

1 EINLEITUNG

Bei vielen technischen Anwendungen werden die geforderten Funktionalitäten des Werkstückes nur mit engen Toleranzen erreicht. Die Anforderungen an die Werkstückgeometrie werden immer höher. Zur Bearbeitung der Werkstücke werden in der Großserienfertigung Batch-Schleifverfahren, welche entweder einseitig oder doppelseitig schleifen oder läppen, eingesetzt. 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. Durch die eingeschränkten Möglichkeiten, den Prozessraum mit Messtechnik zu versehen, gibt es nur wenige Untersuchungen über die Fertigungsverfahren Quer-Seiten-Doppelplanschleifen.

Die industrielle Großserie unterscheidet sich bei der Handhabung deutlich von den Untersuchungen wissenschaftlicher Natur. Ein Unterschied der Untersuchungen unter Produktionsbedingungen zu rein wissenschaftlichen Betrachtungen ist die Tatsache, dass sich immer mehrere Werkstücke im Einsatz befinden. Langfristige Prozessvariablen wie Schleifscheibenverschleiß, KSS-Schwankungen, Chargenunterschiede der Werkstücke sowie unterschiedliche Bediener werden analysierbar. Weiterhin wird die kostengünstigste Produktion heute meistens durch das Erreichen einer oder mehrerer Grenzlagen im Prozess beschränkt.

Im Rahmen dieser Arbeit wird generell die Großserie mit den Einflüssen der Prozesskette und den wechselnden Arbeitsschichten betrachtet. Weiterhin werden zwei unterschiedliche Fertigungsverfahren, welche sich über die kinematischen Eingriffsverhältnisse und die Werkstückzuführung einordnen lassen, untersucht. Warum der Trend vom Wendtschleifen oder Diskusschleifen, welches seit etwa 30 Jahren eingesetzt wird, zum Planschleifen mit zyklodaler Werkstückbewegung (auf Wolters-, Stähli-, Modler-, Supfina- und Melchiorremaschinen) wechselt, wird im Zuge der Untersuchungen deutlich herausgearbeitet.

In dieser Arbeit wurde eine Wendtschleifmaschine mit Kraftmesstechnik ausgestattet, um die Prozesskräfte zu ermitteln. Ausgehend vom Stand der Technik werden im Rahmen der Arbeit verschiedene Ansätze verfolgt, um die Grenzlagen der Prozesse zu ermitteln und die Leistungsfähigkeit sowie die Prozesssicherheit darzustellen und, falls möglich, durch Prozessführungsstrategien zu erhöhen.

Die Untersuchungen wurden an Werkstücken aus Aluminiumoxid durchgeführt. Dieses hochharte Material bedingt den Einsatz von Diamantschleifscheiben. Als Großserienbauteil

wurde die keramische Dichtscheibe für die Sanitärindustrie mit einer weltweiten Produktion von 250 Millionen Stück im Jahr gewählt. Durch die Prozesskette der keramischen Fertigung sind die Eingangsparameter beim Schleifen der Großserie immer leicht unterschiedlich. Diese Eingangsvarianz und ihre Auswirkungen auf den Schleifprozess werden ermittelt. Somit werden die wechselnden Gegebenheiten der Großserie in der Prozessführung mit untersucht.

Diese Arbeit leistet einen grundlegenden Beitrag hinsichtlich der Ermittlung von Kennzahlen des Istzustandes für die industrielle Großserienfertigung in Bezug auf die Leistungs- und Qualitätslagen. Zusätzlich wird eine Schleifwerkzeugbewertung durchgeführt. Die Erarbeitung der Störkomplexe, die dem Erzielen hoher Formgenauigkeiten entgegenstehen, ist ein wesentlicher Baustein für die Beherrschung der Prozesse.

Die Arbeit entstand im Anschluss an das öffentlich geförderte Vorhaben Planschleifen mit Planetenkinematik.

2 STAND DER ERKENNTNISSE

2.1 Keramische Werkstoffe

2.1.1 Allgemeines

Obwohl die stetige Entwicklung zur heutigen Technischen Keramik oftmals mit Rückschlägen versehen war, trugen die hervorragende Härte und Verschleißfestigkeit sowie die außerordentliche Temperatur- und Korrosionsbeständigkeit dieses Werkstoffes zu den technischen Errungenschaften unserer Tage bei [Ruß85].

Die Einteilung der Keramikwerkstoffe erfolgt meist nach ihren charakteristischen Gefügebestandteilen. Dabei kann zwischen Oxidkeramik, Silikatkeramik und Nichtoxidkeramik unterschieden werden [Egg98].

Keramik hat mit seinem weiten Spektrum der Eigenschaften, durch starke Bindungskräfte zwischen den Atomen und Ionen und die Zustandsform oder Modifikation im Kristallgitter zahlreiche Gebiete für sich erschlossen.

Hochleistungskeramik wird überwiegend mit Hilfe von organischen Additiven aus rein synthetischen Feinstpulvern im Submikrometerbereich bei Sintertemperaturen von 1500 °C bis 2100 °C hergestellt [Uhl93].

Die Hochleistungskeramik wird durch ihre hohe Härte und Druckfestigkeit weiterhin in Grenzgebieten, in welchen Werkstücke mit diesen Eigenschaften bei hohen Form- und Maßgenauigkeiten sowie guter Oberflächenqualität benötigt werden, eine starke Position behalten. Die technisch anwendbare Keramik entstand vor 100 Jahren, als durch die Verbesserung der Festigkeitseigenschaften die so genannte Ingenieur- und Hochleistungskeramik mit der Zündkerze breite Anwendung fand [Car93].

Durch ständige Verbesserung der Bruchzähigkeit, Temperaturschockbeständigkeit und Festigkeit der Keramik werden immer mehr Anwendungsbereiche erschlossen. Dies ist beispielsweise am gesteigerten Standard der in der Industrie am häufigsten eingesetzten Keramiken Aluminiumoxid, Siliziumcarbid und Siliziumnitrid zu sehen [Kar96].

2.1.2 Aluminiumoxid

Aluminiumoxid (Al_2O_3) gehört zu den Oxidkeramiken, welche auf dem Oxid eines einzigen Elementes basieren und hat die weiteste Anwendung gefunden [Sal83]. Dabei werden Aluminiumoxidwerkstoffe nach ihrem Gehalt an Al_2O_3 in verschiedene Gruppen eingeteilt. So besitzt beispielsweise Hochleistungskeramik einen 99-prozentigen und Verschleißkeramik einen 85- bis 99-prozentigen Anteil an Al_2O_3 . Bei Isolationskeramik liegt der Anteil bei 90 bis 98 Prozent und bei Elektronikbauelementen sowie Substraten bei 99,5 Prozent beziehungsweise zwischen 70 und 99 Prozent [Poh98].

Das Grundmaterial für die Herstellung von Al_2O_3 ist Bauxit. In Les Baux in Frankreich entdeckt, wird dieses gelbbraune Material heute fast ausschließlich in Australien, Afrika und Südamerika im Tagebau gewonnen. Die jährliche Weltproduktion beträgt bis zu 40 Millionen Tonnen, wobei für die Gewinnung von einer Tonne Aluminiumoxid, abhängig von der Erzqualität, die doppelte bis vierfache Menge an Bauxit benötigt wird [Poh98].

Das Al_2O_3 hat bis zu seinem Schmelzpunkt bei 2050 °C nur eine thermodynamisch stabile Phase: das $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (Korund). Die Aluminium- und Sauerstoffatome liegen in ionisierter Form vor und ziehen sich elektrostatisch an. Maßgebend für die Bindungskräfte sind die Zahl der Valenzelektronen (Coulomb'sches Gesetz) und die Anionen-Kationen-Abstände. Ein Vergleich mit den Gittern anderer keramischer Werkstoffe zeigt, dass Al_2O_3 die kleinsten Atomabstände besitzt, woraus die hohen Bindungskräfte resultieren. Al_2O_3 beinhaltet die hexagonal dichteste Kugelpackung der Sauerstoffatome, in welcher zwei Drittel der oktaedrischen Lücken von Metallatomen besetzt sind. Weiterhin existiert eine ausgeprägte Spaltbarkeit in der $\langle 001 \rangle$ -Richtung. Die typischen Nichtleitereigenschaften ergeben sich durch einen ionischen Bindungsanteil von 63 Prozent. Im Vergleich zu anderen keramischen Werkstoffen zeichnen Al_2O_3 eine hohe mechanische Festigkeit, ein großer Verschleißwiderstand und ein extrem hoher elektrischer Widerstand aus [Ruß92].

Aluminiumoxidwerkstoffe finden sehr oft in der Technischen Keramik bei der Produktion von Hochleistungs- und Verschleißkeramiken, sowie in der Elektronik Verwendung. Beispiele hierfür sind Komponenten für Textilmaschinen, Leit- und Führungselemente, Schweißrollen und Dorne, Schneidplatten, Dicht- und Regelscheiben für Armaturen und Kartuschenhersteller sowie Gleitringe.

2.1.3 Aluminiumoxidwerkstoffsystem für Dicht- und Regelscheiben

Die Firma CeramTec AG fertigt Dicht- und Regelscheiben aus Aluminiumoxidkeramik A 1896. Dieser Werkstoff zeichnet sich aus durch

- hohe Härte und Verschleißfestigkeit
- Formstabilität
- Temperaturbeständigkeit
- Korrosions- und chemische Beständigkeit
- Alterungsbeständigkeit
- Anlagerungsfreiheit

Tabelle 2.1 zeigt die Eigenschaften des Versuchswerkstoffes.

Tabelle 2.1: Eigenschaften des Versuchswerkstoffes [CT]

		Aluminiumoxid
Firmenbezeichnung		A 1896
Allgemeine Eigenschaften		
Rohdichte	g/cm ³	3,71
Mechanische Eigenschaften		
Biegebruchfestigkeit (20 °C)	MPa	330
Druckfestigkeit	MPa	3400
E-Modul (dynamisch)	GPa	330
Vickershärte H _{V10}	MPa	1100
Bruchwiderstand K _{Ic}	MPa · m ^{1/2}	4,0
Thermische Eigenschaften		
Wärmeleitfähigkeit 20 bis 100 °C	W/mK	24
Längenausdehnungskoeff. 20 bis 400 °C	10 ⁻⁶ · K ⁻¹	6,9
Längenausdehnungskoeff. 20 bis 1000 °C	10 ⁻⁶ · K ⁻¹	8,3
mittlere spez. Wärmekapazität	KJ/kgK	0,9
Maximale Einsatztemperatur unbelastet in oxidierender Atmosphäre	°C	1200

2.1.4 Herstellverfahren von Oxidkeramik

Die Herstellung der Dichtscheiben gliedert sich im Wesentlichen in fünf Teilbereiche.

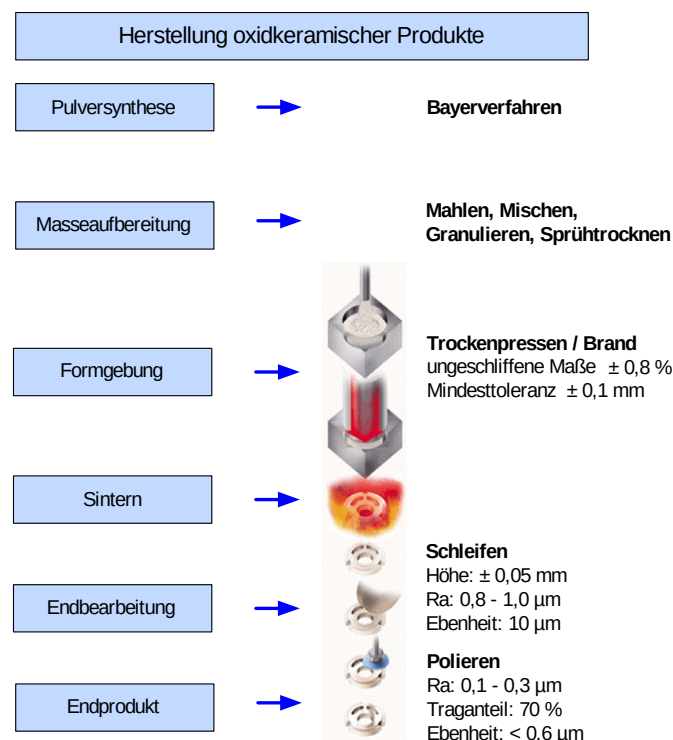


Bild 2.1: Prozesskette für die Herstellung oxidkeramischer Dichtscheiben [CT03]

Nach der Gewinnung der Tonerde aus dem Rohstoff Bauxit mittels Bayerverfahren erfolgt die Masseaufbereitung. Dabei wird das Ausgangspulver gemahlen und mit Sinterhilfsstoffen vermischt, granuliert und sprühgetrocknet. Im Anschluss daran kann das aufbereitete Pulver im Formpressverfahren unter Drücken zwischen 20 und 100 MPa zur gewünschten Form weiterverarbeitet werden. Das entstandene Produkt wird als Grünling bezeichnet und bei Sintertemperaturen von 1500 °C bis 1800 °C, je nach Aluminiumoxidgehalt, gebrannt. Hierbei entsteht eine Schwindung von 17 bis 20 Prozent. Die Maßgenauigkeit liegt nach dem Brand bei $\pm 0,8$ Prozent und einer Mindesttoleranz von $\pm 0,1$ mm. Die Prozessabfolge zeigt **Bild 2.1**.

2.2 Seiten-Doppelplanschleifverfahren für Großserien

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 2.2 a, b**) und das „Querschleifen“ beziehungsweise „Tauchsleifen“ (**Bild 2.2 d**).

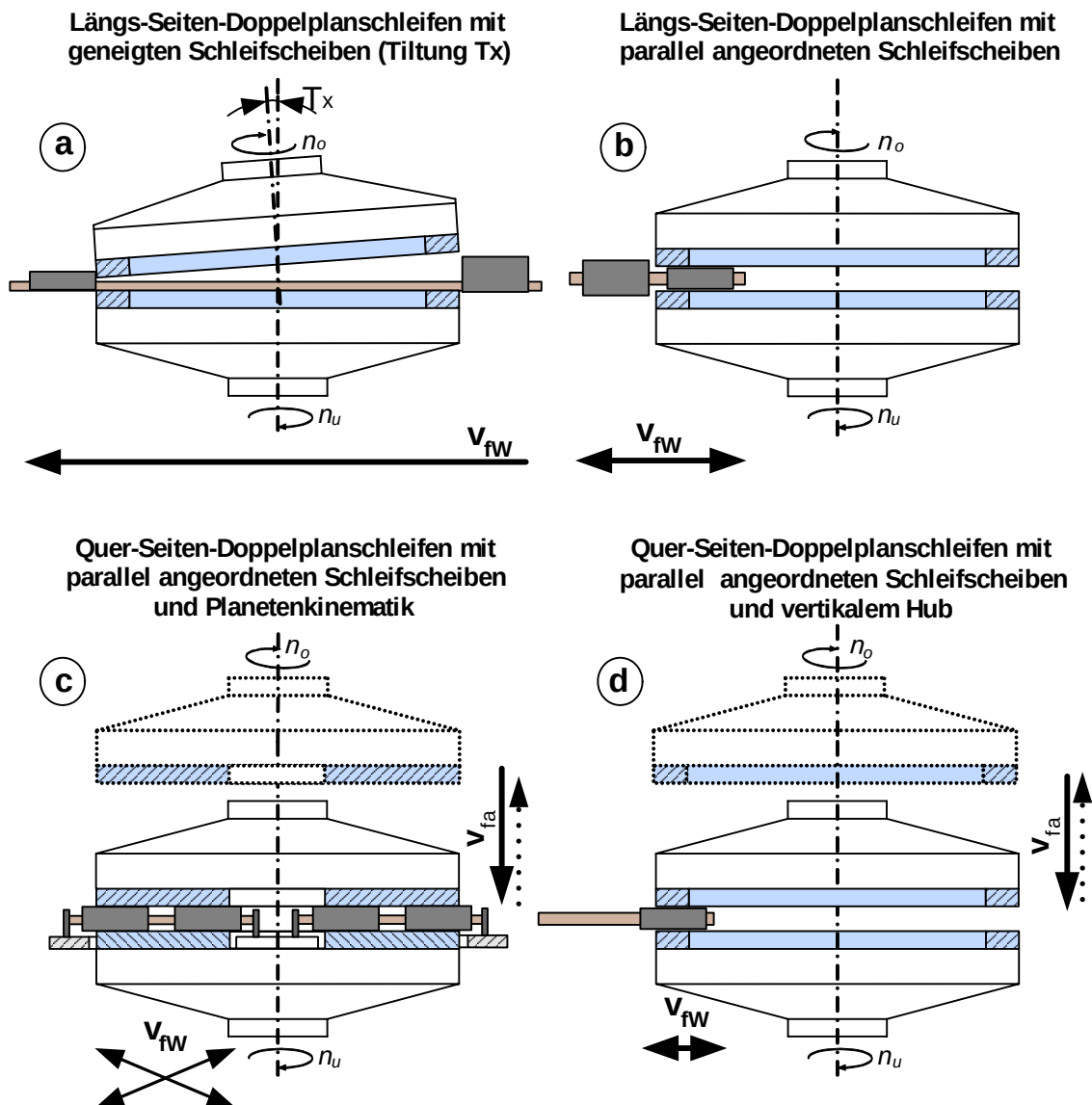


Bild 2.2: Seiten-Doppelplanschleifverfahren für den Großserieneinsatz

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 Halteinrichtungen liegen, verläuft längs oder quer zu der Schnittgeschwindigkeit v_c [Zet81]. FUNCK, ARDELT und EGGER beschreiben ein weiteres Seiten-Doppelplanschleifverfahren (**Bild 2.2 c**), welches abgeleitet von den Läppmaschinen die Werkstückbewegung mittels Planetenkinematik erzeugt [Fun94; Ard01; Egg01].

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 2.2 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 $l_{\bar{u}}$. 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].

Anforderungen an die Maschine

Aus den Vor- und Nachteilen des Seiten-Doppelplanschleifens wurden schon 1989 von SPUR die Anforderungen an die Werkzeugmaschinen abgeleitet [Spur89]. Vor allem senkrecht zur Werkstückoberfläche entstehen bei der Bearbeitung von Keramik sehr hohe Prozesskräfte. Die Werkzeugmaschinen müssen daher eine hohe statische und dynamische Steifigkeit besitzen, um die geforderten Maß- und Formgenauigkeiten der Werkstücke gewährleisten zu können. Außerdem wirken sich bei zu geringer dynamischer Steifigkeit Rattererscheinungen negativ auf die Oberflächengüte aus. Eine hohe Antriebsleistung der Maschine von mindestens 20 kW wird vorausgesetzt, um die geforderten Zeitspanungsvolumina zu erreichen. Beim Vorschubantrieb und den Führungen kann ein Stick-Slip-Effekt zu kurzzeitigen Kraftspitzen oder sogar Stößen auf die keramischen Werkstücke führen, welche einen erhöhten Schleifscheibenverschleiß oder im Extremfall eine Zerstörung der Werkstücke

bewirken. Ein ruckarmer Vorschubantrieb ist somit die Voraussetzung für die Keramikbearbeitung. Durch die Kühlschmierung wird die entstehende Temperatur in der Wirkzone minimiert und die Spanbruchstücke des Werkstückes beziehungsweise die Verschleißpartikel der Schleifscheibe werden aus der Wirkzone transportiert. Das geeignete Kühlschmiersystem, das die Anordnung der Düsen, den Volumendurchsatz, den Einspritzdruck, die Art des Kühlschmierstoffes und die Filtertechnik umfasst, beeinflusst maßgeblich das Arbeitsergebnis und den Verschleiß der Diamantwerkzeuge [Spu89].

Einfluss der Schnittgeschwindigkeit

In der industriellen Praxis werden beim Längs-Seiten-Doppelplanschleifen Schnittgeschwindigkeiten v_c von 15 bis 25 m/s eingesetzt. Den Hochgeschwindigkeitstrend der neunziger Jahre ignorierend, ist das Schleifverfahren bisher nie über $v_c = 30$ m/s betrieben worden [Mar01]. Im Gegensatz dazu begann seit 1993 der Aufstieg des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens mit Planetenkinematik, welches in einem Schnittgeschwindigkeitsbereich v_c von 1 bis 5 m/s arbeitet [Ard01].

KRUG fand bei seinen Untersuchungen heraus, dass mit steigender Schnittgeschwindigkeit die Schnittkraft F_c abnimmt. Die Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n stieg bei Schnittgeschwindigkeiten $v_c = 20$ m/s im Gegensatz zu späteren Untersuchungen [Boc93, Pah65] wieder an. Bei einer weiteren Analyse der Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n wurde von BOCK, MARKSCHAT und HOFFMEISTER neben dem Rückgang der Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n eine Reduzierung der Werkstückrautiefe und eine deutliche Abnahme des Schleifscheibenverschleißes im Geschwindigkeitsbereich $v_c = 18$ bis 34 m/s festgestellt [Mar93, Boc93].

Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit

Der Einfluss der axialen Vorschubgeschwindigkeit v_{fa} bei konstantem Aufmaß wurde für das Quer-Seiten-Doppelplanschleifen von SALJÉ, BOCK und PAHLITSCH untersucht. Die Erhöhung der axialen Vorschubgeschwindigkeit v_{fa} führt zu einer Zunahme der Einzelkornspannungsdicke und einer damit erhöhten Belastung der Kornschneide. Mit dem Anstieg der Schleifkräfte nehmen die Werkstückrautiefen zu. Die Ursache für die erhöhten Werkstückrautiefen wurde durch die geringere Überdeckung der Schleifspuren begründet [Sal91, Sal92, Boc93, Pah65]. Die Planparallelitätsabweichungen f_k steigen mit dem axialen Vorschub f_a progressiv an [Sal92].

Einfluss der Werkstückvorschubgeschwindigkeit

SALJÉ untersuchte den Einfluss der tangentialen Vorschubgeschwindigkeit v_{ft} auf einer Längs-Seiten-Doppelplanschleifmaschine des Typs Diskus. Für die Beurteilung des Einflusses der Werkstückvorschubgeschwindigkeit wurde der Geschwindigkeitsquotient q , definiert als das Verhältnis von Schnittgeschwindigkeit v_c zur Werkstückvorschubgeschwindigkeit v_{fw} , eingeführt. Bei einer niedrigen axialen Vorschubgeschwindigkeit v_{fa} ist der maximale