

1 Theorie der spanenden Formung

1.1 Begriffe der spanenden Formung

1.1.0 Grundlagen

Grundanliegen dieses ersten Abschnittes ist es, Klarheit in den Begriffen der spanenden Formung zu schaffen.

KIENZLE mit seinen grundlegenden Arbeiten [3] und [4] gebührt das besondere Verdienst, dass er zunächst ein Ordnungssystem der Fertigungsverfahren geschaffen hat, aus der DIN 8580 im Wesentlichen entstand. Aus den sechs Hauptgruppen der Fertigungsverfahren (Urformen, Umformen, Trennen, Fügen, Beschichten, Stoffeigenschaftsändern) wurde die dritte Hauptgruppe Trennen weiter unterteilt in die Gruppen Zerteilen, Spanen mit geometrisch bestimmten und unbestimmten Schneiden sowie Abtragen (Bild 1.1).

Ein weiterentwickeltes Ordnungssystem, ebenfalls in der umfangreichen DIN 8589 festgelegt, unterteilt dann weiter in die einzelnen Verfahren mit geometrisch bestimmter Schneide (Drehen, Bohren/Senken/Reiben, Fräsen, Hobeln/Stoßen, Räumen, Sägen, Feilen/Raspeln, Bürstspanen, Schaben/Meißeln) und mit geometrisch unbestimmter Schneide (Schleifen, Bandschleifen, Hubschleifen, Honen, Läppen, Strahlspanen, Gleitspanen). Generell versteht man nach DIN 8589 unter Spanen einen Trennvorgang, bei dem ein Werkstück mithilfe der Schneiden eines Werkzeugs (mit geometrisch bestimmten oder geometrisch unbestimmten Schneiden) Werkstoffschichten in Form von Spänen zu einer Änderung der Werkstückform (meist vorgefertigt durch Ur- oder Umformen) und/oder der Werkstückoberfläche mechanisch abgetrennt werden.

Aufgrund der sehr weiten Verbreitung und Anwendung des Spanens und damit insgesamt der spanenden Verfahren bestand für Forschung, Praxis und Lehre aber auch die Notwendigkeit einer korrekten und konkreten Definition der Begriffe, speziell für die Kinematik und Geometrie des Spannungsvorgangs, die Geometrie des Schneidkeiles und weiterer physikalischer und technologischer Spannungsbegriffe.

Ältere Arbeiten beschränken sich dabei meist auf Definitionen und die Nomenklatur der Winkel, primär beim einschneidigen Werkzeug. Es wurden aber auch Versuche gemacht, diese Begriffsbestimmungen auf alle spanenden Verfahren zu übertragen [5]. Die Begriffe sind heute im Wesentlichen in den DIN 8580, 8581, 8582, 8583 und 8584 festgelegt. Der Vorteil dieser DIN ist, dass sie im hohen Maße auch auf die internationale Norm ISO 3002/1 bis 3002/5 abgestimmt sind.

Auf diese DIN wird nachfolgend näher eingegangen, da sie die Grundlagen für alle spanenden Verfahren bilden.

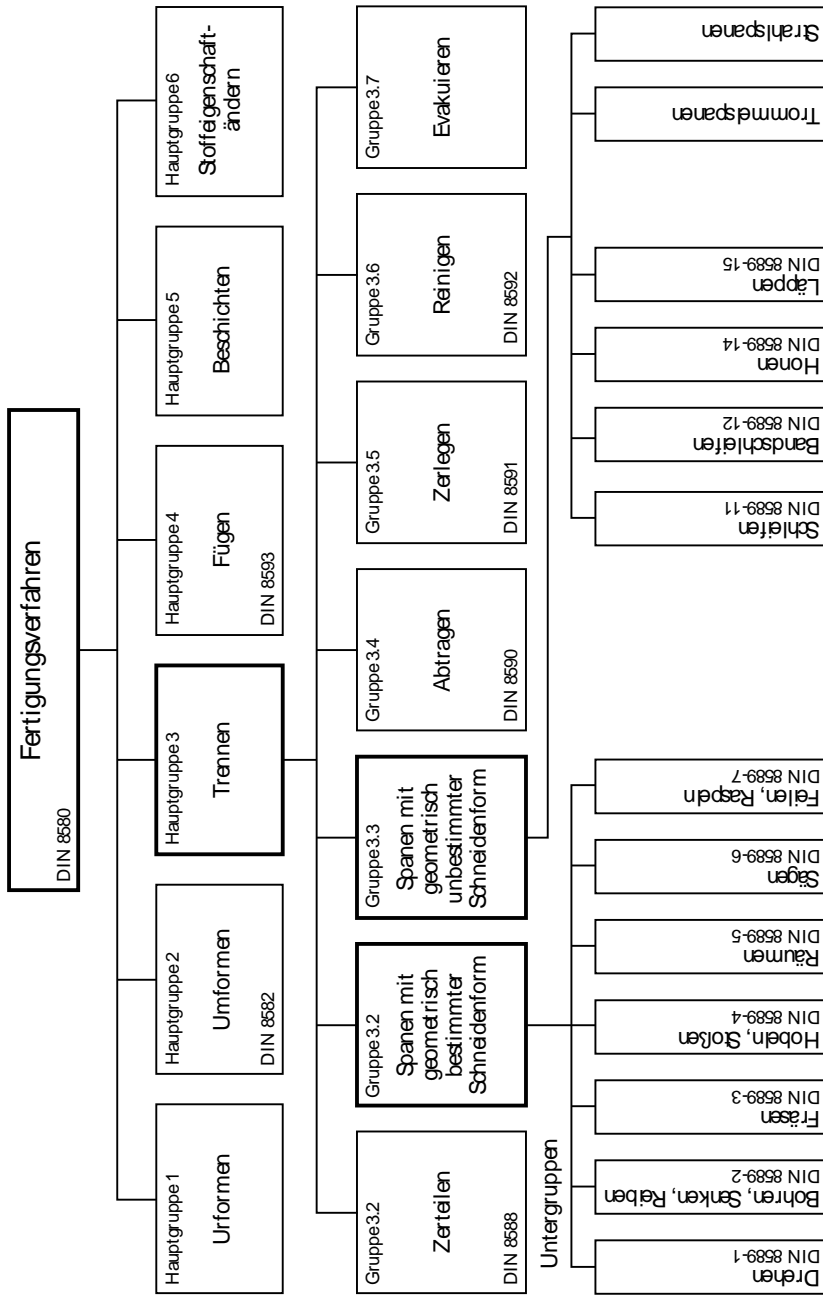


Bild 1.1. Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580 und Zuordnung spanender Verfahren

Die Begriffe des Spanens müssen folgenden Forderungen Rechnung tragen:

1. Sie müssen auf sämtliche spanende Bearbeitungsverfahren anwendbar und übertragbar sein.
2. Sie müssen in einem logischen geometrischen Zusammenhang stehen.
3. Eingeführte und bestehende Begriffe sollten soweit wie möglich berücksichtigt werden.

Die gleichzeitige Gültigkeit der Begriffe für alle spanenden Verfahren schafft die Möglichkeit, die für die Praxis notwendigen Begriffe auf ein Minimum zu beschränken.

Die Systematik und die Begriffe beruhen darauf, dass von dem allgemeinen Fall des Spannungsvorgangs, bei dem die Vorschubrichtung nicht senkrecht zur Schnittrichtung steht, ausgegangen wurde. Das häufig als Lehrbeispiel dargestellte Drehen stellt dann nur einen Sonderfall dar. Die Betrachtungen dieses allgemeinen Falls führen zur Einführung des entscheidenden Begriffs des Vorschubrichtungswinkels φ . Erst durch ihn ergibt sich der geometrische Zusammenhang zwischen den verschiedenen spanenden Verfahren.

Weiterhin werden die Wirkbewegungen als Resultierende aus Schnittbewegung und Vorschubbewegung in die Betrachtung einbezogen und hieraus die Wirkbegriffe abgeleitet. Wenn auch der Unterschied zwischen Wirkrichtung und Schnittrichtung meist vernachlässigbar klein ist, werden doch durch den Wirkrichtungswinkel η , der den Unterschied zwischen Wirkrichtung und Schnittrichtung angibt, wesentliche geometrische Zusammenhänge deutlich. Da diese Kinematik des Spannungsvorgangs die wesentliche Grundlage für die neue Betrachtungsweise bildet, ergibt sich als entscheidende Bezugsebene für die Spanungsgeometrie diejenige Ebene, die alle Bewegungen enthält. Sie wird Arbeitsebene genannt. Mit den Begriffen Vorschubrichtungswinkel, Wirkrichtungswinkel und Arbeitsebene lassen sich die Grundbegriffe allgemein gültig für alle spanenden Verfahren aufbauen.

1.1.1 Kinematik und Geometrie des Spannungsvorgangs

Die für jeden spanenden Vorgang wichtigen Bewegungen sowie die Geometrie des Spannungsvorgangs sind in DIN 6580 festgelegt. Sie stimmen inhaltlich mit ISO 3002-1 und 3002-3 überein.

Die folgenden Teilabschnitte 1.1.1.1 bis 1.1.1.5 behandeln die Spannungskinetik als Grundlage der Festlegungen. Die hieraus abgeleiteten notwendigen Hilfsbegriffe sind in 1.1.1.6 erläutert. Teilabschnitt 1.1.1.7 definiert die Flächen am Werkstück, während in 1.1.1.8 bis 1.1.1.10 die Vorschubgrößen, Eingriffsgrößen und Spanungsgrößen definiert und erläutert sind.

Besonders die Begriffsfestlegung der Schnitttiefe bzw. Schnittbreite a_p im Teilabschnitt 1.1.1.9 ist zu beachten, um Verwechslungen mit dem Arbeitseingriff a_e , zu vermeiden. Die Größe a_p ist immer diejenige, die, mit dem Vorschub f multipliziert, den Spanungsquerschnitt A ergibt. Da der Vorschub in der Arbeitsebene bzw. parallel dazu gemessen wird, muss die Größe a_p senkrecht dazu gemessen werden. Sie erscheint als Schnitttiefe oder als Schnittbreite und führt deshalb wahlweise die eine oder andere Benennung, aber immer das gleiche Zeichen a_p . Beim Fräsen und Schleifen ist zusätzlich der Arbeitseingriff a_e , von Interesse. Er steht senkrecht zur Größe a_p und zur Vorschubrichtung und ist nicht zu verwechseln mit der Schnitttiefe a_p .

Die im Abschnitt 1.1.1.10 erläuterten Spanungsgrößen sind nicht identisch mit den Abmessungen der abgehobenen Späne (siehe Unterabschnitt 1.2.1.1). In den Begriffen der spanenden Formung werden die „Einstellgrößen“, d. h. die Größen, die für den Arbeitsgang unmittelbar an der Maschine einzustellen sind, nicht besonders behandelt.

Selbstverständlich können je nach Kinematik der Werkzeugmaschine z. B. auch Geschwindigkeiten, Vorschubgrößen oder Eingriffsgrößen „Einstellgrößen“ sein.

Die definierten Begriffe beziehen sich immer auf den jeweils betrachteten Schneidenpunkt.

1.1.1.1 Bewegungen zwischen Werkzeugschneide und Werkstück

Die Bewegungen bei einem Spanungsvorgang sind Relativbewegungen zwischen Werkzeugschneide und Werkstück. Sie werden auf das ruhend gedachte Werkstück bezogen. Dabei ist zu unterscheiden zwischen solchen Bewegungen, die unmittelbar das Entstehen von Spänen bewirken (Wirkbewegung, Schnittbewegung und Vorschubbewegung), und solchen, die nicht unmittelbar am Entstehen von Spänen beteiligt sind (Zustellbewegung, Nachstellbewegung, Ausstellbewegung und Rückstellbewegung).

Die Bewegungen können gerade, kreisförmig oder beliebig sein. Es sind Bewegungen an der Wirkstelle, die durch die Werkzeugmaschine erzeugt werden.

Unmittelbar entstehen Späne durch die Wirkbewegung, die sich meist aus einer Schnittbewegung und einer Vorschubbewegung zusammensetzt, nach einer vorangegangenen Zustellbewegung.

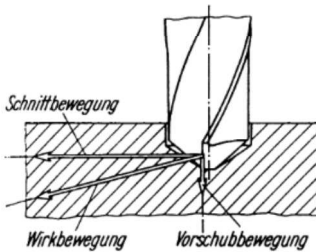


Bild 1.2 Schnitt-, Vorschub- und Wirkbewegung beim Bohren (nach DIN 6580)

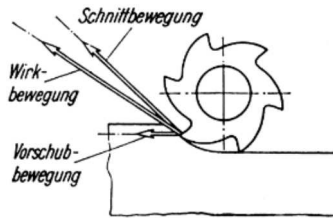


Bild 1.3 Schnitt-, Vorschub- und Wirkbewegung beim Fräsen (nach DIN 6580)

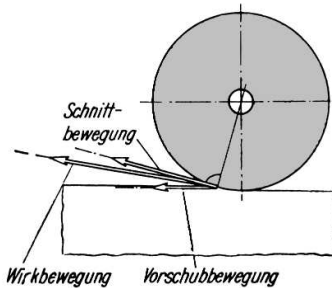


Bild 1.4 Schnitt-, Vorschub- und Wirkbewegung beim Schleifen (nach DIN 6580)

Wirkbewegung

Die Wirkbewegung ist die Bewegung zwischen Werkzeugschneide und Werkstück, die den Zerspanvorgang bewirkt. Sie ist in der Regel eine aus Schnitt- und Vorschubbewegung resultierende Bewegung. Erfolgt keine gleichzeitige Vorschubbewegung, so ist die Wirkbewegung identisch mit der Schnittbewegung (Bilder 1.1 bis 1.3).

Schnittbewegung

Die Schnittbewegung ist diejenige Bewegung zwischen Werkzeugschneide und Werkstück, die ohne Vorschubbewegung nur eine einmalige Spanabnahme während einer Umdrehung oder eines Hubs bewirken würde. Die Schnittbewegung kann sich aus mehreren Komponenten zusammensetzen.

Vorschubbewegung

Die Vorschubbewegung ist diejenige Bewegung zwischen Werkstück und Werkzeug, die zusammen mit der Schnittbewegung eine mehrmalige oder stetige Spanabnahme während mehrerer Umdrehungen oder Hübe ermöglicht. Sie kann schrittweise oder stetig vor sich gehen. Die Vorschubbewegung kann sich aus mehreren Komponenten zusammensetzen (Bild 1.5).

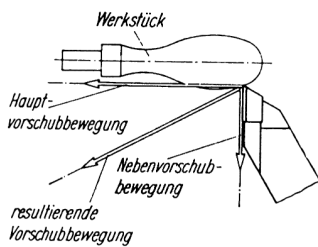


Bild 1.5 Beispiel für eine zusammengesetzte Vorschubbewegung (nach DIN 6580)

Die nicht unmittelbar an der Spanentstehung beteiligten Bewegungen sind trotzdem bedeutungsvoll, weil sie zur Bearbeitung des Werkstücks zwingend notwendig sind. Die Zustellbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück bestimmt im Voraus die Dicke der jeweils abzuhebenden Schicht (Schnitttiefe a_p).

Anmerkungen: Bei einigen Fertigungsverfahren – z. B. Einstechdrehen, Bohren, Räumen – gibt es verfahrensbedingt keine Zustellbewegung. Ferner ist auch die Nachstellbewegung als Korrekturbewegung bedeutsam, z. B. um den Werkzeugverschleiß mit Blick auf die geforderte Maßgenauigkeit des Werkstücks auszugleichen.

Die Anstellbewegung ist erforderlich, um das Werkzeug vor dem Spanen an das Werkstück heranzuführen, während die Rückstellbewegung das Werkzeug in die Ausgangslage zurückführt.

1.1.1.2 Richtungen der Bewegungen (Bewegungsrichtungen)

Unter den Bewegungsrichtungen versteht man die momentane Richtung der Wirkbewegung (Wirkrichtung), der Schnittbewegung (Schnitttrichtung) und der Vorschubbewegung (Vorschubrichtung) im ausgewählten Schneidenpunkt.

Entsprechend kann unterschieden werden zwischen Zustell-, Nachstell-, Anstell- und Rückstellrichtung.

1.1.1.3 Wege des Werkzeuges gegenüber dem Werkstück

Den einzelnen Bewegungen lassen sich die entsprechenden Wege zuordnen. So sind im Bild 1.6 am Beispiel des Walzfräsens der Wirkweg l_e , der Schnittweg l_c und der Vorschubweg l_f dargestellt.

Zum Beispiel ist der Vorschubweg l_f derjenige Weg, den der betrachtete Schneidenpunkt durch die Vorschubbewegung spanend zurücklegt. Der auf die Umdrehung oder den Hub bezogene Vorschubweg wird als „Vorschub“ bezeichnet und bedeutet folglich immer Vorschub pro Umdrehung bzw. pro Hub (siehe Abschnitt 1.1.1.8). Zustellweg l_z , Nachstellweg l_n , Anstellweg l_a und Rückstellweg l_r sind die jeweils den o. g. Bewegungen zugeordneten Wege.

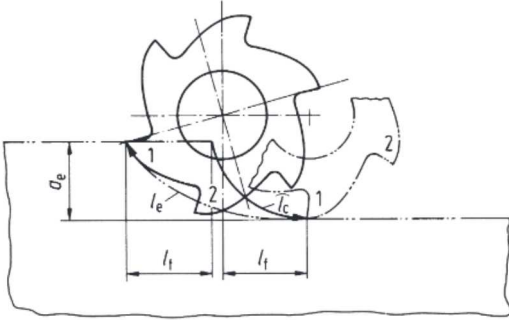


Bild 1.6 Schnittweg l_c , Vorschubweg l_f und Wirkweg l_e beim Gegenlaufräsen (nach DIN 6580)
Die Zahlen 1 und 2 zeigen die Bewegung der Fräserzähne.

1.1.1.4 Geschwindigkeiten

Wirkgeschwindigkeit v_e

Die Wirkgeschwindigkeit v_e ist die momentane Geschwindigkeit der Wirkbewegung im betrachteten (ausgewählten) Schneidenpunkt (Bilder 1.2 bis 1.4 und 1.7 bis 1.9).

$$v_e = \frac{v_c \sin \varphi}{\sin(\varphi - \eta)} = \frac{v_f + v_c \cos \varphi}{\cos(\varphi - \eta)} \quad (1.1)$$

In vielen Fällen ist das Verhältnis v_f/v_c so klein, dass die Näherung gilt

$$v_e \approx v_c \quad (1.2)$$

Schnittgeschwindigkeit v_c

Die Schnittgeschwindigkeit v_c ist die momentane Geschwindigkeit der Schnittbewegung im betrachteten Schneidenpunkt (Bilder 1.2 bis 1.4 und 1.7 bis 1.9). Sie ist z. B. bedeutungsvoll für das Standvermögen und die Standzeitberechnung der Werkzeuge sowie für die Leistungsberechnung der Werkzeugmaschine.

Vorschubgeschwindigkeit v_f

Die Vorschubgeschwindigkeit v_f ist die momentane Geschwindigkeit der Vorschubbewegung im betrachteten Schneidpunkt (Bilder 1.2 bis 1.4 und 1.7 bis 1.9). Sie ist besonders für das Fräsen von Bedeutung und dient zur Leistungsberechnung von Vorschubantrieben.

Zustellgeschwindigkeit v_z , Nachstellgeschwindigkeit v_n , Anstellgeschwindigkeit v_a und Rückstellgeschwindigkeit v_r sind jeweils die momentanen Geschwindigkeiten im betrachteten Schneidpunkt.

1.1.1.5 Komponenten der Bewegungen, Richtungen, Wege und Geschwindigkeiten

Die in den vorstehenden Abschnitten definierten Bewegungen Richtungen (1.1.1.2), Wege (1.1.1.3) und Geschwindigkeiten (1.1.1.4) können auch aus verschiedenen Komponenten erzeugt werden.

1. Komponenten, bezogen auf das rotierende Werkzeug bzw. Werkstück
2. Komponenten, bezogen auf lineare Bewegungen von Werkzeug bzw. Werkstück
3. Komponenten, bezogen auf die Werkzeugmaschine.

Anmerkung: Weitere Begriffe siehe DIN 66 217.

1.1.1.6 Hilfsbegriffe

Die einheitliche Betrachtung der verschiedenen Spanungsverfahren erfordert die Einführung einiger Hilfsbegriffe:

Vorschubrichtungswinkel φ

Der Vorschubrichtungswinkel φ ist der Winkel zwischen Vorschubrichtung und Schnittrichtung (Bilder 1.7 bis 1.11).

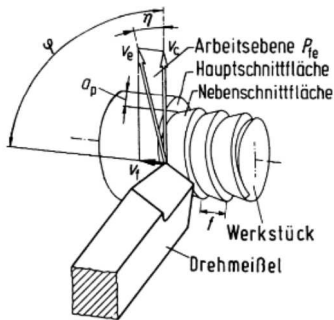


Bild 1.7 Arbeitsebene P_{fe} , Vorschubrichtungswinkel φ und Wirkrichtungswinkel η beim Drehen (nach DIN 6580)

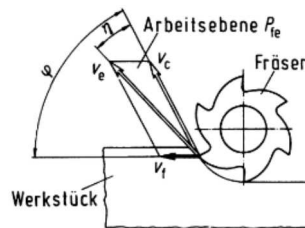


Bild 1.8 Arbeitsebene P_{fe} , Vorschubrichtungswinkel φ und Wirkrichtungswinkel η beim Gegenlaufräsen mit Walzenfräser ($\varphi < 90^\circ$) (nach DIN 6580)

Bei manchen Spanungsvorgängen, z. B. beim Fräsen, ändert sich φ laufend während des Schneidens (Bilder 1.8 bis 1.9). Dagegen ist bei anderen Spanungsvorgängen φ konstant = 90°

(siehe Bild 1.7), was bei diesen Vorgängen eine vereinfachte Berechnung des Wirkrichtungswinkels η nach sich zieht (siehe Gl. 1.4).

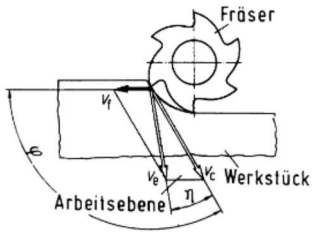


Bild 1.9 Arbeitsebene P_e , Vorschubrichtungswinkel φ und Wirkrichtungswinkel η beim Gleichlauffräsen mit Walzenfräser ($\varphi > 90^\circ$) (nach DIN 6580)

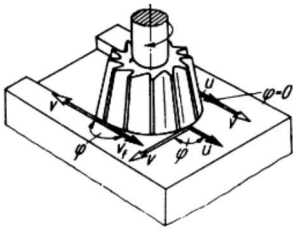


Bild 1.10 Vorschubrichtungswinkel φ beim Fräsen mit Stirnfräser (nach DIN 6580)

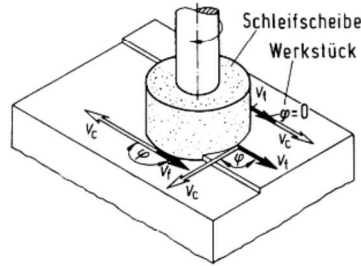


Bild 1.11 Vorschubrichtungswinkel φ beim Schleifen mit Stirnfräser (nach DIN 6580)

Wirkrichtungswinkel

Der Wirkrichtungswinkel η ist der Winkel zwischen Wirkrichtung und Schnitttrichtung (Bilder 1.7 bis 1.9):

$$\tan \eta = \frac{\sin \varphi}{\frac{v_c}{v_f} + \cos \varphi} \quad (1.3)$$

Bei

$$\varphi = 90^\circ \quad \text{ist} \quad \tan \eta = \frac{v_f}{v_c} \quad (1.4)$$

Arbeitsebene P_e

Die Arbeitsebene P_e ist eine gedachte Ebene, die die Schnitttrichtung und die Vorschubrichtung (in dem jeweils betrachteten Schneidenpunkt) enthält. In ihr vollziehen sich die Bewegungen, die an der Spanentstehung beteiligt sind (Bilder 1.7 bis 1.9).

Anmerkung: Es gibt immer nur eine Arbeitsebene, auch dann, wenn die Vorschubbewegung aus mehreren Komponenten erzeugt wird, weil es momentan immer nur eine Vorschubrichtung gibt.

1.1.1.7 Flächen am Werkstück

Man unterscheidet die Ausgangsfläche, die Schnittfläche und die gefertigte Fläche. Während man unter der Ausgangsfläche die Oberfläche des zu bearbeitenden Werkstücks vor dem Spanen versteht (Bild 1.12), ist die Schnittfläche die am Werkstück von der Werkzeugschneide erzeugte Fläche (Bild 1.12).

Ein Teil dieser Schnittfläche wird bei der nächsten Umdrehung bzw. beim nächsten Hub wieder abgespannt. Die am Werkstück verbleibenden Teile bilden die gefertigte Fläche, d. h. im Endeffekt diejenige Fläche am Werkstück, die durch den Spannungsvorgang erzeugt wurde (Bild 1.12).

Anmerkung: Entsprechend der Unterscheidung von Haupt- und Nebenschneide kann zwischen Haupt- und Nebenschnittflächen unterschieden werden, siehe auch Bild 1.12 und DIN 6580.

1.1.1.8 Vorschubgrößen

Vorschub f

Der Vorschub f ist der Vorschub je Umdrehung oder je Hub (Bild 1.12) gemessen in der Arbeitsebene.

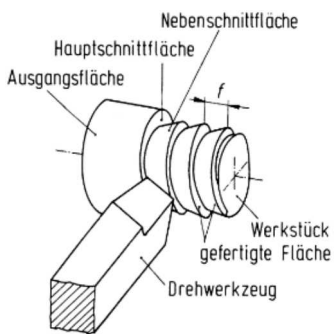


Bild 1.12 Flächen und Vorschub f beim Drehen (nach DIN 6580)

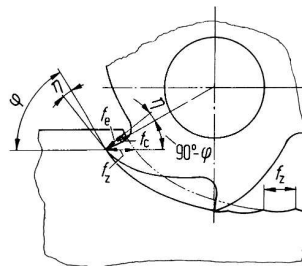


Bild 1.13 Zahnvorschub f_z , Schnittvorschub f_c und Wirkvorschub f_e beim Gegenlauffräsen (nach DIN 6580)

Zahnvorschub f_z

Der Zahnvorschub f_z ist der Vorschubweg zwischen zwei unmittelbar nacheinander entstehenden Schnittflächen, also der Vorschub je Zahn oder je Schneide (Bild 1.13), gemessen in der Arbeitsebene. Es ist

$$f_z = \frac{f}{z} \quad z \text{ Anzahl der Schneidenträger (Zähne).} \quad (1.5)$$

Ist $z = 1$, z. B. beim Fräsen mit einem Einzahnfräser oder beim Drehen, so wird damit

$$f_z = f \quad (1.6)$$

Beim Räumen entspricht dem Zahnvorschub die Zahnstaffelung. Vom Zahnvorschub f_z abgeleitet sind der Schnittvorschub f_c und der Wirkvorschub f_e .

Schnittvorschub f_c

Der Schnittvorschub f_c ist der Abstand zweier unmittelbar nacheinander entstehenden Schnittflächen, gemessen in der Arbeitsebene und senkrecht zur Schnitttrichtung (Bild 1.13). Es ist

$$f_c \approx f_z \sin \varphi \quad (1.7)$$

Bei Spannungsvorgängen mit $\varphi = 90^\circ$ (z. B. beim Drehen und Hobeln) ist

$$f_c = f_z \quad (1.8)$$

Wirkvorschub f_e

Der Wirkvorschub f_e ist der Abstand zweier unmittelbar nacheinander entstehenden Schnittflächen, gemessen in der Arbeitsebene und senkrecht zur Wirkrichtung (Bild 1.13). Es ist

$$f_e \approx f_z \sin(\varphi - \eta) \quad (1.9)$$

In vielen Fällen ist das Verhältnis v_f/v_c so klein, dass η vernachlässigbar ist. Dann ist mit genügender Genauigkeit

$$f_e \approx f_z \sin \varphi \approx f_c \quad (1.10)$$

1.1.1.9 Eingriffsgrößen

Die Eingriffsgrößen beschreiben geometrisch das Ineinandergreifen von Werkzeug und Werkstück, also des Wirkpaares.

a) Eingriffsgrößen des Werkzeuges, bezogen auf die Arbeitsebene

Schnitttiefe bzw. Schnittbreite a_p

Die Schnitttiefe bzw. Schnittbreite a_p ist die Tiefe bzw. Breite des Eingriffs der Hauptschneide, senkrecht zur Arbeitsebene gemessen (Bilder 1.14 bis 1.18).

Beim Langdrehen und Plandrehen, Stirnfräsen und Seitenschleifen entspricht a_p der Tiefe des Eingriffs (Schnitttiefe).

Beim Einstechen, Räumen, Walzfräsen und Umfangsschleifen entspricht a_p der Breite des Eingriffs, also der Schnittbreite.

Beim Bohren ins Volle entspricht a_p dem halben Bohrerdurchmesser.

Arbeitseingriff a_e

Der Arbeitseingriff a_e ist die Größe des Eingriffes des Werkzeuges, gemessen in der Arbeitsebene und senkrecht zur Vorschubrichtung.