

# HANSER

Leseprobe

Stirnradverzahnung

Berechnung - Werkstoffe - Fertigung

Herausgegeben von Heinz Linke

ISBN: 978-3-446-41464-8

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser.de/978-3-446-41464-8>

sowie im Buchhandel.

### 10.2.4 Spanende Zahnformgebung durch Werkzeuge mit geometrisch bestimmter Schneide

#### 10.2.4.1 Technologische Grundlagen

Die Voraussetzung für eine spanende Formgebung ist eine Relativbewegung zwischen einem in den abzuspannenden Werkstoff eindringenden keilförmigen und gegenüber dem Werkstoff verschleißbeständigen Werkzeug und dem Werkstück. Die Relativbewegung setzt sich dabei aus der Schnittbewegung, die zu einer einmaligen Spanabnahme führen würde und der Vorschubbewegung zusammen. Dadurch kommt es zu einer mehrmaligen oder stetigen Spanabnahme. Der Eindringquerschnitt einer Werkzeugschneide in den Werkstoff in der Ebene, auf der der Vektor der Schnittgeschwindigkeit  $v_c$  senkrecht steht, wird als Spanungsquerschnitt  $A$ , dessen Abmessung in der Schneidenebene als Spanungsbreite  $b$  und in der Ebene senkrecht zur Schneidenebene als Spanungsdicke  $h$  bezeichnet (siehe hierzu auch Bild 10.2/8). Das Produkt aus Spanungsquerschnitt und Schnittgeschwindigkeit stellt das Zeitspannungsvolumen  $Q_w$  in  $\text{mm}^3/\text{s}$  dar, dessen Größe den spanungstechnischen Maßstab für die Produktivität des Verfahrens darstellt. Dieses Zeitspannungsvolumen besitzt in erster Näherung eine Proportionalität zur wirksamen Spannungsleistung  $P_z$  und Spanungskraft  $F_z$  deren Komponenten in Schnittrichtung als Schnittkraft  $F_s$  und senkrecht dazu als Passivkraft  $F_p$  bezeichnet werden. Die Passivkraft ihrerseits wird in die Vorschubkraft  $F_v$  und die Radialkraft  $F_r$  zerlegt (Bild 10.2/5). Während die Schnittkraft infolge der schnittrichtungsorientierten Wirkrichtung gemäß

$$P_s = F_s v_c \quad (10.2/2)$$

mit

$$\begin{aligned} P_s &= \text{Schnittleistung} \\ F_s &= f(\text{Spanungsquerschnitt, Schneidekeilgeometrie, Werkstoff, ...}) \end{aligned}$$

für die Leistung des Werkzeugantriebes bestimmend ist, sind die weiteren Kraftkomponenten vor allem von Interesse, um die Größe der senkrecht zur Werkstückoberfläche wirksamen und damit verformungs- und abweichungsverursachenden Belastung zu ermitteln.

Unter der Wirkung der Reibung zwischen Werkzeugschneide und dem Werkstückwerkstoff kommt es zu Verschleißerscheinungen am Werkzeug-Schneidekeil in Form einer Verschleißmarke mit der Breite  $VB$  an der Schneide und einer Auskolkung auf der Spanfläche des Werkzeuges, auf der der abgetrennte Span abläuft (Bild 10.2/6).

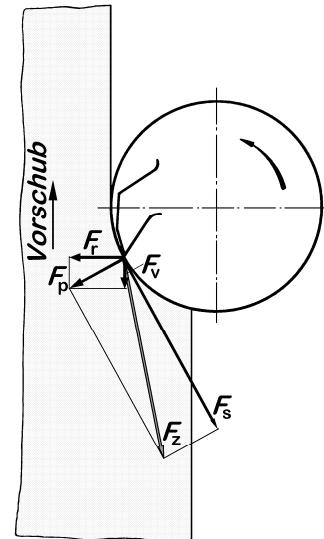


Bild 10.2/5 Kräfte an der Schneide

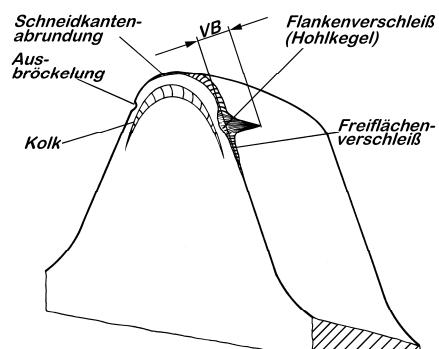


Bild 10.2/6 Verschleißformen an der Schneide

Ursachen dieser Verschleißerscheinungen sind das Abscheren von Pressschweißteilchen, mechanischer Abrieb, Verzunderung und Diffusionsvorgänge, wobei die Reihenfolge der Aufzählung gleichzeitig ein Maßstab für den Grad des Auftretens mit zunehmender Schnittgeschwindigkeit und damit Schnitttemperatur ist (Bild 10.2/7).

In der Vergangenheit wurden Schneidstoffe entwickelt, die den Erfordernissen des Spanungsvorganges immer besser gerecht werden und sogar erlauben, einsatzgehärtete Werkstoffe mit geometrisch bestimmter Schneide zu bearbeiten. Das erfordert hochharte Schneidstoffe, die die Erzeugung sehr kleiner Schneidkantenradien zulassen, um das Verhältnis zwischen Schneidkantenradius und Mindestspanungsdicke, die bei spanenden Verfahren mit geometrisch bestimmter Schneide im Bereich  $h_{\min} = 0,01$  mm liegt, in spanungstechnisch vertretbaren Grenzen zu halten und somit nicht übermäßige Spanungskräfte zu verursachen.

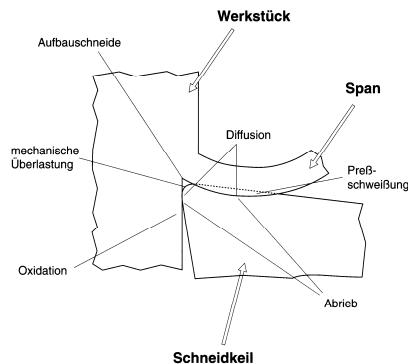


Bild 10.2/7 Ursachen der Verschleißerscheinungen

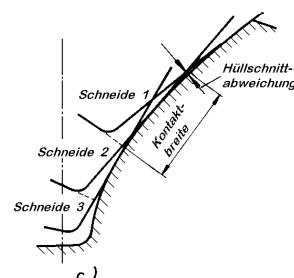
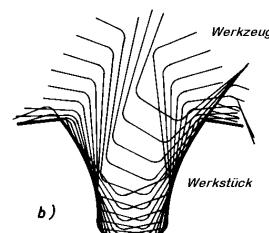
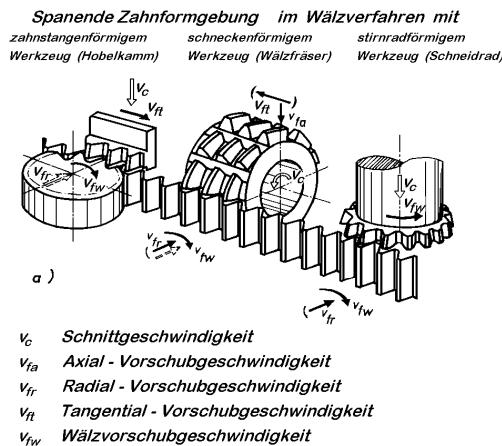


Bild 10.2/8 Spanende Verzahnungsherstellung im Wälzverfahren [10.2/2]

a) Verfahrensprinzip; b) Wälzkinematik Werkzeug-Werkstück; c) Spanungsgeometrie bei Wälzverfahren

In der Verzahnungstechnik sind folgende Schneidstoffe von Bedeutung:

- **Schnellarbeitsstähle** (auch Hochleistungs-Schnell-Stahl [HSS]). Sie sind hochlegierte Stähle mit Härten von 60 bis 67 HRC und einer Anlassbeständigkeit bis ca. 600°C. Die Anlassbeständigkeit, Härte und Verschleißbeständigkeit werden durch den Martensit und die darin eingelagerten Sonderkarbide (besonders Mo-W-Doppelkarbide, Cr- und V-Karbide) bestimmt.

PM-HSS-Schneidstoffe werden, im Gegensatz zu den oben genannten schmelzmetallurgisch hergestellten Schnellarbeitsstählen, nach *pulvermetallurgischen* Verfahren hergestellt. Sie besitzen in der Regel einen höheren Legierungsanteil und haben durch die Feinkörnigkeit, den hohen Reinheitsgrad, die gleichmäßige Verteilung der Karbide sowie das Fehlen von Seigerungen weitere Vorteile. Die durch den hohen Reinheitsgrad begründete Zähigkeit des Werkstoffes macht ihn besonders geeignet für Anwendungen in der Verzahnungstechnik für geometrisch komplizierte und schlagartigen Belastungen unterliegende Werkzeuge, wie beispielsweise Wälzfräser, Schneidräder, Schabräder, usw.

- *Hartmetalle* sind Sinterwerkstoffe und bestehen aus Sonderkarbiden (WC, VC, TiC, TaC und NbC), die in einer Bindungsphase eingelagert sind. Gegenüber den Schnellarbeitsstählen besitzen die Hartmetalle durch den hohen Hartstoffanteil (70 ... 95%) eine höhere Härte und Warmfestigkeit. Sie bewirken bei Schneidentemperaturen bis etwa 1000°C spanungstechnische Vorteile, die jedoch neben der Diffusionsgefahr auch durch die geringe Biegefestigkeit gemindert werden können. Insbesondere bei Verzahnungswerkzeugen versucht man, diese Nachteile durch geringere Korngrößen zu vermindern. Hartmetalle mit Ultrafeinstkorn der Korngröße 0,4 bis 0,5 µm haben eine um etwa 30% höhere Festigkeit als die Standardkorngröße 0,9 bis 1,4 µm.

Infolge ihrer gegenüber den Schnellarbeitsstählen eingeschränkten Bearbeitbarkeit werden aus ihnen vor allem Wendeplatten mit zwei bis vier Schneiden an den Kanten hergestellt, die in einen Werkzeuggrundkörper eingelötet oder geklemmt werden. Bei Verwendung von Wendeschneidplatten sind die maximal möglichen vier Schneiden durch Wenden der Schneidplatten auf dem Grundkörper nacheinander nutzbar, wenn nicht geometrische Gründe, wie z. B. unsymmetrische Schneidenausbildung bei modifizierten Verzahnungsprofilen, entgegenstehen (Bild 10.2/9). Insofern unterscheiden sich auch gleichartige Werkzeuge, z. B. Wälzfräser, dadurch, ob sie mit Schnellarbeitsstahl- oder Hartmetallschneiden ausgeführt sind. Ähnlich den Schnellarbeitsstählen lassen sich Hartmetalle in ihrer Verschleißbeständigkeit durch eine Oberflächenbeschichtung verbessern, die aufgrund der fehlenden Gefügeumwandlung mit CVD-Verfahren aufgebracht wird.

- *Polykristallines Bornitrid (PKB)*. Es ist nach Diamant das heute härteste verfügbare Material (kubisches Bornitrid) und wird gegenwärtig als Schneidplatte im eingeschränkten Abmessungsbereich oder auf einer Hartmetall-Trägerplatte angeboten. Trotz seiner hohen Schlagempfindlichkeit ist dieser Schneidstoff für die Bearbeitung gehärteter Stähle unter Schlichtbedingungen einsetzbar.

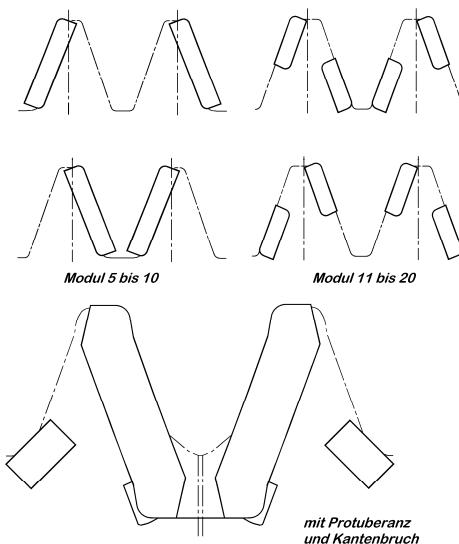


Bild 10.2/9 HM-Schneidplatten an Wälzfräsern  
[10.2/106]

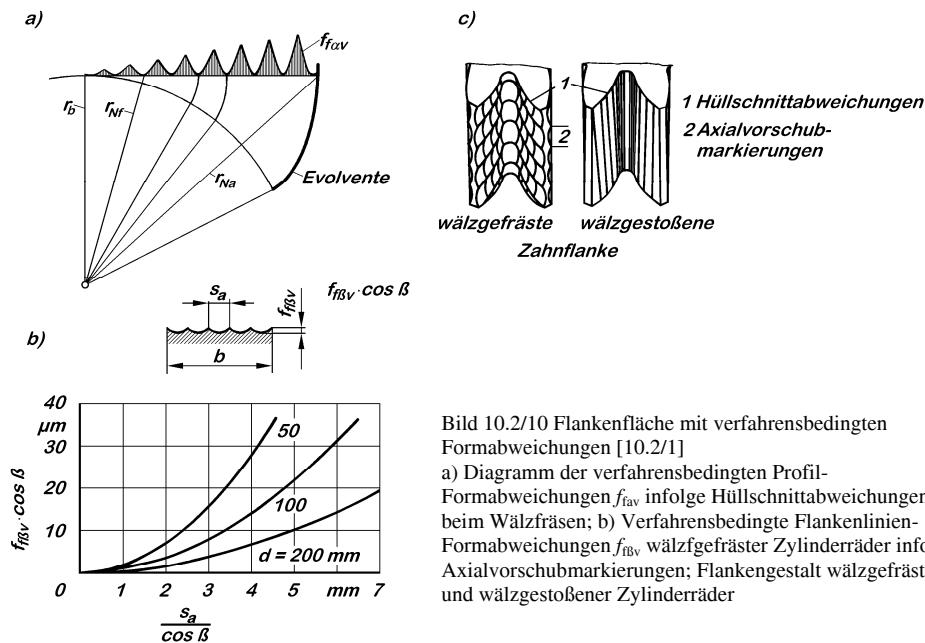


Bild 10.2/10 Flankenfläche mit verfahrensbedingten Formabweichungen [10.2/1]

a) Diagramm der verfahrensbedingten Profil-Formabweichungen  $f_{fav}$  infolge Hüllschnittabweichungen beim Wälzfräsen; b) Verfahrensbedingte Flankenlinien-Formabweichungen  $f_{fBv}$ , wälzgefräster Zylinderräder infolge Axialvorschubmarkierungen; Flankengestalt wälzgefräster und wälzgestoßener Zylinderräder

Die **Spanbarkeit** hängt in starkem Maße von der Schneidstoff - Werkstoff - Fertigungshilfsstoff Paarung ab. Infolge einer nur begrenzten Beeinflussung der Spanungskraft wird die Spanbarkeit vor allem anhand des Verschleißverhaltens gemessen. Als Stellgröße empfiehlt sich die Schnittgeschwindigkeit, da sie den Parameter mit der höchsten Abhängigkeit darstellt. Ihre Größe wird insofern bei der Verfahrensgestaltung um den Wert der relativen Spanbarkeit korrigiert.

Die **Fertigungsgenauigkeit** wird bei spanenden Verfahren von folgenden Gesetzmäßigkeiten geprägt [10.2/44,45]:

- Die Erzeugung der Werkstückverzahnung erfolgt mit diskreten Schneiden in Einzelschritten, wobei die Soll-Flankenflächen durch die Aufeinanderfolge einzelner Abschnitte (pro Schnitt) des geometrischen Wirkpaars Werkzeugschneide-Flankenfläche angenähert werden. Je nach der Lage der Hauptvorschubbewegung (Hauptkomponente der komplexen Vorschubbewegung) ergeben sich verfahrensbedingt Hüllschnittabweichungen bei der Annäherung des Profils (Hauptvorschubbewegung in Flankenrichtung, z.B. Wälzstoßen) oder Vorschubmarkierungen in Flankenrichtung (Hauptkomponente in Evolventenrichtung, z.B. Wälzfräsen) (Bild 10.2/10).
- Die Wälzkinematik erfordert bei den Wälz-, Wälzschraub- und Schraubverfahren eine maschinentechnische Erzeugung über ein entsprechendes Getriebe, in dem auch im Falle seiner elektronischen Ausführung noch mechanische Glieder enthalten sind, die mit ihren unvermeidbaren Abweichungen eine Profil-Formabweichung erzeugen, die als Welligkeit des Profils auftritt. Ihre Wellenzahl entspricht dem Verhältnis der Länge der Eingriffsstrecke zur Eingriffsteilung multipliziert mit dem Verhältnis aus Störfrequenz und Werkzeugdrehfrequenz.
- Das Werkzeug mit seinen unter dem Flanken- und Kopffreiwinkel sowie dem Flanken- und Kopfspanwinkel von der Bezugszahnstange in Zahnbreitenrichtung abweichenden Funktionsflächen besitzt lediglich in einer Ebene das Sollprofil. Fehlerhafte Lagen der Frei- und /oder Spanflächen führen demzufolge zu Unterschieden zwischen Ist- und Soll-

Schneidenlage, so dass Abweichungen der Werkstückverzahnung die Folge sind (Beispiel im Bild 10.2/11).

- Der Werkzeugverschleiß in Form der Verschleißmarke führt unmittelbar zum Versatz der Ist-Schneidenlage gegenüber der Soll Schnidenlage und in Form des Kolkverschleißes über den Orthogonal-Freiwinkel mittelbar zur Veränderung der Schneidenlage gegenüber ihrer wälz- und/oder schraubkinematisch erforderlichen Solllage, so dass beide Verschleißformen zu verschleißbedingten Abweichungen der Verzahnung führen, die in Abhängigkeit von der Art, Lage und Gleichmäßigkeit der Verschleißausbildung über den Werkzeugschneiden zu unterschiedlichen Abweichungsformen führen können.
- Unter der Wirkung der den Spanungsvorgang begleitenden Spanungskraft und ihrer Komponente normal zur Flankenfläche ergeben sich infolge der endlichen Steifheit des Systems Werkzeugmaschine – Werkzeug - Vorrichtung – Werkstück Verformungen, die je nach Größe und Gleichmäßigkeit über der Eingriffslinie zu systembedingten Abweichungen führen (Beispiel: Schälwälzfräsen).
- Neben diesen spanungstechnisch verursachten Abweichungen wirken sich außerdem die allgemeingültigen Gesetzmäßigkeiten hinsichtlich des Einflusses der Genauigkeit des Werkzeugs, seiner Aufspannung, der Werkstückbezugsflächen und der Werkstückaufspanngenaugkeit aus, die zu Rundlauf- und Summenteilungsabweichungen, aber auch zum Taumeln des Profils und der Flankenlinie am Werkstückumfang führen, (Bild 10.2/12).
- Spanende Verfahren arbeiten nach einem diskontinuierlichen (Einzelteilen nach Ausarbeitung einer Zahnlücke) oder kontinuierlichen (Teilung der Verzahnung im Werkzeug gespeichert) Verfahrensprinzip. Während beim Einzelteilverfahren die Teilgenauigkeit der

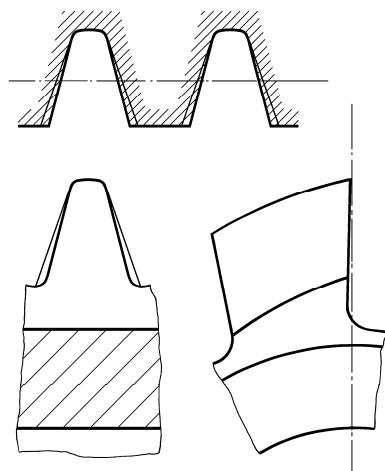


Bild 10.2/11 Einfluss geometrischer Abweichungen des Werkzeugs auf die Verzahnungsgenauigkeit bei einem Wälzfräser mit fälschlich negativem Spanwinkel an den Kopfschneiden

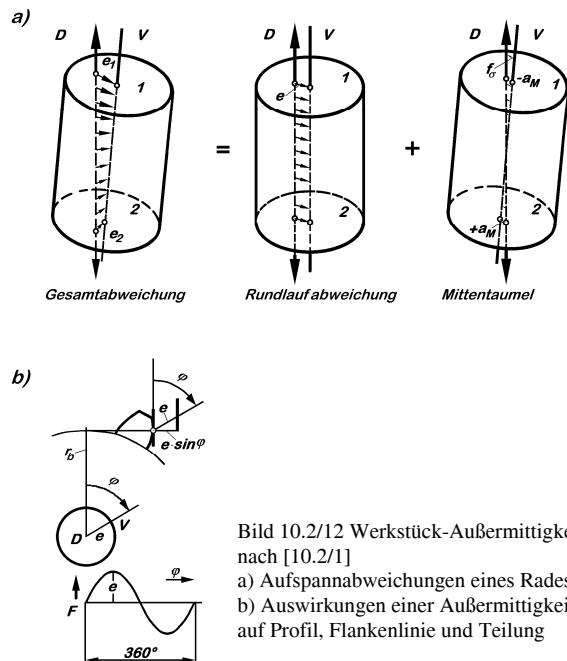


Bild 10.2/12 Werkstück-Außenmittigkeit nach [10.2/1]

- a) Aufspannabweichungen eines Rades;  
b) Auswirkungen einer Außenmittigkeit  $e$  auf Profil, Flankenlinie und Teilung

Werkzeugmaschine die Genauigkeit der Teilkreisteilung bestimmt, ist diese bei kontinuierlich arbeitenden Verfahren vor allem von der Werkzeug-Teilgenauigkeit abhängig. Insbesondere mehrgängige schneckenförmige Verzahnwerkzeuge (z. B. Wälzfräser) weisen größere Abweichungen auf, die im Falle der ganzzahligen Teilbarkeit der Werkstück-Zähnezahl durch die Profil-Formabweichungen führen (Bild 10.2/13).

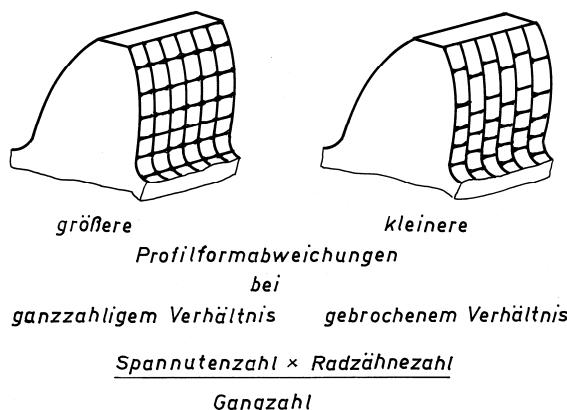


Bild 10.2/13 Profil-Formabweichungen der Flankenfläche beim mehrgängigen Wälzfräsen

#### 10.2.4.2 Wälzhobeln

Das Wälzhobeln (Tab.10.2/1 lfd. Nr. 6) stellt bereits von seinen verfahrens- und getriebetechnischen Prinzipien, einerseits dem Hobel-/Stoßverfahren und andererseits dem Wälzprinzip Zahnstange - Stirnrad ein spanendes Verfahren mit einfacher verfahrenstechnischer Geometrie und Kinematik sowie überschaubaren Gesetzmäßigkeiten dar. Insofern ist es nicht verwunderlich, dass dieses Verfahren bereits seit 1913 von der Schweizer Firma MAAG entwickelt wurde und sich über viele Jahrzehnte vor allem bei der Herstellung großer Verzahnungen in der Einzelfertigung bewährt hat (Tabelle10.2/1 lfd. Nr. 6). Mit der ständigen Weiterentwicklung und zunehmend besseren Beherrschung des Verfahrens Wälzfräsen einschließlich der Entwicklung immer komplizierterer aber auch leistungsfähigerer Wälzfräser-Werkzeuge hat das Wälzhobeln an Bedeutung verloren. Das Wälzhobeln eignet sich für Gerad- und Schrägstirnräder, aber auch für Kettenräder, Zahnwellen und andere Maschinenelemente mit wälzbaren Profilen. Es stellt ein universelles Verfahren mit jedoch geringer Produktivität dar, das auch für Verzahnungen mit geringem Werkzeugauslauf geeignet ist.

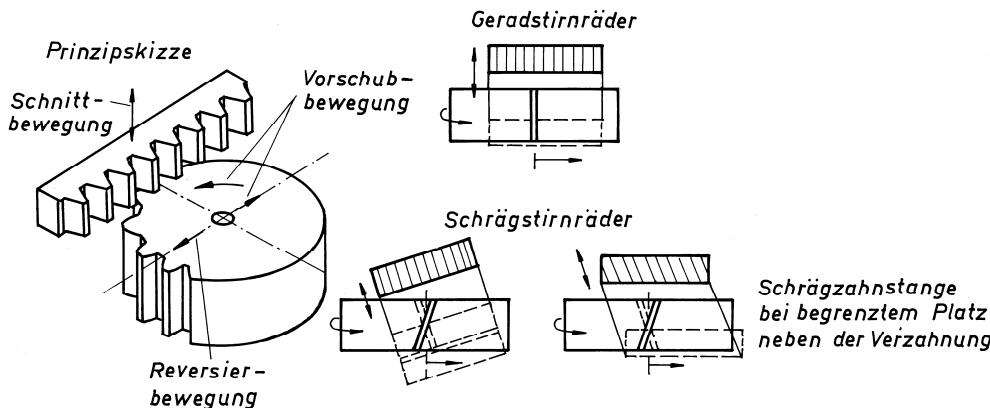


Bild 10.2/14 Verfahrensprinzip für das Wälzhobeln [10.2/103]

Ursache der geringen Produktivität ist, dass der Rückhub des Hobelwerkzeuges als Leerschnitt ausgeführt werden muss und die Erzeugung der Hubbewegung bezüglich der erreichbaren Hubzahlen maschinentechnische Grenzen setzt [10.2/46 bis 10.2/49].

Selbstverständlich lässt sich auf Wälzhobelmaschinen durch Ausschaltung der Wälzbewegung auch im Profilverfahren arbeiten, so dass auch Innenverzahnungen herstellbar sind.

Das Verfahrensprinzip des Wälzhobels entspricht dem Abwälzen einer Stirnradverzahnung an einer Zahnstange, wobei die Zahnstange durch die Werkzeuggeometrie in der Spanfläche einschließlich der Schnittbewegung verkörpert wird (Bild 10.2/14). Die Schnittbewegung wird in Form einer Hubbewegung vom Hobelkamm (mehrere Hobelzähne nebeneinander angeordnet) oder dem einzelnen Hobelzahn ausgeführt, so dass infolge des bewegten Werkzeuges das Wälzhobeln im spanungstechnischen Sinne ein Stoßverfahren darstellt. Die Zähne des Hobelwerkzeuges sind an den Flanken zur Erzielung eines spanungstechnisch erforderlichen Freiwinkels (Vermeidung der Flankenreibung) hinterarbeitet und enthalten an der Stirnfläche, die mit der Spanfläche identisch sein kann, einen Spanflächenschliff, um den Spanablauf günstig zu gestalten. Da dieser Spanflächenschliff zu geometrischen Abweichungen von der Soll-Stirnfläche der Verzahnung führt, ist unter Beachtung der Winkelverhältnisse am Hobelzahn eine Korrektur des sonst dem Bezugsprofil entsprechenden Werkzeugprofils erforderlich [10.2/50 bis 10.2/52]. Die relativ gleichbleibende Spanungskraft und die vielfältigen Einflussmöglichkeiten auf ihre Größe und ihren Verlauf über dem Wälzweg sind die Ursache dafür, dass mit Hilfe des Wälzhobels eine relativ hohe Genauigkeit erreicht werden kann, die bis zur Qualität 5 (4) nach DIN 3962/63 reicht.

#### 10.2.4.3 Wälzstoßen

Das Wälzstoßen (Tab.10.2/1 lfd. Nr. 7) ist ein kontinuierliches Verzahnverfahren, das nach dem Wälzprinzip arbeitet. Demzufolge liegen die Achsen des Werkstückes und des Werkzeuges im Falle zylindrischer Stirnradverzahnungen koaxial im Raum. Als Werkzeug wird ein gerad- oder schrägverzahntes Schneidrad verwendet, dessen Zähne hinterarbeitet sind, um die spanungstechnisch erforderlichen Freiwinkel an den Flanken und am Zahnpkopf zu erhalten [10.2/53]. Während des Spanungsvorgangs wälzen Werkzeug und Werkstück in Analogie zum Eingriff im Getriebe aneinander ab, so dass sich im spanungstechnischen Sinne eine zusammengesetzte Vorschubbewegung ergibt.

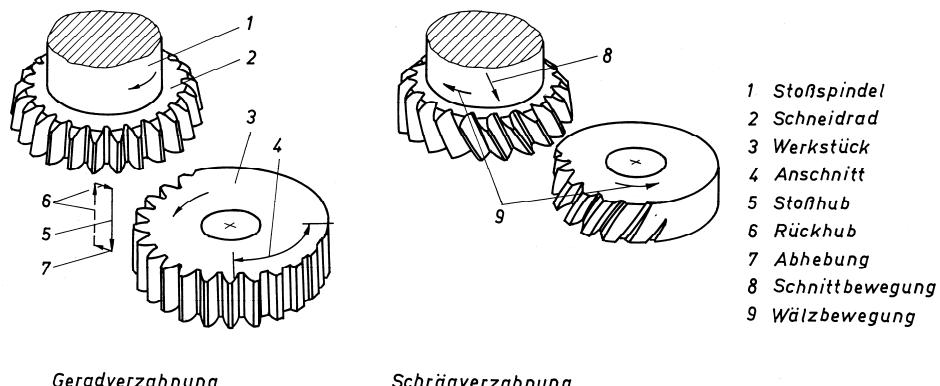


Bild 10.2/15 Verfahrensgeometrie und –kinematik des Wälzstoßens (Anmerkung: Stoßhub ist z-Richtung)

Infolge der Hinterarbeitung der Schneidradzähne sowie zur Erzeugung der Schnittbewegung führt das Schneidrad eine Hubbewegung aus, der bei schrägverzahnten Stirnrädern eine Drehbewegung überlagert ist (Bild 10.2/15). Die Hubbewegung in z-Richtung in Kombination mit der Drehbewegung wird vom Stößel der Maschine ausgeführt, der zur Realisierung der Schraubbewegung die sogenannte Leitpatrone enthält. Diese Leitpatrone, die austauschbar in der Maschine angebracht ist, weist eine schraubenförmige Führungsnuß konstanter Steigungshöhe  $H$  für den Stößel auf. Die sich aus der Wälzbewegung ergebende kombinierte Vorschubbewegung wird durch kinematische Kopplung der Drehbewegung von Werkstück und Schneidrad erzeugt.

Konventionelle Wälzstoßmaschinen sind mit einem mechanischen Getriebe ausgerüstet, bei dem durch Wechselräder die Wälzkopplung zwischen Schneidrad und Werkstück hergestellt wird. Moderne Wälzstoßmaschinen verwenden CNC-Steuerungen, mit denen nicht nur der aufwendige Wechsleraustausch entfällt, sondern auf Grund der Leistungsfähigkeit der Rechnersteuerungen auch vielfältige Aufgaben realisiert werden können, die diese Wälzstoßmaschinen flexibler und leistungsfähiger machen.

Die Stößelbewegung wird allgemein über einen Kurbeltrieb erzeugt, so dass die Schnittbewegung über der einstellbaren Hublänge veränderlich ist. Der Nachteil der ungleichmäßigen Geschwindigkeit über der Hublänge des mechanischen Kurbeltriebs kann durch einen zusätzlichen Kurbeltrieb vermieden werden. Mit dieser konstruktiven Lösung wird die Arbeitsgeschwindigkeit auf etwa 70% der maximalen reduziert, jedoch nahezu über die gesamte Hublänge konstant gehalten und gleichzeitig die maximale Rückhubgeschwindigkeit um ca. 40 % erhöht (Bild 10.2/16). Die erforderliche Hublänge ergibt sich aus der Zahnbreite sowie dem An- und Überlaufweg der Schneiden des Schneidrades über die Werkstück-Stirnfläche.

Die Hublänge  $l_h$  beträgt für geradverzahnte Werkstücke:

$$l_h = 1,14 \cdot b \quad (10.2/3)$$

für Schneidräder mit Treppenschliff für schrägverzahnte Werkstücke:

$$l_h = \frac{b}{\cos \beta} + (0,6 \dots 1,0) m_n \cdot \sin \beta + \frac{b}{14} \quad (10.2/4)$$

mit

- $b$  Zahnbreite
- $\beta$  Schrägungswinkel
- $m_n$  Normalmodul

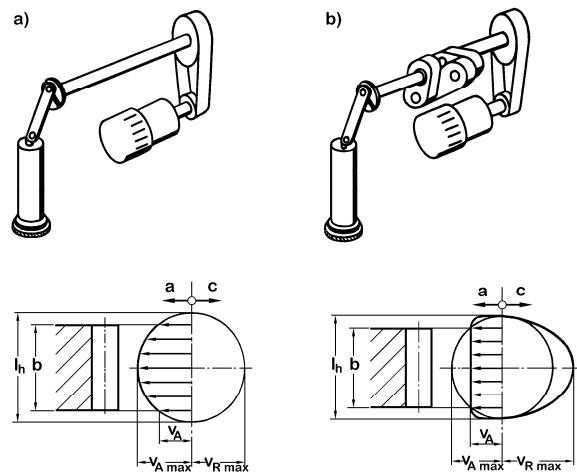


Bild 10.2/16 Wälzstoßen: a) Normaler Hubantrieb, b) Antrieb für konstante Schnittgeschwindigkeit

a Arbeitshub, b Radbreite, c Rückhub,  $l_h$  Hublänge,  $v_A$  Werkzeuggeschwindigkeit im Arbeitshub,  $v_{A\max}$  max. Werkzeuggeschwindigkeit im Arbeitshub,  $v_{R\max}$  max. Rückhubgeschwindigkeit

Verglichen zu den anderen Herstellverfahren von Verzahnungen erfordert das Stoßen einen geringen Abstand zu begrenzenden Bunden. Diese Eigenschaft sowie das Erzeugungsprinzip des Wälzstoßens führten zu den typischen Einsatzgebieten des Verfahrens (Tab.10.2/1 lfd. Nr. 7):

- Innenverzahnte Gerad- und Schrägstirnräder
- Außenverzahnte Gerad- und Schrägstirnräder bei Gewährleistung eines geringen Werkzeugüberlaufs (z. B. als Radblöcke, Schaltwellen in Fahrzeuggetrieben, ...)
- Zahnstangen
- Sonderverzahnungen, wie Zahnsegmente, Kronenräder, Zahnnaben, Keilwellen, Kettenräder u. a.

Damit ist das Wälzstoßen nach dem Wälzfräsen das am häufigsten eingesetzte Verzahnungsverfahren. Die Schneidradgestaltung ist von der Werkstückgeometrie und dem Aufnahmезapfen der Stoßspindel der Maschine abhängig. Grundsätzlich werden unterschieden (DIN 1825 bis 1829). Siehe Anlage 6.1:

- *Scheibenschneidräder* für Außenverzahnungen und große Innenverzahnungen mit ausreichendem Werkzeugauslauf auch für die Befestigungsmutter
- *Glockenschneidräder* für Außen- und große Innenverzahnungen, bei denen die Gefahr des Anstoßens der Befestigungsmutter des Schneidrades an der Werkstückform besteht
- *Schaftschneidräder* mit Kegelschaft für Innenverzahnungen mit kleinem Teilkreisdurchmesser

Schneidräder sind allgemein in Voll-Schneidstoff-Ausführung üblich, wobei Schnellarbeitsstahl als Schneidstoff dominiert. Zur Verbesserung der Schneidhaltigkeit und Standzeit (Gesamt-Schnitzzeit zwischen zwei erforderlichen Nachschliffen) werden Schneidräder oberflächenbehandelt und insbesondere PVD-beschichtet. Der Nachschliff erfolgt von der Spanfläche (Stirnfläche oder stirnseitige Normalebene der Zähne) und führt einerseits zur Verringerung der Zahnbreite und damit - wegen des Hinterschliffs der Zähne - zur Veränderung der Profilverschiebung und andererseits zur Veränderung der Schneidhaltigkeit der Schneidräder.

Die anwendbaren Schnittwerte sind außer von der Spanbarkeit des Werkstück-Werkstoffes vor allem von den Parametern des Spanungsvorganges wie Schneidstoff-Werkstoff-Fertigungshilfsstoff-Paarung, der geometrischen Durchdringung zwischen Schneidrad und Werkstück pro Hub u. a. abhängig, d. h., das Verschleiß-Standzeit-Verhalten des Schneidrades ist maßgeblich für die Verfahrensproduktivität. Insofern unterliegt die Verfahrensgestaltung der ständigen Weiterentwicklung [10.2/56, 10.2/60, 10.2/61].

Beim Wälzstoßen liegt insbesondere an der Kopfecke zur nachlaufenden Flanke ein ungünstiger Spanungsvorgang vor, da die geringeren Spanungsdicken an der nachlaufenden Flanke zu einem

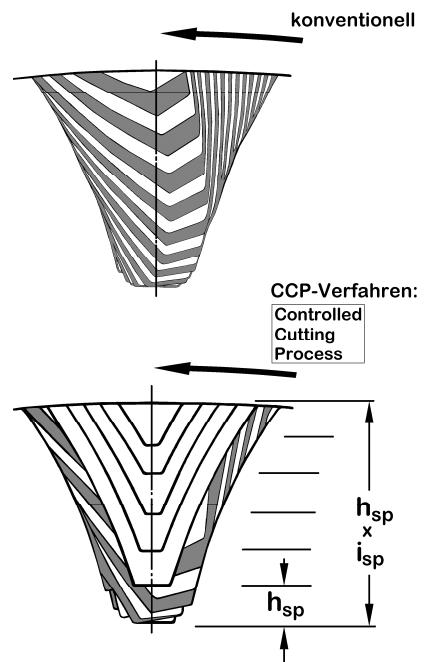


Bild 10.2/17 Vergleich der Spanquerschnitte beim konventionellen und beim CCP-Verfahren

$h_{sp}$  = Radialvorschub je Werkradumdrehung

$i_{sp}$  = Anzahl Werkradumdrehungen

Werkstoffstau und folglich zu erhöhtem Verschleiß führen. Besondere Fortschritte bei der Verfahrensgestaltung sind durch die rechnergestützte Regelung des Spanungsvorganges (CCP-Verfahren) erzielt worden. Durch Abstimmung der Schnittwerte und der Werkzeug- und Werkstückgeometrie wurde unter Nutzung einer spiralförmigen Radialzustellung mit degressivem Radialvorschub der Bereich geringer Spanungsdicken an der nachlaufenden Flanke des Schneidrades während des Auswälzens der Zahnlücken erreicht (Bild 10.2/17). Der Schneidradverschleiß konnte somit deutlich reduziert werden, so dass höhere Schnittwerte angewendet werden können. Gleichzeitig führen die günstigeren Schnittbedingungen zu einer verbesserten Verzahnungsgenauigkeit, die bei üblichen Schnittbedingungen, vor allem durch den Einfluss der Rückfederung zwischen Werkzeug und Werkstück bei Vollendung eines Schnittes (Umlaufs) infolge des Auswälzens des Schneidrades in den Einwälzbereich, und der damit reduzierten Spanungskraft begrenzt wird. Bei Anwendung des CCP-Verfahrens in Verbindung mit Titanitridbeschichteten Schneidrädern ist die Qualität 6 bis 7 nach DIN 3962 bei Einhaltung einer Rauhtiefe von  $R_z < 10 \mu\text{m}$  möglich. Besondere Bedeutung besitzt dies vor allem bei der Herstellung von Innenverzahnungen mit anschließendem Nitrieren, da eine Nachbearbeitung zur Verbesserung der Genauigkeit und/oder der Oberflächengüte sehr kostenintensiv sein kann.

#### 10.2.4.4 Wälzschälen

Das Wälzschälen entspricht der Paarung Schneidrad/Werkrad, wobei jedoch beide eine kontinuierliche Drehbewegung ausführen und das Werkzeug auch eine kontinuierliche Vorschubbewegung in Achsrichtung besitzt (Tab.10.2/1 lfd. Nr. 8). Es ist ein nach dem Schraubwälzprinzip arbeitendes spanendes Verzahnverfahren, das bereits zu Beginn des vergangenen Jahrhunderts erfunden wurde (Bild 10.2/18). Es konnte jedoch erst in den letzten Jahrzehnten zur Anwendungsreife geführt werden, da außerordentliche Anforderungen an Genauigkeit und Steifheit von Werkzeugmaschine und Werkzeug einschließlich der Aufspannung zu erfüllen sind [10.2/64]. Mit dem Wälzschälen steht heute ein hochproduktives Verfahren zur Bearbeitung von Außen- und Innenverzahnungen zur Verfügung. In Form des Hartschälens eignet sich das Verfahren auch als spezielle Verfahrensvariante zur Bearbeitung einsatzgehärteter Verzahnungen mit kleinen Abmessungen. Die Summe der Schrägungswinkel von Werkzeug ( $\beta_0$ ) und Werkstück ( $\beta_2$ ) liegen im Bereich

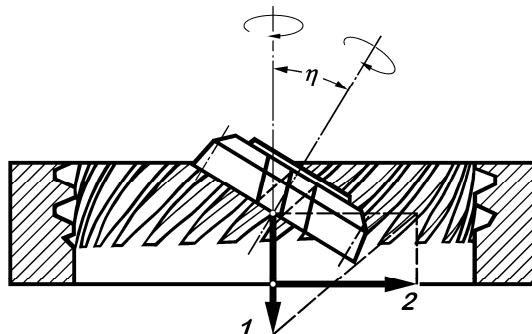


Bild 10.2/18 Wälzschälen

$$0^\circ \leq \eta = \Sigma_0 = |\beta_0 + \beta_2| \leq 90^\circ \quad (10.2/5)$$

Vorzeichenregel:

Außenverzahnung: rechtssteigend +

linkssteigend -

Innenverzahnung: rechtssteigend -

linkssteigend +

Damit bewegen sich die Schneidkanten des Schälrades auch in Zahnrichtung, so dass eine Spanabnahme erfolgen kann. Demzufolge stehen die Komponenten der sich aus dem Verfahrensprinzip ergebenden Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück in Form der

Vorschubbewegung (1) und der zusätzlichen Differentialdrehung (2) (Bild 10.2/18) im festen Verhältnis zueinander. Als unabhängige wählbare Bewegungskomponente ergibt sich lediglich die Axialvorschubbewegung.

Das Schälrad entspricht einem gerad- oder schrägverzahnten Stirnrad mit zylindrischer oder keglicher Außenkontur, wobei die kegige Außenkontur die spanungstechnisch erforderlichen Freiwinkel aufweist. Die zylindrischen Schälräder müssen zur Erzielung effektiver Freiwinkel einen Spanflächenversatz gegenüber dem Achskreuzungspunkt aufweisen. Allgemein werden Schälräder in Analogie zu den Schneidrädern des Wälzstoßverfahrens im Treppenschliff ausgeführt, um spanungstechnisch günstige Schneidengeometrien zu erzeugen. Der Spanflächen-Steigungs- winkel entspricht dabei im Allgemeinen dem Schrägungswinkel des Schälrades  $\beta_0$ . Da bezüglich der Wälzkinematik die einzelnen Punkte der Schneidkanten nicht den getriebetechnischen Ein- griffsbedingungen für eine abweichungsfreie Wälzung entsprechen, sind Korrekturen der Schälrad-Evolventengeometrie unumgänglich. Die *erreichbare Genauigkeit* beim Wälzschälen ungehärteter Verzahnungen liegt im Bereich der Qualitäten 7 bis 8 nach DIN 3962/63 und für das Hartschälen mit Hartmetall-Schälräder bei Qualität 6.

#### 10.2.4.5 Wälzfräsen

Das Wälzfräsen (Tab.10.2/1 lfd. Nr. 9), ein Verfahren der Verzahnungsvor- und -fertigbearbeitung von Außen- und Innenverzahnungen sowie weiterer wälzbarer Profile, das nach Vorarbeiten von *Schiele* (1856) und *Grant* (1887) im Jahre 1897 von *Pfauter* in Chemnitz erfunden wurde, stellt das dominierende Verfahren zur Fertigung von Stirnradverzahnungen überhaupt dar und eignet sich sowohl für die hochproduktive Vor- und Fertigbearbeitung ungehärteter als auch in seiner besonderen Form des Schälwälzfrässens zur Schlichtbearbeitung einsatzgehärteter Verzahnungen (Bild 10.2/19). Es überdeckt dabei den Abmessungsbereich der Verzahnungen von wenigen Millimetern bis zu zehn Metern und von Modulen  $m = 0,1 \dots 50 \text{ mm}$ . Es vereint in sich Vorteile hoher Flexibilität und gleichzeitig hoher Produktivität und in der Vergangenheit hat sich gezeigt, dass dieses Verfahren ständig weiterentwicklungsfähig ist.

Das Verfahrensprinzip entspricht für die Herstellung von Stirnradverzahnungen dem Spanungsverfahren Fräsen und dem getriebetechnischen Schraubwälzprinzip (Bild 10.2/1). Dabei wird das Werkzeug von einer Zylinderschnecke verkörpert, deren Normalschnitt dem Bezugsprofil der Zahnstange entspricht, das mittels einer Komponente der Vorschubbewegung in Zahnrichtung verschoben wird, so dass aus dem Bezugsprofil des Fräzers und der Vorschubkomponente die Erzeugungszahnstange eingehüllt wird. Der Schwenkwinkel des Wälzfräzers  $\eta_0$  ergibt sich entsprechend des Erzeugungsprinzips aus der Geometrie von Werkzeug und Werkstück und beträgt:

$$\eta_0 = \beta \pm \gamma_0 \quad (10.2/6)$$

Mit  $\beta$  Schrägungswinkel  
 $\gamma_0$  Steigungswinkel des Fräzers  
 unteres Vorzeichen (-) bei gleicher Steigungsrichtung,  
 oberes Vorzeichen (+) bei entgegengesetzter Steigungsrichtung von Werkzeug und Werkstück

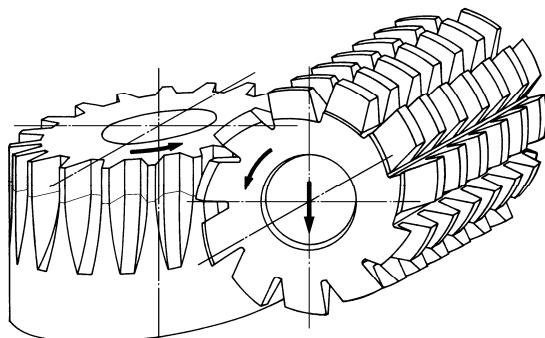


Bild 10.2/19 Wälzfräsen eines Stirnrades