

Anforderungen an und Beurteilung von Werkzeugmaschinen

2

Die Forderungen an eine Werkzeugmaschine und ihre Beurteilung bilden eine Einheit. Der Aufbau, die technischen Daten und die Ausstattung mit Automatisierungseinrichtungen werden im Wesentlichen durch den Anwender und dem von ihm auf der Maschine zu verwirklichenden Prozess bestimmt.

Das oder die zur Anwendung kommenden Fertigungsverfahren, die Werkstückabmessungen und -stückzahlen bestimmen die Gestaltung der Baugruppen und die Gesamtkonstruktion. Dabei wird zunehmend nur so viel „Funktionalität“ wie notwendig eingebaut, um eine wirtschaftliche Fertigung auf diesen Maschinen zu ermöglichen. Kundenabhängig ist ein analoger Prozess also auf einer hochflexiblen, automatisierten, in ein Fertigungssystem eingebundenen Maschine oder auf einer zugeschnittenen „low cost“-Ma-

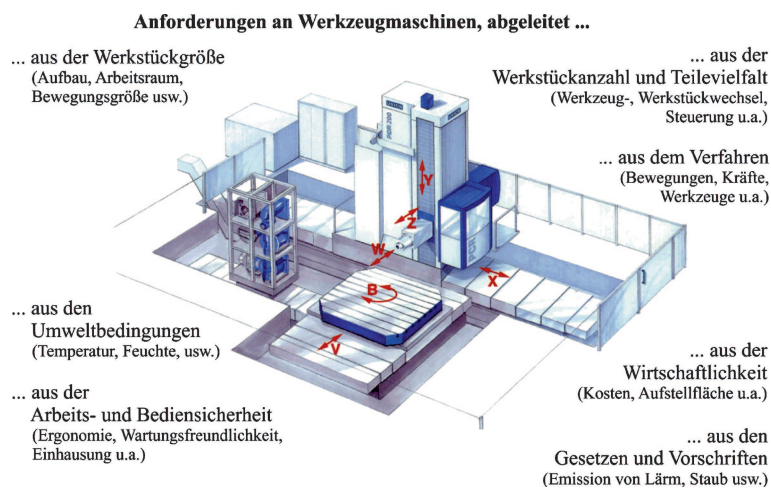


Abb. 2.1 Anforderungen an Werkzeugmaschinen (Quelle Bild: UNION, Chemnitz)

Tab. 2.1 Bewegungsprinzip Beurteilung von Werkzeugmaschinen

	Theoretisch-rechnerisch	Praktisch-experimentell
Beurteilung technischer Einsatzgrößen	Bewegungsabläufe, einschließlich Kollisionsbetrachtungen Dynamisches Verhalten von Regel- und Steuermechanismen	<i>Größen der Werkstück- und Werkzeugaufspannflächen, des Arbeitsraumes, der möglichen Bewegungen und Einstellungen</i> <i>Realisierung von Drehzahlen, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen, Abläufen, Positionierbewegungen u. a.</i> <i>Leistungs-Drehmomenten-Drehzahl-Verhalten</i>
Beurteilung technischer Eigenschaften	Verformungsverhalten bei statischer, dynamischer und thermischer Beanspruchung von Baugruppen und Maschinen Wirkungsgradberechnung	<i>Herstell- und Montagegenauigkeit von Baugruppen und Maschine (Form- und Lageabweichungen funktionsbestimmender Flächen)</i> <i>Genauigkeit von Bewegungen, hinsichtlich der relativen Lage der Baugruppen untereinander (geometrische Genauigkeit) und des Bewegungsablaufes (Bahngenauigkeiten, Positioniergenauigkeit)</i> <i>Verformungsverhalten bei statischer, dynamischer und thermischer Beanspruchung von Baugruppen und Maschinen Probewerkstück, Leistung und Wirkungsgrad</i>
Beurteilung der Einsatzfähigkeit	<i>Prozessfähigkeit, Wartungsfreundlichkeit, Zuverlässigkeit, Ergonomie, Arbeits- und Bediensicherheit, Design</i> <i>Schnittstellen zu anderen Prozessen und Maschinen, Möglichkeit des Einsatzes von Zusatzbaugruppen und der Integration von Verfahren</i>	
Beurteilung des Umweltverhaltens	<i>Staub-, Lärm-, und Ölnebelentwicklung, elektrische Emissionen, anfallende Verbrauchsstoffe, Entsorgung, Maschinenrecycling</i>	
Beurteilung ökonomischer Daten	Preis, Aufstellfläche, Energie- und Medienverbrauch, Wartungskosten Produktivität (Geschwindigkeiten, Zerspanungsleistungen, Span-zu-Span-Zeiten u. a.)	

schine realisierbar. Die technischen Parameter aus dem Fertigungsverfahren können dabei die Gleichen sein. In Abb. 2.1 sind einige wesentliche Anforderungen genannt.

Die umfassende Beurteilung der Werkzeugmaschine beinhaltet eine Vielzahl von Gesichtspunkten, die aus den verschiedensten Anwendungen und Betrachtungswinkeln resultieren. Mit Tab. 2.1 wird versucht, diese Kriterien möglichst umfassend darzustellen. Die kursiv gedruckten Eigenschaften sind im Wesentlichen durch den Maschinenhersteller beeinflussbar.

In den folgenden Abschnitten werden einige der wichtigsten und grundlegenden Zusammenhänge zu den Anforderungen an und zur Beurteilung von Werkzeugmaschinen dargestellt. Dabei werden hier Aussagen zu „Kosten“ bewusst ausgeklammert.

2.1 Fertigungsverfahren

Im Abschn. 1.1 wurde die Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580 dargestellt und darauf aufbauend eine Möglichkeit der Systematisierung der Werkzeugmaschinen. Abgeleitet aus den auf den Maschinen zur Anwendung kommenden Verfahren sollen im Folgenden die Grundlagen zur Bestimmung von technischen Anforderungen aus den fertigungstechnischen Größen hergeleitet werden. Umfassende und weiterführende Ausführungen sind [1] und [2] zu entnehmen.

2.1.1 Spanende Verfahren

Die Zerspanungstechnik beinhaltet die gezielte Formgebung von Werkstücken durch Anwendung spanender Verfahren und Fertigungsmittel. Dabei wird die geometrische Gestaltänderung der Werkstücke durch Abtrennen von Werkstoffteilchen auf mechanischem Weg erzeugt und durch einen oder mehrere Schneidkeile am Werkzeug verwirklicht. Sind diese Schneidkeile des Werkzeugs geometrisch eindeutig zu beschreiben, spricht man von geometrisch bestimmter Schneide, ansonsten von geometrisch unbestimmter Schneide.

Die allgemeingültigen Zusammenhänge für die Fertigungsverfahren mit geometrisch bestimmter Schneide lassen sich anschaulich am Verfahren „Drehen“ erläutern.

Zur Beschreibung der Verfahren sind die Begriffe in der DIN 6580 [3] so festgelegt, dass sie für alle Bereiche der spanenden Fertigung angewendet werden können. Man bezieht sich dabei auf einen einzelnen betrachteten Schneidenpunkt und ein ruhend gedachtes Werkstück.

Kinematik des Zerspanungsvorganges

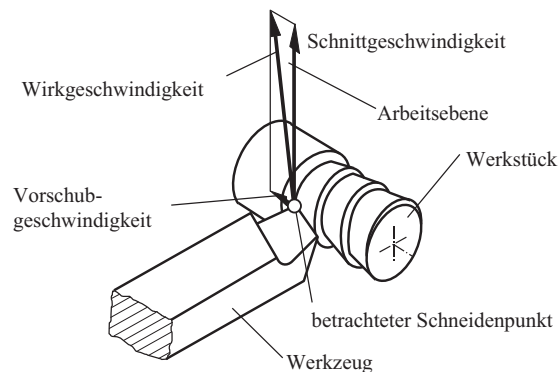
- Die *Schnittbewegung* ist die Bewegung zwischen Werkstück und Werkzeug, die eine einmalige Spanabnahme bewirkt. Charakterisiert durch die momentane Richtung – *Schnitttrichtung* –, durch die momentane Geschwindigkeit – *Schnittgeschwindigkeit* v_c – und durch den zurückgelegten Weg des Schneidenpunktes in Schnitttrichtung – *Schnittweg*.
- Die *Vorschubbewegung* ist die Bewegung zwischen Werkstück und Werkzeug, die eine fortgesetzte Spanabnahme bewirkt. Charakterisiert durch die momentane Richtung – *Vorschubrichtung* –, durch die momentane Geschwindigkeit – *Vorschubgeschwindigkeit* v_f – und durch den zurückgelegten Weg des Schneidenpunktes in Vorschubrichtung – *Vorschubweg*.

Die durch die Vektoren der Schnitt- und Vorschubgeschwindigkeit (Abb. 2.2) aufgespannte Ebene wird als *Arbeitsebene* bezeichnet.

Als *Wirkbewegung* wird die resultierende Bewegung aus Schnittbewegung und gleichzeitig wirkender Vorschubbewegung bezeichnet.

Neben diesen Bewegungen sind weitere für eine spanende Fertigung notwendig, die nicht unmittelbar an der Spanbildung beteiligt sind:

Abb. 2.2 Kinematik des Zerspanungsvorganges (nach DIN 6580)



- Die *Zustellbewegung* als die Bewegung zwischen Werkstück und Werkzeug, die die Dicke der abzunehmenden Schicht bestimmt,
- die *Anstellbewegung* als die Bewegung, mit der Werkstück und/oder Werkzeug vor der Bearbeitung zueinander positioniert werden,
- die *Nachstellbewegung* als die Korrekturbewegung zwischen Werkstück und Werkzeug (z. B. Verschleißausgleich).

Die an der Werkzeugmaschine einzustellenden fertigungstechnischen Parameter werden als Schnittgrößen (Abb. 2.3) bezeichnet und sind

- zur Realisierung der Schnittbewegung die Drehzahl n oder (Doppel-)Hubzahl n_{DH} ,
- zur Realisierung der Vorschubbewegung der Vorschub f entweder als unabhängige Geschwindigkeit einer Baugruppe in m/min oder als abhängige Geschwindigkeit von der Drehzahl in mm/Umdrehung oder Hubzahl in mm/Hub,
- zur Realisierung der Zustellbewegung die Schnitttiefe a_p .

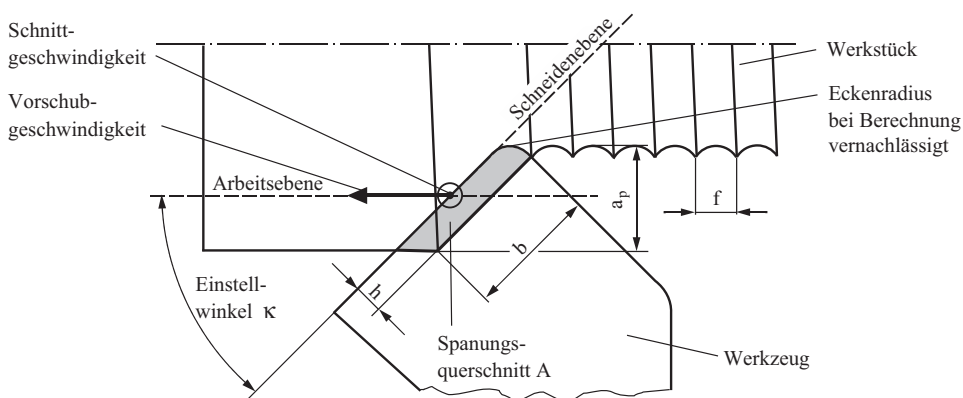


Abb. 2.3 Schnitt- und Spanungsgrößen beim Drehen

Aus diesen Schnittgrößen lassen sich die *Spanungsgrößen* (Abb. 2.3) ableiten, welche in der Spanungszone wirksam sind. Man sollte sie nicht verwechseln mit den Abmessungen der entstehenden Späne, die durch *Spangrößen* charakterisiert werden.

- Die *Spanungsbreite* b ist die Breite des abzunehmenden Materials senkrecht zur Schnitttrichtung und gemessen in der Schneidenebene.
- Die *Spanungsdicke* h ist die Dicke des abzunehmenden Materials senkrecht zur Schnitttrichtung und gemessen senkrecht zur Schneidenebene.
- Der *Spanungsquerschnitt* A ist der Querschnitt des abzunehmenden Materials.

Der geometrische Zusammenhang zwischen Schnitt- und Spanungsgrößen wird über den Einstellwinkel κ hergestellt. Er ist der Winkel zwischen Arbeits- und Schneidenebene (wird durch Schnitttrichtung und Hauptschneide des Werkzeuges aufgespannt).

$$b = \frac{a_p}{\sin \kappa} \quad (\text{Spanungsbreite}) \quad (2.1)$$

$$h = f \cdot \sin \kappa \quad (\text{Spanungsdicke}) \quad (2.2)$$

$$A = a_p \cdot f \quad (\text{Spanungsquerschnitt}) \quad (2.3)$$

Schneidkeilgeometrie

Als *Schneidkeil* wird der Teil des Werkzeuges bezeichnet, an dem der Span entsteht. In Abb. 2.4 sind am Beispiel eines vereinfacht dargestellten Drehmeißels die wichtigsten Flächen und Schneiden (Schnittlinien, die den Keil begrenzenden Flächen) eingezeichnet. Zum Erreichen guter Oberflächen am Werkstück und akzeptabler Standzeiten des Werkzeuges sind die Haupt- und Nebenschneide mit Fasen versehen. Die Hauptschneide ist immer die Schneide, auf deren Länge die Spanungsbreite gemessen wird.

Für die Bezeichnung der Winkel am Schneidkeil werden in DIN 6581 [4] zwei Koordinatensysteme beschrieben und darin die Winkel definiert. Zum Verständnis der folgenden

Abb. 2.4 Flächen und Schneiden am Drehmeißel (vereinfacht)

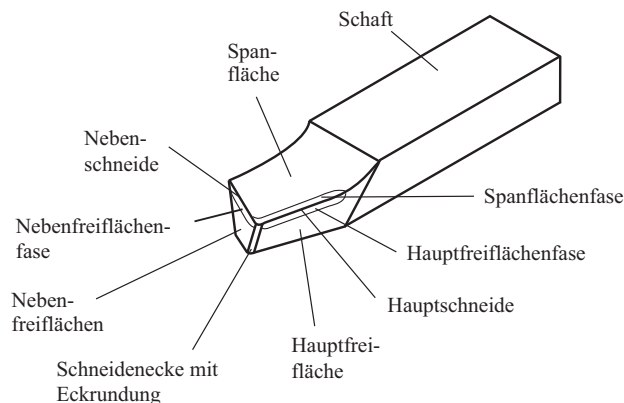
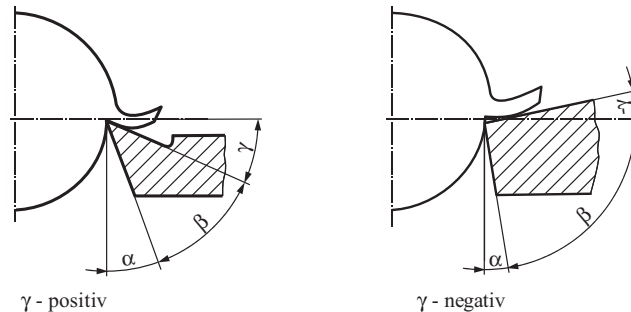


Abb. 2.5 Winkel am Schneidkeil (vereinfacht)



Betrachtungen genügt die Darstellung in Abb. 2.5. Zu beachten ist dabei, dass die Summe aus den drei eingezeichneten Winkel immer 90° ergibt.

Der Freiwinkel α beeinflusst die Größe des Keilwinkels. Er wird möglichst klein gehalten, um die Stabilität des Werkzeugs nicht zu sehr zu schwächen.

Der Keilwinkel β beeinflusst vor allem die Schneidfähigkeit der Werkzeugschneide. Wird dieser Winkel klein gehalten, dringt er mit geringerer Kraft in das Werkstück ein. Nachteilig ist hierbei die schlechte Wärmeabfuhr, die damit verbundene erhöhte Temperatur der Schneide und deren erhöhter Verschleiß sowie die Gefahr des Einhakens der Schneide.

Der Spanwinkel γ beeinflusst maßgeblich die Spanbildung, den Spanablauf und somit auch die Zerspankraft. Ein großer Spanwinkel (der Keilwinkel wird zwangsläufig klein) bewirkt geringere Zerspankraft und gutes Abfließen des Spanes. Wählt man diesen Winkel klein, im Extremfall negativ (Hartmetallschneiden), ergibt sich eine mehr schabende Wirkung, die Bruchgefahr an der Schneide nimmt deutlich ab und der Verschleiß verlagert sich von der eigentlichen Schneidkante weg in Richtung Spanfläche, was zu längeren Standzeiten führen kann.

Spanbildung

Der Schneidkeil des Werkzeugs dringt unter Wirkung der Zerspankraft in das Werkstück ein. Bei einer kontinuierlichen plastischen Verformung werden dabei Späne erzeugt. Abhängig von der Struktur des zu zerspanenden Werkstoffes kann man in den vier Bereichen (A, B, C, D) der Spanbildung (Abb. 2.6) unterschiedliche dominierende Prozesse beobachten.

Im Bereich A geht die Struktur des Werkstoffes durch Scheren in die Struktur des Spanes über (*Scherspan*). Bei spröden Werkstoffen (Grauguss) kommt es zum Abreißen des Werkstoffes (*Reißspan*). Bei verformungsfähigen Werkstoffen (Stahl, Aluminium) tritt die Trennung erst kurz vor der Schneidkante (Bereich B) ein. Beginnt der Werkstoff in diesem Bereich zu fließen, dann entsteht eine sogenannte Fließschicht (Bereich C), die die Scherschichten verbindet und somit zum *Fließspan* führt. Ist die Fließschicht nicht sonderlich ausgeprägt und die gescherte Spanstruktur lamellenartig, spricht man vom *Lamellenspan*. Die entstehenden Spanstrukturen sind im Wesentlichen abhängig von der Verformbarkeit

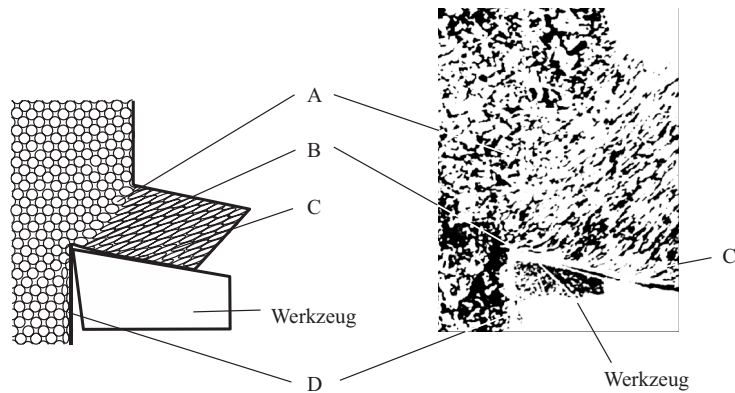


Abb. 2.6 Spanbildung und Spanstruktur (nach [5])

und der Festigkeit des Werkstoffes (Abb. 2.7). Im Randbereich D der Schnittfläche ist der Werkstoff des Werkstücks erhöhter Kraftwirkung ausgesetzt und die Gefügestruktur verfestigt sich (Verfestigungszone).

Die äußere Gestalt des Spanes – Spanform genannt – wird darüber hinaus durch die Schneidkeilgeometrie (z. B. Spanwinkel), durch die Zerspanungsbedingungen (z. B. Schnittgeschwindigkeit, Spanungsdicke) und zusätzliche Maßnahmen (z. B. Spanleitstufen) beeinflusst. Die Charakterisierung erfolgt nach dem Stahl-Eisen-Prüfblatt 1178-69 [6].

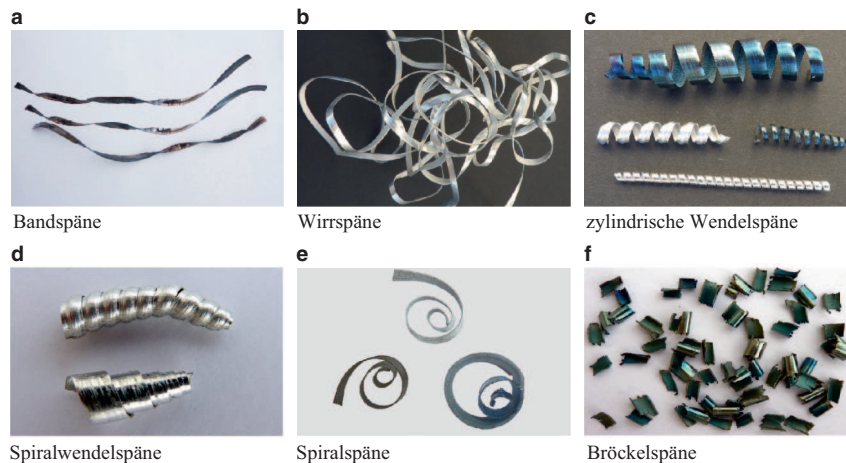


Abb. 2.7 Spanformen geordnet nach den Spanarten. a–d Fließspäne, e Scherspan, f Reißspan (Bröckelspan)

Verschleiß und Standzeit

Wird die Wirksamkeit der Schneide durch Abnutzung der Frei- und Spanflächen eingeschränkt, so spricht man von Verschleiß des Werkzeugs. Die Auswirkungen sind:

- ein Anwachsen der Zerspankräfte, bei gleichzeitiger Veränderung der Verhältnisse zwischen Schnitt-, Vorschub- und Passivkraft,
- eine Erhöhung der Temperatur in den Spanbildungszonen und am Werkzeug, was wiederum zu erhöhtem Verschleiß führt,
- eine veränderte Spanform durch die neue Schneidkeilgeometrie,
- eine in der Regel verschlechterte Oberflächenqualität am Werkstück und größere Verfestigungstiefe gegen Standzeitende.

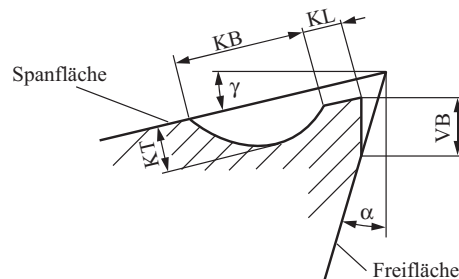
Als Ursachen gelten die Reibvorgänge in der Kontaktzone, die bei hoher mechanischer und thermischer Beanspruchung auftreten. Sie rufen hervor:

- Mechanische Beschädigungen der Schneidkante (Ausbrüche, Querrisse, Kammerisse, plastische Verformungen),
- Adhäsion (Abscherung von Pressschweißstellen),
- Diffusion (bei gegenseitiger Löslichkeit von Werkzeug- und Werkstoffbestandteilen),
- mechanischen Abrieb (harte Bestandteile im Werkstückwerkstoff lösen Schneidstoffteilchen heraus),
- Verzunderung (Bildung von Oxyden an der Werkzeugschneide, die bei mechanischer Beanspruchung ausbrechen).

Diese Verschleißformen überlagern sich und sind zum Teil nicht voneinander trennbar. Zur Messung des Verschleißes werden deshalb die sichtbaren Auswirkungen herangezogen (Abb. 2.8).

- Kolkverschleiß auf der Spanfläche
- Freiflächenverschleiß an der Hauptfreifläche
- Oxydationsverschleiß an der Nebenfleifläche

Abb. 2.8 Verschleiß am Schneidkeil



Wobei als *Verschleißmessgrößen* definiert sind:

- an der Freifläche die Verschleißmarkenbreite VB in mm
- an der Spanfläche die Kolktiefe KT in mm
- der Kolkklippenbreite KL in mm
- die Kolkbreite KB in mm

Als Standzeit eines Werkzeuges wird nun die Zeit verstanden, die das Werkzeug vom Scharfschliff bis zum Erreichen eines maximal zulässigen Verschleißkriteriums mit dem Werkstück im Eingriff ist und Zerspanungsarbeit leistet. Diese Zeit kann man auch als Standweg, Standstückzahl u. a. ausdrücken.

Das Verschleißkriterium kann der quantitative zulässige Wert einer am Werkzeug messbaren Verschleißmessgröße sein. Genutzt wird auch ein aus mehreren solchen Größen abgeleiteter Wert. Eine zulässige Werkstückeigenschaft (z. B. Rauheit) wird oft dann zur Standzeitbegrenzung gewählt, wenn der Werkzeugverschleiß nicht oder nur mit unvertretbarem Aufwand messbar ist bzw. diese Werkstückeigenschaft sich nicht unmittelbar aus dem Werkzeugverschleiß ableitet.

Schneidstoffe

Werkstoffe, aus denen die Schneide besteht und die somit direkt an der Spanbildung beteiligt sind, werden als Schneidstoffe bezeichnet. Aufgrund der Beanspruchung beim Zerspanungsprozess sollten sie große Härte, Zähigkeit, Verschleiß-, Druck- und Biegefestigkeit besitzen und diese Eigenschaften auch bei hohen Temperaturen und schnellen Temperaturwechseln beibehalten.

Die Einteilung der Schneidstoffe erfolgt oft in

Unlegierte und legierte Werkzeugstähle: Der Einsatz von Werkzeugen aus diesen Schneidstoffen beschränkt sich auf Verfahren mit niedrigen Schnittgeschwindigkeiten und daraus resultierender geringer Wärmeentwicklung (z. B. Sägeblätter, Feilen, Gewindebohrer).

Schnellarbeitsstähle: Durch karbidbildende Legierungselemente verbessern sich die Warmhärte (etwa bis 600 °C), Zähigkeit und Anlassbeständigkeit. Durch unterschiedlichste Legierungszusammensetzung und Wärmebehandlung ergeben sich verschiedenste Eigenschaften, die eine breitgefächerte Anwendung ermöglichen (z. B. Dreh- und Hobelmeißel, Spiral- und Gewindebohrer, Reibahlen, Räumwerkzeuge, Fräser). Durch Beschichten der Aktivteile von Werkzeugen aus Schnellarbeitsstahl hat sich die Leistungsfähigkeit besonders hinsichtlich der Standzeit weiter steigern lassen.

Gegossene Hartlegierungen: Werkzeuge aus diesem Schneidstoff werden gegossen und anschließend geschliffen. Sie bestehen aus einer Eisen-Nickel-Kobalt-Legierung mit ver-

schiedenen Karbidbildnern und haben gegenüber den Schnellarbeitsstählen eine verbesserte Warmhärte. Ihre Verbreitung erfolgte überwiegend in den USA (Stellit).

Hartmetalle (gesintert): Im pulverförmigen Zustand wird einem Metallkarbid bzw. einem Metallkarbidgemisch im Allgemeinen Kobalt zugesetzt und es danach durch Sintern sowie anschließendem Schleifen geformt. Die Einführung der Hartmetalle führte zu einer erheblichen Leistungssteigerung im Zerspanungsprozess und erforderte Werkzeugmaschinen mit wesentlich höheren Drehzahlen, Antriebsleistungen, steiferen Gestellen und Führungen. Durch Variation der Gemischkomponenten lassen sich bestimmte Eigenschaften (z. B. große Zähigkeit, extreme Warmhärte) erzeugen. Die gesinterten Hartmetalle werden an fast allen spanenden Werkzeugen mit großem Erfolg eingesetzt. Superharte Beschichtungen (z. B. mit Aluminiumoxid) erweitern das Einsatzgebiet.

Schneidkeramik: Der Schneidkörper wird ähnlich wie Hartmetall durch Sintern, aber auf der Basis von Aluminiumoxid oder Siliziumnitrid hergestellt. Hervorzuheben sind die gegenüber Hartmetall hohe Warmhärte und ausgezeichnete Verschleißfestigkeit, die hohe Schnittgeschwindigkeiten (über 1000 m/min) ermöglichen. Die Empfindlichkeit der Schneidkeramik gegenüber Schlag und Schwingung sowie rasche Temperaturänderung ist beim Einsatz zu beachten.

Superharte Schneidstoffe: Unter diesem Begriff werden üblicherweise Schneidstoffe mit einer Vickershärte von mehr als 50.000 N/mm² zusammengefasst: Natürlicher oder synthetischer Diamant, hartes Bornitrid, Verbundschneidstoffe (beschichtete Hartstoffe), Mischschneidstoffe. Werkzeuge aus diesen Schneidstoffen sind aufgrund der entstehenden Kosten extremen Einsatzbedingungen vorbehalten. Die Anwendung erfolgt bei Zerspanungsaufgaben, die mit anderen Schneidstoffen nicht gelöst werden können, oder bei beachtlichen Produktivitätssteigerungen, die die notwendigen erhöhten Maschineneigenschaften rechtfertigen.

Kräfte am Schneidkeil

Am Schneidkeil und damit an der Wirkstelle zwischen Werkstück und Werkzeug wird die Zerspanungsarbeit geleistet. Sie besteht zum größten Teil aus Verformungsarbeit sowie aus Trenn- und Reibarbeit. Bilanziert man die umgesetzten Energien, so stellt man fest, dass der überwiegende Teil der Zerspanungsarbeit in Wärme überführt wird. Sie äußert sich als Erwärmung von Werkzeug, Werkstück und Maschine, als Strahlung an die Umgebung, konvergiert in den Kühlschmierstoff oder wird in den Spänen abgeführt.

Die Zerspanungsarbeit bewirkt Kräfte an den Span- und Freiflächen. Die Resultierende aus diesen Flächenkräften wird Zerspankraft genannt. Sie liegt im Raum und wird auf das Werkzeug wirkend, im Schwerpunkt des Spanungsquerschnittes angreifend, definiert. Natürlich wirkt eine gleich große Gegenkraft auf das Werkstück.

Für die Analyse und Berechnung dieser komplexen Kraft ist es vorteilhaft, sie in Komponenten in Richtung der Zerspanungsbewegungen (Abb. 2.9) zu zerlegen: