5.2 Varianten bei der Präzisionsbearbeitung sprödharter Werkstoffe

- Dr.-Ing. Carsten Rußner
  CeramTec AG
  Lauf a. d. Pegnitz

Die Folien finden Sie ab Seite 462.

5.2.1. Technologische Vererbung

Bei vielen technischen Anwendungen werden die geforderten Funktionalitäten des Werkstückes nur mit engen Toleranzen erreicht. Das Planseitenschleifen ist heute ein gängiges Fertigungsverfahren, um bei technischen Bauteilen den hohen Anforderungen an Genauigkeit, Ebenheitsfehler und Planparallelität gerecht zu werden. Für den Fall, dass beide Seiten bearbeitet werden müssen, wurden die Quer-Seiten-Doppelplanschleifmaschinen entwickelt, um eine kostengünstige Serienfertigung zu ermöglichen. Gerade die unterschiedlichen Fertigungsverfahren, das Schleifen nach dem „Prinzip Wendt" sowie das Quer-Seiten-Doppelplanschleifen mit Planetenkinematik (andere Benennungen sind Planschleifen mit Läppkinematik, Flachhonen oder Feinschleifen) stehen hier im Vordergrund. Untersuchungen über das einseitige Planseitenschleifen sind in der Literatur stark vertreten, während die Übertragung der Untersuchungen auf das reale Quer-Seiten-Doppelplanschleifen bisher nicht erfolgt ist. Weiterhin wurden bisher die technologischen Vererbungen in der Prozesskette Schleifen und Polieren nicht untersucht. Welche Einflüsse hat die Vorbearbeitung durch Schleifen auf einen optimal funktionierenden Polierprozess? Die Einflüsse der Vorbearbeitung sind in **Bild 1** zusammengefasst.

Bild 1: Technologische Vererbung in der Prozesskette Schleifen-Polieren

5.2.2. Seiten-Doppelplanschleifverfahren für Großserien

5.2.2.1. Technologie des Seiten-Planschleifens

Planschleifverfahren werden zum Erzeugen ebener Flächen eingesetzt. Das Umfangsplanschleifen ist durch hohe Flexibilität und durch

die Bearbeitungsmöglichkeit kleiner Losgrößen charakterisiert und sei hier nur der Vollständigkeit halber erwähnt. Insgesamt haben sich in der industriellen Großserienfertigung vier Seiten-Doppelplanschleifverfahren durchgesetzt. Die Gemeinsamkeiten dieser Verfahren sind:

- doppelseitiges Bearbeiten
- spannungsfreie Werkstückaufnahme in einer Halteraussparung
- Verkippen der Werkstückachse möglich
- Beschränkung auf ebene Funktionsflächen
- kurze Umrüstzeiten
- zyklische Änderung der Bearbeitungsbedingungen
- undefinierte Mikrokinematik bei Werkstückeigendrehung
- gleichmäßige Belastung der gesamten Funktionsfläche durch flächenhaften Eingriff der Diamantschneiden
- inhomogene Belastung der Schleifscheiben
- Wirkrichtung parallel zur Werkstückoberfläche

ZETTEL [Zet81] beschrieb 1981 drei mögliche Verfahrensvarianten des Seiten-Planschleifens, das „Längsschleifen mit und ohne Neigung der Topfscheibe“ (**Bild 2 a, b**) und das „Querschleifen“ beziehungsweise „Tauchschleifen“ (**Bild 2 d**).

Beim Seiten-Planschleifen steht die Schleifspindel senkrecht auf der zu bearbeitenden Fläche. Die Schleifmaschinen werden sowohl mit einer als auch mit zwei Spindeln hergestellt. Im Zwei-Spindelbetrieb können gleichzeitig zwei parallele Flächen eines Werkstückes bearbeitet werden, demzufolge wird die Leistungsfähigkeit stark erhöht. Die Vorschubbewegung der Werkstücke v_{fW}, die ungespannt in Halteeinrichtungen liegen, verläuft längs oder quer zu der Schnittgeschwindigkeit v_c [Zet81]. FUNCK, ARDELT und EGGER beschreiben ein weiteres Seiten-Doppelplanschleifverfahren (**Bild 2 c**), welches abgeleitet von den Läppmaschinen die Werkstückbewegung mittels Planetenkinematik erzeugt [Fun94; Ard01; Egg01].

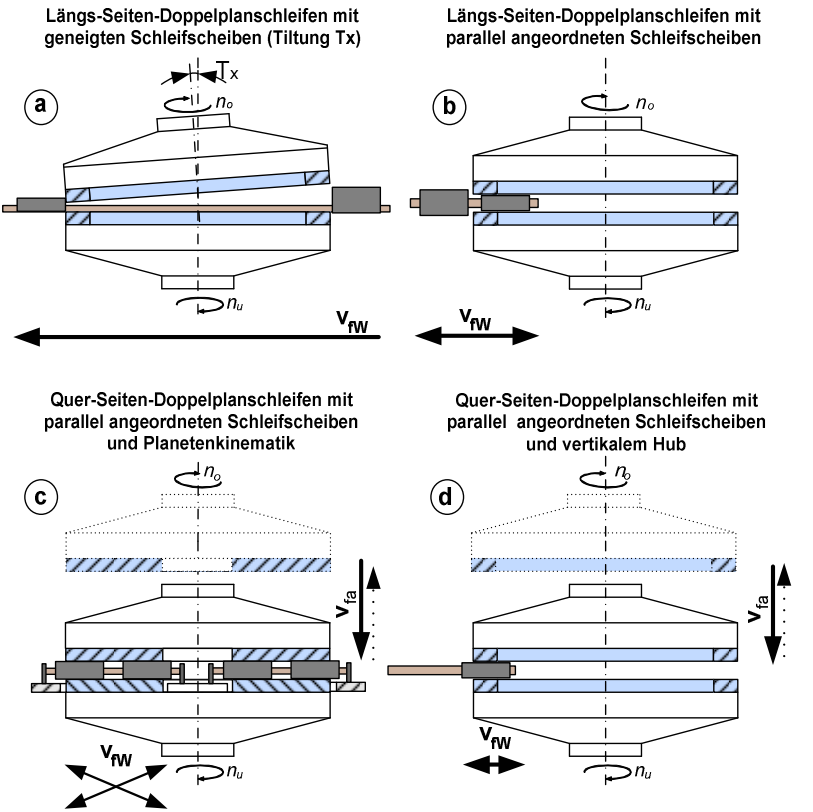


Bild 2: Seiten-Doppelplanschleifverfahren für den Großserieneinsatz

Grundlegende Arbeiten zum Planseitenschleifen stammen aus dem Jahr 1957 von KRUG und aus den Jahren 1977 bis 1992 von SALJÉ. Obwohl das Quer-Seiten-Doppelplanschleifen als hochproduktives Verfahren die industrielle Großserie sehr schnell erobert hat, liegen kaum wissenschaftliche Arbeiten zu dem Thema vor. Eine mögliche Ursache dafür liegt in dem schlechten Zugriff auf den Prozessraum zum Messen der Schleifkräfte. Je nach Verfahren werden die Werkstücke durch den gesamten Prozessraum bewegt, dies macht eine Anbringung von Kraftmesskomponenten schwierig [Kru57; Sal92].

Die experimentellen Untersuchungen der Maschineneinstellbedingungen des einseitigen Planseitenschleifens von KRUG zeigen auf, dass die Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n meistens deutlich höher ist als die Schnittkraft F_c. Keine Rolle hingegen spielt die erheblich geringere radiale Kraftkomponente F_r. Durch Vergrößerung des Vorschubes f_a wachsen die axialen und tangentialen Kraftkomponenten progressiv an, während sich die axiale Vorschubgeschwindigkeit v_{fa} linear auswirkt. Die Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit v_c verringert die Schnittkraft F_c [Kru57].

Die Annäherung von SALJÉ an das Planseitenschleifen erfolgte durch theoretische Überlegungen zum Längs-Seiten-Doppelplanschleifen mit parallel angeordneten Schleifscheiben (**Bild 2 b**). Die unterschiedlichen Kontaktflächen beim Seiten- und Umfangsschleifen führen zu verschiedenen Prozessabläufen. Solange mit einer ideal scharfkantigen Schleifscheibe gearbeitet wird, handelt es sich um einen Umfangsschleifprozess. Erst aufgrund der unter realen Arbeitsbedingungen schnell eintretenden Kantenverrundung durch Verschleiß der Schleifscheibe kann der Prozess als Seitenschleifprozess definiert werden. Über die auftretenden Kräfte ist es möglich, eindeutig zwischen den beiden Prozessarten zu unterscheiden. Die Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n beim Planumfangsschleifen mit geraden Scheiben ist im allgemeinen Null. Es findet sich nur ein orthogonales Kräftesystem. Beim Planseitenschleifen existiert ein dreiachsiges Kräftesystem mit Kontaktflächen auf der Schleifscheibe sowohl am Umfang als auch an der Stirnseite.

Weitere Einflussparameter nach SALJÉ auf das Zeitspanungsvolumen Q_W und die Schleifkräfte F des Seitenschleifprozesses sind die Form der Werkstücke sowie der so genannte Überlauf $l_ü$. Der Überlauf definiert sich aus der Einbringung der Werkstücke in den Prozessraum während des Bearbeitungszeitraumes und der sich damit verändernden Eingriffsflächen zwischen Schleifscheibe und Werkstück [Sal90].

5.2.2.2. Quer-Seiten-Doppelplanschleifen „Prinzip Wendt“

Das Quer-Seiten-Doppelplanschleifen mit dem Funktionsprinzip des Herstellers Wendt **(Bild 2 d)** ist trotz seiner weltweiten Verbreitung wissenschaftlich kaum erforscht. Insgesamt wurden von der Firma WENDT seit dem Produktionsbeginn im Jahr 1977 weltweit 360 Maschinen verkauft, von denen Ende 2003 noch 355 in Betrieb sind

[Per03]. Die einzige dem Verfasser bekannte wissenschaftliche Veröffentlichung stammt aus dem Jahr 1981 von ZETTEL, der die konstruktiven und schleiftechnischen Unterschiede gegenüber den konventionellen Querschleifverfahren analysierte [Zet81].

5.2.2.3. Der Schleifprozess des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens „Prinzip Wendt“

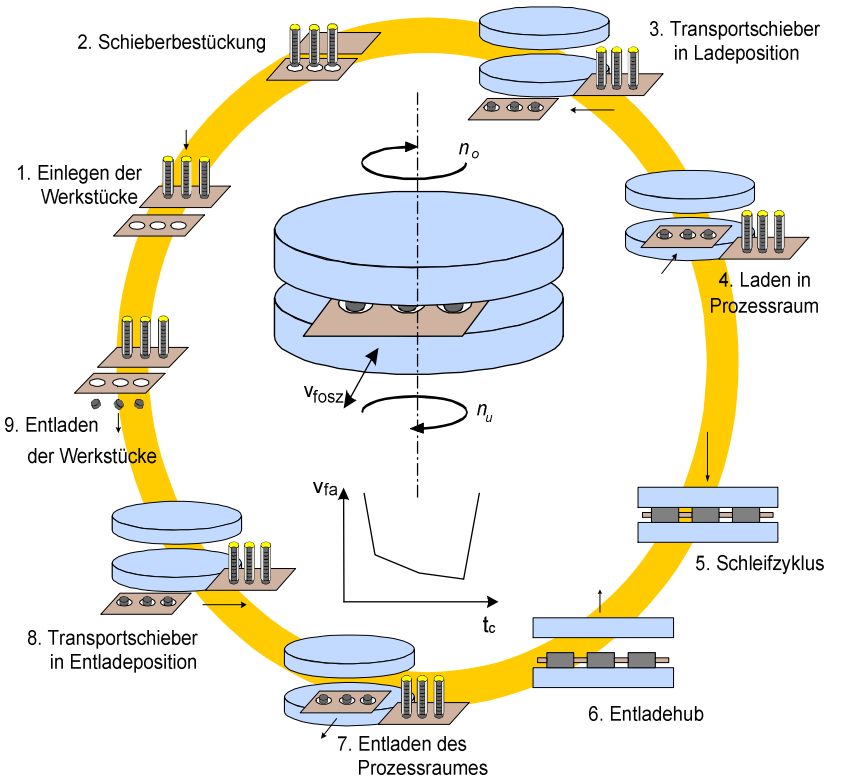


Bild 3: Doppelseitenquerplanschleifen nach dem Prinzip des Herstellers Wendt

Als Besonderheit sind beim Doppelseitenquerplanschleifen die Schneiden der Schleifscheibe auf der gesamten Werkstückfunktionsfläche im Eingriff, wodurch ein hohes Zeitspanungsvolumen ermöglicht wird. Bei einer typischen vollautomatisierten Maschine mit diesem

Schleifverfahren werden die Werkstücke wie in **Bild 3** über Plattenschieber zwischen das geöffnete und mit einer Schnittgeschwindigkeit v_c gegensätzlich drehende Scheibenpaar (obere und untere Schleifscheibe) eingebracht. Beim Erreichen der Schleifscheibenkante setzt die axiale Vorschubgeschwindigkeit v_{fa} der oberen Schleifspindel ein. Während des Arbeitsvorgangs werden die Teile mit einer Oszillationsgeschwindigkeit v_{osz} des Schiebers über den gesamten Schleifscheibenbelag hin- und herbewegt. Ist das eingestellte Sollmaß erreicht, werden die Teile bei einem niedrigen Schleifdruck aus dem Schleifraum entnommen.

5.2.2.4. Einfluss der Oszillationsbewegung

Die Einstellung der Oszillationsbewegung im Schleifprozess Doppelseitenquerplanschleifen ist für das Produktionsergebnis bezüglich der Prozesszeitverkürzung, des Schleifscheibenverschleißes, der erzielten Oberfläche und Ebenheit am Werkstück von entscheidender Bedeutung. Die an der Maschine eingestellten Oszillationswege und Geschwindigkeiten beruhten bisher zumeist auf Erfahrungswerten der Maschinenhersteller und Anwender. Deshalb wurde das Zusammenspiel der Schnittgeschwindigkeit v_c, axialer Vorschubgeschwindigkeit v_{fa} sowie Oszillationsgeschwindigkeit v_{osz} und die im Prozessraum auftretenden Kraftkomponenten, insbesondere F_n, während des Schleifvorgangs aufgezeichnet.

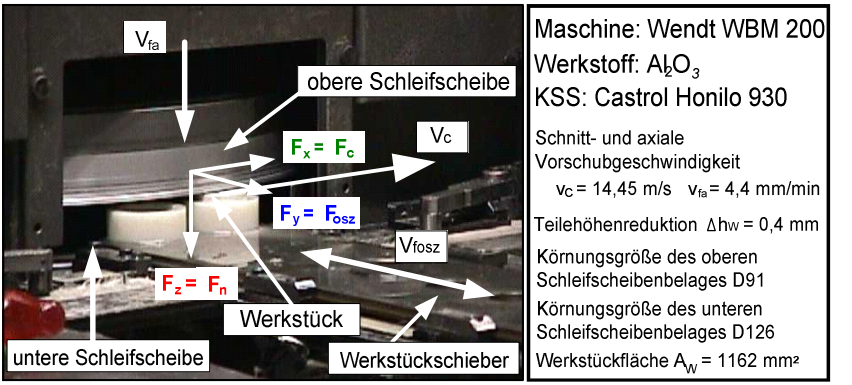


Bild 4: Kinematik und Prozesskräfte im Prozess Quer-Seiten-Doppelplanschleifen „Prinzip Wendt“

Bild 5 zeigt den Verlauf der Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n synchron zum Oszillationsweg s_{osz}. Es wird deutlich, dass der ansteigenden Kraftkomponente F_n eine Schwingung überlagert ist, die auf die Werkstückoszillation zurückzuführen ist. Die Frequenz der Normalkraftschwankung ist die doppelte Oszillationsfrequenz.

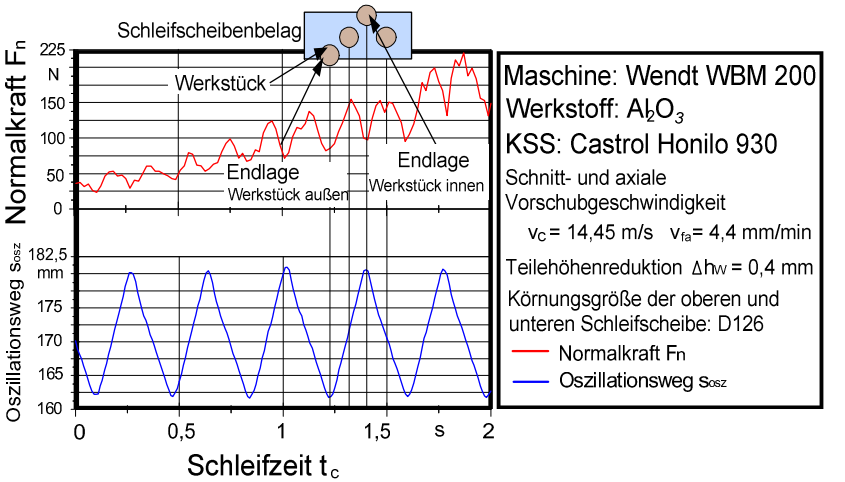


Bild 5: Einfluss des Oszillationsweges s_{osz} auf die Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n im Prozess Quer-Seiten-Doppelplanschleifen „Prinzip Wendt“

An den jeweiligen Umkehrpunkten der Oszillationsbewegung befindet sich ein relatives Minimum der Werkstückfläche im Kontaktbereich zwischen den Schleifscheibenbelägen. Grund hierfür ist die Oszillation der Werkstücke über die Belagbreite der Schleifscheibe hinaus. In den beiden äußeren Endlagen liegen noch etwa 80 Prozent der Werkstückfläche A_W auf dem Schleifscheibenbelag auf. Sobald das Werkstück die gesamte Schleifscheiben-belagsbreite von b_s = 40 mm überdeckt und sich in der Mittelstellung befindet, erreicht die Kraft ein relatives Maximum.

5.2.3. Planschleifen mit Planetenkinematik

5.2.3.1. Technologie

Die älteste Aufzeichnung des Verfahrens Planschleifen mit Planetenkinematik geht auf das Jahr 1932 zurück. In einem Übersichtsband des Ausschusses für wirtschaftliche Fertigung AWF ist eine Zweiseitenläppmaschine dargestellt, auf der auch Schleifscheiben feinster Körnung eingesetzt werden können. Schon damals war bekannt, dass gegenüber dem Läppen eine Leistungssteigerung bis zu 400 Prozent bei schlechteren Genauigkeiten erreicht wird. Zum genauen gleichzeitigen planparallelen Abrichten der beiden Schleifscheiben ist eine besondere Diamantabdrehvorrichtung vorgesehen [Ard01]. Die nächste geschichtliche Erwähnung des Verfahrens stammt aus den fünfziger Jahren von LÄTZIG [Lät50], welcher erstmalig die Unterscheidungsmerkmale zwischen dem Planschleifen mit Planetenkinematik und dem Planparallelläppen definiert.

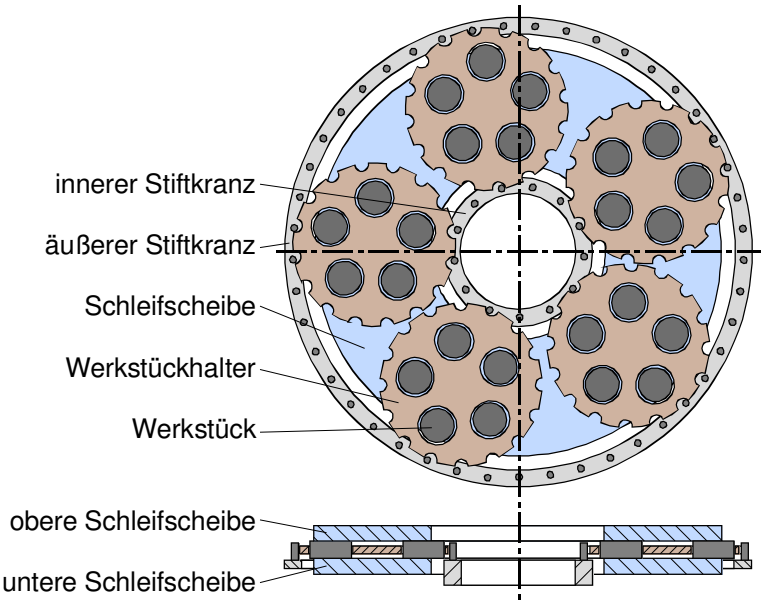


Bild 6: Schematische Darstellung des Arbeitsraumes beim Planschleifen mit Planetenkinematik [Ard01]

Das Planschleifen mit Planetenkinematik weist dem Planparallelläppen gegenüber höhere Relativgeschwindigkeiten auf und wird unter Verwendung von Kühlschmierstoff betrieben. Die Relativbewegung zwischen den drei Wirkpartnern untere Schleifscheibe, Werkstücke und obere Schleifscheibe wird durch Drehbewegungen der Scheiben und des Stiftkranzes realisiert. Den prinzipiellen Aufbau zeigt **Bild 6**. Planschleifen mit Planetenkinematik wird seit 1932 angewandt. Der Durchbruch kam jedoch erst 1996 mit Einführung einer neuen angepassten Baureihe der Firma Peter Wolters GmbH, Rendsburg. Seitdem sind insgesamt 259 Maschinen der Firma Peter Wolters GmbH, Rendsburg, 50 von der Firma Melchiorre GmbH, Mailand und 60 von der Firma Stähli AG, Pieterlen sowie etwa 40 Umrüstungen von Läppmaschinen auf dem weltweiten Markt eingeführt worden [Per03].

Nach CLAR [Cla82] wurden 1982 kunstharzgebundene Siliziumcarbidschleifscheiben eingesetzt und damit kürzere Bearbeitungszeiten, jedoch schlechtere Oberflächengüten erzielt. BLUM [Blu87] erreichte 1987 dem Läppen vergleichbare qualitative Ergebnisse. Als wichtigste Einflussfaktoren für die Arbeitsgenauigkeit wurden die Wahl des Kühlschmierstoffes, die Temperierung der Schleifscheiben sowie die Werkzeugspezifikation festgestellt. Hohe Schleifdrücke üben nach WEBER einen negativen Einfluss auf die Formgenauigkeit aus [Web89].

SPUR und FUNCK stellten fest, dass die Kantenverrundung der Werkstücke auf die elastische Verformung der Schleifscheiben zurückzuführen ist. Weiterhin erläuterte FUNCK den Zusammenhang zwischen Zeitspanungsvolumen und kinematischen Prozessparametern. Ein hohes Zeitspanungsvolumen Q_W führt zu höheren Ebenheitsfehlern f_E [Ard01, Fun94, Spu95c].

JANSSEN [Jan96] konzipierte 1996 eine komplett neue Läppmaschine für die Schleifbearbeitung mit verbesserter Steifigkeit des Gestelles. Er ersetzte die bisherigen C-Gestelle durch Portalbauweise. Weiterhin trieb er die Halter nicht mehr über die Triebstockverzahnung sondern über eine Evolventenverzahnung mit deutlich verbesserter Laufruhe an.

5.2.3.1.1. Kinematik

Das Planschleifen mit Planetenkinematik wurde aus dem doppelseitigen Planläppen entwickelt und ist durch das gleiche kinematische Prinzip gekennzeichnet. Daher lassen sich die Begriffe zur Beschreibung der Kinematik übertragen. Die effektive Relativbewegung zwischen einer Schleifscheibe und den Werkstücken entsteht durch die Überlagerung zweier Drehbewegungen, einerseits das Abrollen des Werkstückhalters in der Triebstockverzahnung und andererseits die Rotation der Schleifscheiben. Zur Betrachtung der Relativbewegungen der Werkstücke auf den Schleifscheiben kann das vergleichbare kinematische Prinzip des Planetenrad-Umlaufgetriebes herangezogen werden (**Bild 7**). Eine Hypozykloide entsteht durch das Abrollen an der Innenseite des Wälzkreises, die Epizykloide durch Abrollen an der Außenseite [Gel77]. Je nach Abstand des betrachteten Punktes vom Wälzzentrum entstehen gestreckte, gewöhnliche, oder verschlungene Zykloiden sowie Sonderformen davon, dargestellt in **Bild 7** [Ard01].

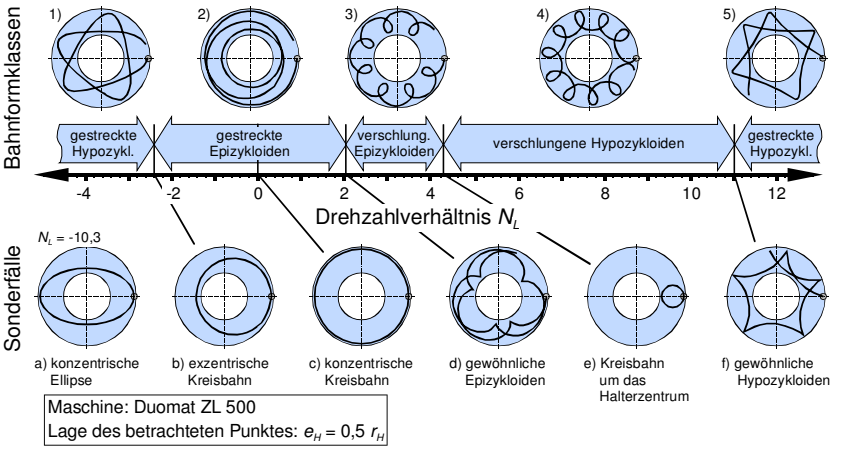


Bild 7: Bahnformklassen und ihre Sonderfälle beim Planschleifen mit Planetenkinematik [Ard01]

ARDELT beschreibt erstmalig die wichtigsten Prozessschritte für das Planschleifen mit Planetenkinematik. Die Prozessschritte sind teilweise identisch mit denen des Planparallelläppens [Ard01, Sab91, Eng97]. Den Schwerpunkt der Forschungsarbeit von ARDELT bilden Untersuchungen bezüglich der in **Bild 7** dargestellten Bewegungsformen der Planetenkinematik. Die Kinematik des Verfahrens beinhaltet bisher ungenutzte Potenziale zur Steigerung der Arbeitsqualität und

der Wirtschaftlichkeit. Die Art der Relativbewegungen zwischen Werkstücken und Schleifscheiben wirkt sich nicht nur auf den Verschleiß der Werkzeuge und somit indirekt auf die Formgenauigkeit der hergestellten Funktionsflächen aus. Sie besitzt vielmehr einen direkten Einfluss auf das Zeitspanungsvolumen und die Antriebsmomente von Schleifscheiben und innerem Stiftkranz. Da die Verfahrenskinematik von einer Vielzahl geometrischer Parameter beeinflusst wird und die Bandbreite der kinematischen Einstellungen unendlich groß ist, lassen sich diese Zusammenhänge mit einer rein empirischen Vorgehensweise nicht allgemeingültig erfassen. Die Auswirkungen der Relativbewegungen auf den Prozessverlauf und das Arbeitsergebnis wurden von ARDELT sowohl analytisch simuliert als auch experimentell nachgewiesen. Zusätzlich wurde von ARDELT der Einfluss der kinematischen Prozessparameter auf die Bearbeitung sowie auf die Prozessoptimierung erfasst [Ard01].

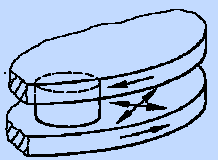
5.2.3.1.2. Eigenschaften des Verfahrens

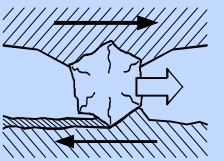
Die Firma Peter Wolters GmbH, Rendsburg, beschrieb 1993 erstmals das Verfahren mit Ergebnissen aus der Produktion. Die Zerspanung erfolgt etwa drei- bis fünfmal schneller als beim Läppen. Die qualitativ hochwertigen keramisch gebundenen Schleifscheiben sind extrem teuer und verschleißen schneller als Läppscheiben [Wol93]. Ardelt fasst die charakteristischen Eigenschaften des Verfahrens in **Bild 8** zusammen [Ard01].

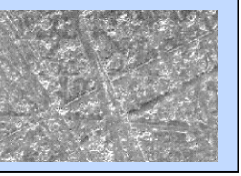
Durch den erhöhten Verschleiß ergeben sich Ungenauigkeiten der Werkstücke. Das Planschleifen mit Planetenkinematik erfordert deutlich höhere Anpressdrücke als das Läppen. Die Planparallelität und Oberflächengüte ist sehr gut. Bekannte Probleme hingegen sind der Abtransport der Späne von den großflächigen Schleifscheiben und damit das Zusetzen der Spanräume. Diese Eigenart bedingt verfahrenstechnische Feinheiten wie kurzen Trockenschliff durch Abschaltung des Kühlmediums oder Hinzugeben von freien abrasiven Körnern in den Prozess zum Konditionieren der Schleifscheiben. Der dabei ansteigende Ebenheitsfehler f_E der Schleifscheiben zieht eine Verschlechterung der Genauigkeit der Werkstücke nach sich. Bei der Großserienproduktion von gehärtetem Stahl konnte ein Schleifscheibenverschleiß im µm-Bereich festgestellt werden. Weiterhin wurden 250 µm-Abschliffe in etwa sieben bis acht Minuten bei einer Genauigkeit der Höhe von ± 2,5 µm bewältigt. Die Nachteile dieses Großserienverfahrens sind der relativ hohe Kostenanteil für die Schleif-

scheiben, ein Werkstück-Schleifscheibenflächenverhältnis, welches die Kapazität beschränkt, sowie die extrem lange Schärfzeit der Schleifscheiben von 20 Minuten. Erst mit der Neuentwicklung von keramisch gebundenen Pelletschleifscheiben, welche zum Zerspanen von sprödharten Werkstoffen unter anderem mit dem Schleifmittel Diamant hergestellt wurden, konnten als Verbesserungen eine Maßgenauigkeit von ± 1,5 µm sowie länger konstante Prozessbedingungen bei 30 Prozent niedrigeren Drücken unter Reduktion der Nachschärfzeiten auf eine Minute erreicht werden [Wol93, Wol97, Wol99].

Charakteristische Eigenschaften des Planschleifens mit Planetenkinematik







Maschinenaufbau	Prozesstechnologie	Arbeitsergebnis
- nichtstetige, chargenweise Bearbeitung der Bauteile - spannungsfreie Aufnahme der Werkstücke in einer Halteraussparung - Selbstkorrektur durch pendelnd gelagerte obere Schleifscheibe - kraftgebundener Vorschub, Zeitspanungsvolumen nicht vorgegeben - preiswerte Vorrichtungen für unterschiedliche Werkstücke - kurze Umrüstzeiten - Beschränkung auf ebene Funktionsflächen	- zyklische Änderung der Bearbeitungsbedingungen durch Planetenkinematik - undefinierte Mikrokinematik bei Werkstück-Eigendrehung - gleichmäßige Belastung der gesamten Funktionsflächen durch flächenhaften Eingriff - Wirkrichtung parallel zur Werkstückoberfläche - vergleichsweise geringe Schnittgeschwindigkeiten und Schleifdrücke, daher geringe Temperaturen - inhomogene Belastung der Schleifscheiben	- undefiniert gebogene, sich überlagernde Bearbeitungsspuren - sehr gute Oberflächengüten und Formgenauigkeiten - Verbesserung der Formgenauigkeit gegenüber dem Ausgangszustand möglich - Verminderung der Höhenstreuung der Werkstücke möglich - Ausrichtung von Funktions- zur Mantelfläche nicht möglich - schwankende Verteilung des Aufmasses auf Ober- und Unterseite der Werkstücke

Quellen: Ard99, Blu80, Fun94, Kön96, Sim88, Stä98, Tön98b, Uhl99a, Uhl99b

Bild 8: Eigenschaften des Planschleifens mit Planetenkinematik [Ard01]

Die Untersuchungen von EGGER zeigen, dass nach dem Abrichten der Diamantschleifscheiben die Schnittleistung P_c deutlich abfällt. Durch eine angepasste Belastung des Werkzeuges kann bei der Bearbeitung von Al_2O_3 ein konstantes Zeitspanungsvolumen Q_W über eine längere Prozessdauer hinweg erreicht werden. Der Verlauf der Oberflächengüte ist weitgehend dem des Zeitspanungsvolumens Q_W angepasst. Die

Kühlschmierstoffmenge ermöglicht mit zunehmendem Durchfluss größere Schnittleistungen P_c und begünstigt einen stationären Prozessverlauf. Gleichzeitig wird der Verschleiß der Schleifscheiben reduziert. Dagegen können wassermischbare Prozessmedien den Verschleiß der Körner sowie Zusetzungen der Spanräume nicht verhindern [Egg01].

ARDELT beschreibt den Unterschied der Kühlschmierstoffart bezogen auf die Antriebsmomente und das flächenbezogene Zeitspanungsvolumen Q''_W. Die Antriebsmomente der kunstharzgebundenen Schleifscheiben liegen unter Verwendung von Öl mit 12 bis 15 Nm mehr als doppelt so hoch als beim Schleifen mit Lösung. Hierbei ist mit Öl ein etwa sechsmal höheres flächenbezogenes Zeitspanungsvolumen Q''_W erreichbar [Ard01].

EGGER bearbeitete Werkstücke aus Aluminiumoxid mit keramisch gebundenen Schleifscheiben der Körnung D20/D30 und D91 sowie mit kunstharzgebundenen Scheiben der Körnung D107. Die Variation des Eingriffsdruckes p_e von 0,04 auf 0,18 N/mm² führte zu einer nahezu linearen Erhöhung der bezogenen Schnittkraft F_c. Die Erklärung hierfür liegt in der Korneindringtiefe in den Werkstoff, welche höhere Kräfte zur Materialtrennung erfordert. Bei den Schleifscheiben mit der kleineren Körnungsgröße traten deutlich geringere Kräfte auf. Aufgrund der elastischeren Eigenschaften der Kunststoffbindung fielen die Zeitspanungsvolumina geringer aus und die Schnittleistungen konnten nicht über einen Eingriffsdruck p_e von 0,12 N/mm² gesteigert werden. Der Eingriffsdruck p_e besitzt weiterhin nur geringfügige Auswirkungen auf die Werkstückrauheit [Egg01].

Schleifscheiben mit ausreichendem Kornüberstand ermöglichen bei Steigerung der Bahngeschwindigkeit zunächst eine Erhöhung des Zeitspanungsvolumens Q_W. Eingeschränkt wird diese Steigerung nur durch das Schmiermedium, welches bei höherer Viskosität die Ausbildung eines hydrodynamischen Schmierfilmes fördert. Das Einsetzen von gröberen Schleifkörnungen verschiebt diese Gesetzmäßigkeit in Richtung höherer Zeitspanungsvolumina Q_W. Auf das Verschleißverhalten haben höhere Bahngeschwindigkeiten einen negativen Einfluss, während die Oberflächenqualität positiv verändert wird [Egg01].

Als weitere Einflussparameter wurden von EGGER die Schleifscheibenbindung, die Nutung sowie die Konditionierung, die Prozessführung und die Werkstückgeometrie genannt. Bei Werkzeugen mit Nutung reduzieren sich die Schnittleistungen P_c langsamer, der Ver-

schleiß steigt jedoch schneller an. Wichtig bei der Prozessführung ist der kinematische Faktor *K*, der die Bahnform der Werkstücke über der Schleifscheibe beschreibt. Die größten Ebenheitsfehler f_E entstehen bei einem *K*-Faktor von 0,5 (gestreckte Epizykloiden), während die anderen Bahnformen zu niedrigeren Formfehlern führen. Die Werkstückgeometrie hat einen erkennbaren Einfluss auf das Zeitspanungsvolumen Q_W. So steigt das Zeitspanungsvolumen Q_W an, wenn die Summe der zu schleifenden Werkstückflächen aus einer Vielzahl von kleinen Werkstücken besteht anstatt aus wenigen größeren Werkstücken. EGGER vermutet einen Einfluss der Gesamtlänge der Außenkanten in Bezug auf die Elastizität der Kunstharzbindung. Ein kleines Werkstück wird an der Umfangskante deutlich stärker in die Bindung gedrückt, wodurch größere Spanungsdicken entstehen [Egg01].

ARDELT stellte in seinen Untersuchungen fest, dass hochwertige Werkstückqualitäten im Zusammenhang mit niedrigen Zeitspanungsvolumina auftreten. Aus diesem Grund werden beim Planschleifen mit Planetenkinematik mehrstufige Prozesse empfohlen. Die Schruppbearbeitung erfolgt zur Reduzierung der Hauptzeiten t_h und der Schlichtprozess mit niedrigem Zeitspanungsvolumen Q_W zur Verbesserung der Werkstückqualität [Ard01].

Tabelle 1 zeigt die qualitativen Zusammenhänge eines Einstellparameters mit Prozess- und Zielgrößen nach ARDELT. Einen grundlegenden Einfluss auf die Zerspanung übt die Auswahl der geeigneten Schleifscheiben und des Kühlschmiermittels aus. Die Erhöhung der mittleren Bahngeschwindigkeit steigert bei gleich bleibenden physikalischen Zerspanungsbedingungen am Einzelkorn das Zeitspanungsvolumen. Die Selbstschärfung der Schleifscheiben kann erfolgreich über den Schleifdruck *p* gesteuert werden. Größere Chargen (höhere Belegung B) sind vorteilhafter zu bearbeiten, solange die Zerspanprodukte aus der Wirkzone noch abtransportiert werden können. Das Drehzahlverhältnis stellt einen Bearbeitungsparameter dar, durch welchen die summarische Belastung der Schleifscheiben und damit die Zeitspanungsvolumina Q_W sowie die Antriebsmomente direkt beeinflusst werden können [Ard01].

++ nimmt stark zu
+ nimmt zu
o kein Einfluss
- nimmt ab
-- nimmt stark ab

!! deutlicher Einfluss, nicht linear quantifizierbar

			Prozessgrößen		Zielgrößen			
			Antriebsmoment	flächenbezogenes Zeitspanungsvolumen	arithmetischer Mittenrauwert	Ebenheitsfehler	Höhenstreuung	Schleifverhältnis
			M_u	Q''_w	R_a	f_E	S_{h_w}	G
Einstellparameter	Kühlschmierstoff	KSS	!!	!!	!			
	mittlere Diamantkörnungsgröße	D	+	+	+	o		!!
	mittlere Bahngeschwindigkeit	v_{mit}	++	++	+	o		
	Schleifdruck	p	++	++	-	++	++	
	Belegung	B	++	o	-	--	-	
	Drehzahlverhältnis	N_L	!!	!!	!!	!!		

Tabelle 1: Qualitative Auswirkungen der Einstellparameter auf Prozess- und Zielgrößen beim Quer-Seiten-Doppelplanschleifen mit Planetenkinematik [Ard01]

5.2.3.1.3. Anwendungen

Prinzipiell können auf den Quer-Seiten-Doppelplanschleifmaschinen alle Werkstücke mit zwei planparallelen Funktionsflächen bearbeitet werden. Aufgrund der großen Schleifscheibendurchmesser und -flächen sind im Gegensatz zu den beiden anderen Verfahren deutlich größere Werkstücke schleifbar [Ard01].

Die nutzbare Belagbreite der Schleifmaschinen kann zwischen 120 mm bis über 500 mm liegen. Wichtig hierbei ist, dass durch min-

destens drei gleichmäßig verteilte Halter im Prozessraum eine statisch bestimmte Auflage erreicht wird. Um eine stabile Bewegung zu gewährleisten, sollte die Werkstückhöhe den Durchmesser des Werkstückes nicht wesentlich überschreiten.

5.2.3.2. Quer-Seiten-Doppelplanschleifen Funktionsprinzip „Diskus“

5.2.3.2.1. Technologie

SALJÉ und HEIDENFELDER untersuchten das gleichzeitige Schleifen zweier Planflächen auf einer Seiten-Doppelplanschleifmaschine Modell DDS 900 PL IV der Firma Diskus AG, Dietzenbach [Sal84].

5.2.3.2.1.1. Prozessablauf

Beim Längs-Seiten-Doppelplanschleifen wird das Werkstück bei der Zweispindel-Ausführung der Schleifmaschine mittels eines Durchlaufverfahrens (Käfig) oder von mehreren Seiten (Schieber) zwischen den Schleifscheiben durchgeführt oder eingeschoben. Dabei führt das Werkstück die Vorschubbewegung aus. In der ersten Verfahrensvariante steht die Topfscheibe leicht geneigt zur unteren Schleifscheibe (Tiltung), das Endmaß wird durch den Winkel der oberen Scheibe bestimmt und die Werkstücke in einer Kreisbahn kontinuierlich über die Schleifscheiben geführt (**Bild 2 a**). Im Unterschied dazu steht in der zweiten Variante die obere Topfscheibe parallel zur unteren Schleifscheibe, der Abstand zwischen oberem und unterem Schleifbelag bedingt das Endmaß (**Bild 2 b**). Die Vorteile bei der ersten Variante liegen hauptsächlich in der hohen Mengenleistung durch den kontinuierlichen Werkstückdurchlauf, während diese bei der zweiten Variante durch den diskontinuierlichen Betrieb mittels abwechselnder Schieberzuführungen geringer ausfällt. Längs-Seiten-Doppelplanschleifen mit Neigung der Topfscheibe fordert dabei allerdings eine wesentlich größere Schleifscheibenbreite. Dies ist gerade bei der Bearbeitung von harten Werkstoffen mittels Diamant- oder CBN-Schleifscheiben ein sehr großer Kostenfaktor. Weitere Nachteile der beiden Verfahren liegen in der Begrenzung des Aufmasses auf etwa 0,4 mm bei der Variante mit Neigung und bis etwa 0,7 mm (bei Hartmetallen) bei senkrechter Stellung der oberen Scheibe [Zet81].

5.2.3.2.1.2. Eigenschaften des Verfahrens

Beim Längs-Seiten-Doppelplanschleifen mit getilteten Schleifscheiben wird das Werkstück durch die Werkstückvorschubgeschwindigkeit v_{fW} in die untere Schleifscheibe gedrückt, bis ein Kräftegleichgewicht erreicht ist. Hierbei muss jedoch das Werkstück nicht mehr parallel zur unteren Schleifscheibenoberfläche liegen, sondern bildet einen beliebigen Winkel mit der Drehachse. Somit entsteht in der Fertigteilkontur eine schiefwinklige Lage zur Werkstücklängsachse des Rohteils. Der Abschliff am Werkstück verteilt sich bei gleicher Scheibenspezifikation je zur Hälfte auf beide Scheiben. Das Eigengewicht des Werkstückes kann hierbei vernachlässigt werden. Haupteinflussparameter bezüglich des Schleifergebnisses sind die Tiltung der Schleifscheibe, die Überlaufwege und die Lage der axialen Vorschubpunkte. Der technologisch günstigste Schleifprozess ist bei einem gleich häufigen Überschleifen eines jeden Werkstückelementes zu finden. Die Werkstückbreite bestimmt durch die geringere Belastung der Einzelschneide das Schleifergebnis [Sal84].

Das Zeitspanungsvolumen sollte durch hohe tangentiale Vorschubgeschwindigkeiten sowie niedrige axiale Vorschübe erreicht werden. Somit entstehen Werkstücke mit geringeren Planparallelitätsabweichungen f_k und niedrigeren Randzoneneinflüssen. Eine Kostenbetrachtung für das Schruppen zeigte, dass die Fertigungseinzelkosten nahezu ausschließlich durch den Zeitfaktor beeinflusst werden, während die Werkzeugkosten vernachlässigbar klein bleiben [Sal84].

WESTKÄMPER, HOFFMEISTER und MARKSCHAT stellten bei Untersuchungen zur Tiltung fest, dass eine negative Tiltung der Vorwegnahme eines Profilverschleißes entspricht. Beim Schleifen mit positiver oder ohne Tiltung ist zunächst die Umfangsfläche der Schleifscheiben für die Materialzerspanung zuständig. Aufgrund des hohen Verschleißes entsteht an der Einlaufkante mit zunehmendem Zerspanungsvolumen ein keilförmiges Schleifscheibenprofil, welches dem Ausgangsprofil beim Schleifen mit negativer Tiltung entspricht [Wes95].

5.2.3.2.2. Anwendungen

Das Quer-Seiten-Doppelplanschleifen nach dem Prinzip Diskus hat gegenüber den anderen Verfahren einen entscheidenden Vorteil zur Bearbeitung von Werkstücken. Durch eine horizontale Anordnung der Werkzeugspindel (**Bild 9**) können im Durchlaufverfahren Werkstücke mit einer vielfachen Höhe des Durchmessers geschliffen werden.

Bild 9: Diskusschleifmaschine mit horizontaler Lage der Werkzeugspindeln [Dis03]

5.2.3.3. Ausblick

Die Produktivität des Quer-Seiten-Doppelplanschleifprozesses ist der Hauptgrund für die Durchsetzung dieses Verfahrens in der Großserienproduktion von keramischen Dichtscheiben. Die Betrachtung der untersuchten Prozesskette zeigte die Auswirkungen der Eingangskenngrößen und deren Einfluss auf den nachfolgenden Prozess.

Der vorhandene Schleifprozess ist durch hohe Wirtschaftlichkeit gekennzeichnet, jedoch sind die erreichten Ergebnisse nicht ganz zufrieden stellend. Die hohen Kosten des Poliervorganges für Dichtscheiben zieht die Notwendigkeit der Abstimmung des wirtschaftlichen Zieles innerhalb der Prozesskette auf die Optimierung des Polierprozesses nach sich. Da im Polierprozess eine höhere Zahl von Werkstücken in einem Arbeitsgang bearbeitet wurde, konnte der Höhenstreuung des vorherigen Schleifprozesses neben dem Ebenheitsfehler und der Rauheit ein maßgeblicher Einfluss zugeordnet werden. Aufgrund der besseren Schleifergebnisse bezüglich des Ebenheitsfehlers f_E und der Werkstückhöhenstreuung innerhalb einer Großserie zeigte ein durch Quer-Seiten-Doppelplanschleifen mit Planetenkinematik bearbeitetes Werkstück deutliche Verkürzungen der Hauptzeiten unter Verbesserung der polierten Qualität im Superfinish. Die zeitbezogene Teilehöhenreduktion des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens mit Planetenkinematik ist zwar um den Faktor zehn niedriger als beim Quer-Seiten-Doppelplanschleifen „Prinzip Wendt", jedoch können aufgrund der größeren Schleifscheibenflächen deutlich mehr Werkstücke je Zyklus bearbeitet werden. Durch die dadurch in Summe reduzierten Nebenzeiten je Werkstück ist das Quer-Seiten-Doppelplanschleifen mit Planetenkinematik wirtschaftlicher.

5.2.3.4. Abkürzungen

Al_2O_3	Aluminiumoxid

5.2.3.5. Lateinische Formelzeichen

a	mm	Abstand zweier Spiralbahnen
A_S	mm^2	Fläche des Schleifscheibenbelages
A_{So}	mm^2	Fläche des Schleifscheibenbelages der oberen Schleifscheibe
A_{Su}	mm^2	Fläche des Schleifscheibenbelages der unteren Schleifscheibe
A_W	mm^2	Werkstückfläche
A_{Wo}	mm^2	Fläche der Werkstückoberseite
A_{Wu}	mm^2	Fläche der Werkstückunterseite
B	%	Belegungsfaktor
B_{WS}	%	Überdeckungsgrad
b_S	mm	Schleifscheibenbelagsbreite
f_a	µm	Vorschub quer zur Werkstückoberfläche
F_c	N	Schnittkraft
F_n	N	Schleifnormalkraft in axialer Richtung auf dem Werkstück
F_{no}	N	Schleifnormalkraft in axialer Richtung auf der Werkstückoberseite
F_{nu}	N	Schleifnormalkraft in axialer Richtung auf der Werkstückunterseite
Δh_W	mm	Teilehöhenreduktion, Aufmass
i_{osz}		Anzahl Oszillationshübe
$l_ü$	mm	Überlauf
l_v	mm	Sicherheitshöhe
n_o	min^{-1}	Drehzahl der oberen Schleifscheibe
n_u	min^{-1}	Drehzahl der unteren Schleifscheibe
q_W		Abschliffverhältnis
q_{Wtat}		tatsächlich gemessenes Abschliffverhältnis
Q_W	mm^3/s	Zeitspanungsvolumen

Q''_W	mm³/(mm²·s)	bezogenes Zeitspanungsvolumen auf die Schleifscheibenbelagfläche
$r(t)$	mm	Abstand eines Werkstückes vom Schleifscheibenmittelpunkt
r_{Sa}	mm	Außenradius des Schleifscheibenbelages
s_{21}	m	Bahnlänge
s_{0P}	mm	Bogenlänge
s_{osz}	mm	Oszillationsweg
t_c	s	Schleifzeit
t_h	s	Hauptzeit eines gesamten Schleifzyklus
T_x	°	Tiltungswinkel zweier Schleifscheiben zueinander
v_c	m/s	Schnittgeschwindigkeit
v_{fa}	mm/min	axiale Vorschubgeschwindigkeit quer zur Werkstückoberfläche
v_{faE}	mm/min	axiale Eilganggeschwindigkeit quer zur Werkstückoberfläche
$v_{flängs}$	mm/min	Vorschubgeschwindigkeit längs zur Werkstückoberfläche
v_{fosz}	mm/min	Vorschubgeschwindigkeit längs zur Werkstückoberfläche
v_{fquer}	mm/min	Vorschubgeschwindigkeit quer zur Werkstückoberfläche
v_{fW}	mm/min	Vorschubgeschwindigkeit des Werkstückes
V_W	mm³	Zerspanungsvolumen
z_{osz}		Anzahl der Oszillationen
z_W		Anzahl der Werkstücke je Schieber / Halter

5.2.3.6. Griechische Formelzeichen

φ	°	Winkel
ω_o	1/s	Winkelgeschwindigkeit der oberen Schleifscheibe

5.2.4. Literaturverzeichnis

[Ard01] Ardelt, Th.:
Einfluss der Relativbewegung auf den Prozess und das Arbeitsergebnis beim Planschleifen mit Läppkinematik.
Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb
TU Berlin, 09.Oktober 2000 (Informativer Arbeitskreis)

[Egg01] Egger, R.:
Planschleifen von Keramik mit zykloidischer Wirk-bewegung
Fortschr.-Ber. VDI Reihe 2 Nr. 588. VDI-Verlag Düsseldorf; 2001

[Fun94] Funck, A.:
Planschleifen mit Läppkinematik.
Dissertation TU Berlin, 1994.

[Kru57] Krug, H.:
Die Schnittkräfte beim Flachschleifen. Teil I: Einflüsse der Zerspanbedingungen.
Werkstatttechnik und Maschinenbau 47 (1957) 1, S.23-35.

[Per03] persönliche Telefonate mit der Fa. Melchiorre,
Peter Wolters, Stähli und Wendt,

[Sal90] Saljé, E.:
Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren.
Bd. 56. Hrsg. E. Saljé, Essen: Vulkan Verlag, 1990.
S. 1-18.

[Sal92] Saljé, E.; Zillig, E.; Heidenfelder, H.:
Ein Beitrag zum Doppel-Planseitenschleifen.
ZwF 87, 1992, 4, S. 225-229.

[Zet81] Zettel, H.D.:
Flachschleifverfahren für Kleinteile aus harten Werkstoffen.
wt- Z. ind. Fertig. 71, 1981, S. 391-396.

Die verwendeten Vortragsfolien (Nr. 1 bis 21) finden sich auf den folgenden Seiten.

Technologische Variantenauswahl beim Schleifen von sprödharten Werkstoffen

Dr.-Ing. Carsten Rußner
Leiter Innovation – Business Development
CeramTec AG
Lauf a. d. Pegnitz

5.2 Präzisionsbearbeitung sprödharter Werkstoffe - Folie 1

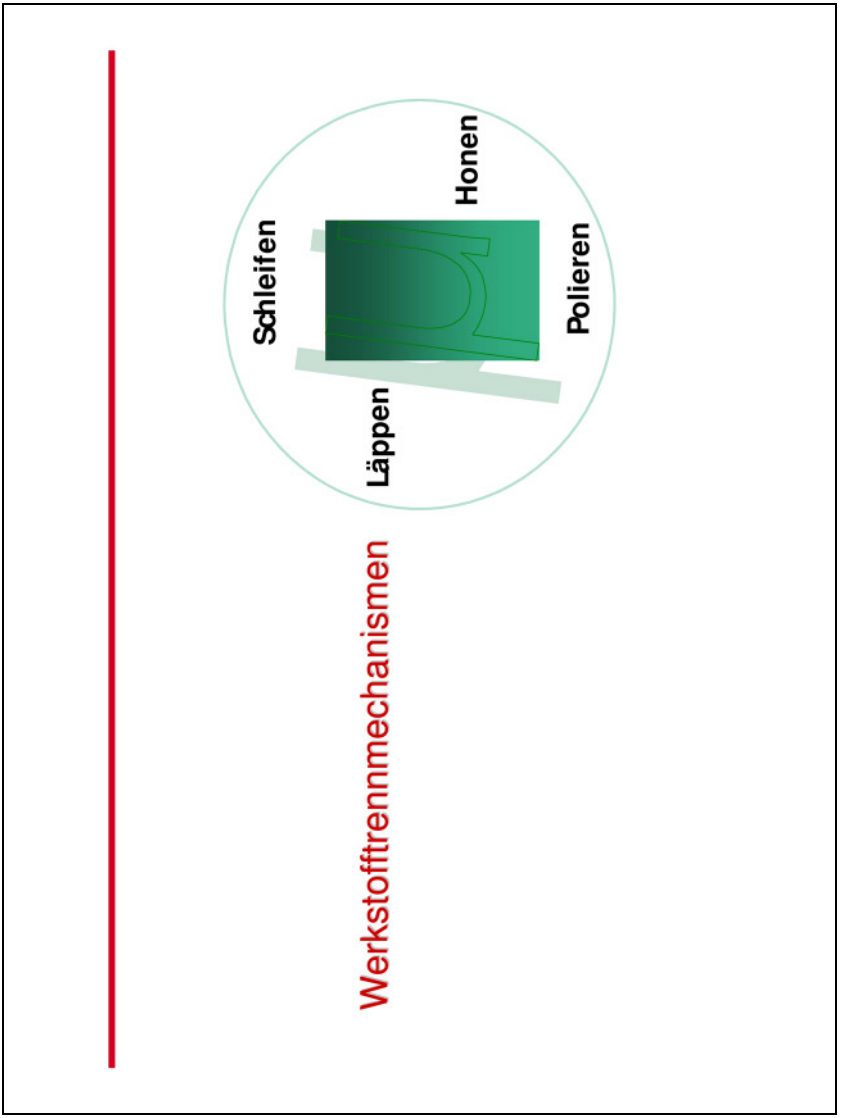
Wegweiser

- Werkstofftrennmechanismen
- Technologischer Variantenvergleich
- Technologische Vererbung
- Produktionsbeispiele
- Ausblick

Ziele:

- **Auslegung eines Produktionsprozesses**
- **Die technologische Vererbung in der Prozesskette**
- **Variantenbeurteilung**

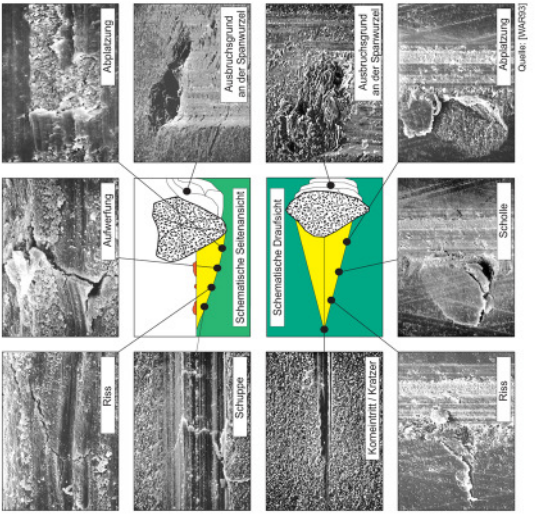
5.2 Präzisionsbearbeitung sprödharter Werkstoffe - Folie 2



5.2 Präzisionsbearbeitung sprödharter Werkstoffe - Folie 3

Werkstofftrennmechanismen

- spanende Fertigungs-verfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide
- Trennmechanismus durch einzelne Abrasivkörner
- Oberflächenausprägung entlang einer Ritzspur

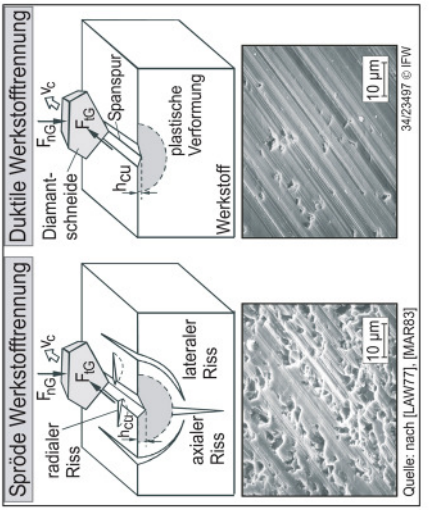


5.2 Präzisionsbearbeitung sprödharter Werkstoffe - Folie 4

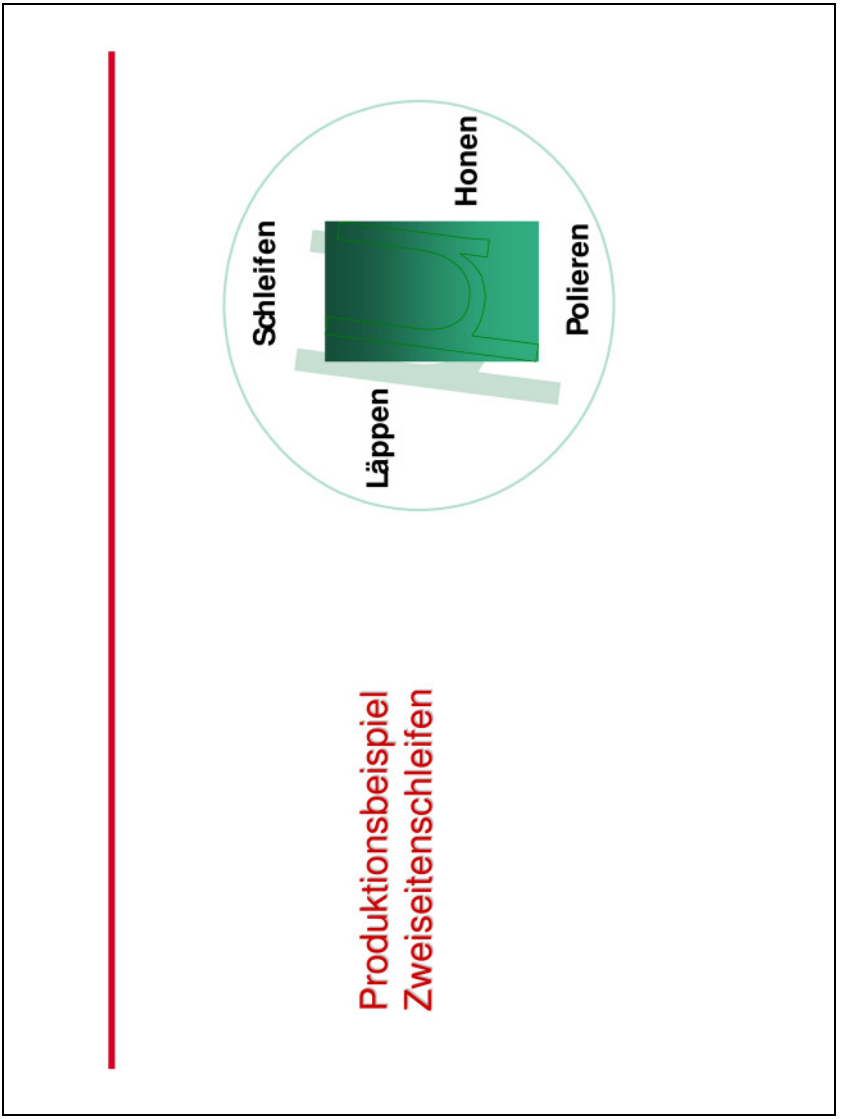
Auswirkung der Trennmechanismen

- I: spröde Werkstofftrennung
- II: duktile Werkstofftrennung
- Entstehung abhängig von:

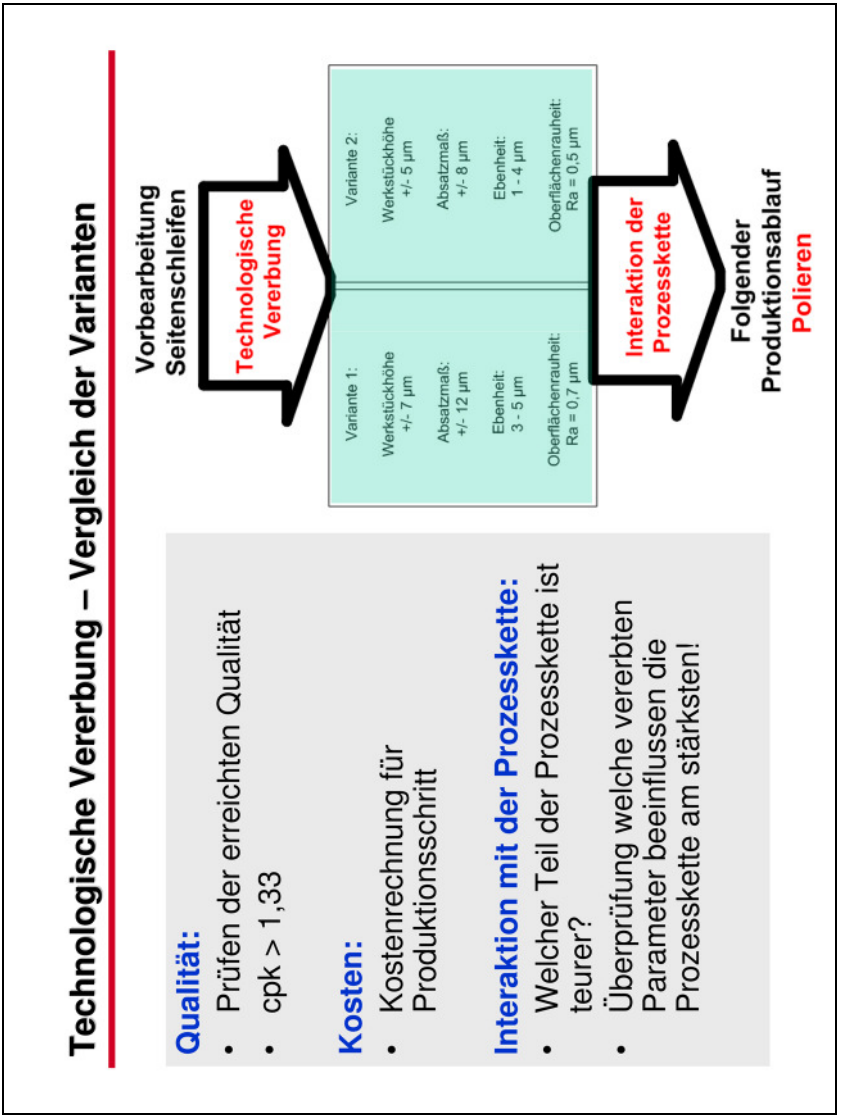
verwendeten Prozess- und Systemgrößen



5.2 Präzisionsbearbeitung sprödharter Werkstoffe - Folie 5



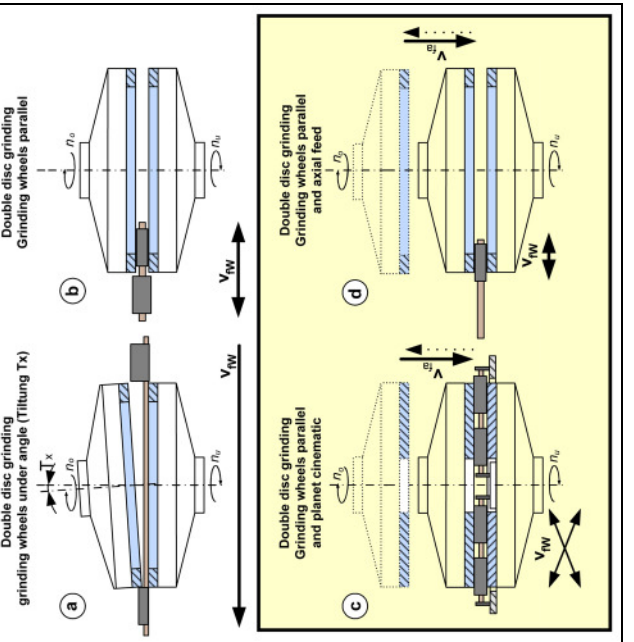
5.2 Präzisionsbearbeitung sprödharter Werkstoffe - Folie 6



5.2 Präzisionsbearbeitung sprödharter Werkstoffe - Folie 7

Seiten-Doppelplanschleifverfahren für die Großserie

Double disc grinding for massproduction



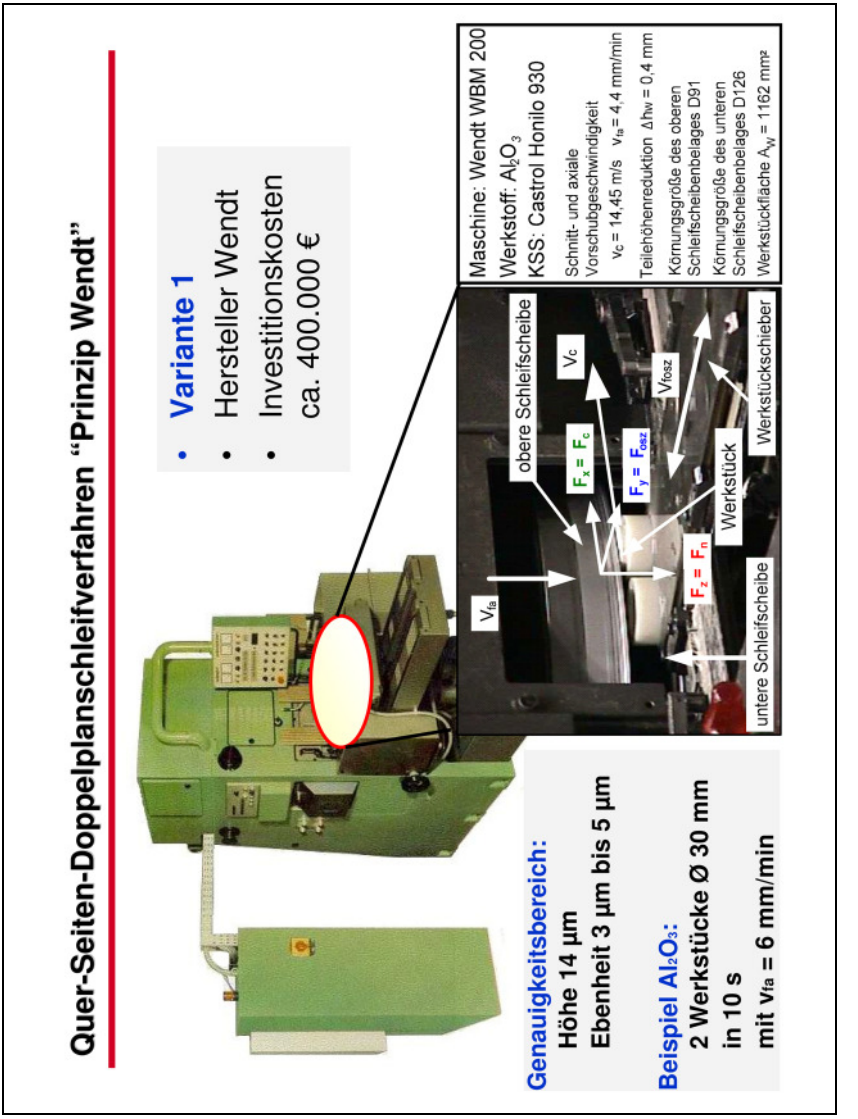
Gemeinsamkeiten

- spannungsfreie Aufnahme der Werkstücke
- kurze Umrüstzeiten
- Überlagerung der Schleifkinematik mit Werkstückvorschub

Im Unternehmen

- chargenweise, nichtstetige Bearbeitung der Werkstücke
- Ebenheitsabweichung geringer

5.2 Präzisionsbearbeitung sprödharter Werkstoffe - Folie 8

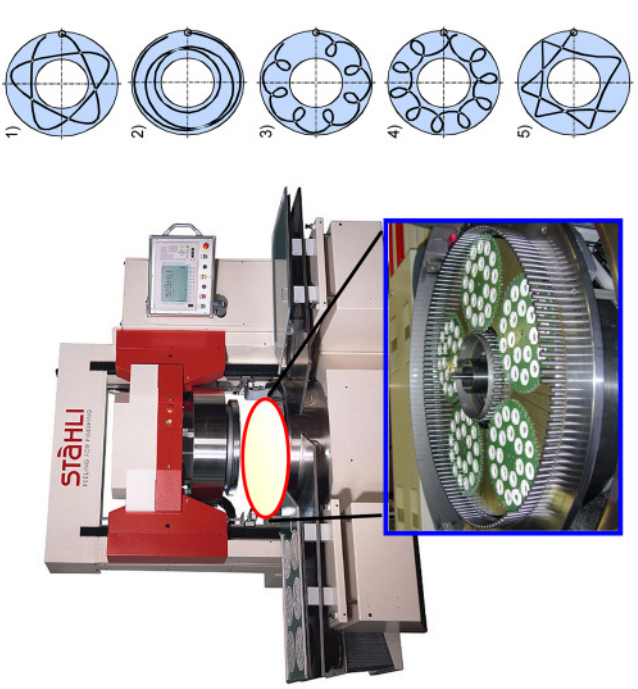


5.2 Präzisionsbearbeitung sprödharter Werkstoffe - Folie 9

Quer-Seiten-Doppelplanschleifverfahren mit Planetenkinematik

Variante 2

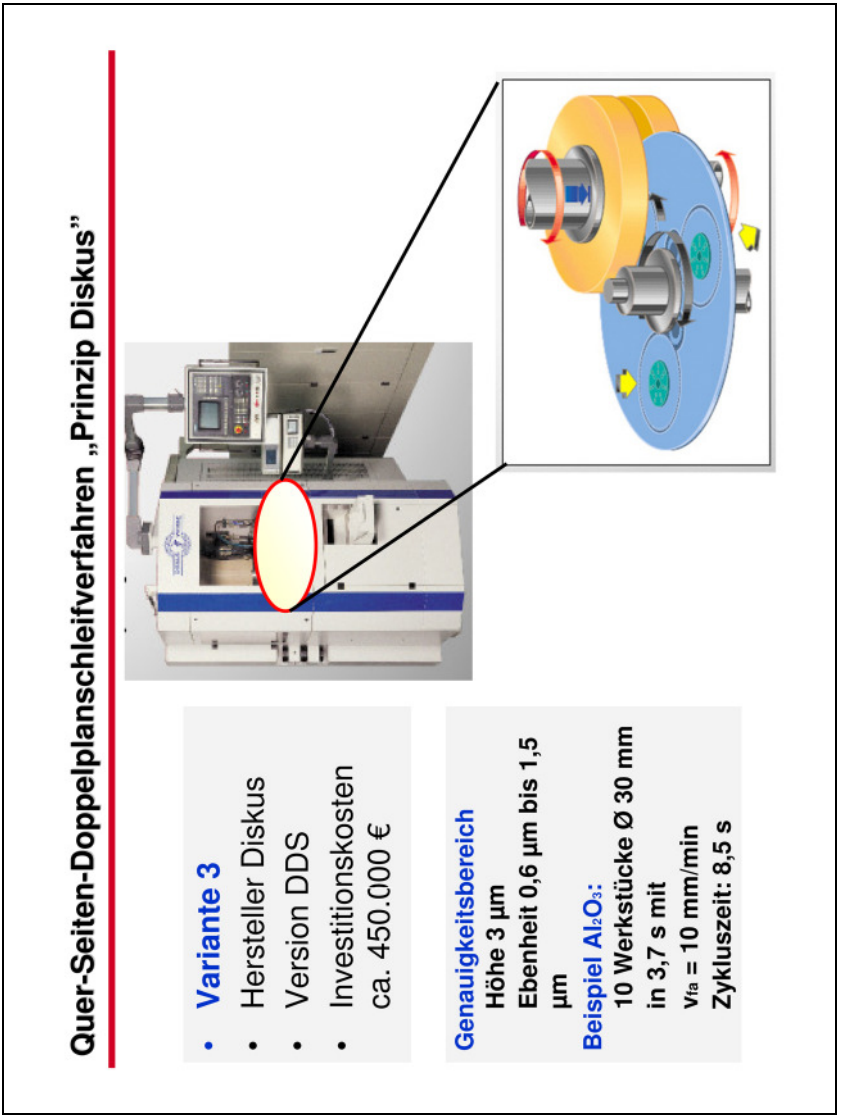
- Hersteller Wolters, Stähli, Melchiorre, Modler
- Investitionskosten ca. 300.000 € ohne Automation



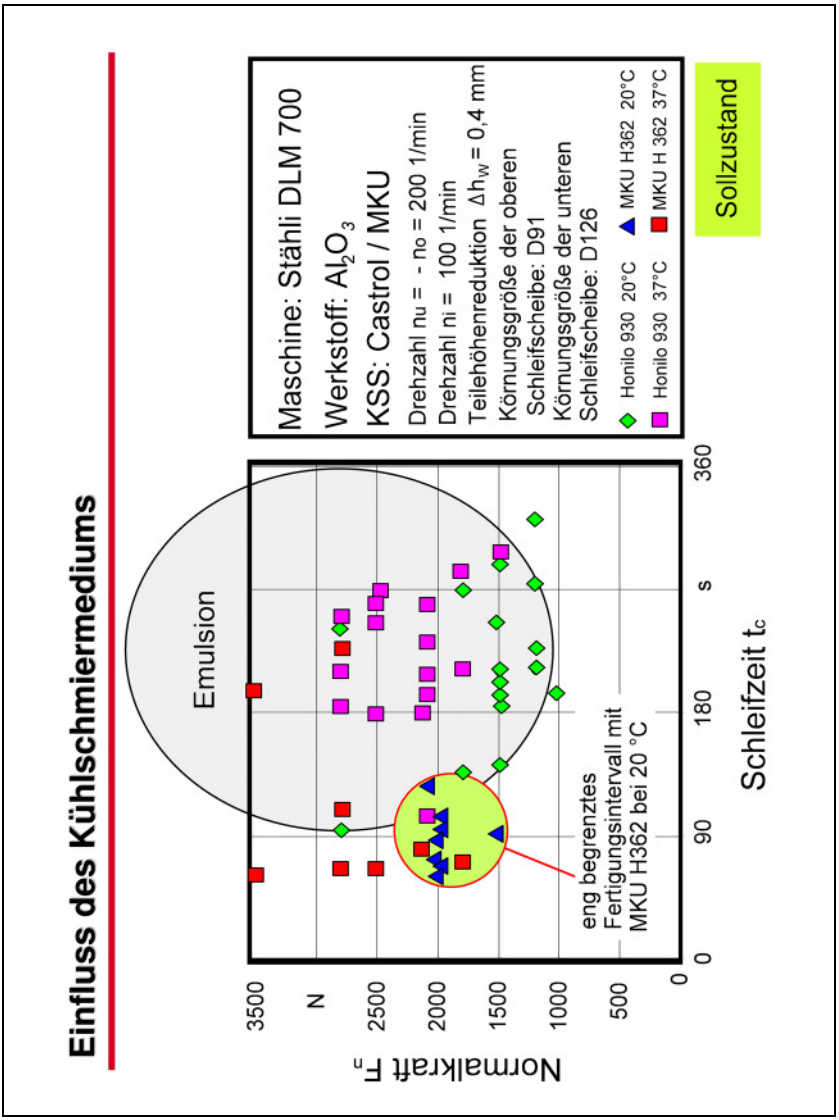
Genauigkeitsbereich
Höhe 10 µm
Ebenheit 1 µm bis 4 µm

Beispiel Al_2O_3:
138 Werkstücke Ø 30 mm
in 80 s mit
v_{fa} = 0,6 mm/min
Zykluszeit: max. 180 s

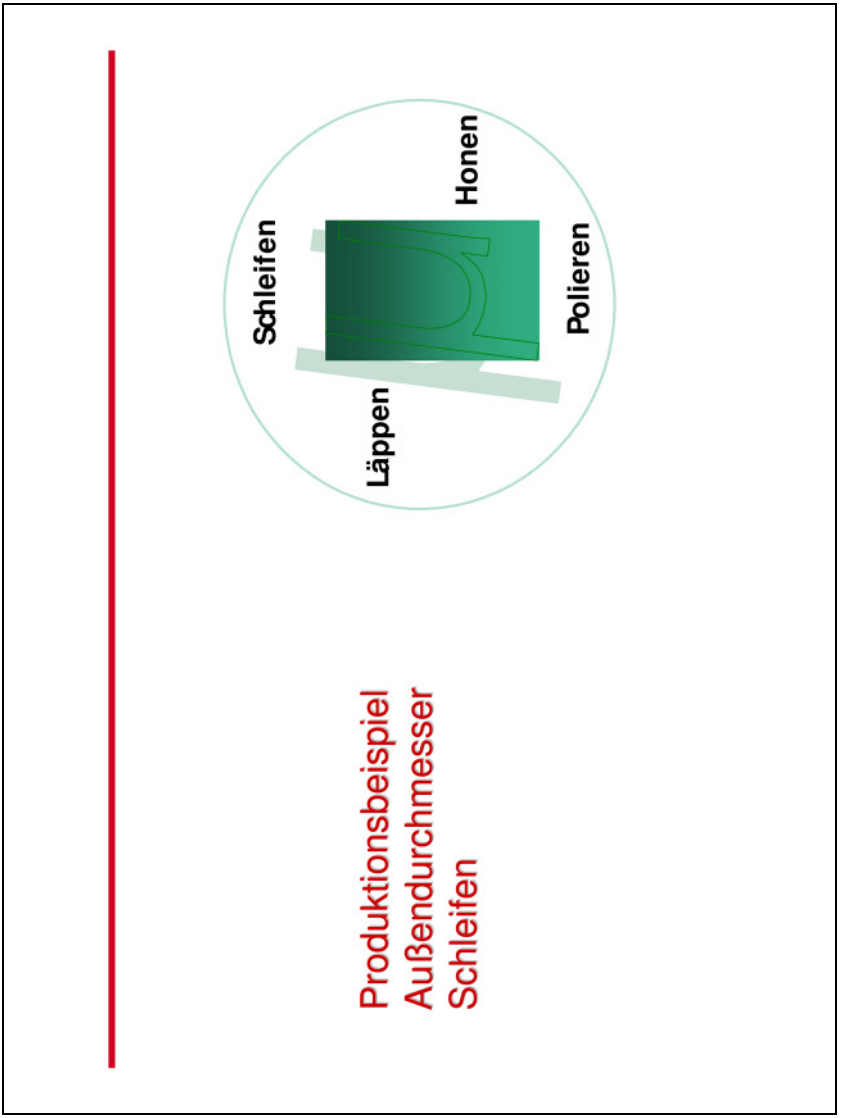
5.2 Präzisionsbearbeitung sprödharter Werkstoffe - Folie 10



5.2 Präzisionsbearbeitung sprödharter Werkstoffe - Folie 11



5.2 Präzisionsbearbeitung sprödharter Werkstoffe - Folie 12



5.2 Präzisionsbearbeitung sprödharter Werkstoffe - Folie 13

Schrägeinstechschleifen mit Spitzenlostechnologie

- spannungsfreie Aufnahme der Werkstücke
- mehrere Werkstücke je Zyklus möglich
- Einsatz keramisch gebundener Diamantschleifscheiben
- hohe Formtreue der Schleifscheibe mit spezieller Abrichttechnologie
- einfache Automation
- hochprofitable Großserientechnik

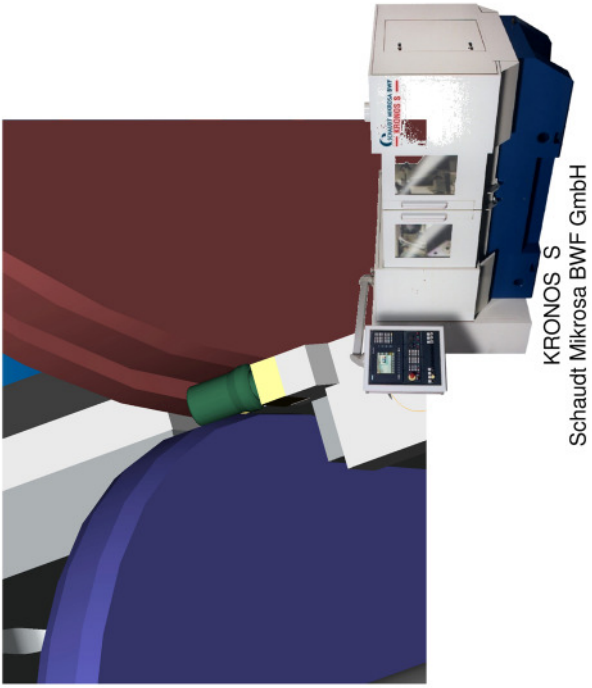
Schrägeinstechschleifen mit Spitzenlostechnologie

Grunddaten
Maschine Kronos S
Werkstoff Si_3N_4
Schleifscheibe V+ 2046
Ø 400 x 15 mm, D46 C100
WINTER DDS-Formrolle
Ø 120 mm, b_d = 1 mm

Schleifparameter
Aufmaß 0.7 mm
Schnittgeschw. v_c = 120 m/s

Abrichtparameter
Schnittgeschw. v_{cd} = 40 m/s
Geschw.-Verh. q_d = 0.4
Zustellung a_{ed} = 3 µm

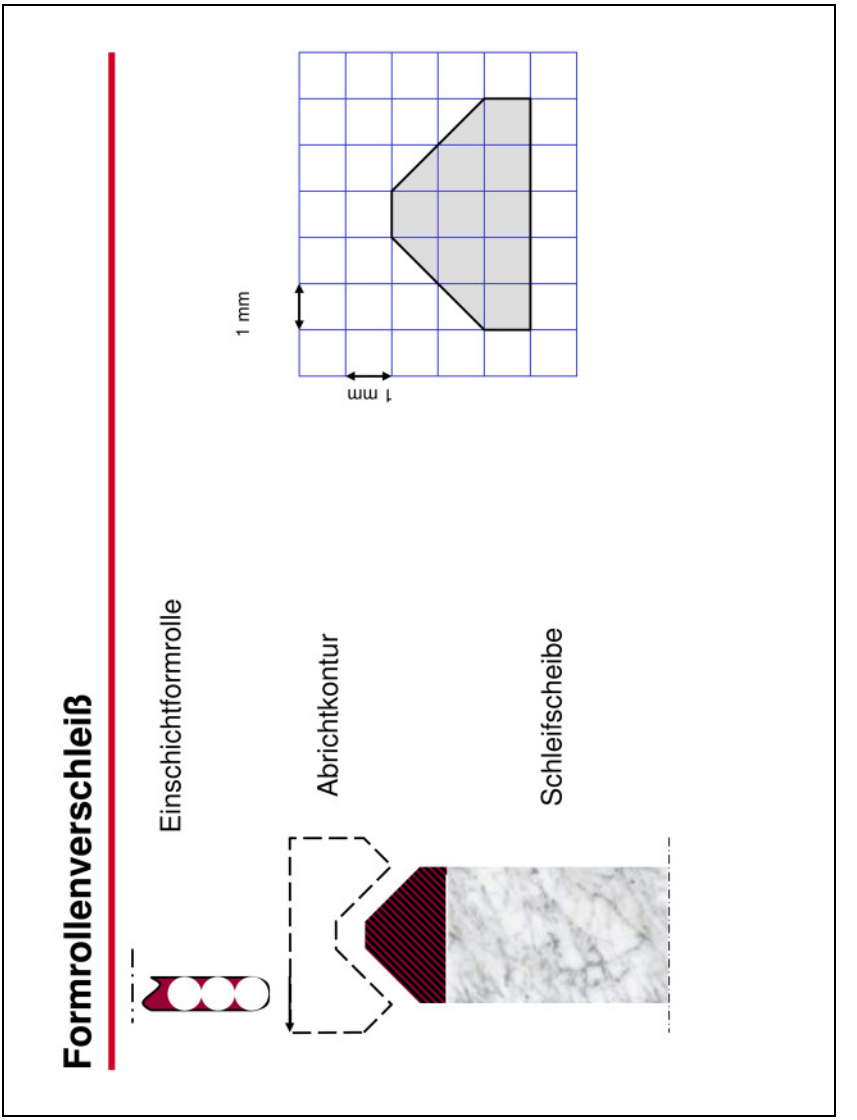
Ergebnis
Rauheit R_z = 2,02 µm
Durchmessertoleranz ± 2 µm
nach 400 Teilen kein
messbarer Verschleiß



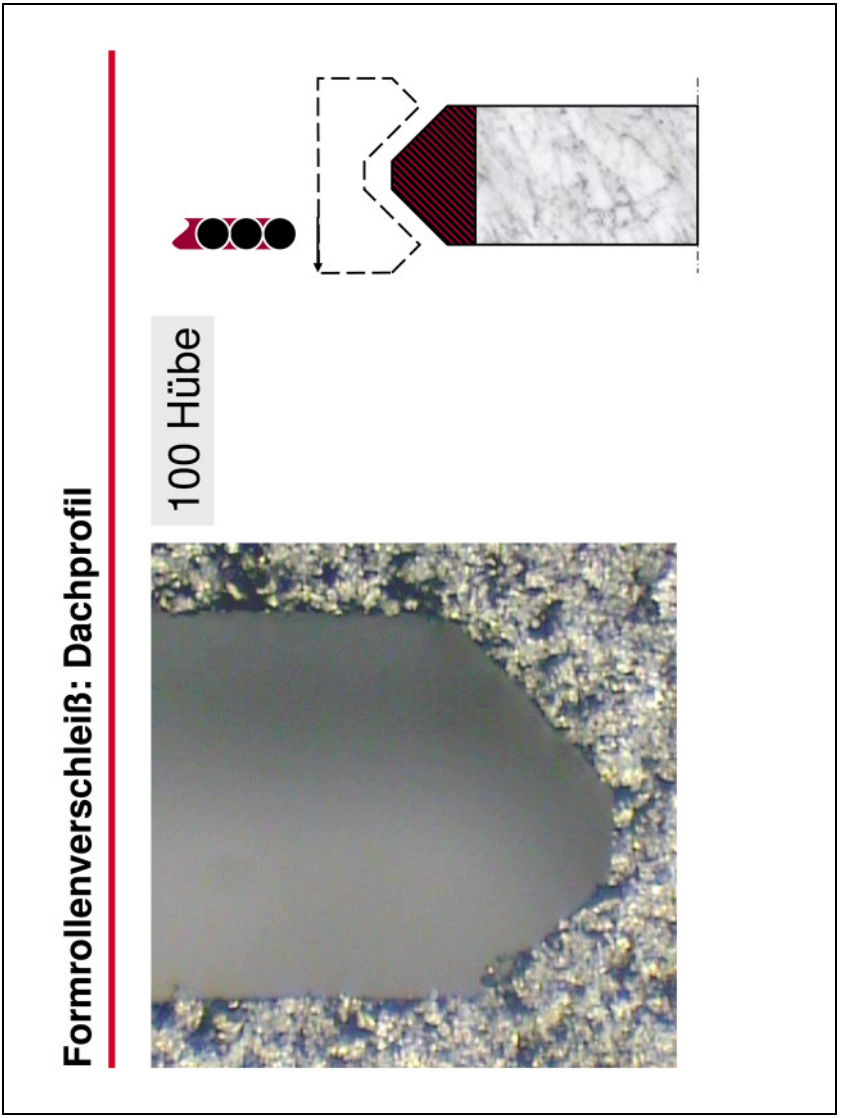
KRONOS S
Schaudt Mikrosa BWF GmbH

(1) Mittelwerte aus Stichprobe

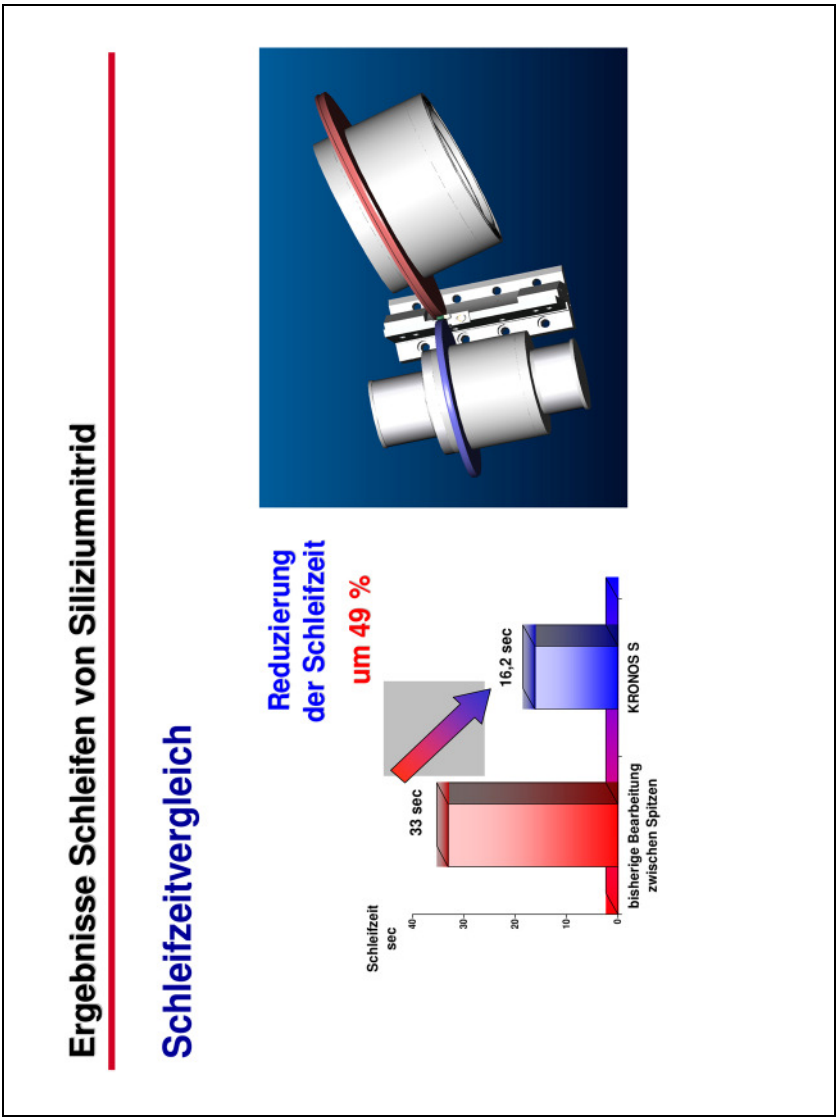
5.2 Präzisionsbearbeitung sprödharter Werkstoffe - Folie 15



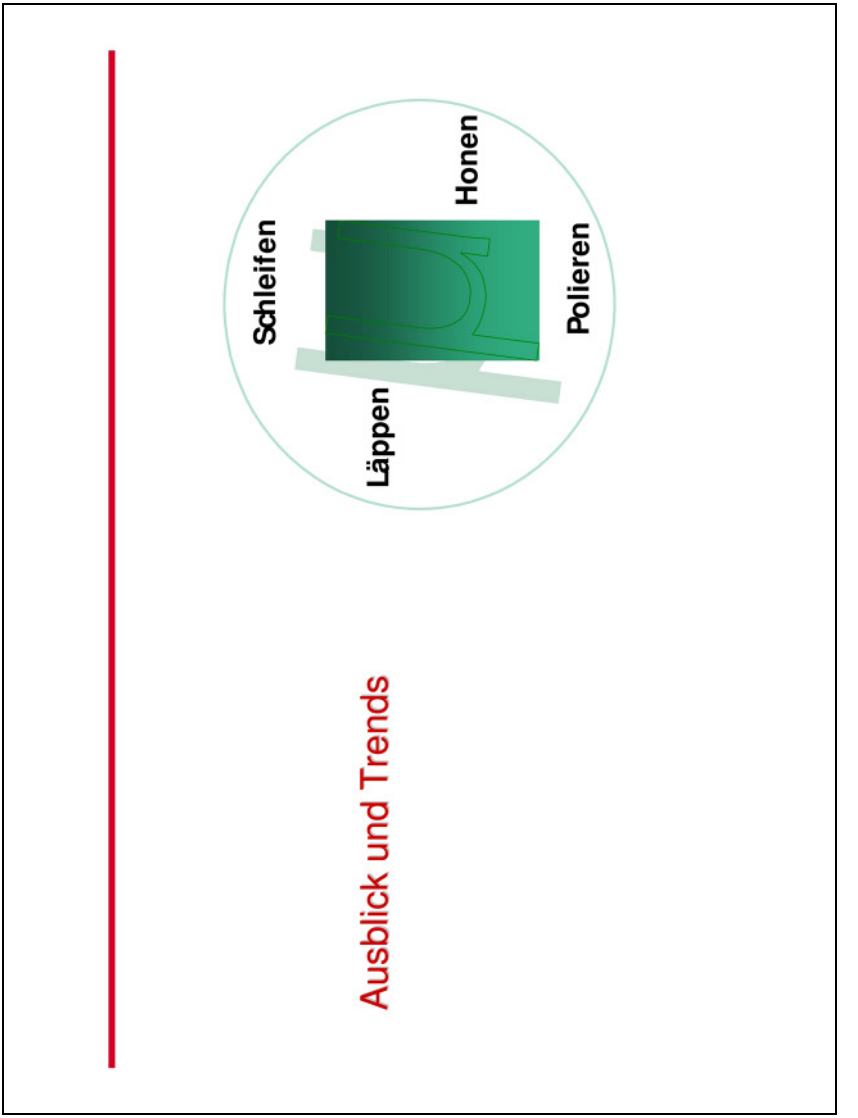
5.2 Präzisionsbearbeitung sprödharter Werkstoffe - Folie 16



5.2 Präzisionsbearbeitung sprödharter Werkstoffe - Folie 17

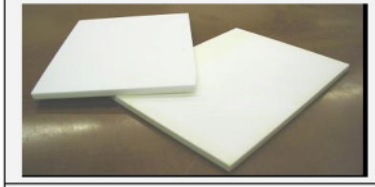
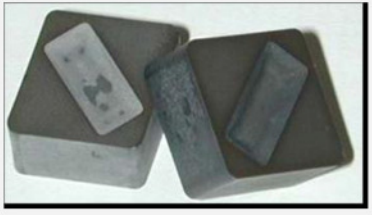


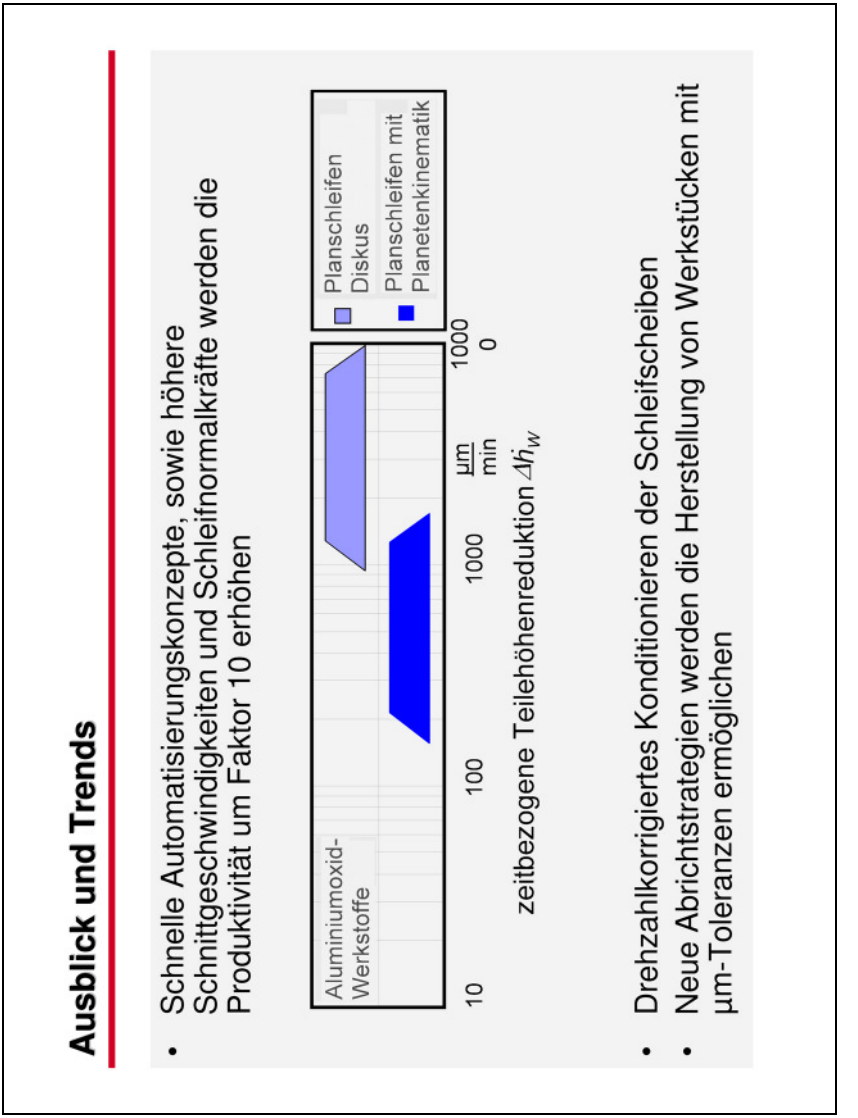
5.2 Präzisionsbearbeitung sprödharter Werkstoffe - Folie 18



5.2 Präzisionsbearbeitung sprödharter Werkstoffe - Folie 19

Ausblick und Trends für das Seitenschleifen mit Planeten

Werkstücke	Werkstück-Info	vorher	Auf DLM 705
	Dichtscheibe Aluminiumoxid	Schleifen von max. 5 Werkstücken	☺ Höhe 10 µm Ebenheit 1 µm bis 4 µm 70 Mio. Stück / a
	Aluminiumoxid Platten 115 x 115 x 2 mm	Teile sind wegen Deformation nur Tiefzuschleifen	☺ Ebenheiten um die 0.015 mm Teile bleiben ganz
	Silizium-Nitrid Wendeplatten	Schleifmaschine arbeitet am Limit was Druck, Vorschub und Drehzahlen betrifft.	☺ Das Limit wurde noch nicht erreicht, Schleifscheiben-entwicklung angestoßen



5.2 Präzisionsbearbeitung sprödharter Werkstoffe - Folie 21