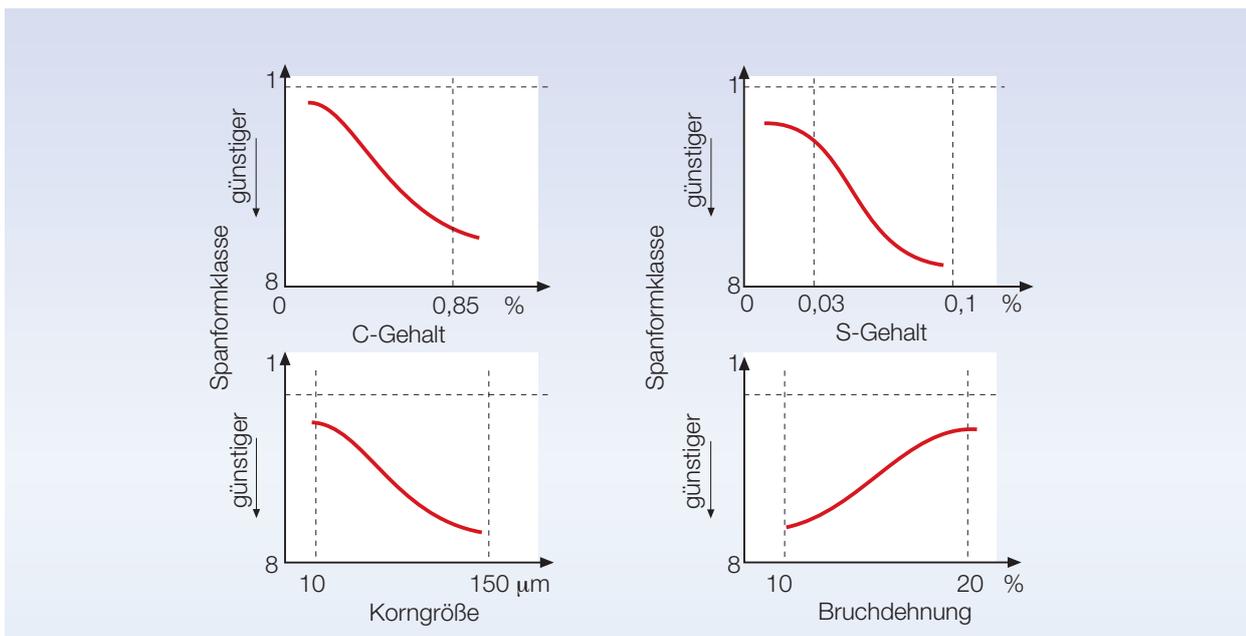


Bild 2.37: Werkstoffeinfluss und Spanform.

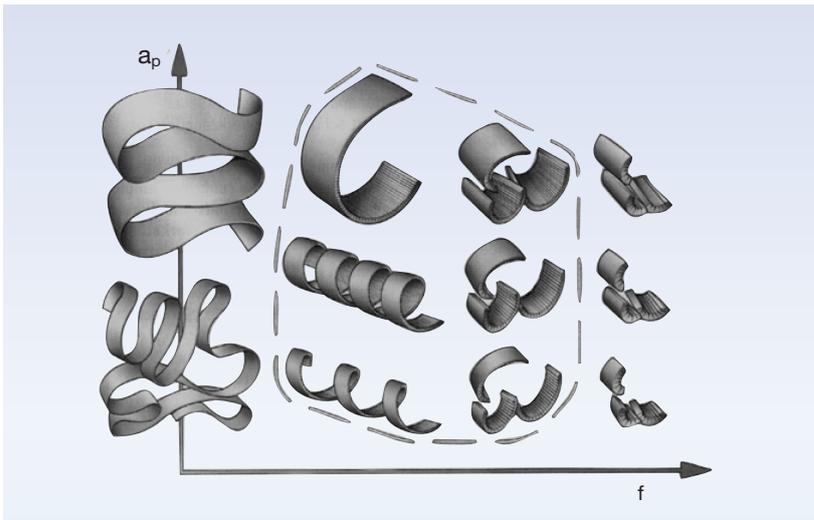


Bild 2.38: Arbeitsbereich einer Platte (nach Sandvik).

stoffe. Dies sind Keramiken insbesondere auf Aluminiumoxid Basis und hochharte Schneidstoffe auf Diamant und Bornitrid Basis. Auch bei Verfahren mit unterbrochenem Schnitt wie beim Fräsen führt ein Kühlmittelstrahl beim Schneidenaustritt zu plötzlichem Abkühlen, also zum Thermoschock. Das Fräsen mit Hartmetall, insbesondere mit CVD-beschichteten Wendeschneidplatten, sollte daher trocken erfolgen. Ausnahmen bildet das Fräsen von Titan-Werkstoffen, von Nickelbasislegierungen und wenigen rostfreien Stählen.

Die Anforderungen an Kühlschmier-systeme lassen sich nach Haupt- und Zusatzfunktionen gliedern. Hauptfunktionen sind:

Kühlen:

Wärmeabfuhr aus dem Werkzeug, dem Werkstück und der Maschine,

Schmieren:

Verringern der Reibung zwischen Werkzeug und Werkstoff und Minderung der erforderlichen Kräfte und Leistungen, Verringerung der Klebeigung zwischen Schneid- und Werkstoff.

Die Anforderungen an die beiden Hauptfunktionen sind in hohem Maß von den spanenden Bearbeitungsverfahren abhängig. Bild 2.40 gibt eine schematische Übersicht, wobei im Einzelfall weitere Kriterien wichtig sein können.

Daneben können Kühlschmierstoffe verschiedene Zusatzfunktionen übernehmen wie den Abtransport der Späne und den Oberflächenschutz der Werkstücke.

Weitere Anforderungen an Kühlschmierstoffe sind

- Humanverträglichkeit,
- Unschädlichkeit gegen Maschinenteile,
- Alterungsbeständigkeit und
- biologische Abbaubarkeit.

Die flüssigen Kühlschmierstoffe für die Zerspaltung lassen sich nach Bild 2.41 gliedern.

Wassergemischte Kühlschmierstoffe weisen wegen ihrer höheren Wärmekapazität, ihrer Wärmeleitfähigkeit und ihrer Verdampfungswärme bessere Kühlwirkungen auf als Mineralöle. Wassergemischte Kühlschmierstoffe kön-

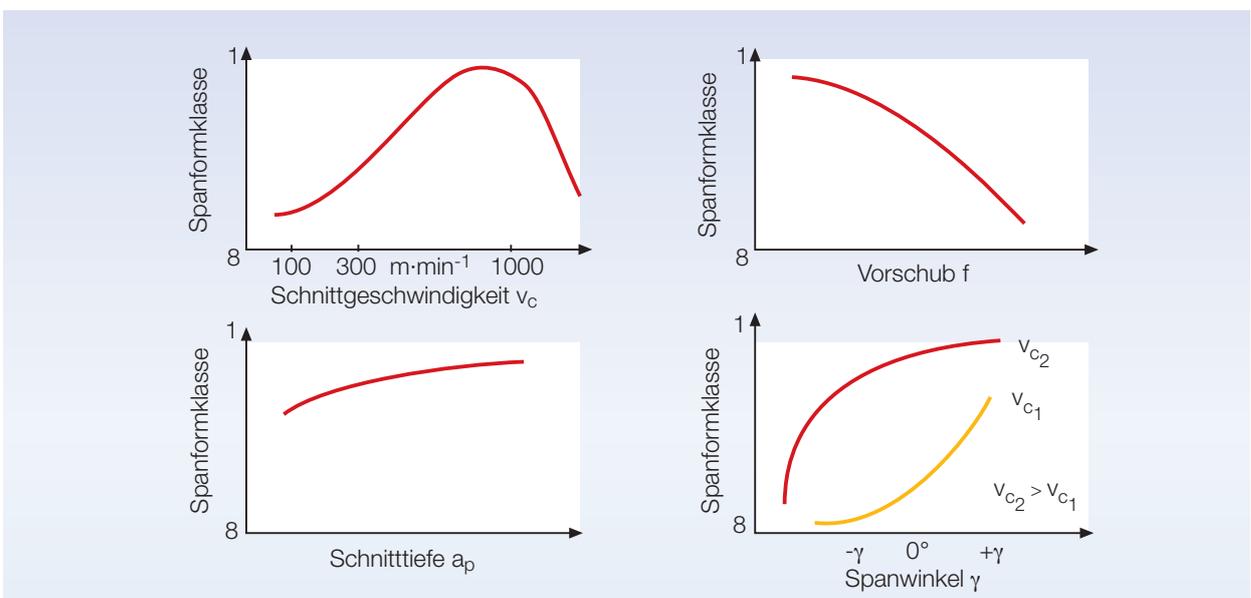


Bild 2.39: Schnittbedingungen und Spanform.

nen für fast alle Bearbeitungen an Stahl, Gusseisen und Aluminiumlegierungen eingesetzt werden. Etwa 90 % der Fertigungsanlagen werden mit wassergemischten Kühlschmierstoffen betrieben. In beiden Kategorien können neben den Mineralölen auch synthetische Flüssigkeiten verwendet werden.

Folgende Kühlschmierkonzepte lassen sich unterscheiden:

- Überflutungskühschmierung,
- Mindermengenkühschmierung (MMKS) und
- Trockenbearbeitung.

Die **Überflutungskühschmierung** ist durch die konventionelle Art der Flüssigkeitszufuhr gekennzeichnet. Im Arbeitsraum wird die Wirkstelle über eine oder mehrere Düsen mit ausreichendem Strom der Flüssigkeit überflutet. Bei Innenbearbeitungen, so z. B. beim Bohren, werden zunehmend auch Innenzuführungen von Kühlschmierflüssigkeit eingesetzt.

Die **Mindermengenkühschmierung (MMKS)** arbeitet mit weit geringeren Flüssigkeitsmengen als die konventionelle Überflutungskühschmierung, was an sich schon angesichts der durchaus kostenmäßig ins Gewicht fallenden Aufwende von Vorteil ist (siehe Abschnitt 1.3). Gegenüber der konventionellen Kühschmierung ist allerdings die Kühlwirkung eher gering; denn es wird mit einem Druckluft-Flüssigkeitsgemisch gearbeitet, wobei der Flüssigkeitsanteil bei 50 ml/h liegt. Somit besteht nur eine geringe Möglichkeit, Wärme durch Wärmeleitung in die Flüssigkeit abzuführen. Wegen der geringen Flüssigkeitsmenge ist auch die durch Verdampfen abführbare Energie begrenzt. Die Wirkung der MMKS beruht folglich überwiegend auf Schmierung, d. h. dem Herabsetzen von Reibung und damit geringerer Wärmeentstehung während



Bild 2.40: Anforderungen spanender Verfahren an Kühlschmierstoffe.

des Spanens. Aus diesem Zusammenhang folgt, dass die MMKS dort besonders wirksam ist, wo die Leistungsumsetzung an der Wirkstelle höherer Reibanteile aufweist.

Neben dem geringeren Flüssigkeitsbedarf und den damit verbundenen geringeren Aufwenden für die Kühlschmiersysteme ist die verschwindend geringe Kontamination

der Späne interessant. Es entfallen aufwendige Waschprozesse für Werkstücke und Späne. Allerdings müssen besondere MMKS-Systeme beigestellt werden. Sie unterscheiden sich durch die Art der Gemischerzeugung [WEIN99]. Funktional günstig sind die Systeme, die in die Maschinen integriert sind, z. B. in Bohr- oder Frässpindeln.

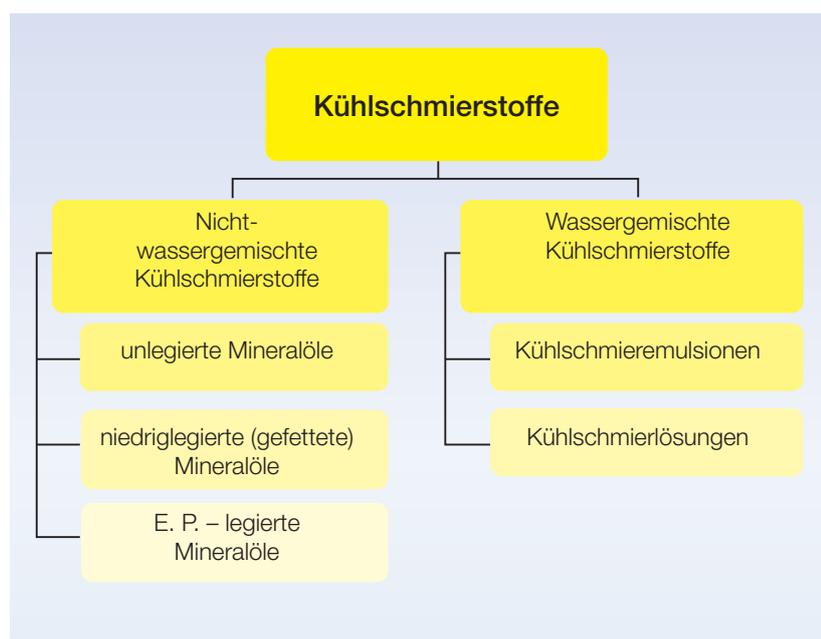


Bild 2.41: Kühlschmierstoffe.

Trockenbearbeitung ist aus Kosten- und Umweltgründen interessant, wo nicht aus Gründen der Thermoschock-Empfindlichkeit auf flüssige Kühlschmierstoffe verzichtet werden muss (siehe oben). Probleme bei der Trockenbearbeitung können sich ergeben durch

- hohe Temperaturen im Werkzeug wegen geringer Wärmeabfuhr,
- thermisch bedingte Maß- und Formänderungen des Werkstücks,
- thermische bedingte Randzonenbeeinflussungen am Werkstück und
- fehlende Möglichkeit des Späne-transportes von der Wirkstelle.

Diese Probleme sind weitgehend verfahrensabhängig.

2.10 Nichteisenmetalle

Aluminiumlegierungen

Aluminium und seine Legierungen haben eine Dichte in der Größenordnung von $2,7 \text{ g/cm}^3$. Hauptanwender von Aluminium sind daher die Industrien, deren Produkte auf Gewichtsersparnis setzen. Das sind in erster Linie Produkte für den Fahrzeug- und Flugzeugbau mit mehr als 40 % des Aluminiumverbrauchs. Es folgen das Bauwesen mit ca. 18 % und der Maschinenbau mit ca. 9 % des

Verbrauchs. Die Gewinnung von Primäraluminium ist sehr energieintensiv – 1 t Hüttenaluminium erfordert einen Verbrauch von 18000 kWh Elektroenergie – danach ist Aluminium aber gut recycelbar. Etwa 20 % des Aluminiums werden durch Sekundäraluminium gedeckt.

Reinaluminium und weiche Aluminiumlegierungen bereiten trotz ihrer geringen Festigkeit und damit geringer Zerspankräfte und -energien beim Spanen durchaus Schwierigkeiten. Diese liegen in der Spanbildung selbst begründet. Es kommt zum Schmieren, zu starker Aufbauschneidenbildung und zu einer „Scheinspanbildung“, bei der sich teigiges Material auf Grund von örtlichen Temperaturerhöhungen und Reibeffekten seitlich aus den Kontaktzonen Spanfläche/Span und Freifläche/Werkstückoberfläche herausdrückt und zu Prozessstörungen führt. Wirrspäne und stark beeinträchtigte Oberflächen am Werkstück sind die Folgen. Solche Werkstoffe sind für eine spanende Bearbeitung problematisch und sollten – wenn nicht andere Gründe wie die Verformbarkeit, die elektrische oder thermische Leitfähigkeit oder die Korrosionsfestigkeit dies fordern – vermieden

werden. Im Hinblick auf die Verwendung im Fahrzeug- und Maschinenbau sind Aluminiumknetlegierungen und Aluminiumgusslegierungen bedeutsam. Bei Knetlegierungen steht die Umformbarkeit im Vordergrund, bei Gusslegierungen das Formfüllungsvermögen und die Vergießbarkeit.

Die wichtigsten Legierungszusätze von Aluminium sind Cu, Mg, Mn, Zn und Si. Ihre Beimengungen bestimmen die Festigkeit, wie Bild 2.42 zeigt. Kupfer steigert die Festigkeit und verbessert die Zerspanbarkeit. Mangan fördert die Duktilität und Gießbarkeit, Silizium verbessert den Korrosionswiderstand und die Gießbarkeit und Magnesium wirkt festigkeitssteigernd und erhöht die Korrosionsbeständigkeit. Es wird zwischen aushärtbaren und nichtaushärtbaren bzw. naturharten Legierungen unterschieden. Bei letzteren wird eine Verfestigung über Mischkristallbildung erreicht, bei aushärtbaren Legierungen geschieht dies durch Ausscheidung vorher gelöster Bestandteile. Aus Bild 2.42 ist zu erkennen, dass sich die Festigkeit durch die Zusammensetzung in weiten Grenzen beeinflussen lässt.

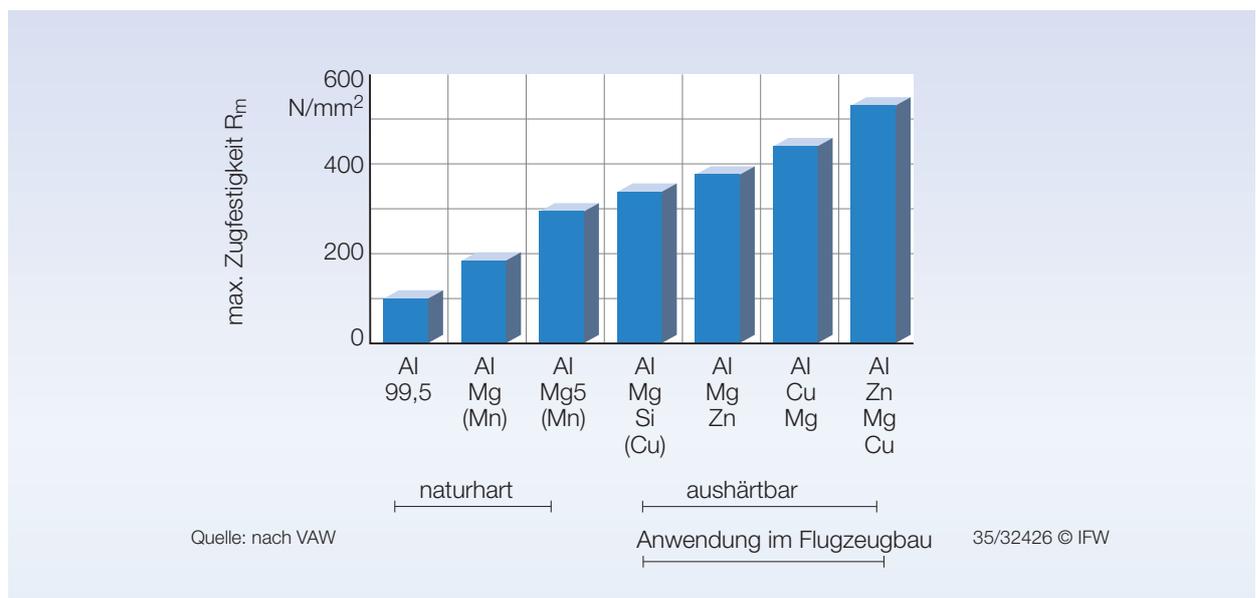


Bild 2.42: Festigkeit von Aluminiumknetlegierungen.

Wegen der gegenüber Stahl und anderen Eisenwerkstoffen geringeren Festigkeit lassen sich Aluminiumlegierungen je nach Schneidstoff mit erheblich höheren Schnittgeschwindigkeiten und Zeitspanvolumen zerspanen. Als Schneidstoffe kommen in Frage:

- Schnellarbeitsstahl,
- Hartmetalle,
- Diamantbeschichtete Schneiden,
- Polykristalliner Diamant.

In Dreh- oder Fräsprozessen lassen sich mit **Schnellarbeitsstahl** Werkzeug begrenzend Zeitspanvolumen von **2000 cm³/min** erreichen, mit **Hartmetall 4000 cm³/min** und mit **Diamant 1500 cm³/min**. Die Schnittgeschwindigkeiten liegen für die drei Schneidstoffarten bei 400 m/min (HSS), 1200 m/min (HW) und 1800 m/min (Dt).

Bei den hohen Schnittgeschwindigkeiten, die aus Werkzeugsicht möglich sind, ist zu fragen, ob bei gegebenen Schnittkräften die an der Spindel zur Verfügung stehende Leistung ausreicht; denn die Zerspanleistung ist, wie vorn erläutert,

$$P_c = F_c \times v_c \quad (2.21)$$

Bei Aluminiumzerspannung verfügbare Leistung an der Arbeitsspindel beachten!

Zwar fallen mit der Schnittgeschwindigkeit auch beim Spanen von Aluminiumlegierungen die Kräfte deutlich ab (Bild 2.43), sie tun dies jedoch unterproportional, sodass der leistungssteigernde Einfluss der Geschwindigkeit erheblich größer ist als der mindernde Einfluss der Schnittkraft.

Legierungen mit übereutektischem Siliziumgehalt (Eutektikum bei 12,5 %

Silizium) werden auch als Kolbenwerkstoffe bezeichnet und für Motorwerkstoffe (Block, Kopf) eingesetzt. Si-Gehalte werden bis 24 % genutzt. Solche Werkstoffe wirken wegen ihrer erhöhten Festigkeit und der Silizium- und auch Al₂O₃-Einschlüsse verschleißend auf die Schneiden der Werkzeuge. Es werden Hartmetalle eingesetzt. In kritischen Fällen haben sich diamantbasierte Schneiden bewährt.

Titanlegierungen

Die Festigkeit von Titanlegierungen ist der von hochvergüteten Stählen ähnlich. Allerdings sind die übrigen physikalischen Eigenschaften, die in die Zerspanbarkeit eingehen, stark unterschiedlich. Die Bruchdehnung, der E-Modul und die Wärmeleitfähigkeit sind gering. Die Dichte liegt bei 4,5 g/cm³. Titan gehört damit zu den Leichtmetallen. Die Titanlegierungen werden daher im Flugzeugbau und in anderen Bereichen, wo eine geringe Dichte bei guter Festigkeit gefordert ist, eingesetzt. Titanlegierungen sind zudem gut biotolerant und haben daher ein interessantes Anwendungsgebiet in der Medizintechnik (biokompatible Implantate, Hüftgelenke, Stents, Kniegelenke). Schließlich sind sie gegen ein weites Spektrum von Stoffen korrosionsbeständig, womit sie in der chemischen Industrie Anwendung finden.

Titan und seine Legierungen werden eingeteilt in

- Reintitan,
- α-Legierungen,
- (α+β)-Legierungen und
- β-Legierungen.

Das Spanen von Titan und Titanlegierungen ist schwierig. Hohe Härte, geringe Bruchdehnung, geringe Wärmeleitfähigkeit und hohe Reaktivität im höheren Temperaturbereich führen zu hohen Zerspankräften, zu hohen Temperaturen in der Spanbildungszone und

zur Neigung von Verschweißungen. Die Folge ist hoher Verschleiß, die Neigung zu Ratterschwingungen und das Entstehen von physikalischen Randzonenbeeinflussungen. Die hohe Reaktivität insbesondere dünner Späne und Staubpartikel können zum Entzünden und zur Verpuffung führen. Der geringe Elastizitätsmodul steht für eine hohe Nachgiebigkeit als Folge von Passivkräften während des Spanens und daraus folgenden Maß- und Formabweichungen und auch zum Aufbau von selbsterregten Schwingungen.

Reintitan und α-Legierungen sind am besten zerspanbar. Die Zerspanbarkeit nimmt in der oben angesprochenen Reihenfolge zu den β-Legierungen hin ab. Die am häufigsten eingesetzte Universalsorte ist die (α+β)-Legierung Ti-6Al-4V. Allerdings können Variationen der Zusammensetzung zu sehr unterschiedlichen mechanischen und auch technologischen Eigenschaften führen. In der Luft- und Raumfahrt eingesetzte Bauteile werden häufig geschmiedet. Die Schmiedehaut ist sehr fest und wirkt stark verschleißend. Sie wird in der Praxis auch als „Elefantenhaut“ bezeichnet. Sie zu zerspanen stellt eine besondere Herausforderung dar.

Titanlegierungen werden meist im lösungsgeglühten oder ausgehärteten Zustand bearbeitet. Die Härte liegt dann zwischen 300 HB bis 440 HB, was einem Festigkeitsbereich von 650 N/mm² bis 1300 N/mm² entspricht. Daraus folgt offensichtlich eine erhebliche Spanne in der Zerspanbarkeit.

Schneidstoffe sollten eine hohe Verschleißfestigkeit, ausreichenden Widerstand gegen plastische Verformung auch bei höheren Temperaturen (Warmfestigkeit), geringe Diffusionsneigung und hohe Zähigkeit aufweisen.

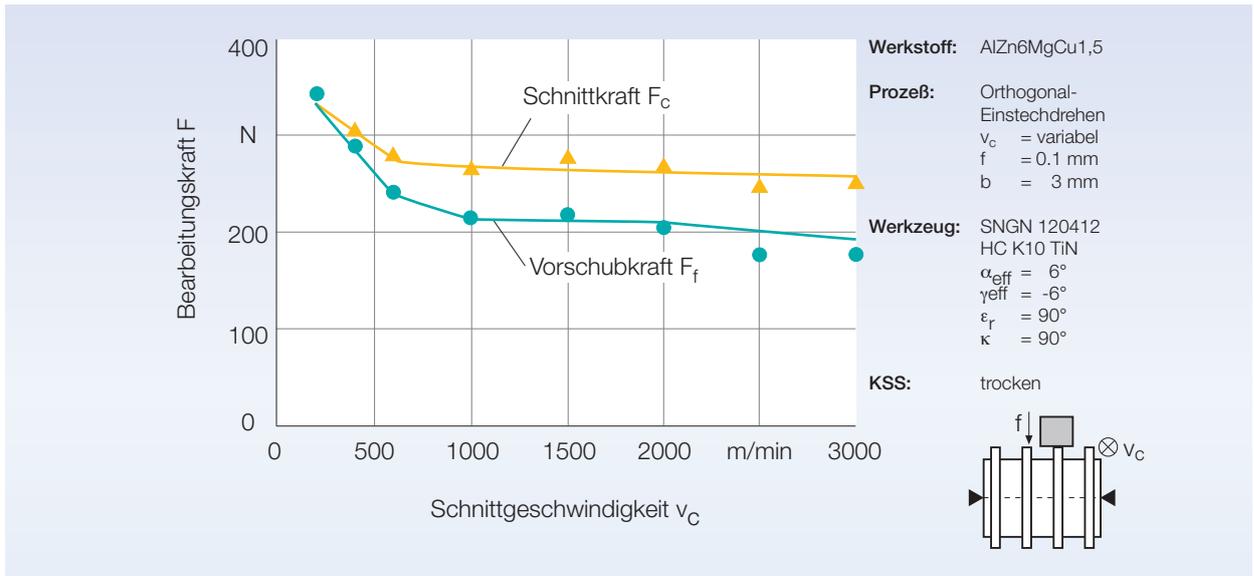


Bild 2.43: Zerspankräfte und Schnittgeschwindigkeit.

Die Schneidkeile sollten extrem scharfkantig ausgeprägt sein. Es wurden spezielle feinkörnige Hartmetallsorten für die Titanbearbeitung entwickelt. Neben dem scharfkantigen unbeschichteten Hartmetall werden PVD-beschichtete Sorten der Anwendungsgruppen P10 bis P30 und CVD-beschichtetes Hartmetall der Gruppen P40, M30 und S30 eingesetzt mit in der genannten Reihenfolge steigender Zähigkeit, aber geringerer Verschleißfestigkeit. Wegen der starken Wärmeentwicklung und der im Vergleich zur Stahlbearbeitung erheblich geringeren Wärmeabfuhr über Späne als Folge der niedrigen Wärmeleitfähigkeit ist auf gute Kühlschmierung auch bei Fräsprozessen (anders als bei anderen Werkstoffen) zu achten.

Titan zeigt eine starke Neigung zur Kaltverfestigung auf Grund der gleich-

zeitigen hohen Festigkeit und Verformbarkeit. Daraus folgt die Neigung zur Randzonenbeeinflussung und zur Bildung von hohen Eigenspannungen nahe der Oberfläche. Selbst bei geringen Schnittgeschwindigkeiten kommt es zu starker Lamellenspanbildung. Auch besteht die Gefahr, dass sich Aufbauschneiden und Pressschweißungen am Werkzeug und Werkstück bilden, insbesondere bei nicht scharfen Schneiden. Folgende Empfehlungen lassen sich grundsätzlich unabhängig vom Verfahren geben:

- Scharfe, positive Schneidkeile mit ausreichendem Freiwinkel,
- Steife Einspannung des Werkstücks, geringe Systemnachgiebigkeit,
- Zeitspanvolumen eher über Schnitttiefe und Vorschub als über Schnittgeschwindigkeit steigern,
- Optimierte Vorschübe (nicht zu groß, um Kräfte zu begrenzen; nicht zu ge-

ring wegen starker Kaltverfestigung),

- Reichliche und geeignete (verfahrensabhängig) Zufuhr von Kühlschmierstoff,
- Gering verschlissene Schneiden einsetzen, um Wärmeentwicklung zu begrenzen,
- Bedingungen mit gegen Null tendierender Spannungsdicke wie beim Gegenlaufräsen vermeiden.
- Fräsen auch mit flüssigen Kühlschmierstoffen.

Aus Sicht der zur Verfügung stehenden Maschinen ist zu beachten, dass wegen der begrenzten Schnittgeschwindigkeit geringe Drehzahlen auftreten können. Die Maschinen müssen daher auf das notwendige Drehmoment und die Zerspankräfte ausgelegt sein. Im unteren Drehzahlbereich kann die Leistung nicht ausreichend sein!

3. Drehen

3.1 Verfahrensarten, Kenngrößen, Maschinen

Durch Drehen werden rotationssymmetrische Formen erzeugt. Im Allgemeinen rotiert das Werkstück, und das Werkzeug führt die Vorschubbewegung aus.

Das Zeitspanvolumen QV ergibt sich

$$QV = a_p \times f \times v_c \quad (3.1)$$

(anders als beim Fräsen!) aus:

$$QA = f \times v_c \quad (3.2)$$

Die Zeitspanfläche ist (anders als beim Fräsen!):

Je nach Vorschubrichtung unterscheidet man:

- Längsdrehen (Runddrehen), Vorschub parallel zur Achse,
- Plandrehen (Querdrehen), Vorschub quer zur Achse,
- Formdrehen, Vorschub in zwei Richtungen (NC-) bahngesteuert,
- Profildrehen, Vorschub geradlinig, Werkzeugschneide enthält das Profil und
- Schraubdrehen, Vorschub mit Werkstückrotation gekoppelt.

Daneben kann auf Spezialmaschinen unrund gedreht werden. Produktions-Drehmaschinen werden in der Regel numerisch gesteuert. Sie sind mit Werkzeugspeichern und Werkzeughandhabungssystemen ausgerüstet. Diese sind häufig Revolverköpfe. Durch zusätzliche Werkzeugmagazine kann die Zahl der automatisch einzuwechselnden Werkzeuge erhöht werden. Die das Werk-

stück tragende Spindel kann horizontal oder vertikal angeordnet sein.

Die Revolverköpfe können je nach Bauart mit rotierenden Werkzeugen zum Bohren und Fräsen ausgerüstet werden (Verfahrenskombination, siehe Abschnitt 1.4). Für einen automatischen Werkstückwechsel werden Werkstückspeicher eingesetzt, die einen Betrieb über Pausen hinweg oder in unbemannten Schichten gestatten. Wie vorn erwähnt gibt es einen Trend zur Komplettbearbeitung. Durch Kombination verschiedener spanender Verfahren und auch spanender mit anderen Fertigungsverfahren wie Schweißen oder Härten wird dieser Trend unterstützt. Ob Kombinationsmaschinen wirtschaftlich arbeiten, muss im Einzelfall untersucht werden. Weitere Automatisierungskomponenten sind Maschinen, eigene Messvorrichtungen, Maschinen- und Werkzeugüberwachungssysteme.

Maschinen mit vertikal hängenden Spindeln können in „pick-up“-Anordnung ausgeführt sein, wobei sich die Werkstückspeicherung besonders günstig realisieren lässt. Umgeformte Teile werden häufig in Futter gespannt, in Dreibackenfuttern bei zylindrischen Spannflächen oder Zweibacken- oder Sonderspannfuttern bei profilierten Spannflächen. Lange Teile werden zwischen Futter oder Stirnmitnehmer und Reitstockspitze gespannt.

Drehmaschinen sind gekennzeichnet durch

- Spindelanordnung (horizontal/vertikal),
- Antriebsleistung,
- maximale Drehzahl,

- Drehdurchmesser bzw. Spitzenhöhe und
- maximale Drehlänge oder Spitzenweite.

Bei Horizontaldrehmaschinen wird zwischen Kurzdrehmaschinen für Futterteile und Spitzendrehmaschinen, auf denen zwischen Spitzen gearbeitet werden kann, unterschieden. Übliche Antriebsleistungen bei mittleren Drehmaschinen liegen zwischen 25 kW und 50 kW, maximale Drehzahlen sind vom Drehdurchmesser abhängig, bei Durchmessern von 450 mm werden maximale Drehzahlen von 6300 m/min vorgesehen. Meist begrenzen die Futter (Fliehkraftwirkung mindert die Spannkraft!) oder Unwuchten von Formteilen die maximal erreichbaren Drehzahlen.

3.2 Werkzeuge zum Drehen

Für Winkel am Drehwerkzeug gilt, was in Abschnitt 2.1 ausgeführt wurde. Beim Schrappen werden die Werkzeuge mit hohen Kräften belastet. Die umgesetzte Leistung und damit auch die entstehende Wärme und die Temperaturen sind groß. Danach muss der Schneidkeil des Werkzeugs ausgelegt werden. Um die mechanische Belastung des Schneidkeils zu verringern, wird mit Einstellwinkeln $\kappa < 90^\circ$ gearbeitet. Bei schweren Schrappschnitten werden Winkel bis herunter zu $\kappa = 45^\circ$ gewählt. Geringe Einstellwinkel empfehlen sich auch beim Überdrehen von rauer oder aufgehärteter Außenhaut oder beim Schrappdrehen im unterbrochenen Schnitt. Hier haben sich auch runde Schneidplatten bewährt. Wesentlich ist,

dass die Belastung im Eingriff über eine längere Schneide verteilt wird und dass die Schneidenecke nicht in der rauhen oder aufgehärteten Schicht spant oder stoßartig in Eingriff kommt. Eine zu große Eingriffslänge der Schneide vergrößert allerdings die Ratterneigung, d. h. das Auftreten von selbsterregten Schwingungen, die zum Werkzeugbruch führen können. Auch wird die Werkstückoberfläche durch Schwingungen mit großen Amplituden unzulässig beeinträchtigt.

Vorschub und gleicher Zustellung der Leistungsbedarf mit abnehmendem Einstellwinkel κ erhöht (Bild 3.1).

Drehwerkzeuge werden in drei Arten ausgeführt:

- als Vollstahlwerkzeuge oder Drehlinge,
- als gelötete Drehwerkzeuge und
- als Klemmwerkzeuge.

Vollstahlwerkzeuge oder Drehlinge werden meist aus Schnellarbeitsstahl

geschliffen werden mit den Nachteilen der langen Werkzeugwechselzeiten und der wiederholten Positionierung im Arbeitsraum der Maschine. Gelötete Werkzeuge werden nur noch als Sonderwerkzeuge verwendet.

Klemmwerkzeuge werden heute weitestgehend am häufigsten eingesetzt. Sie bestehen aus einem Schaftteil oder Halter, der der Positionierung des Werkzeugs im Arbeitsraum der Maschine und der Kraftübertragung dient, und dem eigentlichen Schneidenteil, der als Wendeschneidplatte, auch Klemmplatte genannt, ausgeführt wird. Daraus ergeben sich wenigstens zwei Schnittstellen, eine zwischen Schaftteil und Werkzeugaufnahme der Maschine und die andere zwischen Schaftteil und Wendeschneidplatte. Bild 3.2 zeigt den Aufbau eines Klemmhalters nach DIN 4983. Das Bild gibt nur einen Auszug aus den standardisierten Varianten wieder, worin die stofflichen Varianten noch nicht enthalten sind. Daraus folgt bereits eine kaum überschaubare Vielfalt. Im Sinne einer ökonomischen Vorratshaltung besteht eine wichtige Aufgabe darin, eine für einen Betrieb optimale Auswahl zu treffen (Bild 3.3). Mehrbereichs-Schneidstoffsorten und Halter und Plattenformen, die für ein breites Anwendungsspektrum einsetzbar sind, sind im Allgemeinen auf einen engen Anwendungsfall fokussierten Werkzeugen vorzuziehen.

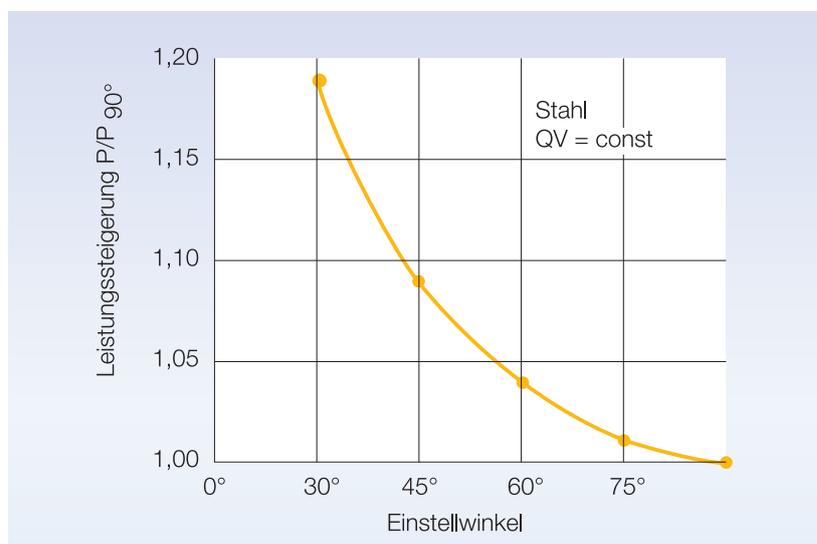


Bild 3.1: Leistungsbedarf und Einstellwinkel.

Um die thermische Beanspruchung in Grenzen zu halten, sollte der Eckenwinkel ϵ groß sein; denn dadurch wird der Raumwinkel vergrößert, durch den die Wärme aus der thermisch hochbelasteten Spitze des Schneidkeils abfließen kann.

Schruppen: Keil- und Eckenwinkel (β und ϵ) groß wählen.

Allerdings wird, wie vorn erläutert, durch eine Verringerung des Einstellwinkels die spezifische Schnittkraft vergrößert. Folglich wird bei gleichem Spannungsquerschnitt, also bei gleichem

hergestellt. Die aktive Schneidkante wird durch Anschleifen erzeugt. Daher wird diese Art Werkzeuge häufig als Profildrehmeißel eingesetzt, vorzugsweise in der Automatendreherei oder als Werkzeuge mit sehr geringen Abmessungen, die eine andere Befestigungsart erschweren oder unmöglich machen. Im letzteren Fall findet man auch Vollhartmetallwerkzeuge.

In **gelöteten Drehwerkzeugen** werden Schneidplatten meist aus Hartmetall, in einigen Fällen auch aus Schnellarbeitsstahl auf einen Stahlschaft (Schaftquerschnitte nach DIN 770 - 2) aufgelötet. Sie müssen nach dem Löten angeschliffen und nach Verschleiß nachge-

Lagerhaltung von Haltern und Schneidplatten begrenzen.

Die Klemmung der Platten kann sehr unterschiedlich ausgeführt werden, wie Bild 3.4 zeigt. Es lassen sich grundsätzlich Klemmsysteme mit Spannpratzen für Platten ohne Loch und Klemmsysteme für Platten mit Loch, die über Kniehebel, direkt über Spannschraube oder über Exzentrerschraube gespannt werden, unterscheiden.

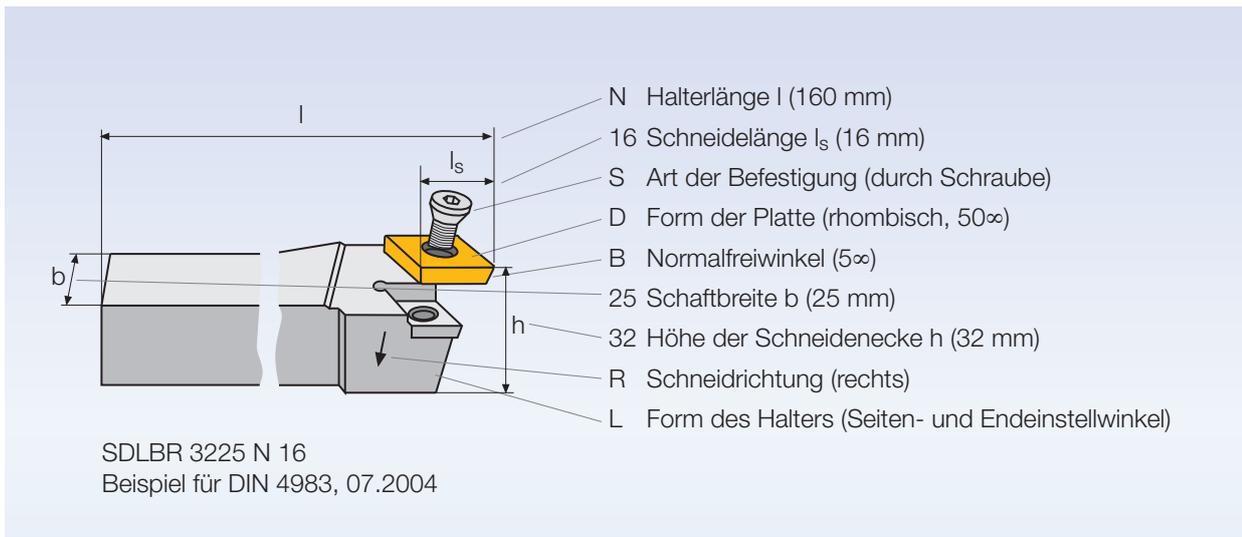


Bild 3.2: Drehklemmhalter, Kennzeichnung nach DIN 4983.

Die Bauarten sind meist patentrechtlich geschützt und in der Regel nicht kompatibel.

Für die Wahl eines Systems ist von Bedeutung:

- sicherer, steifer Plattensitz (beim Schruppen),
- günstige Krafteinleitung in den Halter (beim Schruppen),
- einfache Handhabung,
- Automatisierbarkeit des Halterwechsels, wo vorgesehen,
- wenig lose Teile,
- Einsatz von Spanleitstufen, falls erforderlich,
- freier, ungehinderter Spanabfluss und
- geringe Lageabweichungen beim Wechseln (beim Schlichten).

Die Formen der Wendeschneidplatten und des Halters sind für den Anwendungsfall wesentlich. Sie müssen nach der Werkstückkontur bzw. nach der Werkzeugbahn ausgewählt werden (Bild 3.5).

Das Bild zeigt einen allgemeinen Überblick der Einsatzgebiete der Wendeschneidplatten. Die quadratische Platte ist für schwere Zerspanung geeignet. Bei unterbrochenem Schnitt oder beim Abspannen von stark schleißenden Randzonen und Krusten, wie sie vor allem bei im Sand gegossenen Rohteilen auftreten,

Merkmale	Beispiel Bild 3.2	Kennbuchstaben/-zahlen
Art der Befestigung	S	
Form der Wendeschneidplatte	D	S quadratisch D rhombisch 50° C rhombisch 80° V rhombisch 35° T dreieck W sechseckig (trigon)
Form der Klemmhalter		A $\kappa_r = 90^\circ$ B $\kappa_r = 75^\circ$ C $\kappa_r = 90^\circ$ D $\kappa_r = 45^\circ$ L $\kappa_r = 60^\circ$ E $\kappa_r = 90^\circ$ G $\kappa_r = 90^\circ$ H $\kappa_r = 107,5^\circ$ I $\kappa_r = 95^\circ$
Normal-Freiwinkel	B	B = 5°, C = 7°, E = 20°, N = 0°
Schneidrichtung	R	R rechtsschneidend L linksschneidend N neutral (beiseitig)
Höhe der Schneidenecke	32	
Schaftbreite	25	in mm
Länge	N	A: 32, D: 60, F: 80, H: 100 K: 125, N: 160, R: 200, T: 300 in mm
Größe der Wendeschneidplatte	16	Schneidenlänge/Durchmesser (rund) in mm

Bild 3.3: Kennzeichnung von Klemmhaltern (Auszug aus DIN 4983, 07.2004).

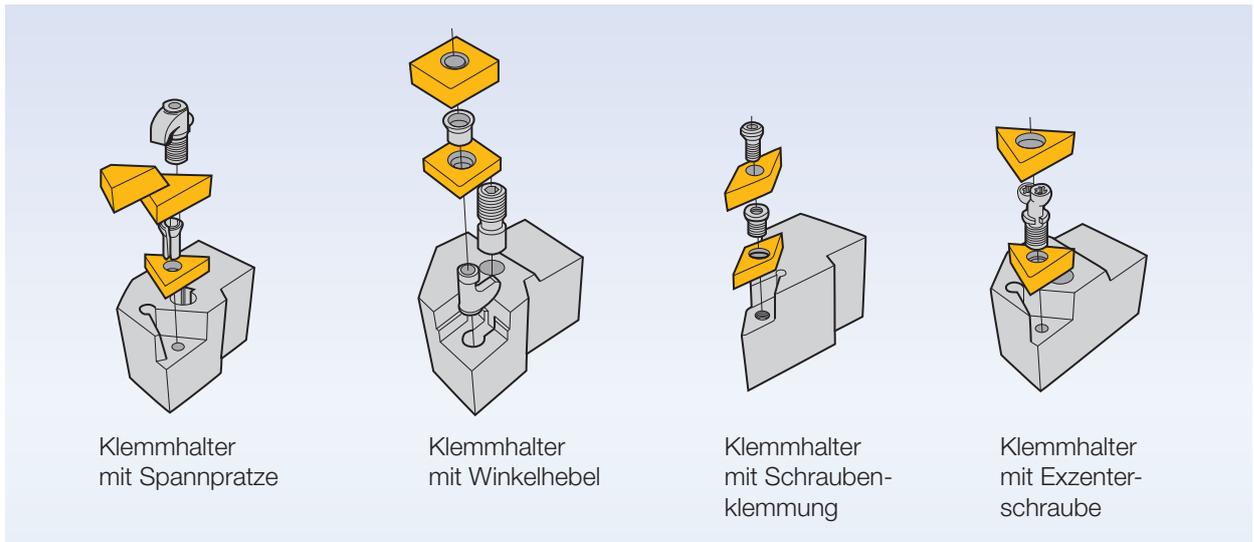


Bild 3.4: Klemmsysteme.

	R	S	C	W	T	D	V
Eckenwinkel		90°	80°	80°	60°	55°	35°
Bedingung (Kriterium)							
b_{max}	0,4 d	2/3 l	2/3 l	1/4 l	1/2 l	1/2 l	1/4 l
Schrappem (Festigkeit)	+	+	+	○			
Schruppen-Schlichten (Schneidzahl)		○	+	+	+	+	
Schlichten (Schneidzahl)			○	○	+	+	+
Längs-/Querdrehen (Vorschubrichtung)			+	○	○	+	+
Profildrehen (Zugänglichkeit)			○	○	+	+	+
Hartdrehen	+	+					
unterbrochener Schnitt	+	+	○	○	○		

+ best geeignet ○ geeignet

Bild 3.5: Wahl der Plattenform.

können zudem runde Platten hilfreich sein. Platten mit Eckenwinkel kleiner als 90° oder 80° sind für Längs-, Plan- und Formdrehoperationen einsetzbar und ermöglichen so eine Begrenzung der Platten- und Haltervielfalt. Allerdings sind sie bei schweren Schnitten weniger robust. Die rhombische Platte mit einem

Eckenwinkel von 80° wird häufig verwendet. Sie stellt einen guten Kompromiss zwischen Robustheit und vielfältiger Verwendbarkeit für unterschiedliche geometrische Bearbeitungsvarianten dar. Die Höhe der Schneidenecke bestimmt die mögliche Schafthöhe. Um biegesteife Einspannbedingungen zu haben, wird

eine möglichst große Schafthöhe empfohlen. Die Werkzeuglänge wird man so gering, wie es die Anwendung erlaubt, wählen.

Außendrehen: Schaftquerschnitt so groß wie möglich wählen.

Innendrehen: Einstellwinkel nahe 90°.

Halterauskragung so gering wie möglich einstellen.

Als Faustregel für die zulässige Schnittbreite b (s. a. Abschnitt 2) können die in Bild 3.5 aufgeführten Maximalwerte gelten. Der Schneideckenradius r_ϵ wird für Schrapp- und Schlichtoperationen unterschiedlich gewählt; beim Schrappen kommt es auf Robustheit und Bruchfestigkeit an (s. a. Abschnitt 2). Der Eckenradius wird möglichst groß gewählt. Als praktische Regel gilt, den Eckenradius etwa doppelt so groß wie den Vorschub einzustellen. Beim Schlichten ist die Oberflächengüte gefragt (s. a. Abschnitt 2). Der Eckenradius bildet sich unmittelbar auf der Oberfläche des Werkstücks ab. Wie vorn angegeben, kann die theoretische Rautiefe aus dem Eckenradius und dem Vor-

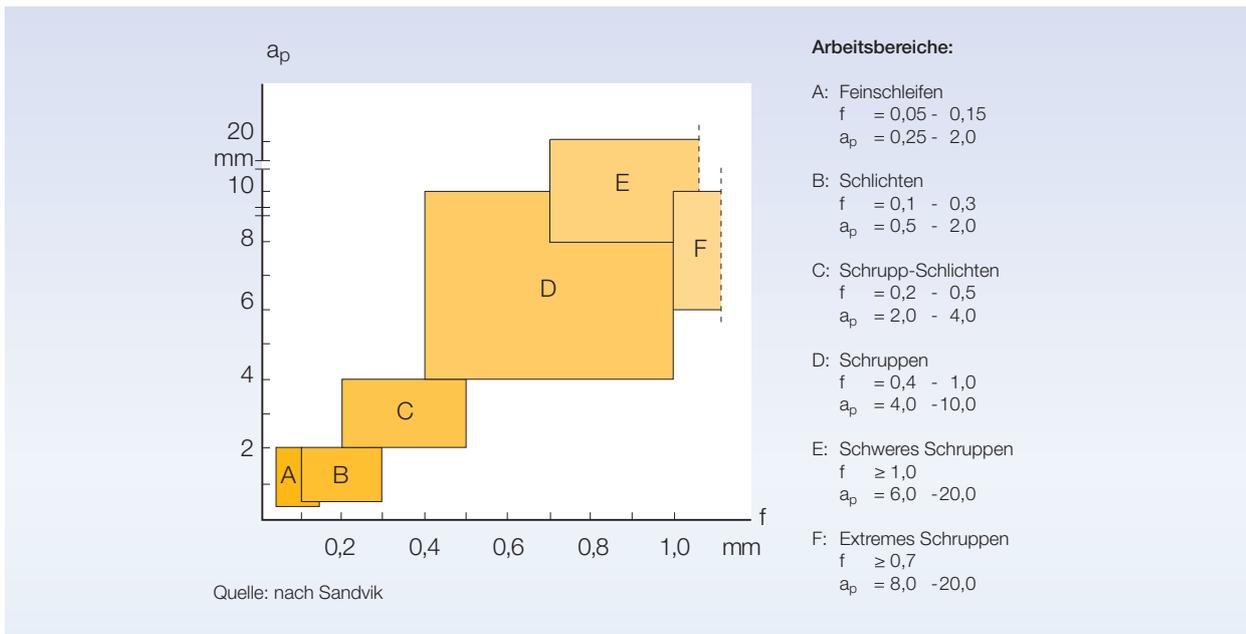


Bild 3.6: Arbeitsbereiche von Wendeschneidplatten (nach Sandvik/Coromant).

schub errechnet werden. Da Schwingungen, Werkstoffunregelmäßigkeiten und Verschleißwirkungen zusätzliche Rauheitsanteile erzeugen, ist mit der Formel (2.16) nur eine untere Grenze für die Rauheit angeschrieben. Als praktische Regel gilt, den Vorschub nicht größer als 1/3 des Eckenradius zu wählen.

Vorschub kleiner als 1/3 des Eckenradius.

Zusammenfassend als ein Bild der Orientierung für die Wahl von Vorschub f und Schnitttiefe a_p gilt Bild 3.6.

Für automatischen Werkzeugwechsel sind Schaftwerkzeuge wie vorn gezeigt, kaum geeignet. Daher wurden verschiedene Halter entwickelt, die eine Speicherung der montierten Werkzeuge und Halter in Werkzeugspeichern und automatisches Einwechseln erlauben. Häufig werden Schaftdrehwerkzeuge in

einem automatisch einwechselbaren Halter gespannt. Damit entsteht eine weitere Schnittstelle zwischen Schaft und Halter, die während des automatischen Betriebs nicht getrennt wird. Wendeschneidplatten können auch direkt in einem automatisch wechselbaren Halter gespannt werden. Eine Ausführungsform mit Hohlschaftkegel nach DIN 69893-1 zeigt Bild 3.7. Der Hohlschaftkegel wurde speziell für das Hochgeschwindigkeitsspannen entwickelt. Er

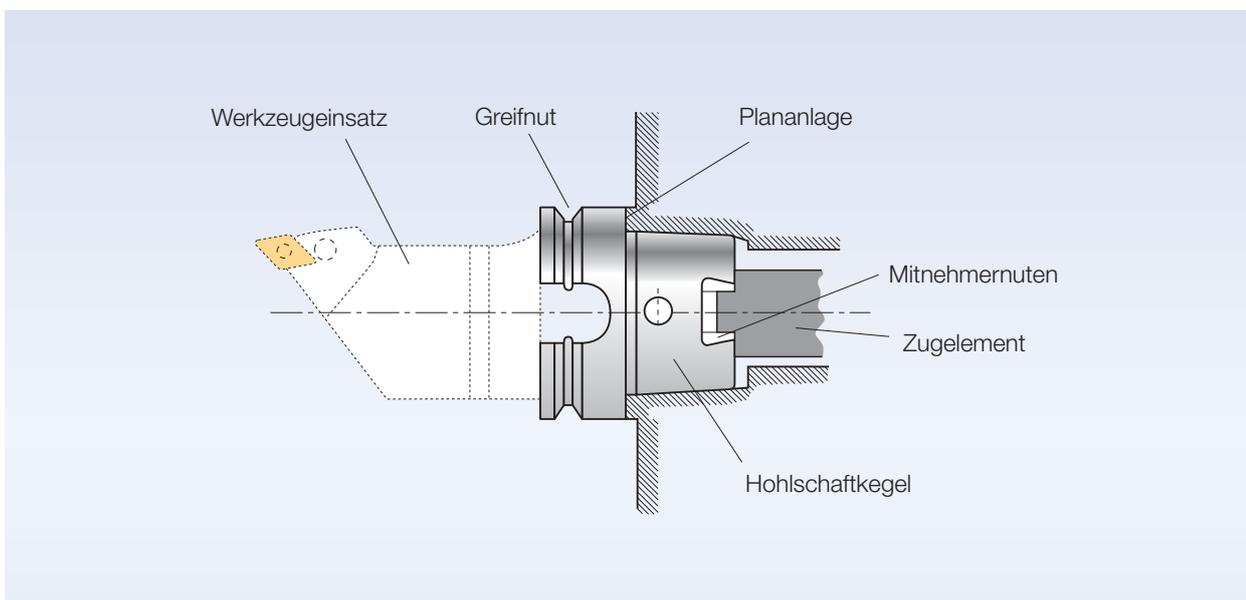


Bild 3.7: Werkzeughalter für automatischen Wechsel (nach DIN 69893-1).

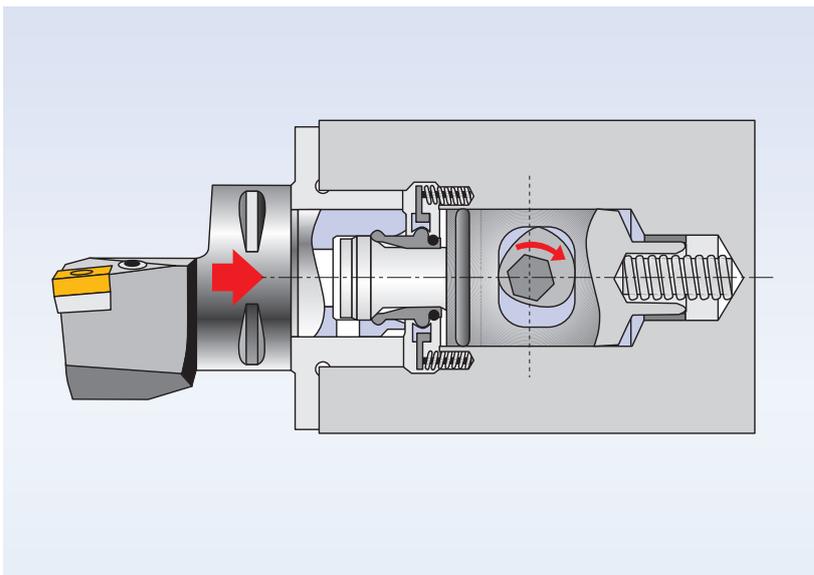


Bild 3.8: Capto-Halter (nach Sandvik).

zeichnet sich neben der Zentrierfunktion eines Kegels durch eine Plananlage aus. Andere proprietäre Halter aus Herstellernormen sind verbreitet. Dazu gehört das Capto-System (Bild 3.8). „Capto“ ist ein Werkzeugspannsystem von Sandvik, welches ursprünglich für Drehmaschinen zur Steigerung der Wechsellagergenauigkeit und Stabilität entwickelt wurde. Das System hat einen polygonförmigen Kegel ebenfalls mit Plananlage. Durch den speziellen Kegel muss für ein breites Anwendungsspektrum auf Herstellerrohlinge zurückgegriffen werden. Das System wird inzwischen für ein breites Spektrum von spanenden Verfahren und in Lizenz von verschiedenen Herstellern angeboten.

Die Wahl des Haltersystems ist von großer wirtschaftlicher Tragweite; denn für einen Betrieb kann damit insgesamt eine erhebliche Investition verbunden sein. Um schnelles Umrüsten, geringe Lagerhaltung und einheitliche Voreinstelleinrichtungen zu gewährleisten, wird man möglichst ein einheitliches System wählen, das für eine große Bandbreite von Maschinen und Werkzeugtypen geeignet ist. Daher sollten folgende Kriterien bei der Wahl beachtet und auf Gewicht geprüft werden:

- Steife und sichere Kraft- und Momentenübertragung,
- Hohe Positioniergenauigkeit der Schneiden,
- Verwendbarkeit für alle Operationen (rotierend und stationär) und Maschinen,
- Schnelle Austauschbarkeit,
- Begrenztes Investment,
- Möglichkeit der Werkzeugkodierung,
- Gute Erweiterbarkeit und
- Möglichkeit innerer Kühlschmierstoffzufuhr.

Eine Prüfung auf Wirtschaftlichkeit von Haltersystemen ist unerlässlich wegen des hohen Investments. Modulare Werkzeugsysteme sind meist doppelt so aufwendig wie konventionelle Werkzeuge. Daher müssen die über verkürzte Rüstzeiten, schnellere Werkzeugwechsel während eines Arbeitsvorgangs, häufigerer Werkzeugumschlag und geringere Werkzeuglagerhaltung eingespielten Vorteile sorgfältig gegenüber den wirtschaftlichen Lasten abgewogen werden. Dazu können Werkzeugverwaltungssysteme wirkungsvolle Hilfestellung leisten, wie sie von verschiedenen Werkzeugherstellern und Softwarehäusern angeboten werden.

3.3 Kräfte und Leistung beim Drehen

In Abschnitt 2.3 sind die Grundlagen der Kraft- und Leistungsberechnung dargestellt. Für die Zuordnung einer Bearbeitungsaufgabe beim Drehen ist der Leistungsbedarf der Maschine (Berücksichtigung eines Wirkungsgrads von 80 %) P_m für die **Schruppphase** von Interesse; denn es muss geprüft werden, ob das Leistungsangebot der vorgesehenen Maschine ausreicht. Für die Schruppbearbeitung von Stahl kann sehr überschlägig mit folgender Beziehung gearbeitet werden:

$$P_m [\text{kW}] = QV \left[\frac{\text{cm}^3}{\text{min}} \right] / 20 \quad (3.3)$$

Beispiel: Schruppen eines Lagersitzes mit einem Aufmaß von $a_p = 4 \text{ mm}$ und einem Vorschub von $f = 0,5 \text{ mm}$ bei einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 200 \text{ m/min}$ ergibt ein Zeitspannvolumen von $QV = 400 \text{ cm}^3/\text{min}$ und damit eine erforderliche Maschinenleistung von $P_m = 20 \text{ kW}$.

Beim Schlichten versucht die Passivkraft F_p die Schneide von der vorgegebenen Vorschubbahn abzudrängen und kann damit besonders bei schlanken, wenig steifen Werkstücken Maß- und Formfehler hervorrufen. Die Passivkraft ist weitgehend linear vom Eckenradius r_e des Drehmeißels und weniger stark vom Vorschub abhängig. Sie ist für Stahl überschlägig:

$$F_p [\text{N}] = 100 \times r_e [\text{mm}] \times \sqrt{f [\text{mm}]} / 2 \quad (3.4)$$

In dieser Faustformel sind die mittlere Festigkeit von Stahl und ein Einstellwinkel nahe 90° berücksichtigt. Die Schnittkraft ist in der Regel um den Faktor 3 bis 4 größer und verursacht damit auch eine entsprechend größere Durchbiegung des Werkstücks. Sie wirkt aber tangential an der Wirkstelle und erzeugt damit

einen Fehler zweiter Ordnung (Cosinusfehler), der für die Maß- und Formabweichung weit weniger ins Gewicht fällt.

Beispiel: Schlichten einer dünnen Welle mit folgenden Einstellungen: $f = 0,2 \text{ mm}$, $r_e = 0,8 \text{ mm}$ ergibt eine Passivkraft von $F_p = 28 \text{ N}$. Eine Welle von 20 mm Durchmesser und einer Länge von 250 mm würde dadurch eine maximale Durchbiegung von $5,0 \mu\text{m}$ erfahren, was einer Durchmesser-Abweichung von $10,0 \mu\text{m}$ entspricht.

3.4 Werkzeugführung

Die moderne NC-Technik bietet viele Möglichkeiten, Werkzeugbahnen beim Drehen so auszulegen, dass ein ungestörter Bearbeitungsablauf und gute Standzeiten der Werkzeuge erreicht werden. Besonderes Augenmerk sollte beim Überdrehen von Schmiedeteilen oder anderen Umformteilen darauf gelegt werden, dass raue und/oder aufgehärtete Krusten so bearbeitet werden, dass die Schneiden geschont werden. Dazu können die Rohteile zweckmäßig angefast werden. Bild 3.9 zeigt dafür Beispiele. Durch Anfasen werden die unvermeidbaren Lauffehler eines Rohteils an den Kanten beseitigt. Dies kann außen und innen notwendig sein. Das Anfasen kann in den Außen- oder Innendrehprozess integriert werden – allerdings mit dem Nachteil, dass die Wendeschneidplatte, zwar tunlichst an anderer Stelle als beim Über- oder Ausdrehen, erheblich belastet wird. Oder, wenn ausreichend Werkzeugspeicherplatz gegeben ist, können zusätzliche Werkzeuge eingesetzt werden, die das Anfasen übernehmen. Dazu können auch „verbrauchte“ Wendeschneidplatten Verwendung finden.

Beim Überdrehen von Schultern kann es beim Auslauf zu unerwünschter Ringbildung kommen, die zu erheb-

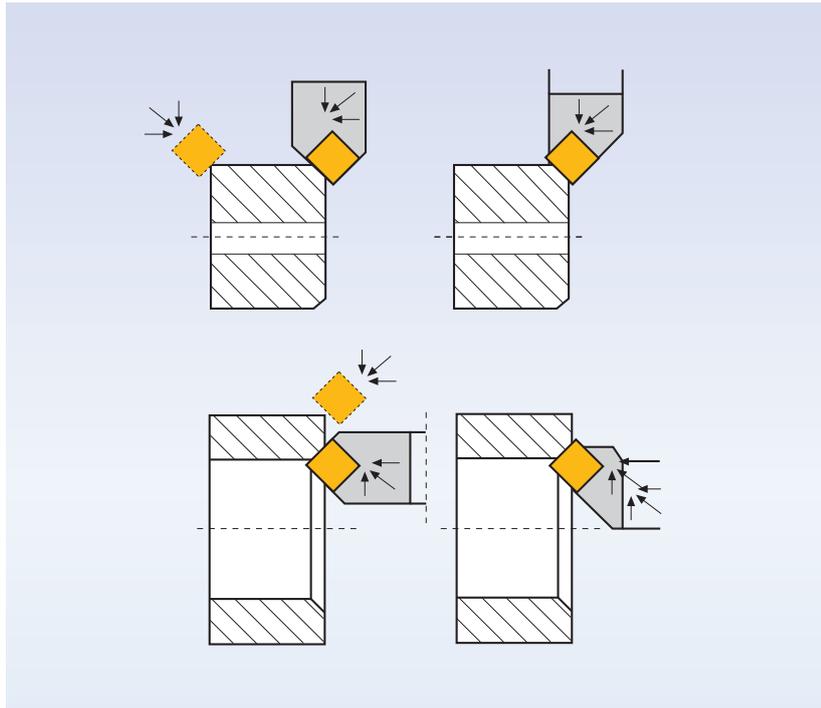


Bild 3.9: Anfasen von Rohteilen.

lichen Prozessstörungen führt. Dies lässt sich durch rückwärtiges Anfasen wirkungsvoll unterbinden (Bild 3.10, links). Gratbildung kann ebenfalls durch geeignete Bahnführung des Werkzeugs vermieden werden, wie Bild 3.10 rechts zeigt.

In Bild 3.11 sind einige Empfehlungen enthalten, die die Standzeiten der Werk-

zeuge erhöhen können. Beim Plandrehen kann es wegen eines freieren Spanflusses vorteilhaft sein, von innen nach außen zu drehen (Teilbild a). Im Teilbild b wird die für den Stofffluss beim Schmieden günstige oder notwendige Schräge an der Schulter mit einer robusten Wendeschneidplatte ausgeräumt um anschließend mit einer rhombischen Platte (W oder D) fertigbearbeitet

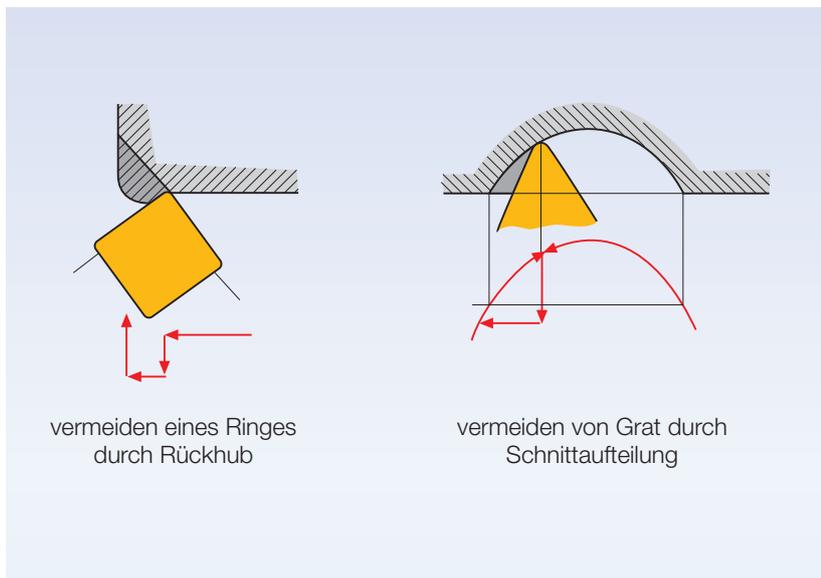


Bild 3.10: Vermeiden von Ringbildung (links) und Grat (rechts).

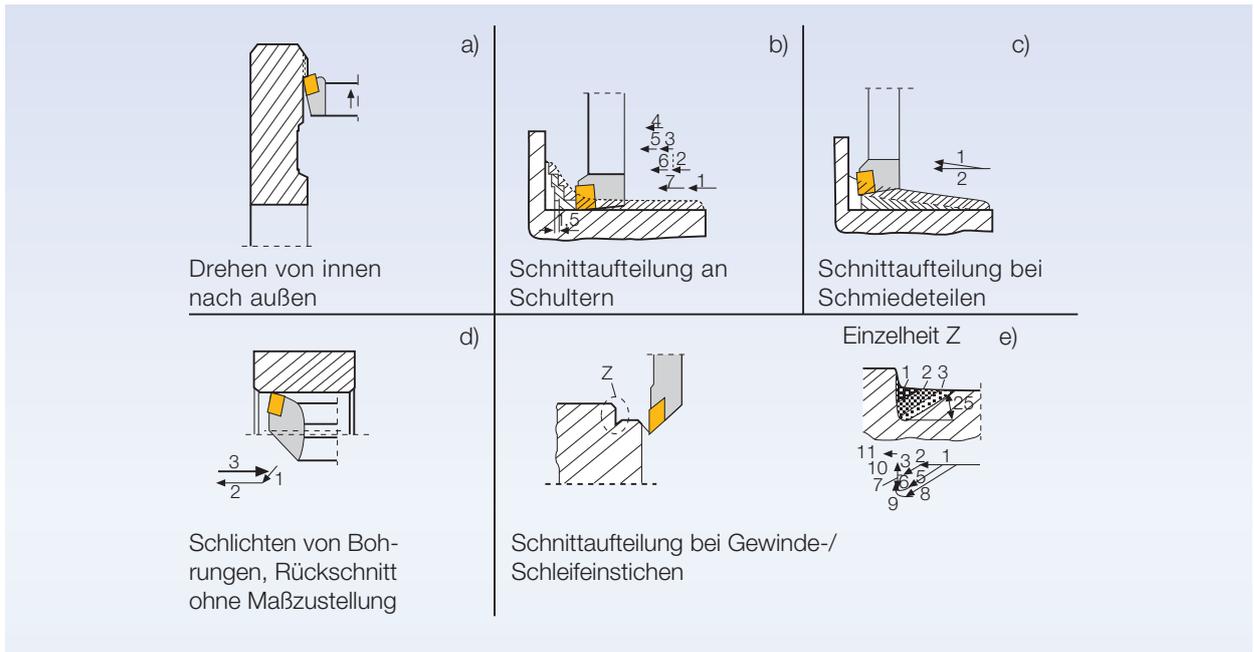


Bild 3.11: Schnittaufteilung an Umformteilen.

zu werden. Im Teilbild c folgt das Werkzeug der Kontur des Schmiedeteils an den Aushebeschrägen. Beim Ausdrehen von Bohrungen kann sich eine vom Futter abgewandte Vorschubrichtung (rückwärts fahrend) empfehlen, damit ablaufende Späne die erzeugte Oberfläche

im Innern der Bohrung nicht beschädigen (Teilbild d). Zum Schruppdrehen sollten stabile, kräftige Wendeschneidplatten eingesetzt werden. Das setzt voraus, dass Einstiche und Nuten mit separaten Werkzeugen erzeugt werden (Teilbild e).

3.5 Hochgeschwindigkeitsdrehen (HSC)

Das Hochgeschwindigkeitsspanen (HSC (high speed cutting)) wurde möglich, nachdem Schneidstoffe entwickelt waren, die die bei hohen Geschwin-

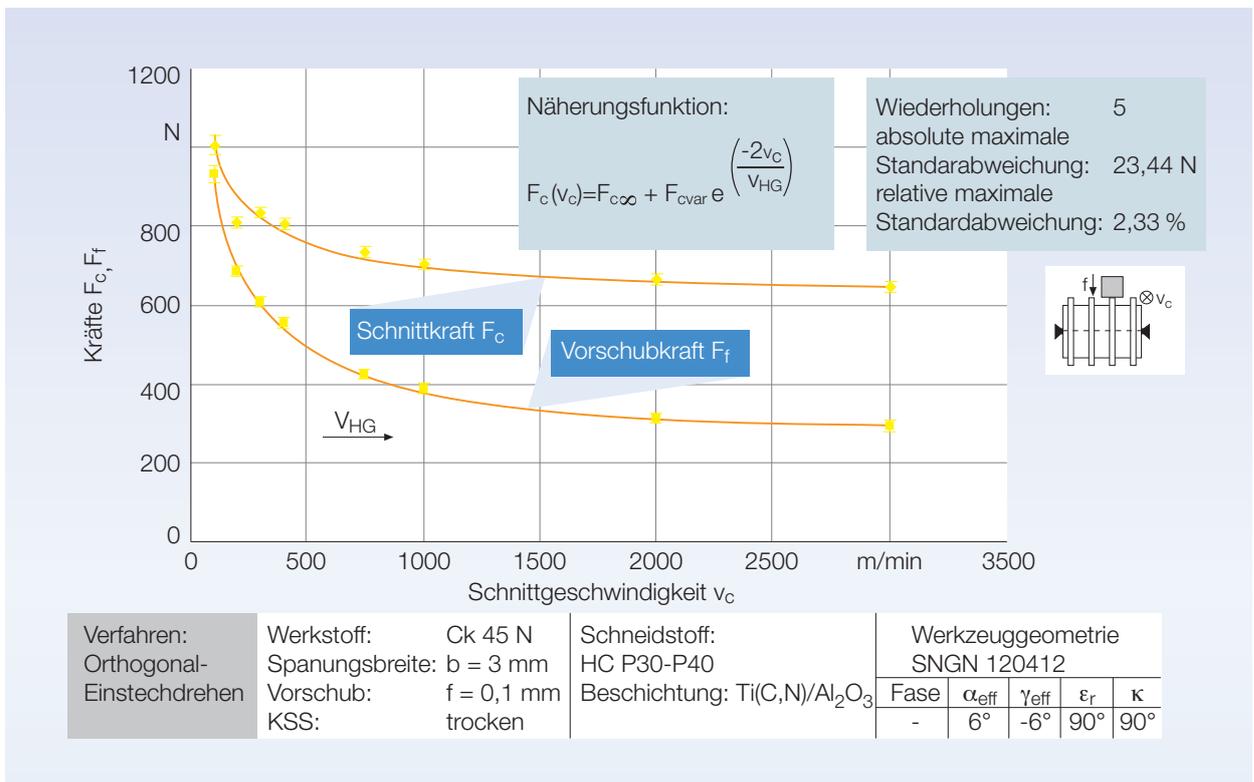


Bild 3.12: Schnitt- und Vorschubkraft in Abhängigkeit von der Schnittgeschwindigkeit.

digkeiten auftretenden hohen Schneidkeiltemperaturen ertragen und nachdem Maschinen entwickelt und gebaut waren, die über Arbeitsspindeln für ausreichend hohe Drehzahlen und über Vorschubantriebe und Steuerungen für sehr schnelle Vorschubbewegungen verfügen. Das Hochgeschwindigkeitsspanen ist nicht grundsätzlich unterschiedlich vom Spanen in konventionellen Geschwindigkeitsbereichen. Gleichwohl lassen sich durch Einführung des Hochgeschwindigkeitsspanens einige Effekte nutzen, die für die praktische Anwendung interessant sind.

Mit höheren Schnittgeschwindigkeiten steigt zunächst das Zeitspanvolumen QV und die Zeitspanfläche QA (siehe Formeln (3.1) und (3.2), wenn der Spanungsquerschnitt unverändert bleibt. Dies kann vor allem dort genutzt werden, wo mit rotierenden Werkzeugen gearbeitet wird. Bei Prozessen und Maschinen, bei denen das Werkstück rotiert und mit Schnittgeschwindigkeit bewegt wird wie beim Drehen, ergeben sich dagegen meist Grenzen aus der Spanntechnik; denn die Fliehkräfte, die

die Spannbacken nach außen drücken, wirken den Spankräften entgegen und mindern sie mit dem Quadrat der Drehzahl. Hinzu kommt, dass bei schweren Werkstücken und Spannvorrichtungen (großes Massenträgheitsmoment) die Hochlauf- und Bremszeiten, die ebenfalls mit dem Quadrat der Drehzahl wachsen, so lang werden können, dass damit die Nebenzeiten die Wirtschaftlichkeit in Frage stellen.

Das Zeitspanvolumen bei rotierenden Werkstücken ist somit begrenzt durch

- Beeinflussung der Werkstückspannung mit zweiter Ordnung der Drehzahl,
- notwendige Verstärkung der Sicherheitseinrichtungen gegen Lösen rotierender Elemente,
- Erhöhung der Nebenzeiten für das Anlaufen und Abbremsen von Werkstück, Spannvorrichtung und Spindel und
- Unwuchten der rotierenden Teile, die besonders bei Formteilen häufig unvermeidbar sind.

Vorteilhaft wirkt sich beim Spanen mit hohen Geschwindigkeiten aus, dass die Kräfte deutlich sinken (Bild 3.12). Filigrane Bauteile mit geringen Wandstärken lassen sich dadurch mit geringeren elastischen Verformungen, die durch die Zerspankraftkomponenten verursacht werden, bearbeiten (Beispiel: Bauteile für den Flugzeugbau, dünnwandige Ringe oder Hülsen).

Zu fragen ist, ab welcher Schnittgeschwindigkeit das Hochgeschwindigkeitsspanen beginnt. Eine physikalisch begründete Definition lieferte Ben Amor [BENA03]. Er bezieht sich auf den Leistungsverlauf über der Schnittgeschwindigkeit. Bild 3.13 gibt die danach ermittelte Grenzgeschwindigkeit an, oberhalb der man vom Hochgeschwindigkeitsspanen sprechen kann.

Mit der Schnittgeschwindigkeit nimmt die umgesetzte Leistung zu – wenn auch wegen der fallenden Schnittkraft unterproportional. Entsprechend steigen die Temperaturen im Schneidkeil. Dabei ist zu beachten, dass für die Wärmebilanz im Hinblick auf das Werkzeug die Ener-

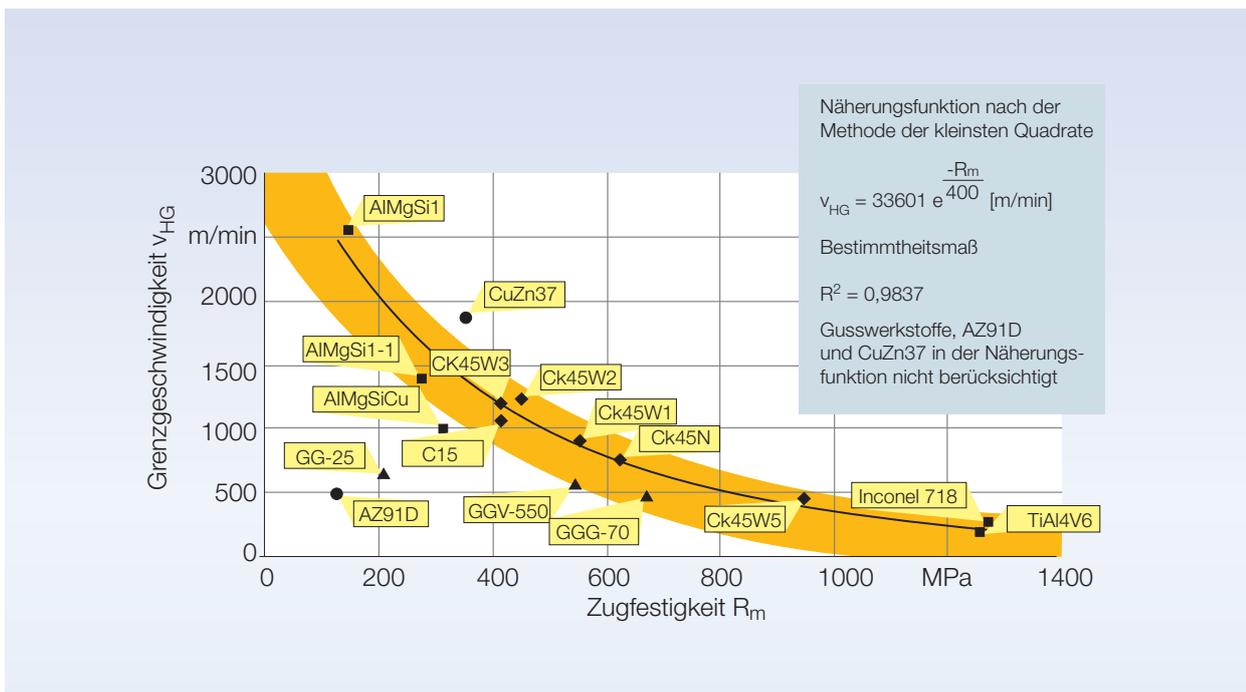


Bild 3.13: Grenzgeschwindigkeit und Zugfestigkeit.

gie je Zeiteinheit, d. h. die Leistung, maßgebend ist; denn der Schneidkeil ist dauernd oder über längere Zeitabschnitte im Eingriff. Anders verhält es sich mit der Wärmebilanz im Hinblick auf den Werkstoff, z. B. für die Randzonenbeeinflussung der neu entstandenen Oberfläche. Hier kommt es auf die Energie je Volumeneinheit an.

Durch die mit der Schnittgeschwindigkeit zunehmenden Temperaturen im Schneidkeil nimmt der thermische Verschleiß stark zu. Dadurch kommt es beim Spanen von Eisenwerkstoffen und anderen Werkstoffen höherer Festigkeit zu wirtschaftlicher Begrenzung der Geschwindigkeitssteigerung. Nur bei Werkstoffen mit vergleichsweise niedriger Schmelztemperatur, wie Aluminium- und Magnesiumlegierungen, bleibt die thermische Belastung des Schneidkeils unkritisch. Schnittgeschwindigkeiten von mehr als 3000 m/min sind dort durchaus erreichbar.

Grenzen für einen Zerspanprozess können neben der Schnittgeschwindigkeit auch das Drehmoment und die Leistung sein. Dann spricht man von Hochleistungszerspannung (HPC). Da

solche Prozesse vor allem beim Fräsen von Interesse sind, werden sie dort behandelt.

3.6 Hartdrehen

In vielen Bereichen des Maschinen-, Fahrzeug- und Gerätebaus werden Bauteile zunehmend höheren Kraft- und Leistungsdichten ausgesetzt. Sie müssen daher fester, härter und verschleißfester sein. Wo früher Werkstoffe und insbesondere Stähle mit nur mäßigen Festigkeiten ausreichten, werden jetzt häufig hochvergütete oder gehärtete Werkstoffe eingesetzt. Für eine Vielzahl von Bauteilen lässt sich durch die Verfahren der Hartbearbeitung neben dem Schleifen das Spektrum der Vor- und Fertigbearbeitungsprozesse erweitern.

Spanen von gehärteten Eisenwerkstoffen und von Hartstoffschichten mit Härten oberhalb 47 HRC wird als Hartbearbeitung (genauer: Hartbearbeitung mit geometrisch bestimmter Schneide) bezeichnet. Diese harten Werkstoffe wurden – abgesehen von Reparaturfällen – bis zum Aufkommen dieser Technologie ausschließlich durch Schleifen

bearbeitet und in ihre Endform gebracht. Durch die Entwicklung von Schneidstoffen hoher Härte und Warmfestigkeit sind das Hartdrehen, das Hartfräsen und das Hartbohren, auf die hier eingegangen wird, und auch das Harträumen, Hartschaben und Hartreiben möglich und wirtschaftlich geworden. Tafel 3.1 gibt eine Übersicht über Bedingungen wieder, unter denen diese Prozesse geführt werden können. Die Rauheits- und Genauigkeitswerte sind Bestwerte, die nur unter günstigen Bedingungen erreicht werden können.

Beim Drehen ist die Schneide meist ununterbrochen im Eingriff. Die in der Spanbildungszone umgesetzte Energiedichte ist hoch, was zu einer hohen thermischen Belastung des Schneidkeils führt. Daher müssen Schnittgeschwindigkeiten mit Rücksicht auf den Werkzeugverschleiß begrenzt werden. Schneidkeramiken (Mischkeramiken aus Al_2O_3 und TiC) werden bei 150 m/min und polykristallines Bornitrid (PCBN) bis 220 m/min eingesetzt. Übliche Schnitttiefen liegen im Bereich $a_p = 0,05$ mm bis 0,3 mm. Vorschübe bestimmen wesentlich die Oberflächengüte. Je nach Anforderungen an die

Prozess	Schneidstoffe	Schnittparameter	Rauheit und Maßgenauigkeit
Hartdrehen	PKB, Mischkeramik, Feinstkorn-Hartmetalle	$v_c = 100-220$ mm/min $f = 0,05-0,2$ mm/min	$R_z = 1,3$ μ m IT6 - IT7
Hartbohren	Hartmetall, TiN-beschichtet	$v_c = 40-60$ mm/min $f = 0,02-0,04$ mm	$R_z = 2-4$ μ m IT7 - IT9
Hartfräsen	PKB, Feinstkorn-Hartmetall	$v_c = 200-350$ mm/min $f_z = 0,1-0,2$ mm	$R_z = 2-5$ μ m IT7 - IT10

Tafel 3.1: Randbedingungen der Hartbearbeitung.

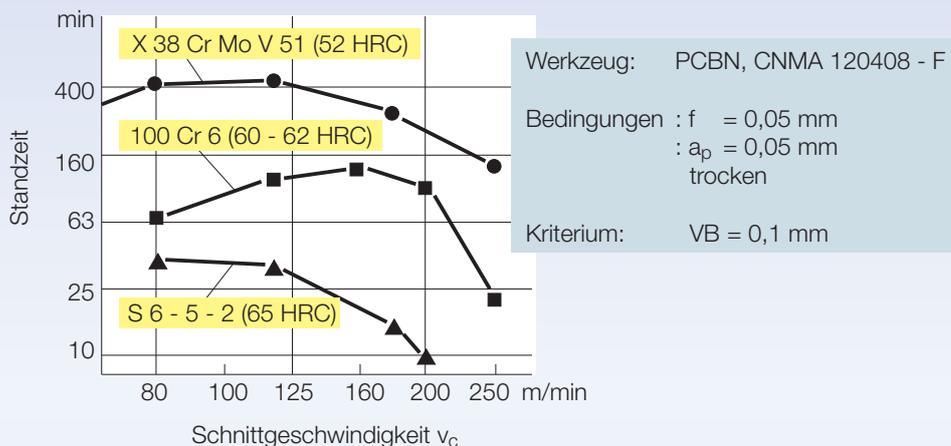


Bild 3.14: Verschleißverhalten von PCBN (KOCH96).

Rauheit werden $f = 0,05 \text{ mm}$ bis $0,2 \text{ mm}$ eingestellt. Bild 3.14 zeigt die Abhängigkeit von Standzeit und Schnittgeschwindigkeit in einem Diagramm für den Einsatz von polykristallinem Bornitrid. Aus den eigentümlichen Kurven, vergleicht man sie mit den Geraden bei der Weichzerspannung, ist zu entnehmen, dass ein begrenztes Schnittgeschwindigkeitsfenster eingehalten werden muss.

In Bild 3.14 wurde neben der Schnittgeschwindigkeit die Härte des Werk-

stoffes variiert. Man erkennt einen starken Einfluss der Härte, wobei die martensitische Härte des „Kugellagerstahls“ 100 Cr 6 und die Härte aus Martensit und Karbiden beim Schnellarbeitstahl tendenziell ähnlich wirken. Für praktische Belange gilt, dass geringfügiges Absenken der Härtegrade einen deutlichen Gewinn an Standzeit mit sich bringt.

Als Endbearbeitungsverfahren zielt das Hartdrehen auf die Substitution von Schleifoperationen. In Bild 3.15 ist ein Praxisbeispiel wiedergegeben, bei

dem das Hartdrehen deutlich günstiger ist [BRAN95]. Eine Reibscheibe aus Wälzlagerstahl 100 Cr 6 wird an drei Flächen, einem Außenzylinder, einer Planfläche und einem kurzen Innenzylinder feinbearbeitet. Die wirtschaftlichen und ökologischen Vorteile sind in der Abbildung angegeben. Allerdings ist ein Vergleich zwischen dem Schleifen und Drehen sehr von der Bearbeitungsaufgabe abhängig und durchaus nicht überwiegend eindeutig. Hinzu kommt, dass unterschiedliche Kriterien an den Prozess angelegt werden können wie Ferti-

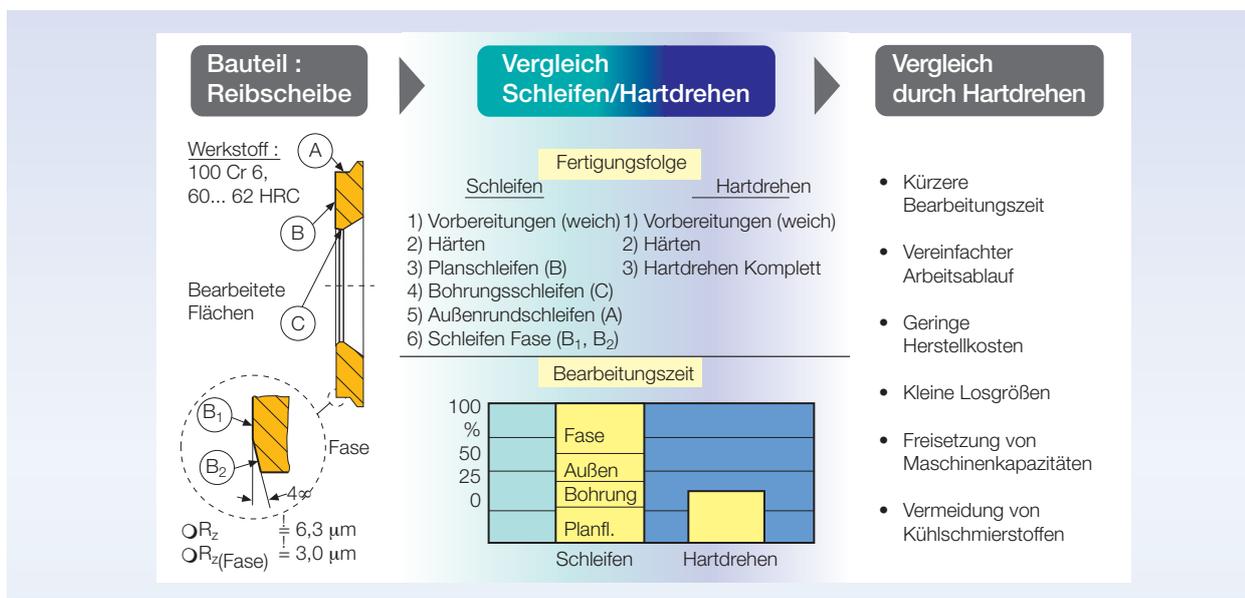


Bild 3.15: Hartdrehen einer Reibscheibe.

	Schleifen	Hartdrehen
Verfahrensprinzip		
Zeitspanvolumen	$QV = a_p \cdot QV'$	$QV = a_p \cdot f \cdot v_c$
spez. Zeitspanvolumen	$QV' = d_w \cdot \pi \cdot v_{fr}$	$QV' = \frac{a_p \cdot f \cdot v_c}{l_c}$
Zeitflächenrate	$QA = a_p \cdot v_{ft,w}$	$QA = f \cdot v_c$
Charakteristische Parameter	$a_p = 5 - 20 \text{ mm}$ $v_{ft,w} = 1 \text{ m/s}$	$a_p = 0,05 - 0,3 \text{ mm}$ $f = 0,05 - 0,2 \text{ mm}$ $v_c = 150 \text{ m/min}$
Wertebereich	$QV' = 2 - 12 \text{ mm}^3/\text{mms}$ $QV = 10 - 240 \text{ mm}^3/\text{s}$ $QA = 5000 - 20000 \text{ mm}^2/\text{s}$	$QV = 22 - 242 \text{ mm}^3/\text{mms}$ $QV = 6 - 150 \text{ mm}^3/\text{s}$ $QA = 125 - 500 \text{ mm}^2/\text{s}$

Bild 3.16: Vergleich Schleifen – Hartdrehen.

gungskosten je Teil, Flexibilität, Bauteilqualität oder ökologische Verträglichkeit. Einen Vergleich des Zeitspanvolumens QV (abgespanntes Volumen je Zeit) und der Zeitspanfläche (spanend erzeugte Fläche je Zeit) zeigt Bild 3.16. Man erkennt, dass insbesondere für die Zeitspanfläche QA erheblich größere Werte zu Gunsten des Schleifens sprechen. Der Vorteil greift allerdings nur dort, wo große Flächen zu bearbeiten sind. Von Bedeutung ist auch, dass beim Drehen und allgemein beim Spanen mit geo-

metrisch bestimmter Schneide eine Mindestspanungsdicke berücksichtigt werden muss. Das heißt, dass nicht mit beliebig geringen Zustellungen oder Schnitttiefen gedreht werden kann. Beim Schleifen dagegen kann der Prozess soweit durch „Ausfeuern“ geführt werden, bis die Normalkraft verschwindet. Folglich sind Hartbearbeitungsprozesse dann kaum einsetzbar, wenn lange, schlanke und sehr nachgiebige Werkstücke bearbeitet werden müssen, zumal dann meist auch die hohen Zeitspanflächen

des Schleifens genutzt werden können. Auch sollte beachtet werden, dass sich Werkstücke in Drehmaschinen in der Regel um ein Vielfaches schneller drehen als in Rundschleifmaschinen. Bei unwichtigen Werkstücken kann sich daher das Hartdrehen verbieten.

Ein in vielen Fällen entscheidender Vorteil des Hartdrehens ist die Formflexibilität des Verfahrens. Das Werkstück wird gesteuert gefertigt, während beim Schleifen meist im Einsteckver-

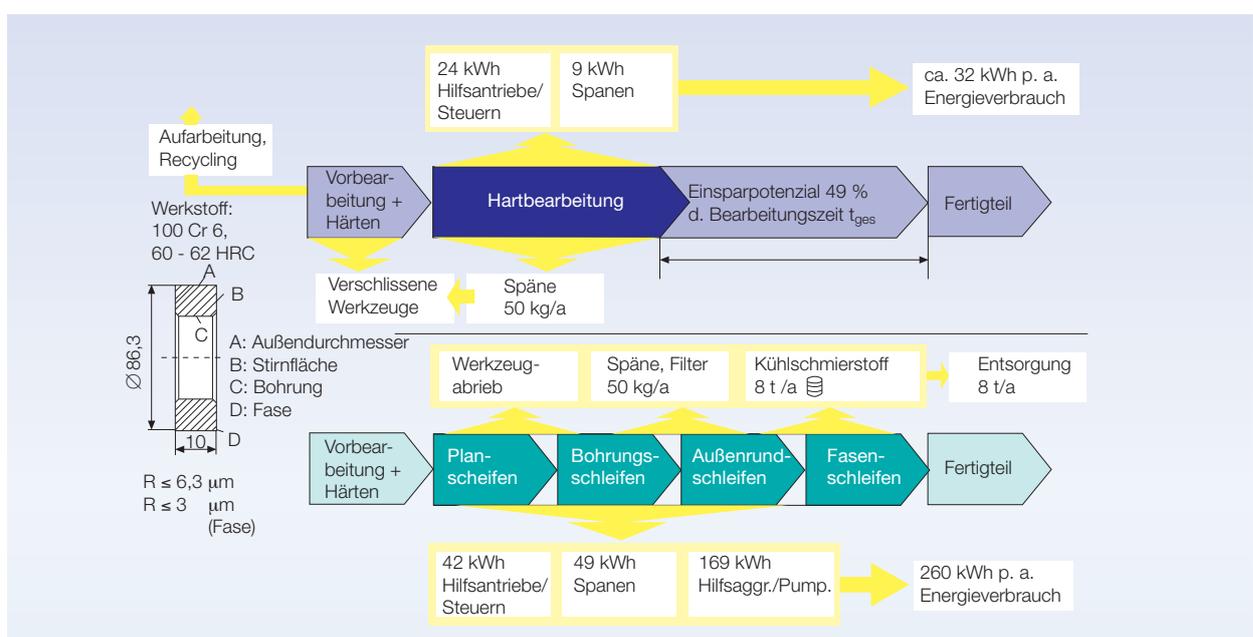


Bild 3.17: Energie- und Stoffströme beim Hartdrehen und Schleifen (nach H.-G. Wobker).

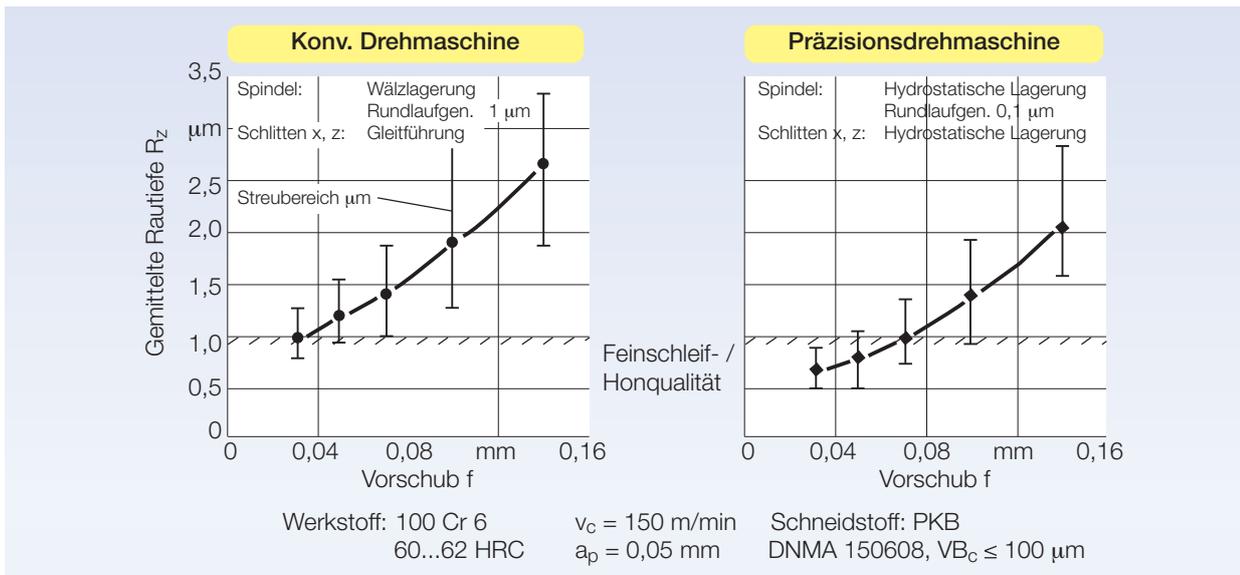


Bild 3.18: Vergleich der Oberflächengüte beim Einsatz einer konventionellen und einer Präzisionsdrehmaschine.

fahren oder jedenfalls die Kontur der Schleifscheibe auf das Werkstück abbildend (Profilschleifen) gearbeitet wird. Durch Drehen lassen sich Werkstücke mit einem oder mehreren leicht zu wechselnden Werkzeugen fertigen. Das führt häufig zu einer erheblichen Verkürzung der Prozesskette im Sinne einer Komplettbearbeitung, zu geringeren Komplexitätskosten und zu geringeren Investitionen (siehe Abschnitt 1.1)

Unter ökologischem Aspekt werden Stoff- und Energieströme verglichen. Am Beispiel der Fertigung eines Innensonnenrades für ein Reibradgetriebe zeigt Bild 3.17 die aus der Fertigung von 5000 Teilen resultierenden Stoffströme für das Schleifen und Hartdrehen. Auf der Grundlage der Aufmaße der Teile ergibt sich eine Masse von 50 kg an Spänen, die pro Jahr anfallen. Der auf den benötigten 4 Schleifmaschinen eingesetzte Kühlschmierstoff summiert sich zu rund 8 t pro Jahr, wenn ein halbjährlicher Wechsel zugrunde gelegt wird. Zusätzlich fallen je nach eingesetztem Schleifstoff ca. 20 cm³ Abrieb von den Schleifscheiben aus den Schleifprozessen und durch Konditionieren (Abrichten) sowie zu-

sätzlich Filtermaterialien an. Besonders kritisch ist dabei zu bewerten, dass es beim Einsatz dieser Technologie zu einer Mischung der Stoffströme kommt, sodass in der Regel der gesamte Stoffstrom entsorgt werden muss. Für die anfallenden Späne existieren zwar Technologien, diese bis auf einen Restgehalt von unter 3 % zu trocknen, sodass sie zurückgeführt werden könnten, dies erfordert jedoch zusätzlichen Energieaufwand [WOBK95].

Für die Hartbearbeitung ergibt sich dem gegenüber ein günstigeres Bild. Da die Bearbeitung trocken durchgeführt werden kann, können die Späne ohne weitere Behandlung in den Stoffkreislauf zurückgeführt werden. Die geringen Beimengungen an Werkzeugabrieb sind dabei für das Recycling nicht von Bedeutung. Die eingesetzten Werkzeuge können je nach Schneidstoff entsorgt werden (Keramik), oder es besteht die Möglichkeit, sie nachzubearbeiten (PCBN). Damit stellt sich die Bilanz der Stoffströme für die Hartbearbeitung günstiger dar; dies resultiert aus den geringeren zur Entsorgung anstehenden Mengen und dem höheren Reinheitsgrad.

Hinsichtlich des Energiebedarfs wurde ein Vergleich der Verfahren Hartdrehen und Schleifen beim Fertigen großer Wälzlagerringe durchgeführt. Gegenüber der konventionellen Fertigungsfolge können beim Hartdrehen direkt aus der Umformwärme gehärteter Wälzlagerringe 34 % Primärenergie und 15 % Werkstoff eingespart werden. Neben dem deutlich geringeren Energieverbrauch ergeben sich weitere Vorteile durch erheblich reduzierte Bearbeitungszeiten und leicht rezyklierbare Zerspanabfälle.

Um in der Feinbearbeitung übliche Toleranzen im Bereich von IT6 und geringer zu erreichen, werden häufig besondere Anforderungen an Hartdrehmaschinen gestellt. Das betrifft die Maß- und Formgenauigkeit, die erreichbare Oberflächengüte (Bild 3.18) und die von der Maschinensteifigkeit abhängige Mindestspanungsdicke.

3.7 Werkzeugüberwachung

Um ungestörte Prozesse zu fahren und Schäden an Werkstücken, Werkzeugen und Maschinen zu vermeiden, wird die Prozessüberwachung

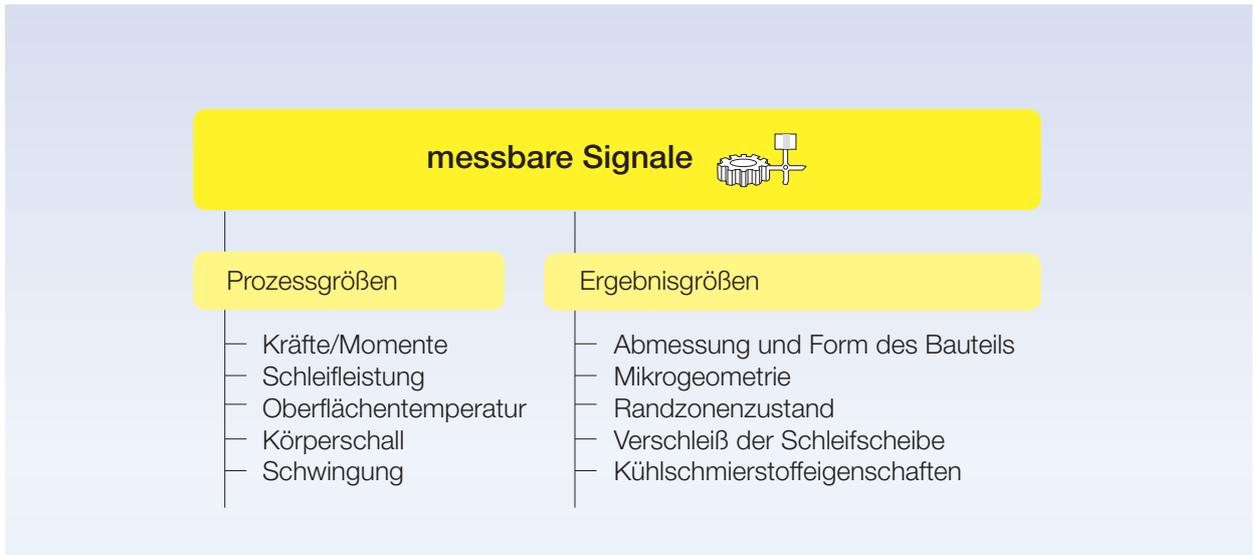


Bild 3.19: Signale und Größen zur Prozessüberwachung.

eingesetzt. In ihr werden Eingangs-, Prozess- und Ergebnisgrößen analysiert und miteinander verglichen. Die messbaren Größen werden nach dem Zeitpunkt ihrer Entstehung unterschieden in Prozessgrößen, die während eines Zerspanprozesses auftreten, und die Ergebnisgrößen, die am Ende des Prozesses als permanentes Ergebnis vorliegen (Bild 3.19).

Ein Vergleich der gemessenen Prozess- und Ergebnisgrößen mit den entsprechenden Zielgrößen liefert in der Regel Abweichungen von den Vorgabewerten. Je nach dem, ob sich diese Abweichungen im Rahmen einer festgelegten Toleranz befinden, wird ein regelungstechnischer Eingriff in den Prozess erforderlich. Ursachen eines solchen Eingriffs können stochastisch auftreten, wie beispielsweise beim Plattenbruch, oder auch als systematische Veränderungen, wie z. B. der Werkzeugverschleiß während eines Drehprozesses.

Eine einfache Überwachungseinrichtung für das Ausbohren ist in Bild 3.20 dargestellt [TOEN01, S. 64]. Als Messgröße dient die Vorschubkraft. Sie wird werkzeugseitig aufgenommen. Das Signal wird einer Auswerteeinheit

zugeleitet. Dort werden zwei Grenzbewertungen vorgenommen. Wenn das Kraftsignal einen festen Wert überschreitet, zeigt ein Monitor mit „Standzeit“ an, dass das Werkzeug verschlissen ist und deshalb eine oder mehrere Wendeschneidplatten gewechselt werden müssen. Gleichzeitig wird bei jedem Bohrvorgang geprüft, ob das Kraftsignal plötzlich oder kurzfristig einen mitgeführten Signalkorridor überschreitet. In diesem Fall wird „Werkzeugbruch“ angezeigt. Diese Prozessüberwachung wurde in der Praxis eingeführt. Sie hat sich bewährt, weil das Ausdrehwerkzeug bis zu 7 Wendeschneidplatten trägt und im Falle eines Schneidenbruchs so die Gefahr eines Totschadens erheblich gemindert werden konnte. Die Überwachungseinrichtung muss allerdings beim Einrichten der Maschine auf einen neuen Bearbeitungsvorgang „angelernt“, d. h. kalibriert werden. Eine theoretische Vorausberechnung der Vorschubkraft hat sich nicht bewährt.

3.8 NE-Metalle

Aluminiumlegierungen

Die Zerspanbarkeit von Aluminiumlegierungen ist generell gut, wie in Ab-

schnitt 2.10 erläutert wurde, wenn diese Werkstoffe nicht wegen zu geringer Festigkeit zum Schmieren, zur Aufbauschneiden- und Scheinspanbildung neigen. Die Zerspankräfte sind vergleichsweise niedrig. Knet- und Gusslegierungen sind im vergüteten Zustand besser zerspanbar als im weichen Zustand. Im weichen Zustand können auch bei höheren Schnittgeschwindigkeiten noch Aufbauschneiden auftreten, die die Oberflächengüte beeinträchtigen. Für weiche Aluminiumlegierungen empfehlen sich große Spanwinkel bis zu 30° und Freiwinkel bis 10°. Je fester die Legierungen sind, desto geringer sollten Spanwinkel und Freiwinkel gewählt werden, um den Schneidkeil zu stärken. Spanformung kann besonders bei weniger festen Werkstoffen ein Problem werden. Dann sind spezielle Vorkehrungen zur Spanleitung und zur Spanhandhabung vorzusehen.

Eutektische und übereutektische Aluminiumlegierungen (Kolbenlegierungen) enthalten harte und abrasive Siliziumpartikel, die stark verschleißend wirken. Hier ist besonders der Einsatz von diamantbeschichteten Werkzeugen oder polykristallinen Diamanten als Schneidstoff angesagt. Für die Schneidstoffe Schnellarbeitsstahl (HSS), unbeschich-

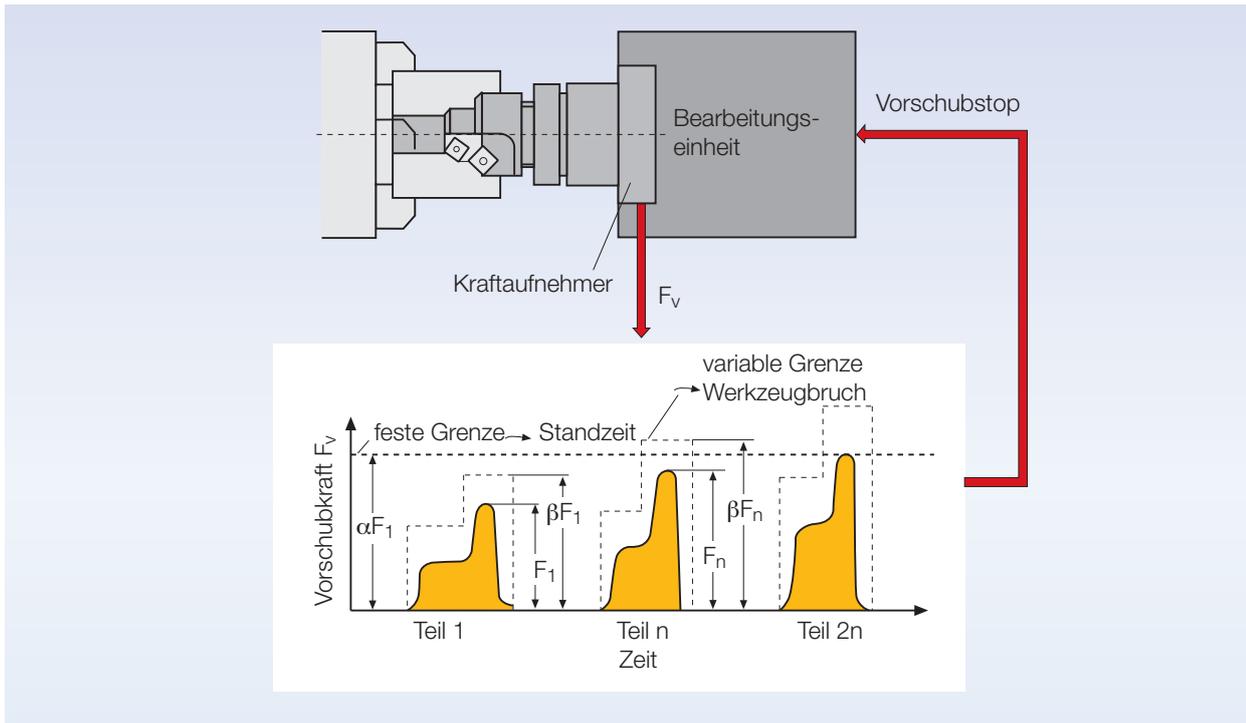


Bild 3.20: Verschleiß- und Bruchüberwachung.

tes Hartmetall (HW) und polykristalliner Diamant (PKD) sind Schnittwerte in Tafel 3.2 angegeben.

Titanlegierungen

Beim Drehen von Titan und Titanlegierungen treten selbst bei niedrigen Schnittgeschwindigkeiten Lamellenspäne auf. Entsprechend pulsieren die Zerspankräfte und beanspruchen die

Schneiden mit schwelenden Lasten. Die Folge können Ermüdungseffekte sein. Die Produktivität, gemessen am Zeitspanvolumen, ist wegen der Begrenzungen in den Schnittgeschwindigkeiten (siehe Abschnitt 2.10) gering. Wie vorn ausgeführt wurde, können die mechanischen Eigenschaften der Titanlegierungen und damit auch die Zerspanbarkeit in weiten Grenzen schwan-

ken je nach chemischer Zusammensetzung und nach Behandlungszustand. Die im Folgenden angegebenen Schnittwerte beziehen sich auf die gängige $\alpha + \beta$ -Legierung Ti6Al4V. Tafel 3.3 gibt Faktoren an, die in die Schnittgeschwindigkeit beim Zerspanen anderer Legierungen eingerechnet werden sollten.

Werkstoff	HSS			HW			PKD		
	v_c m/min	f mm	a_p mm	v_c m/min	f mm	a_p mm	v_c m/min	f mm	a_p mm
weiche Al-Legierung HB = 60	≤ 630	0,20-0,8	≤ 5	≤ 2.500	0,15-0,8	≤ 5	≤ 2.500	0,15-0,4	≤ 3
ausgehärtete unterautektische Al-Legierung	≤ 400	0,20-0,63	≤ 5	≤ 1.600	0,15-0,8	≤ 5	≤ 2.000	0,15-0,3	≤ 2
eutektische und überautektische Al-Legierung	–	–	–	450-310	0,15-0,8	≤ 4	1.400-710	$\leq 0,2$	≤ 1

Tafel 3.2: Schnittbedingungen für das Drehen von Aluminium.

Zustand	Festigkeit [N/mm ²]	Faktor
α-Legierung	600-750	1.4-1.2
α+β-Legierung	800-1250	1-0.6
β-Legierung	700-1200	0.6-0.5

Tafel 3.3: Geschwindigkeitsfaktoren zum Vergleich mit Ti 6 Al 4 V (Faktor = 1).

Für das Drehen werden drei Einsatzbereiche definiert:

1. Schruppen der Oberflächenschicht SO
2. Schruppen im Material SB
3. Schlichten der Fertigflächen FD.

Die angegebenen Vorschübe und Schnitttiefen können aus Tafel 3.4 entnommen werden.

Geschmiedete Titanteile haben häufig eine raue, zähe und stark schleißende Oberflächenschicht, die „Elefantenhaut“. Das Abdrehen dieser bis zu 10 mm dicken Randschichten ist schwierig. Der Einsatzbereich wird mit SO bezeichnet. Dazu werden unbeschichtete, feinkörnige Hartmetalle der ISO-Hauptgruppe

S (Sandvik-Bezeichnung: H13A) eingesetzt. Die Plattenform soll so gewählt werden, dass sie möglichst robust ist, jedoch ausreichende Spannungsdicke ermöglicht. Es werden quadratische Platten empfohlen.

Zum Schruppdrehen im Materialinnern (Bulk), mit SB bezeichnet, werden quadratische (Form S), rhombische (Form C) oder runde (Form R) Platten empfohlen. Die Auswahl ist nach den zu bearbeitenden Konturen zu treffen. Die quadratische Platte ermöglicht die längste Standzeit.

Zum Fertigdrehen, mit FD bezeichnet, können je nach zu bearbeitender Kon-

tur rhombische (Form V oder D) oder dreieckige (Form T) Platten eingesetzt werden.

Zum Drehen werden Wolframkarbidreiche Hartmetalle ohne Beschichtung empfohlen. Diese K-Sorten sollten feinkörnig sein, um scharfe Schneiden zu ermöglichen. Wegen der zum Spanen von Titan notwendigen hohen Energie und der schlechten Wärmeleitfähigkeit des Werkstoffes treten hohe Temperaturen im Schneidkeil auf, wodurch die maximalen Schnittgeschwindigkeiten stark begrenzt sind. Die Wärme sollte aus der Spanbildungszone und dem Schneidkeil durch möglichst intensive Kühlschmierung abgeführt werden. In Tafel 3.4 sind Schnittwerte für die gängige Legierung Ti 6 Al 4 V, der eine Festigkeit von 900 N/mm² entspricht, eingetragen. Es lassen sich auch polykristalliner Diamant und Diamant beschichtete Platten einsetzen. Damit können längere Standzeiten und höhere Schnittgeschwindigkeiten bei reduzierten Vorschüben erreicht werden.

3.9 Drehprobleme, Praxistipps

Die Empfehlungen gehen von einer Stahlzerspanung aus, wenn nicht anders angegeben. Sie sind nach dem Erscheinungsbild der Drehprobleme geordnet, ergänzt um die Verschleißursachen; mit „•“ sind die möglichen Maßnahmen genannt.

Einsatzbereich	HW		
	v _c [m/min]	f [mm]	a _p [mm]
SO	30-40	0.3-0.4	3-10
SB	40-80	0.2-0.4	0.5-4
FD	80-120	0.1-0.4	0.25-0.5

Tafel 3.4: Schnittbedingungen für das Drehen von Titan Ti 6 Al 4 V.

Merkmal	Maßnahmen
<p>Schruppen, hoher Freiflächenverschleiß Abrasiver Verschleiß Oxidationsverschleiß</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Geschwindigkeit senken, Vorschub erhöhen • Einstellwinkel verringern • Mehrschicht-Hartmetall einsetzen • P-Sorte um eine Stufe erniedrigen (warmfester)
<p>Schruppen, hoher Kolkverschleiß hohe Spanflächentemperatur Diffusionsverschleiß</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Geschwindigkeit senken • Hartmetall mit Al₂O₃ Schicht Wählen • positive Platte einsetzen
<p>Schruppen, starker Kerbverschleiß Abrasiver Verschleiß durch Werkstückoberfläche</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Rohteiloberfläche „entkrusten“ • Einstellwinkel verkleinern • „Kruste“ vorschruppen mit getrenntem Werkzeug
<p>Schlichten, hoher Freiflächenverschleiß Abrasiver Verschleiß Oxidationsverschleiß</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Geschwindigkeit senken • positive Platte wählen • P-Sorte um eine Stufe erniedrigen (warmfester) • Cermet einsetzen
<p>Schruppen, Verformung des Schneidkeils zu hohe Leistungsumsetzung Temperatur und Pressung zu hoch</p>	<ul style="list-style-type: none"> • warmhärtere Sorte wählen • Schnittgeschwindigkeit und Vorschub reduzieren
<p>Rattern selbsterregte Schwingungen äußere Schwingungsanregung</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Drehzahl verändern (erhöhen, dann erniedrigen) • Einstellwinkel erhöhen • Eckenradius verringern • positive Platte wählen • Werkzeug kürzer einspannen • gefastetes Werkzeug verwenden
<p>Ungenügende Oberflächengüte Aufbauschneidenbildung Kantenausbrüche starker Freiflächenverschleiß</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Schnittgeschwindigkeit erhöhen • Eckenradius erhöhen • verschleißfestere Sorte einsetzen • Vorschubsenke • positive Platte einsetzen

Merkmal	Maßnahmen
<p>Maßschwankungen Aufbauschneldenbildung starker Freiflächenverschleiß Werkstücknachgiebigkeit</p>	<ul style="list-style-type: none"> • verschleißfesteren Schneidstoff wählen • Schnittgeschwindigkeit erhöhen, Vorschub senken • positive Platte einsetzen • Kühlschmierung verbessern • Werkstückunterstützung
<p>Ungünstige Spanformen warmzähler Werkstoff Schnittgeschwindigkeit und Spannablauf ungünstig</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Platte mit Spanleitstufe einsetzen • Schnittgeschwindigkeit erhöhen • Vorschub erhöhen • negative Platte einsetzen • Einstellwinkel vergrößern
<p>Plattenbruch hohe mechanische Belastung des Schneidkeils</p>	<ul style="list-style-type: none"> • zähere Sorte verwenden • Plattensitz prüfen • dickere Platte einsetzen • größere Platte einsetzen • Schnitttiefe verringern • negative Platte wählen
<p>Kammrisse Temperaturwechsel</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Warmfestere Sorte wählen • Kühlschmierstoffzufuhr erhöhen • Kühlschmierstoffzufuhr abschalten • Plattenabkühlung mindern

4. Bohren

4.1 Verfahrensarten, Spanbildung

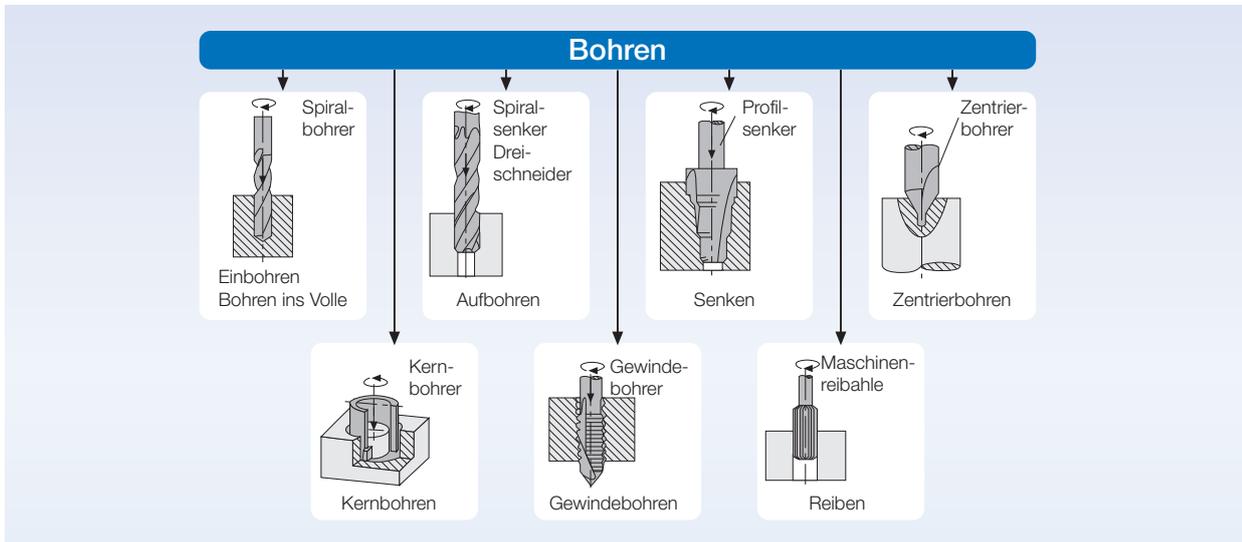


Bild 4.1: Bohrverfahren nach DIN 8589-2.

Bohren ist ein spanendes Verfahren mit drehender Schnittbewegung. Bild 4.1 zeigt gebräuchliche Bohrverfahren. Das Bohren ist von erheblicher praktischer Bedeutung, aber es ist ein kompliziertes Verfahren mit komplexer Werkzeuggeometrie.

Prinzip bedingt gibt es eine Reihe von Problemen, die in der praktischen Anwendung des Verfahrens zu beachten sind bzw. die auftreten können:

- Die Schnittgeschwindigkeit ist über dem Radius veränderlich und zu diesem proportional. Das bedeutet, dass die Geschwindigkeit in der Mitte Null ist. Dort kann es also keine Schneidwirkung sondern nur Quetschen geben.
- Die beim Bohren ins Volle auftretenden Vorschubkräfte sind ohne weiteres wegen der Quetschwirkung in und nahe der Achse ungleich höher als beim Drehen.
- Aus dem Bohrloch müssen Späne transportiert werden. Dieser Transport und die damit verbundenen Reibkräfte

nehmen mit der Bohrtiefe zu. Ein möglicher Spänestau beeinträchtigt die Oberflächengüte der Bohrungswand und kann zum Blockieren und zum Bohrerbruch führen.

- Die Kühlschmierstoffzufuhr wird mit der Bohrtiefe schwieriger.
- Starke Reibung beim Bohren kann zu selbsterregten Schwingungen führen.
- Durchgangsbohrungen erzeugen in der Regel Grate.
- Das Werkzeug ist maßgebunden.

Diesen Problemen muss durch die Prozessführung und die Gestaltung des Werkzeugs so weit als möglich entgegen gewirkt werden.

Technologische Kenngrößen, nach denen ein Bohrprozess ausgelegt wird, sind die Schnittgeschwindigkeit v_c [m/min], die durch das Verschleißverhalten des Werkzeugs begrenzt ist, und der Vorschub je Schneide f_z [mm] (bzw. mit der Schneidenzahl z der Vorschub je Umdrehung $f = z \times f_z$), der im

Wesentlichen für die mechanische Belastung der Schneiden steht. Daraus ergeben sich die Maschineneinstellgrößen worin n die Bohrerndrehzahl, v_f die Vorschubgeschwindigkeit und d der Bohrdurchmesser ist.

$$n = v_c / (\pi \times d) \quad (4.1)$$

$$v_f = z \times f_z \times v_c / (\pi \times d) \quad (4.2)$$

Zum **Bohren ins Volle** werden meist Spiralbohrer (sprachlich korrekter: Wendelbohrer) verwendet. Mit ihnen werden Durchgangs- oder Sacklöcher hergestellt. Spiralbohrer sind in der Regel zweischneidig. Die Schnittgeschwindigkeiten beim Bohren in Stahl liegen mit HSS-Werkzeugen zwischen 10 m/min (hohe Festigkeit) bis 50 m/min (geringere Festigkeit); Hartmetallbohrer können mit Geschwindigkeiten bis 140 m/min betrieben werden (siehe unten). Das Zeitspanvolumen beim Vollbohren ist

$$QV = \frac{1}{4} \times d \times f \times v_c \quad (4.2a)$$

worin die beiden technologisch begrenzten Parameter f bzw. f_z und v_c angeschlossen sind.

In getaktet automatisierten Prozessen, z. B. in Transferstraßen oder Mehrspindeldrehautomaten ist das Bohren nicht selten Taktzeit bestimmend. Die maximale Bohrtiefe l bei Spiralbohrern ist wegen des notwendig zuverlässigen Späne-transportes begrenzt. Sie liegt für kurzspanende Werkstoffe bei höchstens 5- bis 10-mal Bohrerdurchmesser d , bei Stahl meist niedriger. Abhängig von der Spanform, der Bohrlochlage (über Kopf günstiger) und der Kühlschmierstoffzufuhr (Innenkühlung besser als Außenkühlung) muss bei größeren Tiefen als $5 \times d$ entspänt werden; d. h. der Bohrer wird ein- oder mehrmals aus dem Bohrloch herausgefahren, um die Späne heraus zu befördern. Wenn wegen eines zähen Stahlwerkstoffes mit langen Wendespänen gerechnet werden muss, ist eine Vorschubunterbrechung angesagt, wodurch der Span unterbrochen wird. Tiefere Bohrungen werden durch **Tieflochbohren** hergestellt, das wegen seiner Produktivität und erreichbaren Oberflächengüte auch für die Serienfertigung kürzerer Bohrungen vorteilhaft sein kann. Tieflochbohren, das später behandelt wird, erfordert besondere Werkzeuge und Maschinen oder Vorrichtungen.

Beim **Aufbohren** und **Senken** wird eine Vorbohrung erweitert. Da keine Mitte mehr vorhanden ist, besteht die Schwierigkeit, das Werkzeug koaxial zu führen. Die Werkzeuge sind daher meist drei- oder mehrschneidig. Der Späne-transport ist jedoch einfacher als beim Bohren ins Volle. Daher werden Bohrungen mit großem Durchmesser häufig mit einem kleineren Spiralbohrer vorgebohrt und dann in einer oder mehr Stufen auf den Nenndurchmesser erweitert. Diese Vorgehensweise ist auch dann angesagt, wenn die zuläs-

sige Vorschubkraft und/oder das zulässige Drehmoment einer Maschine nicht für das Bohren in einem Zug ausreichen. Das Zeitspanvolumen beim Aufbohren ist

$$QV = \frac{1}{4} \times f \times v_c \times (d-d_i)^2 / d \quad (4.2b)$$

Zentrierbohren ist erforderlich, wenn in ungünstige (raue, unebene oder geneigte Flächen) Oberflächen Bohrungen eingebracht werden sollen. Bei sehr steifer Führung des Bohrers (kurze Einspannung des Bohrers, steife Spindel) oder bei Anwendung von Bohrbuchsen kann auf das Zentrieren verzichtet werden.

Kernbohren wird für große Bohrerdurchmesser eingesetzt; denn dabei wird nicht das gesamte Material der Bohrung, sondern nur ein Ring zerspannt, was geringeres Drehmoment und geringere Leistung erfordert. Kernbohren setzt Durchgangsbohrungen voraus.

Gewindebohren erzeugt Innengewinde. Gewindebohrer müssen mit der Steigung entsprechendem Vorschub gefahren werden. Das kann durch exakte Führung in einer NC-Maschine oder nach dem Anschneiden durch ein Ausgleichsfutter geschehen. Beim Gewindebohren muss die Drehrichtung zum Herausfahren umgekehrt werden. Auf Mehrspindel-Stangendrehautomaten müssen dazu besondere Vorrichtungen (Abkoppeln der Spindel und Drehrichtungsumkehr oder Überholspindel auf der Werkzeugseite) vorhanden sein. Große Innengewinde können durch Profildrehen in mehreren Durchgängen, durch das Strehlen, erzeugt werden. Dann erübrigt sich eine Drehrichtungsumkehr zum Herausfahren. Auch mit steuerbaren kollabierenden Gewindebohrern (collapsible tap) kann so gefahren werden.

Reiben ist ein Feinbearbeitungsverfahren, das dem Aufbohren mit mehrschneidigen Werkzeugen bei geringer Schnitttiefe entspricht. Es dient dazu, maß- und formgenaue Bohrungen herzustellen. Die Lagegenauigkeit kann nicht beeinflusst werden. Toleranzbreiten von IT 7 – bei höherem Aufwand auch IT 6 – sind erreichbar. Rautiefen liegen im Bereich von $R_z = 5 \mu\text{m}$. Bei konventionellen Reibahlen aus Schnellarbeitsstahl wird mit geringen Schnittgeschwindigkeiten von 10 m/min bis 20 m/min und geringen Vorschüben von 0.08 mm bis 1.25 mm gearbeitet. In getaktet automatisierten Anlagen ist diese Art des Reibens in der Regel stark Taktzeit bestimmend. Daher wurden alternative Verfahren und Werkzeuge entwickelt (s. Abschnitt 4.8).

4.2 Werkzeuge

Bild 4.2 gibt Bezeichnungen des Bohrers, die Eingriffsgrößen und die Winkel am Schneidkeil wieder. Der Bohrer besteht aus dem Schaft und dem Schneidenteil, der die Schneidkeile enthält. Über den zylindrischen oder konischen (Morsekegel) Schaft wird der Bohrer eingespannt und geführt. Der Schaft dient insbesondere der Drehmomenteinleitung. Der Schneidenteil weist eine komplexe Geometrie auf, über die ein Bohrer an die jeweilige Bearbeitungsaufgabe angepasst werden kann. Das Querschnittsprofil des Spiralbohrers soll einerseits große Spannuten aufweisen, um dem Spantransport genügend Raum zu lassen. Andererseits muss der Bohrer ausreichend torsionssteif (polares Trägheitsmoment) und torsionsfest (Widerstandsmoment) sein. Der Drallwinkel δ der Spannuten (Steigungswinkel der Nuten) beeinflusst den Spantransport und bestimmt gleichzeitig den Spanwinkel des Schneidkeils. Für die Bearbeitung von Stahl werden in der Regel Spitzenwinkel von 118° und Drallwinkel von 16° bis 30° eingesetzt

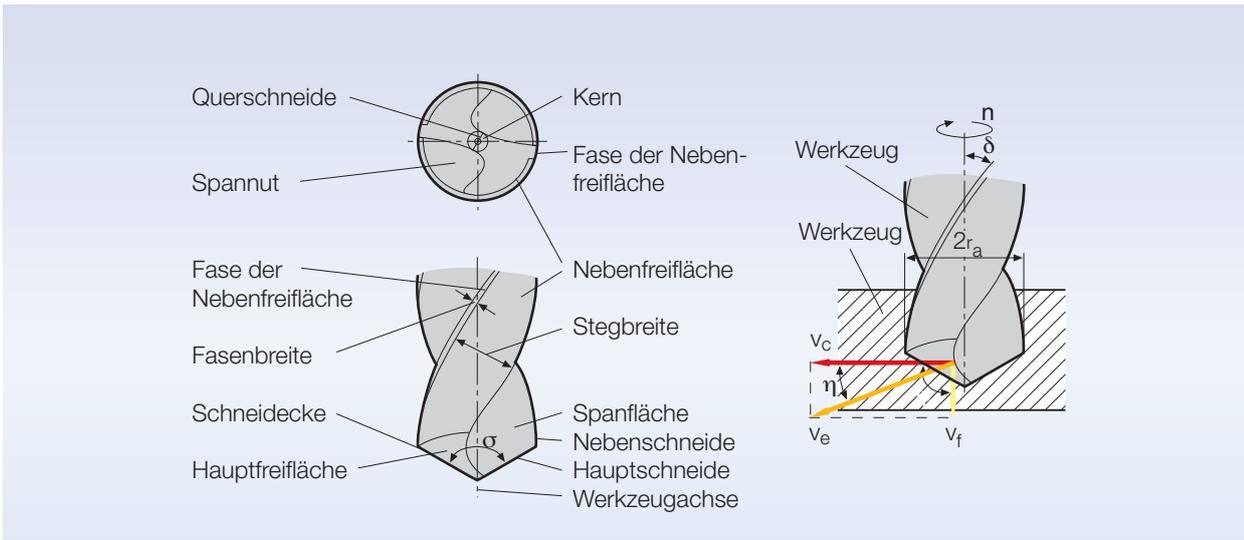


Bild 4.2: Bezeichnungen und Wirkungsweise des Spiralbohrers [nach DIN 8589-2].

(Typ N nach DIN 1836). Geringere Spitzenwinkel (für weichere Werkstoffe) führen besser, größere (für härtere Werkstoffe) verringern resultierende Radialkräfte. Zur Verringerung der Reibeinflüsse werden Spiralbohrer meist gegen den Schaft gerichtet um 0,2 ‰ bis 0,8 ‰ des Durchmessers verjüngt. Der Kern wird umgekehrt um 0,1 % bis 0,2 % verstärkt ausgeführt, um eine höhere Steifigkeit und Torsionsfestigkeit des Bohrers zu erreichen.

Der Spanwinkel am Bohrer ist für das Verformungsgeschehen des Werkstoffs und für die Kräfte am Schneidkeil wesentlich. Er ist vom Spitzenwinkel σ abhängig. Der Spitzenwinkel entspricht dem zweifachen Einstellwinkel κ beim Drehen. Es muss zwischen dem Spanwinkel an der Querschnitte γ_q , der ohne weiteres aus geometrischen Gründen stark negativ ist, und dem Spanwinkel an der Hauptschneide γ_h unterschieden werden (Bild 4.3 und Bild 4.4).

Der Anschlag eines Spiralbohrers ist für seine Schneidfähigkeit von großer Bedeutung; denn durch ihn wird der Freiwinkel bestimmt. Dabei ist zu beachten, dass sich das Verhältnis von Vorschub zu Schnittgeschwindigkeit ($v_f = \text{const.}$, $v_c = 2 \pi r n$) und damit der Wirkrichtungswinkel η entlang der Schneiden mit dem Radius des Bohrers ändern (siehe Bild 2.4).

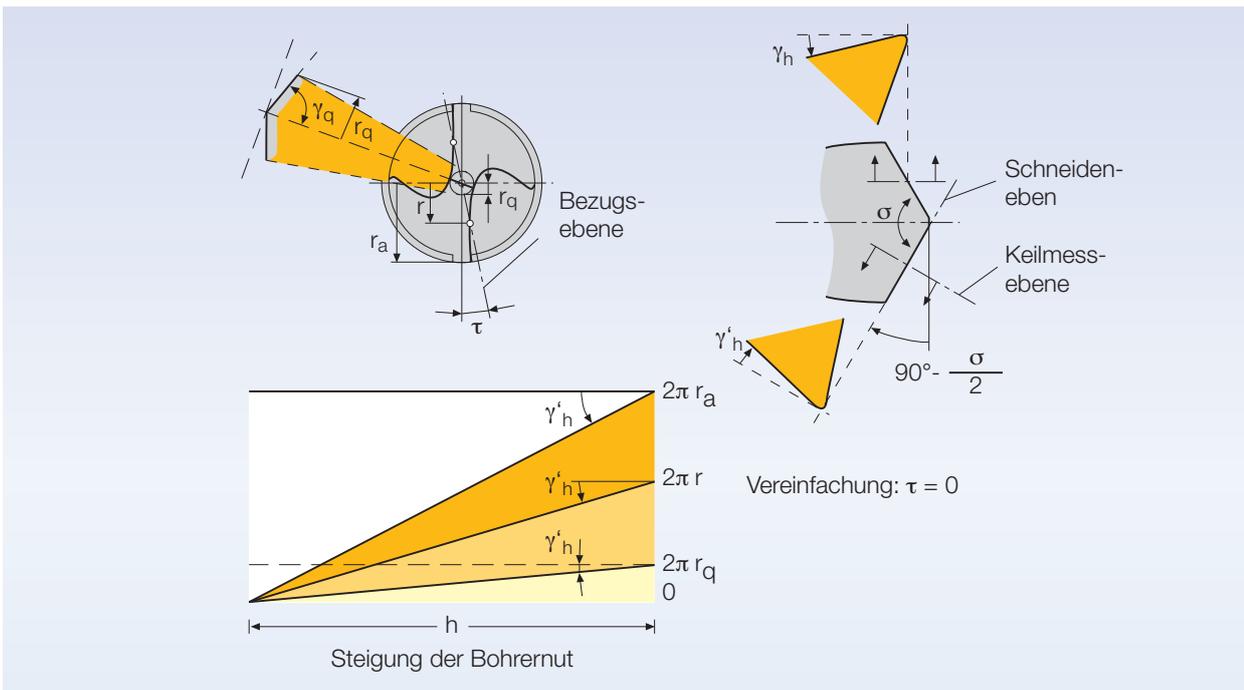


Bild 4.3: Spanwinkel am Bohrer.

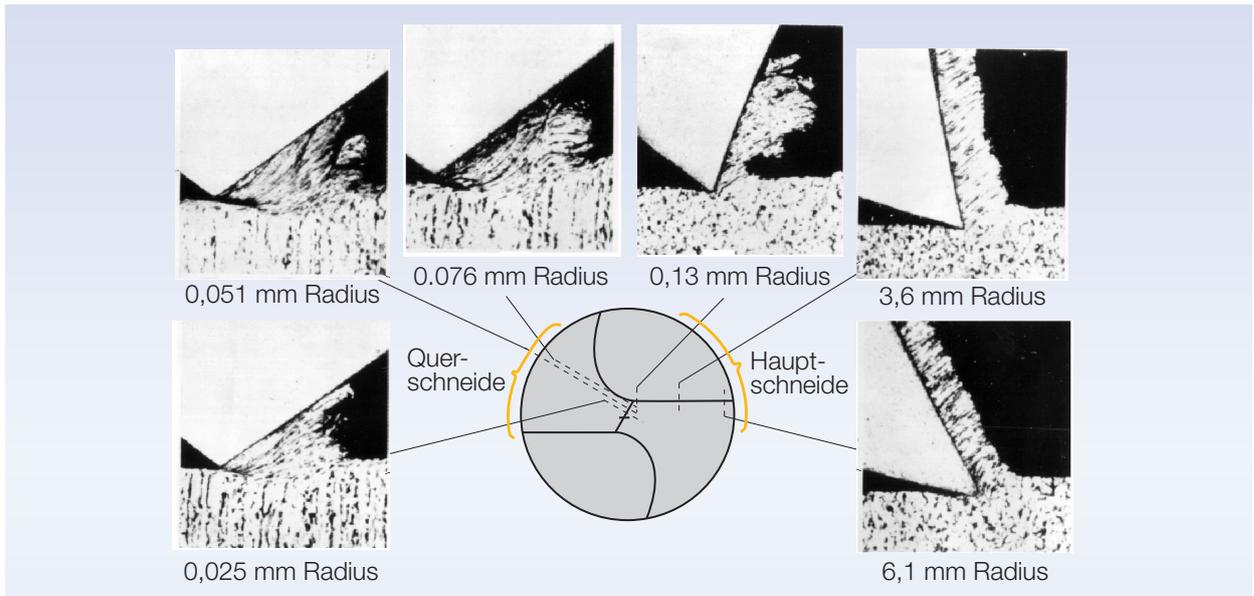


Bild 4.4: Spanbildung beim Bohren ins Volle.

Der Anschliff eines Bohrers wird unter verschiedenen Kriterien ausgeführt:

- Der Bohrer soll ausreichende Zentriereigenschaften besitzen.
- Es muss ein ausreichender Freiwinkel über der gesamten Schneidenlänge erreicht werden.
- Der Schneidkeil soll andererseits möglichst stabil sein.
- Die Querschneide soll wegen der

ungünstigen Spanbildungsvorgänge (teilweises Quetschen) möglichst kurz sein.

Die Querschneide trägt zum Drehmoment und zum Leistungsbedarf wenig bei, sie erzeugt aber bei normalem Anschliff 60 % bis 70 % der Vorschubkraft (Axialkraft). Daher ist dem Anschliff besondere Beachtung zu schenken.

Die Vorschubkraft wird hauptsächlich durch die Nebenschneide, das Drehmoment durch die Hauptschnitten bestimmt.

Am weitesten verbreitet bei Spiralbohrern ist der Kegelmantelschliff. Dazu wird der Bohrer gegenüber einer ebenen Schleiffläche um eine gegen seine Mittelachse gekippte Achse (Kippwinkel z. B. 20°) geschwenkt. Die Freifläche ist damit Teil eines Kegelmantels. Der Freiwinkel nimmt gegen die Bohrerachse zu. Der Kegelmantelschliff lässt sich einfach kinematisch auf Bohrer Spitzen-Schleifmaschinen erzeugen. Daneben gibt es eine Reihe von Sonderanschliffen, die teilweise genormt (DIN 1412), teilweise herstellerspezifisch sind. Je nach Anwendungsfall wird dabei eines der vorn angegebenen Kriterien besonders betont. Bild 4.5 zeigt Sonderanschliffe.

In Form A wird die Querschneidenlänge durch Ausspitzen etwa halbiert, wobei die Form der Ausspitzung dem Nutenprofil angepasst sein muss. Mit der verkürzten Querschneide lassen sich die Vorschubkräfte wesentlich herabsetzen, das Drehmoment wird dagegen kaum beeinflusst.

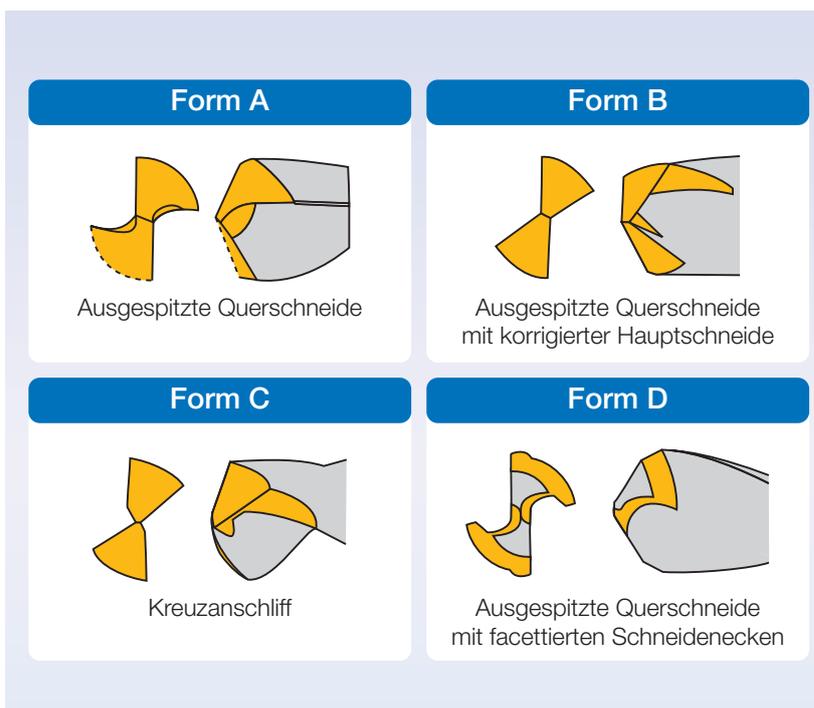


Bild 4.5: Anschliffformen gebräuchlicher Spitzenanschliffe (nach DIN 1412).

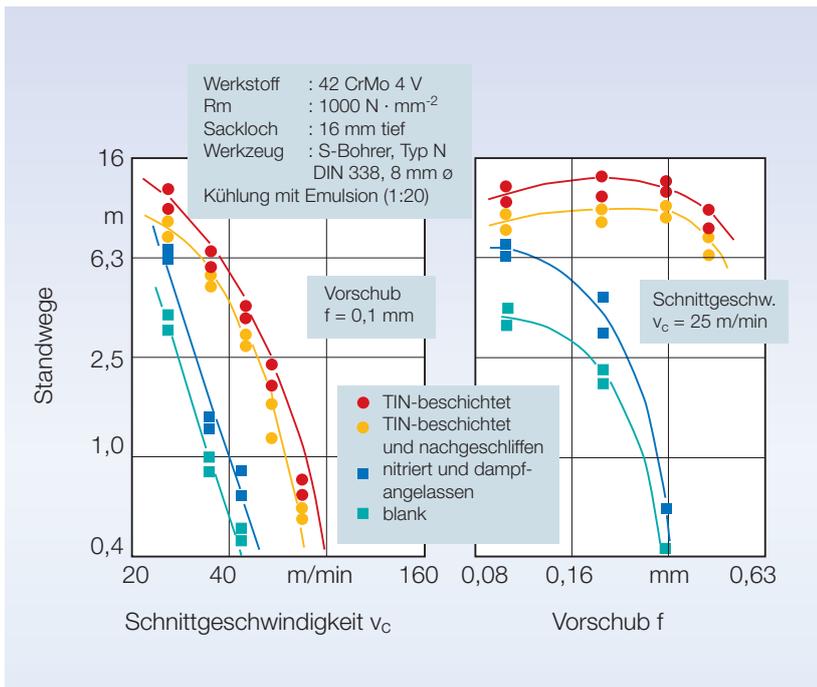


Bild 4.6: Standwege von HSS-Bohrern mit unterschiedlicher Behandlung.

Nach Form B wird zusätzlich eine Spanwinkelkorrektur an den Hauptschnitten vorgenommen. Damit ist die Bindung des Spanwinkels an den Drallwinkel der Nut gelöst. Derartige Korrekturen können die Stabilität der Schnitten erhöhen und Spanformen günstig beeinflussen.

Der Kreuzanschliff nach Form C kann als besondere Art der Ausspitzung aufgefasst werden. Die Querschnittenlänge wird auf etwa 6 % des Außenradius verringert. Damit lassen sich an der Querschnitte sogar positive Spanwinkel erreichen. Das Bohren wird so erleichtert und die Gefahr des Verlaufs verringert.

Spiralbohrer werden meist aus **Schnellarbeitsstahl** hergestellt. Üblich sind nach DIN 1414-1 die Stahlsorten HS 6-5-2 als Standardschneidstoff (für begrenzte Schnittgeschwindigkeiten) und für höhere thermische Belastungen (und höhere Schnittgeschwindigkeiten) HS 6-5-2-5 mit höherer Warmhärte. Für die Stahlbearbeitung werden die Bohrer meist beschichtet

(Titanitrid TiN, Farbe: gold, Titanaluminiumnitrid (TiAl)N, Farbe: schwarzviolett oder Titankarbonitrid TiCN, Farbe grau-violett), wodurch erheblich längere Standwege erreicht werden (Bild 4.6). (TiAl)N zeichnet sich durch gute Standwege auch unter ungünstigen Kühlschmierbedingungen aus. TiCN wird für die Stahlbearbeitung bei unterbrochenem Schnitt empfohlen und dort, wo besondere Härte- und Zähigkeitsanforderungen bestehen. Das Nachschleifen an der Bohrspitze führt trotz dort fehlender Beschichtung noch zu Vorteilen gegenüber unbeschichteten Bohrern.

TiN, (TiAl)N und TiCN mindern die Reibung und die Pressschweißneigung. Dadurch werden das notwendige Drehmoment und die Leistung verringert. Allerdings kann die Beschichtung wegen der geringeren Reibung auch zu ungünstigeren Spanformen (lange Wendelspäne) führen. Dem kann durch eine geänderte Schneidkeilgeometrie begegnet werden (siehe Anschliffe).

Bohrer verschleifen unter Produktionsbedingungen in der Regel am stärksten dort, wo die Schnittgeschwindigkeit und damit die Schneidkeiltemperaturen am höchsten sind. Das sind die Schneidenecken am Außendurchmesser. Wenn die Schnitten eines Bohrers nicht symmetrisch zur Achse angeordnet sind (Mittigkeit) muß eine Schneide die Hauptarbeit übernehmen; sie schleißt dann stark, der Bohrer verliert erheblich an Standweg. Die Achsabweichung sollte daher wenige 1/100 mm nicht überschreiten.

Erfahrungen der Praxis empfehlen Überprüfung des Rundlaufs von Bohrern.

In der Serienfertigung werden weit überwiegend Bohrer aus **Hartmetall** eingesetzt. Für Bohrungsdurchmesser bis 20 mm werden Bohrer aus Vollhartmetall angeboten. Sie lassen sich mit deutlich höheren Schnittgeschwindigkeiten (bis 5-fach gegenüber Schnellarbeitsstahl) betreiben, da Hartmetalle wärmebeständiger sind als Schnellarbeitsstähle. Sie werden meist mit höherer Genauigkeit gefertigt (Schaftdurchmesser mit h 6), sodass sich auch enger tolerierte Bohrungen innerhalb der Toleranzklasse IT 8 mit Oberflächengüten bis R_z = 4 µm herstellen lassen. Das heißt, dass in vielen Fällen das Senken entfallen kann. Hartmetalle haben einen nahezu doppelten E-Modul. Bei gleicher Gestalt haben Hartmetallbohrer somit die doppelte Biegesteifigkeit gegenüber Stahlbohrern. Hinzu kommt, dass sie in überwiegender Zahl der Fälle bzw. wo möglich als Kurzbohrer ausgeführt werden. Sie können daher häufiger ohne Vorzentrierung eingesetzt werden. Bohrbuchsen sind dann nicht erforderlich.

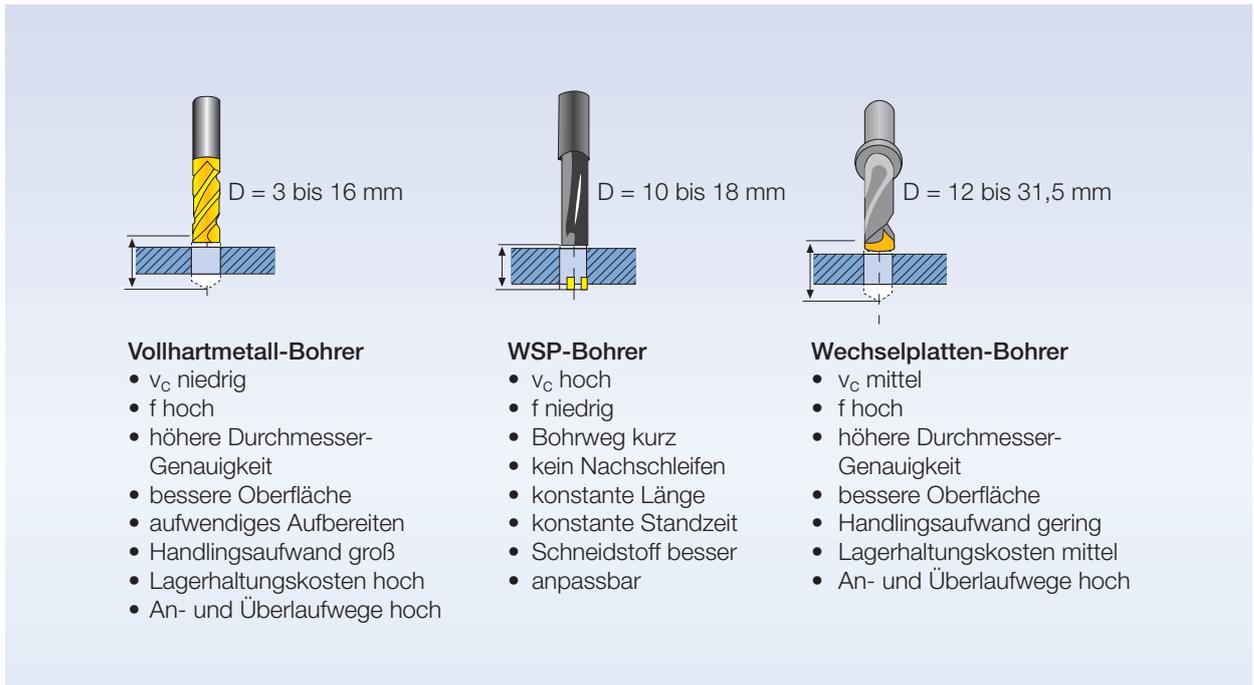


Bild 4.7: Hartmetallbohrervarianten (nach Walter).

💡 Vollhartmetallbohrer leisten das 5- bis 10-fache von HSS-Bohrern und sind erheblich genauer – allerdings auch wesentlich teurer.

Monolithische Bohrer aus Hartmetall (Vollhartmetallbohrer, VHM) sind in aller Regel zweischneidig. Mit der Zwei-

schneidigkeit lassen sich hohe Vorschübe pro Umdrehung realisieren. Eine Querschneide, wie sie bei HSS-Bohrern üblich ist, wird bei HM-Bohrern wegen der niedrigen Bruchzähigkeit von Hartmetall möglichst vermieden. Dies geschieht durch Ausspitzen des Bohrerkerne (Bohrerseele). Ein weiteres Merkmal dieser Bohrerart sind die Nebenschneiden oder

Führungsfasen. Sie sind für die optimale Führung des Werkzeugs an der Bohrungswandung notwendig.

Hartmetallbohrer sind teurer. Ihr Einsatz lohnt sich jedoch, wenn dadurch Maschinenzeiten eingespart werden. Der direkte Werkzeugkostenvergleich fällt in der Regel zu Ungunsten von Hartmetall aus. Wenn jedoch wegen

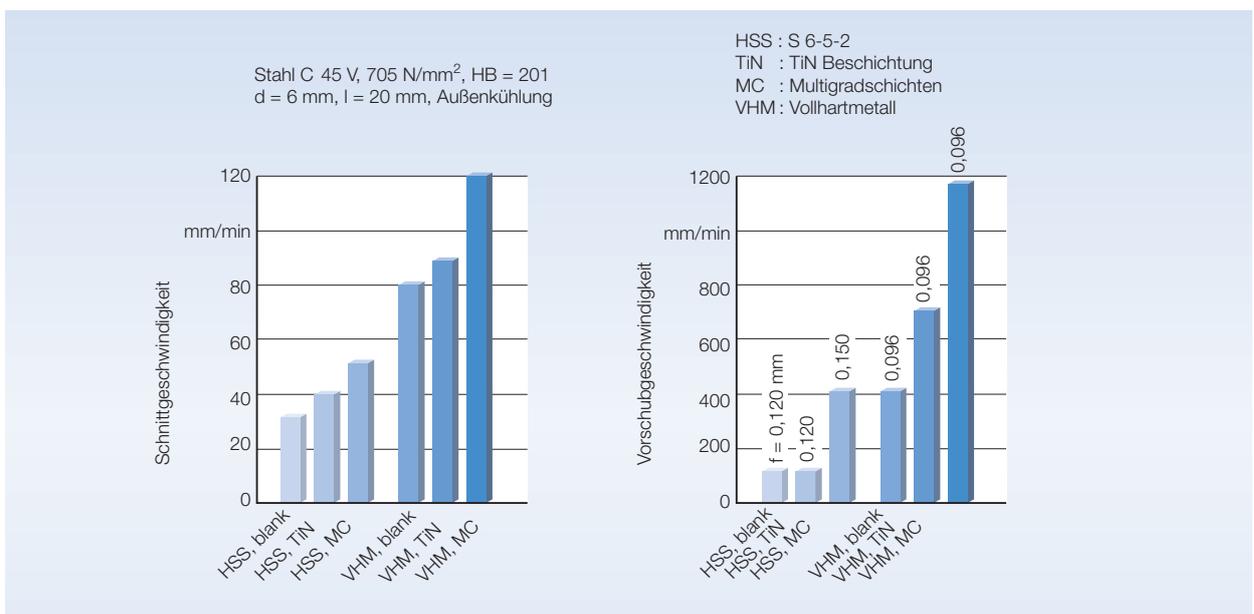


Bild 4.8: Einfluss des Schneidstoffs und der Beschichtung (nach Gühring).

des Entfalls von Operationen (Vorzentrieren, Senken) Bearbeitungszeiten oder bei getakteten Maschinen Stationen eingespart werden, sind Hartmetallbohrer angezeigt. Die Korngröße des Hartmetalls in der Größenordnung von $0.5\ \mu\text{m}$ bis $3\ \mu\text{m}$ bestimmt die Schärfe der Schneide. Bohrer mit Feinkorn $< 1\ \mu\text{m}$ lassen sich ähnlich scharf ausführen wie solche aus Schnellarbeitsstahl.

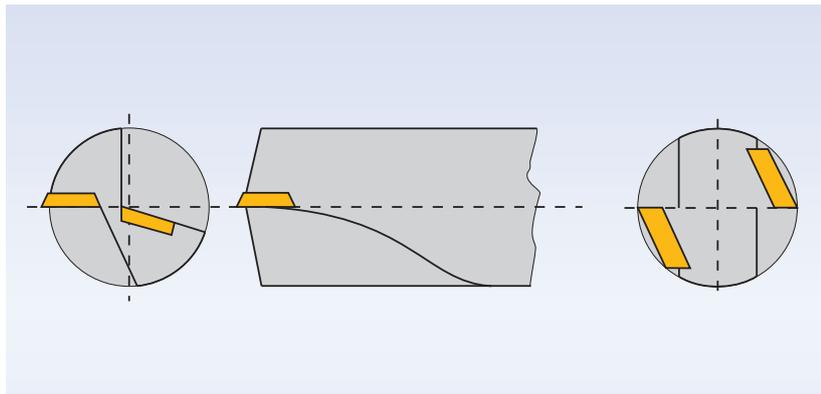
Neben den VHM werden aus Kostengründen in größeren Durchmesserbereichen gebaute Bohrer aus Hartmetall angeboten (Bild 4.7).

Auch Hartmetallbohrer werden beschichtet. Sie neigen dadurch weniger zum Aufschweißen von Werkstoff und arbeiten mit geringer Reibung. Als Schichtstoffe werden eingesetzt TiN (golden), TiCN (grau) und (TiAl)N/TiN (violett). TiN ist eine kostengünstige Standardschicht, TiCN weist geringe Reibung auf, und (TiAl)N/TiN hat die höchste Härte. Gradientenbeschichtungen wurden entwickelt, um günstige Eigenschaftskombinationen zu erreichen.

Bild 4.8 zeigt empfohlene Schnitt- und Vorschubgeschwindigkeiten von Bohrervarianten aus Schnellarbeitsstahl und Vollhartmetall für einen Bohrerdurchmesser von 6 mm. Die optimale Schnittgeschwindigkeit ist in guter Näherung unabhängig vom Bohrerdurchmesser, der Vorschub für Spiralbohrer kann grob überschlägig mit $f = 0.02 \times d$ angenommen werden. Unter dieser Annahme gilt mit (4.2) und mit v_c [m/min] und v_f [mm/min]:

$$v_f = 6.4 \times v_c \quad (4.3)$$

Beispiel: Bohren einer Sackbohrung von $d = 10\ \text{mm}$ Durchmesser mit $v_c = 75\ \text{m/min}$ ergibt eine Vorschubgeschwindigkeit mit $v_f = 480\ \text{mm/min}$.



4.9: Kurzlochbohrer mit Wendeschneidplatten, radialer und tangentialer Einbau.

Die in Bild 4.8 angegebenen Daten beziehen sich auf äußere Überflutungskühlung. Wenn mit Spiralbohrern mit Innenkühlung gearbeitet wird, lassen sich wegen der günstigeren Kühlschmierbedingungen um 10 % bis 15 % höhere Schnittgeschwindigkeiten und 10 % höhere Vorschübe einstellen, d. h. die Vorschubgeschwindigkeit kann nach (4.2) um 20 % bis 25 % gesteigert und die Hauptzeit um diesen Prozentsatz verringert werden.

Hartmetall-Wendeschneidplattenbohrer haben den Vorteil, dass die Platten ausgetauscht werden können. Sie werden jedoch standardmäßig nur für Bohrungsdurchmesser von 10 mm oder größer (bis 120 mm) angeboten. Da der Spantransport nicht in gleicher Weise unterstützt wird wie bei Spiralbohrern, sollte eine Bohrtiefe von $3 \times d$ nicht überschritten werden. Die zwei Schneiden sind asymmetrisch ausgeführt (Bild 4.9 linkes Teilbild). Eine Schneide ist die Zentrumsschneide und überdeckt die Achse. Für sie wird zähes Hartmetall verwendet. Eine andere, außen liegende Schneide überdeckt die Zentrumsschneide teilweise. Sie muss aus warmfestem Hartmetall bestehen, um die größeren Schnittgeschwindigkeiten und höheren Temperaturen auszuhalten.

Bei kleinen Bohrdurchmessern ist wegen der Lochklemmung und der

damit verbundenen Schwächung der Platten Plattenbruch nicht auszuschließen. Tangentiale Spezialanordnungen der Platten bieten mehr Raum für die Befestigung und können sich günstiger verhalten (Bild 4.9, rechtes Teilbild). Gerade in Transferstraßen ist ein zuverlässig erreichbarer Standweg von großer Bedeutung. So konnte bei der Bearbeitung von geschmiedeten Kipphebeln auf einer Transferstraße die Bruchgefahr durch die tangentielle Spezialanordnung der Platten behoben werden.

Kurzlochbohrer mit Wendeschneidplatten eignen sich besonders, wenn unter schwierigen Einsatzbedingungen gearbeitet werden muss wie Bohren in die Schmiedehaut, Bohren einer Durchgangsbohrung bei schrägem Austritt oder Bohren von Kreuzbohrungen. Empfohlen wird an diesen Stellen trotz des kurzen und biegesteifen Bohrers eine starke Reduzierung des Vorschubs. Die stabile Ausführung des Werkzeugs kann dann für eine ausreichende Führung des Werkzeugs sorgen. Wenn es zum Bruch einer Schneide kommt, lässt sich die Platte austauschen.

Wenn Bohrer nichtrotierend eingesetzt werden (in Drehmaschinen), kommt es auf eine exakt zentrische Lage an (Bohrerachse und Drehachse koaxial); denn andernfalls werden der Standweg und die Oberflächengüte

beeinträchtigt. Die Kante der außenliegenden Platte muss parallel zur Vorschubrichtung und zur Drehachse der Spindel liegen. Eine Ursache für das Ausbröckeln der Zentrumschneide kann eine falsche Positionierung des Bohrers sein. Da Halter und Bohrer jeder für sich Lageabweichungen aufweisen, kann in diesem Fall eine Drehung des Bohrers um 180° ganz oder teilweise Abhilfe schaffen.

💡 Nicht rotierende Bohrer müssen zentrisch positioniert werden.

Nichtrotierende Wendeschneidplattenbohrer lassen sich für leichte Schnitt-

selungen mit einem Werkzeug erzeugt werden (Bild 4.10), vorausgesetzt dass die Drehmaschine über eine C-Achse oder eine eindeutige Spindelstoppeinrichtung verfügt. Bild 4.10 zeigt, wie die Bohrstange so gestoppt wird, dass die Bohrung mit einer auskragenden Dreikantplatte rückwärts gefast werden kann.

In Bohrstangen lassen sich mehrere Wendeschneidplatten positionieren, so dass eine Reihe von Formelementen mit einem Werkzeug bearbeitet werden kann. Bei ausreichendem Bohrungsdurchmesser und ausreichendem axialen Abstand der Formelemente (z. B. Abfasungen, Senkungen, Absätze in der

Platten direkt eingeschraubt werden. Reicht auch das nicht wegen zu enger Verhältnisse, können Stufenbohrer aus Vollhartmetall oder Schnellarbeitsstahl gewählt werden. Bohren mit Mindermengenkülschmierung ist möglich (siehe auch Abschnitt 2.9). Dabei übernehmen die im Luftstrom mitgeführten Öltröpfchen zusammen mit einer geeigneten Beschichtung der Bohrer die Schmierwirkung, der Luftstrom besorgt eine – wenn auch geringere – Kühlwirkung an der Wirkstelle.

Mit Schnellarbeitsbohrern lassen sich Bohrungsqualitäten um IT 11 bis IT 12, mit Vollhartmetallbohrern zwei bis drei Qualitätsstufen besser erreichen. Voraussetzung für hohe Qualität ist eine exakte Einspannung der Bohrwerkzeuge.

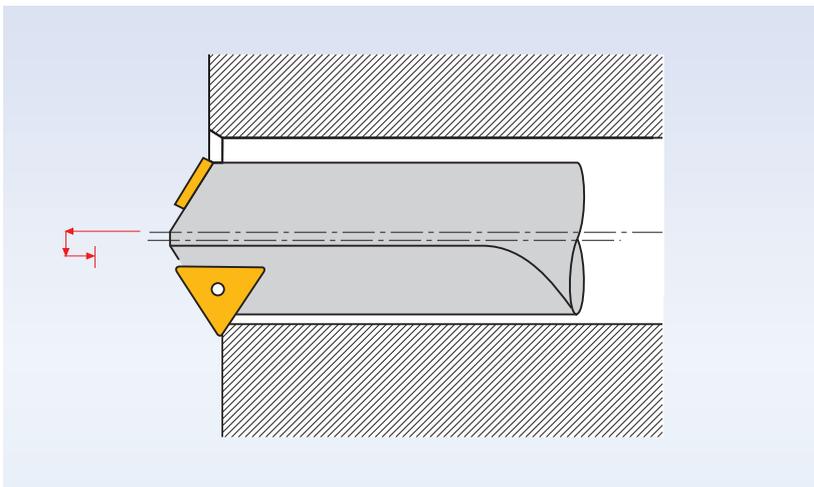


Bild 4.10: Anfasen von Bohrungen.

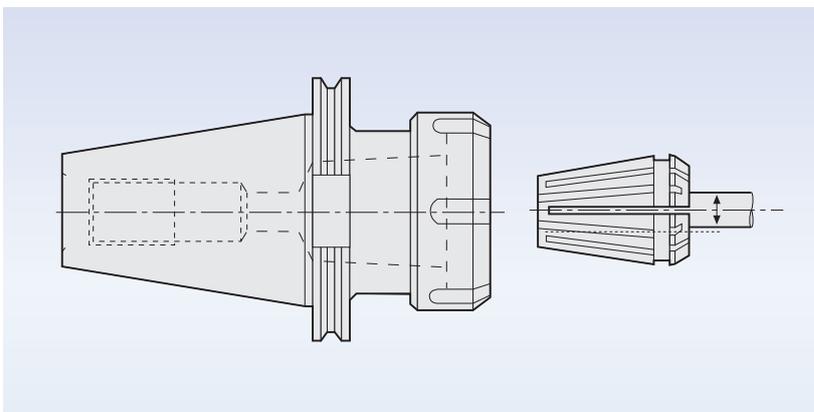


Bild 4.11: ISO-Steilkegel nach DIN 69 871 mit Spannzange (Quelle: Walter AG).

4.3 Werkzeughalter für rotierende Bohrwerkzeuge

Es lassen sich wenigstens zwei Schnittstellen zwischen Werkzeug und Maschine unterscheiden: Die Spindeln von Bohr- oder Fräsmaschinen und Bearbeitungszentren nehmen Halter auf (Schnittstelle 1). Die Spindeln werden in aller Regel mit standardisierten Spindelnasen ausgeführt. Das sind üblicherweise ISO Steilkegel nach ISO 7388/DIN 69871 Teil 1 oder Hohlkegel (HSK) nach DIN 69893-1. Auch der in Abschnitt 3.2 beschriebene Capto-Halter ist inzwischen verbreitet, nachdem das Unternehmen, das ihn zunächst entwickelt hat, Lizenzen an andere Hersteller vergibt und Rohlinge der Halter angeboten werden. Die Halter nehmen die eigentlichen Bohr-, Senk-, Reib- und Gewindewerkzeuge auf (Schnittstelle 2).

Bohrwerkzeuge mit kleinen Durchmessern (maximal 10 mm) lassen sich

te aus der Mitte herausfahren. Damit können z. B. Fasen (Anfasen eines Kernlochs), kurze Senkungen oder Auskes-

Bohrung) lassen sich Kassetten in die Bohrstange einsetzen, andernfalls müssen die Plattensitze ausgefräst und die



Bild 4.12: Hohlschaftkegel (HSK) nach DIN 69 893 für Spannzangenaufnahme. (Quelle: Gühring)

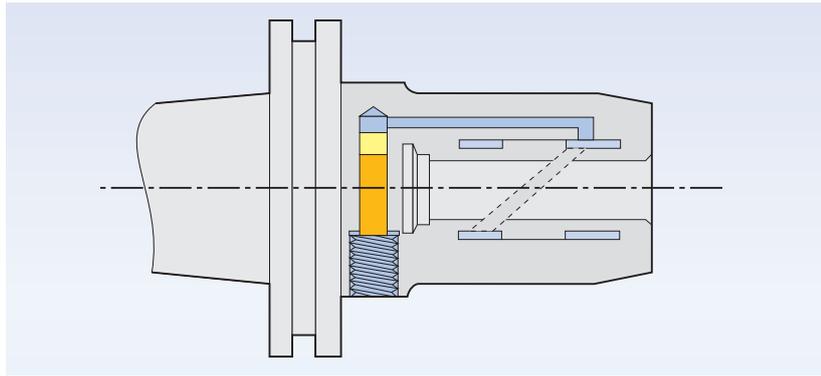


Bild 4.13: Hydrodehnfutter. (Quelle: Walter AG)

in Genauigkeitsspannzangen aufnehmen (Bilder 4.11 und 4.12). Wegen der Gefahr des Durchrutschens müssen bei größeren Durchmessern positive (formschlüssige) Mitnehmer vorgesehen werden. Bei normalen Spannzangen muss mit einem Rundlauffehler von 25 µm gerechnet werden, Genauigkeitsspannzangen können diese Abweichungen halbieren. Für Vollhartmetallbohrer werden bei höheren Ansprüchen Hydrodehnspannfutter oder thermische Schrumpffutter mit Rundlaufabweichungen bis herunter zu 3 µm angeboten (Bild 4.13). In der Praxis der Se-

rienfertigung werden überwiegend thermische Schrumpffutter wegen ihrer Robustheit und ihrer günstigen Kosten bevorzugt. Bild 4.14 gibt eine Übersicht der wichtigsten Eigenschaften von Bohrerhaltern.

le bestimmen mit dem Durchmesser d [mm], mit dem Vorschub f [mm] und der Schnittgeschwindigkeit v_c [m/min], bei einem mittleren Wirkungsgrad des Hauptantriebs von $\eta = 85\%$.

$$P_m = d \times f \times v_c / 50 \quad (4.4)$$

4.4 Kräfte, Momente und Leistungen

Die Maschinenleistung P_m [kW] beim Bohren in Stahl mittlerer Festigkeit lässt sich über eine grobe Überschlagsformel als obere Grenze für das Bohren ins Vol-

Beispiel: Bohren einer Sackbohrung von 10 mm Durchmesser mit einem Vorschub von $f = 0,2$ mm und einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 75$ m/min ergibt nach (4.4) eine Maschinenleistung von $P_m = 3$ kW.

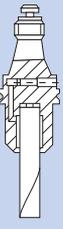
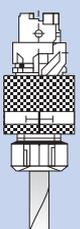
				
Werkzeug-Spannsysteme	Präzisions-Spannzange	Hydrostat. Dehnspannfutter	Schrumpffutter	Pendelhalter
Drehzahlen	< 20000 1/min	< 30000 1/min	> 30000 1/min	< 2000 1/min
Momente	mittel	hoch	sehr hoch	niedrig
Genauigkeit	< 3 µm	< 3 µm	< 2 µm	keine Angabe
Dämpfung	gut	sehr gut	sehr gut	mittel
Steifigkeit	hoch	sehr hoch	sehr hoch	mittel
Handhabung	mittel	sehr einfach	aufwendig	einfach

Bild 4.14: Schnittstellen Werkzeug/Halter.

Wegen der Wirkung der Querschni-
de kann die Vorschubkraft F_f [kN] kritisch
sein. Eine Überschlagsformel für das
Bohren ins Volle für Stahl mittlerer Fest-
igkeit ist mit f [mm] und d [mm]:

$$F_f = 1.1 \times f \times d \quad (4.5)$$

Beispiel: Die zugehörige Vorschubkraft
ist dann nach (4.5) $F_f = 2.2$ kN.

Diese Kraft kann sich jedoch um 100 %
erhöhen, wenn die Querschni-
de stark verschlissen ist. Umgekehrt lässt sie sich
deutlich senken, wenn der Bohrer aus-
gespitzt wird (siehe Abschnitt 4.2).

Für eine genauere Berechnung bzw.
für Werkstoffe mit anderen Festigkeiten
müssen die Leistungen und Kräfte nach
Kienzle über k_c bzw. k_f berechnet wer-
den (siehe Abschnitt 2.3). Die Spa-
nungsdicke h , die zur Bestimmung der
spezifischen Kräfte erforderlich ist, ist
vom Spitzenwinkel σ bzw. vom Einstell-
winkel κ nach (2.2) abhängig. Dann ist
die Bohrleistung an der Spindel d . h.
ohne Berücksichtigung eines Wir-
kungsgrades

$$P_c = k_c \times QV \quad (4.6)$$

Aus (4.6) lässt sich über die Winkel-
geschwindigkeit ω bzw. die Drehzahl n

($\omega = 2 \pi n$) das Drehmoment M an der
Spindel angeben

$$M = P_c / \omega \text{ bzw. } M = P_c / (2 \times \pi \times n) \quad (4.7)$$

Die Komponenten der am Bohrer
wirkenden Kräfte lassen sich nach Ab-
schnitt 2.3 anschreiben zur Schnitt-
kraft F_c , Vorschubkraft F_f und Passivkraft
 F_p . Dabei ist zu beachten, dass es zwei
oder mehr Schneiden gibt, an denen die
Kraftkomponenten wirken. Die Passiv-
kräfte heben sich weitgehend auf
(Bild 4.15).

Die Vorschubkraft an zwei Schneiden
ergibt sich über K_f .

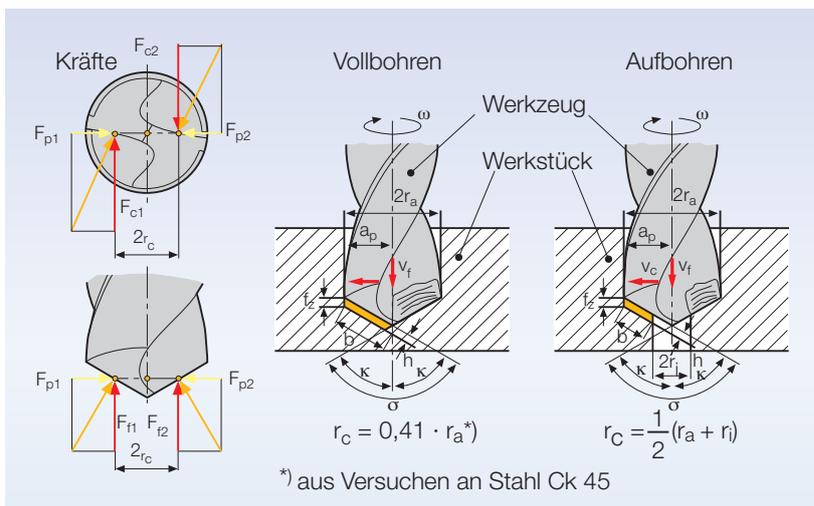


Bild 4.15: Kräfte beim Bohren.

4.5 Hartbohren

Hochbeanspruchte Bauteile werden
häufig vergütet oder gehärtet. Nach
dem Härten müssen Bohrungen einge-
bracht werden. Das Hartbohren ist ein
kritischer Prozess, der nicht selten ge-
gen Ende der Prozesskette stattfindet
und dadurch auch wirtschaftlich sensi-
bel ist. Für einsatzgehärtete Werkstücke,
also Teile mit einer 0,5 mm bis 1,5 mm
starken harten Schicht und zähem
Grundmaterial, ergibt sich häufig noch
die zusätzliche Schwierigkeit, im harten

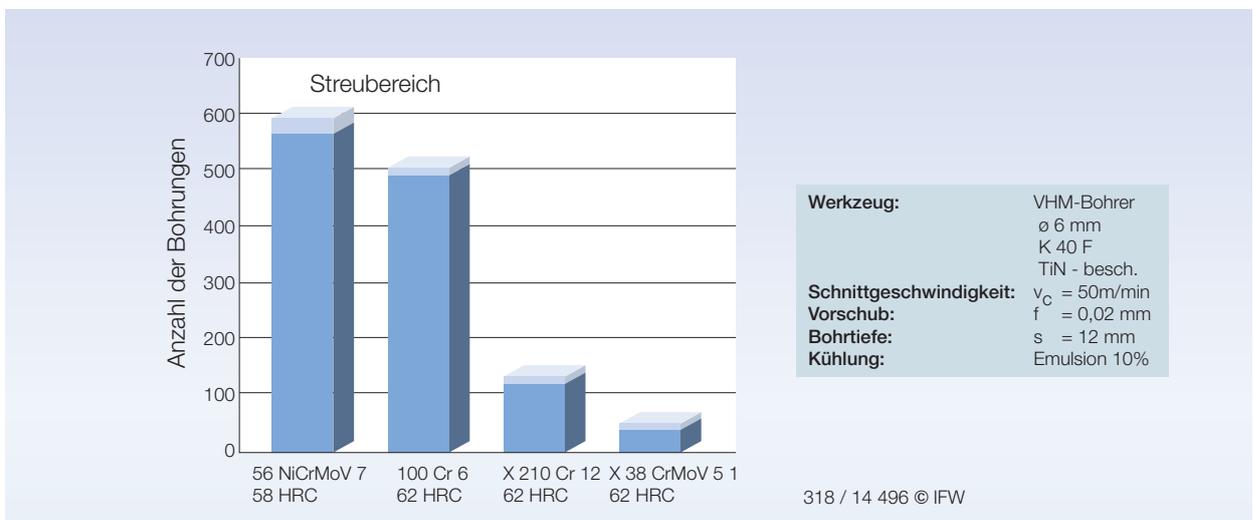


Bild 4.16: Standmengen und Werkstoff.

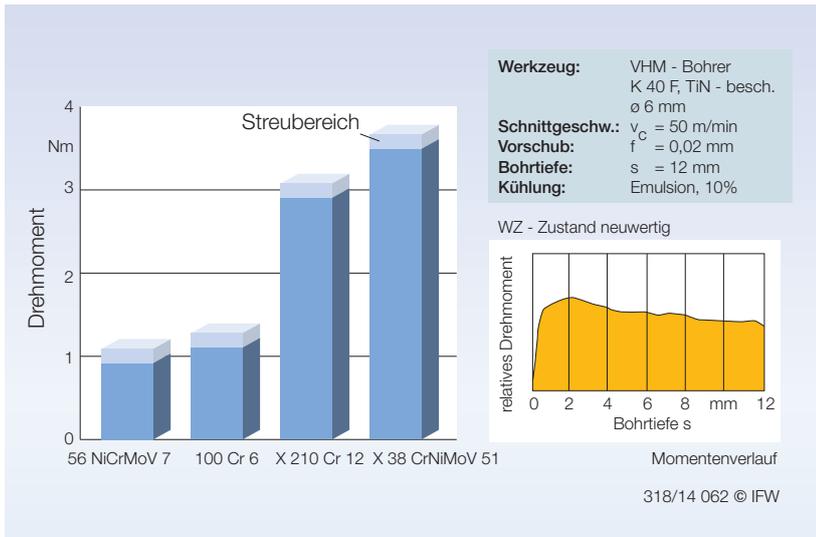


Bild 4.17: Drehmomente und Werkstoff (SPIN95).

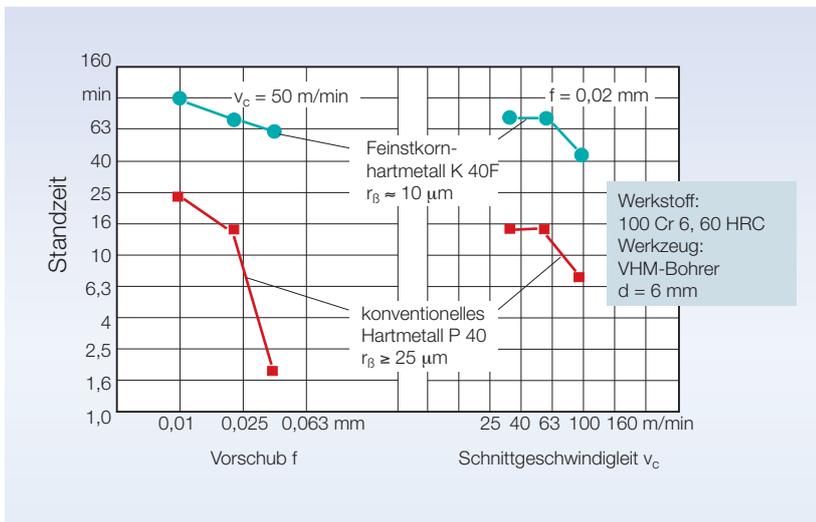


Bild 4.18: Standzeiten und Korngröße des Schneidstoffs.



Bild 4.19: Reduzierung der Arbeitsschritte beim Gewindebohren.

und im weichen Gefüge bohren zu müssen. Das Verschleißverhalten der Bohrer ist vom Werkstoff, dessen Härtemechanismen und vom Verschleißzustand der Werkzeuge abhängig (Bild 4.16). Die im Bild genannten Stähle haben etwa gleiches Härteniveau, aber unterschiedliche Härte-träger. Der 100 Cr 6 weist martensitische Härte auf, die Stähle X 210 Cr 12 und X 38 CrMo V 5 1 haben karbische Härte-träger. Der Stahl 56 NiCrMoV 7 ist ein Warmarbeitsstahl. Die Standmengen unterscheiden sich erheblich.

Im Bild 4.17 sind die erforderlichen Schnittmomente eingetragen. Das Schnittmoment wird durch den eigentlichen Trennvorgang, d. h. vom Widerstand gegen Trennen, und durch die plastische Verformbarkeit bestimmt. Entsprechend wirkt sich die Härte stark aus [SPIN95].

Beim Hartbohren sollte ein begrenztes Prozessfenster eingehalten werden. Grundsätzlich werden Vollhartmetallbohrer eingesetzt. Dabei haben sich Feinkornhartmetalle besonders bewährt (Bild 4.18). Erst bei großen Bohrungsdurchmessern werden Aufbohrwerkzeuge mit Schneidplatten verwendet. Unter Schlichtbedingungen lassen sich durch Hartbohren mit Vollhartmetallbohrern Maßgenauigkeiten im Bereich IT7 bis IT9 und Oberflächengüten von $R_z = 2 \mu\text{m}$ bis $4 \mu\text{m}$, in Sonderfällen auch $R_z = 1 \mu\text{m}$, erreichen.

Gerade bei einsatzgehärteten Bauteilen lässt sich durch Hartbohren die Fertigungsfolge erheblich verkürzen. Besonders interessant ist, dass die gesplittete Wärmebehandlung (Aufkohlen und Härten) bzw. das notwendige Abdecken beim Einsetzen entfallen können (Bild 4.19 und Bild 4.20).

Die Möglichkeiten der Wärmeabfuhr sind beim Hartbohren besonders un-

günstig; denn zum einen entsteht wegen der Härte und Festigkeit eine hohe Leistungsdichte vor den Schneiden und zum anderen ist die Wärmeabfuhr aus dem Bohrer behindert. Daher heizt er sich während eines Bohrvorgangs stark auf, dehnt sich dabei aus und kann durch Wandreibung zusätzlich erwärmt werden und klemmen. Daher hat es sich bewährt, das Bohrwerkzeug schwach konisch mit Verjüngung zum Schaft hin auszuführen [SPIN95].

4.6 Tieflochbohren

Tieflochbohren (sprachlich korrekt: Tiefbohren) dient zur Herstellung von Bohrungen mit großem Verhältnis von Bohrtiefe zu Bohrdurchmesser (bis 200 fach und mehr). Kleine Durchmesser bis ca. 12 mm werden mit speziellen Spiralbohrern oder Einlippenbohrern gefertigt. Einlippenbohrer für größere Bohrtiefen werden mit Führungsleisten ausgestattet, um die dann auftretende Radialkraft aufzufangen.

Bearbeitungsbeispiel:

*Kurbelwelle, Stahl C 45 V, 900 N/mm²
Bohrungsdurchmesser : 6 mm
Bohrlänge: 40 mm Bohrer aus Vollhartmetall nach DIN6535-HA, Spiralbohrer mit Innenkühlung, entspannen
 $n = 5250 \text{ 1/min}$ ($v_c = 100 \text{ m/min}$)
 $f = 0.15 \text{ mm}$ ($v_f = 788 \text{ mm/min}$)*

Bohrer werden bis zu Durchmessern von ca. 5 mm aus Vollhartmetall gefertigt. Schneidteil und Führungsleisten von Einlippenbohrern mit größeren Durchmessern bestehen aus Hartmetall, die auf ein V-förmig gefalztes Rohr aufgelötet sind, oder bei größeren Durchmessern aus einem V-förmigen Schaft mit einer Längsbohrung (Bild 4.21). Durch das Innere des Schaftes wird Kühlschmierstoff zur Wirkstelle geführt, durch den freien Querschnitt werden Späne und Kühlschmierstoff aus dem Bohrloch zwi-

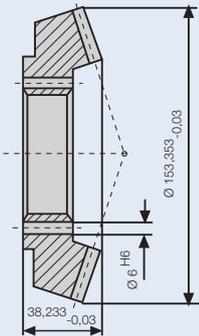
bisher	Bauteil	in Zukunft
<ol style="list-style-type: none"> 1. Spannungsfrei glühen 2. Drehen beider Seiten 3. Bohren 4. Zwischenkontrolle 5. Zylinderstifte in Passbohrungen einsetzen 6. Verzahnen 7. Demontieren der Zylinderstifte 8. Reiben der Passbohrung oder Gewinden 	 <p>Werkstoff: 15 CrNi 6 Zähnezahl: $z = 36$ Stirnmodul: $m_n = 2,5$</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Spannungsfrei glühen 2. Drehen beider Seiten 3. Verzahnen 4. Einsetzen und Härten 5. Bohren und Reiben oder Gewinden

Bild 4.20: Bearbeitungsbeispiel Hartbearbeitung.

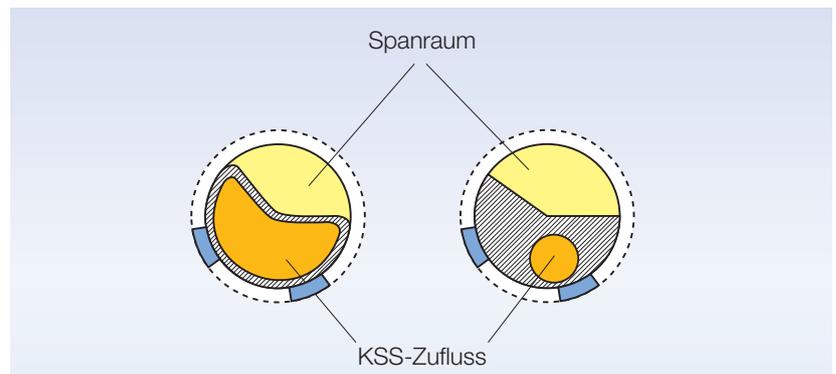


Bild 4.21: Einlippenbohrerschäfte.

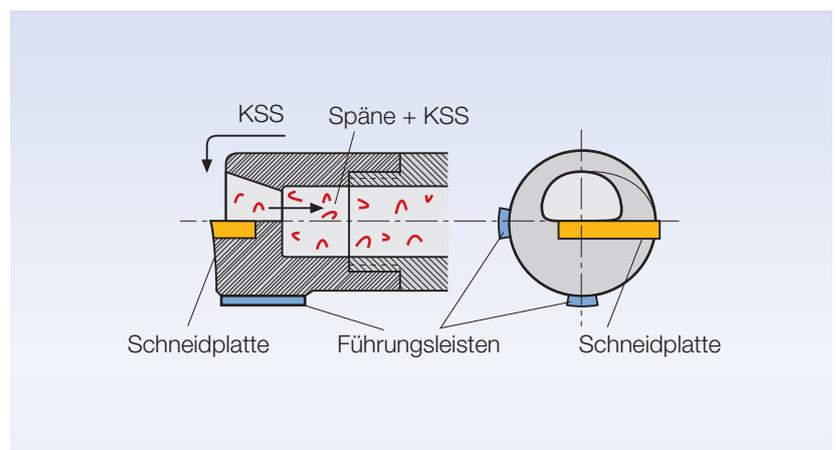


Bild 4.22: BTA-Bohrkopf.

schen Bohrungswand und Bohrrohr herausgebracht. Es ist darauf zu achten, dass der Kühlschmierstoff ausreichend gefiltert ist. Beim Anbohren wer-

den Führungsbuchsen verwendet, die neben der Führung ein Abdichten zum Werkstück übernehmen.

Einlippenbohrer werden bis zu Durchmesser von 25 mm (32 mm) eingesetzt. Bei größeren Bohrungen wird aus wirtschaftlichen Gründen meist das BTA- oder das Ejektorverfahren genutzt (Bild 4.22). Beim BTA-Verfahren wird der Kühlschmierstoff (ausschließlich Öl) zwischen Bohrungswand und Bohrerschaft an die Wirkstelle zugeführt. Die mit Spänen beladene Flüssigkeit wird durch den hohlen Schaft abgeführt.

Beim Ejektor-Verfahren wird mit einem Doppelrohr gearbeitet, sodass das Öl erst kurz vor der Wirkstelle nach außen geleitet wird. Durch eine besondere Düsenanordnung wird zudem eine Sogwirkung auf die Wirkstelle ausgeübt, was die Spanabfuhr erleichtert. Beim BTA- und beim Ejektorverfahren müssen besondere Anbohrvorrichtungen und Ölzuführungen vorgesehen werden, sodass in der Regel auf Spezialmaschinen gearbeitet wird.

Durch Tiefbohren lassen sich Bohrungstiefen bis zu $100 \times d$ und mehr, gemittelte Rautiefen von $R_z = 5 \mu\text{m}$ (in Sonderfällen $2 \mu\text{m}$) und Bohrungsqualitäten bis IT 8 (in Sonderfällen IT 7) in Stahl erreichen. Wegen der guten Führung der Schneiden und des Glättungseffektes, den die Führungsleisten mit sich bringen, sind die Oberflächengüten erheblich besser als beim konventionellen Bohren.

4.7 Gewindebohren

Gewindebohren dient der Herstellung von Innengewinden. Gewindebohrer werden bis 50 mm Durchmesser angeboten, für größere Durchmesser sind die Werkzeuge so aufwendig, dass sich das Gewindeschneiden mit Gewindeschneidköpfen, das Gewindedrehen, das Gewindestrehlen oder das Gewindefräsen meist als wirtschaftlicher erweisen. Gewindebohrer werden fast ausschließlich aus Schnellarbeitsstahl gefertigt. Sie bestehen aus dem Anschnittteil, dem Führungsteil und dem

Schaft. Anschnitt und Führungsteil weisen ein Außengewinde mit Spannuten auf, üblich sind 3 bis 5 Spannuten. Das Gewinde wird von den Stegen zwischen den Spannuten erzeugt.

Der Anschnitt sorgt für die Zentrierung und ist für die Spanleitung und Spanformung zuständig. Es werden 5 Anschnittarten unterschieden. Anschnitt A hat eine Anschnittlänge, die über 6 bis 8 Gänge geht. Damit lässt sich eine gute Führung und eine geringe Beanspruchung der Schneiden in den einzelnen Gängen erreichen; denn die Schneidarbeit verteilt sich auf die 6 bis 8 Gänge. Im Gegensatz dazu geht der Anschnitt E über $1 \frac{1}{2}$ bis 2 Gänge, ist also extrem kurz. Er wird für Gewinde, die bis annähernd zum Bohrungsgrund gehen, eingesetzt. Es entstehen wegen der geringen Zahl an Schneiden kräftige Späne, die Schneiden werden hoch belastet. Soweit möglich empfiehlt sich ein nicht zu kurzer Anschnitt. Bei zähen Werkstoffen wie Chrom- oder Chromnickelstählen oder Titanlegierungen treten starke radiale Verspannungen zwischen Bohrer und Werkstück auf. Um die Reibung zu verringern, wähle man dünne Stege – allerdings mit dem Nachteil, dass sie nicht so häufig nachgeschliffen werden können.

 **Der Anschnitt bestimmt weitgehend das Verhalten des Gewindebohrers.**

Hinsichtlich der Spannuten lassen sich 4 Varianten unterscheiden:

- Gerade Nuten für kurzspanende Werkstoffe,
- Gerade Nuten und Schälanschnitt für Stähle bei Durchgangsbohrungen,
- Rechts gedrahlte Nuten für Stähle bei Sacklochbohrungen,
- Links gedrahlte Nuten für zähe Stähle und Durchgangsbohrungen.

Schälanschnitt und Linksdrill fördern die Späne nach vorn, Rechtsdrill nach

hinten aus dem Bohrloch heraus. Das Profil der Spannuten bestimmt den Spanwinkel, wenn nicht im Anschnitt besondere Anschliffe vorgenommen werden. Gewindebohrer werden für die Stahlbearbeitung mit Spanwinkeln zwischen 3° bis 15° ausgeführt. Je höher die Festigkeit des Werkstoffes ist, desto geringer wird der Spanwinkel gewählt, um die Schneiden mechanisch zu stärken.

Gewindebohrer werden hinterschliffen mit Winkeln um 3° bis 6° , wodurch die Reibung herabgesetzt wird. Dem gleichen Ziel dient eine schwache Verjüngung des Führungsteils um 1:1000. Wenn dennoch die Gefahr des Klemmens z. B. bei dünnwandigen Werkstücken aus zähem Werkstoff besteht, kann das Herausschleifen einzelner Gänge/Schneiden helfen, die Reibung herabzusetzen.

Wegen der erschwerten Spanabfuhr und der bestehenden Bruchgefahr wird beim Gewindebohren mit niedrigen Schnittgeschwindigkeiten gearbeitet. Für Kohlenstoffstähle liegen sie zwischen 5 m/min bis 15 m/min (größere Geschwindigkeiten für weniger feste Werkstoffe von 400 N/mm^2 , niedrigere Werte für 900 N/mm^2). Schnittgeschwindigkeiten für legierte Stähle werden je nach Festigkeit zwischen 2 m/min bis 9 m/min eingestellt.

Der Vorschub beim Gewindeschneiden entspricht der Steigung des Gewindes. Der Vorschub muss von den Maschinen, auf denen gearbeitet wird, bereitgestellt werden. Dies kann mechanisch über Leitpatronen ähnlich Leitspindeln oder mechatronisch über die Steuerung besorgt werden. „Schwimmende“ Halter können für einen Ausgleich bei Vorschubabweichungen (maschineller Vorschub geringer als Steigung!) sorgen. Charakteristisch für das Gewindebohren ist, dass am Gewin-

deende die Drehrichtung des Bohrers umgekehrt werden muss. Bei Drehung in Gegenrichtung können sich Späne verklemmen. Abhilfe können eine bessere Schmierung, ein optimierter Anschnitt und ein geringerer Freiwinkel (Hinterschliff) schaffen. Die Drehrichtungsumkehr muss von den Maschinen geleistet werden. Bei Einspindelmaschinen kann dies durch Umschaltung der Spindeldrehrichtung geschehen. Bei Mehrspindeldrehautomaten mit zentralem Spindeltrieb wird die Spindel, auf der Gewinde geschnitten wird, entkoppelt, oder auf der Werkzeugseite wird ein Überholantrieb für das Werkzeug vorgesehen. Um Probleme bei der Tiefenbegrenzung zu vermeiden, können Rutschkupplungen eingesetzt werden, die sich zudem elektrisch überwachen lassen. Solche Vorrichtungen können auch bei fehlender Kernbohrung Kollisionen mit hohem Schadenspotenzial vermeiden.

Das Gewindeschneiden ist ein spannendes Verfahren mit hohem Reibanteil. Daher haben sich reibungsmindernde Beschichtungen wie Titanitrid TiN oder Titankarbonitrid TiCN bewährt. Gegenüber blanken, unbeschichteten Bohrern lässt sich die Schnittgeschwindigkeit um 30% bis 50% steigern. Die Oberflächenqualität wird verbessert.

Bearbeitungsbeispiel:

Gewindebohren eines Pleuels aus Stahl Ck 35 V,

Innenfeingewinde M 12 x 1,25,

Schnittgeschwindigkeit: $v_c = 6 \text{ m/min}$,

Gewindebohrer blank:

Standmenge: 300 Teile,

Gewindebohrer TiN-beschichtet:

Standmenge: 1200 Teile,

Gewindebohrer TiN-beschichtet,

nachgeschliffen: 400 Teile.

Innengewinde mit größerem Durchmesser werden durch Drehen, Streh-

len (Drehen mit mehrgängigem Drehwerkzeug) oder Fräsen erzeugt. Bei hoher Produktivität lassen sich Gewindeschneidköpfe einsetzen, die am Hubende gesteuert zusammenfallen (collapsible tap) und so eine Drehrichtungsumkehr überflüssig machen.

Mit bahngesteuerten NC-Maschinen lassen sich größere Innengewinde durch Gewindefräsen erzeugen. Das Verfahren zeichnet sich durch hohe Robustheit und Prozesssicherheit sowie durch hohe Flexibilität aus. Neuere Bearbeitungszentren verfügen über geeignete Unterprogramme, die parametrisiert werden können, um an die jeweilige Aufgabe angepasst zu werden. Durch Gewindefräsen lässt sich ein weiterer Bereich von Durchmessern mit einem Fräser fertigen, solange die Steigung dieselbe ist.

4.8 Reiben

Durch Reiben werden vorgebohrte Bohrungen mit hoher Maßgenauigkeit und hoher Oberflächenqualität erzeugt. Die Lagegenauigkeit kann nicht, die Formgenauigkeit nur wenig beeinflusst

werden. Die erreichbaren Toleranzfelder liegen bei IT8 bis IT7, bei günstigen Bedingungen und besonderem Aufwand auch bei IT6. Reiben ist ein Endbearbeitungsverfahren, das dem Bohren ins Volle, dem Aufbohren oder Senken folgt. Prinzipiell handelt es sich selbst um ein Aufbohren mit geringen Schnitttiefen. Untermaße der Vorbohrungen liegen bei 0,1 mm bis 0,4 mm (für Bohrungsdurchmesser von 4 mm bis 75 mm). Die Reibwerkzeuge, auch Reibahlen genannt, werden aus Schnellarbeitsstahl oder Hartmetall angeboten. Reibahlen werden auch beschichtet (TiAlN) hergestellt, um den Reibverschleiß zu mindern. Schnittgeschwindigkeiten in Stahl liegen für blanke HSS-Reibahlen bei 12 m/min, für beschichtete VHM-Werkzeuge bis 50 % höher, die Vorschübe je Schneide zwischen 0,07 mm bis 1,2 mm. Letztere sind vom Anschnitt abhängig; denn damit wird die Spanungsdicke bestimmt. Für Maschinenreibahlen werden üblicherweise Anschnittwinkel kleiner 45° gewählt. Kleinere Anschnittwinkel sind nur für Durchgangsbohrungen geeignet.

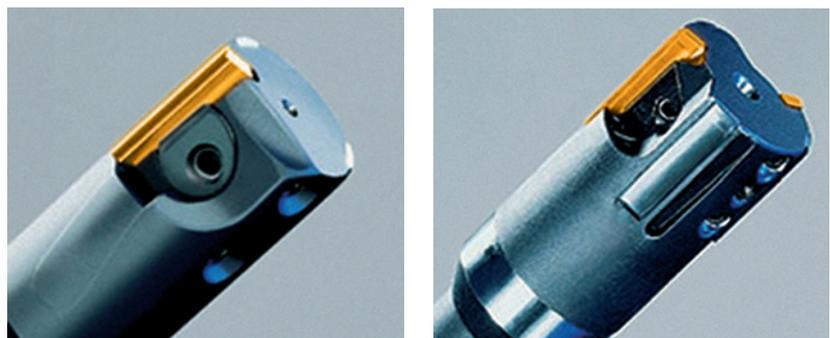


Bild 4.23: Ein- und zweischneidige Reibwerkzeuge mit Führungsleisten. (Quelle: Mapal)

Werkstoff	Vorschub [mm]	Schnittgeschw. [m/min]
Stahl, $\leq 750 \text{ N/mm}^2$	0,2 – 0,4	12 – 90
Stahl, $> 750 \text{ N/mm}^2$	0,1 – 0,4	12 – 70

Tafel 4.1: Schnittdaten zum Reiben mit Einschneiden-Werkzeugen (nach Mapal).



Durch Reiben lassen sich nur die Maßgenauigkeit und Oberflächengüte verbessern, nicht die Lagegenauigkeit.

Seit einiger Zeit werden Ein- und Zweischneiden-Reibwerkzeuge mit Stützleisten zum Auffangen der radialen Kräfte angeboten (Bild 4.23). Die Messer dieser Werkzeuge sind austauschbar. Wegen der günstigeren Spanungsbedingungen lassen sich erheblich höhere Schnittgeschwindigkeiten mit diesen Werkzeugen erreichen (Tafel 4.1), was besonders bei Taktzeit bestimmenden Arbeitsgängen interessant ist. Es empfiehlt sich mit Öl oder wenigstens fetter Emulsion zu arbeiten.

4.9 NE-Metalle

Aluminiumlegierungen

Auf die Zerspanbarkeit von Aluminium und Aluminiumlegierungen im Allgemeinen wurde in Abschnitt 2.10

eingegangen. Zum Bohren werden Schnellarbeitsstahl- und Hartmetallwerkzeuge eingesetzt. Besonders bei weichen Werkstoffen kann der Spantransport aus der Bohrung kritisch sein. Dem muss durch Entspänen oder durch Innenhochdruck-Kühlschmierung begegnet werden. In Tafel 4.2 sind Schnittwerte zum Bohren ins Volle angegeben.

Titanlegierungen

Auf die Zerspanbarkeit von Titan und Titanlegierungen im Allgemeinen wurde in Abschnitt 2.10 eingegangen. Da das Bohren häufig der letzte Arbeitgang zur Fertigung eines Werkstückes ist, ist ein sicherer Prozess an einem teuren Bauteil besonders wichtig. In der Serienfertigung werden Bohrungen in Umformteilen zunehmend im Sinne einer Komplettbearbeitung in Dreh- oder Fräsprozesse integriert. Das impliziert andererseits, dass auf aufwendigen Maschinen gearbeitet wird. Der Bohrprozess muss folglich möglichst produktiv ausgeführt werden.

Sicherheit und Produktivität zu vereinbaren, stellt eine besondere Herausforderung dar.

Es werden Bohrer aus Schnellarbeitsstahl und Hartmetall mit und ohne Beschichtung eingesetzt. Die Schnellarbeitsstähle sind S 6-5-2-5, also eine besonders warmfeste Sorte, oder pulvermetallurgisch hergestellter Schnellarbeitsstahl mit dichtem, gleichmäßigem Gefüge, das besondere Kantenschärfe zulässt. Die Vollhartmetallbohrer (VHM) werden der Anwendungsgruppe K20 zugeordnet. Sie können blank, TiN- oder TiAlN-beschichtet sein. Beim Bohren ins Volle besteht das Problem, dass vor dem Bohrer Kern Werkstoff stark verformt und weggedrückt werden muss. Dadurch kommt es ohne weiteres zu starker Kaltverfestigung des Werkstoffes. Um diese in Grenzen zu halten, müssen Schnellarbeitsstahlbohrer sorgfältig ausgespitzt werden. Zur ausreichenden Wärmeabfuhr empfiehlt sich Innenkühlung oder häufiges Entspänen, wobei die Bohrerspitze intensiv gekühlt werden sollte. Tafel 4.3 gibt Schnittwerte für das Bohren von Titanlegierungen wieder.

HSS		VHM	
v_c [m/min]	f [mm]	v_c [m/min]	f [mm]
≤ 10	≤ 0.10	≤ 60	≤ 0.16

Tafel 4.3: Schnittwerte für das Bohren von Titan.

Werkstoff	HSS		HW	
	v_c m/min	f mm	v_c m/min	f mm
weiche Al-Legierung HB = 60	≤ 200	≤ 0,15	≤ 400	≤ 0,15
ausgehärtete untereutektische Al-Legierung	≤ 100	≤ 0,15	≤ 200	≤ 0,15
eutektische und übereutektische Al-Legierung	≤ 50	≤ 0,15	≤ 100	≤ 0,15

Tafel 4.2: Schnittwerte für das Bohren von Aluminium.

4.10 Bohrprobleme, Praxistipps

Die Empfehlungen gehen von einer Stahlzerspanung aus, wenn nicht anders angegeben. Sie sind nach dem Erscheinungsbild geordnet, mit „•“ sind die möglichen Maßnahmen genannt

Merkmal	Maßnahmen
Standweg zu gering Eckenverschleiß	<ul style="list-style-type: none"> • Drehzahl/Schnittgeschwindigkeit verringern • Bohrer mit verschleißfesterer Schicht (TiAlN) wählen • Kühlschmierung verbessern
Standweg zu gering Freiflächenverschleiß	<ul style="list-style-type: none"> • Vorschub verringern • Drehzahl/Schnittgeschwindigkeit verringern • Mittigkeit des Bohrers prüfen • Innenkühlung vorsehen
Standweg zu gering Querschneidenverschleiß	<ul style="list-style-type: none"> • Reibungsmindernde Schicht (TiN) wählen • Vorschub verringern • Bohrer ausspitzen • Innenkühlung vorsehen
Bohrer bricht erforderliches Drehmoment zu hoch	<ul style="list-style-type: none"> • entspannen, häufiger entspannen • Bohrer nachschleifen • Vorschub verringern • Kühlschmierung verbessern • Innenkühlung vorsehen
Bohrer quietscht hochfrequente Schwingung durch Reibung	<ul style="list-style-type: none"> • Kühlschmierung verbessern • Auf Ölschmierung umstellen • Innenkühlschmierung vorsehen • Schneidenecke verschlissen, Bohrer nachschleifen
Bohrdurchmesser zu weit Unrundlauf des Bohrers, Aufschweißungen	<ul style="list-style-type: none"> • Anschliff prüfen • Bohrerdurchmesser prüfen • Kühlschmierung verbessern • Ölkühlschmierung vorsehen
Bohrdurchmesser zu klein Arbeitstemperatur zu hoch	<ul style="list-style-type: none"> • Bohrerdurchmesser prüfen • Ölkühlschmierung vorsehen • Innenkühlung vorsehen
Lage der Bohrung fehlerhaft Bohrer verläuft	<ul style="list-style-type: none"> • Bohrung zentrieren • Bohrbuchse verwenden • Abstand der Bohrbuchse minimieren
Unterbrechung durch lange Wendelspane Ungünstige Spanformen durch zähen Werkstoff	<ul style="list-style-type: none"> • Vorschub nach jeweils 1 x d unterbrechen • Häufiger entspannen • Bohrer mit geringerem Drallwinkel wählen • Tieflochanordnung wählen
Unsauberes Gewinde Hohe Reibung im Führungsteil	<ul style="list-style-type: none"> • Für bessere Schmierung sorgen, Öl hoher Zähigkeit • Axialen Vorschub überprüfen • Schmale Stege wählen • Einzelne Gänge herausschleifen
Unsauberes Gewinde, Bohrerbruch Klemmen der Späne beim Rücklauf	<ul style="list-style-type: none"> • Umschaltpunkt überprüfen • Spänespülung verbessern • Gewindebohrer mit stärkerem Drall wählen • Gewindebohrer mit geringerem Freiwinkel wählen

5. Räumen

5.1 Verfahrensgrundlagen

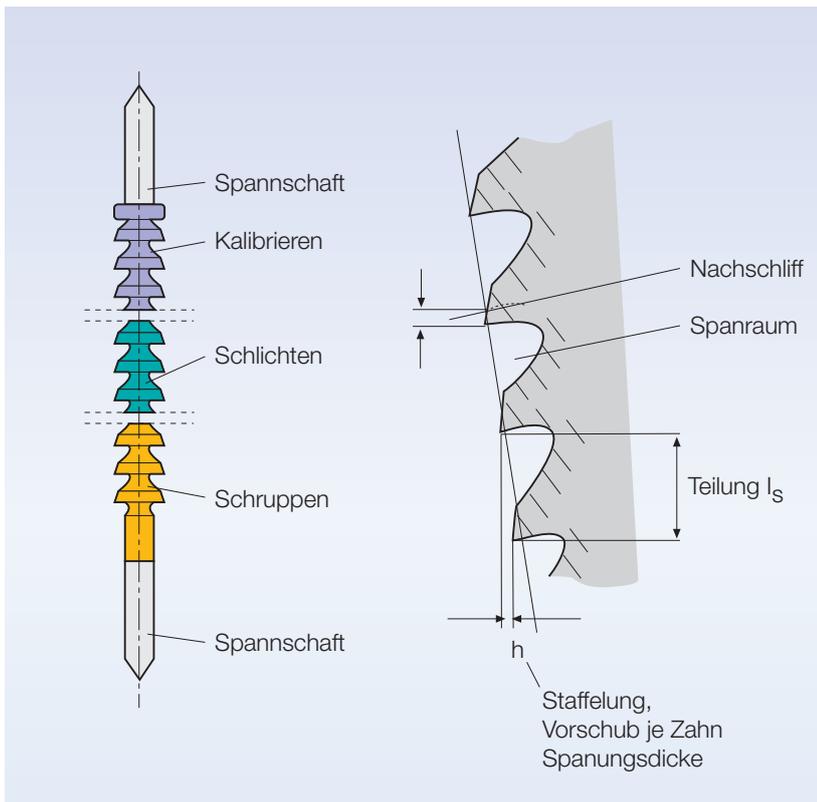


Bild 5.1: Innenräumwerkzeug mit Staffelung.

Das Räumen ist ein produktives spanendes Verfahren der Serienfertigung. Funktionsflächen hoher Oberflächengüte bei großer Maß- und Formgenauigkeit können durch einen einzigen Werkzeughub erzeugt werden. Das Verfahren zeichnet sich durch hohe Zerspanleistung aus. Räumwerkzeuge führen eine geradlinige, in Sonderfällen auch schraubige Schnittbewegung aus. Spezielle Varianten (Drehräumen, Wälzschaben von Evolventenflächen) arbeiten mit rotierenden Schnittbewegungen. Räumwerkzeuge sind aus mehreren/vielen gestaffelt angeordneten Schneiden aufgebaut (Bild 5.1). Das Räumen ist das einzige spanende Verfahren, das ohne Vorschubbewegung arbeitet; denn der Eingriff von Schneide zu Schneide wird durch deren Staffelung erreicht. Die Spanungsdicke f_z ist also durch das Werkzeug vorgegeben und kann nicht wie bei anderen spanenden Verfahren durch Maschineneinstellungen verändert werden.

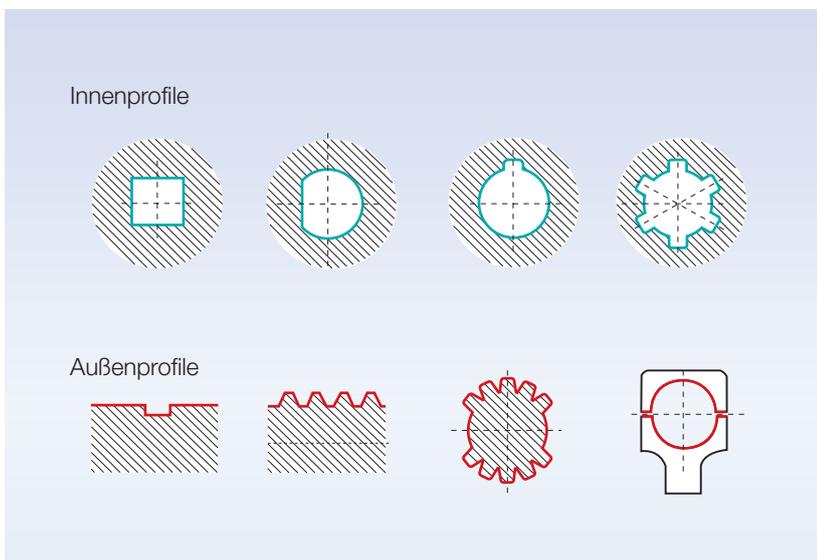


Bild 5.2: Innen- und außengeräumte Profile.

Es ist zwischen dem Innen- und Außenräumen zu unterscheiden. Beim Innenräumen wird ein Werkzeug durch eine vorgearbeitete Bohrung gezogen oder gedrückt. Typische Anwendungen des Innenräumens sind die Herstellung von profilierten Bohrungen wie Vierkanten, Mehrkanten, Vielkeilprofile, Innenverzahnungen und Nuten (Bild 5.2). Da die profilgebundenen und wegen der Staffelung (Spanungsdicke) meist auch werkstoffgebundenen Werkzeuge durch ihren komplexen Aufbau aufwendig sind, wird das Innenräumen entweder nur in der Serienfertigung eingesetzt

oder für die Herstellung von genormten oder sonstigen standardisierten Profilen, wenn ein aufwendiges Werkzeug über eine größere Zahl von Aufträgen oder unterschiedlichen Einsätzen amortisiert werden kann (Beispiel: genormte Vielkeilprofile).

 **Räumen ist produktiv, allerdings sind die Werkzeuge aufwendig. Sie müssen über größere Stückzahlen amortisiert werden.**

Das Außenräumen dient der Herstellung von ebenen oder profilierten Flächen. Es ist häufig die produktivere Alternative zum Fräsen. Allerdings ist auch hier ausreichende Seriengröße vorauszusetzen (Bild 5.2). Räummaschinen können für waagerechte oder senkrechte Hubbewegung (Richtung der Schnittbewegung) ausgeführt werden.

Beim Innenräumen wird ein vorgebohrtes Werkstück in die Arbeitsposition gebracht. Dann wird die Räumnadel in die Bohrung eingeführt und soweit durchgeschoben, bis ihr Ende von einer Klemmeinrichtung im Räum Schlitten gefasst werden kann. Anschließend wird die Räumnadel vom Räum Schlitten durch die Bohrung hindurch gezogen oder geschoben, wobei die Spanabnahme erfolgt. Wenn die Räumnadel gänzlich durch die Bohrung gezogen oder geschoben ist, wird das Fertigteil aus dem Arbeitsraum heraus befördert, das Ende der Räumnadel von einer Transport- und Haltevorrichtungen gegriffen und in die

Ausgangsposition zurückgefahren. Der Vorgang wiederholt sich dann für das nächste Werkstück.

Beim Außenräumen entfällt das Einfädeln des Werkzeugs. Es wird lediglich an dem Werkstück vorbeigeführt, wobei wegen der Staffelung der Schneiden die Spanabnahme erfolgt. Beim Außenräumen sind von der Maschine erhebliche Abdrängkräfte aufzunehmen. Die Maschine muss entsprechend steif in Querrichtung sein.

Durch Räumen lassen sich hohe Maß- und Formgenauigkeiten bis IT 7 (normal IT 8) erreichen. Auch hohe Oberflächengüten R_z bis $5 \mu\text{m}$ (normal $R_z = 6.3 \mu\text{m}$ bis $25 \mu\text{m}$, mit besonderem Aufwand bis $1 \mu\text{m}$) können erzeugt werden. Die Lagegenauigkeit beim Innenräumen kann allerdings kritisch sein; denn die Werkstücke werden meist schwimmend aufgelegt und die schlanken Werkzeuge besitzen nur eine begrenzte Quersteifigkeit.

Räumwerkzeuge werden meist aus Schnellarbeitsstahl gefertigt. Üblich sind die Schneidstoffe

HS 6-5-2, HS 6.-5-2-5 oder HS 2-9-2 mit Härten von 64 HRC bis 66 HRC. Wegen der stoßartigen Belastung der Schneiden muss der Schneidstoff ausreichend zäh sein. Die Räumwerkzeuge können zur Erhöhung des Standweges beschichtet werden, und zwar mit Titanitrid (TiN) oder Titankarbonitrid (TiCN). Wegen des gehärteten Schnell-

arbeitsstahles können nur Beschichtungsverfahren mit Arbeitstemperaturen unterhalb der Anlasstemperatur eingesetzt werden. Das sind PVD-Verfahren bei 480°C bis 500°C . Wegen ihres hohen Wertes müssen Räumwerkzeuge mehrfach nachgeschliffen werden. Dies erfolgt an der Spanfläche, wobei die Erstbeschichtung dort verloren geht. Gleichwohl hat die Beschichtung auf der Freifläche eine Stützwirkung und verzögert den Verschleiß. Um die Nachschliffstärke in Grenzen zu halten, wird vorteilhafter Weise nur bis zu einer Verschleißmarkenbreite von $0,2 \text{ mm}$ gearbeitet. Für Großserien werden in einigen Fällen auch Räumwerkzeuge mit Hartmetalleinsätzen verwendet. Die Wirtschaftlichkeit für die Wahl des Schneidstoffes ist dabei zu prüfen.

Werkstoffe mit Festigkeiten in einem weiten Bereich von 400 N/mm^2 bis 1000 N/mm^2 lassen sich räumen. Es hat sich allerdings bewährt, Stahlwerkstücke in Festigkeiten von 500 N/mm^2 bis 900 N/mm^2 zu halten, um die Schneiden nicht zu überlasten (hohe Festigkeit) oder um Schmieren und ungünstige lange Späne (geringe Festigkeit) zu vermeiden.

Während eines Werkzeughubs werden im Allgemeinen Schrupp-, Schlicht-, Feinschlicht- und Kalibriervorgänge ausgeführt. Durch Variation der Staffelung lassen sich die Spannungsdicken f_z entsprechend anpassen (Tafel 5.1). Zwischen den Schneiden muss ausreichend Spanraum vorhanden sein; denn während eines Werkzeughubes müssen die Späne in den Spanräumen zwangsfrei transportiert werden können. Dazu werden Spanraumfaktoren SR abhängig vom Werkstoff angesetzt. Die Teilung eines Räumwerkzeugs l_s [mm] ergibt sich dann mit der Spannungsdicke h bzw. f_z [mm] und der Räumlänge im Werkstück l_w [mm] zu:

Werkstoff	f_z [μm]		SR	v_c [m/min]
	Schruppen	Schlichten		
Stahl	10-150	3-30	5-15	6-25
NE-Metall	20-200	10-40	3-12	10-40
Kunststoffe	30-60	10-30	5-15	10-40

Tafel 5.1: Spannungsdicken, Spanraumzahlen und Schnittgeschwindigkeiten.

$$l_s = SR \times \sqrt{f_z \times l_w} \quad (5.1)$$

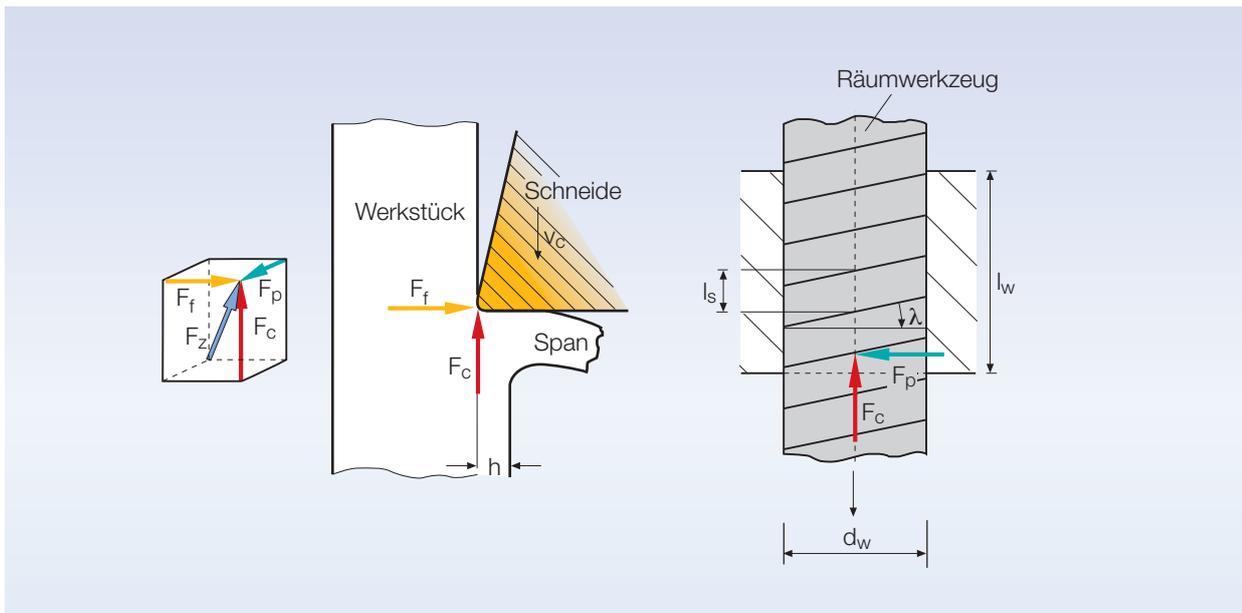


Bild 5.3: Kräfte an der Schneide.

Übliche Räumlängen (l_w durch das Werkstück vorgegeben) beim Innenräumen liegen bei zweimal Bohrungsdurchmesser. Aus der Teilung und der möglichen Spanndicke lassen sich die aktive Länge des Räumwerkzeugs und damit also der notwendige Räumhub ermitteln, der in der Räummaschine zur Verfügung stehen muss. Die Schnittgeschwindigkeiten sind in der Regel für sämtliche Phasen des Werkzeughubes konstant (Tafel 5.1).

Als Kühlschmierstoffe werden für Stahl meist Mineralöle oder hoch additivierte Emulsionen verwendet. Aluminium wird vorteilhaft mit Petroleum oder ähnlichen wenig zähen Kohlenwasserstoffen geräumt.

Die höchsten Kräfte treten in der Schruppphase auf. An jeder Schneide greift eine linienförmig verteilte Zerspankraft an. Beim Außenräumen können die Schneiden einen Neigungswinkel λ aufweisen. Dann hat die Zerspankraft eine Querkomponente F_p , die von den Führungen der Maschine aufgenommen werden muss.

Die Schnittkraft F_c [N] lässt sich – wie vorn ausgeführt (siehe Abschnitt 2.3) – mit dem Ansatz von Kienzle über die spezifische Schnittkraft k_c ermitteln. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Schnittkraft an jeder im Eingriff befindlichen Schneide angreift. Überschläglich lässt sich für einen Stahl mittlerer Festigkeit annehmen:

$$F_c = 250 \times z \times U \quad (5.2)$$

Darin ist U [mm] die Länge des zu räumenden Profils, bei einem Kreisprofil also der Kreisumfang und z die maximale (ganze) Zahl der Schneiden im Eingriff:

$$z = \text{ceil}(l_w/l_s) \quad (5.3)$$

Beispiel: In Stahl mittlerer Festigkeit soll eine Bohrung von 20 mm Durchmesser und eine Länge von 25 mm geräumt werden. Es wird $f_z = 20 \mu\text{m}$ und eine Spanraumzahl von $SR = 10$ gewählt. Damit ergibt sich eine Teilung von $l_s = 7,1 \text{ mm}$. Die maximal im Eingriff befindliche Schneidenzahl ist dann $z = 4$. Daraus folgt eine Schnittkraft nach (5.2) $F_c = 63 \text{ kN}$.

Die Gesamtschnittkraft schwankt über dem Hub, da nacheinander Schneiden in den und aus dem Eingriff kommen (Bild 5.4). Diese Kraftschwankungen regen die Maschine zu Schwingungen an. Besonders steiflankig und damit besonders kritisch ist der Kraftverlauf, wenn die Schneiden über ihrer gesamten Länge plötzlich in Eingriff kommen (rechtes Teilbild, $\lambda = 0$, in der Regel beim Innenräumen). Um die Kraftschwankungen nicht zu stark werden zu lassen, sollten beim Schruppen immer mindestens drei Schneiden, besser mehr im Eingriff sein. Räummaschinen müssen für die hohe dynamische Anregung ausgelegt sein.

Die meisten Innenräumenmaschinen arbeiten mit gezogenen Werkzeugen. Dann ist gerade in der Anfangs- oder Schruppphase der unbelastete Teil des Räumwerkzeugs lang und neigt zu erheblichen Biegeschwingungen. Einige Innenräumenmaschinen arbeiten daher mit drückendem Werkzeug. Diese Anordnung hat zwar den Vorteil, dass das Werkzeug mit seiner Einspannung gut geführt ist, weist aber den Nachteil auf, dass die Werkzeuge auf Knicken beansprucht werden, was kritisch sein

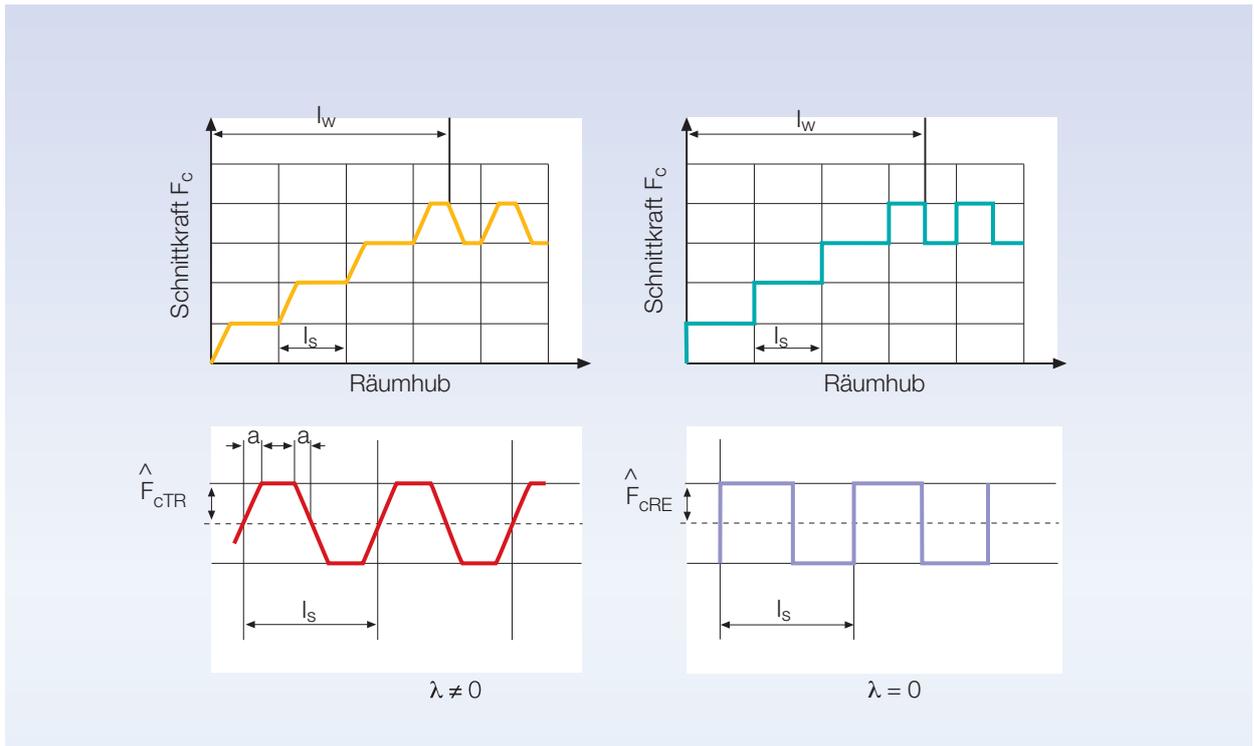


Bild 5.4: Schnittkraft-Zeitverlauf.

kann. Eine in diesem Zusammenhang interessante Anordnung bietet das Prinzip einer Zug-Druck-Räummaschine [LLR03].

Kenngrößen für Räummaschinen sind die maximale Räumkraft und die maximale Räumlänge. Angeboten werden Innen- und Außenräummaschinen mit Räumkräften bis 1200 kN und Räumhüben bis 3000 mm. Die Antrie-

be können elektromechanisch oder hydraulisch ausgeführt sein.

Die Anordnung der Schneiden wird meist so gewählt, dass eine Tiefenstaffelung entsteht. Das bedeutet, dass die Schneiden parallel zur Endkontur liegen. Bei einer Seitenstaffelung wird das Material quer zur Endkontur geräumt (Bild 5.5). Seitenstaffelung wird eingesetzt, um überhöhten Verschleiß

als Folge einer Guss- oder Schmiedehaut eines Werkstücks zu umgehen.

Das Räumen ist ein schwieriges spannendes Verfahren, das hohe technologische Anforderungen stellt. Beim Innenräumen müssen die Vorbohrungen in engen Toleranzen liegen, die geringer als die maximale Spannungsdicke sein müssen. Zu kleine Vorbohrungen machen Räumen unmöglich. Wenn die Vorbohrungen zu groß sind, ist mit Ver-

Bauteil	Werkstoff	Festigkeit [N/mm ²]	Schnittgeschwindigkeit [m/min]	Standweg [m] (Teilezahl)
Lenkzahnstange	Cf 45 V	700 bis 900	20 bis 24	180 (9000)
PKW-Pleuel	Ck 45 V	700	25	250 (10000)
Schwinghebel	16 MnCr 5	600 bis 700	6	380 – 490 (17000 – 22000)
Kurbelwellenlagerdeckel	GG 26	260	6; 10; 25;	1500 (10000)
Scheibenbremsbügel	GGG 50	500	16	900 (15000)

Tafel 5.2: Bearbeitungsbeispiele [SCHW80].

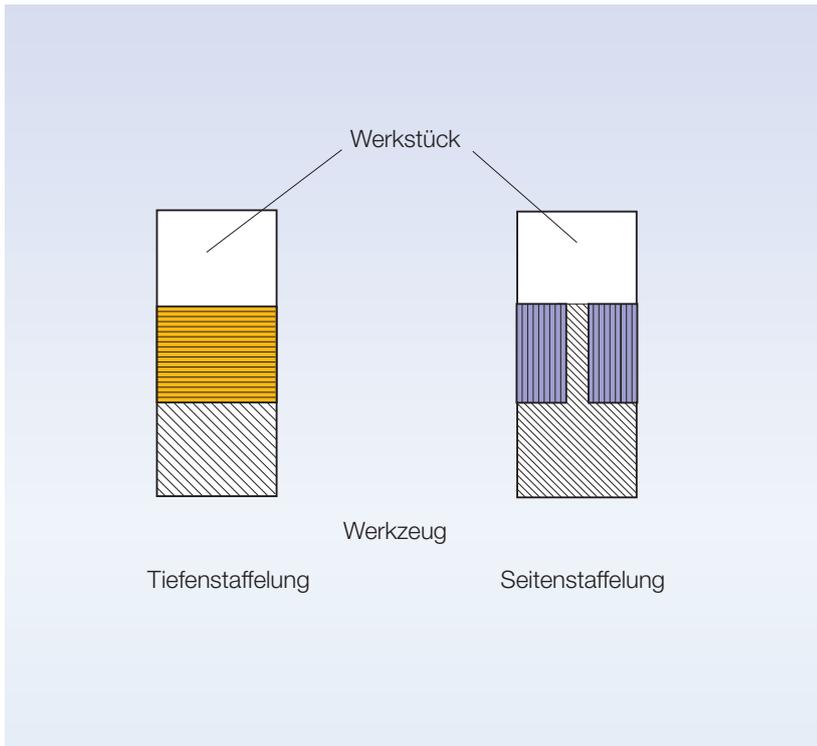


Bild 5.5: Staffelung von Räumwerkzeugen.

laufen und großen Lageabweichungen zu rechnen. Dieser Fehler kann auch zum Verhaken und zum Abreißen des Werkzeugs führen. Auch muss die Auflagefläche des Werkstücks rechtwinklig zur Vorbohrung sein. Wenn besondere Lage- oder Winkligkeitstoleranzen vorgegeben sind, sollte man wegen dieser beim Innenräumen nicht ohne wei-

teres einzuhaltenden Toleranzen zunächst die Innenräumoperation durchführen und erst danach die Außenbearbeitung vornehmen, wobei dann in den geräumten Flächen aufgenommen wird.

Auch gehärtete Werkstücke lassen sich räumen. Als Schneidstoffe werden dann in der Regel Hartmetall oder ku-

bisch kristallines Bornitrid (PCBN) verwendet. Maschinen und Werkzeuge müssen für das Harträumen ausgelegt sein.

Einige Bearbeitungsbeispiele für das Innen- und Außenräumen sind in Tafel 5.2 enthalten, die eine Vorstellung der Produktivität geben sollen. Wegen der technologischen Schwierigkeiten des Verfahrens Räumen müssen alle Vorkehrungen getroffen werden, dass es nicht zum Abreißen oder zu groben Beschädigungen der aufwendigen Werkzeuge kommt. Es empfiehlt sich, von Maschinen- oder Werkzeugherstellern Proberäumungen vornehmen zu lassen und die Maschinen oder Werkzeuge erst nach ausreichender Statistik abzunehmen.

5.2 Räumprobleme, Praxistipps

Die Empfehlungen gehen von einer Stahlzerspannung aus, wenn nicht anders angegeben. Sie sind nach dem Erscheinungsbild geordnet, mit „•“ sind die möglichen Maßnahmen genannt.

Merkmal	Maßnahmen
<p>Rattermarken Schwingungen durch Schneideneingriff</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Führung der freien Räumnadel vorsehen • Ölkühlschmierung vorsehen • Staffelung verringern • Mechanischen Antrieb wählen • Zug- Druckräumen wählen • Teilung des Werkzeugs optimieren • Schrägverzahnung beim Außenräumen
<p>Lagefehler der Bohrung radiale Querkräfte</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Führung der freien Räumnadel vorsehen • Werkzeugführung einsetzen • Ungleichmäßigen Verschleiß vermeiden • Früheres Nachschleifen • Zug-Druckräumen wählen • reibungsarme Schichten (TiN)
<p>Geringe Standmenge hoher Freiflächen- oder Eckenverschleiß</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Verschleißmindernde Schichten (TiAlN) • Hartmetallwerkzeuge einsetzen • Schnittgeschwindigkeit mindern • Schnittgeschwindigkeit erhöhen • Staffelung verringern, 2 Durchgänge
<p>Maßfehler hohe Querkräfte ungenügende Späneabfuhr</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Kalibrierteil prüfen • Früher nachschleifen • Schmierwirkung erhöhen • Für gute Spanabfuhr sorgen • Entspänvorrichtungen einsetzen

6. Fräsen

6.1 Verfahren, Fräsvorgang

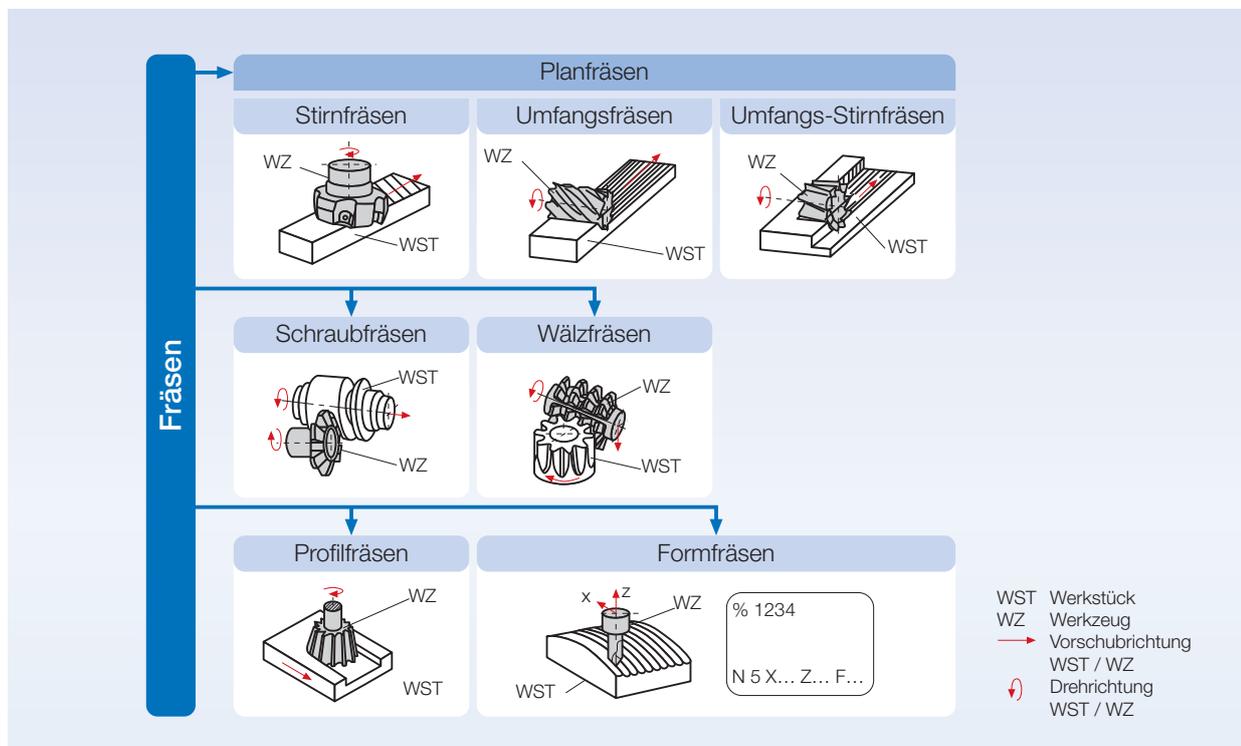


Bild 6.1: Fräsvorgänge nach DIN 8589-3.

Fräsen ist Spanen mit einem rotierenden Werkzeug, dem Fräser, wobei diese Drehung die Schnittbewegung darstellt. Quer oder schräg zur Drehachse findet eine Vorschubbewegung als Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück statt. Die Vorschubbewegung kann vom Werkzeug oder vom Werkstück oder kombiniert von beiden ausgeführt werden. Eine Fräsmaschine hat in der Regel drei geradlinige Vorschubachsen, die bei üblicher numerischer Steuerung simultan und abhängig voneinander gesteuert werden können (Bahnsteuerung, Formfräsen). Damit lassen sich also beliebige räumliche Bahnen fahren. Häufig wird das Fräsen allerdings zum Erzeugen ebener Flächen eingesetzt (Stirn-, Umfangs- und Umfangs-Stirn-Fräsen). In speziellen Maschinen können neben den drei grad-

linigen Vorschubachsen noch zwei Drehachsen zugefügt werden, womit dann in jedem Punkt der Bahn eine beliebige Fräserstellung eingestellt werden kann. Dieses Fünf-Achs-Fräsen wird im Abschnitt 6.6 im Zusammenhang mit dem Werkzeug- und Formenbau behandelt.

Bild 6.1 zeigt die wichtigsten Fräsvorgänge. Diese sind nach der Herstellung verschiedener Formen geordnet, die durch die Vorschubbewegung bestimmt sind. Eine Sonderform des Umfangs-Stirn-Fräsens ist das Drehfräsen, bei dem die Vorschubbewegung nicht geradlinig, sondern drehend ausgeführt wird und mit der infolgedessen zylindrische Flächen erzeugt werden können (z. B. Drehfräsen von Kurbelwellen).

Prinzip bedingt ist jede Schneide eines Fräasers maximal 180° oder weniger im Eingriff, d. h. der Schnitt ist unterbrochen. Es entstehen also kommaförmige Späne. Spanformprobleme auch bei zähen Werkstoffen gibt es normalerweise nicht. Nach der Anschnittart ist zwischen dem Gleichlauf- (Bergab-Fräsen, Downhill) und Gegenlaufräsen (Bergauf-Fräsen, Uphill) zu unterscheiden (Bild 6.2).

Beim Gleichlaufräsen greift die Schneide am dicken Ende des kommaförmigen Spans ein und baut die Zerspankraft stoßartig auf, die Maschine muss daher eine ausreichende dynamische Steifigkeit aufweisen (ausreichend steif gegen Schwingungen sein). Beim Gegenlaufräsen beginnt die Spanbildung am dünnen Ende, am

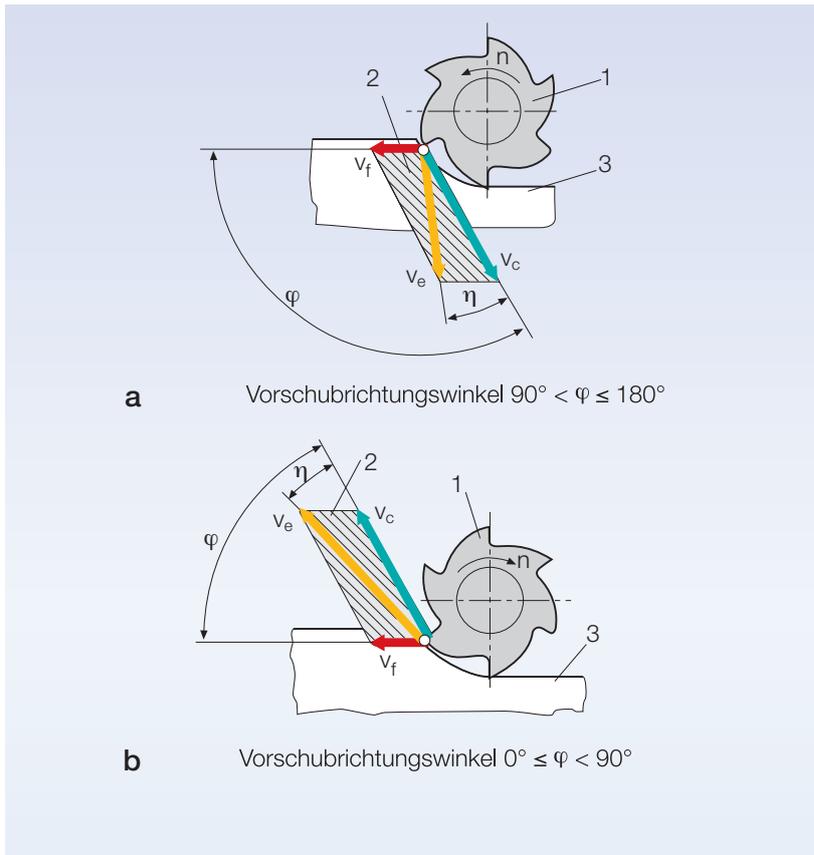


Bild 6.2: Gleichlauf- (a) und Gegenlaufräsen (b).

Anfang kommt es daher zum Drücken zwischen Fräser und Werkstück und damit zu ungünstigen Spanbildungsverhältnissen, da anfangs die Mindestspanungsdicke unterschritten wird und kein Spanen stattfindet, sondern nur hohe Normal- und Reibkräfte entstehen, die stärkeren Verschleiß als beim Gleichlaufräsen bewirken. Wenn die Maschine und das Werkstück es zulassen, sollte Gleichlaufräsen bevorzugt werden. Die Maschine darf insbesondere kein Spiel im Vorschubantrieb aufweisen, was allerdings bei

modernen NC-Maschinen ohnehin nicht der Fall ist. Das Gleichlaufräsen weist eine Kraftkomponente normal zur erzeugten Oberfläche auf, das Werkstück wird in der Regel auf seine Unterlage gedrückt. Das macht das Gleichlaufräsen auch zur Bearbeitung langer schlanker Werkstücke interessant, die beim Gegenlaufräsen eher von der Unterlage abgezogen würden. Beim Stirnfräsen kommt es je nach Lage der Drehachse zum Werkstück zum Gegen- und Gleichlaufräsen, wie Bild 6.3 zeigt.

Die Eingriffsverhältnisse beim Fräsen sind in Bild 6.3 dargestellt. Darin ist:

- | | |
|---------------------------------|---------------------------|
| f_z Vorschub je Schneide [mm] | b Spanungsbreite [mm] |
| a_e Eingriffsbreite [mm] | φ Eingriffswinkel |
| a_p Schnitttiefe [mm] | κ Einstellwinkel |
| h Spanungsdicke [mm] | z Zahl der Schneiden |

Das Zeitspanvolumen QV und die Zeitspanfläche QA sind beim Fräsen im Gegensatz zum Drehen von der Vorschubgeschwindigkeit v_f abhängig. Mit der Fräserdrehzahl n gilt:

$$v_f = z \times f_z \times n \quad (6.1)$$

$$QV = a_e \times a_p \times v_f \quad (6.2)$$

$$QA = a_e \times v_f \quad (6.3)$$

Die Vorschubgeschwindigkeit entscheidet nach (6.2), d. h. für das Schruppfräsen, und (6.3), d. h. für das Schlichtfräsen, die Produktivität. Sie ist über den technologisch bestimmenden Vorschub je Zahn f_z (f_z bestimmt die Belastung des Schneidekeils und die Qualität der erzeugten Oberfläche) mit der ebenfalls technologisch wichtigen Schnittgeschwindigkeit v_c (v_c bestimmt weitgehend den Verschleiß) verknüpft nach:

$$v_c = \pi \times d_{wz} \times n = \pi \times d_{wz} \times v_f / (z \times f_z) \quad (6.4)$$

mit dem Fräserdurchmesser d_{wz} .

Es empfiehlt sich, da f_z und v_c aus technologischen Gründen nicht beliebig groß gewählt werden können, Fräser mit hoher Schneidenzahl z zu wählen, wo möglich. So erreicht ein Fräser mit 200 mm Durchmesser bei 16 statt 8 Schneiden bereits eine Verkürzung der Hauptzeit um 50 %. Allerdings muss die Fräserteilung groß genug sein, um einen freien Spantransport zu gewährleisten. Auch ist dabei zu beachten, dass die Leistung

$$M = P_{\text{spindel}} / (2 \times \pi \times n)$$

an der Spindel der Maschine P_{spindel} bzw. das Drehmoment M an der Spindel ausreichen.

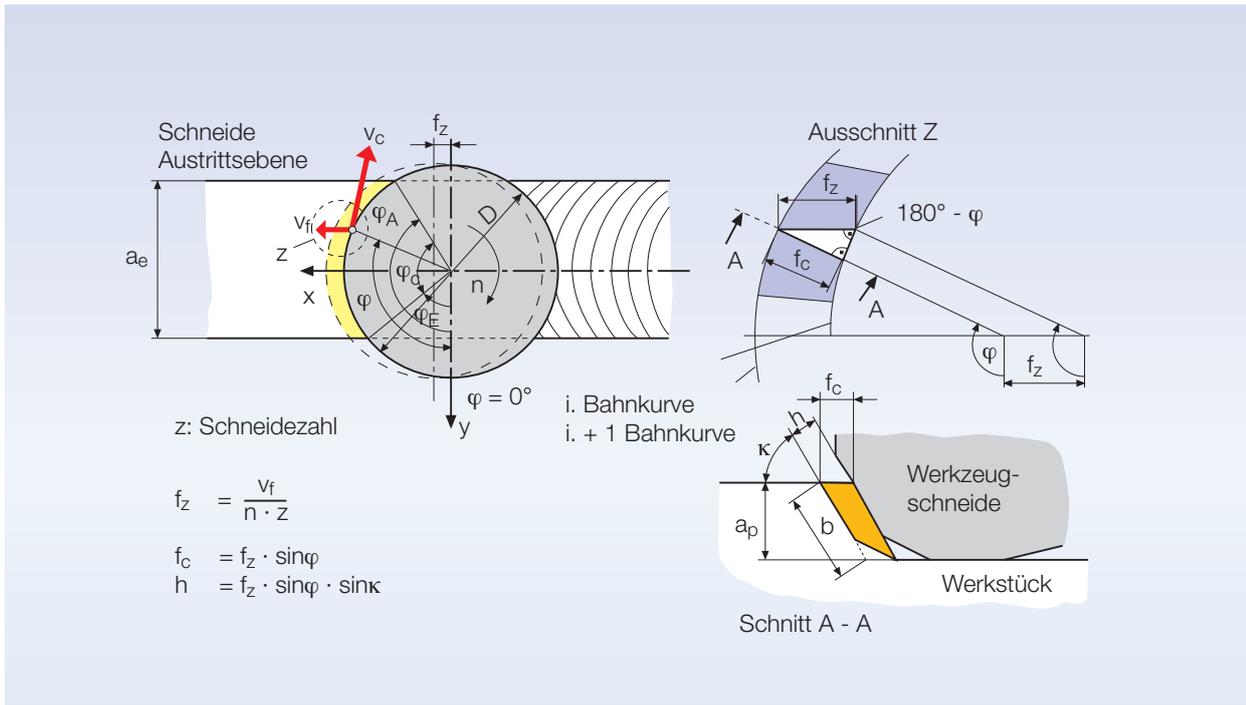


Bild 6.3: Eingriffsverhältnisse beim Stirnfräsen.

💡 Für kurze Bearbeitungszeiten möglichst große Fräser/Schneidenzahl wählen, aber auf ausreichenden Spanraum und auf ausreichende Leistung an der Spindel achten.

Für das Schruppfräsen von Stahl mittlerer Festigkeit unter normalen Bedingungen lässt sich eine Faustformel für den Leistungsbedarf der Fräsmaschine P_m (Wirkungsgrad 80 % angenommen) angeben:

$$P_m = QV \times k_c / 40 \quad (6.5)$$

mit P_m [kW], QV [cm³/min] und k_c [kN/mm²].

Beispiel: Beim Stirnfräsen eines Stahles mittlerer Festigkeit ($k_c = 1,7$ kN/mm²) wird mit einer Zustellung von $a_p = 5$ mm und einer Fräsbreite von $a_e = 150$ mm bei einer Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 1000$ mm/min ($QV = 750$ cm³/min) gearbeitet. Die notwendige Maschinenleistung ist $P_m = 32$ kW.

Der Fräserdurchmesser beim Stirnfräsen richtet sich nach den Werkstückabmessungen. Er sollte 20 % bis 50 % größer sein als das Werkstück breit ist. Wenn wegen der Größe der Werkstückfläche mehrere Durchgänge erforderlich sind, sollte die Fräsbreite 25 % geringer sein als der Fräserdurchmesser. Die Fräsermitte sollte gegen die Fräsbreite außermittig angestellt werden, um schwankende Radialkräfte gering und damit die Schwingungsanregung in Grenzen zu halten. Um ein Nachschneiden beim Schlichten zu vermeiden, muss die Maschine mit einem Spindelsturz gegen die Vorschubrichtung ausgeführt sein. Die Neigung beträgt üblicherweise 0,10 mm auf 1000 mm.

Als Kenngröße für den Verschleiß verwendet man beim Fräsen den Standweg L_f , das ist die Summe aller Vorschubwege je Werkzeug bis zur kritischen Verschleißgröße (s. Abschnitt 2.9). Der Standweg ergibt sich aus der Standzeit T , dem Vorschub je Schneide f_z , der Schneidenzahl z , der Schnittgeschwindigkeit v_c , dem Fräserdurchmesser d_{wz} und dem Eingriffsverhältnis H_E zu:

$$L_f = (T \times f_z \times z \times v_c) / (H_E \times \pi \times d_{wz}) \quad (6.6)$$

Das Eingriffsverhältnis H_E beschreibt den Weg jeder Schneide unter Span bezogen auf den Flugkreis des Fräasers mit dem Fräswinkel unter Span φ_c .

$$H_E = \varphi_c / 360^\circ \quad (6.7)$$

unlegierter Stahl (C: 0.30 – 0.55 %)	$k_c = 1.7$ kN/mm ²
vergüteter Stahl	$k_c = 2.0$ kN/mm ²
rostfreier Stahl	$k_c = 1.6$ kN/mm ²

Tafel 6.1: k_c -Werte für unterschiedliche Stähle.

Für den Fall, dass die Fräsbreite a_e 25 % geringer ist als der Fräserdurchmesser, ist $H_E = 0.33$, für $a_e = 0.5 \times d_{WZ}$ ist $H_E = 0.25$.

Der Standweg je Schneide ergibt sich durch:

$$L_{fz} = L_f / z \quad (6.8)$$

6.2 Werkzeuge

Neben den Winkeln am Werkzeug, wie sie in Abschnitt 2.1 beschrieben sind, ist beim Fräsen der Einstellwinkel κ besonders interessant.

Der Einstellwinkel κ eines Planfräasers beeinflusst die Spanungsdicke und damit die Komponenten der Zerspangkraft direkt. Durch Verringerung von κ wird die Spanungsdicke kleiner, die Schneidenbelastung verteilt sich über eine längere Schneide im Eingriff. Die Kraftkomponente in axialer Richtung nimmt zu, in radialer Richtung entsprechend ab. Gebräuchlich sind Fräser mit 45° , 90° , 10° und mit runden Platten. Beim 45° -Fräser sind die axialen und radialen Komponenten der Zerspangkraft etwa gleich, was einen ruhigeren Lauf bewirkt. Die Schneide tritt allmählicher ins Werkstück ein. Allerdings ist die mögliche Schnitttiefe geringer als bei größerem Einstellwinkel. Die Schnitttiefe a_p beim Fräsen sollte maximal $2/3$ der Schneidkantenlänge betragen. Der Einstellwinkel κ begrenzt also die Schnitttiefe.

Für Schruppoperationen wird der Punkt des ersten Kontaktes der Schneidplatte mit dem Werkstück, d. h. der Punkt, an dem sich beim ersten Kontakt eine Kraft stoßartig aufbaut, als bedeutsam angesehen. Ein S-Kontakt bedeutet nach Bild 6.5, dass der erste Berührungspunkt der Wendeschneidplatte mit dem Werkstoff bei S, also an der äußersten Ecke der Platte liegt. Ein S-Kontakt ist daher un-



Bild 6.4: Planfräser (nach Sandvik/Coromant).

günstig, weil die Ecke der Platte, die die geringste Unterstützung hat, mit dem maximalen Biegemoment stoßartig belastet wird.

nicht die gesamte Kontaktfläche im Moment des Schneideneintritts in Kontakt kommen, um nicht die maximale Last stoßartig aufzubauen. Auch beim Schneidenaustritt sollte dieser Fall vermieden

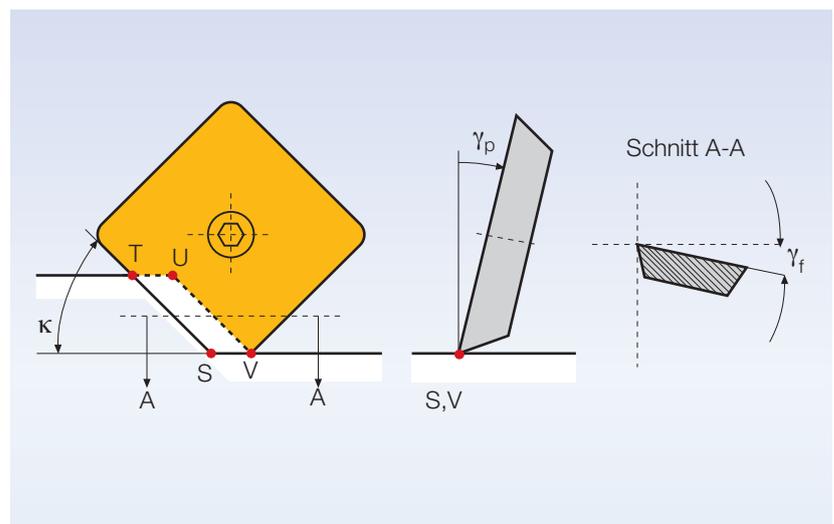


Bild 6.5: Kontaktpunkte beim Fräsen.

Günstig ist dagegen der U-Kontakt, also der Erstkontakt zwischen Werkstoff und Wendeschneidplatte an der Stelle U (Bild 6.5), bei dem die Platte optimal unterstützt ist. Ein U-Kontakt wird erreicht, wenn die Spanwinkel γ_f (Spanwinkel gemessen in Richtung der Vorschubbewegung) und γ_p negativ sind, d. h., die Schneide bleibt in Bewegungsrichtung gegen die Mitte der Platte zurück (in Bild 6.5 ist γ_f positiv eingezeichnet). V- und T-Kontakt werden noch als günstig angesehen. Es sollte jedenfalls möglichst

werden; denn ein steiler Kraftabfall ist ebenfalls aus dynamischen Gründen und Gründen der Schneidkantengefährdung zu vermeiden. Auch dabei sind die Spanwinkel von Bedeutung. Allerdings können negative Spanwinkel und kleine Einstellwinkel im Falle der Stahlzerspannung beim Schneidenaustritt zur Gratbildung führen, bei der Gußbearbeitung häufig zu Kantenausbrüchen.

Beim Fräsen von Stahl mittlerer Festigkeit wird mit positivem axialem Spanwinkel γ_p gearbeitet, um die Zersp-

kräfte gering zu halten. Das ist vorteilhaft für eine geringe Gratbildung und ist besonders dann angezeigt, wenn dünnwandige labile Werkstücke bearbeitet werden müssen. Fräser mit 45° Einstellwinkel werden für die Stahlzerspannung mit Plattensitzen bei einem axialen Spanwinkel γ_p von 20° und einem radialen Spanwinkel γ_f von -3° ausgeführt. Mit einer negativen Platte (Platte mit Keilwinkel $\beta = 90^\circ$, siehe Abschnitt 2.1) ergibt das einen wirksamen axialen Spanwinkel γ_p von 12°. Dadurch werden ein guter Spantransport, optimale Laufruhe und ein ausreichendes Verschleißverhalten erreicht. Der 90°-Fräser wird hauptsächlich zum Eckfräsen (90°-Kante am Werkstück) eingesetzt. Wegen der überwiegend radialen Kraftwirkung lassen sich auch dünne, labile Werkstücke damit bearbeiten. Der 10°-Fräser wird bei hohen Vorschüben und damit großen Zeitspanflächen QA oder zum Tauchfräsen (überwiegend axialer Vorschub des Fräasers) verwendet. Fräser mit runden Platten haben entlang der Schneide unterschiedliche radiale Einstellwinkel von 0° bis maximal 90° abhängig von der Schnittiefe. Wegen der langen Schneide ist der Schneidkeil stabil und die Belastung gut verteilt. Solche Fräser werden für ein breites Spektrum von Schruppoperationen eingesetzt.

Durch Schlichtfräsen lassen sich bei sorgfältiger Einstellung des Werkzeugs Oberflächengüten von $R_z < 5 \mu\text{m}$ erreichen. Beim Planfräsen wird die zu bearbeitende Fläche durch die Nebenschneide erzeugt. Eine Schneide, die – wenn auch nur geringfügig – vorsteht, verschleißt schneller und beeinträchtigt die Oberflächengüte des Werkstücks. Es ist daher geboten, die Lage der Schneiden sorgfältig zu prüfen.

Bei einstellbaren Fräsköpfen ist eine Justierung auf Abweichungen kleiner 2 μm notwendig. Bei nicht nachstellbaren Haltern muss eine hohe Genauigkeit

des Grundkörpers gewährleistet sein. Zur Prüfung können moderne Voreinstellgeräte dienen, wenn sie eine ausreichende Messgenauigkeit aufweisen. Andernfalls können dazu nach der Aufnahme exakt parallel geschliffene, axiale (Ringfläche) und radiale (Zylinderfläche) Prüfflächen dienen, von denen aus die Schneiden hinsichtlich ihrer axialen und radialen Lage vermessen werden. Ein Taumeln des Fräasers auf der Spindel muss vermieden werden. Diese Forderung ist bei großen Fräsdurchmessern besonders kritisch.

Aufnahmemittel von Stirnfräsern sind in ISO 6462 genormt. Fräser können auf unterschiedliche Art an der Maschinenspindel direkt oder indirekt über Spannmittel befestigt werden:

- mit ihrem Zylinderschaft über Spannzangen oder Dehnfutter für begrenzte Drehmomente,
- auf Fräsdornen (Durchmesser 22 mm, 27 mm, 32 mm, 40 mm und 60 mm) mit Spindelaufnahmekegeln (für kleine Stirnfräser),
- auf Dornen, über zentrische Spannschrauben und Stirnmitnehmer,
- an der Spindel zentriert und angeschraubt (mit ein oder zwei Lochkrei-

sen, größere Fräser) bei Momentübertragung über Frässteine und Nuten am Fräser und in der Spindel.

Die optimale Hartmetallsorte zum Fräsen anzugeben, ist problematisch, weil – wie in Abschnitt 2.6 beschrieben – die Hersteller von Hartmetallen ihre eigene Zuordnung zu Anwendungsfällen festlegen, ohne dass ein allgemein verbindlicher Standard existiert. Für die folgenden Angaben wurden die Empfehlungen von Sortimenten eines Herstellers mit großem Marktanteil ausgewertet.

6.3 Werkzeugführung, Fräsbahnen

Die Werkzeugführung sollte so geplant/programmiert werden, dass hohe Produktivität und ausreichende Zuverlässigkeit erreicht werden. Das bedeutet, dass ein hohes Zeitspanvolumen beim Schruppen und eine große Zeitspanfläche beim Schlichten derart gefahren werden, dass die Schneiden möglichst geringen Stoßbelastungen ausgesetzt werden und dass das Werkzeug nach Möglichkeit ununterbrochen im Eingriff gehalten wird. So wird eine rechteckige Fläche, die wegen ihrer Breite mehrere Fräserüberläufe erfordert, nicht zeilenförmig, sondern mä-

Stahl, weich	
allgemeine Fräsorte, leichte bis schwere Schnitte	P 25, beschichtet
Fräsen unter instabilen Bedingungen, Zähigkeit erforderlich	P 25, beschichtet
Schlichten, leichte bis mittlere Schnitte	P 10, beschichtet
Stahl, gehärtet	
allgemeine Anwendungen für gehärtete Stähle	H 05 ¹⁾ , CBN
leichtes Schruppen, Schlichten	H 25 ¹⁾ , beschichtet
Stahl, rostfrei	
allgemeine Anwendungen	M 25, beschichtet
leichte bis mittlere Schnitte	M 25, beschichtet
mittlere bis schwere Schnitte	M 40, beschichtet
Warmfeste Legierung	
allgemeine Anwendungen	S 15 ²⁾ , beschichtet

¹⁾ entspricht K-Sorten

²⁾ entspricht P-Sorte

Tafel 6.2: Sortenwahl für das Fräsen.

anderförmig bearbeitet. Die Fräsbahn ist dabei so einzurichten, dass beim Schneideneintritt und -austritt möglichst geringe Kraftsprünge auftreten (Bild 6.6) und möglichst die günstigen Kontaktpunkte erreicht werden (s. Abschnitt 6.2). Nach Möglichkeit ist im Gleichlauf zu fräsen.

Das **Ausfräsen von Taschen** wird möglichst so programmiert, dass der Umfangs-Stirnfräser schräg eintaucht (dreiaxsig fräsen) und dann parallel zur Außenkontur spiralförmig Material austräumt. Die maximale Schnitttiefe sollte 2/3 der Schneidenlänge nicht überschreiten. Der Fahrsinn ist nach Gleichlauf und nach günstigem Spantransport auszurichten. Der Böschungswinkel beim Eintauchen wird durch den Fräserdurchmesser, den Freiwinkel der Platten im Halter und die Schnitttiefe bestimmt. Je nach Kantenrundung der Taschen am Grund lassen sich runde Platten oder 90° Platten und Halter verwenden. Werden Taschen mit Walzenstirnfräsern bearbeitet, muss meist vorgebohrt werden. Der Bohrerdurchmesser soll 5 mm bis 10 mm größer sein als der Walzenfräser. Die maximale Schnitttiefe beträgt 2 x Fräserdurchmesser. Die Schnittbreite sollte 25 % geringer sein als der Frä-

serdurchmesser. Fräser mit großem Durchmesser erreichen zwar ein hohes Zeitspanvolumen, lassen in den Ecken jedoch je nach dort geforderten Radien mehr Material stehen, das nachfolgend mit kleineren Fräsern ausgeräumt werden muss. Dabei sollte der Fräserradius 15 % kleiner sein als der Eckenradius. Ist viel Material abzuspannen, lässt sich Material durch Bohren austräumen. Es können mehrere Bohrvorgänge mit einem kräftigen Wendeschneidplattenbohrer mit 90° Einstellwinkel (180° Spitzenwinkel) vorgesehen werden.

 **Taschenfräsen mit großem Walzenstirnfräser und Ausräumen der Ecken mit kleinerem Fräser.**

Das Überfräsen von Bohrungen und Nuten sollte nach Möglichkeit vermieden werden; denn diese Schnittunterbrechungen stellen zusätzliche Stoßbelastungen der Schneiden dar. Bohrungen und Nuten sollten daher – sofern möglich – nach dem Überfräsen eingebracht werden.

Die **Maschineneinstellungen** beim Fräsen sind wegen der prinzipiellen Unabhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit von der Schnittgeschwindigkeit komplizierter als beim Drehen und Bohren, wo meist ein Vorschub je Umdrehung angegeben wird und damit prinzipiell eine Verknüpfung des Vorschubs zur Drehgeschwindigkeit gegeben ist. Aus Gründen der mechanischen und thermischen Schneidenbelastung sind die Schnittgeschwindigkeit v_c und der Vorschub je Schneide f_z bzw. die maximale Spannungsdicke h_{max} vorgegeben und meist von der Werkstoff/Schneidstoffkombination abhängig. Es gilt entsprechend Bild 6.3: für das Stirnfräsen $\varphi = 90^\circ$, $\kappa < 90^\circ$) bzw. das Walzenfräsen ($\varphi < 90^\circ$, $\kappa = 90^\circ$):

$f_z = h_{max} / \sin \kappa$ bzw. $f_z = h_{max} / \sin \varphi$	(6.9)
$n = v_c / (\pi d_{wz})$	(6.10)
$v_f = z n f_z$	(6.11)

Zum Schruppen mit Planfräsern bei Plattengrößen von 12 mm (oder 18 mm) sollten Vorschübe je Schneide von 0,20 mm (oder 0,32 mm) als Startwerte verwendet werden, die sich dann nach unten oder oben verändern lassen. Die Schnitttiefe beim Schruppen soll 2/3 der Schneidkantenlänge der Platte nicht überschreiten. Beim Schlichten wird eine Schnitttiefe von $a_p = 0.5$ mm empfohlen. Der Vorschub je Schneide beim Schlichten richtet sich nach der geforderten Oberflächengüte, Ausgangswerte sind $f_z = 0.10$ mm bis 0.18 mm.

Schnittgeschwindigkeiten bestimmen wesentlich den Standweg. Sie werden je nach Festigkeit des Stahls in den in Tafel 6.3 angegebenen Grenzen (als Ausgangswerte für das Schruppen) gewählt. Zum Schlichten lassen sich Schnittgeschwindigkeiten um 25 % bis 50 % erhöhen gegenüber den oben angegebenen Werten.

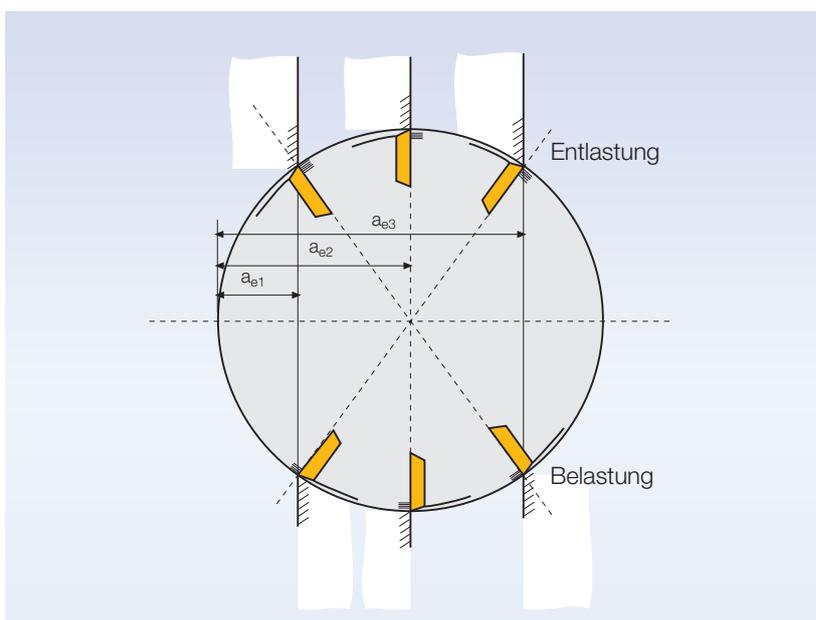


Bild 6.6: Ein- und Austritt bei verschiedenen Fräserpositionen.

Bearbeitungsbeispiel:

Ein Fräser mit 8 Schneiden ($z = 8$) und einem Radius $r_{WZ} = 100 \text{ mm}$ kann demnach bei unlegiertem Stahl mittlerer Festigkeit mit einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 200 \text{ m/min}$ und einem Vorschub je Schneide von $f_z = 0,18 \text{ mm}$ betrieben werden. Die Vorschubgeschwindigkeit beträgt dann $v_f = 458 \text{ mm/min}$. Eine Schneidenlänge von 12 mm , die zu $2/3$ genutzt werden soll, und ein Einstellwinkel von $\kappa = 45^\circ$ erlauben eine Schnitttiefe von $5,6 \text{ mm}$. Bei einer Werkstückbreite von $a_e = 150 \text{ mm}$ folgt ein Zeitspanvolumen von $QV = 385 \text{ cm}^3/\text{min}$.

Die vorstehenden Einstellgrößen sind nur als Anhalt für einen Startpunkt für weitergehende Versuche mit optimalen Schneidstoffen zu verstehen. In der Literatur wird über eingehendere Untersuchungen zum Einfluss verschiedener Werkstoffe und ihrer Behandlung berichtet [SCHN92]. Die daraus entnommenen Bilder 6.7 bis 6.8 zeigen den Zusammenhang von Vorschub je Schneide, Schnittgeschwindigkeit und Standweg je Schneide für einen Einsatzstahl 16 MnCr 5 BG mit HB 148 und einen Vergütungsstahl 42 CrMoS 4 V mit HB 232. Bei Letzterem tritt mit höheren Geschwindigkeiten kritischer Kolkverschleiß auf. Als Schneidstoff wurde hier ein unbe-

schichtetes Hartmetall P 25 eingesetzt. Eine Beschichtung kann Abhilfe schaffen.

Mit bahngesteuerten Maschinen lassen sich größere Bohrungen wirtschaftlich und mit guter Maß- und Formgenauigkeit sowie hoher Oberflächengüte durch Fräsen erzeugen. Beim **Zirkularfräsen** von Bohrungen ist von Vorteil, dass dort maßunabhängige Werkzeuge eingesetzt werden können. Wenn dagegen eine Bohrung durch konventionelle Bohrtechnik erzeugt werden soll, muss ein maßgebundenes Werkzeug eingesetzt werden. Beim Zirkularfräsen kann man dagegen einen größeren Durchmesserbereich mit gleichem Werkzeug überstreichen. Damit entfallen Werkzeugaufwendungen und Nebenzeiten für das Umspannen der Werkzeuge. Es lassen sich so abhängig von der Bahngenaugigkeit der Maschine Bohrungen im Qualitätsbereich von IT 7 und IT 6 herstellen.

unlegierte und niedriglegierte Stähle (HB = 125 – 300):	350 m/min – 125 m/min
hochlegierte Stähle, gegläht/gehärtet (HB = 200 – 380):	180 m/min – 80 m/min
rostfreier Stahl (HB = 200 – 330):	180 m/min – 80 m/min

Tafel 6.3: Ausgangswerte für Schnittgeschwindigkeiten mit Hartmetall.

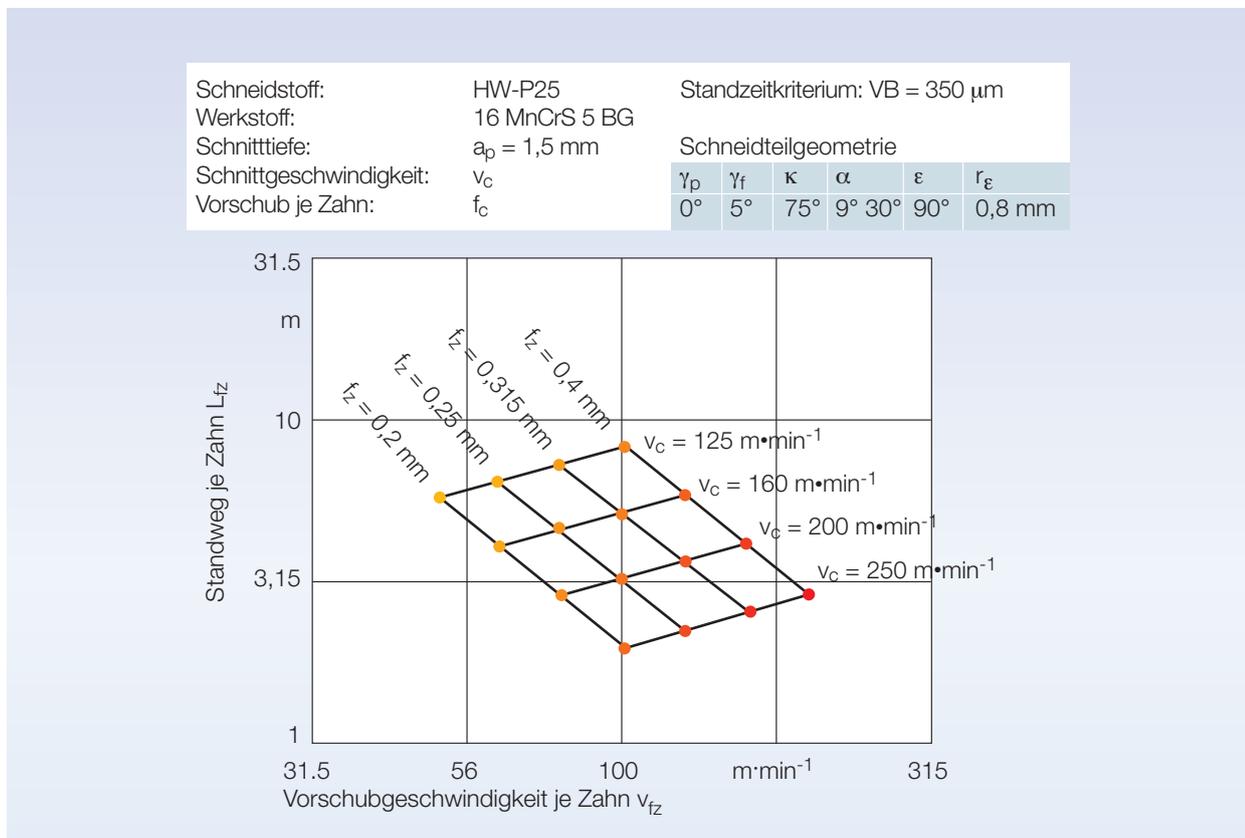


Bild 6.7: Schnittwertwahl für einen Einsatzstahl.

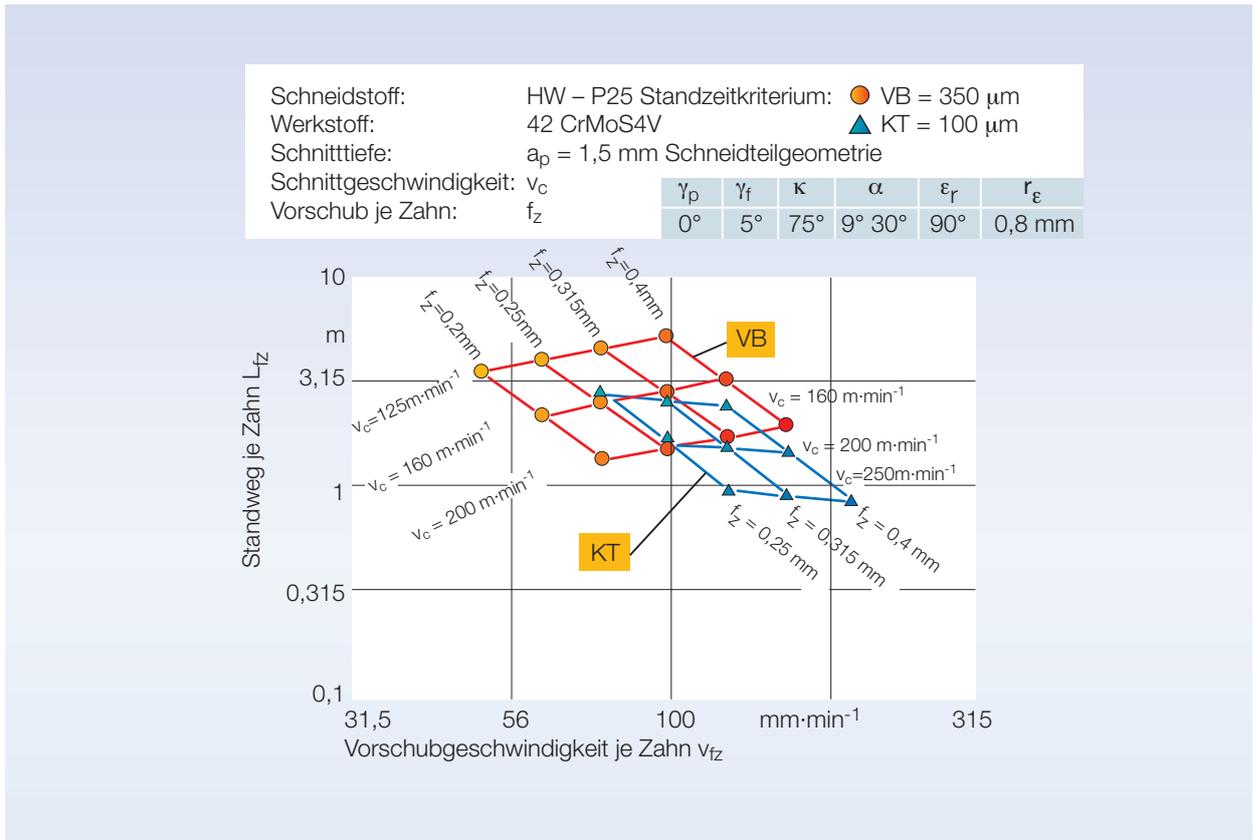


Bild 6.8: Schnittwahl für einen Vergütungsstahl.

Kühlschmierstoffe sind beim Fräsen von Kohlenstoffstählen oder legierten Stählen meist nicht notwendig, da die Schneiden nur über einen Winkelweg von maximal 180° im Eingriff sind und zwischendurch an Luft mäßig abkühlen. Ein flüssiger Kühlschmierstoff würde

den Thermoschock ungünstig verstärken. Die Gefahr von Kammrissen und das Risiko von Schneidenausbrüchen wachsen. Schneidstoffhersteller empfehlen daher Trockenbearbeitung.

6.4 Gratbildung

Beim Fräsen lassen sich verschieden Arten von Grat unterscheiden [GILL99]. Diese sind:

- Eintrittsgrat
- Seitengrat
- Austrittsgrat
- Ziehgrat

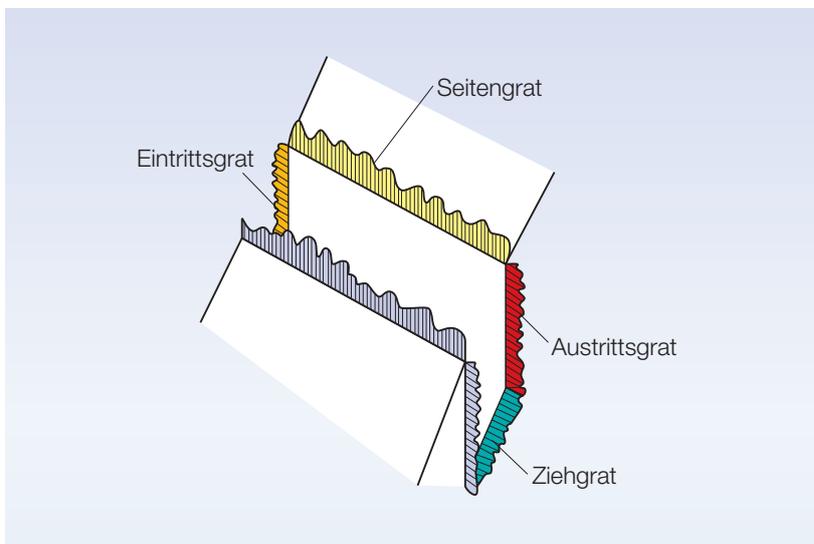


Bild 6.9: Gratbildung beim Fräsen.

Bild 6.9 zeigt schematisch verschiedene Formen von Grat, die beim Umfangs-Stirn-Fräsen entstehen. Das Ausmaß der Gratbildung hängt von den Materialeigenschaften, der Mikrogeometrie des Fräasers und der Fräserführung (Fräsbahn) ab. Je verformungsfähiger ein Werkstoff ist, desto eher kommt es zu starkem Grat, insbesondere bei großem Verhältnis von Dehnung zu Fließgrenze.

Beim Fräsen ist der Schneidenausritt aus dem Material von entscheidender Bedeutung für die Bildung von

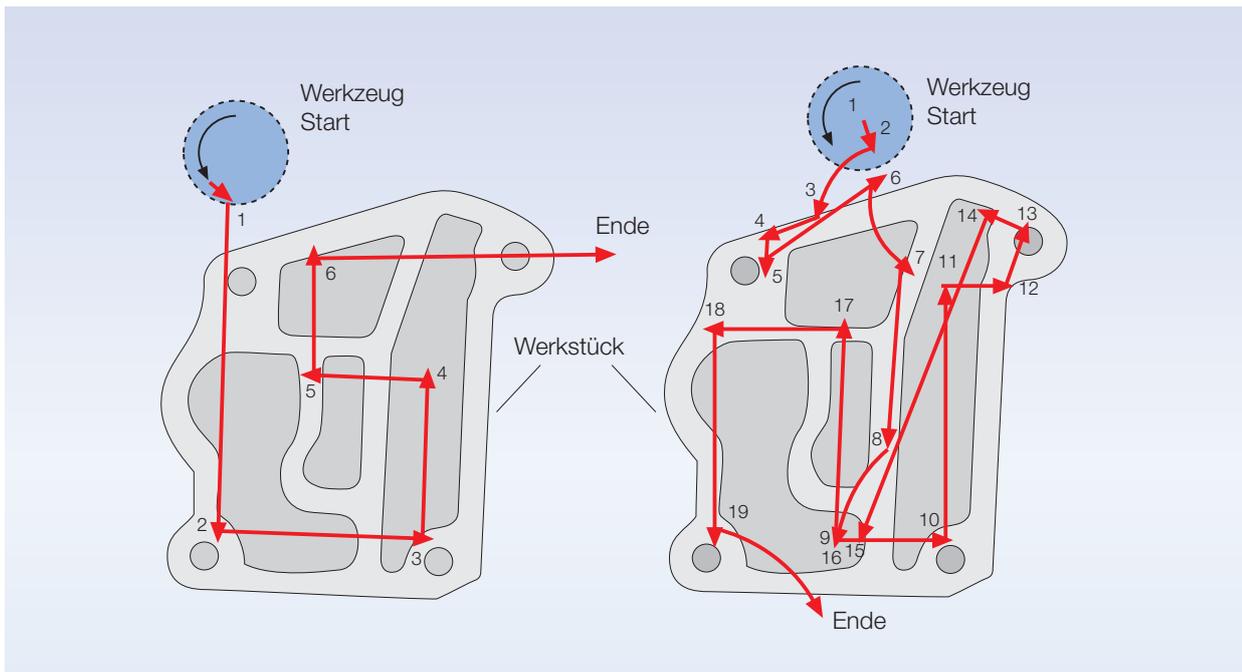


Bild 6.10: Optimierung des Verfahrenswegs (nach Dornfeld).

Grat. Daher seien einige Empfehlungen für die Programmierung gegeben:

- Möglichst auf eine Ecke oder Kante des Werkstücks hin schneiden, nicht an der Ecke oder Kante heraustretend fräsen,
- Operationsfolge so einrichten, dass unvermeidbare Gratbildung an unkritischen Stellen entsteht,
- mit scharfen Schneiden arbeiten (geringer Freiflächenverschleiß),
- Vorschubgeschwindigkeit an gratempfindlichen Stellen reduzieren,
- alle Maßnahmen, die die Vorschubkraft mindern, mindern den Grat,
- schräge Austritte bevorzugen.

Bild 6.10 zeigt eine konventionelle Fräserbahn für das Stirnfräsen mit erheblicher Gratbildung (linkes Teilbild) [DORN02]. Bei Beachtung der oben angeschriebenen Regeln ergibt sich eine im rechten Teilbild eingezeichnete Bahn und ein Minimum an Gratbildung. Der längere Verfahrensweg konnte in diesem Fall durch Erhöhung des Vorschubs fast gänzlich kompensiert werden.

Das Ein- und Austreten an schrägen Flächen, die gegen die erzeugte Fläche

um höchstens 45° geneigt sind, lässt meist Entgratoperationen hinfällig werden. Ein Beispiel für eine Bearbeitung – hier allerdings fürs Drehen – zeigt Bild 6.11. Die dort gezeigten Zapfen wurden in der optimierten Schmiedeteilversion mit kegeligem Ein- und Auslauf geschmiedet. Beim Überdrehen der Zapfen bilden sich dadurch keine Grate, das Entgraten kann entfallen.

6.5 Hochleistungsfräsen, Hochgeschwindigkeitsfräsen

Das Fräsen mit hohen Leistungen und Geschwindigkeiten hat in den letzten Jahren starke Beachtung gefunden. Generell ist damit – richtig genutzt – eine erhebliche Rationalisierung verbunden. Bild 6.12 zeigt Einflüsse der Geschwindigkeit auf die Wirkgrößen des Spanens wie das Zeitspanvolumen, die Zeitspan-

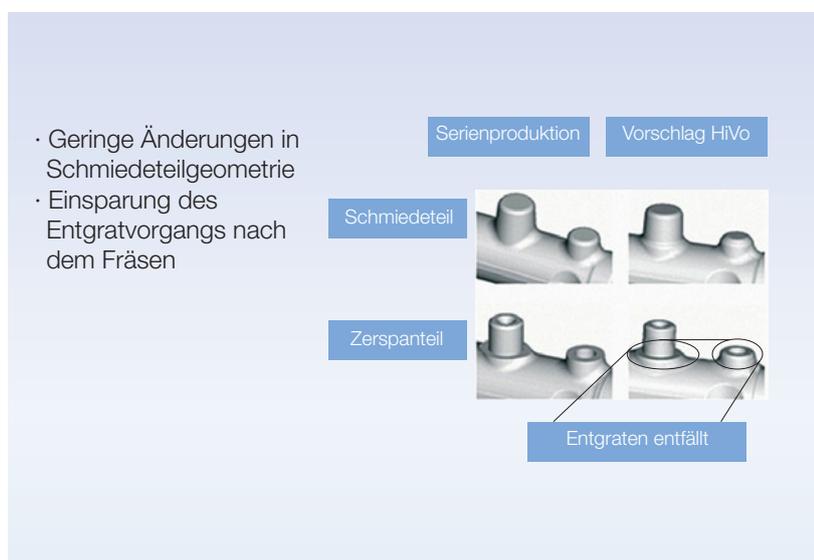


Bild 6.11: Wegfall des Entgratens (nach Hirschvogel Komponenten, Schongau).

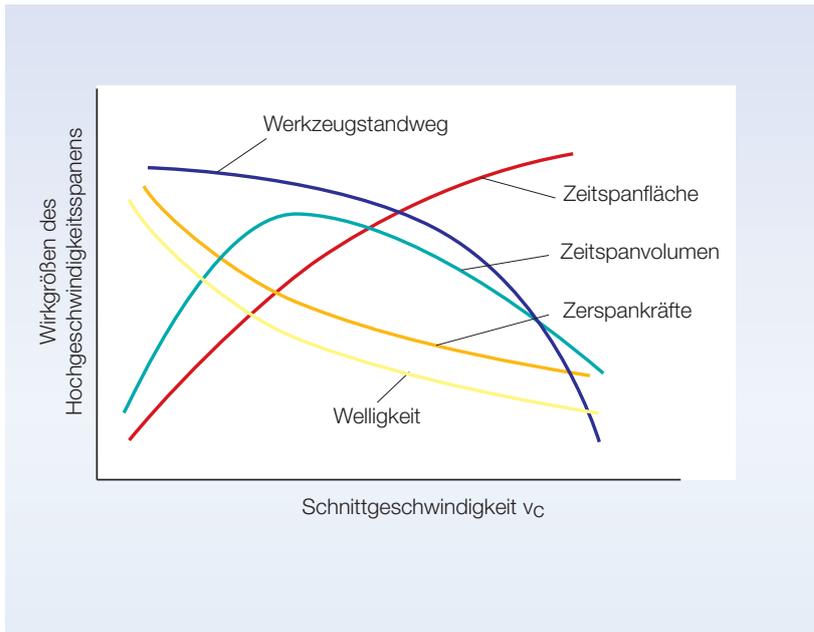


Bild 6.12: Wirkgrößen des Hochgeschwindigkeitsspanens.

fläche, die Zerspankräfte, die Oberflächengüte am Werkstück und den Werkzeugstandweg. Aus Grundlagenuntersuchungen weiß man, dass es zu deutlicher Veränderung der Spanbildung kommt (siehe auch Abschnitt 3.6). Sichtbare oder messbare Phänomene sind:

- Der Abfall der Schnittkraft und der übrigen Zerspankraftkomponenten bei allen duktilen metallischen Werk-

stoffen, was interessant ist bei nachgiebigen Werkstücken oder Werkzeugen (schlanke Fräser),

- Ein starker Wärmetransport mit den Spänen aus der Spanbildungszone,
- Eine Vergrößerung des Scherwinkels und damit eine Minderung der Spanstauchung,
- Eine deutliche Segmentierung des Spanes und eine Konzentration von

plastischen Formänderungen in Scherlokalisierungen, womit eine Minderung des zum Spanen notwendigen Energieaufwands verbunden ist.

Das Hochgeschwindigkeitsfräsen ist anders als das Hochgeschwindigkeitsdrehen besonders interessant, weil hier nicht das Werkstück und eine möglicherweise schwere Spaneinrichtung rotiert, sondern das Werkzeug und die Frässpindel. Nachteile des Drehens, die sich durch ein hohes Massenträgheitsmoment beim Hochfahren und Abbremsen oder durch Unwuchten der rotierenden Teile ergeben, bestehen beim Fräsen nicht. Allerdings sollte nicht übersehen werden, dass das Hochgeschwindigkeitsfräsen keine uneingeschränkte Rationalisierung bietet. Es muss insbesondere zwischen dem Schruppen und dem Schlichten unterschieden werden. Nach Gleichungen (6.2), (6.4) und (6.5) ist das Zeitspanvolumen, auf das es beim Schruppen ankommt, der Maschinenleistung in erster Näherung proportional. (Da mit höherer Geschwindigkeit die Schnittkraft sinkt, ist das nicht ganz exakt, sondern der Leistungsbedarf steigt leicht unterproportional mit der Geschwindigkeit.) Daraus folgt, dass beim Schruppen durch eine Steigerung der Schnittgeschwindigkeit nur dann eine höhere Produktivität erreichbar ist, wenn gleichzeitig die an der Spindelnase verfügbare Leistung entsprechend steigt. Tatsächlich nimmt je nach Art der Spindellagerung mit höherer Spindeldrehzahl auch die Verlustleistung in der Spindel zu, sodass die für das Spanen zur Verfügung stehende Leistung mit höherer Geschwindigkeit gemindert wird (Bild 6.13).

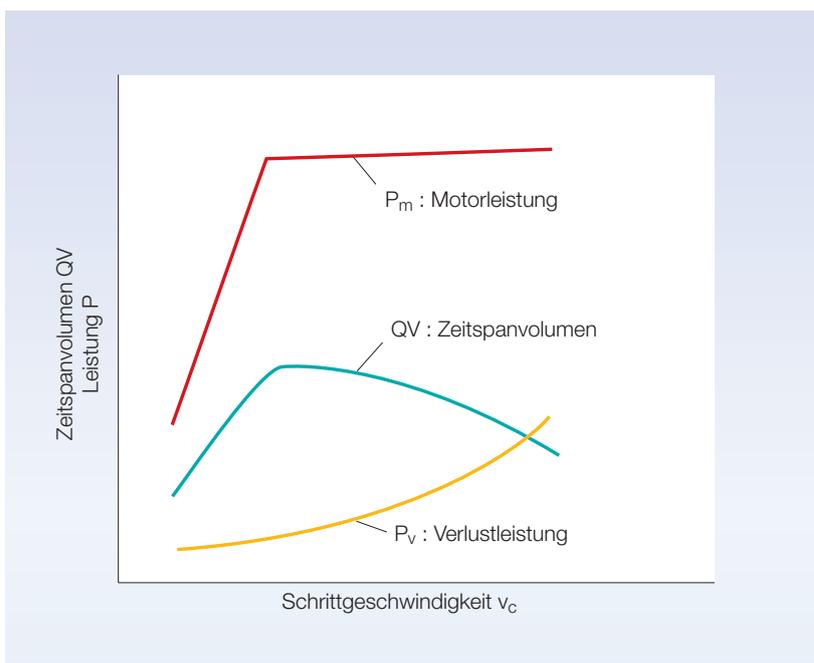


Bild 6.13: Leistungsabhängiges Zeitspanvolumen.

Beim Schruppen wird das Zeitspanvolumen durch die zum Fräsen im Arbeitsraum verfügbare Leistung begrenzt. Das Leistungsmaximum liegt meist nicht beim Geschwindigkeitsmaximum.

Es ist im Zusammenhang mit der Hochgeschwindigkeitsbearbeitung zu beachten, dass Grenzen für einen Zerspanprozess neben der Schnittgeschwindigkeit auch das Drehmoment und die Leistung sein können. Dem folgend wurde in neuerer Zeit die Hochleistungszerspannung entwickelt [ANDR02]. Sie berücksichtigt vier Verfahrensgrenzen,

- die maximale Maschinenleistung,
- das maximale Drehmoment und die maximale Vorschubkraft,
- die maximal zulässige Werkzeugbelastung und
- die maximale Vorschubgeschwindigkeit, die aufgrund der Antriebe und Steuerung erreicht werden kann.

Am Beispiel der Leistungsgrenzen und der Zerspanung einer Aluminiumlegierung im Walzzustand, wie sie im Flugzeugbau verwendet wird, sind die Abhängigkeiten in Bild 6.14 dargestellt. Mit steigender Schnittgeschwindigkeit und damit steigender Drehzahl der Spindel nehmen die Leistungsverluste im Leerlauf zu. Es steht also bei hohen Geschwindigkeiten weniger Leistung an der Arbeitsspindel zur Verfügung. Dem wirkt entgegen, dass die spezifische Energie, die zum Spanen aufgebracht werden muss, mit der Geschwindigkeit abfällt, allerdings in einem nicht starken asymptotischen Verlauf (siehe Abschnitt 3.6). Schließlich ist zu beachten, dass bei gegebener Leistungsgrenze durch Verringerung der Spanungsdicke, die spezifische Energie zunimmt. Diese Einflüsse führen dazu, dass es ein Optimum in dem je kW erreichbaren Zeitspanvolumen gibt, wie theoretisch und experimentell nachgewiesen wurde [ANDR02]. Dieses Optimum ist allerdings von den Randbedingungen der Maschine, des Werkzeugs und des Werkstoffs abhängig.

Beim Schlichten hat das Hochgeschwindigkeitsfräsen eine Reihe von Vorteilen; denn hier ist nicht das Zeitspanvolumen für die Produktivität bestimmend, sondern die Zeitspanfläche (siehe Abschnitt 1.2). Da beim Schlichten in aller Regel die erzeugte Mikrogeometrie der Oberfläche, also die Rauigkeit und Welligkeit eine bestimmende Grenze des Fräsens ist, kommt es auf drei Parameter an (siehe auch Abschnitt 6.7 Werkzeug- und Formenbau):

- die Form des Fräasers,
- den Vorschub und
- die wirksame Schnittbreite.

Beim Schlichtfräsen geht die Schnittgeschwindigkeit voll in die Zeitspanfläche ein und damit in die Produktivität.

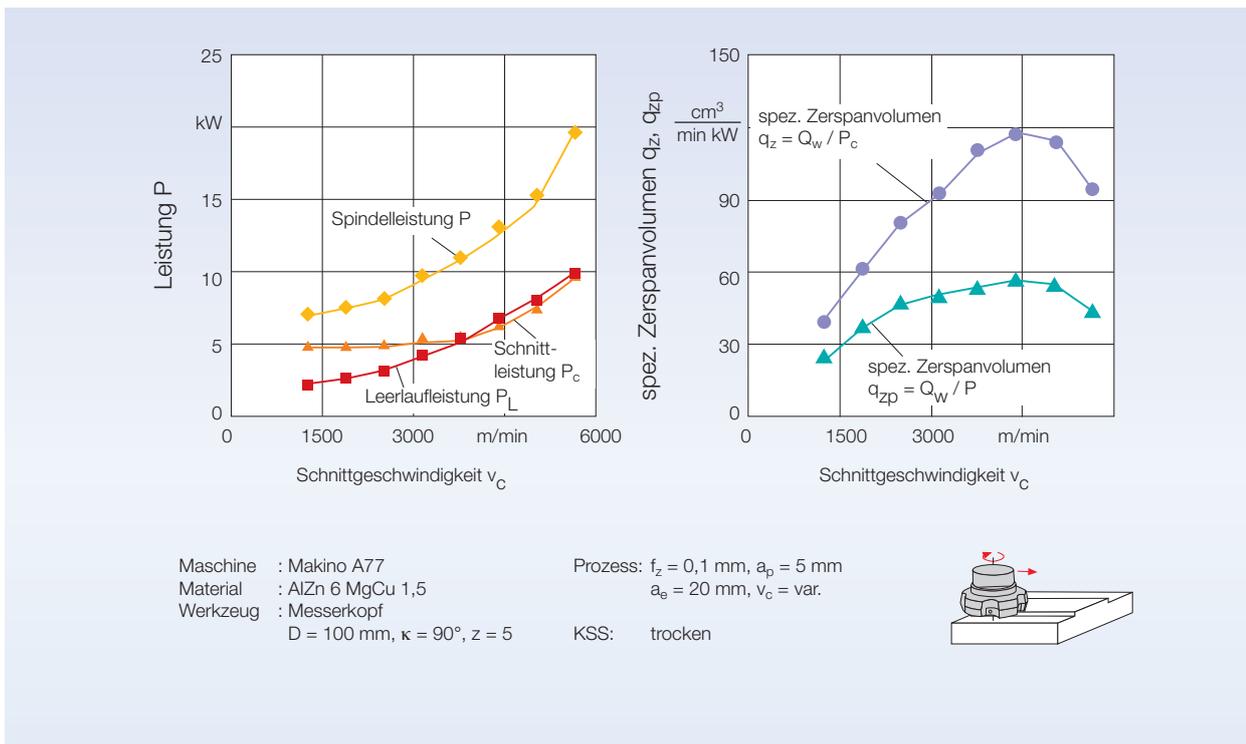


Bild 6.14: Leistungsbedarf in Abhängigkeit von der Schnittgeschwindigkeit (nach Andrae).

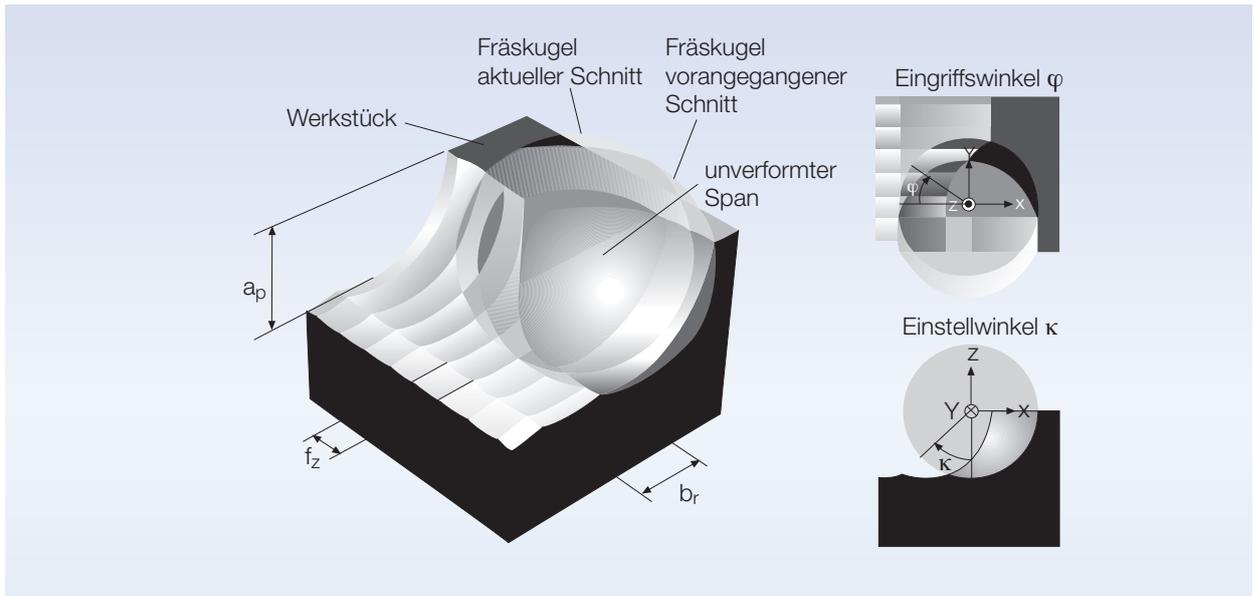


Bild 6.15: Schneidenengriff beim Kugelkopffräsen (URBA09).

6.6 Werkzeug- und Formenbau

Werkzeuge für das Urformen und das Umformen haben Hohlformen. Sie mit ausreichender Produktivität und notwendiger Genauigkeit herzustellen, ist Aufgabe des Werkzeug- und Formenbaus. Diese Hohlformen werden zum Tiefziehen, zum Spritzgießen, zum Kokillen- und Druckgießen sowie zum Schmieden und Schneiden eingesetzt. Je nach Einsatzbereich müssen sie hoch verschleißfest und hoch hart und/oder hoch warmfest sein. Typische Werkstoffstoffe für diese Anwendungen sind zum Beispiel Guss-eisen GGG 70 L oder GG 25 CrMo für große Tiefziehwerkzeuge, Warmarbeits-stahl X 32 CrMo V 3-3 (Werkstoff-Nr.: 1.2365) für mittelgroße Schmiedege-senke und X 40 CrMoV 5-1 (Werkstoff-Nr. 1.2344) für Druckgusswerkzeuge von Leichtmetallen.

Das Hochgeschwindigkeitsfräsen hat im Werkzeug- und Formenbau gute Rationalisierungserfolge gebracht. Daher wird hier besonders auf die spanende Fer-tigung der Endkontur durch Schichten eingegangen. Die Notwendigkeit, zwischen Schruppen und Schichten beim Fräsen mit hohen Geschwindigkeiten zu

unterscheiden, wurde in Abschnitt 6.5 be-handelt. Die Endkonturen der Hohlformen sind häufig Freiformflächen, die durch ab-bildende Verfahren, wie vor allem das Senkerodieren oder Einsenken, oder durch gesteuert erzeugende Verfahren, nämlich durch Fräsen, hergestellt werden müssen. Rotationssymmetrische For-men lassen sich durch Drehen herstellen.

Zur Herstellung von Freiformflächen dagegen ist das Erodieren in neuerer Zeit durch das Hochgeschwindig-keitsfräsen zurückgedrängt worden, da letzteres den direkten Weg vom Com-putermodell zum Bauteil darstellt und meist rationeller und umweltfreundli-cher ist; denn Erodierschlämme stel-len Sondermüll dar. Gefräst wird auf 3- oder 5-Achsen-Maschinen. Typische Werkzeuge sind Torus- oder Kugel-kopffräser. Die Endfläche wird durch zeilenweises Abfahren erzeugt, wobei in einer 3-Achsen-Maschine die Frä-serachse nicht gekippt werden kann. In einer 5-Achsen-Maschine kann die Fräserachse prinzipiell in jedem Punkt eine andere, günstige Lage (z. B. nor-mal zur Oberfläche) einnehmen. Prak-tisch wird jedoch meist nach dem 3+2-Verfahren gearbeitet, d. h. die Frässpindel wird in eine für einen zu be-

arbeitenden Bereich optimale Lage gekippt und dann zur Bearbeitung dieses Bereiches nicht mehr in ihrer Winkellage verändert.

Bild 6.15 zeigt, wie bei dem meist angewandten Kugelkopffräsen die Pa-rameter Fräserradius, Vorschub und Zeilenabstand zusammen wirken und das verbleibende Rauheitsgebirge be-stimmen. Der Zeilenabstand b_r und die Vorschubgeschwindigkeit bzw. der Vorschub je Schneide f_z gehen direkt in die Zeitspanfläche ein, in die theo-retische Rauheit R_{th} jedoch nichtline-ar nach der Formel (6.12) mit dem Ku-gelradius r_k :

$$R_{th} = r_k \cdot \sqrt{r_k^2 - (b_r/2)^2 - (f_z/2)^2} \quad (6.12)$$

In der Praxis wird die Zeilenbreite meist erheblich größer gewählt als der Schneidenvorschub, wodurch eine zeilige Oberfläche entsteht. Werden die Zeilenbreite und der Schneidenvorschub gleichgroß angesetzt, entsteht eine homogene Oberfläche ohne das typische Rillenprofil, was für Glätt-operationen durch Schleifen vorteilhaft sein kann (Bild 6.16). Derart große Vor-schübe setzen allerdings eine hohe Dy-

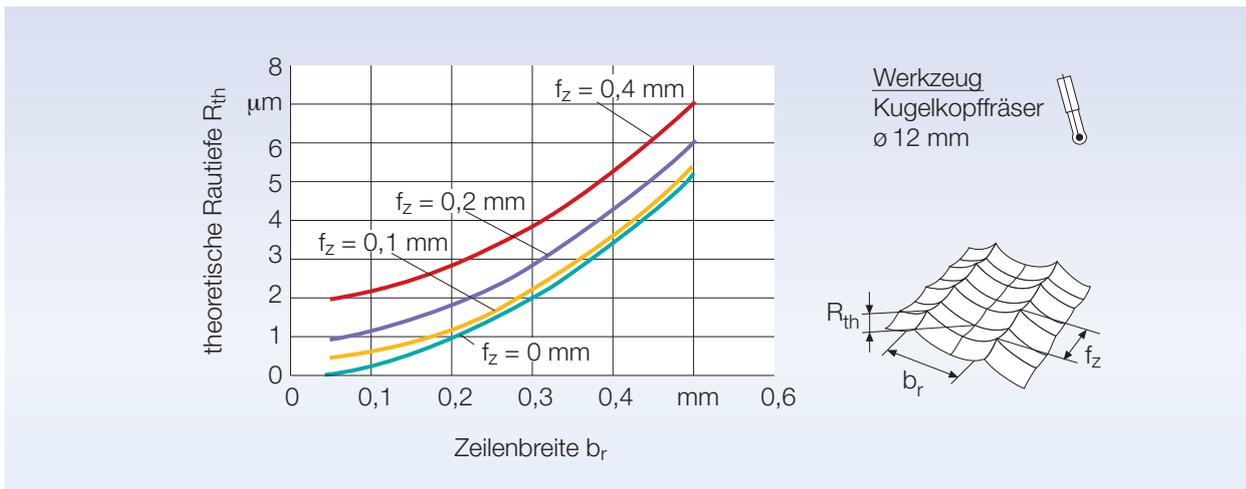


Bild 6.16: Theoretische Rauheit R_{th} .

namik der Maschinenvorschubantriebe voraus, damit nicht unzulässig große Abweichungen von der Sollform auftreten. Zudem ist zu beachten, dass mit höherem Vorschub auch die Kräfte größer werden und damit möglicherweise auch die Werkzeugverformung, was wiederum zu geometrischen Fehlern führen kann. Daher empfiehlt es sich, Fräser so kurz wie möglich zu spannen, um die Auslenkung (diese geht mit der dritten Potenz

der Auskrugung) zu minimieren. Auch kann mit konischen Schäften gearbeitet werden. Wenn dadurch Kollisionen auftreten, lassen sich diese durch simultane 5-achsige Bewegungsführung (5-Achsen-Fräsen) ausgleichen oder durch optimierte Fräserkippen (3 + 2-achsig Fräsen) minimieren. Daneben wurden zur Genauigkeitssteigerung Kompensationsverfahren entwickelt, mit denen die Fräserabdrängung verringert oder kom-

pensiert werden kann [SCHW97].

Für Schlichtoperationen kann man sich zu Nutze machen, dass nicht die gesamte Schnittgeschwindigkeitssteigerung zur Erhöhung des Zeitspanvolumens genutzt, sondern auch ein Teil zur Verringerung der Spanungsdicke verwendet wird. Damit können hohe Oberflächengüten erzeugt werden. Im Werkzeug- und Formenbau lässt sich damit erreichen, dass der immer noch

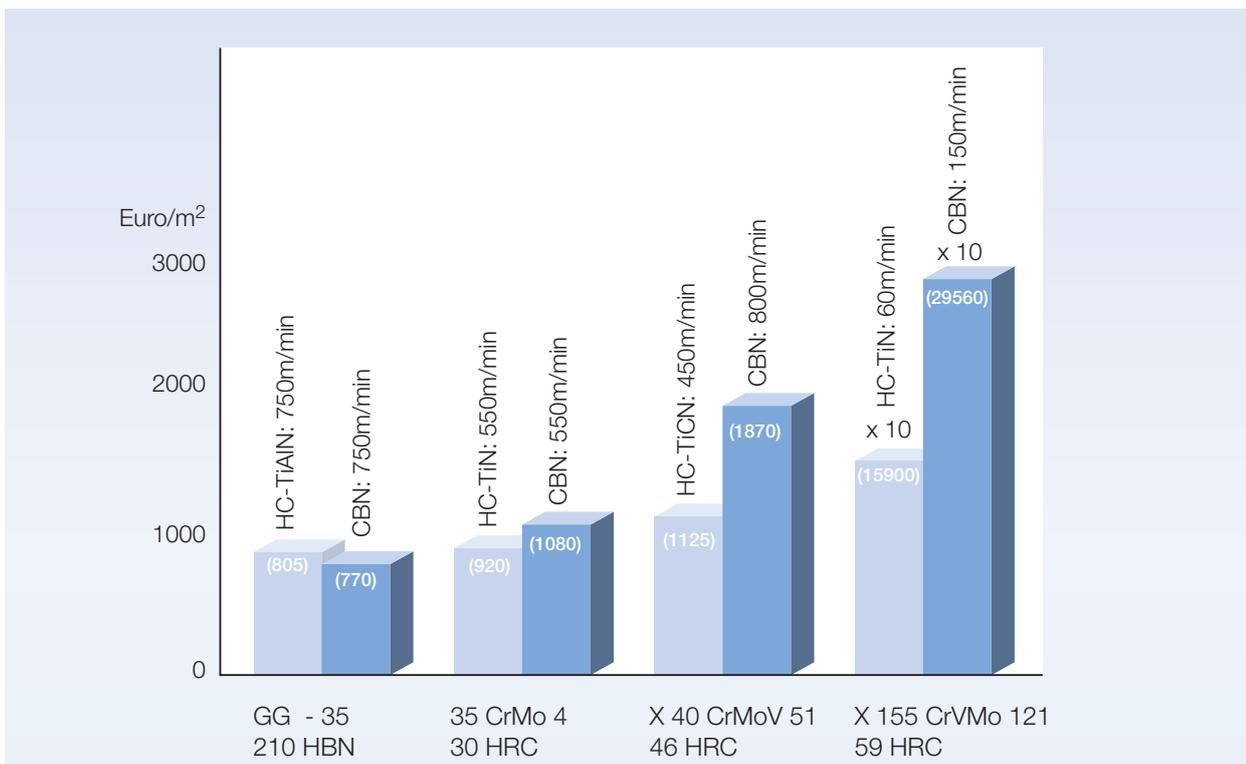


Bild 6.17: Flächenbezogene Fräskosten (FK) für das Schlichten (FALL98).

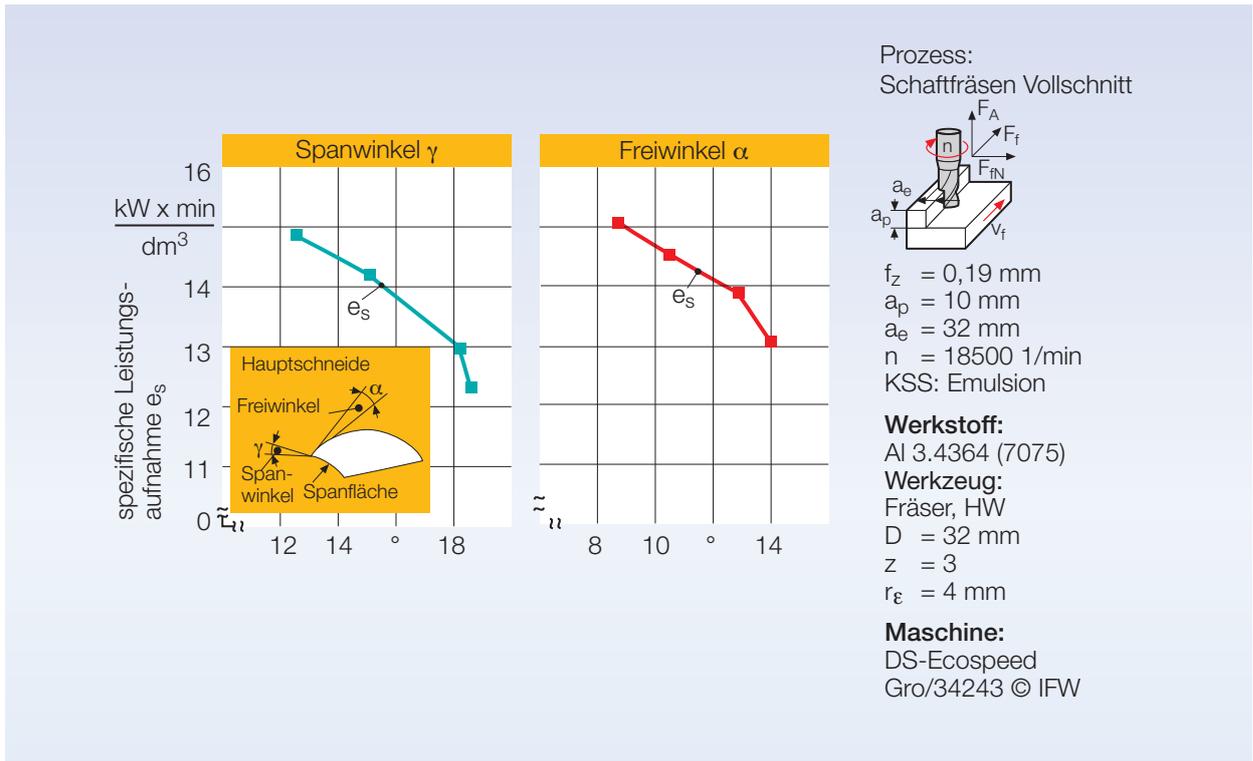


Bild 6.18: Einfluss der Span- und Freiwinkel auf die spezifische Leistung.

große Anteil der manuellen Bankarbeit zum Schlichten und Feinschlichten gefräster Oberflächen wesentlich verringert werden kann und sich zugleich die Maß- und Formgenauigkeit deutlich erhöhen lässt.

Der Verschleiß der Kugelkopffräser ist vom Werkstoff abhängig und steigt in erster Näherung mit der Härte stark an. Oberhalb 55 HRC muss mit geringen Standflächen gerechnet werden. Bild 6.17 gibt eine Übersicht über die flächenbezogenen Kosten für verschiedene Werkstoffe. Perlitisches Gusseisen GG-35 mit einer Härte von 210 HBN steht für Tiefziehwerkzeuge, der bainitische Stahl 35 CrMo 4 mit 30 HRC für Spritzgusswerkzeuge, der martensitische Stahl X 40 CrMoV 5 1 mit 46 HRC für Kokillengießwerkzeuge und der martensitische Stahl X 155 CrV Mo 12 1 mit 59 HRC für Stanzwerkzeuge [FALL98]. Die den Kostenberechnungen aus dem Jahre 1998 zu Grunde liegenden Parameter sind 30 Euro für eine Wendeschneid-

platte und ein Maschinenstundensatz einschließlich Lohnkosten eines Automobilherstellers von 125 Euro. Beschichtetes Hartmetall und kubisch kristallines Bornitrid CBN wurden eingesetzt mit den im Bild angegebenen Schnittgeschwindigkeiten.

6.7 NE-Metalle

Aluminiumlegierungen

In Abschnitt 2.10 wurde erläutert, dass Aluminiumlegierungen grundsätzlich gut zerspanbar sind. Wegen der geringen Festigkeit und der Möglichkeit, günstige Schneidstoff-Werkstoffkombinationen zu wählen, kann mit hohen Schnittgeschwindigkeiten gearbeitet werden. Aluminiumlegierungen eignen sich daher in besonderem Maße für das Hochgeschwindigkeitsspannen [ANDR02]. Gerade beim Fräsen ist diese Prozessvariante besonders interessant, weil – wie in Abschnitt 6.5 erklärt wurde – begrenzende Einflüsse schnell rotierender träger Massen kaum existieren.

Das Hochgeschwindigkeitsspannen von Aluminium ist typisch für das Schlichtfräsen. In neuerer Zeit wurde das Hochleistungsfräsen gerade auch bei Aluminiumlegierungen entwickelt [GROP05]. Dabei stellt der Leistungsbedarf des Prozesses eine wesentliche Grenze für die Produktivität dar. Ein Kennwert dafür ist die auf das Zeitspanvolumen bezogene Leistungsaufnahme. Sie wird in starkem Maße durch die Gestaltung des Werkzeugs bestimmt. Bild 6.18 gibt den Einfluss des Spanwinkels und des Freiwinkels beim Schafffräsen wieder. Bild 6.19 macht deutlich, dass der Spanraum des Fräasers für die hohen Zeitspanvolumina ausgelegt sein muss.

Empfohlene Schnittwerte für das Fräsen von Aluminiumlegierungen durch Schnellarbeitsstahl, Hartmetall und polykristallinen Diamant sind in Tafel 6.4 enthalten. Diese Werte sind als Startwerte aufzufassen, von denen aus optimiert werden kann.

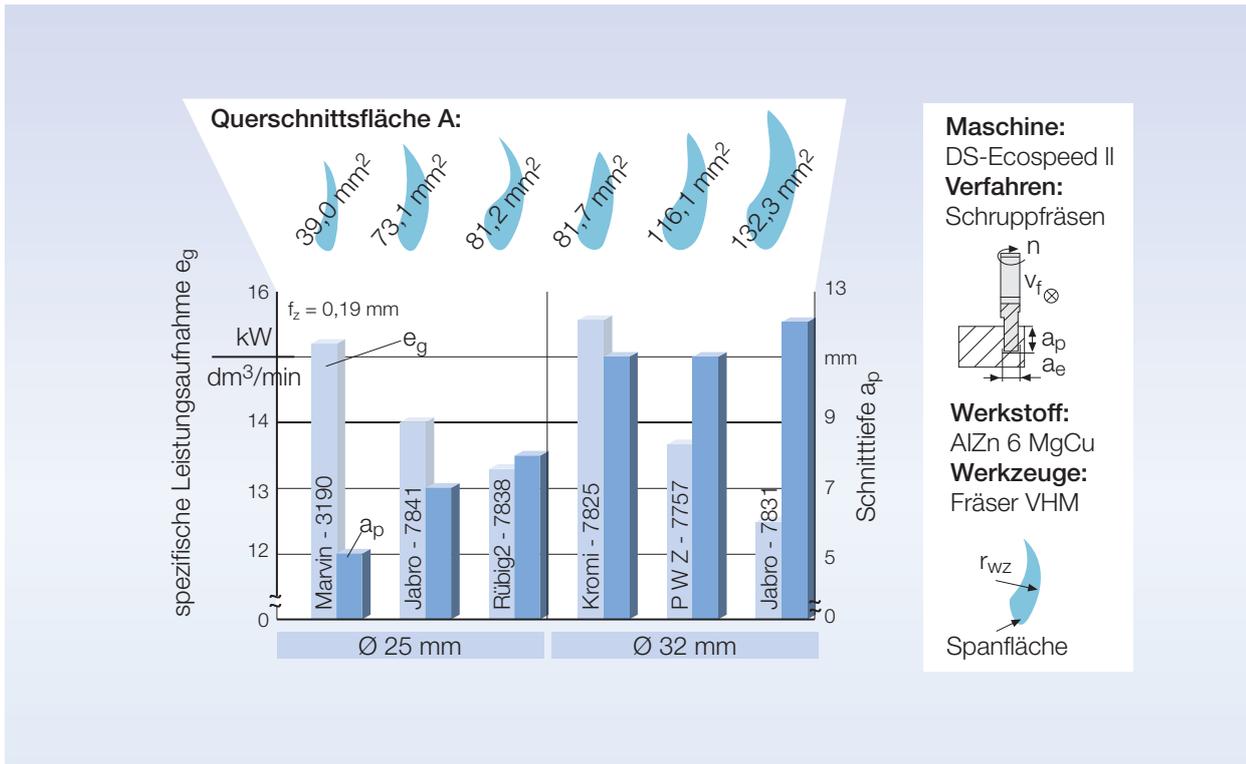


Bild 6.19: Leistungsaufnahme und Spanraum.

Titanlegierungen

Titanlegierungen gehören zu den schwer zerspanbaren Werkstoffen, wie bereits in Abschnitt 2.10 erläutert wurde. Üblich sind Schnittgeschwindigkeiten unterhalb 50 m/min. Für reduzierte Standzeiten um 30 min. lassen sich nach Erfahrungen aus der Praxis der Bearbeitung von Turbinenschaufeln aus TiAl 6 V 4 allerdings auch höhere Schnittgeschwindigkeiten er-

reichen. Die Vorschübe je Schneide liegen abhängig vom Einsatzbereich und vom Einstellwinkel unterhalb 0,25 mm. Es sollte nach Möglichkeit nur im Gleichlauf gefräst werden, um Drücken und Reiben der Schneiden am Werkstoff zu vermeiden. Als Schneidstoffe kommen Schnellarbeitsstahl oder Hartmetall in Frage. Als Schnellarbeitsstahl wird die pulvermetallurgisch hergestellte Variante HSSE (ASP30) ein-

gesetzt wegen möglicher scharfer Schneiden. Gearbeitet wird mit HSS im unteren Schnittgeschwindigkeitsbereich ($\leq 25 \text{ m/min}$). Schnellarbeitsstahl wird in der Strukturkomponentenfertigung im Flugzeugbau zum Schruppen, Hartmetalle der Sorten K20 bis K40 zum Schlichten eingesetzt. In neuerer Zeit entwickelte besonders feinkörnige Hartmetallsorten haben sich gut bewährt. Zum Fräsen werden Kobaltan-

Werkstoff	HSS			HW			PKD		
	v_c m/min	f_z mm	a_p mm	v_c m/min	f_z mm	a_p mm	v_c m/min	f_z mm	a_p mm
weiche Al-Legierung	400	0,25	6	500	0,25	6	2000	0,25	3
ausgehärtete untereutektische Al-Legierung	150	0,25	6	200	0,25	6	2000	0,20	3
eutektische und übereutektische Al-Legierung	-	-	-	200	0,25	2	1000	0,15	2

Tafel 6.4: Schnittwerte für das Fräsen von Aluminium.

Werkstoff	VHM, blank		VHM, TiAlN multi	
	v_c [m/min]	f_z [mm]	v_c [m/min]	f_z [mm]
Schruppen	≤ 31.5	≤ 0.15	≤ 50	≤ 0.15
Schlichten	≤ 20	≤ 0.02	≤ 150	≤ 0.05

Tafel 6.5: Schnittwerte für das Fräsen von Titan Ti6Al4V.

teile bei 10 % verwendet, was K40 entspricht. Positive Ergebnisse beim Schlichten sind mit Multilayer-Beschichtungen auf der Basis von TiAlN erzielt worden [GEY02]. In Tafel 6.5 sind Schnittwerte für das Fräsen von Titanlegierungen angegeben. Für das

Schruppen mit Schaftfräsern wird berichtet, dass sich unbeschichtete besonders feinkörnige Hartmetalle bewährt haben [DENK08, DENK07]. Beschichtungen brachten dort kaum mehr als 5 % bis 10 % Gewinn. Die für den Einsatzfall entwickelten Werkzeu-

ge wurden mit radialen Spanwinkeln $\gamma_r = 14^\circ$ und radialen Freiwinkeln von $\alpha_r = 6^\circ$ ausgeführt. Schnittgeschwindigkeiten zum Schruppen lagen bei 50 m/min. und zum Schlichten bis 150 m/min. Innenkühlschmierung war dann allerdings erforderlich.

6.8 Fräsprobleme, Praxistipps

Merkmal	Maßnahmen
Ungenügende Antriebsleistung	<ul style="list-style-type: none"> • Schnitttiefe reduzieren • Schnittgeschwindigkeit reduzieren • Vorschub reduzieren • positive Spanwinkel verwenden • Schneidenzahl reduzieren
Starke Schwingungen Ungenügende Aufspannung selbsterregte Schwingungen	<ul style="list-style-type: none"> • Werkzeugüberhang verringern • Aufspannung überprüfen • kräftigere Werkzeughalter verwenden • Richtung der Zerspankraft optimieren • Schnitttiefe reduzieren • Fräser mit ungleicher Teilung verwenden • Gegen- statt Gleichlaufräsen • Drehzahl um 10 % erhöhen oder erniedrigen
Zu großer Freiflächenverschleiß Abrasiver oder adhäsiver Verschleiß	<ul style="list-style-type: none"> • Schnittgeschwindigkeit verringern • verschleißfestere Hartmetall-Sorte verwenden • Schneidkantenfase vergrößern
Großer Kolkverschleiß Diffusionsverschleiß	<ul style="list-style-type: none"> • Schnittgeschwindigkeit verringern • Verschleißfestere Hartmetall-Sorte verwenden • Vorschub je Schneide reduzieren
Kammrisse Starke Temperaturwechsel	<ul style="list-style-type: none"> • zähere Hartmetallsorte wählen • für geringere Abkühlung der Schneiden sorgen • Vorschub je Schneide verringern • Schnittgeschwindigkeit reduzieren
Ungenügende Werkstückoberfläche Maschinen- oder Schneideneinfluss	<ul style="list-style-type: none"> • Rundlauf des Fräasers prüfen, Fräser • Schnittgeschwindigkeit erhöhen • Vorschub je Schneide reduzieren • Maschinenschwingungen prüfen (siehe Starke Schwingungen) • Schnitttiefe verringern • Schneidkantenfase verringern
Nachschneiden des Fräasers Spindelneigung fehlerhaft	<ul style="list-style-type: none"> • Spindel ausrichten (unter 0.10 mm auf 1000 mm!) • Axialschlag des Fräasers < 7 µm • Schnitttiefe reduzieren • geringeren Fräserdurchmesser wählen

7. Schleifen

7.1 Grundlagen des Verfahrens

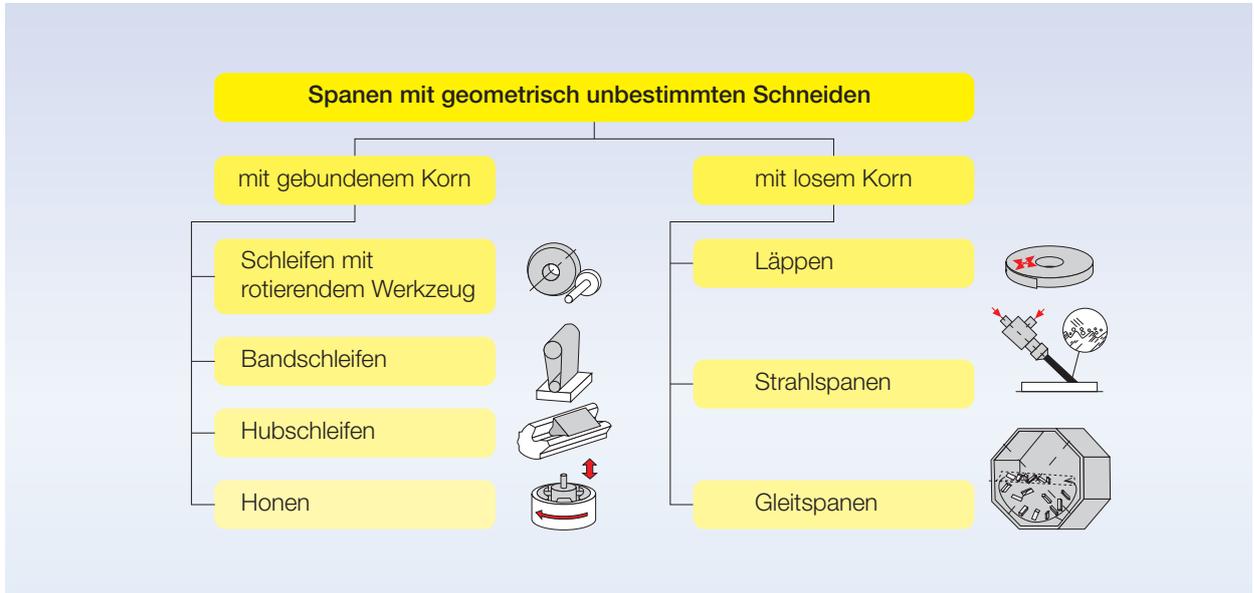


Bild 7.1: Spanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden (nach DIN 8589-11 bis -17).

Die Verfahren der Gruppe „Spanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden“ gliedern sich nach DIN 8589 -11 bis -17 in die Verfahren Schleifen mit rotierendem Werkzeug (mit Schleifscheiben), Bandschleifen, Hubschleifen, Honen, Läppen, Gleit- und Strahlspanen (Bild 7.1). Es können Verfahren mit gebundenem und ungebundenem lose Korn unterschieden werden. Diese Verfahren zählen zu den Feinbearbeitungsverfahren. Sie werden überwiegend zum Erzeugen der finalen Oberflächen eines Werkstücks, also als Endbearbeitungsverfahren, eingesetzt. Daher sind die Qualitätskriterien der Schleifprozesse in der Regel die Maß- und Formgenauigkeit, die Oberflächengüte und die physikalischen Randzoneigenschaften, die mit ihnen erreicht werden. In der Regel lassen sich folgende Toleranzbereiche (in Klammern: erreichbar mit größerem Aufwand oder unter günstigen Bedingungen) (R_p : Fließgrenze des Werkstoffs):

Maß- und Formtoleranzen:
IT 6 und IT 5 (IT 3)

Oberflächengüten:
 $R_z = 5 \mu\text{m} - 1.5 \mu\text{m}$ ($R_z = 0.4 \mu\text{m}$)

Eigenspannungen
 $= 0.7 \times R_p$ ($- 0.6 \times R_p$)

Allerdings ermöglicht die Entwicklung von Hochleistungsschleifverfahren heute die wirtschaftliche Realisierung hoher Zeitspanvolumina, sodass die Einsatzgebiete der Verfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide nicht mehr nur auf die Endbearbeitung beschränkt sind.

Das Schleifen weist einige prinzipielle Unterschiede gegenüber dem Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden auf (siehe auch Bild 2.1). Die Einstellparameter variieren je nach Schleifwerkzeug und Verfahren in weiten Bereichen. Die Schnittgeschwindigkeiten

sind höher als beim Drehen oder Fräsen. Sie liegen bei 30 m/s bis 120 m/s, die Vorschubgeschwindigkeiten zwischen 10 m/min und 200 m/min und die Zustellungen zwischen 3 μm bis 80 μm .

Die Spanungsdicken beim Schleifen sind so gering, dass elastische Anteile an den Formänderungen des Werkstoffs nicht vernachlässigbar sind. Bild 7.2 zeigt die unterschiedlichen Phasen bei der Spanbildung. Beim Schneideneingriff kommt es nach einer rein elastischen Verformung (1) zum plastischen Fließen des Materials (2). Die eigentliche Spanbildung erfolgt nach einem weiteren Eindringen der Schneide in den Werkstoff (3). Neben der Scherung des Spans (7) ist dieser Bereich sowohl durch elastische als auch plastische Formänderungen charakterisiert. Dem gegenüber liegen unmittelbar vor dem Austritt des Kornes aus dem Werkstoff nur noch elastische Formänderungen und die Scherung des Spans vor (4). Beim Schleifen kommt es vor der Schneide zu seitlichem Stofffluss,

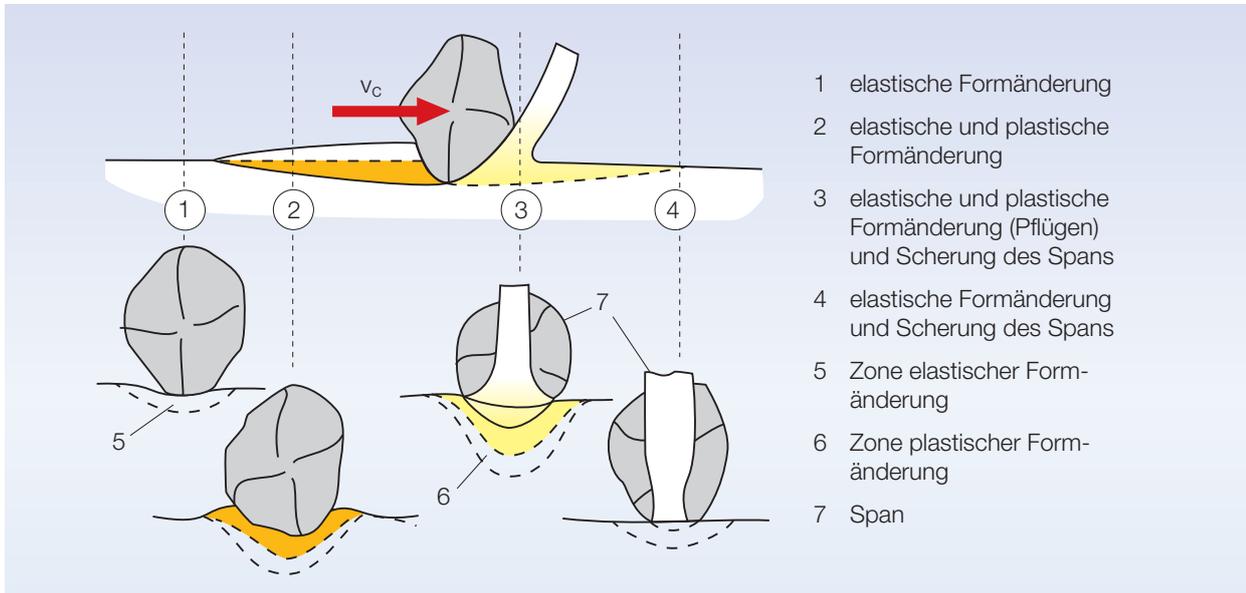


Bild 7.2: Phasen der Spanbildung beim Schleifen.

der Formänderungszustand ist dreiachsig im Gegensatz zu überwiegend zweiachsigem Fließen beim Spanen mit geometrisch bestimmter Schneide.

Ein Maß für die Produktivität des Schleifprozesses ist das Zeitspanvolumen QV [mm^3/min]. In Bild 7.3 sind die Größen zur Berechnung eingetragen. Es gilt mit der Vorschubgeschwindigkeit v_f [mm/min] (a_p und a_e in mm).

$$QV = a_e \times a_p \times v_f \quad (7.1)$$

Da entlang des Schnitteingriffs a_p grundsätzlich gleiche Spanbildungsverhältnisse herrschen, wird für technologische Betrachtungen das auf den Schnitteingriff a_p bezogene Zeitspanvolumen QV' verwendet:

$$QV' = a_e \times v_f \quad (7.2)$$

Das bezogene Zeitspanvolumen ist eine Prozesskenngröße, die mit den

wichtigsten technologischen Wirkgrößen verknüpft werden kann, so mit den Schleifkräften, der Schleifleistung, der Verschleißkennzeichnung durch das Schleifverhältnis G (durch Schleifen abgetrenntes Volumen bezogen auf das am Schleifwerkzeug verschlissene Volumen) und die Randzonenbeeinflussung.

Die genannten Beziehungen für das Zeitspanvolumen QV [mm^3/min] gelten für das Planschleifen. Beim Rundschleifen eines Zylinders mit dem Werkstückdurchmesser d_w [mm] im Einstechverfahren mit der radialen Vorschubgeschwindigkeit v_{fr} [mm/min] ist

$$QV = \pi \times d_w \times a_p \times v_{fr} \quad (7.3)$$

und im Längsschleifverfahren mit dem Schnitteingriff a_p (entspricht dem Längsvorschub) und dem Arbeitseingriff oder der Zustellung a_e bei einer Werkstück-

drehzahl von n_w [min^{-1}].

$$QV = a_e \times a_p \times \pi \times d_w \times n_w \quad (7.4)$$

7.2 Schleifwerkzeuge

Schleifscheiben bestehen aus drei Komponenten, aus dem Hartstoff, der als Schleifkörnung die Schneiden bildet, dem Bindungsmaterial, das die Hartstoffkörner hält, und dem Spanraum, das sind Poren im Scheibenmaterial oder Leerräume vor den Schneiden an der aktiven Schleifoberfläche des Werkzeugs.

Die Hartstoffkörner bestimmen zu einem wesentlichen Teil die Verschleißigenschaften des Werkzeugs. Für die Feinbearbeitung von Stahl wird hauptsächlich Korund (Aluminiumoxid, Al_2O_3) eingesetzt. Das härtere Siliziumkarbid (SiC) wird vorzugsweise zum Schleifen von Gusseisen und Keramiken verwendet. Das hochharte kubisch kristalline

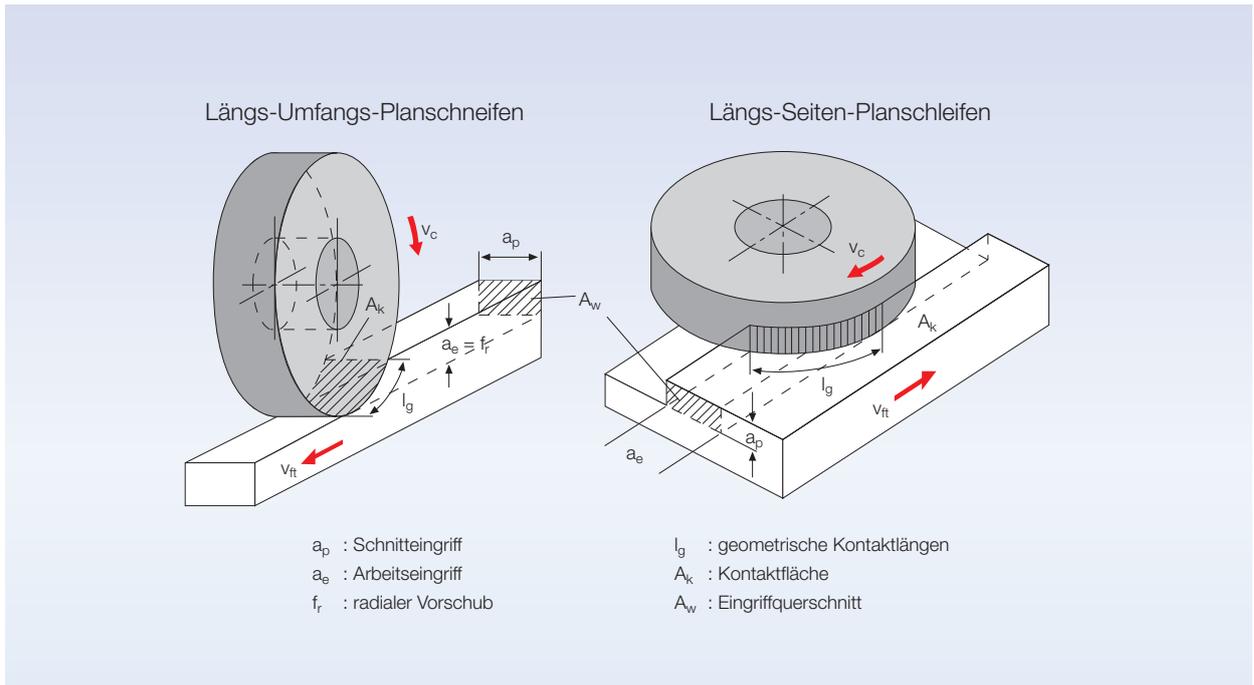


Bild 7.3: Eingriffsverhältnisse beim Umfangs- und Planschleifen.

Hartstoff	Al ₂ O ₃	SiC	CBN
Härte, HV 01	2100	2500	5000
Schmelzpunkt [°C]	2050	2300	2730
Beständigkeit [°C]	1750	1500	1200
Wärmeleitfähigkeit [W/Km] ¹⁾	14	55	200
spez. Wärme [J/gK]	1.08	1.1	1.57

¹⁾ bei Schleiftemperatur

Tafel 7.1: Eigenschaften von Schleifkörnigen.

Bornitrid (CBN) hat nach Diamant die höchste Härte aller bekannten technischen Stoffe. Es wird synthetisch hergestellt und hat verglichen mit den konventionellen Schleifstoffen einen erheblich höheren Preis. Daher liegt sein Haupteinsatzgebiet bei gehärteten Stählen mit Härten oberhalb 45 HRC. Diamant kommt für das Stahlschleifen nicht in Frage, da es wegen der hohen Affinität des Kohlenstoffs zum Eisen chemisch rasch verschleißt. Die mechanischen und physikalischen Eigenschaften der Hartstoffe sind in Tafel 7.1 aufgeführt.

Korund besteht zu 95 % bis 99.5 % aus Al₂O₃ und weiteren metallischen

Beimengungen. Mit dem Reinheitsgrad nimmt die Härte zu und die Zähigkeit ab. Daher wird Normalkorund (95 % Al₂O₃) zum Schruppen und Edelkorund (99.5 % Al₂O₃) für Präzisionsschleifaufgaben eingesetzt. Neuerdings werden zum Präzisionsschleifen auch mikrokristalline Korundkörnigen verwendet. Diese nach einem Sol-Gel-Verfahren hergestellten Körner bestehen aus einer großen Zahl von Mikrokörnigen, die jedes für sich Schneiden bilden können.

Während des Schleifprozesses können geeignet ausgelegte Schleifkörnigen so verschleifen, dass weitgehend arbeitsscharfe Schneiden entstehen. Die

ser Selbstschärfungseffekt setzt bei normalem Korn hohe Kräfte je Korn voraus, sodass der Effekt praktisch nur beim Schruppschleifen eintreten kann. Für mikrokristallines Korn dagegen reicht die spezifische Belastung aus, den Selbstschärfungseffekt auch beim Schlichten zu nutzen. Dieser Mechanismus führt bei mikrokristallinem Korn im Gegensatz zu den grobkristallinen Schmelzkorunden zu reduziertem Verschleiß bei gleichzeitig reduzierter Schleifkraft und Temperatur in der Kontaktzone. Das führt zu höheren Standmengen, längeren Abrichtintervallen und lässt eine Steigerung des Zeitspanvolumens zu.

Schleifkörnigen werden neben ihren mechanischen und physikalischen Eigenschaften durch ihre Korngröße gekennzeichnet. Für Korund und Siliziumkarbid gilt die FEPA-Norm, wobei die Körnungsnummern nach US mesh (Siebmaschen je Zoll) gewählt sind. Tafel 7.2 zeigt Anwendungen von konventionellen Schleifkörnigen, die erreichbaren Oberflächengüten und be-

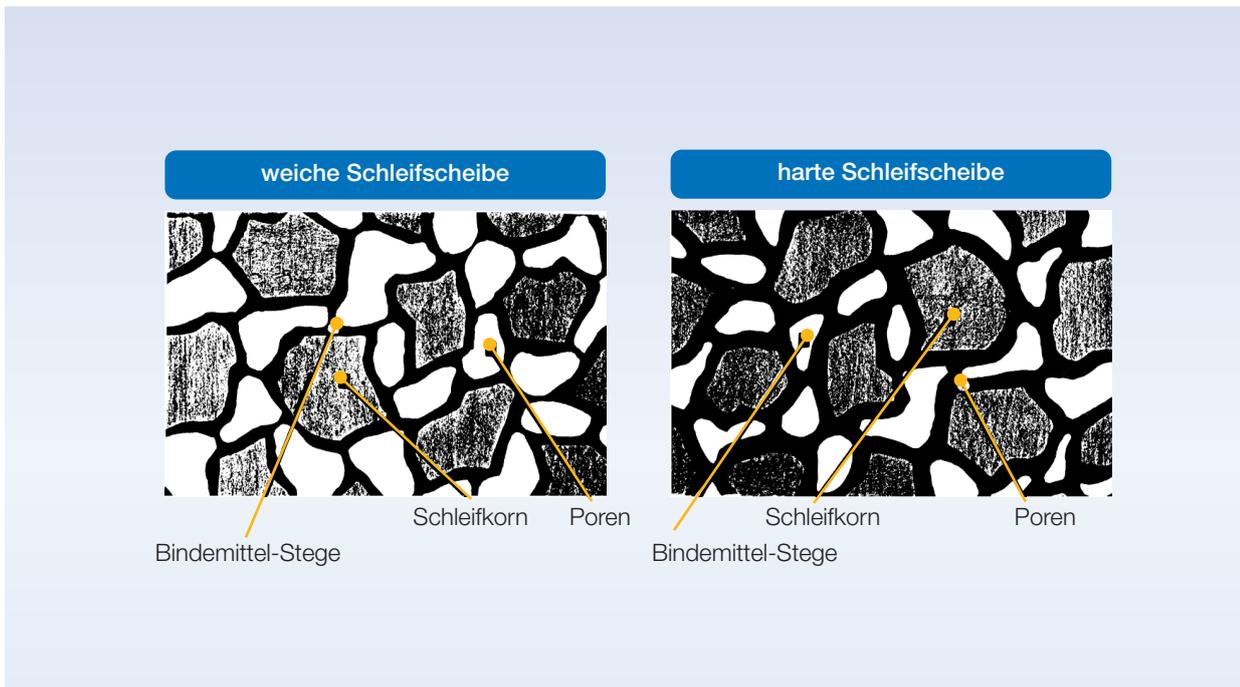


Bild 7.4: Aufbau einer keramischen Schleifscheibe (nach Saint Gobain).

Schleifart	Rautiefe R _z [µm]	Kornzahl US mesh	Korngröße [µm]	Max. Aufmaß [µm]
Vorschleifen	10 - 5	20 - 40	1050 - 440	–
Ferigschleifen	5 - 1,5	46 - 80	370 - 190	< 200
Feinschleifen	1,5 - 0,7	90 - 180	150 - 70	< 100
Feinstschleifen	0,7 - 0,4	220 - 600	60 - 10	< 50

Tafel 7.2: Oberflächengüten, Korngrößen und Aufmaß.

zogene Zeitspanvolumen. Man erkennt einen weiten Bereich für die Zuordnung von Oberflächengüten und Körnung. Das liegt darin begründet, dass neben der Korngröße eine Reihe weiterer Einflussgrößen gegeben ist, vor allem die Art des Abrichtens der Schleifscheibe, Vorschub- und Schnittgeschwindigkeit und weitere. Einen Anfangswert beim Schlichtschleifen für die Wahl der Korngröße KG [µm] bei geforderter Rautiefe R_z [µm] liefert die nachstehende empirische Formel:

$$KG = 100 \times R_z^{1,25} \quad (7.5)$$

Die hochharten Körnungen wie CBN und Diamant werden nach der lichten Weite der Siebe gekennzeichnet, d. h.

die Kennzahl korreliert mit dem Korndurchmesser. Neben den Körnungen der Hartstoffe werden die Eigenschaften einer Schleifscheibe maßgeblich durch die Bindung bestimmt, mit denen die Hartstoffkörner im Verbund gehalten werden. Für das Präzisions-schleifen von Stahl werden überwiegend keramische Bindungen eingesetzt.

Die Bindung bestimmt den Widerstand, der dem Ausbrechen eines Kornes aus dem Verbund entgegengesetzt wird. Dieser Widerstand wird als Härte einer Schleifscheibe bezeichnet (abweichend also von dem üblichen Härtebegriff, der Eindringkörperhärte). Bei keramisch gebun-

denen Schleifscheiben wird die Härte durch die Dicke der Bindemittel-Stege bestimmt: Je dicker die Stege sind, desto härter ist die Scheibe (Bild 7.4). Die so definierte Härte wird nach ISO 525 mit Kennbuchstaben bezeichnet. Praktisch genutzt wird der Härtebereich von E (sehr weich) bis S (sehr hart). Um bei harten, verschleißenden Werkstoffen abgestumpfte Körner aus dem Verband zu entlassen, werden eher weichere Scheiben eingesetzt. Umgekehrt empfehlen sich härtere Scheiben bei weichen Werkstoffen, die stärkeren Bindungsverschleiß erwarten lassen. Daher gilt die Faustregel:

💡 Harte Werkstoffe weiche Scheiben, weiche Werkstoffe harte Scheiben.

Das vollständige Klassifizierungsschema für Schleifscheiben auf Korund- und Siliziumkarbid-Basis ist in Bild 7.5 angeschrieben. Allerdings lassen sich keramisch gebundene Schleifscheiben in ihrem Prozessverhalten in

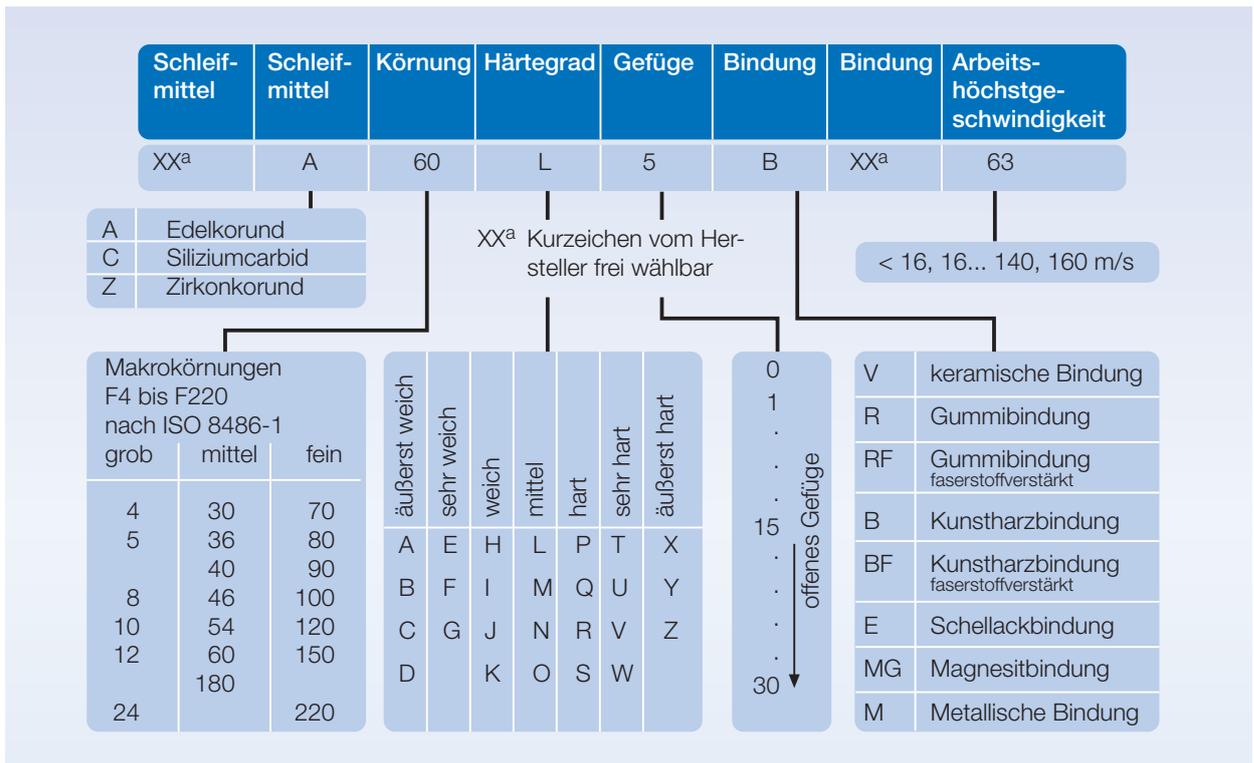


Bild 7.5: Klassifizierung von konventionellen Schleifscheiben (nach ISO 525).

weiten Bereichen durch das Abrichten oder Konditionieren verändern. Durch einen Dreh- oder Schleifprozess, in der Regel in der Schleifmaschine, wird dabei die aktive Oberfläche einer Schleifscheibe mit einer für den vorgesehenen Schleifprozess passenden Wirkrautiefe versehen: Für das Schleifen mit größerem Zeitspanvolumen wird grob, für das Schlichten und Feinschlichten fein abgerichtet. Die Wirkrautiefe der Schleifscheibe sollte so gewählt werden, dass es nicht zu unzulässig hohen Temperaturen in der Schleifzone kommt und dadurch die neu entstehende Oberfläche thermisch geschädigt wird. Durch die passende Wahl der Körnung und vor allem durch treffendes Abrichten können solche Schädigungen vermieden werden. Daher ist das Abrichten ein für das Schleifergebnis entscheidender Vorgang.

Ein Maß für den Verschleiß an Schleifscheiben ist das Schleifverhältnis $G = V_{WSt}/V_s$, worin das am Werkstück verschlissene Volumen bezogen wird auf das Schleifscheibenvolumen. Beim

Schleifen mit Korund an Stahl kann man mit $G = 40$ bis 80 rechnen.

7.3 Oberflächengüte

Die mikrogeometrische Oberflächenausbildung lässt sich durch verschiedene Kenngrößen wie die gemittelte Rautiefe, den Mittenrauwert, den Tragantkennwert und weitere beschreiben (s. Abschnitt 2.4), je nachdem welche Funktion der Oberfläche wesentlich ist. Häufig wird die gemittelte Rautiefe R_z angegeben. In Bild 7.6 sind qualitativ die Einflüsse einiger Eingangsgrößen auf die Oberflächengüte angeschrieben. Grundsätzlich ist die durch Schleifen erzeugte Oberfläche mit der Mikrotopographie der Schleifscheibe und den kinematischen Bedingungen, mit denen die Schneiden gegenüber dem Werkstück bewegt werden, verbunden

Mit Rücksicht auf das Verschleißverhalten ist in Bild 7.6 zwischen konventionellen und hochharten Schleifstoffen unterschieden, wobei für beide die glei-

chen Trends festzustellen sind, bei CBN sind die Veränderungen der Rauheitswerte zeitlich erheblich gestreckt. Aus den schematischen Darstellungen ist zu entnehmen, dass die Rauheit mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit zunimmt, was sich auf die Steigerung der Spannungsdicke zurückführen lässt. Umgekehrtes gilt für den Einfluss der Schnittgeschwindigkeit, mit deren Steigerung die Spannungsdicke abnimmt. Die Schleifzeit bzw. das Zerspanvolumen V'_w wirkt sich ambivalent aus je nach der anfänglichen Mikrotopographie der Schleifscheibe. Bei rauher Scheibe tritt nach anfänglich größerer Rauheit ein Glättungseffekt auf. Umgekehrt ergibt sich bei sehr glatter Scheibe durch Verschleißeffekte eine Aufrauung und damit eine Steigerung der Rautiefe am Werkstück.

Ein besonderer Anwendungsfall ist das Schleifen von Dichtflächen, gegen die Radialwellendichtringe (Simmerringe) laufen. Typische Anwendungen sind Abdichtungen von Kurbel- und Getriebewellen oder die Abdichtung gekapselter

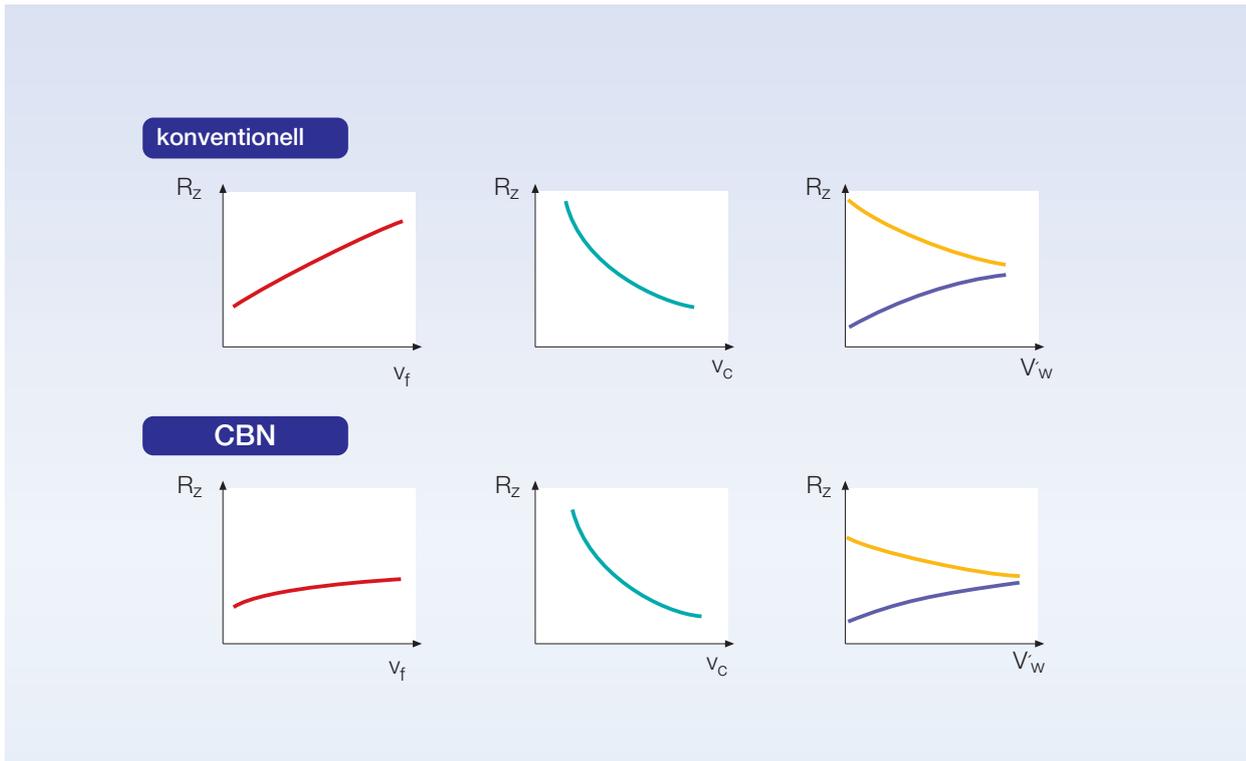


Bild 7.6: Einfluss von Stellgrößen auf die Rauheit.

Wälzlager. Solche Dichtringe sollen auch bei gewissem Innendruck Ölaustritt verhindern. Leckraten von 0.01 ml/h sollen nach DIN 37611 nicht überschritten werden. Um diese scharfen Bedingungen zu gewährleisten, die schon aus Gründen der Umweltbelastung sicher eingehalten werden müssen, müssen richtungsorientierte Strukturen mit einer axialen Komponente vermieden werden. Es müssen Oberflächen durch Feinbearbeitungsverfahren erzeugt werden, die keine Drallstrukturen aufweisen.

Dichtungshersteller geben für geschliffene Wellen folgende Anforderungen an Zylinderflächen an [PREV]:

- Drallfreiheit
- $R_a = 0.2 \mu\text{m} - 0.8 \mu\text{m}$,
 $R_z = 1 \mu\text{m} - 5 \mu\text{m}$, $R_{\text{max}} < 6.3 \mu\text{m}$
- ohne Poren, Kratzer, Riefen
- ausreichender Verschleißwiderstand

Wellenoberflächen für Radialwellendichtringe werden meist geschliffen. Um eine Richtungsorientierung zu vermeiden,

wird das Einstechschleifen empfohlen. Allerdings ist dieser Prozess durchaus nicht Garantie für eine funktionsfähige Oberfläche; denn auch beim Einstechschleifen ergibt sich immer ein Restdrall. Dieser wird wesentlich durch den Abrichtvorgang bestimmt. Um beim Schleifen unzulässige Richtungsorientierung der Mikrostruktur zu vermeiden, sind folgende Bedingungen förderlich [KEST92]:

- Nicht ganzzahliges Drehzahlverhältnis von Schleifscheibe und Werkstück (z. B. 10.5:1),
- Abrichten in einer Richtung, Abrichtvorschub $< 0.1 \text{ mm}$,
- ausreichend lange Ausfeuerphasen (30 s Ausfeuern wird empfohlen),
- ausreichend feine Schleifkörnung, 60-100 US mesh,
- ausreichende Steifigkeit der Wirkpartner (Vermeiden von Kippungen),
- keine Schränkung der Achsen von Werkzeug und Werkstück.

💡 Einstechschleifen ist noch keine Gewähr für Drallfreiheit, weitere Bedingungen sind einzuhalten (siehe oben).

In der Praxis wird noch meist mit dem Fadenindikator geprüft, ob eine unzulässige Ölförderwirkung auftritt. Dabei wird ein mit Öl benetzter gewichtsbelasteter (ca. 50 g), spezieller Faden über die zu prüfende Welle gelegt. Bei Rotation der Welle beginnt sich der Faden axial zu bewegen, wenn ein Drall vorliegt. Allerdings wirkt die Methode – wie praktische Erfahrungen zeigen – nicht, wenn die Drallstrukturen besonders fein oder besonders grob sind. Es wird deshalb an optischen Verfahren gearbeitet, die vielversprechend sind [KEST92]. Das Prüfproblem sollte auch aus Umweltgründen rasch einer praktischen Lösung zugeführt werden; denn es ist bekannt, dass bereits Drallwinkel (Schraubensteigungswinkel) von $6'$ zu hohen Leckraten von 15 ml/h führen können.

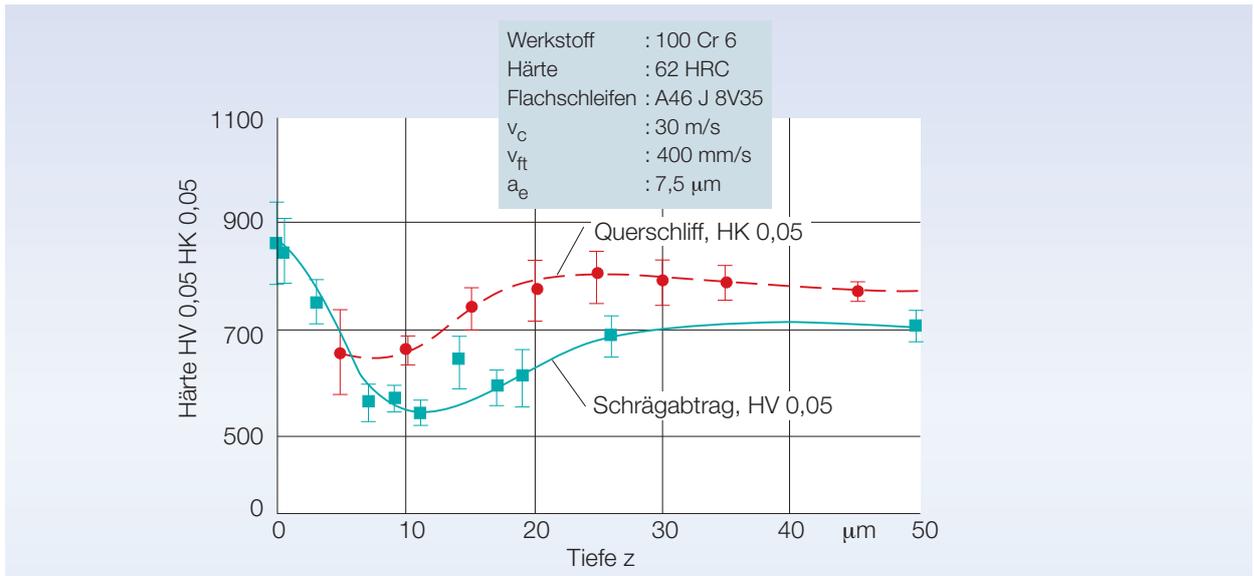


Bild 7.7: Härteveränderungen durch Schleifen.

7.4 Randzonenbeeinflussung

Wie in Abschnitt 2.4 allgemein dargestellt wurde, werden die physikalischen Eigenschaften spanend erzeugter Oberflächen durch den Prozess verändert. Das gilt für das Schleifen in besonderem Maße; denn Schleifen ist meist ein finales Bearbeitungsverfahren, die erzeugte Oberfläche erhält ihre endgültigen Eigenschaften, und zum anderen haben die Spanbil-

dungsvorgänge beim Schleifen erhebliches Potenzial, die Randzonen eines Werkstücks zu verändern. Das kann sein

- Weichhautbildung durch Anlassen,
- Bildung von unerwünschten Zugspannungszuständen,
- Bildung martensitischer, weißer Schichten und/oder
- Entstehen von Mikrorissen.

Die beim Schleifen freiwerdende Wärme kann zu Temperaturen in der

Randzone des Werkstücks führen, die ein Anlassen bewirken. Dieses Phänomen der Weichhautbildung ist in der Regel unerwünscht. Es ist besonders dann kritisch, wenn ein Bauteil wegen tribologischer Beanspruchung gehärtet wurde und die Randhärte dann durch das Schleifen abgesenkt wird oder gänzlich verschwindet. Abhilfe kann durch geringere Zustellung, durch groberes Abrichten der Schleifscheibe, durch bessere Kühlschmierung oder Ersatz von Emulsion durch Mineralöl als

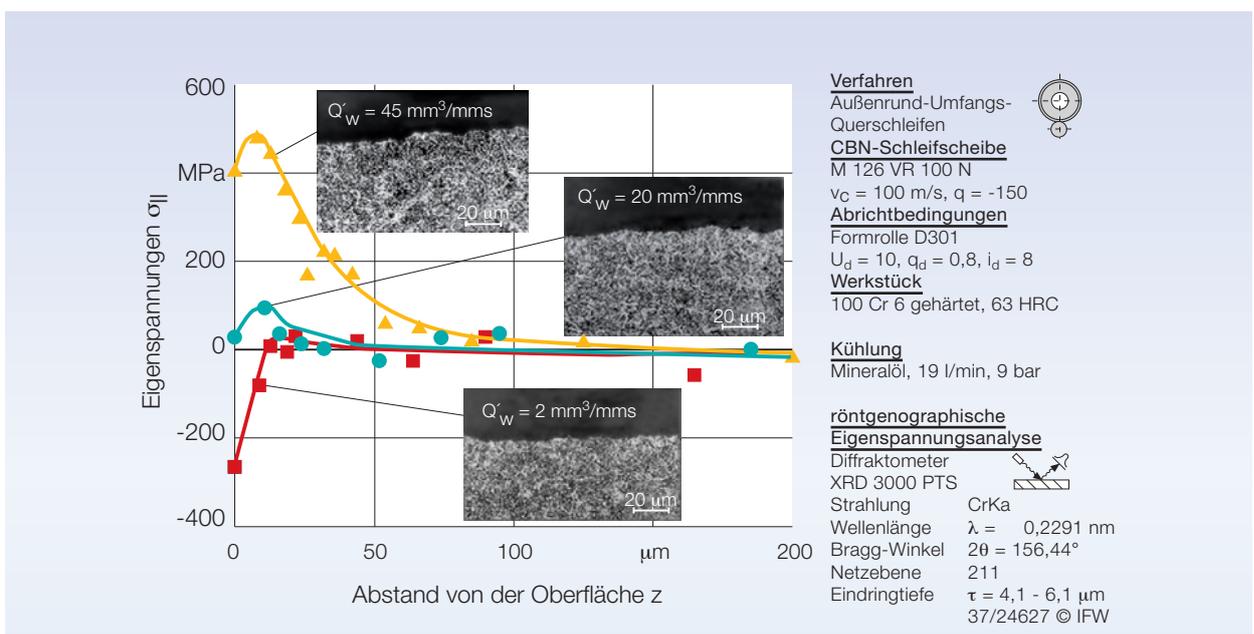


Bild 7.8: Eigenspannungen und Zeitspanvolumen.

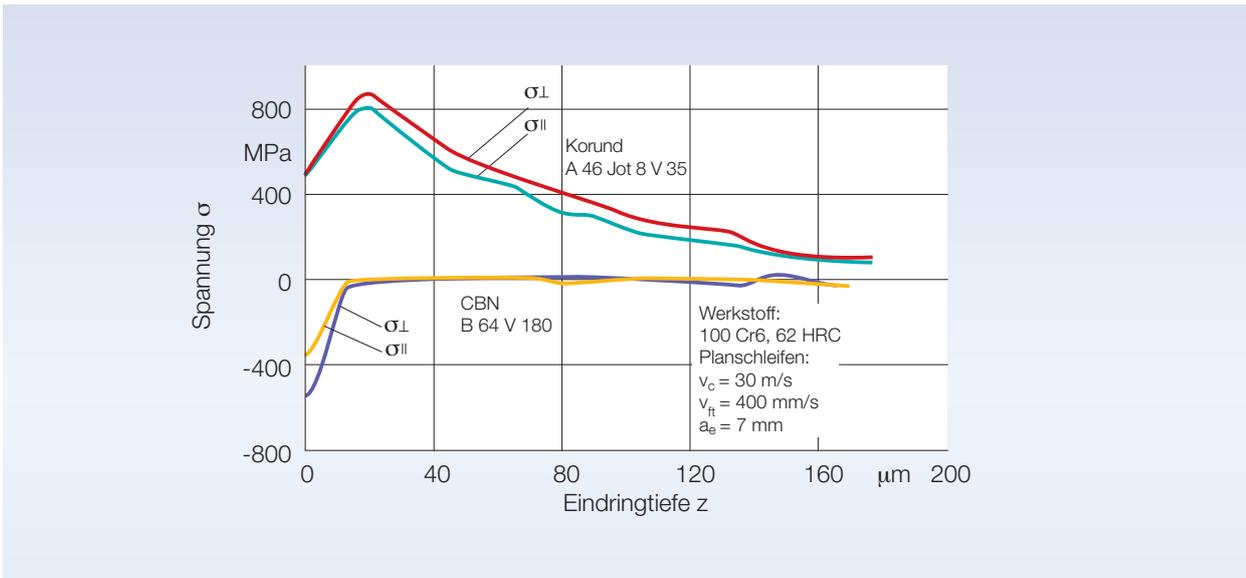


Bild 7.9: Einfluss des Schleifstoffes.

Kühlschmiermittel erreicht werden. Umgekehrt kann auch eine Aufhärtung in den randnahen Schichten durch Kaltverfestigung entstehen (Bild 7.7) [TÖND04].

Mechanische und thermische Einwirkungen erzeugen plastische Verformungen und Gefügeänderungen in den randnahen Schichten und führen damit zur Ausbildung von Eigenspannungsverteilungen im Bauteil (Bild 7.8).

Dabei wirken sich die Einstellpara-

meter, die eine stärkere Energieumsetzung und damit auch höhere Temperaturen in der Kontaktstelle bewirken, in Richtung auf höhere Zugeigenspannungen und größere Eindringtiefe der Eigenspannungsquellen aus. In Bild 7.8 ist das Zeitspanvolumen über die Zustellung a_e variiert. Es ist eine deutliche Verschiebung der Spannungsverteilung zu Zugspannungen zu erkennen. Bei höheren Zustellungen kommt es zudem zu Gefügeveränderungen und schließlich

zur „Weißhautbildung“ in den unmittelbaren Oberflächenschichten.

Wie Bild 7.9 zeigt, ist von Einfluss, mit welchem Schleifstoff gearbeitet wird. CBN als hochharter Schleifstoff verschleißt weniger und weist weniger verrundete Schneiden auf. Vor allem hat CBN eine erheblich höhere Wärmeleitfähigkeit als Korund und transportiert deshalb die beim Schleifen entstehende Wärme stärker aus der Wirkzone heraus, der Schliff bleibt kühler.

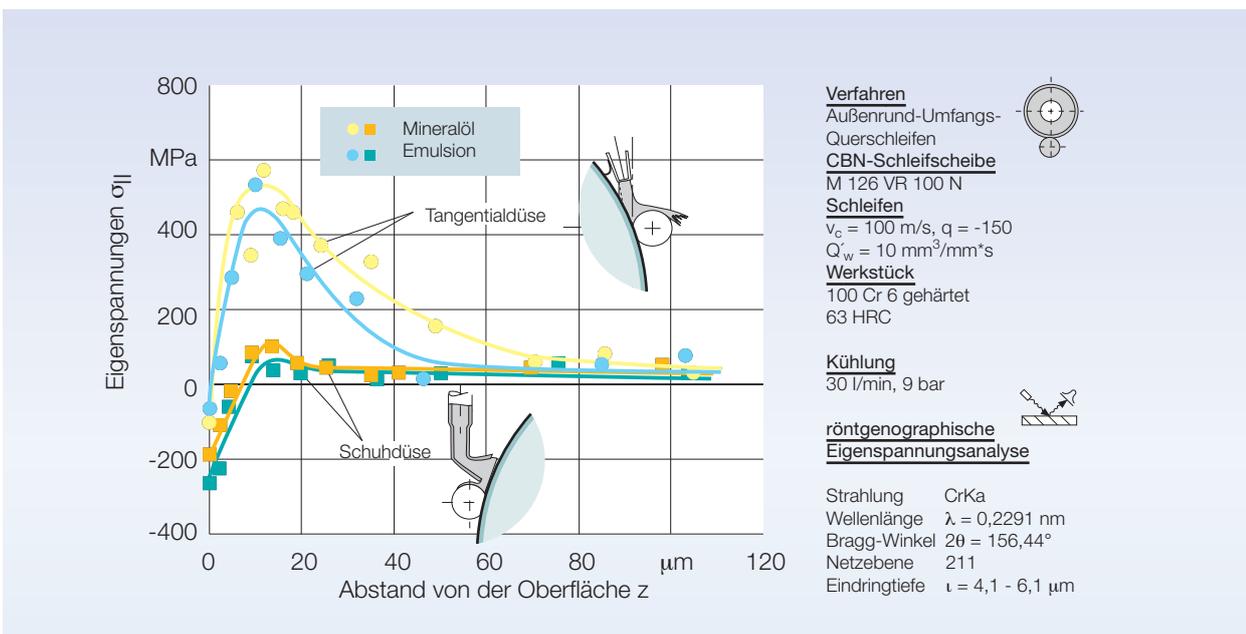


Bild 7.10: Einfluss von Kühlschmierung und Düsenart.

Der Wärmehaushalt in der Schleifzone kann auch über die Kühlschmierung beeinflusst werden, wie Bild 7.10 zeigt.

Wenn die in den Randzonen entstandenen Zugeigenspannungen die Bruchgrenze des Werkstoffs überschreiten, kann es zu Rissen kommen. Der Nachweis von Rissfreiheit kann einigen Aufwand darstellen. In Bild 7.11 sind einige Nachweisverfahren aufgeführt. Zum Nachweis von Zugeigenspannungen wird häufig noch das Nitalätzverfahren genutzt. Dies ist nicht immer eindeutig, ist nur für

7.5 Abrichten von Schleifscheiben

Schleifscheiben müssen konditioniert werden. Darunter versteht man das Abrichten bei konventionellen Schleifscheiben und bei hochharten Schleifscheiben zusätzlich das Schärfe. Beim Schärfe wird die Bindung soweit zurückgesetzt, dass ein ausreichender Kornüberstand (exposure) und damit ausreichend Spanraum entsteht. Bei konventionellen Schleifscheiben auf der Basis von Korund oder Siliziumkarbid wird durch Ab-

ge eingesetzt. In neuerer Zeit werden zunehmend synthetische polykristalline Diamanten für Abrichtwerkzeuge verwendet. Dabei haben CVD-Diamanten besonders günstige Eigenschaften, was die Härte und die Verschleißfestigkeit einerseits und die Zähigkeit andererseits anbelangt. Solche Diamantkörper haben zudem den Vorteil, geometrisch definierte und reproduzierbare Formen zu haben.

In Bild 7.12 sind grundsätzlich unterschiedliche Abrichtarten eingetragen, die sich nach stehenden und ro-

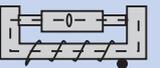
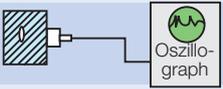
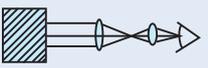
Rissprüfverfahren	Arbeitsprinzip	Beurteilung		
		Kosten	Beeinflussung des Werkstoffs	Risserkennung
Ätzen	 HNO ₃ , H ₂ SO ₄	mittel	gering	bedingt sicher
Magnetpulverprüfung		mittel	keine	sicher
Eindringverfahren	 Diff. Rot. Kontrast Weiß	gering	keine	sicher
	 Fluoresz. Flüssigkeit UV-Lampe	gering	keine	sicher
Ultraschallprüfung	 Oszillograph	hoch	keine	unsicher
Licht- und rasterelektronenmikroskopisches Verfahren		mittel hoch	keine	sicher

Bild 7.11: Verfahren zur Rissprüfung (nach Kosche).

Stichproben zu verwenden und ist zudem aufwendig. In neuerer Zeit wird ein interessantes Analyseverfahren nach dem Mikromagnetverfahren mit Aufnahme des Barkhausen-Rauschens [KARP95] in der Praxis erprobt. Dabei bedarf es zwar einer Kalibrierung, die das Prüfverfahren jeweils an den Werkstoff und an die geometrischen Bedingungen anpasst, das sich aber für die Serienfertigung zu eignen scheint.

richten sowohl die Makrogeometrie einer Schleifscheibe, das ist der Rundlauf und das Profil, als auch die Mikrogeometrie, also das „Schneidengebirge“ – auch als Wirkrautiefe bezeichnet – erzeugt.

Wegen der notwendigen stark abrasiven Wirkung einer Schleifscheibe, die abgerichtet werden soll, kommen nur Hartstoffe als Abrichtwerkzeuge in Frage. In der Serienfertigung werden ausschließlich diamantierte Werkzeuge

tierenden Abrichtwerkzeugen und nach gesteuertem und abformender Profilerzeugung unterscheiden. Feststehende gesteuerte Abrichter können als Einzeldiamanten oder in Fliesen oder „Igel“ ausgeführt sein.

Zu unterscheiden ist das Formabrichten, bei dem das Abrichtwerkzeug gesteuert wird, vom Profilarichten, bei dem das Abrichtwerkzeug die Kontur des zu erzeugenden Profils enthält. Außerdem können die Abrichter festste-

hend sein – das Abrichten entspricht dann einem Drehprozess – oder sie können selbst eine Drehbewegung ausführen – was dem Schleifen entspricht.

Das Formabrichten über die Steuerung ist prinzipiell sehr viel flexibler als das Profilabrichten; denn es muss (im Rahmen der passenden Abrichtform) im Wesentlichen nur das Steuerungsprogramm geändert werden, um ein anderes Profil zu erzeugen.

Gesteuertes Abrichten ist flexibler, Profilabrichten bietet sich für große Serien an.

Anforderungen auf den Rundlauf und Axialschlag geachtet werden.

Abrichten mit feststehenden Werkzeugen ist prinzipiell genauer, beim Abrichten mit rotierenden Werkzeugen auf den Rundlauf und Axialschlag von Spindel und Abrichtwerkzeug achten.

Das gesteuerte Abrichten mit einem feststehenden Einzeldiamanten (auch unter „Diaform“ bekannt) ist in Bild 7.13 dargestellt. Neuerdings werden CVD-

installiert werden, bei der gute Steifigkeit und hoher Rundlauf gegeben sein sollten. Um geringen Verschleiß bei Formrollen zu gewährleisten, sollte auf eine günstige Diamantierung geachtet werden (Bild 7.14). Dabei haben sich gesetzte polykristalline Diamanten bewährt [LIER01]

Beim Profilabrichten kann auch mit stehenden oder rotierenden Abrichtwerkzeugen gearbeitet werden. Das Profil ist in den Abrichtern eingearbeitet, was diese Verfahren weniger formflexibel macht. Das Abrichten mit einem Blockwerkzeug in Form einer diamant-

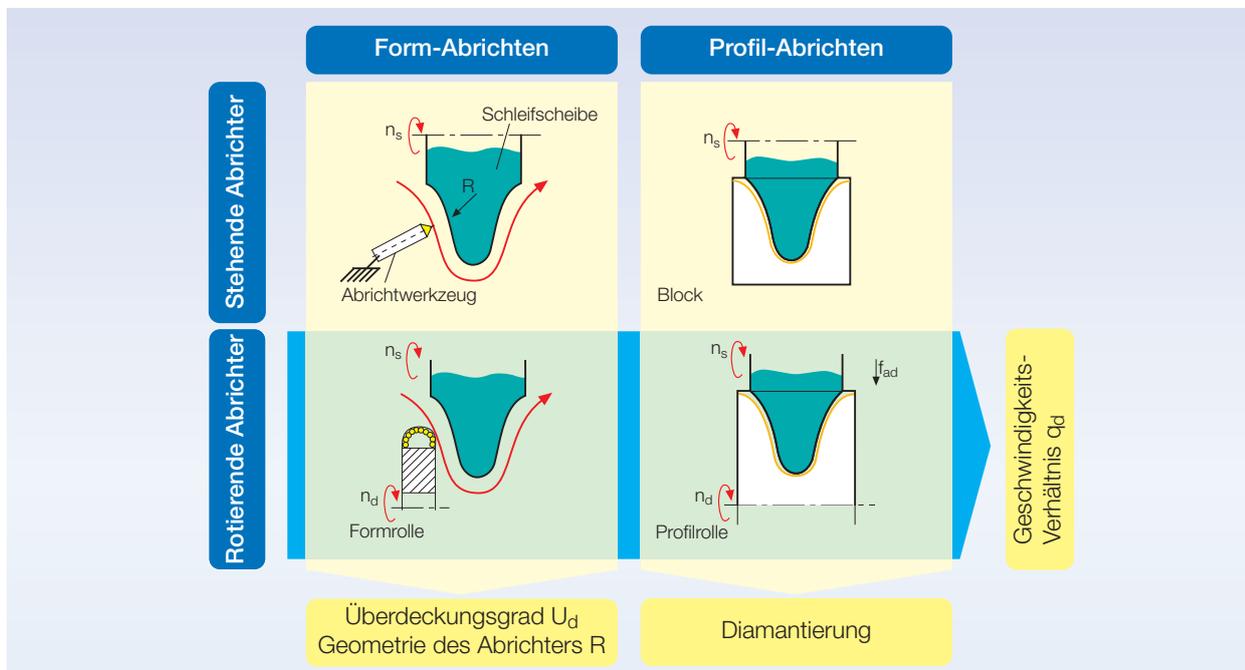


Bild 7.12: Abrichtverfahren (nach Dr. Kaiser).

Das Abrichten mit einem stehenden Werkzeug ist prinzipiell genauer als das Abrichten mit rotierendem Werkzeug; denn Fehler des Rundlaufes und des Taumelns, die von der Abrichtspindel oder dem Abrichtwerkzeug herrühren, können bei feststehenden Abrichtern nicht auftreten. Allerdings lässt sich dieser prinzipielle Nachteil durch die Qualität der Spindel und des rotierenden Werkzeugs weitgehend kompensieren. Es sollte daher bei hohen

Diamanten eingesetzt, um den Verschleiß gering zu halten und Splintern zu vermeiden. Für gerade oder schwach geneigte Konturen werden auch Fliesen oder „Igel“ verwendet, in denen mehrere Diamanten die Abrichtarbeit übernehmen und dadurch weniger verschleifen.

Eine interessante Alternative zum Diaform-Verfahren ist der Einsatz einer Formrolle, die die Flexibilität der gesteuerten Werkzeugführung mit geringem Verschleiß verbindet. Allerdings muss eine Abrichtspindel in der Schleifmaschine

tierten Fliese oder eines „Igels“ hat gegenüber dem Abrichten mit Einzeldiamanten den Vorteil, dass mehrere Diamanten oder ein Haufwerk raschem Verschleiß entgegen wirken. Derartige Vielkornabrichter eignen sich für gerade Mantellinien an der Schleifscheibe. Für große Serien bietet sich das Abrichten mit einer Profilrolle an; denn damit ist eine lange Profilhaltigkeit zu erreichen (siehe Bild 7.12, rechts unten). Allerdings ist eine Profilrolle aufwendig und nur für das ihr eigene Profil nutzbar.



Anwendung

- Abrichten von Profilen mit höchster Genauigkeit (Korund, SiC)
- Schrägstellung um $< 5^\circ$ verhindert Abnutzung der unteren Seite, dadurch
- 2-fach nutzbar
- Radiusgenauigkeiten: $\pm 0,02\text{mm}$

Diamantqualitäten

- Nahtsteine (Sporndiamant, Drilling)
- PKD Diamant (ohne Bedeutung)
- CVD-Diamant

Bild 7.13: Diaform-Verfahren zum Abrichten mit Einzeldiamanten (nach Dr. Kaiser).

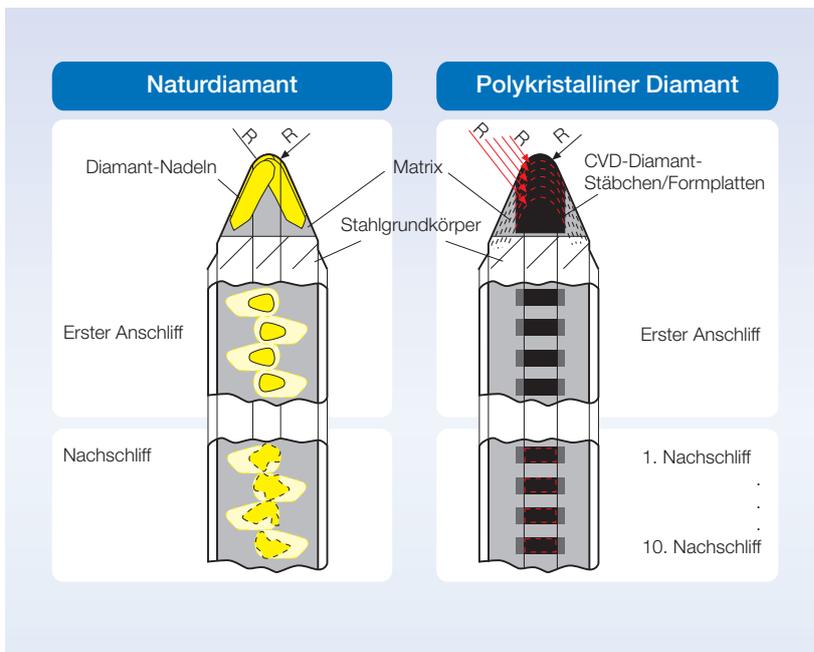


Bild 7.14: Nachschleifen von Formrollen.

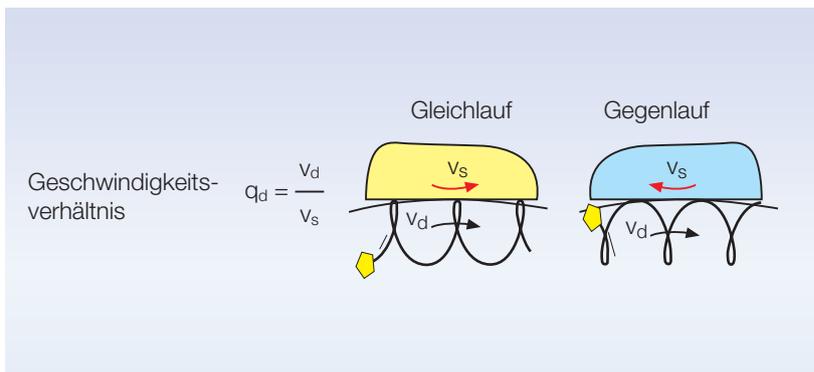


Bild 7.15: Bewegungen beim Gleich- und Gegenlaufabrichten.

Bei allen Abrichtverfahren mit rotierendem Abrichtwerkzeug können die Schleifscheibe und die Abrichtrolle oder die Profilrolle gleiche oder entgegengesetzte Drehrichtung haben (Bild 7.15). Dadurch kann die Wirkrautiefe in weiten Grenzen beeinflusst werden: Bei Gleichlauf kommt ein Abrichtkorn nur kurz in Kontakt mit der Schleifscheibe, es entsteht eine große Wirkrautiefe; beim Gegenlauf dagegen kommt es zu längerem Kontakt und dadurch um den Faktor 2 bis 3 geringere Wirkrautiefe.

7.6 Schleifkosten

Schleifen ist ein „Doppelprozess“, d. h. neben dem eigentlichen Schleifvorgang muss auch das Abrichten in einer Kostenbetrachtung berücksichtigt werden. Im Folgenden wird auf die in Abschnitt 1 erläuterten Kostenformeln für den Maschinenzeitsatz und die Fertigungskosten je Stück (also Herstellkosten ohne Material) nach Gleichungen (1.3) und (1.4) aufgesetzt.

Die Schleifkosten je Einheit sind dann:

$$K_F = K_{\text{masch}} + K_{\text{wz}} + K_d \quad (7.6)$$

mit:

K_{masch} : Maschinenkosten einschließlich Lohn (je Stück).

K_{wz} : Kosten des Schleifwerkzeugs je Stück.

K_d : Kosten für das Abrichten auf das Stück bezogen.

Die Maschinenkosten ergeben sich aus dem Maschinenzeitsatz zuzüglich Lohnkosten (Platzkosten je Zeiteinheit k_{pl}) und der Gesamtzeit $t_{\text{ges}} = t_h + t_n$

$$K_{\text{masch}} = k_{pl} \times (t_h + t_n) \quad (7.7)$$

Die Hauptzeit t_h lässt sich über die radiale Vorschubgeschwindigkeit (beim

Einstechschleifen) und das Aufmaß oder aus dem abzuschleifenden Volumen V_{WSt} und dem Zeitspanvolumen QV ermitteln. Daraus wiederum ergibt sich das beim Schleifen verbrauchte Scheibenvolumen V_s über das oben definierte Schleifverhältnis $G = V_{WSt}/V_s$.

$$K_{Wz} = V_s \times k_s \quad (7.8)$$

mit den Scheibenkosten je Volumeneinheit k_s . Hinzu kommen dann die Abrichtkosten K_d . Diese sind:

$$K_d = (k_{pl} \times t_{ges,d} + V_{s,d} \times k_d)/n + K_{Wz,d}/n \quad (7.9)$$

mit der gesamten Abrichtzeit $t_{ges,d}$, dem durch Abrichten verloren gegangenen Scheibenvolumen $V_{s,d}$ und dem durch Abrichten verbrauchten Abrichtmaterial $K_{Wz,d}$. Um den auf ein Teil entfallenden Anteil zu erfassen, ist durch die Standmengen zu dividieren, also durch die Anzahl der Teile bis zum nächsten Abrichtzyklus.

Beispiel: Einstechschleifen einer Welle aus Vergütungsstahl 42 CrMo V 4 mit Durchmesser $d = 30$ mm, Schleifbreite $a_p = 20$ mm und Schleifaufmaß $w = 0.25$ mm bei einer Toleranzbreite von 10 mm. Geschliffen wird mit Korund ($k_s = \text{Euro } 100 \cdot 10^{-6}/\text{mm}^3$, $G = 40$) und wegen der geforderten Genauigkeit in einem zweistufigen Arbeitsgang (Schruppen mit $v_{fr} = 1.5$ mm/min, Schlichten mit $v_{fr} = 0.25$ mm/min) Die Standmenge der Scheibe bis zum Abrichten sei 15. Mit Praxisdaten ergeben sich folgende Kosten je Werkstück:

$$KF = 4.10 \text{ € mit den Anteilen: } K_{masch}/K_F = 0.90, K_{Wz}/K_F = 0.08, K_d/K_F = 0.02.$$

Wird die gleiche Aufgabe mit einer hochharten Schleifscheibe auf CBN-Basis bearbeitet, steigt der Ansatz für das Werkzeug auf ca. 15 %, die Schleifzeit und damit die Maschinen abhängigen Kosten K_{masch} werden geringer, möglicherweise überproportional geringer.

galvanische CBN-Schnecken



- Rauheit R_z 2,7...4,5 μm
- keine Zahnfußbearbeitung
- fha-Korrekturen nur durch Schleifschneckenkorrekturen
- hohe Prozessstabilität
- sehr kurze Bearbeitungszeit
- Einsatz für Module M 1,0...5,0
- topologisches Schleifen möglich

keramische Schleifschnecken



- Rauheit R_z 1,6...3,5 μm (beeinflussbar durch Abrichttechnik)
- Zahnfußbearbeitung
- fha-Korrekturen durch Abrichten einstellbar
- hohe Prozesssicherheit
- kurze Bearbeitungszeit
- zusätzliches Abrichten
- Modulbereich M 0,4...9,0
- topologisches Schleifen flexibel durch Abrichttechnik

Bild 7.16: Wälzschleifen von Verzahnungen (nach Liebherr und Dr. Kaiser).

7.7 Wälzschleifen

Für die Serienfertigung von Verzahnungen hat das Wälzschleifen große Bedeutung. Durch eine schneckenförmige Schleifscheibe werden die Zahnflanken feinbearbeitet. Dazu werden auch galvanisch gebundene CBN-Scheiben eingesetzt. Konventionelle und CBN Scheiben haben ihre typischen Eigenschaften (Bild 7.16).

Einige charakteristische Parameter für das Abrichten und das Wälzschleifen zeigt Bild 7.17 [LIER01].

Die Entwicklung dieses für die Serienfertigung in der Automobilindustrie und der Antriebs- und Getriebetechnik sehr bedeutsamen Verfahrens hat in den letzten Jahren steile Fortschritte gemacht wie Bild 7.18 zeigt. Die Steigerungen der Schnittgeschwindigkeit und des Zeitspanvolumens und zugleich die Senkung der notwendigen Zahl von Zustellungen haben zu drastischer Verkürzung der Bearbeitungszeiten geführt.

7.8 Bearbeitungsbeispiel Kurbelwelle

Kurbelwellen gehören zu den höchstbeanspruchten Bauteilen im Triebwerk eines Verbrennungsmotors. Ihre Bearbeitung ist komplex wegen ihrer Funktionsflächen auf unterschiedlichen Rotationsachsen. Die geforderten geometrischen Genauigkeiten und die physikalischen Eigenschaften der Randzonen sind kritisch. Im Zuge der Forderung nach Leichtbau wird die Beanspruchung gerade bei höher verdichteten Motoren derart gesteigert, dass die Qualität in engen Grenzen zuverlässig gehalten werden muss (Bild 7.19). Hinzu kommt wegen der Komplexität des Bauteils eine umfangreiche Prozesskette, die in groben Zügen in Bild 7.20 wiedergegeben ist.

Die gesamte Prozesskette in allen einzelnen Schritten umfasst mehr als 100 Positionen. Für den Teil der Hartbearbeitung nach dem Härten und Rollieren konnte durch die Entwicklung der numerisch gesteuerten Schleifmaschinen

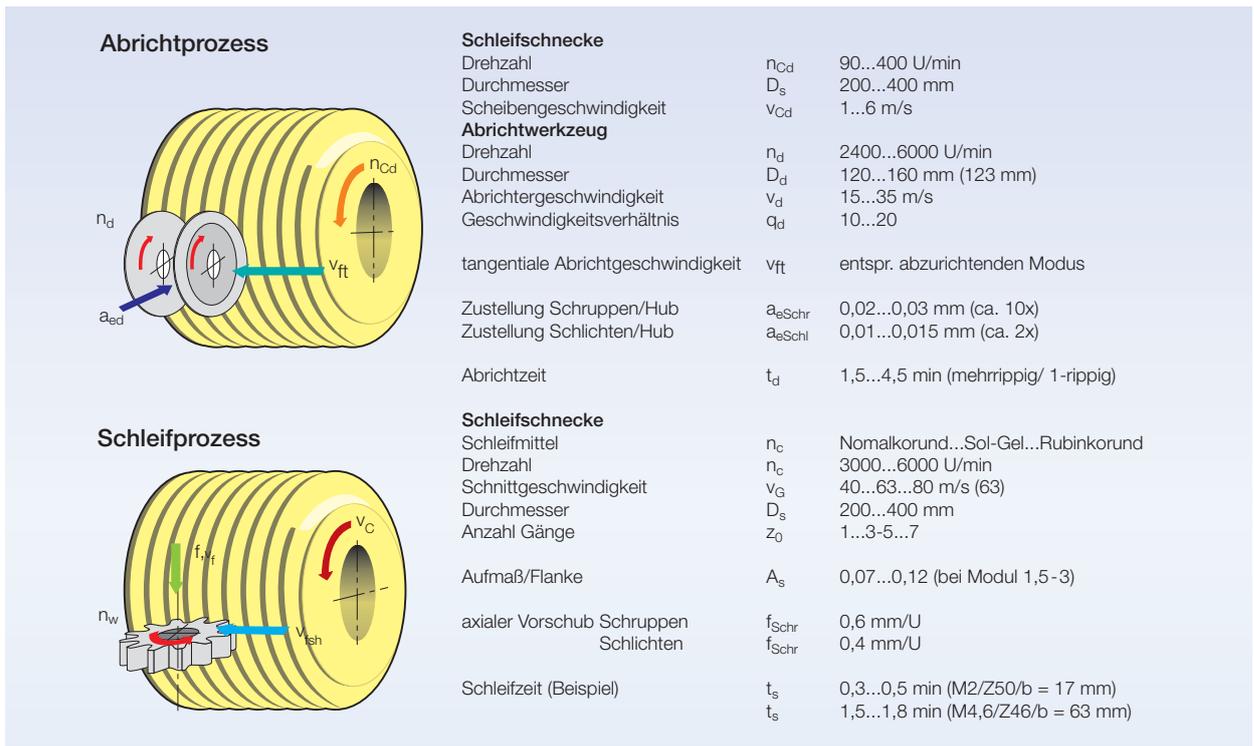


Bild 7.17: Parameter des Wälzschleifens (nach Lierse).

eine wesentliche Verkürzung der Prozesskette durch das bahngesteuerte Schleifen der Hublager erreicht werden [BECK04]. Während bis zu dieser Entwicklung das Werkstück zum Schleifen der Hublager für jede Drehachse ex-

zentrisch in einer Vorrichtung aufgespannt und geschliffen werden musste, können nun durch Verfahren des Schleifspindelstocks mit hoher Dynamik Hauptlager und Hublager in einer Aufspannung bearbeitet werden (Bild 7.21).

Neben einem Zeitgewinn und nicht zuletzt geringerem logistischem Aufwand kann damit auch ein Qualitätsgewinn verbucht werden. Es wird nicht neu aufgespannt, das bedeutet geringere Fehlerursachen. Die ausschließlich zentri-

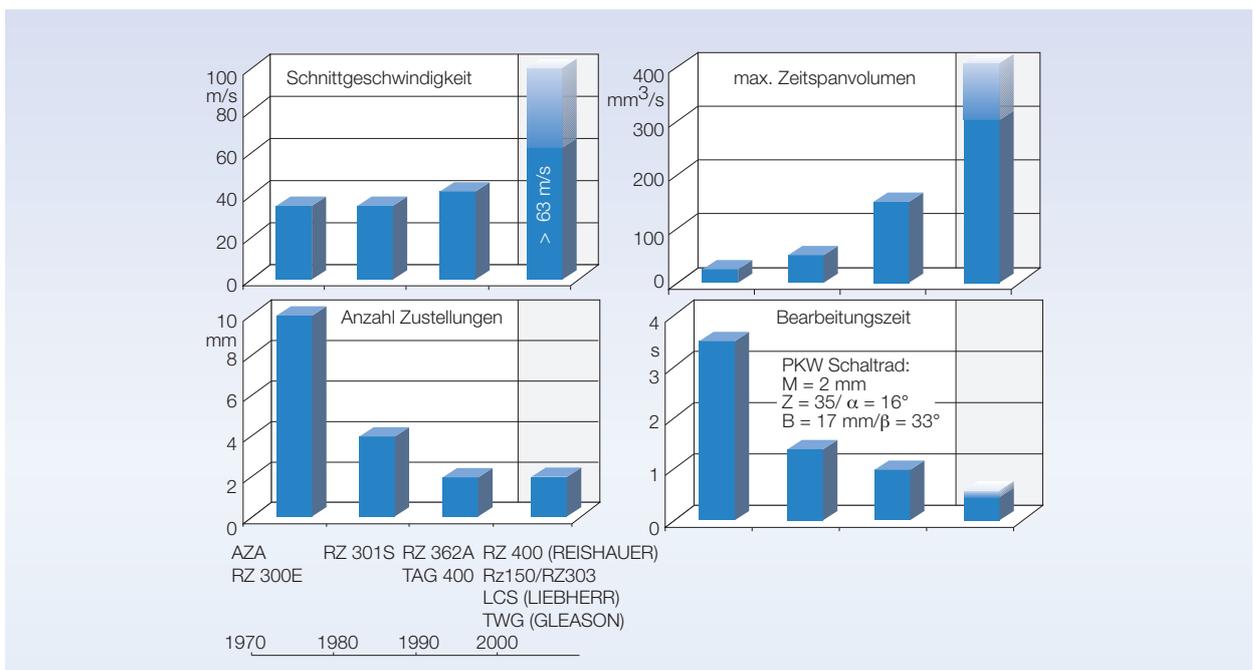


Bild 7.18: Entwicklung des Wälzschleifens (nach Lierse).

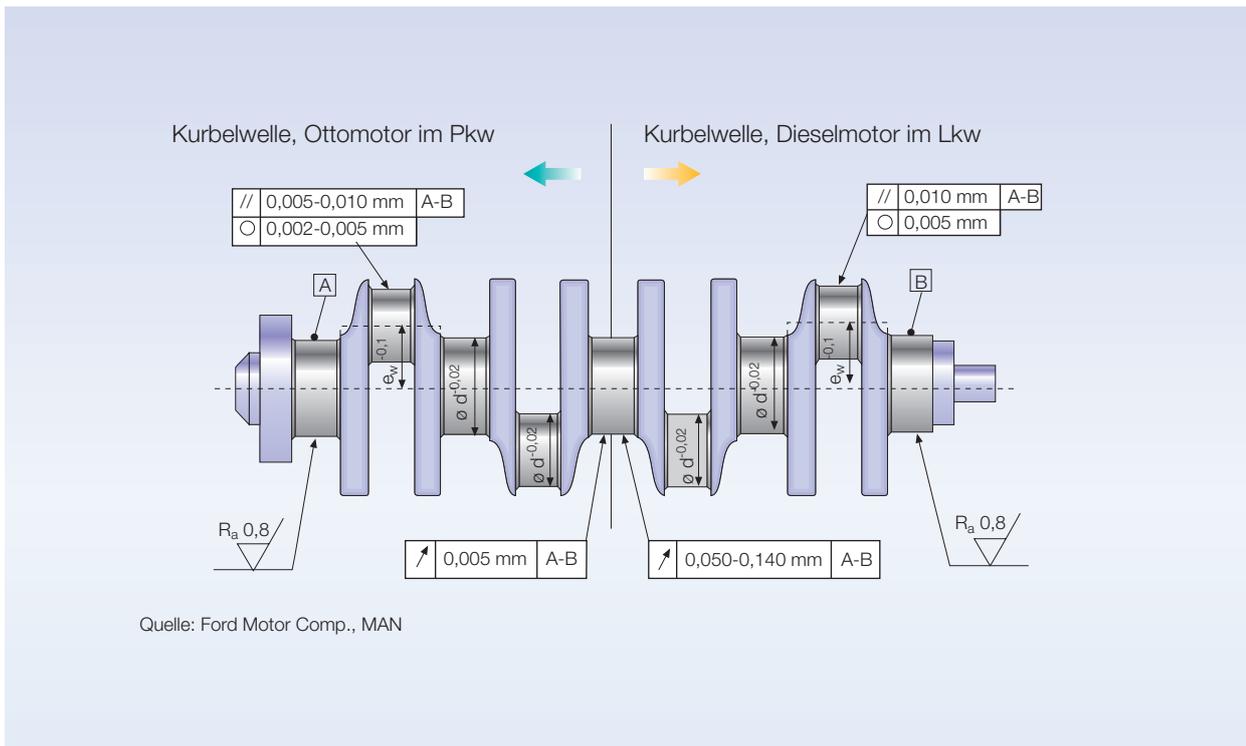


Bild 7.19: Genauigkeitsanforderungen von Kurbelwellen.

sche Aufspannung heißt auch, dass bei exzentrischer, unwuchtiger Drehung die technologisch möglichen Drehzahlen und Geschwindigkeiten gewählt und damit Produktivitätsgewinne erzielt werden können. Durch eine günstige

Prozessauslegung gelingt es zudem, bei hoher Produktivität die physikalischen Randzoneneigenschaften, die für das Dauerstandsverhalten wichtig sind, zu optimieren [BECK04]. Beim Schleifen von Kurbelwellen liegt allerdings ein

besonderes Problem im Schleifen der axialen Passlager vor; denn dort bedeuten hohe Aufmaße, dass es zu großen Kontaktflächen zwischen Schleifscheibe und Werkstück kommt. Wenn diese Materialanhäufungen durch Ein-



Bild 7.20: Prozesskette zur Herstellung von Kurbelwellen (nach J.C. Becker).

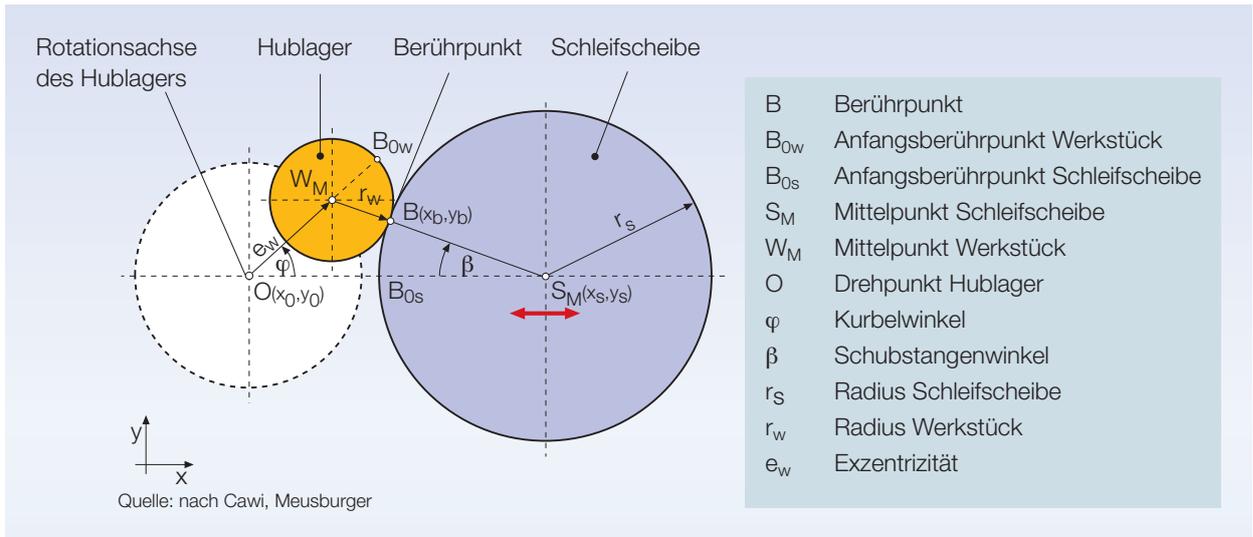


Bild 7.20: Bahn-gesteuertes Hublagerschleifen.

stehtschleifen bearbeitet werden, ist ein langer radialer Weg zurückzulegen, bei dem zudem die Schleifscheibe nur zu einem geringen Teil wirksam ist. Den großen Kontaktflächen kann durch Hinterschleifen der Scheiben entgegengewirkt werden, womit auch die Zufuhr von Kühlschmierstoff erleichtert wird. Eine Alternative ist das Schleifen der Passlager mit axialem Vorschub. Voraussetzung ist, dass das Aufmaß in Grenzen gehalten werden kann. Da-

durch können die Bearbeitungszeit verkürzt und Randzonenschädigungen vermieden werden.

7.9 Schleifprobleme, Praxistipps

Die Empfehlungen gehen von einer Stahlzerspanung aus, wenn nicht anders angegeben. Sie sind nach dem Erscheinungsbild geordnet, mit „•“ sind die möglichen Maßnahmen genannt.

Merkmal	Maßnahmen
ungenügende Oberflächengüte zu große Wirkrautiefe	<ul style="list-style-type: none"> • Abrichtvorschub verringern • Im Gegenlauf abrichten • Wirkbreite des Abrichters erhöhen • Schnittgeschwindigkeit erhöhen • Vorschub erniedrigen • Länger Ausfeuern • Scheibe mit feinerer Körnung wählen • Auf Ölkühlschmierung umstellen
Rattermarken Fremderregte oder selbsterregte Schwingungen	<ul style="list-style-type: none"> • Scheibe auswuchten • Spindel prüfen • Scheibenrundlauf prüfen, abrichten • Weichere Scheibe wählen • Geringeren Abrichtvorschub wählen • Scheibendrehzahl um 10% verringern



<p>Einsteichschleifen: Schleifbrand, Mikrorisse Temperatur in Kontaktzone zu hoch Aufladung der Scheibe</p>	<ul style="list-style-type: none">• Abrichtvorschub erhöhen• Breite des Abrichters verringern• Häufiger abrichten• im Gleichlauf abrichten• Schleifgeschwindigkeit verringern• Offene Struktur der Scheibe wählen• Radialvorschub verringern• Weichere Scheibe wählen• Scheibe mit SG-Korn einsetzen• Kühlschmierung verbessern• Auf Ölkühschmierung umstellen
<p>Stirnschleifen: Schleifbrand zu große Kontaktlänge</p>	<ul style="list-style-type: none">• Auf Schrägeinsteichschleifen umstellen• Axialvorschub verringern• Offene Struktur der Scheibe wählen• Abrichtvorschub erhöhen• Teilweise auf Einsteichschleifen umstellen
<p>Maßfehler zu hohe Radialkräfte Nachgiebigkeit von Werkstück oder Aufspannung</p>	<ul style="list-style-type: none">• Ausfeuerphase erhöhen• Häufiger abrichten• Abrichtvorschub erhöhen• Im Gleichlauf abrichten• Weichere Scheibe wählen• Scheibe mit SG-Korn einsetzen• Schnittgeschwindigkeit erhöhen
<p>Formfehler zu hohe Radialkräfte Nachgiebigkeit des Werkstücks geometrische Fehler im Abrichtsystem</p>	<ul style="list-style-type: none">• Abrichtsystem überprüfen• Abrichtvorschub erhöhen• Im Gleichlauf abrichten• Weichere Scheibe wählen• Schnittgeschwindigkeit erhöhen• Scheibe mit SG-Korn einsetzen• Lünette setzen
<p>Hoher Scheibenverschleiß starker Kornausbruch hoher Bindungsverschleiß</p>	<ul style="list-style-type: none">• Härtere Scheibe wählen• Schnittgeschwindigkeit erhöhen• Vorschub vermindern• Abrichtvorschub vermindern• Im Gegenlauf abrichte• Auf Ölkühschmierung umstellen

Literatur

- [ANDR02] Andrae, P.: Hochleistungserspanung von Aluminiumlegierungen.
Dr.-Ing. Diss. Univ. Hannover 2002.
- [AWIS89] Awiszus, B.: Methode zu rechnergestützten Konstruktion von Schmiedewerkzeugen.
Dr.-Ing. Diss. Univ. Hannover 1989.
- [BECK04] Becker, J. K.: Bahngesteuertes Schleifen von Kurbelwellen.
Dr.-Ing. Diss. Universität Hannover 2004.
- [BENA03] Ben Amor, R.: Thermomechanische Wirkmechanismen und Spanbildung bei der Hochgeschwindigkeitserspanung.
Dr.-Ing. Diss. Univ. Hannover 2003.
- [BMW08] Maschinenstundensatzrechner,
Softwarepaket 9.1., Das neue Portal,
www.softwarepaket.de/9.0/programme/stundenverrechnungssatz/.
- [BRAN08] Brandes, A.: Positionierung technologischer Schnittstellen.
Dr.-Ing. Diss. Leibniz Univ. Hannover 2008.
- [BRAN95] Brandt, D.: Randzonenbeeinflussung beim Hartdrehen.
Dr.-Ing. Diss. Univ. Hannover, 1995.
- [BRIN91] Brinksmeier, E.: Prozess- und Werkstückqualität in der Feinbearbeitung.
Hab. Schrift Univ. Hannover, 1991.
- [BYRS93] Byrne, G., Scholta, E.: Environmental Clean Machining Processes – A Strategic Approach.
Annals of the CIRP 42 (1993) 1, p. 471-474.
- [DENK07] Denkena, B., Köhler, J.: Leistungssteigerung beim Fräsen von Titan.
Tagungsbericht Seminar „Neue Fertigungstechnologien in der Luft- und Raumfahrt“, Hannover, Nov. 2007.
- [DENK08] Denkena, B., de Leon, L., Köhler, J.: Performance Enhancement in Milling Titanium.
Proc. of the 3rd CIRP Intern. Conf. on High Performance Cutting, Dublin, Juni 2008.
- [DORN02] Dornfeld, D.: Strategies for Preventing and Minimizing Burr Formations.
Proceedings of the CIRP International Conference on High Performance Cutting, Aachen 2004 pp. 83-99.
- [FALL98] Fallböhmer, P.: Advanced Cutting Tools for the Finishing of Dies and Molds.
Dr.-Ing. Diss. Univ. Hannover 1998.
- [GEY02] Gey, C.: Prozessauslegung für das Flankenfräsen von Titan.
Dr.-Ing. Diss. Univ. Hannover 2002.
- [GILL99] Gillespie, LaRoux K.: Deburring and Edge Finishing Handbook. SME, Michigan 1999.

Literatur

- [GROP05] Groppe, M.: Prozessauslegung für die Hochleistungsfräsbearbeitung von Aluminium-Strukturbauteilen. Dr.-Ing. Diss. Univ. Hannover 2005.
- [HERT90] Hertogs, J.A.M. e.a.: Neuere Anwendungen der ausscheidungshärtenden ferritisch-perlitischen (AFP) Stähle für geschmiedete Bauteile im Fahrwerk und Motor. Thyssen Edelstahl Techn. Berichte, 16 (1990) 1, S.12 ff.
- [IDS 95] Industrieverband Deutscher Schmieden: Schmiedeteile – Gestaltung, Anwendung, Beispiele. Informationsstelle Schmiedestück-Verwendung, Hagen 1995.
- [JIVI08] Jivishov, V.: Mikrogeometrische Einflüsse beim Weich- und Hartspanen. Dr.-Ing. Diss. Leibniz Universität Hannover 2008.
- [KARP95] Karpuschewski, B.: Mikromagnetische Randzonenanalyse geschliffener einsatzgehärteter Bauteile. Dr.-Ing.Diss. Univ. Hannover 1995.
- [KERS92] Kersten, G.: Optische und antastende Prüfung der Gegenlaufläche von Radial-Wellendichtungen. Dr.-Ing. Diss. Univ. Hannover 1992.
- [KOCH96] Koch, K.F.: Technologie des Hochpräzisions-Hartdrehens. Dr.-Ing. Diss. RWTH Aachen 1996.
- [LIER01] Lierse, T, Kaiser, M.: Abrichten von Schleifwerkzeugen für die Verzahnung, IDR 35 (2001) Nr. 4, S. 297-310.
- [LLR03] Firmendruckschrift Long Life Räumen, LLR, Balve 2003.
- [PREV] Prem, E., Vogt, R.: Grundlagen der Schadensprävention. Freudenberg Simrit, Eigenverlag.
- [REFA93] REFA: Lexikon der Betriebsorganisation: Carl-Hanser-Verlag, 1993. S.195.
- [SCHN92] Schnadt-Kirschner, R.: Werkstoffeigenschaften und Verschleiß beim Stirnplanfräsen von Edelbaustählen. Dr.-Ing. Diss. Univ. Hannover 1992.
- [SCHW80] Schweizer, K.: Räumen, Handbuch der Fertigungstechnik. Bd. 3/2, Hanser-Verlag 1980.
- [SCHW97] Schwab, J.: Kompensation der Fräserabdrängung beim Schlichten von Hohlformen. Dr.-Ing. Diss. Univ. Hannover, 1997.
- [SPIN95] Spintig, W.: Prozessführung und Werkstoffbeeinflussung beim Bohren gehärteter Stähle. Dr.-Ing. Diss. Univ. Hannover 1995.
- [TÖND04] Tönshoff, H. K., Denkena, B.: Spanen-Grundlagen. Springer Verlag 2004.

Literatur

- [TÖNS87] Tönshoff, H. K.: Processing alternatives for cost reduction. Ann. CIRP 36 (1987) p. 445-447.
- [TÖNS95] Tönshoff, H. K.: Werkzeugmaschinen: Grundlagen. Springer Verlag 1995.
- [TÖNS01] Tönshoff, H. K.: Übersicht über die Fertigungsverfahren. Dubbel 20 (2001), S. 3.
- [URBA09] Urban, B.: Kinematische und mechanische Wirkungen des KugelkopffräSENS. Dr.-Ing. Diss. Leibniz Univ. Hannover 2009.
- [VIER70] Vieregge, G.: Zerspanung der Eisenwerkstoffe. Verlag Stahleisen, 2. Aufl. 1970.
- [WARN74] Warnecke, G.: Spanentstehung metallischer Werkstoffe. Dr.-Ing. Diss. TU Hannover 1974.
- [WARN88] Warnecke, G.: Zerspanen von Stahl Ck45. Inst. für den Wiss. Film, Göttingen, Film E 2949, Auszüge.
- [WEIN99]. Weinert, K.: Trockenbearbeitung und Minimalmengenkühlschmierung. Springer Verlag 1999.
- [WINK83] Winkler, H.: Zerspanbarkeit von niedriglegierten Kohlenstoffstählen nach gesteuerter Abkühlung. Dr.-Ing. Diss. Universität Hannover 1983.
- [WINK88] Winkler, H.: Wirtschaftliches Spanen von Schmiedeteilen in der Praxis. Informationsstelle Schmiedestück-Verwendung im Industrieverband Deutscher Schmieden e. V., Hagen 1988.
- [WOBK95] Wobker, H.-G.: Hartbearbeitung. Habilitationsschrift, Universität Hannover 1995, zzgl. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2, Nr. 420, VDI-Verlag1997.

Bildernachweis

Soweit nicht im Folgenden angegeben, stammen sämtliche Bilder aus der Bildersammlung des Verfassers und aus dem Buch Tönshoff, H. K., Denkena, B: Spanen – Grundlagen, Springer-Verlag, Heidelberg, 2004

7.12 bis 7.18	Dr. Kaiser Diamantwerkzeuge, Celle
4.8; 4.12	Gühring oHG, Albstadt
1.6; 6.11	Hirschvogel Komponenten GmbH, Schongau
2.22 bis 2.24; 2.29; 2.30; 2.32; 2.35; 2.36; 3.9; 3.11; 4.6	Infostelle Industrieverband Massivumformung e. V., Hagen
4.23	MAPAL Dr. Kress KG, Aalen
2.21; 2.38; 3.6; 3.8; 6.4	Sandvik GmbH, Düsseldorf
3.20	Toenshoff/Inasaki: Sensors in Manufacturing. Wiley-VCH, Weinheim
4.7; 4.11; 4.13	Walter AG, Tübingen

Normennachweis

Normenbezeichnung	Titel
DIN 338	Kurze Spiralbohrer mit Zylinderschaft, Beuth Verlag 11.2006
DIN ISO 513	Klassifizierung und Anwendung von harten Schneidstoffen für die Metallzerspanung mit geometrisch bestimmten Schneiden. Beuth Verlag 11.2005
DIN 770-2	Schaftquerschnitte für Dreh- und Hobelmeißel, allseitig bearbeitete Schäfte ohne besondere Anforderungen an die Genauigkeit, Beuth Verlag 08.1962
DIN 1412	Spiralbohrer aus Schnellrbeitsstahl - Anschliffformen. Beuth Verlag 03.2001
DIN 1414-1	Technische Lieferbedingungen für Spiralbohrer aus Schnellarbeitsstahl - Teil 1: Anforderungen, Beuth Verlag 11.2006
DIN 1832	Wendeschnidplatten für Zerspanwerkzeuge - Bezeichnung (ISO 1832:2004), Beuth Verlag 11.2005
DIN 1836	Werkzeug-Anwendungsgruppen zum Zerspanen, Beuth Verlag 01.1984
DIN 3761-1	Radial-Wellendichtringe für Kraftfahrzeuge, Beuth Verlag 01.1984
DIN EN ISO 4287	Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Benennungen, Definitionen und Kenngrößen
DIN 4983	Klemmhalter mit Vierkantschaft und Kurzklemmhalter für Wendeschnidplatten – Aufbau der Bezeichnung, Beuth Verlag 07.2004
DIN 4984-1	Klemmhalter mit Vierkantschaft für Wendeschnidplatten - Teil 1: Übersicht, Zuordnung und Bestimmung der Maße, Beuth Verlag 07.2004
ISO 6462	ISO 6462: Face milling cutters with indexable inserts – Dimensions.
DIN 6535	Zylinderschäfte für Spiralbohrer und Schaftfräser aus Hartmetall. Beuth Verlag 02.1992
DIN 6580	Begriffe der Zerspantechnik; Bewegungen und Geometrie des Zerspanvorganges, Beuth Verlag 10.1985
DIN 6581	Begriffe der Zerspantechnik; Bezugssysteme und Winkel am Schneidteil des Werkzeuges, Beuth Verlag 10.1985
DIN 6583	Begriffe der Zerspantechnik; Standbegriffe, Beuth Verlag 09.1981

Normennachweis

DIN 6584	Begriffe der Zerspantechnik; Kräfte, Energie, Arbeit, Leistungen, Beuth Verlag 10.1982
ISO 7388 / DIN 69871	Steilkegelschäfte für automatischen Werkzeugwechsel - Teil 1: Form A, Form AD, Form B und Ausführung mit Datenträger, Beuth Verlag 10.1995
DIN 7523-2	Gestaltung von Gesenkschmiedestücken, Beuth Verlag 1986
DIN 7526	Toleranzen und zulässige Abweichungen für Gesenkschmiedestücke, Beuth Verlag
DIN 8589-0	Fertigungsverfahren Spanen - Teil 0: Allgemeines; Einordnung, Unterteilung, Begriffe, Beuth Verlag 09.2003
DIN 8589-2	Fertigungsverfahren Spanen - Teil 2: Bohren, Senken, Reiben; Einordnung, Unterteilung, Begriffe, Beuth Verlag 09.2003
DIN 8589-3	Fertigungsverfahren Spanen - Teil 3: Fräsen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe, Beuth Verlag 09.2003
DIN 8589-11	Fertigungsverfahren Spanen - Teil 11: Schleifen mit rotierendem Werkzeug; Einordnung, Unterteilung, Begriffe, Beuth Verlag 09.2003
DIN 8589-12	Fertigungsverfahren Spanen - Teil 12: Bandschleifen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe, Beuth Verlag 09.2003
DIN 8589-13	Fertigungsverfahren Spanen - Teil 13: Hubschleifen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe, Beuth Verlag 09.2003
DIN 8589-14	Fertigungsverfahren Spanen - Teil 14: Honen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe, Beuth Verlag 09.2003
DIN 8589-15	Fertigungsverfahren Spanen - Teil 15: Läppen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe, Beuth Verlag 09.2003
DIN 8589-17	Fertigungsverfahren Spanen - Teil 17: Gleitspanen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe, Beuth Verlag 09.2003
DIN EN 10243-1	Gesenkschmiedeteile aus Stahl - Maßtoleranzen - Teil 1: Warm hergestellt in Hämmern und Senkrecht-Pressen; Deutsche Fassung EN 10243-1:1999, Berichtigungen zu DIN EN 10243-1:2000-06, Beuth Verlag 12.2007
DIN 69893-1	Kegel-Hohlschäfte mit Plananlage - Teil 1: Kegel-Hohlschäfte Form A und Form C; Maße und Ausführung, Beuth Verlag 10.2006

Impressum

Manuskript:	Prof. Dr.-Ing. E. h. mult. Dr. h. c. Hans Kurt Tönshoff, Garbsen
Redaktionsbeirat:	Dr.-Ing. Joachim Friedhoff, Bottrop Dr.-Ing. Markus Groppe, Düsseldorf Dipl.-Ing. Reinhold Pollig, Daun Dipl.-Ing. Volkhard Schnitzler, Witten Dipl.-Ing. Werner Specker, Fridingen Dipl.-Wirtsch.-Ing. Harro Wörner, Schongau
Bilder:	Siehe Bildernachweis Seite 119
Verantwortlich für die Gesamtherstellung:	Infostelle Industrieverband Massivumformung e. V. Goldene Pforte 1, 58093 Hagen www.metalfom.de
Titelbild:	Grafik Design Peter Kanthak, 58739 Wickede
Layout und Satz:	Grafik Design Peter Kanthak, 58739 Wickede
Druckschriften-Nr.:	EI-WS-0410-50DOM
Ausgabe:	April 2010
ISBN:	3-928726-23-8

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch die der Übersetzung und der Vervielfältigung, vorbehalten. Auszugsweise Wiedergabe des Inhalts nur nach Rückfrage bei der **Infostelle** Industrieverband Massivumformung e. V. mit Quellenangabe gestattet.

Den Veröffentlichungen der **Infostelle** Industrieverband Massivumformung e. V. liegen die Ergebnisse der Gemeinschaftsforschung der im Industrieverband Massivumformung e. V. zusammen geschlossenen Mitgliedsunternehmen zugrunde.

Infostelle

Industrieverband
Massivumformung e. V.

Goldene Pforte 1
58093 Hagen, Deutschland
Telefon: +49 (0) 23 31 / 95 88 28
Telefax: +49 (0) 23 31 / 95 87 28

E-Mail: orders@metalform.de

Weitere Informationen unter:
www.metalform.de

ISBN: 3-928726-23-8

Den Veröffentlichungen
der **Infostelle**
liegen die Ergebnisse
der Gemeinschaftsforschung
der im Industrieverband
Massivumformung e. V.
zusammengeschlossenen
Unternehmen zugrunde.

Stand: April 2010
EI-WS-0410-50DOM

Infostelle

Industrieverband
Massivumformung e. V.

Goldene Pforte 1
58093 Hagen, Deutschland
Telefon: +49 23 31 95 88 28
Telefax: +49 23 31 95 87 28

E-Mail: orders@metalform.de

Weitere Informationen unter:
www.metalform.de

ISBN: 3-928726-23-8

Den Veröffentlichungen
der **Infostelle**
liegen die Ergebnisse
der Gemeinschaftsforschung
der im Industrieverband
Massivumformung e. V.
zusammengeschlossenen
Unternehmen zugrunde.

Stand: April 2010
EI-WS-0410-50DOM