

Seiten-Doppelplanschleifverfahren für Großserien

Prof. Klaus Künanz, Dipl.-Ing. Carsten Rußner¹

1 Einleitung

In der Herstellung von technischer Keramik stellt die Endbearbeitung durch produktspezifische Schleif- und Polierverfahren nach wie vor einen entscheidenden Zeit- und Kostenfaktor dar. Auf dem Gebiet der Endbearbeitung wird seit über 25 Jahren erfolgreich das Quer-Seiten-Doppelplanschleifen mit Diamantschleifscheiben eingesetzt. Dieses Standardverfahren wird vor allem in der Massenproduktion von keramischen Dicht- und Regelscheiben verwendet. Es ist umso überraschender, dass das Zusammenwirken der einzelnen Parameter gerade dieses Schleifverfahrens nur wenig untersucht ist und sich viele Erkenntnisse nur auf empirisch gewonnene Daten stützen.

Für die doppelseitige Schleifbearbeitung der Dichtscheiben sind insgesamt drei Einflussfaktoren für die prozessfähige Massenproduktion besonders wichtig, die Oszillationsbewegung, die Schleifkräfte und das Abschleifverhältnis.

2 Technologie des Seiten-Doppelplanschleifens

Planschleifverfahren [Kru57, Zet81, Sal90, Sal92, Fun94; Ard01; Egg01, Per03] werden zum Erzeugen ebener Flächen eingesetzt. Insgesamt haben sich in der industriellen Großserienfertigung folgende Seiten-Doppelplanschleifverfahren durchgesetzt:

- „Längsschleifen mit und ohne Neigung der Topfscheibe“,
- „Querschleifen“ beziehungsweise „Tauchschleifen“ und
- von den Läppmaschinen abgeleitetes, die Werkstückbewegung mittels Planetenkinematik, erzeugendes Schleifen.

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 und
- Wirkrichtung parallel zur Werkstückoberfläche.

¹ Promovend CeramTec AG

3 Der Schleifprozess des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens „Prinzip Wendt“

Als Besonderheit sind beim Quer-Seiten-Doppelplanschleifen die Schneiden der Schleifscheibe auf der gesamten Werkstückfunktionsfläche im Eingriff, wodurch ein hohes Zeitspannungsvolumen ermöglicht wird. Bei einer typischen vollautomatisierten Maschine mit diesem Schleifverfahren werden die Werkstücke wie in Bild 3.1 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_{fosz} 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.

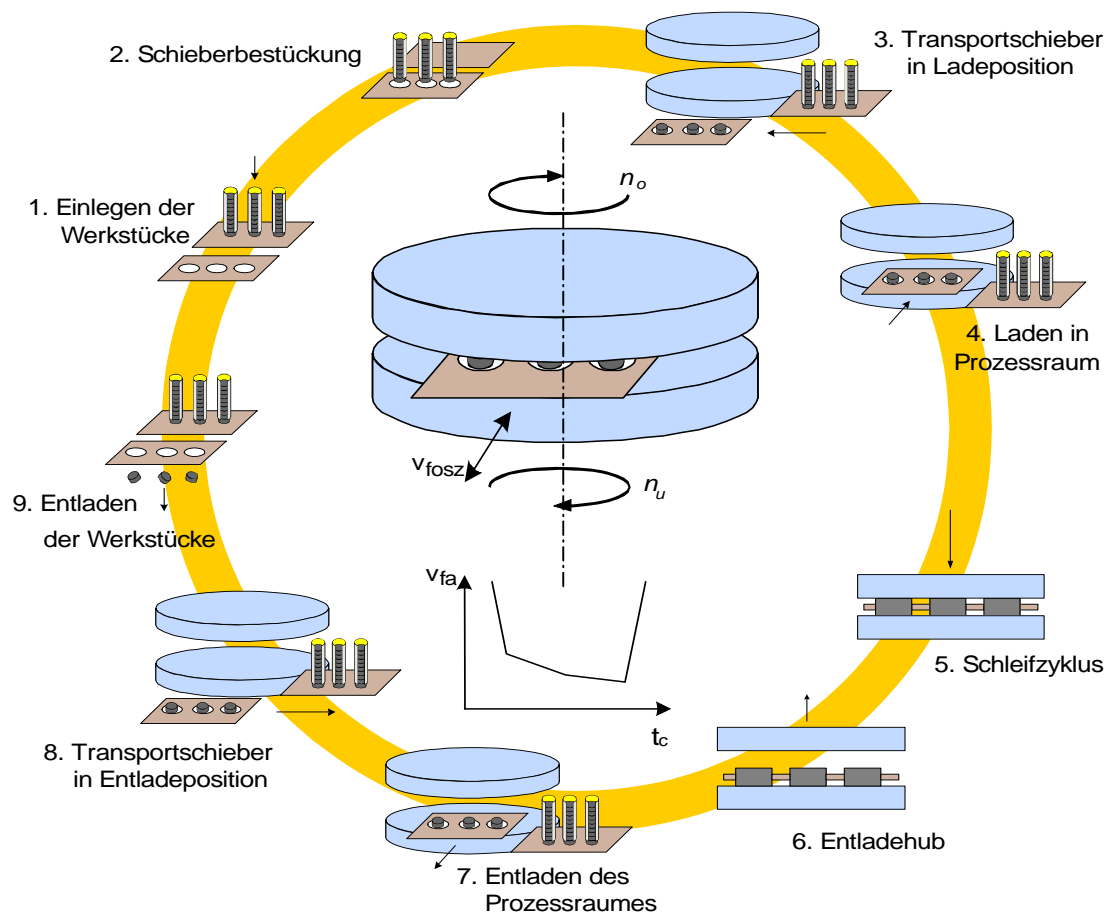


Bild 3.1: Quer-Seiten-Doppelplanschleifen nach dem Prinzip des Herstellers Wendt

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 Schleifscheibenbelagbreite von $b_s = 40$ mm überdeckt und sich in der Mittelstellung befindet, erreicht die Kraft ein relatives Maximum.

4 Wirtschaftliche Prozessauslegung

Üblicherweise besitzen die mit den Quer-Seiten-Doppelplanschleifmaschinen geschliffenen Werkstücke nicht die gleichen Flächen auf der Werkstückober- und Werkstückunterseite. Aus diesem Grund muss der Ablauf der Schleifoperation unter Beachtung der Aufteilung des Schleifaufmaßes geplant werden. Die Auslegung des Schleifaufmaßes ist nach den nun folgenden Gesetzmäßigkeiten abzuleiten.

Bei einem Flächenverhältnis von 1:1 der Werkstückoberseite zu der -unterseite ist das Aufmaß mit $\Delta h_{W_o} = \Delta h_{W_u}$ ausulegen. Bei diesen geometrisch gleichen Verhältnissen sind die Zerspanungsvolumina sowie die Schnittgeschwindigkeiten v_c an der Werkstückober- und Werkstückunterseite konstant.

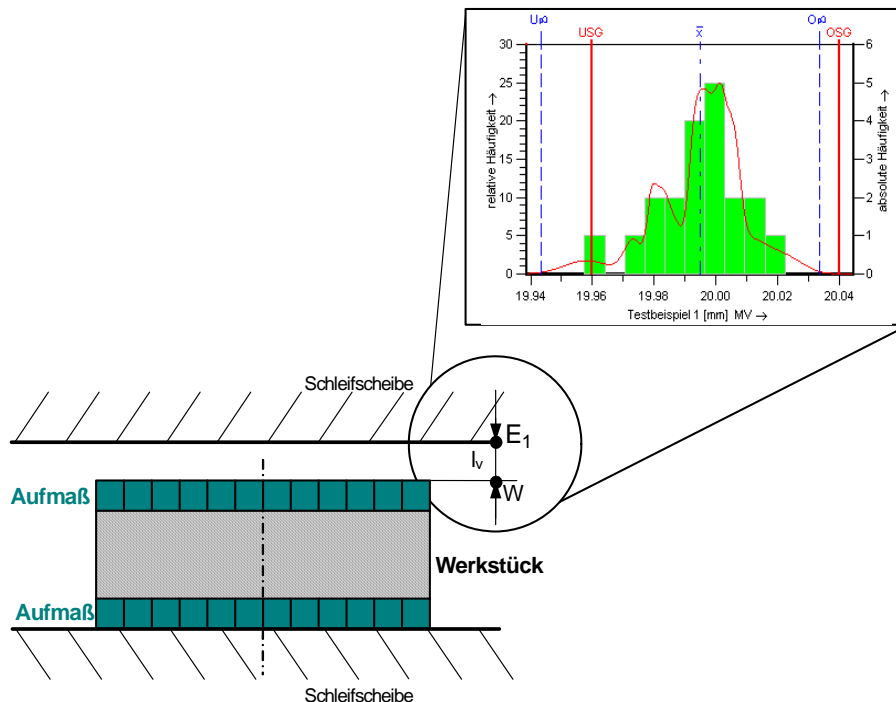


Bild 4.1: Prozessraum der Quer-Seiten-Doppelplanschleifverfahren mit eingezeichneter Sicherheitshöhe l_v

Der Ablauf der Schleifoperation stellt sich nunmehr wie folgt dar. Das Werkstück wird auf die untere axial fest verankerte Schleifscheibe geschoben. Die obere Schleifscheibe wird im so genannten Eilgang mit der axialen Vorschubgeschwindigkeit v_{faE} bis zum Punkt E_1 zugestellt. In Bild 4.1 ist die aus der Prozessanalyse entstehende Sicherheitshöhe l_v dargestellt. Sie beträgt zwischen 10 und 20 μm . Mit statistischen Methoden wird die größte Höhe des gesinterten Werkstückes für die Maschineneinstellung ermittelt. Zusammen mit der Sicherheitshöhe l_v ergibt dies den Prozesspunkt E_1 . Ab diesem Prozesspunkt E_1 wird der Eilvorschub v_{faE} auf den Schleifvorschub v_{fa} reduziert. Das Werkstück wird am Prozesspunkt W lediglich mit axialer Vorschubgeschwindigkeit v_{fa} erreicht, um eine Überlastung und somit eine mögliche Zerstörung des Systems Schleifscheibe-Werkstück auszuschließen.

Aufgrund der Produktvielfalt können unterschiedliche Flächenverhältnisse und somit beliebige Zerspanungsvolumina zwischen der Werkstückober- und Werkstückunterseite entstehen. Die Auswirkungen auf Quer-Seiten-Doppelplanschleifverfahren werden exemplarisch mit folgender praxisnaher Auslegung des Schleifaufmaßes für ein Flächenverhältnis von 1:2 erklärt: Aufgrund des Postulates „Zerspanungsvolumen oben = Zerspanungsvolumen unten“ ist das

Schleifaufmaß $\Delta h_{Wo} = 2 \cdot \Delta h_{Wu}$ zu wählen. Somit ergibt sich bei konstanten Schleifscheibendrehzahlen dasselbe Zerspanungsvolumen wie bei dem Flächenverhältnis 1:1.

Bei kreisrunden Werkstücken mit gleichen Flächenanteilen auf der Ober- und der Unterseite ist das Aufmaß beider Seiten entsprechend gleich vorzunehmen. Bild 4.2 zeigt einige Auslegungen des Schleifaufmaßes.

4.1 Schleifzeit und Hauptzeit

Unter Einbeziehung der größtmöglichen Produktivität, das heißt, der entsprechenden Schleifzeiten bei dem Flächenverhältnis 1:2, bedeutet die Erhöhung des Schleifaufmaßes auf $\Delta h_{Wo} = 2 \cdot \Delta h_{Wu}$, dass nach Bild 4.2 insgesamt drei Skalenteile zurückgelegt werden müssen. Dem gegenüber steht das Flächenverhältnis 1:1, in dem zwei Skalenteile mit dem Schleifvorschub v_{fa} zurückgelegt werden müssen. Damit errechnet sich die Schleifzeit t_c zu:

Flächenverhältnis: 1:1

$$t_c = \frac{(\Delta h_{Wo} + \Delta h_{Wu})}{v_{fa}} + \frac{l_v}{v_{fa}} = \frac{2 \cdot \Delta h_{Wu}}{v_{fa}} + \frac{l_v}{v_{fa}}. \quad (4-1)$$

Flächenverhältnis: 1:2

$$t_c = \frac{3 \cdot \Delta h_{Wu}}{v_{fa}} + \frac{l_v}{v_{fa}}. \quad (4-2)$$

Somit verlängert sich die Schleifzeit bei Vernachlässigung von l_v/v_{fa} in dem hier verwendeten Beispiel um 50 Prozent.

Die Schleifzeit t_c kann für Maschinentypen mit festgelegten Schnittgeschwindigkeitsstufen v_c nicht mehr optimiert werden. Die Toleranzen sind nur über eine Anpassung des Schleifaufmaßes zwischen Werkstückober- und Werkstückunterseite zu erreichen. Die Hauptzeit t_h errechnet sich aus der Schleifzeit t_c zuzüglich der Verfahzeit im Eilvorschub bis zum Umschaltpunkt auf den Schleifvorschub.

Bei Maschinen mit stufenlos regelbaren Schleifspindeln setzt an dieser Stelle die mögliche Optimierung der Hauptzeiten ein, indem das Schleifaufmaß auf das minimal notwendige $\Delta h_{Wo} = \Delta h_{Wu}$ reduziert wird. Es gilt, wie in Bild 4.2 gezeigt, die Reduzierung des Zerspanungsvolumens auf der Werkstückoberseite zu

$$\Delta V_{Wo} = \frac{\Delta V_{Wu}}{2}. \quad (4-3)$$

oder wiederum zu: $\Delta h_{Wo} = \Delta h_{Wu}$. Somit errechnet sich die Hauptzeit nach Einstellen eines Drehzahlverhältnisses von $\omega_o < \omega_u$ wieder nach (4-1).

An dieser Stelle wird eine Restriktionsanalyse notwendig, um die Beschränkungen seitens des Prozesses, der Schleifscheiben, des Werkstoffes und der Maschine zu ermitteln. Erst wenn alle Restriktionen ermittelt wurden kann ein gesamtwirtschaftliches Lösungsfeld für den Prozess erstellt werden.

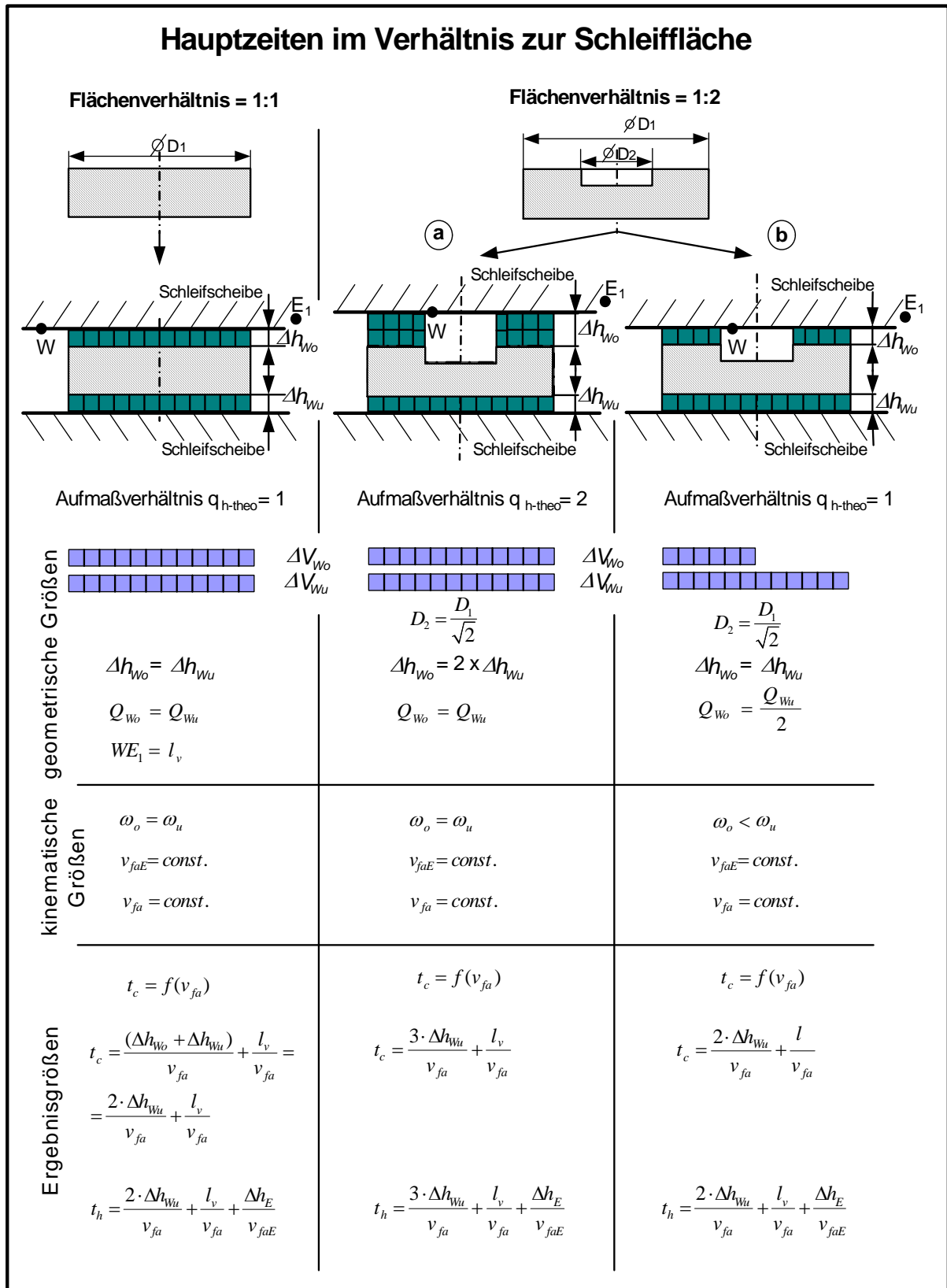


Bild 4.2: Prozesskenngrößen des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens

4.2 Aufmaßverhältnis q_h

Der Prozess Quer-Seiten-Doppelplanschleifens ist hinsichtlich der erreichbaren Toleranzen stark abhängig von der Auslegung des Aufmassverhältnisses

$$q_{htheo} = \frac{\Delta h_{w0}}{\Delta h_{wu}} \quad (4-4)$$

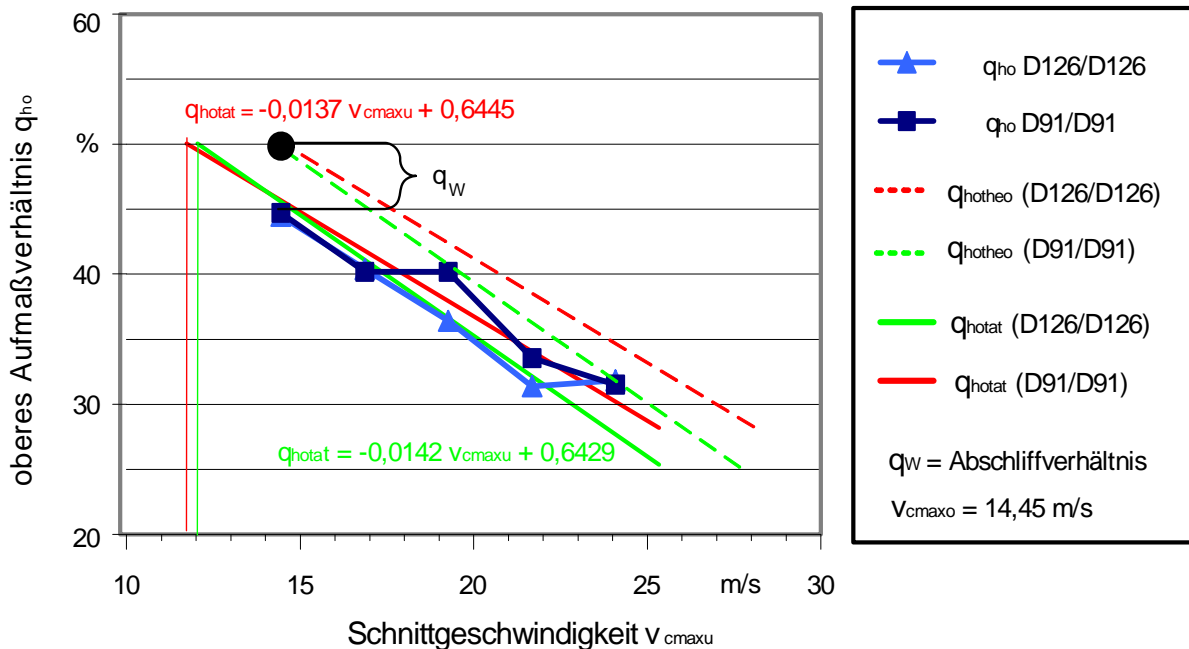


Bild 4.3: oberes Aufmaßverhältnis q_{ho} in Abhängigkeit der unteren Schnittgeschwindigkeit v_{cmaxu} der Quer-Seiten-Doppelplanschleifmaschine „Prinzip Wendt“

Durchgeführte Versuche für das Quer-Seiten-Doppelplanschleifen „Prinzip Wendt“ sollen den Zusammenhang zwischen dem oberen und dem unteren Aufmassverhältnis darstellen. Das Ergebnis des tatsächlichen oberen Aufmassverhältnisses q_{hotat} für die Schleifscheibenkörnungen D126 für die untere und die obere Schleifscheibe zeigt einen deutlich linearen Verlauf, wie in Bild 4.3 dargestellt. Bei einer Erhöhung der unteren Schnittgeschwindigkeit v_{cu} im betrachteten Bereich von 15 bis 25 m/s fällt das obere Aufmaßverhältnis q_{ho} von 45 auf 30 Prozent ab. Erst bei dem Überschreiten einer Grenzschnittgeschwindigkeit im Bereich von $v_{cmaxu} = 20$ bis 25 m/s verlässt das Ergebnis aufgrund der Überlastung der Schleifscheibe durch Zusetzen der Spanräume die lineare Funktion. Auf der Oberfläche der Schleifscheibe findet sich ein Belag aus abgeschliffenen Partikeln. Das im Versuch stetig steigende Zeitspannungsvolumen der unteren Schleifscheibe bei jeweils konstanter axialer Vorschubgeschwindigkeit v_{fa} kann offensichtlich ab einer Schnittgeschwindigkeit von über $v_{cmax} = 20$ m/s von der Kühlschmierung der Schleifmaschine nicht mehr bewältigt werden.

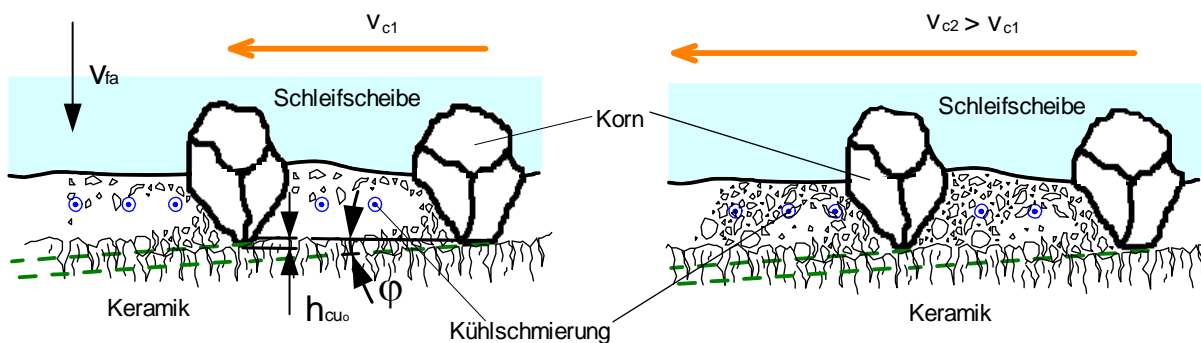


Bild 4.4: Spanräume und Korneingriffswinkel

4.3 Einfluss des Abschleißverhältnisses auf Zerspanvolumen und Toleranzen

Bild 4.3 ist weitere wichtige Erkenntnis dem Bereich der Schnittgeschwindigkeit von $v_{cmax-o}=14,45$ m/s zu entnehmen. Eigentlich sollte hier das Aufmaßverhältnis bei genau 50 Prozent liegen, da beide Schleifscheiben die gleiche Schnittgeschwindigkeit besitzen. An diesem Punkt ist jetzt das definierte Abschleißverhältnis q_w zu sehen. Aufgrund des nicht gleichen Abschleißes zwischen oberer und unterer Schleifscheibe bei konstanten Schnittgeschwindigkeiten verschiebt sich auch das obere tatsächliche Aufmaßverhältnis q_{hotat} um den Betrag des Abschleißverhältnisses q_w . Aus diesem Grund ist es wichtig im Prozess Quer-Seiten-Doppelplanschleifen die obere Schnittgeschwindigkeit auf die neue berichtigte Schnittgeschwindigkeit $v_{cq_w} = v_c + v_c \cdot (1 - q_w)$ zu setzen. Jetzt entsteht bei exakt definierten Schleifaufmaßen wiederum ein produktionsrelevanter Vorteil. Die Bauteile können jetzt trotz unterschiedlicher Flächenverhältnisse unorientiert in Lage dem Schleifspalt zugeführt werden (Bild 4.5). Solange das Postulat „Zerspanungsvolumen oben = Zerspanungsvolumen unten“ beachtet wird, werden die Teile innerhalb der benötigten Toleranzen fertigbar.

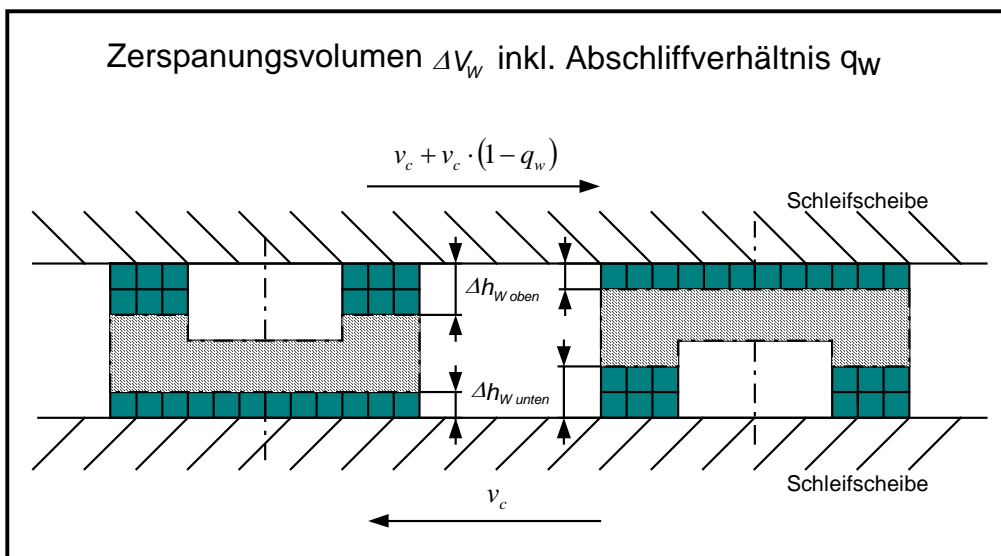


Bild 4.5: Schnittgeschwindigkeitsanpassung um den Betrag des ermittelten Abschleißverhältnisses

Die Ergebnisse dieser Optimierung sind in Bild 4.6 zu finden. Es wurden jeweils vier Teile innerhalb eines Schleifvorgangs bearbeitet. Der bei einer Schnittgeschwindigkeit von 15 m/s zerspannte Werkstoff war Aluminiumoxidkeramik. Der Schleifdruck lag bei 20 N/cm². Die verwendeten Schleifscheiben waren kunstharzgebunden mit einer Diamantkörnung D91 (mittlere Korngröße der Siebung 91µm). Klassisch geschliffene Werkstücke erreichen aufgrund der Vorschubsteuerung zwar das gleiche Endmaß, jedoch mit einem Abschleißunterschied zwischen unten und oben von 5 Prozent. Das Ergebnis der Werkstücke mit um q_w angepasster Schnittgeschwindigkeit liegt bei genau 50 Prozent. Die Belegung B wurde hierbei zu 12 Prozent errechnet. Dieser Wert ist das Verhältnis der gesamten Werkstückfläche zur Schleifscheibenfläche und ein Hinweis auf die Belastung der Schleifscheibe hinsichtlich vorhandenen Abschleißes und der benötigten Kühlschmierstoffmenge.

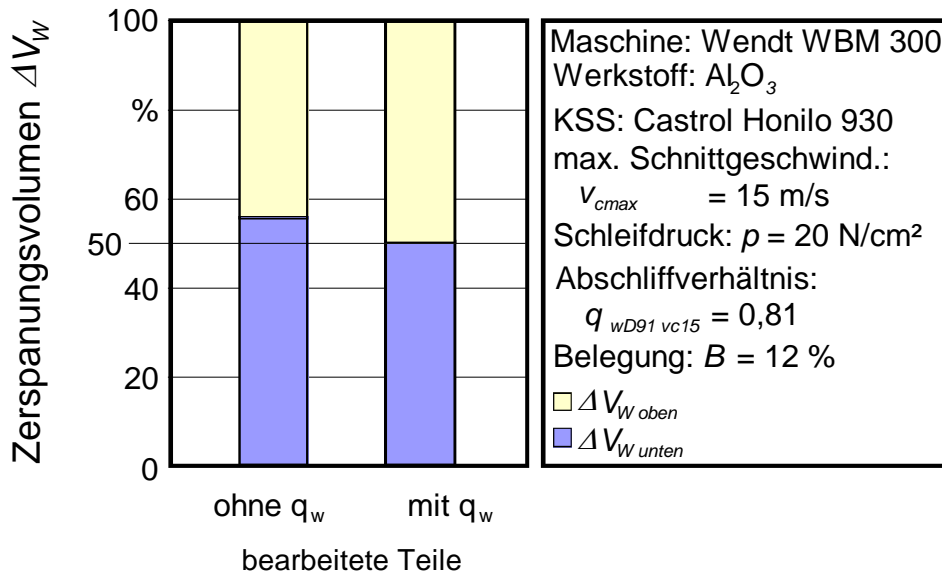


Bild 4.6: Einfluss des Abschleißverhältnisses auf das Zerspanvolumen

4.4 Potenziale für die Großserienfertigung

Insgesamt können folgende Vorteile für die industrielle Großserienfertigung erarbeitet werden: Verbesserung des Schleifergebnisses um eine Zehnerpotenz.

Tabelle 1: Schleifergebnis

	Schleifaufmaß Werkstück	Schleifergebnis			
		ohne q_w	Abweichung	mit q_w	Abweichung
oben	0,2	0,18	0,02	0,1	0,001
unten	0,2	0,22	0,02	0,1	0,001

alle Maße in mm

Die gefertigten Werkstücke wurden auf $1\mu\text{m}$ genau vorsortiert um eine entsprechend fähige Aussage zu erzielen. Das Schleifaufmaß lag bei 0,2 mm pro Seite. Es wurden jeweils vier Werkstücke ungerichtet gleichzeitig geschliffen. Die Grundgesamtheit der analysierten Teile lag bei 1000 Stück. Das Schleifergebnis ohne Abschleißverhältnis q_w ergab den erwarteten Wert von 0,18 mm Abtrag auf der oberen Schleifscheibe und 0,22 mm auf der unteren Schleifscheibe. Das heißt es entstand eine Abweichung von jeweils 0,02mm pro Werkstückseite. Die Gesamtstreuung der Werkstückhöhen lag bei $2\mu\text{m}$. Ganz anders sieht das Ergebnis mit dem Korrekturfaktor für das Abschleißverhältnis q_w aus. Hierbei war eine Genauigkeit pro Seite von $1\mu\text{m}$ feststellbar. Auch hier lag die Gesamtstreuung der Werkstückhöhen bei $2\mu\text{m}$. Hierbei werden jetzt Prozessfähigkeiten bis zu sechs Sigma möglich.

Weiterer Vorteil: Kein lagerichtiges Zuführen der Werkstücke mehr nötig → Entfall des Fertigungsschrittes „Seitenrichtiges Auflegen“.

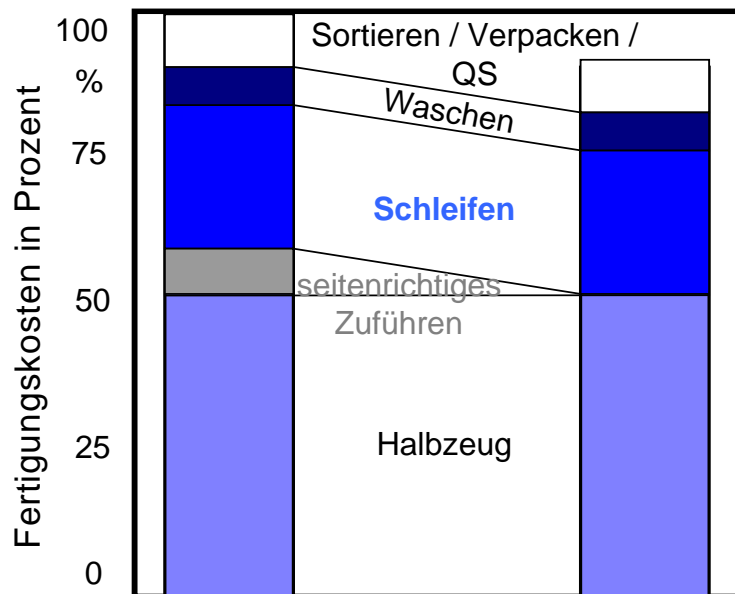


Bild 4.7: Einsparung der Auflegkosten

Die Betrachtung der Fertigungskosten zeigt eine Kostenersparnis von ca. 10 Prozent durch das Weglassen eines Arbeitsschrittes. Die Betrachtung der Ersparnis durch prozesssicheres Einhalten von Werkstücktoleranzen konnte noch nicht ermittelt werden und bleibt späteren Untersuchungen vorbehalten.

Literatur

- [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 zyklodischer Wirkbewegung 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 Flachsleifen. 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.: Flachsleifverfahren für Kleinteile aus harten Werkstoffen. wt- Z. ind. Fertigung. 71, 1981, S. 391-396.