

13.7.2.5 Spitzenlose Außenrundschleifmaschinen

Karsten Otto

13.7.2.5.1 Verfahrensbeschreibung

Das spitzenlose Außenrundschleifen ist nach DIN 8589, Teil 11 ein Verfahren zur Serien- und Massenfertigung von zylindrischen, konischen und balligen Werkstücken (Abb. 13.175). Man unterscheidet beim spitzenlosen Schleifen grundsätzlich zwischen zwei Verfahrensvarianten, dem Durchgangsschleifen (auch Durchlaufschleifen genannt) und dem Einstechschleifen. Letzteres wird für die Bearbeitung von Werkstücken mit abgesetzten oder profilierten Mantelflächen wie z. B. Düsenadeln, Zapfenkreuze, Ventile, Getriebewellen und Kompressorwellen eingesetzt. Im Durchgangsschleifen werden nicht profilierte Werkstücke, wie z. B. Ringe, Stangen, Zylinder und Kegelrollen sowie Hydraulikschieber bearbeitet.

Im Gegensatz zu den anderen Rundschleifverfahren wird das Werkstück hierbei nicht kraftschlüssig eingespannt. Stattdessen befindet es sich im sogenannten Schleifspalt zwischen der Schleifscheibe und der Regelscheibe auf einer Werkstückauflage (Abb. 13.176). Schleif- und Regelscheibe haben die gleiche Rotationsrichtung, jedoch unterschiedliche Rotationsgeschwindigkeiten. Die Schleifscheibe ist im Schleifprozess für die Zerspanung und den Antrieb der Werkstücke ursächlich. Die Werkstückauflage und die langsam rotierende Regelscheibe bremsen durch ihren Reibkontakt das Werkstück soweit ab, dass, von einem geringen Schlupf abgesehen, die Umfangsge-



Abb. 13.175: Werkstückbeispiele für das spitzenlose Außenrundschleifen (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)

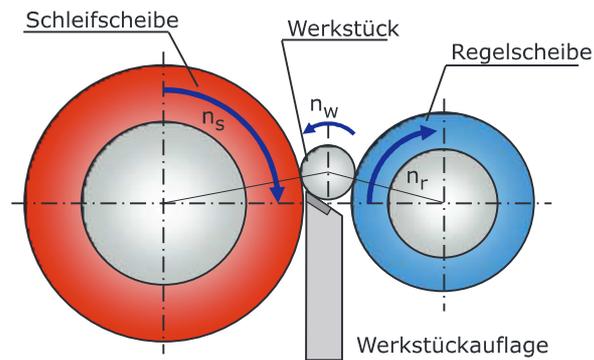


Abb. 13.176: Prinzip des spitzenlosen Außenrundschleifens

schwindigkeiten von Regelscheibe und Werkstück gleich sind. Das spitzenlose Schleifen erfolgt im Gleichlauf. Somit wird eine ausreichend hohe Tangentialkraft zwischen Werkstück und Regelscheibe erzeugt und dadurch das rotatorische Durchrutschen der Werkstücke verhindert. Besonders positiv wirken sich hierbei Regelscheiben mit einem hohen Reibkoeffizienten aus (z. B. Normalkorund in Gummibindung).

Werkstückauflage und Regelscheibe stützen das Werkstück auf seiner Länge bzw. einem wesentlichen Teil seiner Länge ab und nehmen die auftretenden Zerspanungskräfte auf. Durch diese stabile Abstützung können selbst biegeschlanke Werkstücke mit hohen Zeitspanvolumina in sehr guter Qualität bearbeitet werden.

Das spitzenlose Schleifen ermöglicht gegenüber anderen Rundschleifverfahren einen Vorteil in der Fertigungsgenauigkeit. Der eingestellte Zustellbetrag entspricht beim spitzenlosen Schleifen der Durchmesserabnahme des Werkstückes. Beim Schleifen zwischen den Spitzen bzw. im Futter entspricht der Zustellbetrag der doppelten Durchmesserabnahme. Setzt man eine gleiche Zustellgenauigkeit der Maschinenachsen voraus, so ist die Grundgenauigkeit des Verfahrens doppelt so hoch (Abb. 13.177). Demzufolge wirken sich Zustellfehler, welche z. B. durch Schleifscheibenverschleiß oder thermische Verlagerungen der Maschine auftreten, nur halb so stark aus.

13.7.2.5.2 Die Rundheit beim spitzenlosen Schleifen

Durch die gleichzeitige Bearbeitung und Lagerung am Mantel des Werkstückes treten beim spitzenlosen Schleifen sogenannte Polygoneffekte auf. Darunter versteht man die Ausbildung von Rundheitsfehlern auf dem Werkstückumfang. Dieser regenerative Effekt wird durch Schnitttiefenänderungen an der Schleifscheibe bewirkt. Die Ursachen des Rundheitsfehlers sind geometrische



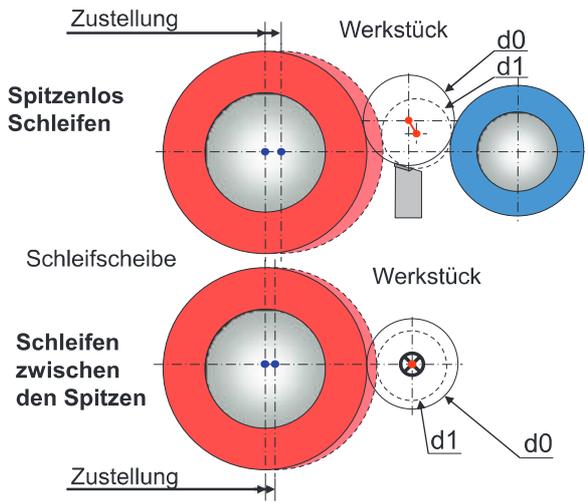


Abb. 13.177: Hohe Grundgenauigkeit des Verfahrens (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)

und dynamische Instabilitäten. Dynamische Instabilitäten können durch die Maschine, die Werkzeuge, das Werkstück selbst, die Prozessparameter sowie durch äußere Störeinflüsse erzeugt werden. Rundheitsfehler bilden sich nie als Folge einer Instabilität aus. Es liegen immer mehrere Ursachen vor, die zusammen wirken und sich gegenseitig beeinflussen.

Die Schleifmaschine sollte einen stabilen Nachgiebigkeitsfrequenzgang (Abb. 13.178), möglichst ohne Reso-

nanzstellen, haben. In der heutigen Zeit wird dies durch FEM Simulationen während der Konstruktion und durch Modalanalysen an der Maschine und anschließender Optimierungen realisiert. Optimierte Frequenzgänge weisen keine ausgeprägten Maxima in der Nachgiebigkeit bei gleichzeitigem Abfall im Phasengang durch -90° auf.

Bei zu hohen Zeitspannungsvolumen oder falsch ausgelegten bzw. falsch abgerichteten Schleifscheiben treten Schwingungen beim Schleifen auf. Die sich dadurch periodisch ändernde Zustellung am Werkstück erzeugt Unrundheiten. Auch das Werkstück selbst kann durch seine Geometrie die Ursache für Rundheitsfehler sein. Unrundheiten können beim Überschleifen von Verzahnungen, Querbohrungen und Nuten sowie beim Bearbeiten von Werkstücken mit Unwucht entstehen.

Um den Einfluss der geometrischen Rundheitsfehlerausbildung näher zu erläutern, kann man sich ein Werkstück vorstellen, welches auf seinem Umfang nur eine Erhebung hat (Abb. 13.179). Beginnt das Werkstück im Schleifspalt zu drehen (Position 1), wird eine solche Erhebung zu einem gewissen Zeitpunkt in Kontakt mit der Werkstückauflage (Position 2) kommen. Die Erhebung bewirkt, dass das Werkstück im Schleifspalt nach oben angehoben wird. Das führt unweigerlich zu einer abrupten Zustellungsänderung an der Schleifscheibe. Wenn sich die Erhebung an der Werkstückauflage vorbei gedreht hat, sinkt das Werkstück wieder ab und die Zustellung

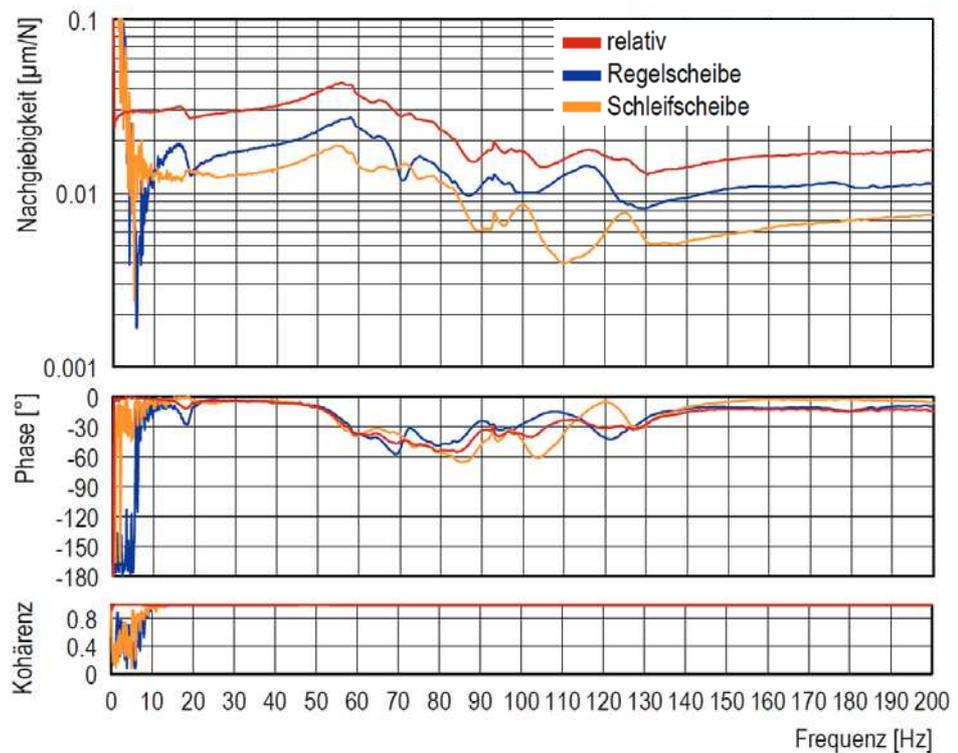


Abb. 13.178: Nachgiebigkeitsfrequenzgang (Quelle: Planlauf GmbH)

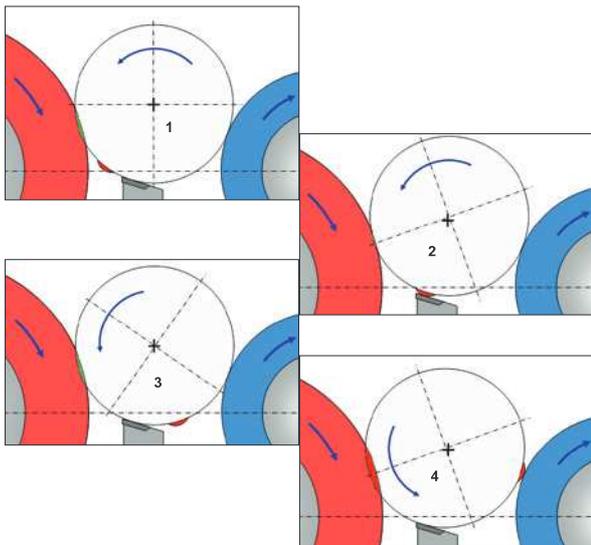


Abb. 13.179: Entstehung von Polygoneffekten (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)

ändert sich erneut. Das Werkstück hat auf Grund dieser Zustellungsänderung an der Schleifscheibe auf seinem Umfang einen Rundheitsfehler erhalten. Dreht sich das Werkstück weiter, kommt die Erhebung mit der Regelscheibe (Position 4) in Kontakt. Das Werkstück wandert in Richtung Schleifscheibe. Dadurch wird eine erneute Zustellungsänderung hervorgerufen und ein weiterer Rundheitsfehler entsteht. Somit kommt es bei nur einer angenommenen Erhebung auf dem Werkstückumfang innerhalb einer einzigen Werkstückumdrehung zu mindestens zwei neuen Rundheitsfehlern. Die neu entstandenen Rundheitsfehler bewirken die gleichen zuvor beschriebenen Effekte.

Der Rundheitsfehler stellt sich als Überlagerung von Polygonen dar (Abb. 13.180). Die Amplitude der Polygone ist abhängig von der Schleifscheibeneindringtiefe und ih-



Abb. 13.180: Überlagerung von Polygonen (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)

rer Wellenzahl. Polygone mit niedriger Wellenzahl bilden die größten Rundheitsfehler aus.

Um diesen Rundheitsfehler abzubauen, sind spezielle geometrische Einstellungen im Schleifspalt notwendig. Entscheidend hierfür ist die Größe der Winkelverhältnisse der Kontaktpunkte zwischen Werkstück und Schleifscheibe, zwischen Werkstück und Werkstückauflage sowie zwischen Werkstück und Regelscheibe (Abb. 13.181), die als Winkel φ_1 und φ_2 definiert sind. Mit Hilfe dieser Winkel lässt sich der Stabilitätsindex SI für jedes Polygon und jede Einstellung berechnen. Der Stabilitätsindex gibt Auskunft, ob sich ein Polygon einer bestimmten Ordnung beim Schleifen verbessert (abbaut) oder verschlechtert (Abb. 13.182).

Eine geometrisch stabile Einstellung ist erreicht, wenn der Stabilitätsindex aller betrachteten Polygone positiv ist. In der Praxis werden dabei vorzugsweise die Polygone von 2 bis 30 überprüft. Häufig weisen jedoch ein oder mehrere Polygone negative Werte auf. Das Polygon mit dem kleinsten Stabilitätsindex (im Folgenden mit w bezeichnet) sollte sich dementsprechend am stärksten ausprägen. Jedoch haben Versuche und energetische Überlegungen gezeigt, dass häufig die energetisch günstigeren niedrigen Polygonordnungen mit negativem Stabilitätsindex dominieren. Dementsprechend ist eine geometrisch instabile Einstellung mit $w > 15$ einer Einstellung mit

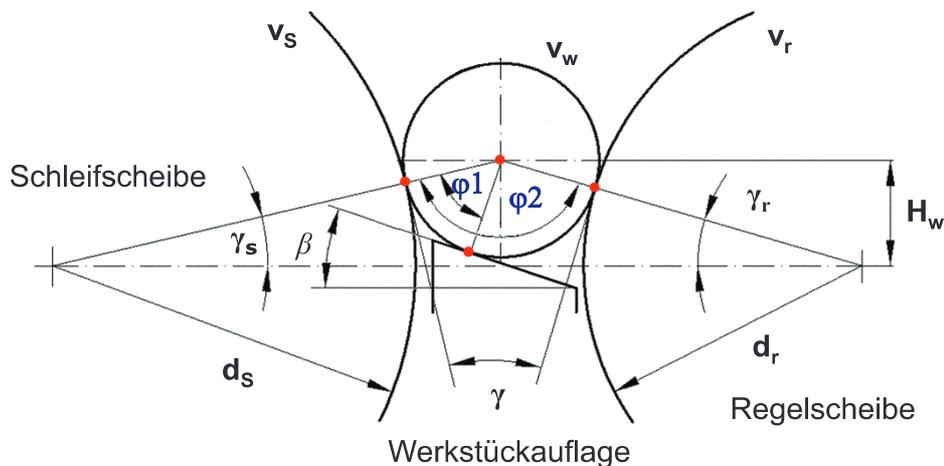
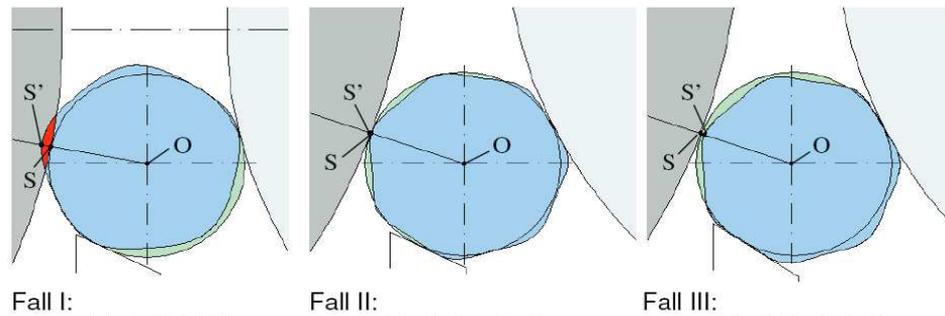


Abb. 13.181: Kontaktverhältnisse im Schleifspalt (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)



Fall I	$SI(z) > 0$	→ Polygon wird abgebaut
Fall II	$SI(z) = 0$	→ Polygon wird nicht abgebaut
Fall III	$SI(z) < 0$	→ Polygon wird größer

Abb. 13.182: Der Stabilitätsindex (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)

$w < 15$ vorzuziehen, da der Einfluss kleinerer Polygonformen auf den Rundheitsfehler wesentlich höher ist. Der Stabilitätsindex berechnet sich wie folgt (Reeka 1967):

$$SI_{(z)} = 1 + \frac{\sin(\phi_1) \cdot \cos(z \cdot \phi_2) - \sin(\phi_2) \cdot \cos(z \cdot \phi_1)}{\sin(\phi_2 - \phi_1)} \quad (13.53).$$

Z steht für die Eckenzahl des jeweils einzeln zu berechnenden Polygons. Zur besseren Übersicht können die Ergebnisse in einem Diagramm dargestellt werden (Abb. 13.183).

Eine solche Darstellung zeigt jedoch nur die Auswertung einer geometrischen Konfiguration. Um einen besseren Gesamtüberblick zu erreichen, kommen Stabilitätskarten zum Einsatz. Diese enthalten eine große Anzahl von geometrischen Einstellungen und Ergebnissen. Auf Grund der Übersichtlichkeit muss der Informationsgehalt der Stabilitätskarten im Vergleich zu dem in Abbildung 13.183 gezeigten Säulendiagramm reduziert wer-

den. Zusätzlich wird nur das Polygon mit dem niedrigsten Stabilitätsindex dargestellt. Somit wird sichtbar, ob die jeweilige geometrische Einstellung stabil oder instabil ist. Im Laufe der Zeit wurden mehrere Arten von Stabilitätskarten entwickelt, wobei sich deren Nutzungsmöglichkeiten und Auswertung erheblich unterscheiden. Die wichtigsten universellen Karten sind die von Reeka (Reeka 1967) und Mais (Mais 1980). Spezielle Stabilitätskarten wurden durch die Softwaresysteme „Cegris“ und „Heureka“ generiert (Abb. 13.184). So zeigt die Färbung der Stabilitätskarte „Heureka“ die Größe des minimalen Stabilitätsindex an. Die roten Bereiche sind instabil ($SI < 0$), der gelbe Bereich hat einen Stabilitätsindex von Null und die grünen und blauen Bereiche zeigen Einstellungen mit einem positiven Stabilitätsindex.

Nach der Auswahl eines geeigneten Arbeitspunktes kann man die notwendigen Einstellparameter für die Maschine, den Winkel der Werkstückauflage β und die Höhenlage des Werkstückes H_w , aus der Stabilitätskarte entnehmen.

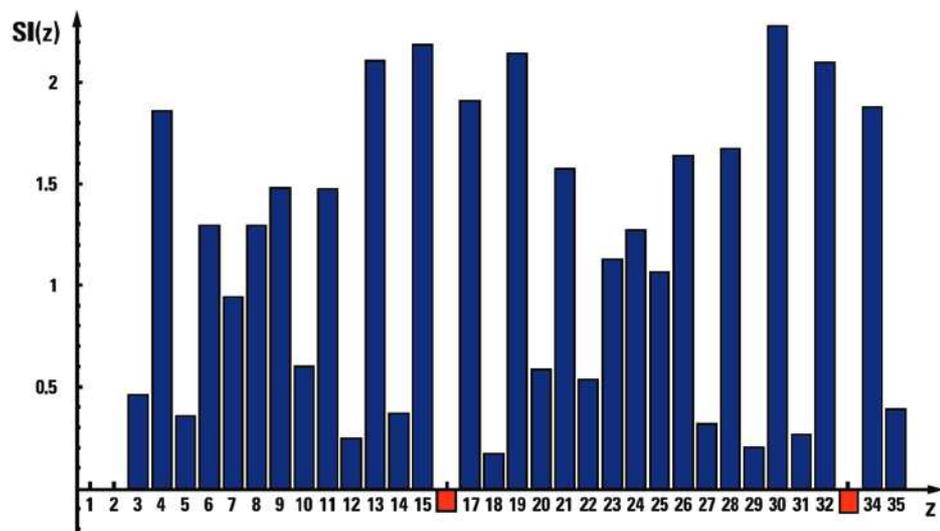


Abb. 13.183: Stabilitätsindex über die Polygonordnung z (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)

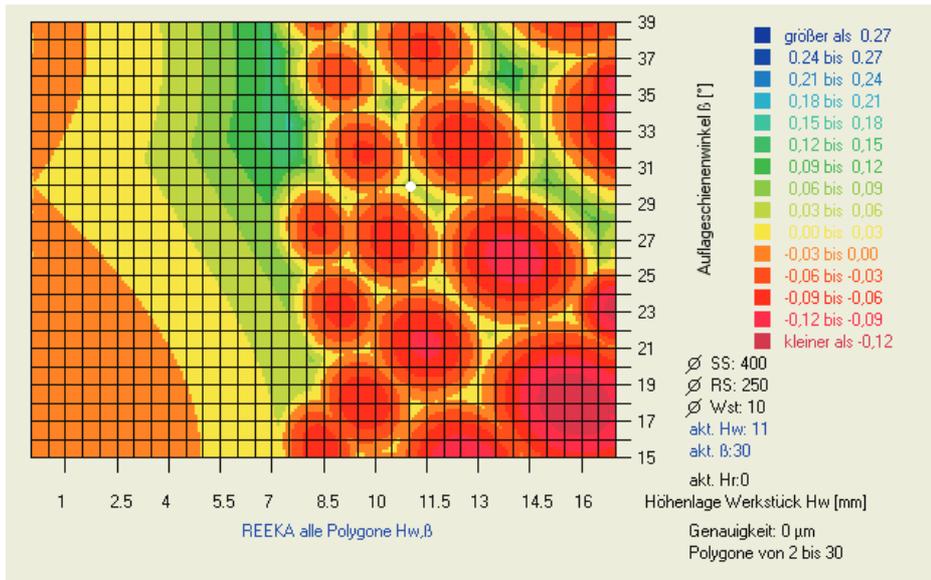


Abb. 13.184: Stabilitätskarte Heureka (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)

Hat die gewählte Höhenlage H_w einen positiven Wert spricht man vom „Schleifen über Mitte“. In diesem Fall befindet sich der Werkstückmittelpunkt oberhalb der Verbindungslinie der Mittelpunkte von Schleif- und Regelscheibe (Abbildung 69). Schleift man unterhalb dieser Verbindungslinie hat die Höhenlage H_w einen negativen Wert und man spricht man vom „Schleifen unter Mitte“. Die Eigenschaften beider Schleifverfahren sind in Tabelle 13.8 aufgezeigt.

Stehen keine Stabilitätskarten zur Ermittlung von Höhenlage H_w und Werkstückauflagewinkel β zur Verfügung, kann unter der Randbedingung $d_r / d_s = 0,6$ für die in Abbildung 13.181 dargestellte Schleifspaltgeometrie, mit Richtwerten gearbeitet werden (Tab. 13.9):

Mit Hilfe der Gleichung 13.54 wird dann die Höhenlage H_w berechnet.

$$H_w = \frac{\gamma}{2 \cdot \frac{1}{d_s + d_w} + \frac{1}{d_r + d_w}} \quad (13.54).$$

Tab. 13.8: Eigenschaften Schleifen über und unter Mitte

Schleifen über Mitte	Schleifen unter Mitte
mehr und große geometrisch stabile Bereiche	wenige und kleine geometrisch stabile Bereiche
Kräfte auf die Werkstückauflage gering	hohe Kräfte auf die Werkstückauflage
Werkstück besitzt einen Freiheitsgrad → weniger stark anfällig für dynamische Einflüsse	Werkstück besitzt keinen Freiheitsgrad → sehr anfällig für dynamische Einflüsse
Werkstück kann nach oben aus dem Schleifspalt herauspringen → Oberführung für Durchgangsschleifen notwendig	Werkstück kann nicht nach oben aus dem Schleifspalt herauspringen
Werkstücke laufen beim Durchgangsschleifen bei konischer Regelscheibenform auseinander → keine Beeinträchtigung durch Stirnflächenqualität der Werkstücke	Werkstücke laufen beim Durchgangsschleifen bei konischer Regelscheibenform nicht auseinander → Werkstücke können nicht kippen

Tab. 13.9: Richtwerte

Winkel der Werkstückauflage β	geometrisch stabile Tangentenwinkel γ
30°	6°... 6°40' oder 7°20'... 8°30'
40°	7°... 7°40' oder 8°30'... 10°
45°	6°... 6°40' oder 8°... 9°

Die Werkstückauflage hat auf Grund der großen Auskraglänge und der geringen Dicke eine relativ geringe Steifigkeit. Die horizontalen Kräfte (F_{xa}), die auf die Werkstückauflage wirken, sollten möglichst gering sein. Wichtig ist daher die Auswahl des richtigen Aufwinkels β . Dieser wird aus dem Reibwert an der Werkstückauflage μ_a nach folgender Gleichung 13.55 berechnet:

$$\tan(\beta) = \mu_a \quad (13.55).$$

Der Reibwert, welcher in einem Bereich von $\mu_a = 0,12 \dots 0,4$ variiert, ist abhängig von der

- Werkstoffpaarung Material der Werkstückauflage - Werkstück
- Art des Kühlschmierstoffes
- Rauheit der Reibpartner
- Umfangsgeschwindigkeit des Werkstückes.

Auf Grund der vielen Einflussgrößen liegt der Reibwert für den jeweiligen Einsatzfall meist nicht vor. Deshalb werden überwiegend Werkstückauflagen mit einem Winkel von 30° , unabhängig vom Reibwert, verwendet.

13.7.2.5.3 Durchgangsschleifen

Kurzbeschreibung

Das spitzenlose Durchgangsschleifen gehört zu den komplexesten aber auch zu den rentabelsten Schleifverfahren innerhalb der Außenrundbearbeitung (Abb. 13.185). Die Werkstücke werden infolge der Neigung der Regelscheibe und ihrer Umfangsgeschwindigkeit in Achsrichtung durch den Schleifspalt transportiert und dabei bearbeitet.

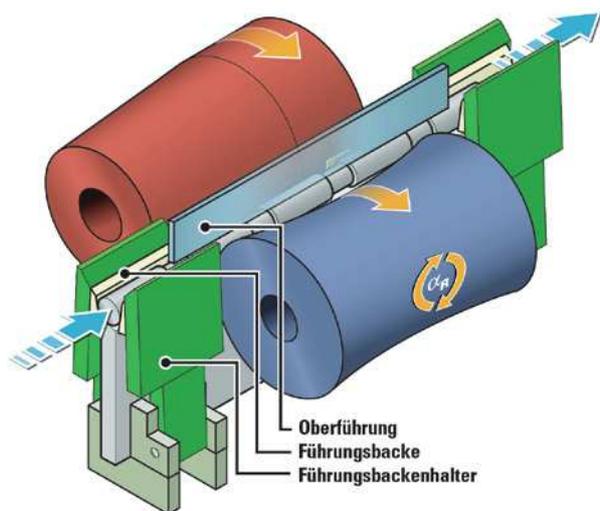


Abb. 13.185: Durchgangsschleifen (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)

Die Beschickung der Maschine erfolgt während der Bearbeitung, also in der Hauptzeit. Geführt werden die Werkstücke im Ein- und Auslauf mit Führungsbacken. Der Materialabtrag erfolgt ab dem Eintritt in den Schleifspalt. Auch das Schleifen profilierter Werkstücke ist möglich, sofern sie nur am größten Durchmesser bearbeitet werden. Werkstücke, welche die Schleifspaltlänge deutlich überschreiten (z. B. Stangen und Rohre), lassen sich ebenfalls äußerst effektiv bearbeiten.

Die Antriebskraft am Regelscheibenumfang teilt sich auf Grund der Neigung in eine axiale und eine vertikale Komponente. Die vertikale Kraftkomponente übernimmt dabei die Aufgaben der Regelscheibe wie Führen und Abbremsen der Werkstücke im Schleifprozess. Die axiale Kraftkomponente führt zur Vorschubbewegung der Werkstücke im Schleifspalt. Je mehr man eine Regelscheibe neigt, umso größer wird der axiale Kraftanteil und desto schneller werden die Werkstücke durch den Schleifspalt befördert. Erhöht man zusätzlich die Regelscheibendrehzahl, so kann eine weitere Steigerung der Vorschubbewegung erzielt werden. Die maximal mögliche Vorschubgeschwindigkeit ist vor allem vom Werkstückdurchmesser, dem Aufmaß und der zu erzielenden Oberflächenqualität abhängig. Die Vorschubgeschwindigkeit v_d berechnet sich aus der Drehzahl der Regelscheibe n_r , dem Regelscheibendurchmesser d_r und dem Neigungswinkel der Regelscheibe α_r nach folgender Formel:

$$v_d = n_r \cdot d_r \cdot \pi \cdot \sin(\alpha_r) \quad (13.56).$$

Regelscheibenform

Um eine gerade Berührungslinie zwischen Werkstück und Regelscheibe über den gesamten Schleifspalt zu gewährleisten, muss die Regelscheibe eine besondere Form aufweisen. Diese wird durch das Abrichten erzeugt und Hyperboloid genannt (Abb. 13.186). Die Form der Regelscheibe hängt vom Neigungswinkel der Regelscheibe α_r ,

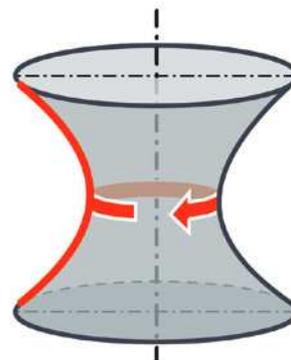


Abb. 13.186: Hyperboloid (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)

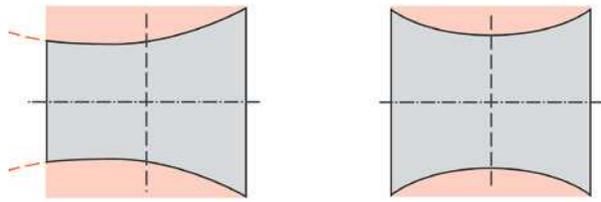


Abb. 13.187: Konische und symmetrische Regelscheibenform (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)

von der Höhenlage des Werkstückes H_w , vom Regelscheibendurchmesser d_r und vom Werkstückdurchmesser d_w ab. Grundsätzlich muss zwischen der konischen und der symmetrischen Regelscheibenform unterschieden werden (Abb. 13.187). Beide werden in der Praxis genutzt, wobei der Anteil der konischen Form deutlich überwiegt. Die konische Regelscheibenform wird durch Schwenken des Regelscheibenabrichters um den Abrichtwinkel α'_r und den Einsatz einer Diamantschuhverstellung erzeugt (Abb. 13.188). Das ist eine tangentielle Verstellung des Abrichtdiamanten um den Wert h . Mit der Diamantschuhverstellung wird nicht die Form des Hyperboloids sondern nur die Lage von dessen Kehlkreis geändert. Wird der Diamant nicht in der Höhe verstellt, erhält man eine symmetrische Regelscheibenform. Für das Abrichten einer konischen Regelscheibenform gelten folgende Gleichungen:

$$\alpha'_r = \alpha_r \cdot \sqrt{\frac{d_r}{d_r + d_w}} \quad h = \frac{H_w}{\sqrt{\frac{d_w}{d_r} + 1}} \quad (13.57)$$

Auf modernen CNC-Maschinen kann das komplette Regelscheibenprofil NC-gesteuert abgerichtet werden. In die Steuerungen sind dafür komplexe mathematische Pro-

gramme integriert, welche die Form der Regelscheibe für den jeweiligen Anwendungsfall berechnen können und die Ergebnisse als NC-Programme generieren. Dadurch entfällt sowohl das Einstellen der Diamantschuhverstellung als auch das Schwenken des Regelscheibenabrichters.

Prozessführung

Für das Schleifen wird die Schleifscheibe in mehrere Profilstufen unterteilt (Abb. 13.189). CNC-Steuerungen erlauben dieses Profilieren komfortabel über das Abrichtprogramm. Die Berührungslinie an der Regelscheibe bleibt gerade. Die Einlaufzone dient zum Ausgleich von Werkstückdurchmessertoleranzen. In der Schleifzone findet die eigentliche Zerspanung statt. Innerhalb der Ausfunkezone werden die Unrundheiten und Rauheiten auf ein Minimum reduziert.

Beim Durchgangsschleifen muss das Werkstück während des gesamten Schleifvorgangs, einschließlich Ein- und Auslauf, auf einer Linie liegen. Dafür wird die Werkstückauflage über die Scheibenbreite hinaus verlängert (Abb. 13.190). Die Führungsbacken setzen am Ein- und Auslauf die Linie der Regelscheibe fort. Während die schleifscheibenseitig angebrachten Führungsbacken einen gewissen Abstand zum Werkstück haben, müssen die Führungsbacken auf der Regelscheibenseite sehr genau eingestellt werden. Besonders an der Auslaufseite muss die Berührungslinie der Regelscheibe exakt durch die Führungsbacke verlängert werden. Ansonsten erzeugt die Schleifscheibenkante am Auslauf Formfehler und Vorschubmarkierungen auf der Werkstückoberfläche.

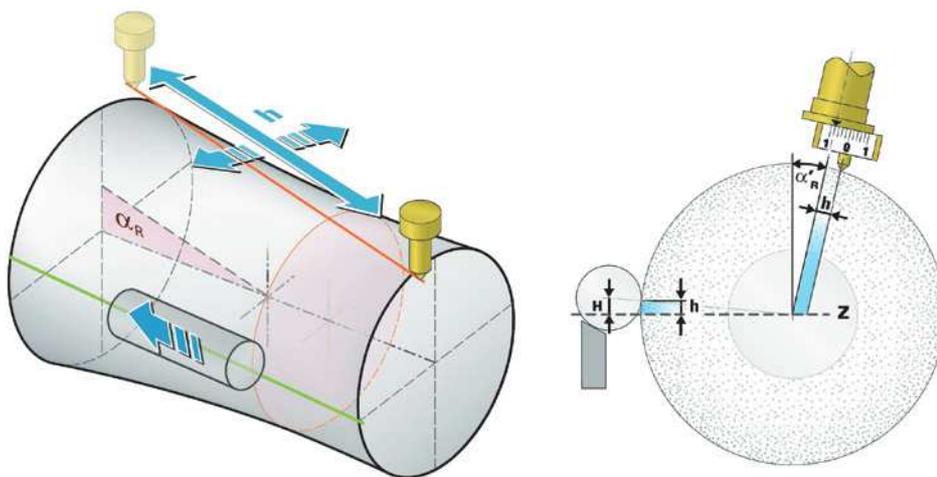


Abb. 13.188: Konische Regelscheibenform, Neigungswinkel, Abrichtwinkel, Diamantschuhverstellung (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)

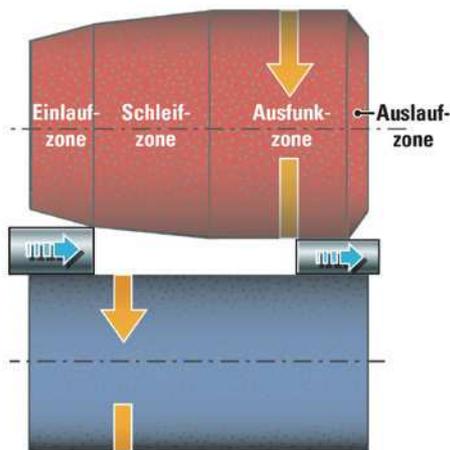


Abb. 13.189: Mehrstufiger Schleifprozess (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)

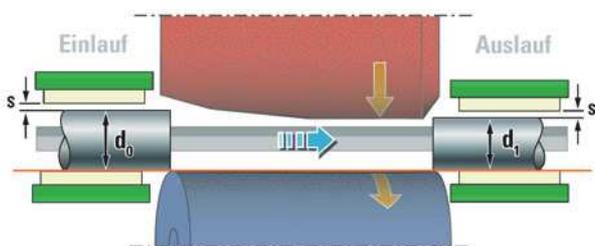


Abb. 13.190: Einstellung der Führungsbacken (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)

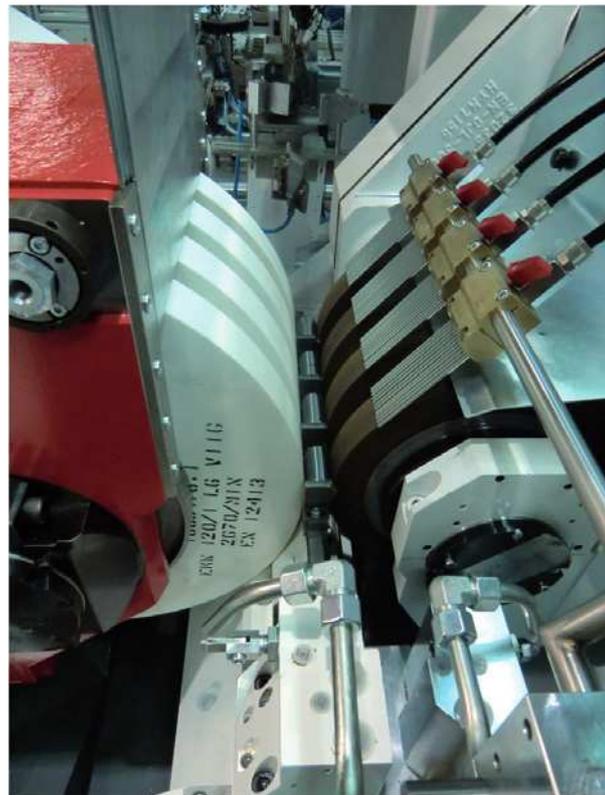


Abb. 13.192: Einstechschleifen in 4-fach Produktion (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)

13.7.2.5.4 Einstechschleifen

Kurzbeschreibung

Beim Einstechschleifen werden die Werkstücke dem Schleifspalt einzeln zugeführt. Geschliffen wird das Werkstück durch die radiale Zustellung der Schleifscheibe mit Hilfe der Achse X1. Nach dem Schleifvorgang öffnet der Schleifspalt wieder und das Werkstück kann abgeführt werden (Abb. 13.191).

Schleif- und Regelscheibe besitzen im Allgemeinen ein Negativprofil des Werkstückes, das ihnen mit Hilfe der Abrichter verliehen wird. Neben unterschiedlichen

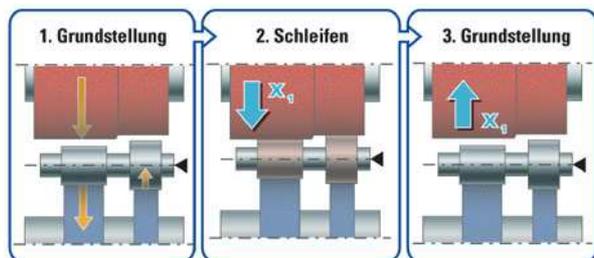


Abb. 13.191: Schleifzyklus (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)

Durchmessern können auch Fasen und Verrundungen in einem einzigen Einstich bearbeitet werden.

Neben der Einfachproduktion können bei ausreichender Scheibenbreite auch mehrere Werkstücke gleichzeitig geschliffen werden. In diesem Fall spricht man von Mehrfachproduktion (Abb. 13.192).

Die rotierende Regelscheibe wird beim Einstechschleifen nur minimal geneigt (ca. $0,1^\circ \dots 0,2^\circ$). Durch die dabei entstehende Axialkraft läuft das Werkstück gegen einen Axialanschlag und ist in dieser Lage für den Schleifvorgang positioniert.

Prozessführung

Der Schleifzyklus besteht aus mehreren aufeinander folgenden Schritten. Man spricht deshalb von einem mehrstufigen Schleifprozess (Abb. 13.193). Er besteht mindestens aus den Prozessschritten Schruppen, Schlichten und Ausfunken. Die Zustellbeträge und die Zustellgeschwindigkeiten können für jeden Schritt in der Steuerung hinterlegt werden. Um kurze Schleifzeiten zu erreichen, muss in der Schruppphase mit hohen Zustellgeschwindigkeiten und folglich mit hohem Zeitspanvolumen Q_w gearbeitet werden. In der Schlicht- und Ausfunkphase

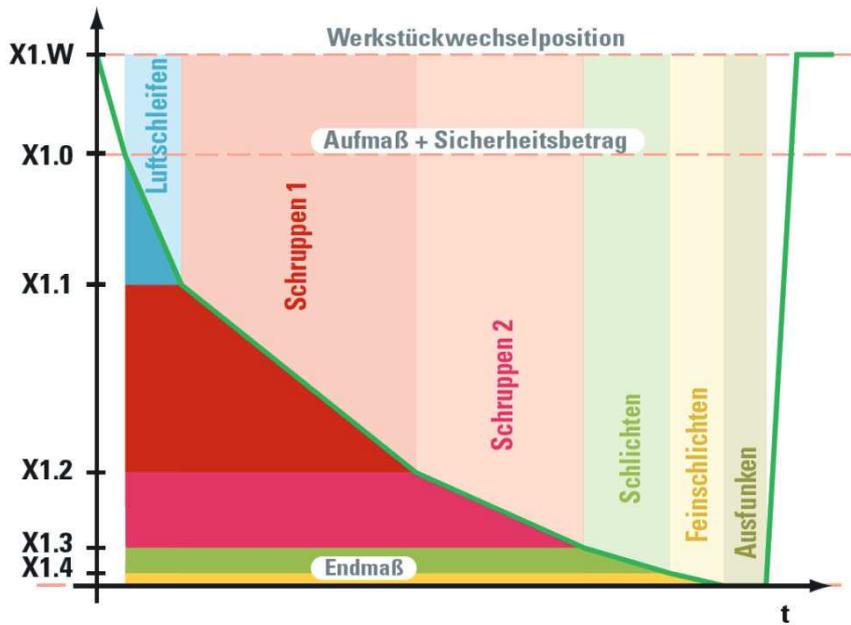


Abb. 13.193: Mehrstufiger Schleifprozess (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)

wird die Werkstückqualität erzeugt. Die Zustellgeschwindigkeit wird beim Schlichten reduziert und das Ausfunken erfolgt ohne Zustellung. Beim Ausfunken wird nur noch durch den Abbau von elastischen Verformungen der Maschine und der Werkzeuge geschliffen. Damit werden die Rundheit und die Oberfläche des Werkstückes und die Maßstabilität des Prozesses verbessert.

Beim Zerspanen großer Aufmaße kommt die Technologie „Schleifen aus dem Vollen“ zur Anwendung (Abb. 13.194). Durch die starke Reduktion des Durchmessers verschiebt sich der Werkstückmittelpunkt in Richtung Werkstückauflage und Regelscheibe. Dadurch kann der Überstand des Werkstückes über die Werkstückauflage verloren gehen und es besteht die Gefahr, in die Werkstückauflage zu schleifen. Um dieser Verschiebung entgegenzuwirken, wird die Regelscheibe durch die X4-Achse während des Einstechvorgangs der X1-Achse an die Werkstückauflage herangefahren. Die Umschaltpunkte der X4-Achse werden dabei zeitgleich mit denen der X1-Achse erreicht.

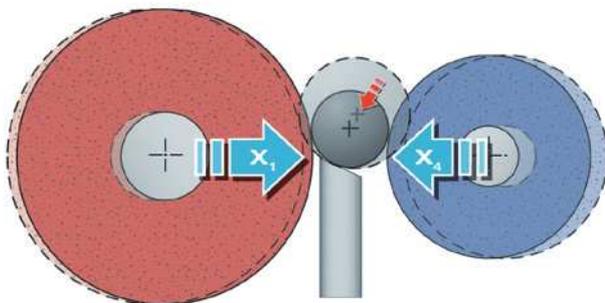


Abb. 13.194: Schleifen aus dem Vollen (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)

Die Anschliffsituation

Beim spitzenlosen Schleifen ist die stabile Lage des Werkstückes zu jedem Zeitpunkt des Schleifprozesses sehr wichtig. Die Werkstückauflage besitzt, wie die Regel- und Schleifscheibe, ein Negativprofil der Stufensprünge des zu schleifenden Werkstückes. Besonders bei profilierten Werkstücken mit unterschiedlichen Aufmaßen auf den Sitzen, muss die Anschliffsituation beachtet werden. Es ist zu prüfen, an welchen Sitzen die Schleifscheibe zuerst mit dem Werkstück in Kontakt kommt. Man sollte darauf achten, dass möglichst an mehreren Sitzen gleichzeitig angeschliffen wird. An Fasen oder an Stirnflächen sollte keinesfalls angeschliffen werden.

Weiterhin ist die Anlage des Werkstückes an der Regelscheibe zu beurteilen. Liegt zu Beginn des Schleifprozesses nur ein schmaler Sitz an der Regelscheibe an, wird die Regelscheibe nicht in der Lage sein, das Werkstück abzubremesen.

Schleifen mit Andruckrolle

Andruckrollen werden für das konzentrische Schleifen zu einem vorhandenen Durchmesser sowie bei der Bearbeitung kleiner Teilbereiche eines Werkstückes eingesetzt (Abb. 13.195). Die Andruckrolle hat die Funktion, das Werkstück sicher im Schleifspalt zu halten.

Dieser Schleifvorgang entspricht dem Prismenschleifen, welches man von herkömmlichen Rundschleifmaschinen kennt. Hier bildet der nicht zu schleifende Mantel des Werkstückes die Führungsbasis. Die vorhandenen Rundheitsfehler werden sich auf die zu schleifenden



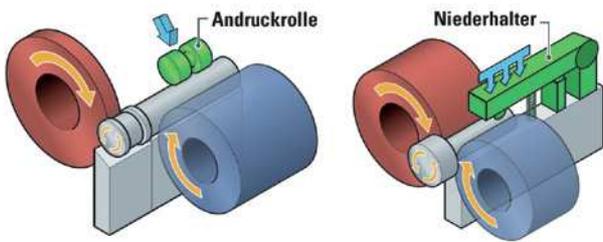


Abb. 13.195: Andruckrolle und Niederhalter (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)

Werkstückpartien übertragen. Deshalb muss sichergestellt werden, dass die Rundheit auf dem Mantel besser ist, als die Rundheit, die man mit dem Schleifen erreichen möchte.

Schleifen mit Niederhalter

Als „kopflastig“ bezeichnet man Werkstücke, deren Schwerpunkt dazu führt, dass sie nicht auf der Werkstückauflage liegen bleiben. Für die Bearbeitung solcher Werkstücke werden Niederhalter Abbildung 13.195 eingesetzt. Diese werden meist durch eine Feder betätigt und halten das kopflastige Werkstück auf der Werkstückauflage. Außerdem wird durch die Federkraft das Andrehen des Werkstückes vor dem eigentlichen Schleifprozess verbessert.

Spitzenlose Stirnflächenbearbeitung

Neben der Mantelfläche eines Werkstückes kann gleichzeitig dessen Stirnfläche geschliffen werden. Dabei ist zu beachten, dass grundsätzlich an der Mantelfläche angeschliffen werden muss. Erst wenn das Werkstück stabil zwischen Schleifscheibe, Regelscheibe und Werkstückauflage „eingespannt“ ist, kann mit der Bearbeitung der Stirnfläche begonnen werden. Das radiale Aufmaß sollte

bei solchen Schleifoperationen mindestens 1,5-mal so groß sein als das axiale Aufmaß. Für die Stirnflächenbearbeitung bieten sich, je nach Konfiguration der Maschine, die folgenden drei Verfahrensvarianten an (Abb. 13.196):

- Schrägstellung der Werkstückauflage
- Schrägstellung der Schleifscheibe
- Geradeinstich mit zusätzlicher Bewegung in Z-Richtung.

Beim Schleifen von Stirnflächen hat die Gestaltung des Axialanschlages der Werkstückauflage eine besondere Bedeutung. Um gute Stirnflächenqualitäten zu erreichen, muss eine hohe Axialruhe bei der Werkstückrotation gewährleistet sein. Diese wird durch einen punktuellen Kontakt (Abb. 13.197) zwischen Werkstückzentrum und Axialanschlag erzeugt. Andere Kontaktformen, z.B. Flächenanschlag auf Kreisringfläche oder Flächenanschlag auf Stirnfläche, führen auch bei optimaler Gestaltung immer zu geringfügigen Axialbewegungen des Werkstückes im Schleifprozess. Das führt unweigerlich zu Form- (Ebenheit) und Lagefehlern (Planlauf) an der zu schleifenden Stirnfläche.

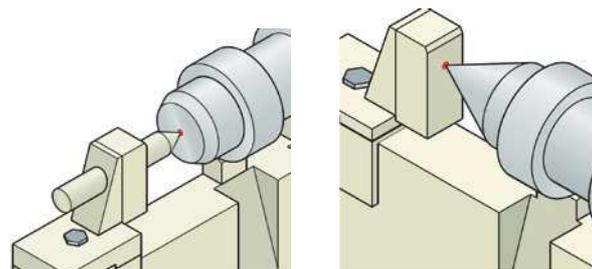


Abb. 13.197: Axialanschlüge mit Punktkontakt (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)

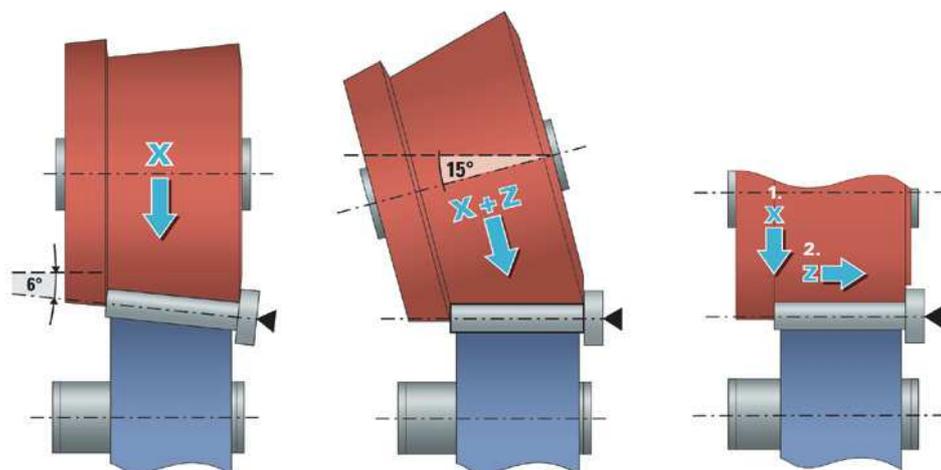
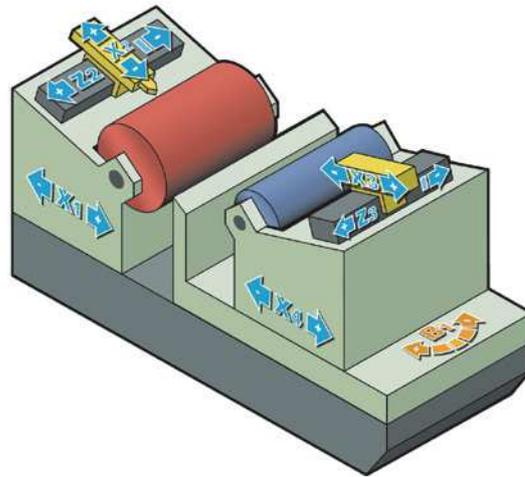


Abb. 13.196: Verfahrensvarianten zur Stirnflächenbearbeitung (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)



Abb. 13.198: Gesamtansicht einer spitzenlosen Außenrundschleifmaschine (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)



13.7.2.5.5 Klassifikation spitzenloser Außenrundschleifmaschinen

Spitzenlose Außenrundschleifmaschinen lassen sich nach der Neigung des Maschinenbettes, dem Schleifspalt, der Baugröße und den Spindelkonzepten klassifizieren (Abb. 13.198).

Klassifikation nach der Neigung des Maschinenbettes

Werden Maschinen nach der Neigung des Maschinenbettes klassifiziert, unterscheidet man die horizontale, die schräge und die vertikale Bauweise (Tab. 13.10).

Klassifikation nach dem Schleifspalt

Man unterscheidet dabei Maschinen mit ortsfestem und beweglichem Schleifspalt (Abb. 13.199). Der bewegliche Schleifspalt ist dadurch gekennzeichnet, dass der Schleif-

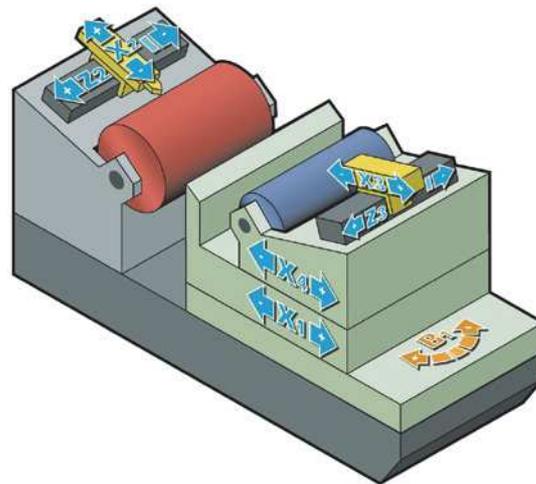


Abb. 13.199: Maschinen mit ortsfestem und beweglichem Schleifspalt (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)

Tab. 13.10: Klassifikation nach der Neigung des Maschinenbettes

horizontal	schräg	vertikal
<ul style="list-style-type: none"> • gebräuchlichste Bauform • gute Zugänglichkeit beim Einrichten 	<ul style="list-style-type: none"> • geeignet für schwere Werkstücke, da ein Teil der Gewichtskraft auf die Regelscheibe verlagert wird • Vermeidung von Anschliffen, da das Werkstück beim Andrehen unterstützt wird 	<ul style="list-style-type: none"> • Sonderbauform • Vorteile bei Be- und Entladung der Werkstücke • nur „Schleifen unter Mitte“ möglich

	groß	mittel	klein
Durchmesserbereich Werkstück			
minimaler Durchmesser [mm]	5	1,5	0,5 (0,1)
maximaler Durchmesser [mm]	>150	<150	<50
Schleifscheibenantrieb			
Antriebsleistung [kW]	>60	20 bis 60	<20
Schleifscheibenabmessung			
Durchmesser [mm]	>650	500 bis 650	<500
Breite [mm]	>600	200 bis 600	<200

Tab. 13.11: Klassifikation nach Baugröße

spindelstock ortsfest mit dem Maschinebett verbunden ist. Die Schlitten für die Zustellbewegungen X1 und X4 befinden sich auf der Regelscheibenseite. Deshalb sind solche Maschinen kompakter als Maschinen mit ortsfestem Schleifspalt. Nachteilig ist allerdings die notwendige Nachführung von Automatisierungseinrichtungen, da sich die Werkstückauflage mit der X1-Achse bewegt. Bei Maschinen mit ortsfestem Schleifspalt befindet sich die Werkstückauflage ortsfest angebracht im Zentrum der Maschine. Schleif- und Regelscheibe verfügen jeweils über eigene Achsschlitten, mit denen sie zur Werkstückauflage bewegt werden können. Bei Maschinen mit ortsfestem Schleifspalt ist auf Grund der fixen Position der Werkstückauflage keine Handlingnachführung notwendig. Besonders bei der Verkettung von mehreren Maschinen ist dies ein Vorteil.

Klassifikation nach der Baugröße

Unterscheidet man spitzenlose Maschinen nach Ihrer Baugröße, so kann man diese anhand der Parameter Werkstückdurchmesserbereich, Antriebsleistung und Schleifscheibenabmessung in drei Baugrößen unterscheiden (Tab. 13.11).

Klassifikation nach dem Spindelkonzept

Die Schleif- und Regelspindeln können entweder einseitig (fliegende Lagerung) oder beidseitig (Portallagerung) gelagert sein. Bei den portallagerten Spindeln befindet sich die Scheibe (Schleifscheibe bzw. Regelscheibe) zwischen der vorderen und der hinteren Lagerstelle. Diese Spindeln haben eine hohe Steifigkeit und eignen sich besonders für die Aufnahme breiter Scheiben. Die Scheiben können direkt (Direktaufnahme) oder mittels einer Scheibenaufnahme auf die Spindeln montiert werden (Abb. 13.200). Auf Grund der großen Steifigkeit eignen sich portallagerte Spindeln besonders gut für Prozesse mit hohen Zeitspannvolumina oder auch hohen Genauigkeitsforderungen.

Der Scheibenwechsel lässt sich dagegen bei einer fliegend gelagerten Spindel (Abb. 13.200) schneller und einfacher durchführen. Diese Spindeln sind im Allgemeinen auch kostengünstiger als portallagerte Spindeln.

Bei beiden Spindelkonzepten können je nach Anforderung sowohl Wälzlager als auch Gleitlager in Form von hydrodynamischen als auch hydrostatischen Lagern zum Einsatz kommen.

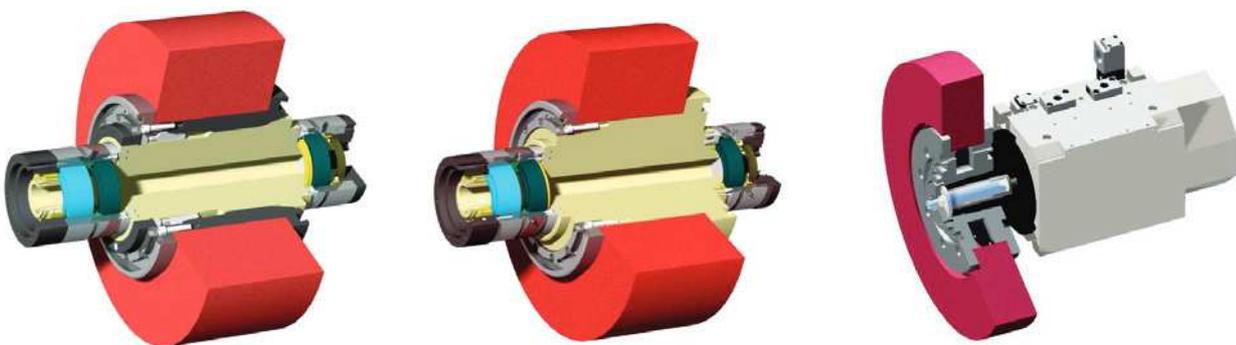


Abb. 13.200: Portallagerung mit Scheibenaufnahme, Portallagerung mit Direktaufnahme, fliegende Lagerung mit Scheibenaufnahme (Quellen: Schaudt Mikrosa GmbH; Studer AG)

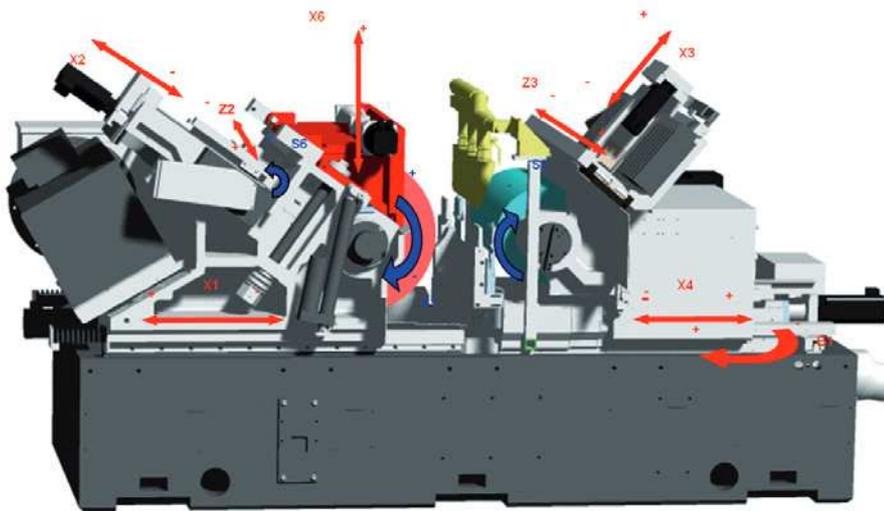


Abb. 13.201: Maschine mit ortsfestem Schleifspalt (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)

13.7.2.5.6 Maschinenaufbau

Spitzenlose Schleifmaschinen sind auf Grund der großen Scheibeneingriffsbreiten hohen Belastungen ausgesetzt. Daher müssen sie eine hohe statische und dynamische Steifigkeit sowie eine gute thermische Konstanz aufweisen. Der prinzipielle Aufbau einer spitzenlosen Schleifmaschine ist in Abbildung 13.201 dargestellt.

Diese Maschine ist mit ortsfestem Schleifspalt und sieben Achsen ausgestattet. Die X1-Achse dient der radi-

alen Zustellung der Schleifscheibe zum Werkstück und die X4-Achse wird für die radiale Zustellung der Regelscheibe zum Werkstück genutzt. Die Abrichteinrichtungen für beide Scheiben befinden sich jeweils auf der dem Schleifspalt abgewandten Seite. Für das Abrichten der Schleifscheibe werden Bahnabrichter in unterschiedlichen Ausführungen eingesetzt. Zum Abrichten kommen stehende (Ein- und Mehrkorndiamanten, Fliesen) oder rotierende Werkzeuge (Diamantformrollen, Diamant-

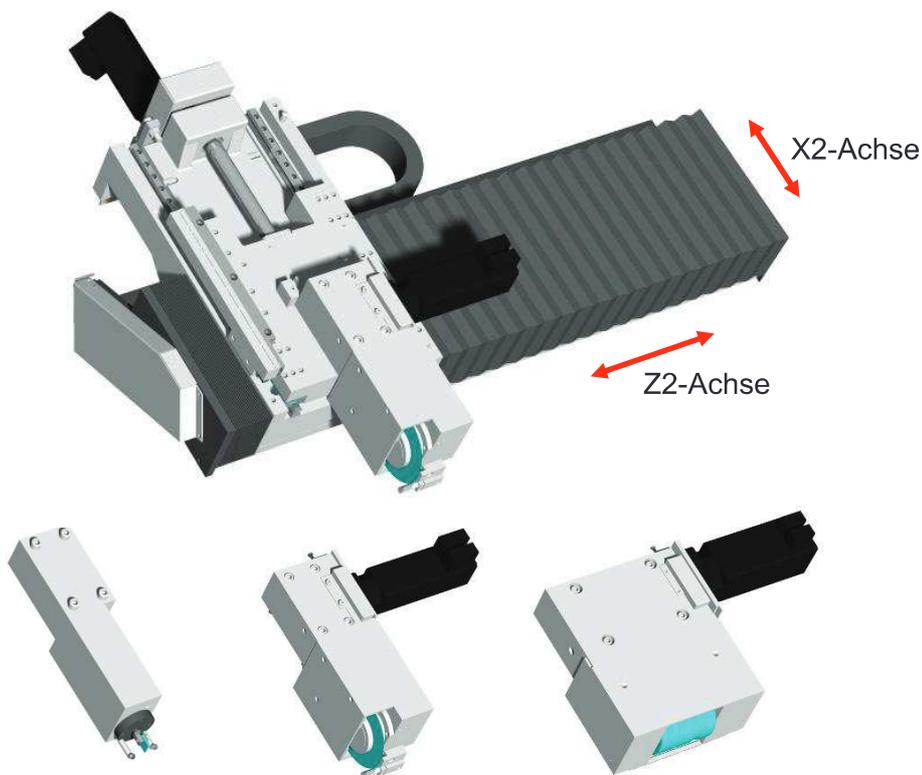


Abb. 13.202: CNC-Schleifscheibenabrichter mit wechselbaren Abrichtköpfen für stehende Werkzeuge, Diamantformrolle und Diamantprofilrolle (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)



Abb. 13.203: Maschinenarbeitsraum für das Durchgangsschleifen (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)

profilrollen) zur Anwendung. Für das Abrichten der Regelscheibe werden Bahnabrichter genutzt. Als Abrichtwerkzeuge für die Regelscheibe haben sich Einkorndiamanten durchgesetzt.

Von Vorteil sind Schleifspindelantriebe, die eine konstante Umfangsgeschwindigkeit der Schleifscheibe ermöglichen. Für konventionelle Schleifscheiben sollte ein Bereich bis 63m/s und für Schleifscheiben mit hochharten Schneidstoffen ein Bereich bis 120 m/s abgedeckt werden. Das Auswuchten der Schleifscheiben erfolgt meist mittels integrierter automatischer Auswuchteinrichtung. Manuelle Systeme findet man bei modernen Maschinen zunehmend selten. Die Primärschutzhaube der Schleifscheibe muss entsprechend den Forderungen der DIN EN 13218 ausgeführt sein.

Die Regelspindel befindet sich im Regelspindellagergehäuse. Dieses kann um den Winkel α_r in beide Richtungen geneigt werden. Für das Durchgangsschleifen haben sich Neigungswinkel von bis zu 6° bewährt. Die Rotationsbewegung der Regelspindel muss sehr konstant und gleichförmig sein. Deshalb werden vorzugsweise Servomotoren als Antriebe genutzt. Die Übertragung vom Motor zur Spindel erfolgt mittels Getriebe oder Riemen. Auch der Einsatz von Motorspindeln ist durchaus üblich. Je nach Baugröße sind Drehzahlen von bis zu 1.000 U/min möglich.

Für die Erzielung guter Schleifergebnisse ist eine stabile und präzise gefertigte Werkstückauflage notwendig. Diese ist mit der Werkstückauflagehalterung fest verschraubt oder mechanisch bzw. hydraulisch geklemmt. Die Werkstückauflage wird im Arbeitsbereich zur Minimierung des Verschleißes und zur Reduzierung der Reibung mit Hartmetall oder PKD belegt.

Unterhalb der X4-Achse befindet sich der Schwenkschlitten der B-Achse. Diese dient beim Einstechschleifen der Konuskorrektur am Werkstück sowie der Einstellung des „Schleiffeuers“ beim Durchgangsschleifen.

Der Sekundärschutz deckt den Arbeitsraum der Maschine ab und schützt den Bediener und die Umwelt.

Neben den bisher aufgezeigten Maschinen mit sechs linearen Achsen haben sich auch andere kinematische Maschinenkonzepte erfolgreich im Markt etabliert. Diese erreichen mit einer geringeren Achszahl die gleiche Maschinengrundfunktionalität (Schleifen, Abrichten Schleifscheibe, Abrichten Regelscheibe). Gerade beim Einstechschleifen lassen sich bestimmte Schleifapplikationen effektiver realisieren.

In Abbildung 13.204 ist eine Maschine mit vier CNC-Achsen dargestellt. Die Schleif- und Regelscheibe sind über

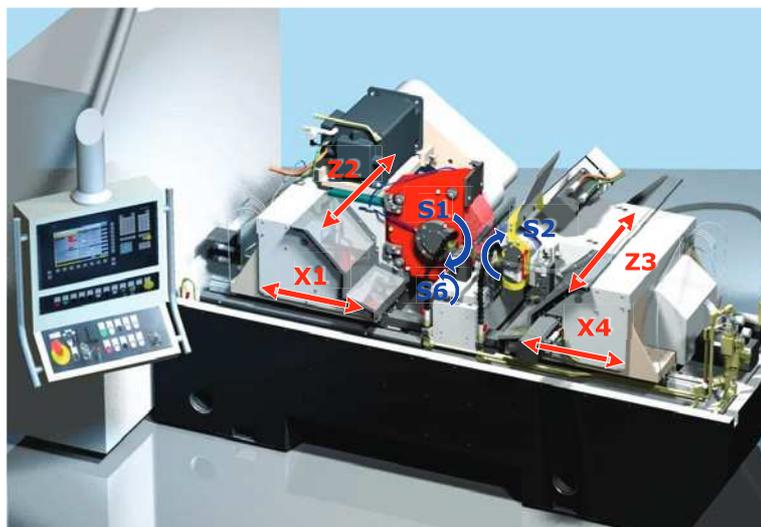


Abb. 13.204: Maschine mit Kreuzschlittensystem für Schleif- und Regelscheibe (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)

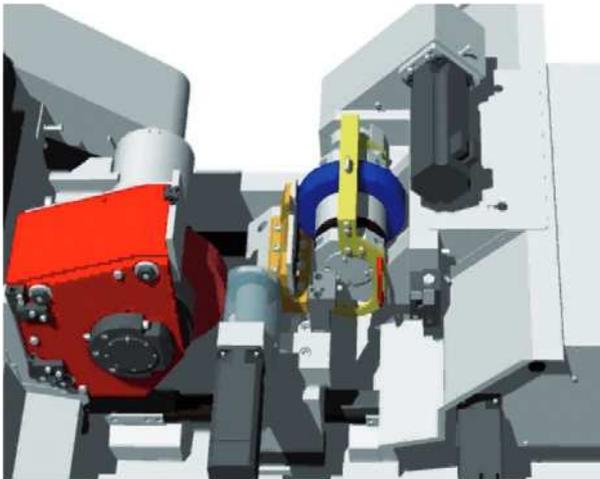


Abb. 13.205: Abrichten der Schleifscheibe (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)

ein Kreuzschlittensystem in X- und Z-Richtung verfahrbar. Die vier Achsen werden sowohl zum Abrichten als auch zum Schleifen genutzt. Die stationären Abrichteinrichtungen für beide Scheiben befinden sich im Zentrum der Maschine (Abb. 13.205). Auf Grund der Bewegungsmöglichkeit in Z-Richtung eignet sich dieses Maschinenkonzept in Verbindung mit einem schräg gestellten

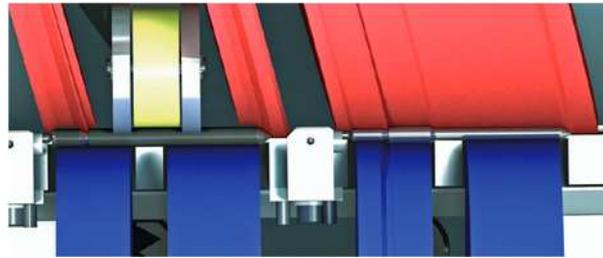


Abb. 13.206: Schrägeinstechschleifen einer Düsenadel in zwei Arbeitsoperationen (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)

Schleifspindelkopf auch hervorragend zum Schrägeinstechschleifen (Abb. 13.206).

Abbildung 13.207 zeigt eine Maschine mit vier linearen CNC-Achsen. Die Abrichteinrichtungen für beide Scheiben befinden sich auf der dem Schleifspalt abgewandten Seite. Der Schleifscheibenabrichter ist mit dem Maschinenbett verbunden und in Z-Richtung verfahrbar. Die X-Achse der Schleifscheibe wird sowohl zum Schleifen als auch in Verbindung mit der Z-Achse des Abrichters zum Abrichten genutzt. Der Aufbau der Regelscheibenseite ist äquivalent. Einziger Unterschied ist, dass sich alle Elemente dieser Seite auf einem Schwenkschlitten (hier als C2-Achse bezeichnet) befinden.

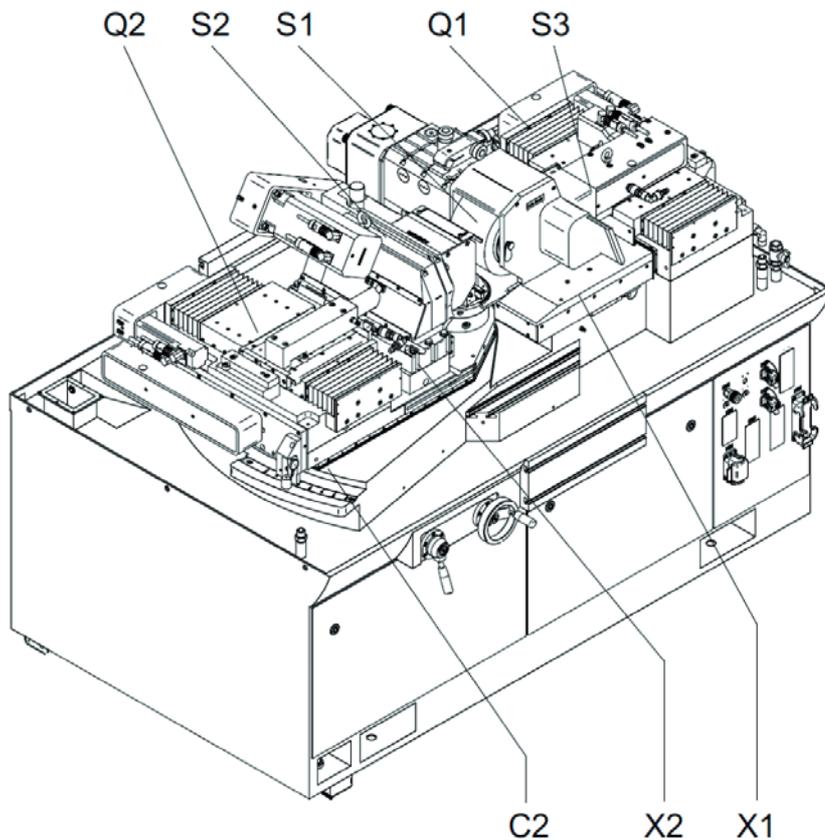


Abb. 13.207: 4-Achs-Maschine mit entkoppelten Achsen (Quelle: Agathon AG)

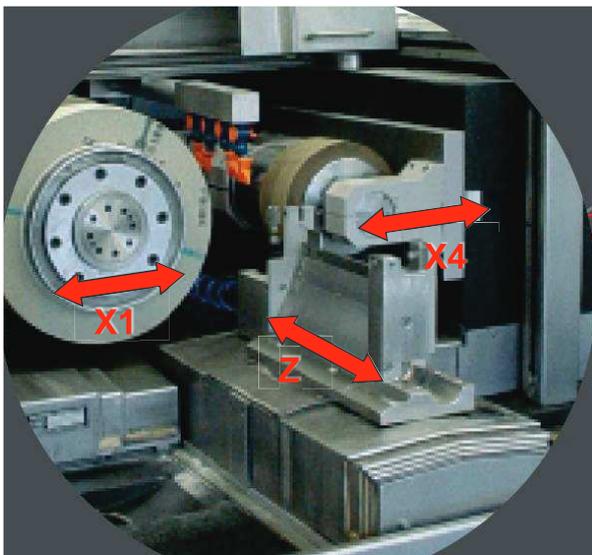


Abb. 13.208: 3-Achs-Maschine (Quelle: Tschudin AG)

Abbildung 13.208 zeigt, dass eine volle Funktionalität auch mit drei Achsen erreicht werden kann. Die Maschine ist mit je einer X-Achse für die Schleif- und die Regelscheibe ausgestattet. Die Werkstückauflagehalterung und die Abrichteinheiten werden über eine gemeinsame Z-Achse verfahren. Dadurch ergibt sich zusätzlich eine sehr einfache Be- und Entlademöglichkeit der Maschine.

13.7.2.5.7 Arbeitsbereich und Genauigkeit

Mit dem spitzenlosen Schleifverfahren können Werkstücke in einem Durchmesserbereich von 0,1 bis 400 mm bearbeitet werden, wobei der größte Teil der zu schleifenden Werkstücke in einem Bereich von 3 bis 35 mm liegt. Die schleifbare Werkstücklänge wird beim Einstechschleifen durch die maximale Schleifscheibenbreite begrenzt. Im Durchgangsschleifen können wesentlich längere Werkstücke bearbeitet werden. Beim Schleifen von Stangen sind Werkstücklängen von bis zu 5 m keine Seltenheit. Die beim Schleifen erreichbaren Maß-, Form- und Oberflächengenauigkeiten sind abhängig von den statischen, dynamischen und thermischen Eigenschaften der Schleifmaschine, von der Zustellgenauigkeit der Maschinenachsen, vom Werkstückwerkstoff und dessen Härte, von den

eingesetzten Schleif- und Regelscheibenspezifikationen, von den Abrichtwerkzeugen, von der Schleifspaltgeometrie (Höhenlage, Winkel und Material der Werkstückauflage), von den eingestellten Prozessparametern, von der Werkstückgeometrie und vom Aufmaß, von der Art des Kühlschmierstoffes und dessen Zuführung sowie in nicht unerheblichem Maß von den Fähigkeiten des Maschineneinrichters. Unter optimalen Bedingungen können Rundheitstoleranzen von $0,5 \mu\text{m}$, Durchmesserstoleranzen von $\pm 0,5 \mu\text{m}$ und Oberflächentoleranzen von $R_z = 0,8 \mu\text{m}$ prozesssicher eingehalten werden.

Das bezogene Zeitspannungsvolumen Q'_w dient als Maß für die Leistungsfähigkeit des Verfahrens. Übliche verfahrensspezifische Richtwerte sind in Tabelle 13.12 aufgeführt.

Die Vermessung der Werkstücke erfolgt in den meisten Fällen nicht während sondern nach dem Schleifprozess. Es kommen vorzugsweise taktile (z.B. Messtaster) oder pneumatische Messverfahren (z.B. Ringmessdüsen) zum Einsatz.

13.7.2.5.8 Automatisierung

Hohe Produktivität wird nicht allein durch die Maschine erreicht. Einen wesentlichen Anteil hat die Be- und Entladezeit. Aus diesem Grund sind spitzenlose Außenrundschleifmaschinen in den meisten Fällen automatisiert.

Für das Durchgangsschleifen werden die Werkstücke im Strang axial der Maschine zugeführt. Kurze leichte Werkstücke mit einem \varnothing/L -Verhältnis < 1 werden meist über Flach- (Abb. 13.209) oder V-Bänder nicht rotierend zu- und abgeführt. Die Rotation startet erst beim Einlaufen der Werkstücke in den Schleifspalt. Längere Werkstücke, wie z.B. Stangen, werden rotierend über Rollengänge (Abb. 13.210) be- und entladen. Werkstücke, wie z.B. Ringe, mit einem \varnothing/L -Verhältnis > 1 werden dem Schleifspalt ebenfalls rotierend über Zweiwalzenzuführungen (Abb. 13.211) zugeführt. Die Zuführgeschwindigkeit sollte dabei minimal größer sein als die Durchgangsgeschwindigkeit beim Schleifen. Die Abführung erfolgt entweder über eine Einwalzenabführung (Abb. 13.212) oder im einfachsten Fall über eine Rutsche in eine Transportkiste.

Tab. 13.12: Richtwerte für bezogenes Zeitspannungsvolumen Q'_w

	Einstechschleifen, gerechnet über die gesamte Schleifzeit	Durchgangsschleifen, gerechnet über die gesamte Schleifscheibenbreite
Konventionelle Schleifmittel	$Q'_w = 1 \text{ mm}^3 / (\text{mm} / \text{s})$	$Q'_w = 0,5 \text{ mm}^3 / (\text{mm} / \text{s})$
Hochharte Schleifmittel	$Q'_w = 5 \text{ mm}^3 / (\text{mm} / \text{s})$	$Q'_w = 1 \text{ mm}^3 / (\text{mm} / \text{s})$



Abb. 13.209: Flachbandzuführung (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)



Abb. 13.210: Rollengang (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)



Abb. 13.211: Zweiwalzenzuführung (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)

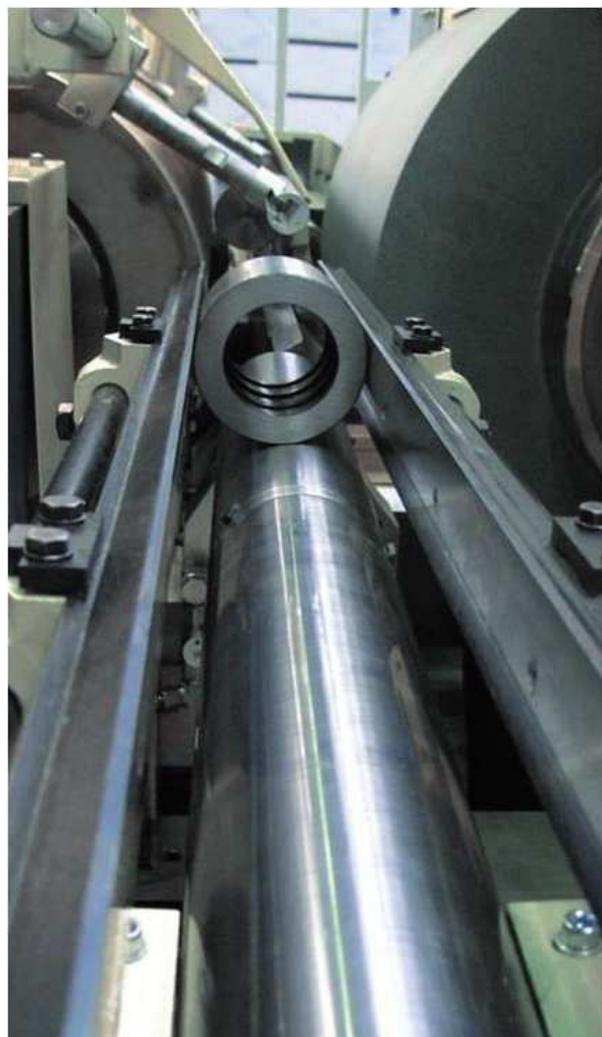


Abb. 13.212: Einwalzenabführung (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)



Abb. 13.213: Handeinlegevorrichtung (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)

Die einfachste Form der Automatisierung für das Einstechschleifen ist die Handeinlegevorrichtung (Abb. 13.213). Dabei werden die Werkstücke außerhalb der Maschine in Hakengreifern abgelegt, anschließend manuell in die Maschine eingeschoben und über dem Schleifspalt auf die Werkstückauflage abgesenkt. Die Handeinlegevorrichtung verbleibt während des Schleifprozesses im Arbeitsraum der Maschine. Danach werden die Werkstücke auf dem gleichen Weg heraus transportiert.

Eine weitere kostengünstige Form der Automatisierung sind die Einschieber. Die Rohteile werden über eine prismatische Schiene axial auf die Werkstückauflage bis zum Axialanschlag geschoben. Dies wird sowohl manuell als auch automatisch (z. B. pneumatisch) realisiert. Leichte Werkstücke können auch mittels Druckluft durch Schläuche in die Schleifposition gebracht werden. Beim Einsatz solcher Beladeeinrichtungen erfolgt das Entladen vorzugsweise über Weithub (Abb. 13.214). Zum Entladen wird mit Hilfe der X4-Achse die Regelscheibe von der Werkstückauflage weg bewegt. Die Fertigteile fallen auf ein Band, das sich unterhalb der Regelscheibe befindet und die Teile aus der Maschine transportiert.

Die Automatisierung mit Portalladern ist beim Einstechschleifen weit verbreitet. Das Greifen der Werkstücke erfolgt mechanisch oder mittels Vakuum. Die Rohteile werden von einem Speichersystem abgegriffen, zur Bearbeitung auf der Werkstückauflage abgelegt und anschließend aus dem Schleifspalt entnommen und auf einer definierten Position innerhalb oder außerhalb der Maschine abgelegt. Portallader sind mit einer Horizontalachse und einer oder zwei Vertikalachsen ausgerüstet.

Integrierte Portale (Abb. 13.215) befinden sich komplett innerhalb des Sekundärschutzes der Maschine und übernehmen den Be- und Entladeprozess. Die Werkstücke werden dazu durch eine externe Zuführeinrichtung

(z. B. Shuttle, Einschieber, Band) von außen in die Maschine transportiert bzw. wieder abgeführt. Solche Schlüssellochlösungen können einfach mit weiteren externen Automatisierungseinrichtungen (z. B. Ladezellen mit Teilespeichern und Pre- bzw. Postprozessmessenrichtungen) verbunden werden.

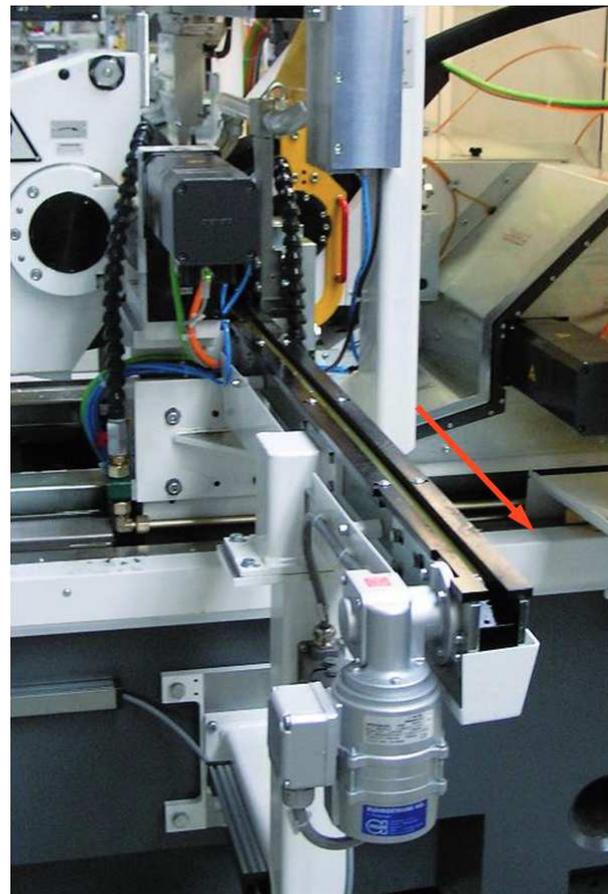


Abb. 13.214: Weithubband (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)



Abb. 13.215: Integriertes Portal (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)

Externe Portallader sind direkt mit Werkstückspeichersystemen (z.B. Taktspeicherbändern) gekoppelt (Abb. 13.216). Das Be- und Entladen erfolgt entweder von oben durch eine Beladeklappe oder seitlich von der Maschinenrückseite. Bei dieser Variante können Roh- und Fertigteilgreifer gleichzeitig in die Maschine einfahren. Dadurch werden kürzere Werkstückwechselzeiten als bei der Beladung von oben erreicht.

Literatur zu Kapitel 13.7.2.5

Mais, F. U.: Geometrische und kinematische Grundlagen für das spitzenlose Durchlaufschleifen. Dissertation, Aachen, Techn. Hochschule, Fak. f. Maschinenwesen, 1980.

Reeka, D.: Über den Zusammenhang zwischen Schleifspalt-geometrie und Rundheitsfehler beim spitzenlosen Schleifen. Dissertation, Aachen, Techn. Hochschule, Fak. f. Maschinenwesen, 1967.

Conrad, K.; Stoll, S.; Otto, K.: Leitfaden spitzenloses Außenrundschleifen. Leipzig, Schleifring Service GmbH Team Mikrosa, 2008.



Abb. 13.216: Maschine mit seitlich einfahrendem Portal und Taktspeicherbändern (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)



13.7.3 Schraubschleifen

Joachim Heim

Das Schraubschleifen ist eine Sonderform des Rundschleifens, dadurch gekennzeichnet, dass eine profilierte Schleifscheibe entsprechend dem Gewindeprofil verwendet wird (Abb. 13.217). Der Werkstückrotation ist in Achsrichtung eine Längsbewegung der Schleifscheibe zur Erzeugung der Schraubbewegung bzw. Steigung überlagert. Dieses Hauptmerkmal bestimmte in der Vergangenheit den besonderen Status der Schraubschleifmaschinen, da die Steigung über hochgenaue Trapezspindeln und Wechselräder einschließlich mechanischer Korrekturmöglichkeiten erzeugt werden musste.

Mit der Einführung voll NC-gesteuerter Schleifmaschinen erfolgt die Erzeugung der Steigung über zwei interpolierende NC-Achsen C und Z. Damit ist vom Prinzip her schon jede NC-gesteuerte Rundschleifmaschine für das Schraubschleifen geeignet. Um jedoch den Anforderungen an Genauigkeit und Produktivität gerecht zu werden, besitzen moderne Schraubschleifmaschinen eine Reihe weiterer Merkmale.

Durch die Entwicklung neuer Schneidstoffe haben früher nur in der Weichbearbeitung angewandte Verfahren das Schraubschleifen teilweise ersetzt. Trotzdem hat es auch heute noch Bedeutung bei der Fertigbearbeitung gehärteter Stähle und hochfester Materialien, die anders nicht oder nur schwer bearbeitbar sind, sowie für die Erzielung hoher Genauigkeiten und Oberflächenqualitäten. Praktische Anwendungen sind das Schleifen von Gewindelehren, Schnecken, Werkzeugen, Spindeln und Muttern für Antriebe sowie Lenkgetriebe.



Abb. 13.217: Schraubschleifprozess (Quelle: Buderus)

13.7.3.1 Schleifprogramme

Der Ablauf des Schraubschleifprozesses kann entweder durch Längsschleifen oder durch Einstechschleifen erfolgen:

Längsschleifen mit einem oder meist mehreren Durchgängen

Das gesamte Aufmaß wird dabei auf einzelne Durchgänge wie Schruppen, Schlichten, Feinschlichten und Ausfeuern aufgeteilt mit jeweils angepassten Parametern für Schnittgeschwindigkeit und Längsvorschub. Das Verfahren kann als Pendelschleifen erfolgen mit Zustellung an den jeweiligen Enden des Gewindes oder für höhere Genauigkeiten als Einwegschleifen mit schnellem Rückhub im Eilgang. Durch das Schleifen nur in eine Richtung wird die Auswirkung eines möglichen Umkehrspiels vermieden, das zu ungleichmäßigem Abtrag an linker und rechter Gewindeflanke führen würde. Dieses Verfahren ist für das Präzisionsschleifen hochgenauer Spindeln, Schnecken und Lehren geeignet.

Einstechschleifen

Mindestens eine Werkstückumdrehung zuzüglich Ein- und Überlauf zur Fertigstellung der Schraube wird benötigt. Voraussetzung ist, dass die Schleifscheibenbreite mit dem Gewindeprofil um eine Steigung breiter ist, als die zu schleifende Schraube selbst, sowie genug Platz für den Ein- und Auslauf der Schleifscheibe vorhanden ist. Dieses Verfahren ermöglicht eine sehr kurze Bearbeitungszeit. Es wird jedoch oft nur für geringere Qualitätsansprüche und kleine Steigungen wie bei Befestigungsgewinden angewandt, wo ein Einschwenken der Schleifscheibe in den Steigungswinkel nicht erforderlich ist.

13.7.3.2 Schleifscheibenprofil

Der Ablauf des Schleifprozesses bestimmt die Form des Scheibenprofils. Grundsätzlich hat die Schleifscheibe das Negativprofil des Gewindes bzw. mindestens eines Zahnes. Die Einzahnscheibe als gebräuchlichste Scheibenform entspricht der Zahnücke im Normalschnitt. Zur Erzeugung des korrekten Gewindeprofils muss sie in den Steigungswinkel geschwenkt werden. Als Profilierwerkzeug reicht der Einkorndiamant aus, der auch die höchste Oberflächengüte des geschliffenen Gewindes ermöglicht, da die Diamantspitze immer im Kontakt mit der Schleifscheibe ist. Nachteil ist der schnelle Verschleiß, wodurch die Spitze unkontrolliert abstumpft und Form- und Maßfehler am Gewinde entstehen. Somit ist diese Methode für eine Serienproduktion schlecht geeignet.



Abb. 13.218: Profilierte Diamantscheibe (Quelle: Buderus)

Anwendung findet heute hauptsächlich die profilierte Diamantscheibe mit genau definiertem Radius (Abb. 13.218). Durch die Rotation sind ständig andere Diamantkörner im Kontakt mit der Scheibe, wodurch je nach Rundlauf und Spezifikation der Diamantscheibe nicht so geringe Rauigkeiten der Oberfläche erreicht werden, wie mit dem Einkorndiamant. Dafür sind Standzeit und Maßhaltigkeit um ein mehrfaches länger, wodurch dieses Abrichtverfahren für eine automatische Fertigung prädestiniert ist.

Korrigierte Profilformen sind erforderlich, wenn die Schleifscheibe nicht oder nicht voll in den Steigungswinkel geschwenkt wird. Die Verzerrung zwischen Axialschnitt und Normalschnitt durch den Schwenkwinkel lässt sich einfach berechnen. Dies gilt aber nur für ein Werkzeug, welches wie die Schneide eines Drehwerkzeuges in einer Ebene wirkt. Die Schleifscheibe kann auf Grund ihres Durchmessers auch über diese Ebene hinaus wirksam werden, was zu einem Vor- oder Nachschneiden und somit zu einem verfälschten Gewindeprofil führt. Durch Korrekturen des Scheibenprofils lassen sich diese Verfälschungen in bestimmten Grenzen kompensieren. Die Profilkorrekturen sind vom Scheibendurchmesser abhängig und generell umso kleiner, je kleiner die Schleifscheibe ist.

Die Mehrzahnscheibe für das Einstechschleifen mit nicht auf den Steigungswinkel eingeschwenkter Schleifscheibe weist mehrere gleiche Zähne mit der Profilkorrektur für den Axialschnitt auf. Für das Längsschleifen wird jedoch oft eine Schnittaufteilung vorgenommen, indem die Zähne schrittweise größer werden, bis der letzte Zahn oder Fertigschneider die endgültige Zahnhöhe aufweist. Der Fertigschneider muss beim Einschwenken in den Stei-

gungswinkel in der Ebene der Werkstückachse liegen damit keine Profilverzerrung entsteht. Die Vorschneider befinden sich entweder über oder unter dieser Ebene. Die dadurch entstehende Verzerrung des Profils ist bei der Profilierung der Vorschneider zu berücksichtigen.

Das Profilieren der Mehrzahnscheiben ist wesentlich aufwendiger als für eine Einzahnscheibe. Ein Einkorndiamant kann meist nicht benutzt werden, da er nicht die Lücke zwischen zwei nebeneinanderliegenden Zähnen mit den geforderten kleinen Radien ausformen kann. Profildiamanten mit definiertem Spitzenradius haben eine zu kurze Standzeit und sind höchstens für eine Einzelfertigung verwendbar. Praktische Lösungen bieten Diamantscheiben, die bahngesteuert das Scheibenprofil erzeugen. Profilkorrekturen können leicht über die Steuerung umgesetzt werden und andere Zahnformen ohne Wechsel der Diamantscheibe erzeugt werden. Ist das Scheibenprofil endgültig definiert, können für die Serienproduktion Diamant-Profilrollen eingesetzt werden, die das komplette Scheibenprofil über eine Einstichbewegung auf die Schleifscheibe kopieren. Ohne Diamantrolle arbeitet das Krushierverfahren. Hierbei wird eine Stahlrolle mit dem Scheibenprofil gegen die Schleifscheibe gedrückt und bei geringer Drehzahl ohne Relativbewegung zwischen Scheibe und Rolle die Scheibe profiliert. Dieser Prozess hängt stark vom Bediener ab. Die Standzeit der Stahlrollen ist begrenzt und macht dieses Verfahren nur für eine Einzelfertigung interessant.

13.7.3.3 Schleifscheibenspezifikation

Schleifscheiben für das Schraubschleifen sind in der Regel feinkörniger als übliche Schleifscheiben für das Rundschleifen, da sie profiliert sind und die Korngröße kleiner sein muss als die zu schleifenden Radien. Ansonsten sind alle bekannten Scheibenspezifikationen möglich:

- Keramisch gebundene Scheiben mit konventionellem Korn verschiedener Spezifikation je nach Anwendung. Diese lassen sich noch mit Einkorndiamanten abrichten.
- Keramisch gebundene CBN-Scheiben bieten hohe Standzeit und sind besonders für die Serienfertigung geeignet. Auf Grund der hohen Kosten muss aber der Standzeitvorteil nutzbar sein, um wirtschaftlich zu produzieren. Das Profilieren kann nur mit rotierenden Diamantabrichtern erfolgen. Zusätzlich sind Sensoren zur Abrichtüberwachung erforderlich, die sicherstellen, dass bei den geringen Abrichtzustellungen im μm -Bereich das gesamte Scheibenprofil profiliert wird.
- Galvanisch gebundene CBN-Scheiben erhalten ihre Form bereits mit dem Herstellungsprozess. Das erspart





das Abrichten auf der Maschine. Allerdings lassen sich einmal vorhandenen Profile nicht korrigieren. Die erreichten Oberflächenqualitäten sind geringer als die keramischer Scheiben. Da sich geringe Rauigkeit und hohe Abtragrate widersprechen, werden auch unterschiedliche Schleifscheiben für Vor- und Fertigschleifen eingesetzt.

- Diamantscheiben nur für spezielle Anwendungen bei Nichteisenwerkstoffen. Deren Profilierung ist jedoch besonders schwierig, da Diamant schlecht mit Diamant abgerichtet werden kann.

13.7.3.4 Außenschraubschleifen

Die größte Herausforderung ist der Temperatureinfluss bei langen Werkstücken, da sich die Wärmedehnung direkt auf die Steigung auswirkt. Die Fertigung sollte in einer klimatisierten Umgebung stattfinden. Zur Prozesskühlung und Schmierung wird Schleiföl verwendet, dessen Temperatur konstant gehalten werden muss. Da trotzdem durch den Schleifprozess Wärme in das Werkstück eingebracht wird, ist das Längsschleifen von der Reitstockseite zur Werkstückspindel durchzuführen. Der Reitstock muss die Wärmedehnung ermöglichen, die durch den Schleifprozess in das Werkstück eingebracht wird. Durch die genannte Schleifrichtung hat diese Wärmedehnung aber keinen Einfluss auf die erzeugte Steigung, da sie nur in dem bereits geschliffenen Teil des Werkstückes entsteht. Schließt sich jedoch ein zweiter Durchgang an, muss die Wärmeausdehnung beachtet werden.

Neben der Steigungsgenauigkeit ist ein geringer Zylinderfehler ein wichtiges Qualitätsmerkmal. Um dies zu erreichen, ist eine mechanische Feineinstellung des Reitstockes eine grundsätzliche Voraussetzung. Zusätzlich bieten moderne Maschinen eine NC-gesteuerte Zylinderkorrektur, die unterschiedliche Korrekturwerte über die Schleiflänge ermöglichen.

Beim Spannen der Werkstücke ist zu beachten, dass die Position der Windungen immer gleich zur C-Achse ist, damit nach einem erstmaligen manuellen Einfinden die Schleifscheibe danach immer in die vorgearbeitete Windung einfindet. Es gibt aber auch Lösungen, die ein automatisches Einfinden ermöglichen.

13.7.3.5 Innenschraubschleifen

Für das Innenschraubschleifen gelten die gleichen Grundsätze wie vorab beschrieben. Da die Schleifschei-

be jedoch kleiner ist als die Werkstückbohrung, muss sie eine im Verhältnis zum Scheibendurchmesser bedeutend größere Abtragleistung bringen, wodurch ein häufigeres Abrichten erforderlich ist und die Standzeit sinkt. Eine Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit ist meist nicht möglich, da der kleine Scheibendurchmesser sehr hohe Drehzahlen erfordert und die kritische Drehzahl schnell überschreitet. Die kritische Drehzahl ist von der Länge des Schleifdornes abhängig, die wiederum durch die Länge des zu schleifenden Werkstückes vorgegeben wird. Eine Erhöhung der Steife des Schleifdornes durch einen größeren Schaftdurchmesser ist begrenzt durch die Kollisionsgefahr mit der Bohrung, wenn die Schleifspindel in den Steigungswinkel geschwenkt wird. Kleine Steigungen lassen sich meist einfach realisieren, bei größeren Steigungen ist das Schleifen nur mit korrigiertem Profil möglich, da die Schleifspindel nicht oder nicht ganz in den Steigungswinkel geschwenkt werden kann.

Eine zielgenaue Prozesskühlung und Schmierung ist besonders zur Vermeidung von Brandschliff erforderlich. Dazu gehört neben der äußeren auch eine innere Kühlmitteldüse durch die Werkstückspindel, die mit der Schleifscheibe mitläuft und dadurch immer genau auf die Scheibenflanke gerichtet ist.

Obwohl meist Einzahnscheiben verwendet werden, sind auch Mehrzahnscheiben möglich, wenn die Profilverzerrung durch das Vor- und Nachschneiden beachtet wird. Das Abrichtverfahren sollte den geringen Kräften angepasst sein, die der Schleifdorn aufnehmen kann. Auch sollte die Axialposition der Schleifscheibe vor dem Abrichten kontrolliert werden, um keinen Profilversatz zuzulassen. Dazu bieten moderne Maschinen geeignete Messvorrichtungen an.

Das manuelle Einfinden in die vorgearbeitete Windung ist komplizierter als beim Außenschraubschleifen, da es nicht eingesehen werden kann. Daher besitzen die Werkstücke oft ein Merkmal an der Außenkontur, zu dem die Windung positioniert werden muss. Andernfalls ist ein automatisches Einfinden in die Windung möglich.

Da das Gewinde oft eine sehr hohe Laufgenauigkeit zu Außendurchmesser, Anlagefläche oder Bohrung haben muss, besitzen moderne Maschinen mehrere Bearbeitungseinheiten, die eine Bearbeitung aller relevanten Flächen in einer Aufspannung ermöglichen (Buderus Schleiftechnik 2010).

Literatur zu Kapitel 13.7.3

Buderus Schleiftechnik GmbH (Hrsg.): Katalog Buderus CNC Gewindeschleifmaschinen, Asslar 2010.

13.7.4 Zahnflanken- schleifmaschinen

Frank Reichel

13.7.4.1 Einleitung

Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf Maschinen für das Zahnflankenschleifen von Zylinderrädern. Zum Schleifen von Kegelrädern werden Maschinen eingesetzt, die in ihrem Grundaufbau und ihrer Kinematik den Maschinen entsprechen, bei denen Werkzeuge mit geometrisch bestimmter Schneide eingesetzt werden. Deshalb wird an dieser Stelle nicht darauf eingegangen. Durch Zahnflankenschleifmaschinen wird eine sehr komplexe Kontur geschliffen – die Evolvente entlang einer Schraubenlinie (Schrägverzahnung) überlagert zumeist mit Zahnflankenmodifikationen. Um diese Aufgabe im Mikrometerbereich bei höchstmöglicher Produktivität zu erfüllen wurden sehr anspruchsvolle Maschinen entwickelt. Zumeist sind die Konstruktionen zugeschnitten auf das verwendete Bearbeitungsverfahren. Abbildung 13.219 zeigt die prozentuale Verteilung der Zahnflankenschleifmaschinen bezogen auf die Verzahnungstechnologie und den Werkstückdurchmesser. Einen weiteren großen Einfluss auf die Maschinenkonstruktion hat die Lage der Werkstückachse – horizontal oder vertikal. Eine horizontale Werkstückachse hat Vorteile bei wellenförmigen Werkstücken (Ritzel) bis ca. 200 kg, die zwischen Spitzen bearbeitet werden sollen. Zum einen ist dann der Reitstock stabiler an die Maschinenstruktur angebunden, zu anderen ist eine bessere Automatisierbarkeit gegeben. Für scheibenförmige Werkstücke (Räder) und bei schweren Werkstücken hat die

vertikale Werkstückachse Vorteile – Automatisierung, Spannen, Ausrichtbarkeit schwerer Werkstücke und Minimierung der Verformungen durch das Eigengewicht.

13.7.4.2 Maschinen für das diskontinuierliche Wälzschleifen (Teilwälzschleifen)

Mit solchen Maschinen der Fa.Maag/Zürich und Fa.Niles/Berlin wurde um 1930 begonnen Zahnräder zu schleifen. Bis ungefähr zum Jahr 2000 wurden diese Maschinen geliefert. Ab den 1980er Jahren wurden sie mehr und mehr von hauptsächlich Profilschleifmaschinen verdrängt. Es sind aber immer noch tausende solcher Maschinen in der Verzahnungsfertigung weltweit anzutreffen. In Abbildung 13.220 ist eine Maschine nach dem Niles-Verfahren zu sehen. Die Schleifscheibe wird mit einem

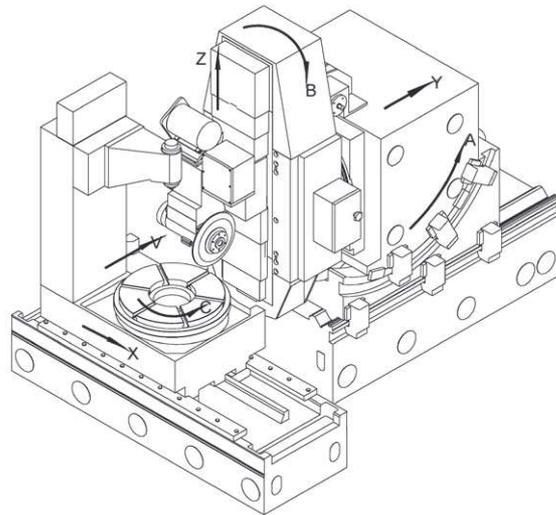


Abb. 13.220: Teilwälzschleifmaschine

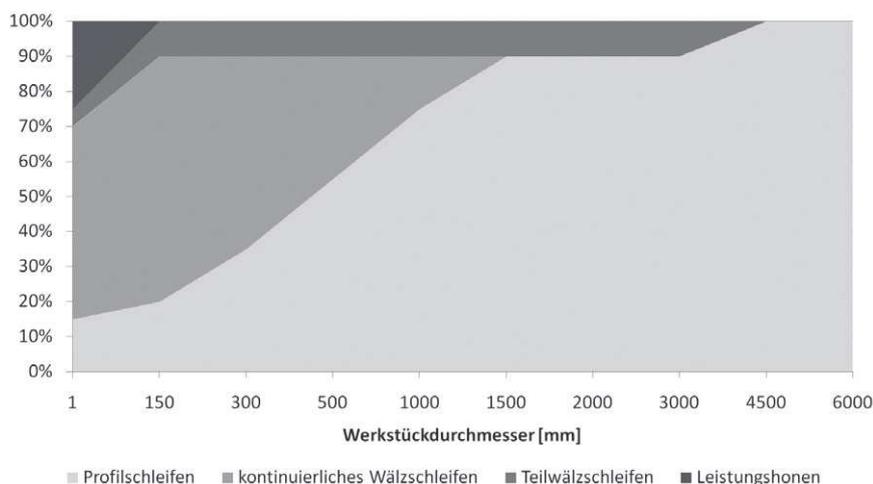


Abb. 13.219: Prozentuale Verteilung der vorhandenen Zahnflankenschleifmaschinen

Stichwortverzeichnis

Symbole

0-Punkt-Spannsysteme 1115
5-Achs Bearbeitung 1095

A

Abbildungsgenauigkeit 1192, 1194
ABCD-Matrix 1160
Abrasion 91
Abrasive Wasserstrahl-Schneiden 1249
Abrichteinrichtung 1014
Abrichten 655, 656, 745, 964, 1012, 1288
Abrichtgeräte 617
Abrichtparameter 1014
Abrichtprozess 571, 900
Abrichtrolle 1012
Abrichtwerkzeug 573, 580, 630
Abschnittsorgung 507
Abstützen 183
Abtrag 867, 1187, 1192 ff, 1208, 1209, 1212, 1218
Abtragen 1133
 chemisches 1137
 chemisch-thermisches 1139
 elektrochemisches 1187, 1193, 1216
 funkenerosives 1134, 1188
 thermisches 1133
 thermisches durch Laserstrahlen 1135
Abtragsrate 1192
Abtragstemperatur 887
Abwälzabtragen, elektrochemisches 1196 ff, 1208, 1218
Achsantriebe 623
Achsenwinkel 942
Achsenüberwachung 803
Adapterplatten 387
Additive 109
Adhäsion 90
Aluminiumoxid 1283
Amortisationsrechnung 58
Anbaugeräte 898
Andruckrolle 651
Annuitätenmethode 57
Anpressdruck 863, 887
Anpresskraft 889
Antrieb-Plandrehkopf-Kombinationen 332
Antriebsleistung 895
Antriebssystem 122
Anweisungsteil 141
Anwendungsbereich, sphärischer 892
Anwendungsprogramm 139
Arbeitsbereiche 821
Arbeitsgeschwindigkeit 734
Arbeitsmaske 1335
Arbeitsprinzip 819
Arbeitsraum 1112
Arbeitssicherheit 792
Arbeitsspalt 1188, 1193, 1196 ff, 1208, 1212
Architekturen
 antriebsbasierte 128
 controllerbasierte 128
Aspektverhältnis 1332
Ätzabtragen 1138
Aufbereitung von Honwerkzeugen 846
Aufbereitung von Kühlschmierstoffen 852
Aufbohren 328

Auflösung, anodische 1187
Aufnahmetechnik 832
Aufspannung, mehrfache 1095
Ausbrüche 88
Ausführungsformen 127
Ausgangsgrößen 115
Auskesseln 1193
Auslegungsmöglichkeiten 820
Außenhonen 816
Außenhon-Werkzeug 842
Außenräumen 468
Außenrundhonen 817
Außenrundscheifeln 538
 von Behältern 722
 von Draht 723
 von Zylindern 720
Außenrundscheifmaschinen 627
Außenschraubscheifeln 664
Außenwirbeln 1053
Auswuchteinrichtungen 584
Auswuchten 618
Auswuchtgeräte 617
Auszahlung 28
Automatisierung 16, 660
Automatisierungseinrichtungen beim Tiefbohren 372
Automatisierungsgrad von Sägemaschinen 503
Automatisierungskonzepte 280
Axialspannfutter 263

B

Bahnbewegung 123
Bahnplanung 123
Bahnvorbereitung 125
Bandfinish-Bearbeitung 896
Bandsägen 497
Bandscheifeln 540, 670, 685
 Störungsursachen 694
Bandscheifmaschinen 695
Bandvorschub 897
Bauform 408
Baugrößenordnung 821
Bauteilschädigung 1241
Bauteilspektrum 869
Bearbeitungseinheiten 1092, 1106
Bearbeitungsgeometrien 888
Bearbeitungsmodellierung, objektorientierte 134
Bearbeitungsschritte 136
Bearbeitungsspannung 1221
Bearbeitungsspektrum 888
Bearbeitungszentrum 407, 1095, 1097, 1098, 1100
Bearbeitungszugaben 864
Beladestation 308, 1086
Beladungskonzepte 1111
Berechnungsgrundlagen 889
Berechnungsverfahren 860
Beschichtungen 93, 171
 im Gewindebohren 1041
Betriebsabrechnungsbogen 33
 Aufbau 33, 34
 Aufgaben 33
 Schlüsselgrößen 33
Betriebsart 139
Bettschlitten 206

Beugungsmaßzahl 1160
 Bewegungsachsen 407
 Bewegungssteuerung 123
 Bezugsprofil 938, 939
 Bezugssysteme 74
 Werkzeug-Bezugssystem 74
 Wirk-Bezugssystem 74
 Bindemittelsysteme 681
 Bindung 731
 keramische 565
 metallische 565
 Bindungsmaterial 845
 Bindungssysteme 564
 Bindungswerkstoff 844
 Bohren 313, 1196
 Bohren von FVK 1244
 Bohrschleifen 746
 Bohrfutter 334, 1064
 Bohrgewindefräser 1049
 Bohrmaschinen 344
 Bohrprozess 299
 Bohrung, profilierte 818
 Bohrungsbearbeitung
 lagegeregelte Werkzeuge 331
 Bohrungsdrehen 267
 Bohrungsschleifen 1295
 Bohrverfahren 313
 Bohrvorrichtungen 338
 Bohrwerkzeuge, zweischneidige 326
 Bohrzentren 384
 Bornitrid, kubisches 103, 844, 845
 Brandschutz 795
 Brennschnittteile beim Bandschleifen 708
 BTA-Bohren 365
 Bügelsägen 496

C

CAD/NC-Kopplung 133
 Carbide 1284
 CBN-Schleifscheibe
 galvanisch gebunden 1016
 keramisch gebunden 1023
 CD-Schleifen 578
 Centerless-Schleifen 1294
 Cermet 99
 CFK-Werkstoffe 1243
 CIS-Schleifen 577
 CNC-Bohrzentren 384
 CNC-Maschinen 383
 CNC-Steuerungen 409
 CNC-Universaldrehmaschine 209
 CO₂-Emissionen 889
 CO₂-Laser 1163
 Coilstrukturschliff 712
 Coronieren 899
 Crushieren 579
 CVD 105
 CVD-Beschichtungsverfahren 172

D

Deckungsbeitrag 44
 Decoder 125
 Dehndorne 190
 Dehnspannfutter 335
 Deklarationsteil 141
 Delamination von FVK 1244

Diamant 102, 500, 563, 844, 845
 Diamantdrehmaschinen 280
 Diamantformrollen 576
 Diamantscheibe 663
 Diamantschleifscheiben 1281
 Diamantschneidstoff 1242
 Diamantwerkzeuge 1286
 Diffusion 92
 DIN 8589-14 887, 898
 DIN EN 61131 136
 DIN S66025 128
 Dioden-Laser 1164
 Direkthonen 899
 Direktmesssysteme
 mechanische 854
 pneumatische 856
 Divisionskalkulation
 Äquivalenzziffernrechnung 35, 36
 Stufendivisionskalkulation 36
 Doppelhonwerkzeug 836
 Doppelkegelscheibe 1007
 Dornhonen 873, 875
 Dornhonwerkzeuge 840
 Drahterodieren 1137
 Drallräumen 468
 Drehantrieb 820
 Drehautomaten 228
 Drehbearbeitung 199
 Drehen 147
 Berechnungsverfahren 159
 Handspannfutter 185
 historische Entwicklung 147
 Kraftspannfutter 186
 Spanneinrichtungen 183
 Verfahren 150
 Werkstückaufnahmen 183
 von FVK 1247
 von Nickellegierungen 1263
 von Titanlegierungen 1276
 Dreh-Fräs-Bearbeitungsmaschinen 298
 Dreh-Fräszentrum 300
 Drehmaschinen 147, 204
 für die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung 158, 285
 Längsnutenbearbeitung 177
 Übersicht 154
 zweispindelige 258
 Drehmaschinenrevolver 176
 Drehmeißel 164
 Drehmeißelklemmhalter 174
 Drehmoment 863
 Drehprozess 299
 Drehräummaschine 297
 Drehschälens 298
 Dreh-Schleifzentrum 261
 Drehschnitt 733
 Drehspindeleinheit 279
 Drehteile 277
 Drehverfahren nach DIN 8589-1 150
 Drehwerkzeuge 164
 Drehzellen 156, 218
 Drehzentrum 156, 218, 254
 Dreibacken-Bohrfutter 334
 Druckeigenspannungen 822, 872, 873, 888
 Durchgangsbohrung 817
 Durchgangsschleifen 648
 Durchlaufbearbeitung 892
 Durchlaufschleifen 609

E

Ease-Off 990
 Eckenradius 74, 77
 Eckenwinkel 76
 Eckfräser 422
 ECM-Entgratvorrichtung 1223
 ECM-Jet-Verfahren 1196
 ECR-Typ 1171
 Edelstahlcoils, Bandschleifen von 710
 EDM, Electro Discharge Machining 1143
 EDM von FVK 1250
 Effektivverzinsung 57
 Eigenspannung 901
 Einbaukartusche 305
 Eingangsgrößen 115, 860
 Eingriffsbogen 734
 Einheit, modulare 896
 Einleisten-Honwerkzeug 837
 Einlippenbohren 362
 Einlippenbohrverfahren 325
 Einnahme 28
 Einspannen von FVK 1248
 Einspindeldrehautomaten 228
 Einspindelmaschine 257
 Einspindler 257
 Einstechschleifen 609, 627, 650, 662, 763
 Einstechverfahren 890, 892
 Einstellwinkel 76
 Einzahlungen 28
 Einzelkosten 29
 Einzelteilverfahren 987, 990
 Ejektorbohren 366
 Electro Discharge Machining, EDM 1134
 Elektroden 1188, 1189, 1193 ff
 Elektrodenisolation 1194, 1200
 Elektrodenwerkstoffe 1149
 Elektrolyte 1187 ff, 1193, 1196, 1200 f, 1207 ff, 1216, 1222
 Elektrolytverarmung 1192
 Elektrolytversorgung 1195, 1196, 1206 f
 Elektrolytzuführung 1200
 Elektronenstrahlithografie 1335
 Elektro-Spanner 201
 Elektrostate 799
 Emission, induzierte 1156
 Endqualität 866
 Endwert 56
 Energiedichte 1340
 Energieeffizienz 200, 1097
 Entgraten
 elektrochemisches 1218
 thermisch-chemisches 1138
 Entladestation 308, 1086
 Entsorgungskosten 736
 Epizykloide 990
 Ereignis 139
 Ermüdungsfestigkeit von FVK 1242
 Ertrag 28
 Evolvente 937, 938
 Ex-Cell-O-Verfahren 898
 Excimer-Laser 1165

F

Face-Hobbing 990, 992
 Face-Milling 990, 991
 Fahrschnitt 733
 Fahrständemaschine 611

Faradaysches Gesetz 1187
 Faser-Laser 1164
 Faserorientierung 1243
 Fässler 899
 Feature 136
 Feilen 515
 Feilwerkzeuge 515
 Feinbearbeitungszentren 756
 Feinbohrmaschinen 350
 Feinbohrspindel 354
 Feinbohrstangen 358
 Feinbohrwerkzeuge 355
 Feindrehmaschinen 157
 Feinstbearbeitungszentrum 896
 Feldbus 121
 FEPA-Standard 679
 Fernfelddivergenz 1159
 Fertigschleifen 763
 Fertigungseinzelkosten 39
 Fertigungsgemeinkosten 39
 Fertigungssysteme 386
 Fertigungssystem zur Fertigbearbeitung 1088
 Fertigungsverfahren
 mit geometrisch bestimmter Scheide 22
 mit geometrisch unbestimmter Scheide 23
 nach DIN 8580 21
 Fertigungsverfahren, trennende 73
 Fertigungszelle 386
 Fertigwälzfräsen 986
 Festigkeit, dynamische 1153
 FG-Verfahren (VW) 880
 Finanzplan 59
 Fingerfutter 188
 Finishbandtechnik 893
 Finishen 816
 Finishsteinvarianten 893, 894
 Fixe Kosten 29
 Flächen, sphärische 892
 Flachscheifen 600
 Flachscheifmaschinen 597
 Flachschliff von Massivholz 714
 Flammenmelder 795
 Flankenlinienmodifikationen 939
 Fließspannbildung 79
 Fluidstrahlen 816, 880, 882
 FMEA 164, 1167
 FMF-Hybridhonverfahren 880
 Form-Bandschleifen 690
 Formbohren 377
 Formdrehen 153
 Formfeilen 515
 Formfräser 428
 Formgebung 1285
 Formhonen 886
 Formhonwerkzeug 839
 Formmesser 994
 Formregelungseinrichtungen 859
 Formschleifen 540, 715
 Formverfahren 935
 Fräsbearbeitung faserverstärkter Kunststoffe 1242
 Fräsen, trochoides 445, 1278
 Fräsen von Nickellegierungen 1267
 Fräsen von Titanlegierungen 1277
 Fräser für die Aluminiumbearbeitung 429
 Fräsergangzahl 979
 Frärschleifen 747
 Fräsköpfe 306

Fräsmaschinen 442, 404
Fräsprozess 299, 441, 450
Fräsverfahren 401
Fräswerkzeuge 416
Freifläche 73
Freiflächenverschleiß 87
Freiformdrehen 153
Freihandtrennen 729, 732
Freistich 817
Freiwinkel 76
Freiwinkelschleifen 748
Fremdleistungskosten 32
Fresnelbeugung 1333
Fügetechniken 1344
Führungen 410
Führungsbahnenschleifen 542
Führungsgrößen 115
Führungssysteme 275
Fundamentierung 776
Funkenerosion 1143
Funktion 140
Funktionsbaustein 140
Funktionssteuerungen 116
Fußfreischnitt 981

G

Gabelfräskopf 307
GA-Faktor 734
Gauß'scher Strahl 1159
G-Code 128
Gebühren 32
Gefrierspannen 185
Gegenlaufräsen von FVK 1243
Gegenlaufschleifen 703
Gegenspindelmaschine 259
Gemeinkosten 29
Generatoren 1204 ff
Geradheitsmessung 874
Gesamtzerspanarbeit 85
Geschwindigkeitsprofile 126
Gewebe 680
Gewichtsausgleich 1095
Gewichtsreduzierung 200
Gewinde 1027
Gewindeausführungen 1028
Gewindebearbeitung 1067
Gewindebohren 1034
Gewindebohren, Werkzeuge 1038
Gewindedrehen 161, 1057
Gewindedrehen, Zustellungsarten 1059
Gewindefertigung 1034
Gewindefertigung, Maschinen zur 1061
Gewindefräsen 1047
Gewindefräser 431
Gewindefräsfurchen 1052
Gewindefurchen 1042
Gewindefurcher, Werkzeuge 1044
Gewindeherstellung 1028
Gewindeschleifen 641
Gewindeschneidapparate 1067
Gewindeschneidfutter 1064
Gewindesenkfräser 1049
Gewindestrehlen 1060
Gewidewirbeln 1053
Gewinnvergleichsrechnung 52
Gewirke 680

GFK-Werkstoffe 1243
Glasfasergewebe 731
Gleichlaufräsen von FVK 1243
Gleichlaufschleifen 703
Gleithonen 878
Gleitschleifen 542
Goldabsorber 1335
Gouy-Phase 1160
Gratbildung 736
Großbandsäge 505
Großflächenwerkzeuge 839
Großhohmaschinen 821, 826
Großkurbelwellen 790
Grünbearbeitung 1286
Grundhalter 436
Grundkörper 566
Grünräumen 478
G-Wert 868

H

Handeinlegevorrichtung 660
Handfeilen 516
Handhabung von Werkstücken 1116
Handling 820, 851
Hartbearbeitungsverfahren 1289
Hartdrehen 264
Härte 97
Härtegrad 731
Hartfeinbearbeitung 762, 1019
Hartmetall 169, 99
Hartmetall-Sägewerkzeuge 501
Harträumen 478
Hartschalen 1022
Hartwirbeln 1056
Hauptbewegungen 889
Hauptkomponenten 820
Hauptschneide 74
Hauptspindelantrieb 820
Hauptzeit 161, 1095, 1100
Hauptzeit, Gewindeherstellung 1030
Hebelausgleichfutter 193
Heißprägen 1333
Heißtrennen 734
Herstellverfahren, wälzende 935
Hiebarten 517
High Speed Cutting 158
Hilfsfunktionen 131
Hobelkämme 1001
Hobelmaschine 458, 461
Hobeln 462
Hobel- und Stoßmaschinen 1001
Hochdruckspannzylinder 200
Hochgeschwindigkeitsbearbeitung 285
Hochgeschwindigkeitsgewindebohren 1038
Hochgeschwindigkeitszerspanung 285
Hochleistungsdrehmaschine 296
Hochleistungsfräsen 444, 1279
Hochleistungskeramik 1284
Hochpräzisionsdrehen 275
Hochtemperaturwerkstoffe 1261
Hochvorschubfräser 426
Hohlschaftkegel 333, 437
Honband-Technologie 896
Honbeläge 846
Honen 1296
Honleistenlänge 862

- Honleisten-Zustellsystem 820, 852
 Honmaschine für Verzahnungen 901
 Honmaschinenarten 819
 Honmesssystem 820
 Honmodul 824
 Honprozess 860, 867, 1020
 Honrad 968
 Honring 1019
 Honsystem 827
 Honverfahren 814, 816
 Honzeiten 864
 Honzentrum 821, 825
 Honzugabe 867
 Horizontales Bearbeitungszentren 406
 Horizontal-Langhubhohmaschinen 827
 HSC-Bearbeitung 158
 HSC-Bohrmaschine 382
 HSC-Maschinen 382
 Hubbewegung 820
 Hublagerschleifen 789
 Hublänge 862
 Hubschleifen 541
 Hülschnittabweichung 958
 Hybridansatz 1342
 Hybridverfahren 816, 818
 Hydraulikventile 875
 Hydro-Dehnspannfutter 335
 Hydrostatische Gleitführung 410
 Hypoid 970
 Hypoidgetriebe 943
 Hypoidräder 990
- I**
- ICP-Typ 1171
 Implantate, Schleifen von 767
 Inconel 1262
 Indexschnitt 733
 Indirektmesssysteme 858
 Innen-/Außenschneider 972, 992, 993
 Innengewindeerzeugung 1050
 Innengewindeschleifen 642
 Innenhonen 816
 Innenprofilhonen 817
 Innenräumen 467
 Innenräummaschinen 483
 Innenrundhonen 817
 Innenrundscheifen 538
 Innenrundscheifen von Behältern 722
 Innenrundscheifmaschinen 634
 Innenschleifen 635
 Innenschraubschleifen 664
 Innenwirbeln 1054
 In-Prozess-Messung 777
 Interpolation 1095
 Investitionsprogramm 50
 Investitionsrechnung 51, 54
 Ionenstrahlverfahren 1166
 Istkostenrechnung 43
- J**
- Joule'sche Wärme 1188
- K**
- Kalkulation, retrograde 46
 Kalttrennen 734
 Kammerisse 89
 Kapitalkosten 31
 Kapitalwert 56
 Kappschnitt 733
 Karbidbildner 98
 Karusselldrehmaschinen 157, 268
 Kaufman-Typ 1170
 Kegelrad
 Bogenverzahnung 941
 Evolventenverzahnung 941
 Geradverzahnung 941, 991
 Läppmaschine 975
 Schrägverzahnung 941
 spiralverzahnt 994
 Stoßmaschine 1001
 Zykloidenverzahnung 941
 Keilhakenfutter, kraftbetätigtes 186
 Keilstangenfutter 185
 Keilwinkel 76
 Keramik 170
 technische 1283
 Kernlochformen 1038
 Kinematik 819
 Kleinsignalverstärkung 1158
 Kleinstbohrungen 841, 873
 Koaxialhonen 879
 Kolbenlaufbahn 816
 Kolkverschleiß 87
 Kollisionsüberwachung 803
 Kollisionsvermeidung 807
 Kombiniertes Verfahren 818
 Kompaktabscheider 798
 Kompakt-SPS 137
 Komplettbearbeitung 240
 Komplettbearbeitungsmaschine 1098
 Konditionieren 569, 630, 1288
 Konischhohwerkzeug 839
 Konsolspannfutter 264
 Kontursägen 504
 Kontursenken 1193, 1196 ff
 Konturüberwachung 803
 Konzentration 847
 Koordinatenbohrmaschinen 360
 Koordinatensystem 129
 Korkscheifbänder 713
 Korngrößenangaben 564
 Korngröße 844
 Kornmaterial 845
 Kornwerkstoffe 561
 Korrosionsschutzwirkung 851
 Korund 561
 Kostenartenrechnung 30
 Kostenrechnungssysteme 42
 Kostenstellenrechnung 32
 Kostenträgerzeitrechnung 35
 Kostenvergleichsrechnung 51
 Kraftspannanlage 195
 Kraftspanneinrichtungen 199
 Kreissägen 496
 Kreuzschliff-Superfinishen 892
 Kreuzschlitten 1095
 Kubisches Bornitrid 170
 Kubisch kristallines Bornitrid (cBN) 563
 Kugelgewindespindel 1056
 Kugelkopffräser 426
 Kugelrollspindel 1095
 Kühlaggregate 894

Kühlschmiermittelmanagement 1108
Kühlschmierstoff 554, 848, 894
 Aufbereitung 894
 Zuführtechniken 852
Kühlschmierstoffe 108, 704
Kühlschmierstoffversorgung 432
Kühlschmiersystem 555
Kühlwirkung 851
Kunstharzbindung 564
Kuppelkalkulation 42
Kurbelwelle 896
Kurbelwellenfräser 430
Kurbelwellenschleifmaschinen 785
Kurzhubhonen 815, 816, 887
Kurzhubhonvarianten 888
Kurzschlussüberwachung 1212

L

Ladungsträgerverarmung 1212
Lagekorrekturen 816
Lagergassenbearbeitung 874
Lagerintegration 509
Lagerstelle, hydrostatische 1095
Lagerungen 410
Lamellenspannbildung 79
Langdrehautomaten 156, 243
Längenausgleich 1065
Langgutlager 510
Langhubhonen 816
Langhubhonvarianten 816
Längsbearbeitung 892
Längsdrehen 161
Längsformschleifen 763
Längsschleifen 662
Längs-Seiten-Planschleifen 608
Längs-Umfangs-Planschleifen 602
Langzeitschleifband 713
Langzeitschleifmittel 677
Läppen 907 ff, 1023
Lärmemissionen 737
Laser 1151
Laserbedingung 1158
Laserhonen 816, 883
Laserstrahlschneiden 1137
Laserstrahlung 1155
Laufbahnbearbeitung 892
Leerhub 1001
Leichtbauspännmittel 200
Leistenhonwerkzeug 842
Leistung 28
Leistungsfaktor 734
Leistungshonen 899
Leistungshonmaschine 901
Leitsteuerung 118
Leitungsführungen 1070
Lenkzahnstange 613
Lift-&Carry-Transfer 824
LIGA-Technik 1332
Linearachse 306
Lineardirektantrieb 256
Linearfinishen 889
Lithografie, optische 1338
Look-ahead 123
Lorentzkraft 1343
Löscheinrichtung 797
Luft- und Raumfahrtanwendungen 428
Lünetten 208, 596

1352

M

Magnetspanntechnik 597
Maschinen 893
Maschinenarten 819
Maschinenbett 286
Maschinenkonzepte, modulare 820
Maschinenrichtline 792
Maschinenschaber 523
Maschinensteuerung 118
Maschinenstundensatz 34, 40
Maschinenwerkzeuge 522
Mask Aligner 1338
Maske 1332
Materialabtrag 867, 1187, 1195, 1210
Materialeinzelkosten 39
Materialgemeinkosten 39
Materialkosten
 Betriebsstoffkosten 31
 Fertigungsmaterialkosten 31
 Hilfsstoffkosten 31
Mechanische Schrittzustellung (formschlüssig) 853
Medizintechnik 1055
Mehrfachaufspannung 1094
Mehrfachbearbeitung 834, 1096
Mehrleisten-Honwerkzeug 836
Mehrmaschinenysteme, verkettete 1101
Mehrspindelbohrkopf 1100
Mehrspindeldrehautomaten 230
Mehrspindeleinheit 1096
Mehrspindelkopf 1096, 1097, 1098
 Lochbild 1094, 1096
Membranfutter 188
Mengensäge 506
Messbüchse 854
Messdorn 854
Messerkopf 972, 991, 994
Messsteuerungen 627
Messsystem 820, 854
Messtaster 1108
Microfinishen 816
Microfinishing 721
Mikrofertigung 1196
Mikromontage 1344
Mikrostrukturierung 1175
Miniaturfräser 427
Minimallängenausgleich 1067
Minimalmengenschmierung 432, 801, 1069, 1096, 1100
Minisynchronmotor 1340
Mitnehmer 192
Mittellagerbearbeitung 788
Mittelantriebsdrehmaschinen 283
Modularbaukasten 261
Modulare-SPS 138
Modulschnecke 1056
Molybdän und seine Legierungen 1257
Monokristalliner Diamant 171
Morsekegel 435
Motorblock 816, 818
Motorspindel 252
Multifunktionsmaschinen 259

N

Nachformdrehen 162
Nachschliff 980
Nassbearbeitung 1070
Nasstrennen 732

NC-Programmierung 128, 131
NC-Simulation 1122
NC-Steuerung 119
Nd\YAG-Laser 1164
Nebenschneide 74
Nebenzzeit 1094, 1100
Negativresist 1332
Neigungswinkel 76
Neutralisatoren 1172
Nichtoxidkeramik 1284
Nickel 1339
Nickelbasislegierungen 1260
Niederhalter 652
NiFe-Legierung 1342
Nimonic 1263
Nitride 1284
Nockenwellenschleifmaschinen 778
Normalkostenrechnung 43
Normung 815
Nullpunkterkennung 1212
Nutenfräsen 445
Nutzstoßen 179
Nutzwertanalyse 62

O

Oberflächen 455, 462
Oberflächen-Flachschleifen 711
Oberflächengüte 849
Oberflächenrauheit 864
Oberflächenrauheit beim Schleifen 556
Oberflächenstruktur 1020
Objektlöschanlage 795
Ohm'sches Gesetz 1191
Ölfilmstärke 885
Ölhalte und Transportmechanismen 881
Ölnebelabscheidung 798
Oszillationsfinishen 887, 889, 890
Oszillationsschnitt 733
Oxidationsvorgang 94

P

Paletten-Transportsysteme 1119
Palettenwechsler 274, 1111
Palettieren 508
Parallelbearbeitung 1094
Passivkraft 82
Peak-Honen 875
PEM-Verfahren 1194
Pendelschleifen 577, 978
Pendelschleifverfahren 602
Periode 139
Personalkosten 30
Pick-up-Drehmaschine 256
Pick-up-Schnittstelle 305
Pick-up-Station 262
Pick-up-Werkstückwechsel 1098
PIG-Typ 1171
Pinole, hydrostatische 1095
PKW-Getrieberad 902
Plan-Bandschleifen 689, 708
Plandrehen 267
Plandrehmotoren 156, 248
Planetengeräte 1345
Planetenräder 832
Planflächen 892

Planfräser 421
Plankostenrechnung 43
Plankurvenfutter 186
Planlappen 910
Planrad 941, 942, 990
Planräumen 468
Planschlagkorrekturen 816
Planschleifen 536
Planschleifmaschine 600, 610
Planschleifverfahren 600, 1289
Plasmapolieren 1230, 1231
Plateau-Honen 876
PMMA (Plexiglas) 1335
Polieren 921 ff
Polieren, elektrochemisches 1228
Polygonspanntechnik 336
Polykristalliner Diamant 171
Polymerbeton 895
Portallader 274, 275
Portal-Radsatzdrehmaschine 294
Portfoliodarstellung 63
Positionierüberwachung 804
Positionshonen 816, 828, 885
Positivresist 1332
Postprocessor 128
Powerhonen 899
Präzisionsbearbeitung 632, 756
Präzisionsdrehmaschinen 157, 275
Präzisionsfeilen 516
Präzisionsspannfutter 336
Processor 128
Produktionsdrehmaschinen 155, 210
Produktionsfaktoren nach Gutenberg 27
Profil-Bandschleifen 690
Profilbearbeitung 506
Profildrehen 152
Profilfeilen 515
Profilfräsen 987
Profilfräser 988
Profilfräsmaschinen 951
Profilflappen 912
Profilmodifikationen 939
Profilräumen 468
Profilschleifen 540, 611, 666, 1013
Profilschleifmaschine 965
Profilschleifverfahren 600
Profilverfahren 940
Programm 141
Programmiersprache 128, 133, 142
Programmiersysteme 624
Programmorganisationseinheiten 141
Programmsteuerung 116
Protuberanz 981, 1010
Prozess-Bearbeitungsmodule 1110
Prozessgestaltung auf Fräsmaschinen 440
Prozesskinematik 900
Prozesskostenrechnung 46
Prozesskostenrechnung, ressourcenorientierte 48
Prozessmodellierung 450
Prozessregelung 451, 895
Prozesssteuerung 120
Prozessüberwachung 451
Pulversynthese 1284
Pumpenrotor 612
PVD 105

Q

Qualitätsmanagement 1120
 Qualitätsmerkmale 816, 832, 901
 Qualitätsstand 822
 Querdrehen 162
 Querrisse 89

R

Radialbohrmaschinen 346
 Radialfinishen 889
 Radialoszillation 888, 891
 Radialspanntechnik 831
 Radialspannungen 736
 Radienabrichten 638
 Radsatzdrehmaschine, mobile 291
 Radsatzwellen-Drehmaschine 296
 Randschichten 1152
 Randzone 872, 887
 Raspeln 515
 Rauheit 847, 864
 Räumen 467
 Maschinen und Systeme 481
 Schneidstoffe 478
 von Nickellegierungen 1269
 von Titanlegierungen 1279
 Werkstückstoffe 468
 Werkzeuge 469
 Räummaschinen
 Steuerungstechnik 490
 Räumnadel 467
 Räumprozess
 Berechnungsgrundlagen 479
 Zerspankräfte 479
 Räumverfahren 467
 Räumwerkzeuge 612, 955
 Ausführungsformen 473
 Befestigung 474
 Instandhaltung 476
 Verschleiß 475
 Räumwerkzeugschleifen 751
 Rayleigh-Länge 1159
 Reaktion, tribochemische 92
 Regeln 115
 Regelscheibenform 648
 Regelsystem 820
 Reiben 330
 Reibungsreduzierung 889
 Reibwert 863
 Reinigungsanlage 894
 Reinigungssystem 852
 Reitstock 206
 Reluktanzantrieb 1341
 REM-Aufnahme 1337
 Rendite 57
 Rentabilitätsrechnung 52
 Rentabilitätsvergleichsrechnung 53
 Resist 1332
 Resonator 1156
 Richtwerte 315
 Ringformen, sphärische 892
 Roboter 1118
 Rohrbearbeitungsmaschinen 302
 Rohrschleifmaschine 720
 Röntgenscanner 1333
 Röntgentiefenlithografie 1332
 Rotationsdrehen 264

Rotationsfinishen 887, 889, 892
 Rotationsfinish-Maschine 894
 ROX-Kennzahl 27
 Return on Equity (ROE) 27
 Return on Investment (ROI) 28
 Return on Sales (ROS) 27
 Rückhub 1001
 Rückkopplung 1158
 Rückverfolgung von Werkstücken 1121
 Rund-Bandschleifen 689
 Rundheitsfehler 643
 Rundheitsmessung 874
 Rundkolbenfutter 188
 Rundlappen 911
 Rundräumen 468
 Rundscharntisch 1084
 Rundscheifen 538, 717
 Rundscheifmaschinen 620
 Rundscheifverfahren 1294
 Rundtaktmaschine 1100
 Rundtaktmaschinen 1077
 Rundtisch 304
 Rundtischmaschine 606
 Rüstplätze 308
 Rüstzeitoptimierung 193

S

Sacklochbohrung 817
 Sacklochräumen 468
 Sackloch-Werkzeuge 838
 Sägebänder 495
 Sägeblattschleifmaschine 749
 Sägen 495
 Sägeverfahren 495
 Sägewerkzeuge 499
 Sägezentrums 510
 Sättigungsintensität 1158
 Satzräder 938
 Säulenkonzept 896
 Schaben 521
 Schabmaschinen 1002
 Schabrad 958, 1002
 Schabschleifen 670
 Schabverfahren 521, 1004
 Schabwerkzeuge 522
 Schaftfräsen 403, 427
 Schaftaltersysteme 175
 Schaftwerkzeuge 418, 422, 841
 Schälrad 977
 Schälwälzfräsen 986
 Scheibenfräser 423
 Scheiben-Laser 1164
 Scherbänder 79
 Schieber-Werkzeuge 357
 Schleifbänder 671, 681, 683
 Schleifbrand 1015, 1020
 Schleifen 299, 1286
 von FVK 1248
 spitzenloses 643
 über Mitte 647
 unter Mitte 647
 von Nickellegierungen 1269
 von Nocken- und Kurbelwellen 542
 von Titanlegierungen 1280
 Schleiffeinstbearbeitung 721
 Schleifkenngrößen 546

- Schleifkorn 672, 674
Schleifkörperschutzhauben 793
Schleiflunetten 596
Schleifmaschinen 543, 1006
Schleifmittel 731
 auf Unterlage 670
 -körnungen 678
Schleifprozess
 Kenngrößen 535
Schleifscheiben 554, 753, 1016, 1287
Schleifscheibenbindungseigenschaften 754
Schleifscheibenprofil 662
Schleifscheibenverschleiß 570
Schleifscheibenverwaltung 616
Schleifscheibenwechsler 743
Schleifschnecke 1009
Schleifspalt 645, 655
Schleifverfahren 534, 536, 600
Schleifvorgang 549
Schleifwerkzeuge 561
Schleifzahnrad 898
Schleifzentrum 756, 613
Schlichten 455
Schlichtfräsen 419, 425
Schmelzkorunde 676
Schmierwirkung 851
Schnecken 944
 Duplexschnecken 946
 Globoidschnecke 944
 Zylinderschnecke 944
Schneckenräder 946, 998
Schneckenradwälzfräser 999
SchneckenSchalen 997
Schneidbeläge 843
Schneiden, funkenerosives 1144
Schneiden für Drehwerkzeuge 165
Schneidengeometrie 165, 448
Schneidenträger 174
Schneiderodieren 1135
Schneiderosionsanlage 1150
Schneidkantenpräparation 449
Schneidkeil 73
Schneidkeramiken 1264, 1267
Schneidkopfsystem 175
Schneidkornart 848
Schneidmittel 893
Schneidöle 109
Schneidplatten 170
Schneidräder 1001
Schneidstoffe 168, 843
 für FVK 1242
 konventionelle 844, 847
 zum Fräsen 416
 nach ISO 513 169
Schnellarbeitsstahl 169, 418, 98
Schnellhubschleifen 615
Schnellradialbohrmaschine 348
Schnellwechseleinsätze 1068
Schnittarbeit 85
Schnittenergie 85
Schnittgeschwindigkeit 816, 860
 beim Bandschleifen 702
Schnittkosten 735
Schnittkräfte 81, 862
Schnittleistung 85
Schnittstelle 333
Schnittstellensystem 435
Schnittstrategien 441, 447
Schnittwerte für Schwermetalllegierungen 1254
Schrägeinstechschleifen 630
Schraubdrehen 152, 1060
Schraubbläppen 912
Schraubräumen 468
Schraubschleifen 539, 662
Schraubwälzschleifen 962
Schrittzähler 858
Schruppen 455
Schruppfräsen 425
Schruppfräser 419
Schuhschleifverfahren 637
Schwalbenschwanzführung 272
Schwermetalle 1253
Schwimmende Spannung 343
Schwingschleifen 816
Segmentspanndorn 599
Selbstschärfeffekt 893
Senken 1144, 1187 ff, 1201, 1208, 1218
Senkerodieren 1135
Senkerosionsanlage 1145
Senkrechtdrehmaschinen 157, 251
Sensitivitätsanalyse 60
Setzmarkierungen 815
Shiften 1011
Shiftstrategie 986, 1011
Sicherheitsanforderungen 736
Sicherheitseinrichtungen 792
Sicherheitstechnik, NC-integrierte 809
Siliciumcarbid 562, 677
Siliziumcarbidkeramik 1284
Simulation von Fertigungssystemen 1121
Simulation von Zerspanprozessen 16
Sinterkorunde 676
Sintern 1286
Slope 127
Sonderbearbeitungsstationen 1110
Sonderdrehmaschinen 158, 289
Sondereinzelkosten
 der Fertigung 39
 des Vertriebs 39
Sonderläppverfahren 913
Sonderschleifmaschinen 772
Sonderschleifverfahren 542
Sondertiefbohrmaschinen 373
Spanarten 79
Spanbildung 77
Spänefall 1097
Spänemanagement 1108
Spanen von FVK 1242, 1248
Spanen mit geometrisch unbestimmter Schneide 536
Spanfläche 73
Spanformen 80
Spanndorne 190
Spanneinrichtungen für Drehmaschinen 207
Spannen von Werkstücken 1113
Spannest 1097
Spannfutter 333
Spannlage 1095
Spannmittel 287
 auf Verzahnungsschleifmaschinen 598
 für die Drehbearbeitung 263
Spannplatz 1095
Spannrundlaufgenauigkeit 333
Spannstock 341
Spannsysteme 435, 439, 744

Spannvorrichtung 336, 1095 ff
 für Feinbearbeitungen 359
Spannzangen 189, 335
Spannzangenfutter 335
Spanwinkel 76
Spheric-Honen 899
Spindelinheiten 1093
Spindelkonfiguration 1096, 1097, 1098, 1100
Spindelkopf 1097
Spindeln 328
Spindelrevolver 1096
Spindelstock 205
Spindelüberwachung 803
Spindelwerkzeug 329
Spiralbohrer 326
Spiralfutter 185
Spiral-Gleithonen 878
Spritzgießen 1333
SPS 136
SPS-Programmierung 140, 141
Spulen 1339
Spülwirkung 850
Stabilitätsindex 646
Stabilitätskarte 451
Standzeit 444
Staubemissionen 737
Steifigkeit 97, 1095
Steilkegel 333, 436
Steinanpresskraft 889
Steinbreite 890
Steinlänge 889
STEP-NC 135
Step-Technologie 323
Steuerbohrung 875
Steuerkette 115
Steuerung 115, 117, 123 ff, 820
Steuerungsablauf 116
Steuerungsebenen 117
Steuerungseinrichtung 115
Steuerungsmittel 115
Steuerungssystem 118
Steuerungstechnik 115
Stillstandsüberwachung 805
Stirnflächenbearbeitung 652
Stirnmesserkopf 991
Stirnmitnehmer 184
Stirnräder 938
Stirnschleifen 600
Stirn-Umfangsplanfräsen 402
Störgrößen im Fräsprozess 447
Stößel 1001, 1095, 1096, 1098
Stoßen 299
Stoßmaschine 455, 456, 461
Stoßschaber 522
Strahlparameter, komplexe 1160
Strahlparameterprodukt 1159
Strahlqualitätskennzahl 1160
Strahlungstransportgleichung 1158
Streuabtrag 1194, 1197, 1198
Streubild 673
Stromdichte 1192, 1209
Struktur 731
Stückzeitberechnung 1098
Stützelement 700
Stützscheibe 699
Substrat 1334
Superfinish-Verfahren 721, 815, 816

Supportmaschine 604
Synchronreistöcke 632
Synchrotronstrahlung 1332, 1333
System
 tribologisches 818
 verkettetes modulares 825
Szenariotechnik 61

T

Tangentialdrehen 265
Tangentialspannungen 736
Tantallegierungen 1259
Target Costing 46
Tauchfräser 425
Taumelfräsen von FVK 1247
Teamzusammensetzung 1170
Technische Investitionsplanung 49
Technische Investitionsrechnung 49
Technologieträgersystem 1095
Teilespektrum beim Verzahnungshonen 903
Teilkostenrechnung 44
Teilwälzschleifen 665, 959, 1006
Teleservice 820
Tellerscheiben 1006
Temperaturfelder 85
Temperaturmessung 86
Temperaturverteilung 86
Thermoplaste 1343
Tiefbohren 362
Tiefbohrmaschinen 362
Tiefbohrwerkzeug 383
Tieflochbohrwerkzeuge 325
Titanaluminide 1273
Titanbleche, Plan-Bandschleifen von 708
Titandrehen 1276
Titanlegierungen 1272
Toleranzen 13
Topfräumen 468
Topfschleifscheibe 991, 1023
Topografiemessung 266
Torusfräser 427
Trägerwerkstoffe für Schleifmittel auf Unterlage 680
Transfer-Honanlage 822
Transfermaschinen 1089, 1100
Transferzentrum 1094 ff
Transformation 1095
Trennen
 Bearbeitungsfehler 1241
 von FVK 1241
 handgeführtes 729, 732
 von Hartmetall 1242
 maschinengeführtes 729
Trennfräser 424
Trennschleifen 732
Trennschleifmaschinen 729
Tribos-Spannfutter 336
Trockenbearbeitung 1100
Trockenräumen 478
Trockentrennen 732
Tubusräumen 468
Turbinenschaufeln, Schleifen von 716, 760
Tuschierplatte 523

U

Udimet 1263
Ultrapräzisionsdrehen 275

Ultrapräzisionsdrehmaschinen 280
 Umfangsgeschwindigkeit des Werkstücks 889
 Umfangsplanfräsen 402
 Umfangsprofilfräsen 402
 Umschlingungswinkel 446
 Umspannen 1095, 1098
 Umspannvorgang 1100
 Universaldrehmaschinen 155, 204
 Universalsägen 505
 Universalschleifmaschine 742
 Unrundhonzwerkzeug 839
 Unrundschleifmaschinen 639
 Unterflur-Radsatzdrehmaschine 290
 Unternehmerlohn, kalkulatorischer 32
 Unwuchtausgleich 587
 Unwuchten 584

V

Ventile 875
 Verbreiterung
 homogene 1158
 inhomogene 1158
 Vereinzeln 510
 Verfahrenskinetik 889
 Verfahrensmerkmale 818, 889
 Verfahrensstruktur 891
 Verfahrensvarianten 870, 890, 899
 Verformung, plastische 90
 Vergleich, paarweiser 63
 Verkettungen 16, 508
 Verkettungsarchitekturen 1101
 Verkettungseinrichtungen 304
 Verknüpfungssteuerungen 116
 Verschleiß 554, 87
 an der Schneidkante 173
 bei FVK 1242
 -formen 1267
 -keramiken 1283
 -mechanismen 90
 -schutzschicht 103
 -ursachen 90
 -widerstand 97
 Vertikalbandsägemaschine 504
 Vertikaldrehmaschinen 251, 253, 294
 Vertikal-Finishmaschine 895
 Vertikal-Innenrundhonzmaschinen 852
 Vertikal-Langhubhonzmaschinen 820
 Vertriebsgemeinkosten 39
 Verwaltungsgemeinkosten 39
 Verzahnen 299
 Zahnmaschinen, spanende 947
 Zahnungsfräser 427
 Zahnungshonen 670, 816, 898, 1019
 Zahnungsschleifmaschinen 598
 Zahnungswerkzeuge 428
 Verzunderung 94
 Vollbohren 322
 Vollkostenrechnung 43
 Vollmantelwerkzeuge 840
 Vollnutenfräsen 1277
 Vorbereitung 865, 866
 Vorrichtung 829
 Vorschubachsen 409
 Vorschubarbeit 85
 Vorschubenergie 85
 Vorschubkraft 81
 Vorschubleistung 85

Vorschubmarkierung 958, 983
 Vorschubrichtung
 Gegenlauf 981
 Gleichlauf 981
 Vorschubrichtungswinkel 73
 Vorschubstrategie 983
 Vw-Wert 868

W

Wagnis, kalkulatorisches 32
 Wälzdrehen 152
 Walzendrehmaschinen 302
 Walzenschleifmaschinen 772
 Walzenwerkstatt 778
 Wälzfräsen 979
 Wälzfräser 427, 947, 979
 Wälzfräser, Schleifen von 750
 Wälzfräsmaschinen 947
 Wälzhobel- und Wälzstoßmaschinen 951
 Wälzhonen 898
 Wälzlappen 912
 Wälzschälmaschine 956
 Wälzschleifen 539, 665, 1009
 Wälzschleifen, kontinuierliches 667
 Wälzschleifmaschine 668, 959
 Wälzstoßen 299, 952
 Wälzverfahren 940
 Warmdrehen 154
 Wärmebilanz 85
 Wärmeenergie 85
 Warmschrumpffutter 337
 Warmtrennen 734
 Waspaloy 1263
 Wasserarmaturen, Formschleifen von 716
 Wasserstrahlschneiden von FVK 1248
 Wechselgenauigkeit 183
 Wechselkopfböhrer 328
 Wechselkopfvollböhrer 325
 Wegmesssysteme 411
 Weichhaut 815
 Weichräumen 478
 Weißbearbeitung 1286
 Welle, elektromagnetische 1155
 Wellengleichung, paraxiale 1159
 Wellenmaschine 258
 Wellenspannfutter 189
 Wendeschneidplatten 168, 323, 428, 431
 Schleifen von 752
 -Vollböhrer 322
 -werkzeuge 420, 426
 Werkstattfeilen 516
 Werkstoffabtrag 867
 Werkstoffe 14
 Werkstoffrandzone 893
 Werkstoffspektrum 869
 Werkstück 183
 Werkstückaufnahme 744, 829, 891, 892
 beim Bohren 338
 beim Schleifen 590
 schwimmende 832
 starre 830
 Werkstück beim Bandschleifen 686
 Werkstücke beim Schleifen 590
 Werkstückhandhabung 1116
 Werkstückhandling 273
 Werkstückmanagement 1107
 Werkstückspannung 274

Werkstückspindel 286, 766
 Werkstücktransport in Transfermaschinen 1090
 Werkstückwechselsystem 407
 Werkstückwechsler 1112
 Werkzeugarten 835
 Werkzeugaufnahme 561, 333
 doppelgelenkige 829
 doppelkardanische 829, 833
 von Schleifscheiben 567
 Werkzeugbahngenerierung 446
 Werkzeugbeschichtung 449
 Werkzeugbezugssystem 74
 Werkzeugcodierung 1108
 Werkzeuge 14, 893, 900
 für die Bohrungsbearbeitung 322
 Werkzeuggeometriekorrektur 125
 Werkzeughalter 273
 Werkzeugkegelreinigung 1108
 Werkzeugmagazine 385
 Werkzeugmanagement 1108
 Werkzeugmaschine 122
 für Keramikbearbeitung 1286
 Werkzeugmaschinenindustrie 10
 Werkzeugrevolver 1100
 Werkzeugschleifmaschinen 741
 Werkzeugschnittstellensysteme 435
 Werkzeugspannfutter 333
 Werkzeugspannsysteme 1064
 Werkzeugstahl 98
 Werkzeugsysteme von Drehmaschinen 207
 Werkzeugträger 286
 Werkzeugüberwachung 1108
 Werkzeug- und Formenbau 425
 Werkzeugwechsel 272, 385, 1094
 Werkzeugwechseleinrichtungen 1097
 Werkzeugwechsellhilfe bei Transferzentren 1100
 Werkzeugwechselsysteme 407, 273
 Werkzeugwechsler 824
 Winkelfräskopf 307
 Winkelhebelhalter 187
 Wirbeln 997, 1053
 Wirbelring 997
 Wirbelwerkzeug 1055
 Wirkarbeit 84, 85
 Wirk-Bezugssystem 74
 Wirkenergie 84
 Wirkleistung 85
 Wirkrichtungswinkel 73
 Wirtschaftlichkeit 845, 901
 Wolframlegierungen 1255
 Wolfram, Zerspanung 1253
 Wolframgetriebe 1344

Z

Zähigkeit 97
 Zahnflankenschleifen 665
 Zahnradaußenbearbeitung 900

Zahnradbohrung 832
 Zahnräder 832
 Zahnradgetriebe 935
 Zahnradherstellung 936
 Zahnradhonen 899
 Zahnradhonmaschine 899, 968
 Zahnradlappen 899
 Zahnradräummaschinen 954
 Zahnradschabmaschine 957
 Zeitspanfläche 735
 Zeitspannungsvolumen 1015
 Zeitsteuerung 859
 Zellensteuerung 118
 Zentrieren 183
 Zerspanbarkeit 1239
 von Nickellegierungen 1263
 von Titanlegierungen 1274
 Zerspankraft 81
 Zerspankraftkomponenten 159
 Zerspanleistung 160
 Zerspanprozess beim Bandschleifen 701
 Zerspantechnik 10
 Zerspantemperaturen 86
 Zerspanungskenngrößen 448
 Zerspanungskennwerte 868
 Zerspanungsprozess 682
 Ziehaußbohrwerkzeug 377
 Ziehschaben 521
 Ziehschleifen 816
 Zielkostenrechnung 46
 Zinsen 32
 Zinsfuß 57
 Zirkonkorund 677
 Zirkonoxid 1284
 Zirkular-Bohrgewindefräser 1050
 Zirkular-Gewindefräser 1051
 Zugfestigkeit von FVK 1242
 Zusatzeinrichtungen 304
 Zuschlagskalkulation 45
 differenzierende 38, 40
 einfache 38
 Zuschlagssätze
 Fertigungsgemeinkostenzuschlagssatz 40
 Materialgemeinkostenzuschlagssatz 40
 Vertriebsgemeinkostenzuschlagssatz 40
 Zustellkraft 864
 Zustelloptimierung 895
 Zustellsysteme 820, 893
 Zustellung 820, 853
 Zweisäulen-Schnellspanner 341
 Zweispieler 258
 Zyklonabscheider 799
 Zylo-Palloid-Verfahren 971
 Zyklus 139
 Zylinderbüchse 831
 Zylinder-/Globoidschnecke 995
 Zylinderlaufbahn 881, 886
 Zylinderräder 938