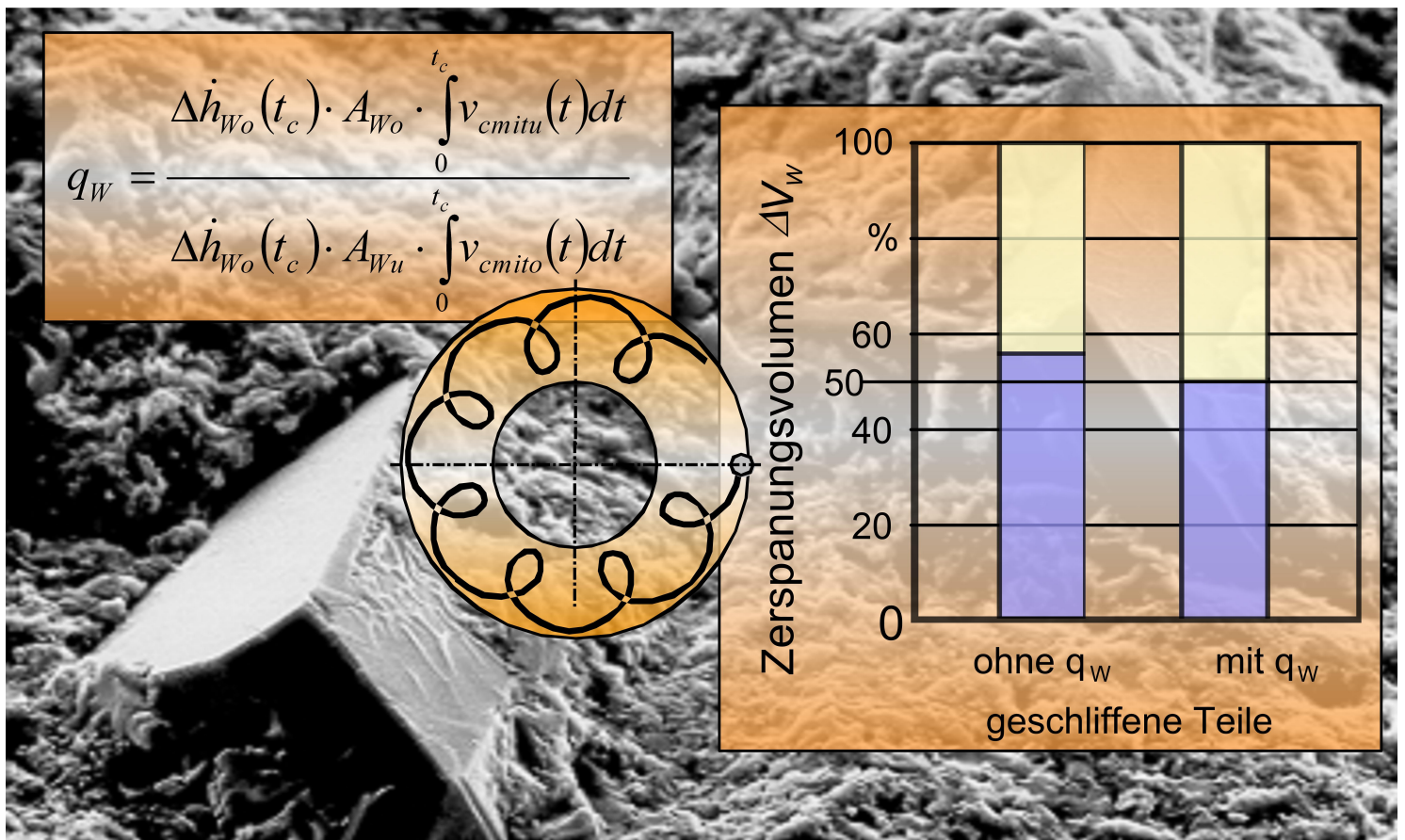


Präzisionsplanschleifen von Al_2O_3 -Keramik unter Produktionsbedingungen



Präzisionsplanschleifen von Al₂O₃-Keramik unter Produktionsbedingungen

An der Fakultät Maschinenwesen der
Technischen Universität Dresden,
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs
eingereichte Dissertation

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Carsten Rußner
geboren am 03. November 1965 in Lauf an der Pegnitz

Promotionsausschuss:

Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. habil. H. Weise
erster Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. habil. K. Künanz
zweiter Gutachter:	Prof. Dr.-Ing., Prof. eh. J. Dietrich
dritter Gutachter:	Dr.-Ing. P. Stingl

Tag der Verteidigung: 22. Mai 2006

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2006

Zugl.: (TU) Dresden, Univ., Diss., 2006

ISBN 3-86537-900-1

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2006

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2006

Gedruckt auf säurefreiem Papier

ISBN 3-86537-900-1

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand berufsbegleitend an der Fakultät Maschinenwesen am Institut für Produktionstechnik, Professur Laser- und Abtrenntechnik der TU-Dresden während meiner Tätigkeit als Leiter der Prozessinnovation des Geschäftsbereichs Systemtechnik der CeramTec AG in Lauf a. d. Pegnitz.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus Künanz gilt mein besonderer Dank für seine freundschaftliche Unterstützung, seine großzügige Förderung und seinen fachlichen Rat, sowie seine viele freie Zeit, mit der er diese Arbeit begleitet hat.

Herrn Prof. Dr.-Ing., Prof. eh. Jochen Dietrich danke ich für die Übernahme des Korreferats und die wissenschaftlich interessante Diskussion meiner Arbeit. Meinem dritten Gutachter Herrn Dr. Peter Stingl, Leiter der Entwicklung der CeramTec AG in Lauf, danke ich das über Jahre entgegengebrachte Interesse an meiner Arbeit, sowie die Schaffung der Möglichkeiten, eine berufsbegleitende Promotion genehmigt zu erhalten sowie für die eingehende Durchsicht und seine wertvollen Anregungen. Weiterhin bedanke ich mich bei Herrn Dipl.-Phys. Karl Billau, Geschäftsbereichsleiter der Systemtechnik für seine unermüdliche Zusprache, diese Arbeit zu beenden, die Durchsicht und Freigabe, sowie die Erlaubnis, auf Ressourcen des Geschäftsbereiches zurückgreifen zu können.

Weiterhin möchte ich Dr. Wolfgang Jaschinski, Prof. Dr. Karl-Heinz Schüller, sowie Herrn Rudolf Lorenz danken für die Befürwortung dieser Arbeit in der CeramTec AG.

Besondere Freude gaben mir die fachlichen Diskussionen und die persönliche Zusammenarbeit mit Herrn Dr.-Ing. Thomas Ardel und Herrn Roland Weikert, ohne die diese Arbeit nicht hätte entstehen können. Die Diskussionen und Abende mit Herrn Dr.-Ing. Hans Robert Meyer und Herrn Dipl.-Ing. Lutz Giese brachten mich so manchen Schritt weiter. Mein weiterer Dank gilt Herrn Dr.-Ing. Thomas Magg und Herrn Dipl.-Ing. Bernhard Stähli.

Mein freundschaftlicher Dank gilt den Kollegen und Freunden innerhalb der CeramTec AG, die diese Arbeit durch fachlichen und persönlichen Gedankenaustausch gefördert haben. Insbesondere sind hier Frau Dipl.-Ing. Elke Vitzthum, Herr Dipl.-Ing. Thilo Steichele, Herr Dipl.-Ing. Hans Brigasky, Herr Dipl.-Ing. Klaus Popp, Herr Dipl.-Ing. Franz Lenz, Herr Klaus Begert, Herr Roland Litz und Herr Schüllner zu nennen. Mit Ihrer stets engagierten und gewissenhaften Mitarbeit haben insbesondere meine studentischen Mitarbeiter, Carsten Uch, Ulli Blöchinger, Karin Pohley, Helga Brand, Stefan Bitter und Sebastian Langhans einen Grundstock für diese Arbeit gelegt.

Weiterhin möchte ich mich bei Herrn Dr.-Ing. Holger Eichhorn bedanken, der mich nach Dresden gebracht hat und dem es leider aus gesundheitlichen Gründen nicht mehr vergönnt war, mich durch meine gesamte Dissertation zu geleiten.

Auch danke ich meinen Eltern Traudl und Klaus Rußner, die durch die Förderung meiner Ausbildung die Grundlagen für diese Arbeit geschaffen haben. Meiner Frau Ina Rußner danke ich besonders für die nächtelange Durchsicht des Manuskriptes.

Lauf, im Mai 2006

Carsten Rußner

Präzisionsplanschleifen von Al₂O₃-Keramik unter Produktionsbedingungen

0	Formelzeichen und Abkürzungen	4
0.1	Abkürzungen	4
0.2	Lateinische Formelzeichen	4
0.3	Griechische Formelzeichen	8
1	Einleitung	10
2	Stand der Erkenntnisse	12
2.1	Keramische Werkstoffe	12
2.1.1	Allgemeines	12
2.1.2	Aluminiumoxid	12
2.1.3	Aluminiumoxidwerkstoffsystem für Dicht- und Regelscheiben	13
2.1.4	Herstellverfahren von Oxidkeramik	14
2.2	Seiten-Doppelplanschleifverfahren für Großserien	15
2.2.1	Technologie des Seiten-Planschleifens	15
2.2.2	Seiten-Planschleifen von Aluminiumoxid	21
2.3	Quer-Seiten-Doppelplanschleifen „Prinzip Wendt“	22
2.3.1	Technologie	22
2.3.2	Anwendungen	24
2.4	Planschleifen mit Planetenkinematik	24
2.4.1	Technologie	24
2.4.2	Anwendungen	30
2.5	Quer-Seiten-Doppelplanschleifen Funktionsprinzip „Diskus“	30
2.5.1	Technologie	30
2.5.2	Anwendungen	31
2.6	Einordnung der Schleifverfahren ins Normenwerk nach DIN	32
2.6.1	Wirk-, Vorschub- und Schnittgeschwindigkeiten	32
2.6.2	Vorschlag zur Einordnung der Verfahren in das Normenwerk	34
3	Zielsetzung und Arbeitsschwerpunkte	36
4	Versuchsrandbedingungen und Messmethodik	40
4.1	Versuchsmaschinen, Kühlschmiersystem, prinzipielle Arbeitsabläufe	40
4.1.1	Quer-Seiten-Doppelplanschleifmaschine WBM 200	40
4.1.2	Planschleifen mit Planetenkinematik	43
4.1.3	Kuschlsmiersystem	46
4.2	Schleifscheiben	47
4.3	Versuchswerkstücke	50
4.4	Versuchsdurchführung	51
4.5	Technologische Kenngrößen und deren Erfassung	55

4.5.1	Messdatenerfassung	57
4.5.2	Verfahrensunabhängige Eingangskenngrößen	57
4.5.3	Eingangskenngrößen Quer-Seiten-Doppelplanschleifen „Prinzip Wendt“	60
4.5.4	Eingangskenngrößen beim Planschleifen mit Planetenkinematik	63
4.5.5	Verfahrensunabhängige Prozesskenngrößen	64
4.5.6	Prozesskenngrößen Quer-Seiten-Doppelplanschleifen „Prinzip Wendt“	67
4.5.7	Prozesskenngrößen beim Planschleifen mit Planetenkinematik	67
4.5.8	Ergebnisgrößen	70
5	Quer-Seiten-Doppelplanschleifen “Prinzip Wendt”	73
5.1	Technologische Bewertung	73
5.1.1	Technologiekenngößen	74
5.1.2	Programm zur Berechnung eines durchschnittlichen Flächenintegrals	78
5.1.3	Prozesskenngrößen	81
5.2	Bewertung der Werkstückqualität	96
5.2.1	Maß- und Formgenauigkeit	97
5.2.2	Oberflächenqualität	100
5.2.3	Einflussgrößen auf das Arbeitsergebnis	100
5.3	Ökonomische Bewertung	103
5.3.1	Zeitspanungsvolumen	103
5.3.2	Bezogene Werkzeugkosten	104
5.3.3	Schleifverhältnis	105
5.3.4	Produktivität	106
5.3.5	Fertigungskosten je Stück	106
6	Quer-Seiten-Doppelplanschleifen mit Planetenkinematik	109
6.1	Technologische Bewertung	109
6.1.1	Technologiekenngößen	109
6.1.2	Prozesskenngrößen	111
6.2	Bewertung der Werkstückqualität	114
6.2.1	Maß- und Formgenauigkeit	115
6.2.2	Oberflächenqualität	117
6.3	Ökonomische Bewertung	118
6.3.1	Zeitspanungsvolumen	118
6.3.2	Bezogene Werkzeugkosten	118
6.3.3	Schleifverhältnis G	119
6.3.4	Produktivität	120
6.3.5	Fertigungskosten je Stück	121
7	Richtlinien für den wirtschaftlichen Einsatz unter Produktionsbedingungen	123
7.1	Fertigungsnahe Kennzahlen zur Prozesssteuerung	123
7.1.1	Ablauf der Schleifoperation mit Aufteilung des Schleifaufmaßes	123
7.1.2	Hauptzeiten	124
7.2	Prozessführungsstrategie	126
7.2.1	Prozesskette Quer-Seiten-Doppelplanschleifen und Polieren	126
7.2.2	Einfluss der Vorbearbeitung auf die Polierzeit	128
7.3	Verfahrensvergleich	130
7.3.1	Stückzeiten	132

7.3.2	Kostenvergleich der untersuchten Quer-Seiten-Doppelplanschleifverfahren	132
7.3.3	Verbesserung der Qualität	133
8	Zusammenfassung und Ausblick auf weiterführende Untersuchungen	143
9	Schrifttum	146

0 FORMELZEICHEN UND ABKÜRZUNGEN

0.1 Abkürzungen

Al ₂ O ₃	Aluminiumoxid
CBN	kubisches Bornitrid
FEPA	Federation of European Producers of Abrasives
KSS	Kühlschmierstoff
NC	Numeric Control
REM	Rasterelektronenmikroskop
Si ₃ N ₄	Siliciumnitrid
SiC	Siliciumcarbid
SiSiC	siliciuminfiltriertes Siliciumcarbid

0.2 Lateinische Formelzeichen

a	mm	Abstand zweier Spiralbahnen
a_c	m/s ²	Beschleunigung eines Werkstückpunktes auf einer Schleifbahn
a_{co}	m/s ²	Beschleunigung eines Werkstückpunktes auf einer Schleifbahn der oberen Schleifscheibe
a_{cu}	m/s ²	Beschleunigung eines Werkstückpunktes auf einer Schleifbahn der unteren Schleifscheibe
a_e	mm	Eingriffsgröße
a_m	m/s ²	mittlere Beschleunigung eines Werkstückpunktes
a_s	m/s ²	skalare Beschleunigung in Richtung der Bahnkurve
a_W	mm	Abstand zweier Werkstücke
a_{Ws}	mm	Abstand eines Punktes vom Werkstückzentrum
a_Z	mm	Abstand zwischen Schleifscheiben- und Halterzentrum
A_g	mm ²	Kontaktfläche beim Schleifen
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_{Wges}	mm ²	gesamte Werkstückfläche
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
C	Karat/cm ³	Diamantkonzentration (C100 entspricht 4,4 Karat/cm ³)
d_S	mm	Schleifscheibendurchmesser
d_{Sa}	mm	Außendurchmesser des Schleifscheibenbelages
d_W	mm	Werkstückdurchmesser
D	µm	mittlere Diamantkörnungsgroße
E	GPa	Elastizitätsmodul
E_1	mm	Abstellpunkt
f_a	µm	Vorschub quer zur Werkstückoberfläche
f_E	µm	Ebenheitsfehler
f_k	µm	Planparallelitätsabweichung
f_W	mm	Vorschub längs zur Werkstückoberfläche
F	N	Schleifkraft
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
F_{nWn}	N	bezogene Schleifnormalkraft in axialer Richtung
F_{osz}	N	Oszillationskraft
F_t	N	tangentiale Schleifkraft
F_f	N	Vorschubkraft
F_x	N	Schleifkraft in x-Richtung
F_y	N	Schleifkraft in y-Richtung
F_z	N	Schleifkraft in z-Richtung
F_σ	N	Vorspannung des Kraftsensors
g_W	mm	Gestaltfunktion
g_W'	%	Gestaltfunktion bezogen auf die größtmögliche Kontaktlänge l_g
G		Schleifverhältnis
Δh_W	mm	Teilehöhenreduktion, Aufmaß
Δh_{Wo}	mm	Teilehöhenreduktion auf der Werkstückoberseite
Δh_{Wp}	µm	Teilehöhenreduktion auf der Werkstückoberseite beim Polieren
Δh_{Wu}	mm	Teilehöhenreduktion auf der Werkstückunterseite
$\Delta h'_W$	mm/m	wegbezogene Teilehöhenreduktion
$\Delta \dot{h}_W$	mm/s	zeitbezogene Teilehöhenreduktion
h_{co}	µm	Spanungsdicke auf der Werkstückoberseite
h_{cu}	µm	Spanungsdicke auf der Werkstückunterseite
h_{cuges}	µm	gesamte theoretisch berechnete Spanungsdicke
h_s	mm	Höhe Schleifscheibenbelag
h_W	mm	Werkstückhöhe
H_{V10}	MPa	Vickershärte unter 100 N Belastung

i		Anzahl Teile je Zyklus
i_{osz}		Anzahl Oszillationshübe
i_W		Anzahl der geschliffenen Werkstücke
I_W	A	Stromaufnahme
j		Anzahl Umläufe je Zyklus
k_c	N/mm ²	spezifische Schnittkraft
K		kinematischer Faktor
K_{Ic}	MPa $\sqrt{m}$	Bruchzähigkeit, kritischer Spannungsintensitätsfaktor bei Rissöffnungsmodus I
K_A	€/a	kalkulatorische Abschreibung je Jahr
K_E	€/a	Energiekosten je Jahr
K_F	€/Stück	Fertigungskosten je gefertigter Einheit
K_i		Schleifscheibenklasse mit dem Index i
K_I	€/a	Instandhaltungskosten je Jahr
K_L		Winkelgeschwindigkeitsverhältnis
K_{Lohn}	€/a	Lohnkosten je Jahr
K_{MH}	€/h	Maschinenstundensatz
K_{MHW}	€/h	Maschinenstundensatz inklusive Werkzeugkosten
K_R	€/a	Raumkosten je Jahr
K_S		Korrekturfaktor
K_x	€/a	Restfertigungsgemeinkosten je Jahr
K_Z	€/a	kalkulatorische Zinsen je Jahr
l_g	m	Kontaktlänge beim Schleifen
l_r	mm	Messstrecke Tastschnittmessgerät
$l_{\ddot{u}}$	mm	Überlauf
l_v	mm	Sicherheitshöhe
m_w	kg	Masse des Werkstückes
m_{Wn}	kg	Masse des Werkstückes nach der Bearbeitung
m_{Wv}	kg	Masse des Werkstückes vor der Bearbeitung
M_u	Nm	Antriebsmoment der unteren Schleifscheibe
n	min ⁻¹	Drehzahl
n_i	min ⁻¹	Drehzahl des Innenstiftkranzes
n_{max}	min ⁻¹	maximale Drehzahl
n_o	min ⁻¹	Drehzahl der oberen Schleifscheibe
n_u	min ⁻¹	Drehzahl der unteren Schleifscheibe
N_L		Drehzahlverhältnis
p_c	N/mm ²	Schleifdruck
p_{cmax}	N/mm ²	maximaler Schleifdruck
p_e	N/cm ²	Eingriffsdruck
p_p	N/mm ²	Polierdruck
P_c	kW	Schnittleistung
P_{Mot}	kW	Motorleistung
P_w	W	Antriebsleistung
P_{Wmit}	mm	mittlere Bahnlänge

q		Geschwindigkeitsquotient
q_{hotheo}		theoretisches oberes Aufmaßverhältnis
q_{ho}		oberes Aufmaßverhältnis
q_{hotat}		tatsächliches oberes Aufmaßverhältnis
q_W		Abschliffverhältnis
q_{Wtat}		tatsächlich gemessenes Abschliffverhältnis
$q_{Wtat D91}$		tatsächlich gemessenes Abschliffverhältnis für die Schleifscheibenkörnung D91
$q_{Wtat D126}$		tatsächlich gemessenes Abschliffverhältnis für die Schleifscheibenkörnung D126
q_{Wtheor}		theoretisches Abschliffverhältnis
Q_{KS}	l/min	Fördermenge des Kühlschmierstoffes
Q_W	mm ³ /s	Zeitspanungsvolumen
Q_W''	mm ³ /(mm ² ·s)	bezogenes Zeitspanungsvolumen auf die Schleifscheibenbelagfläche
$r(t)$	mm	Abstand eines Werkstückes vom Schleifscheibenmittelpunkt
r	mm	Innenradius des Werkstückes
r_1	mm	Bahnform im Prozessraum am Punkt 1
r_2	mm	Bahnform im Prozessraum am Punkt 2
r_a	mm	Teilkreisradius des äußeren Stiftkranzes
r_i	mm	Teilkreisradius des inneren Stiftkranzes
r_{Sa}	mm	Außenradius des Schleifscheibenbelages
r_{Si}	mm	Innenradius des Schleifscheibenbelages
r_{Sm}	mm	Radius der Schleifscheibenbelagmitte
R	mm	Außenradius des Werkstückes
R_a	µm	arithmetischer Mittenrauwert
R_t	µm	maximale Rautiefe
Δs_A	m	Schleifweg des Werkstückes A
Δs_B	m	Schleifweg des Werkstückes B
s	m	Schleifweg
s_{21}	m	Bahnlänge
s_{0P}	mm	Bogenlänge
s_{osz}	mm	Oszillationsweg
S_{hW}	µm	Höhenstreuung einer Werkstückcharge
t_A	s	Ausfeuerzeit
t_c	s	Schleifzeit
t_{cp}	min	Polierzeit
t_E	h	Maschinenzeit je Werkstück
t_{fa}	s	Vorschubzeit
t_h	s	Hauptzeit eines gesamten Schleifzyklus
t_{osz}	s	Oszillationszeit
T_a	%	Traganteil
T_{KS}	°C	Temperatur Kühlschmierstoff
T_N	h	Nutzungszeit

T_x	°	Tiltungswinkel zweier Schleifscheiben zueinander
U	V	elektrische Netzspannung
v	m/s	Bahngeschwindigkeit
v_c	m/s	Schnittgeschwindigkeit
v_{cmax}	m/s	Schnittgeschwindigkeit am maximalen Schleifscheibendurchmesser
v_{cmaxo}	m/s	Schnittgeschwindigkeit der oberen Schleifscheibe am maximalen Schleifscheibendurchmesser
v_{cmaxu}	m/s	Schnittgeschwindigkeit der unteren Schleifscheibe am maximalen Schleifscheibendurchmesser
v_{cmit}	m/s	mittlere Schnittgeschwindigkeit
v_{cpmit}	m/s	mittlere Schnittgeschwindigkeit beim Polieren
v_{co}	m/s	Schnittgeschwindigkeit der oberen Schleifscheibe
v_{cu}	m/s	Schnittgeschwindigkeit der unteren Schleifscheibe
v_{fa}	mm/min	axiale Vorschubgeschwindigkeit quer zur Werkstückoberfläche
v_{faE}	mm/min	axiale Vorschubgeschwindigkeit quer zur Werkstückoberfläche im Eilgang
$v_{flängs}$	mm/min	Vorschubgeschwindigkeit längs zur Werkstückoberfläche
v_{fosz}	mm/min	Vorschubgeschwindigkeit längs zur Werkstückoberfläche „Prinzip Wendt“
v_{fquer}	mm/min	Vorschubgeschwindigkeit quer zur Werkstückoberfläche
v_{ft}	mm/min	tangentiale Vorschubgeschwindigkeit
v_{fW}	mm/min	Vorschubgeschwindigkeit des Werkstückes
v_{mit}	m/s	mittlere Bahngeschwindigkeit eines Werkstückpunktes
$\vec{v}_{oges}$		resultierender Geschwindigkeitsvektor
v_{Ra}	mm/s	Abtastgeschwindigkeit des Tastschnittmessgerätes
V_{hyd}	l	Tankinhalt des Hydrauliköltankes
V_{KS}	l	Tankinhalt des Kühlschmiermitteltankes
V_S	mm ³	Verschleißvolumen
V_W	mm ³	Zerspanungsvolumen
V_{Wo}	mm ³	Zerspanungsvolumen auf der Werkstückoberseite
V_{Wu}	mm ³	Zerspanungsvolumen auf der Werkstückunterseite
W		Prozesspunkt bei Erreichen der Werkstückoberfläche
x	mm	Weg in x-Richtung
y	mm	Weg in y-Richtung
z_{osz}		Anzahl der Oszillationen
z_W		Anzahl der Werkstücke je Schieber / Halter

0.3 Griechische Formelzeichen

α	10 ⁻⁶ K ⁻¹	Längenausdehnungskoeffizient
Δ		Differenz

η	%	Wirkungsgrad
λ	W/mK	Wärmeleitfähigkeit
ρ_D	g/cm ³	Dichte Diamant
ρ_S	g/cm ³	Sinterdichte der Keramik
ρ_W	g/cm ³	Dichte Werkstoff
σ_B	MPa	Biegefestigkeit
σ_D	MPa	Bruchfestigkeit
φ	°	Winkel
ω_o	1/s	Winkelgeschwindigkeit der oberen Schleifscheibe
ω_u	1/s	Winkelgeschwindigkeit der unteren Schleifscheibe

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.

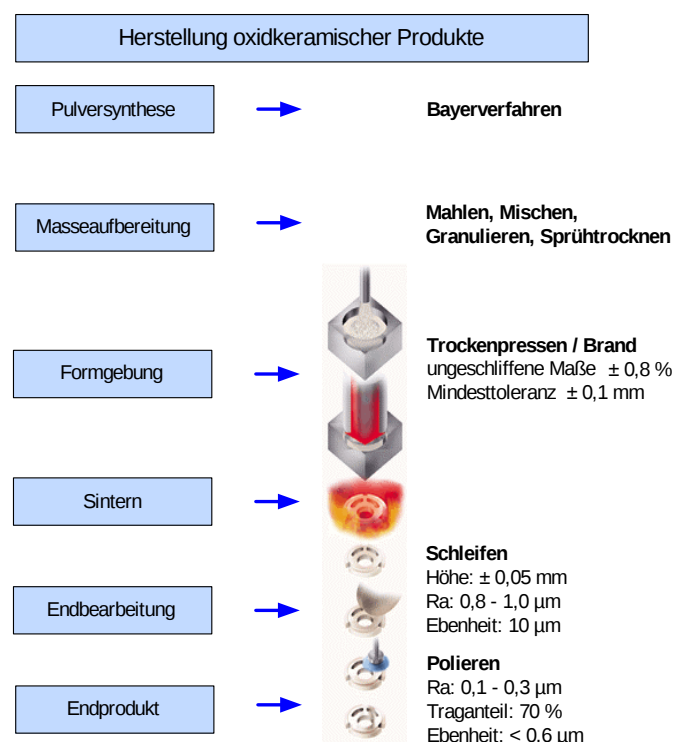


Bild 2.1: Prozesskette für die Herstellung oxidkeramischer Dichtscheiben [CT03]

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**).

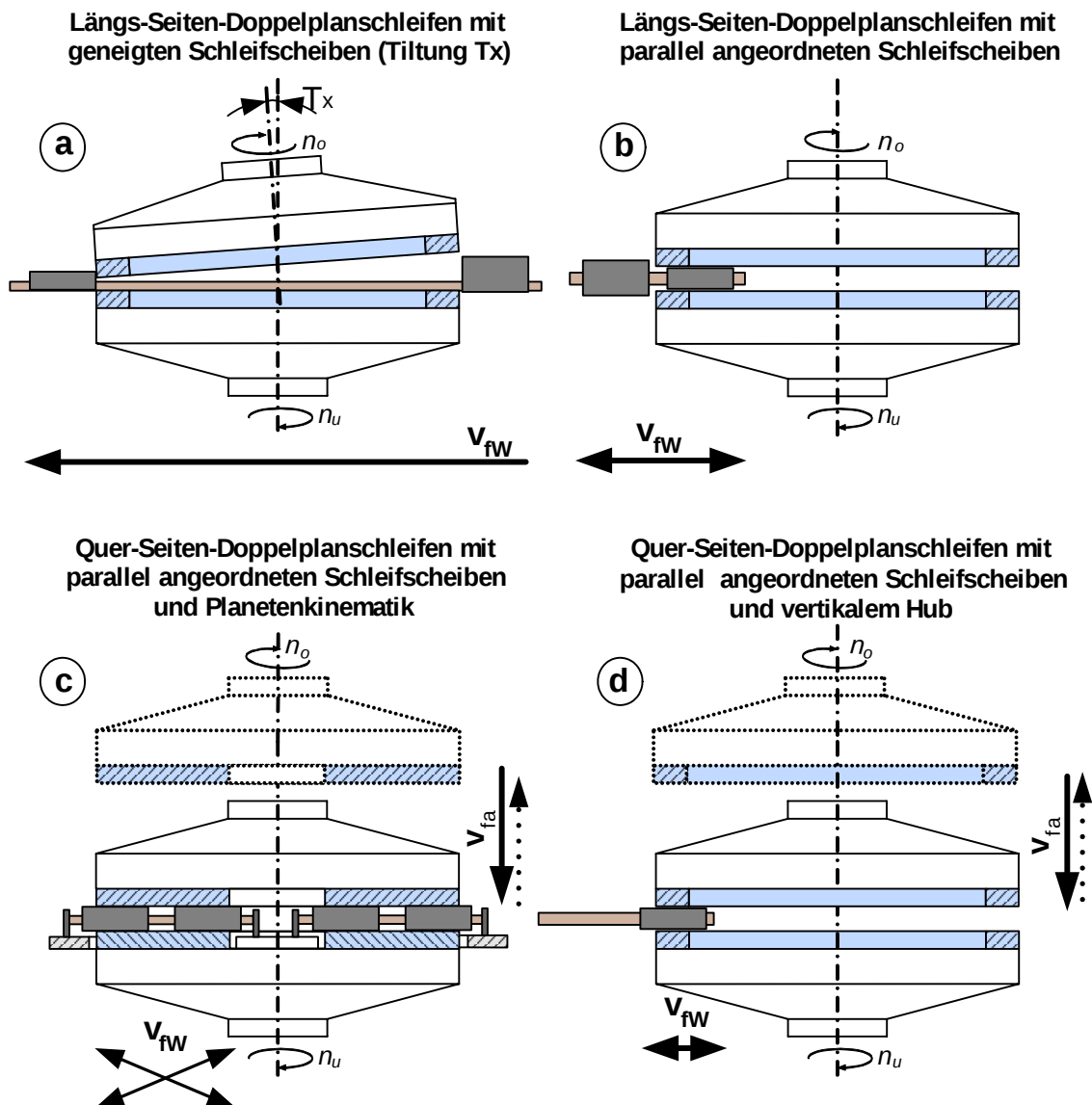


Bild 2.2: Seiten-Doppelplanschleifverfahren für den Großserieneinsatz

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

Vorschub f_a von der Größe der tangentialen Vorschubgeschwindigkeit v_{ft} abhängig. Bei den entstehenden Schleifnormalkräften konnte, bei unzureichender Auslegung der Maschine, der axiale Vorschub f_a nicht vollständig ausgeführt werden, folglich war die Produktivität eingeschränkt [Sal83, Sal76].

Einfluss des Überlaufes

Der Überlauf $l_{\bar{u}}$ des Werkstückes über die Schleifscheibe ist eine selten untersuchte Größe. Der Überlauf ist abhängig vom Schleifscheibendurchmesser, der Werkstückbreite und dem Abstand von der Schleifscheibenachse zur Werkstückachse. SALJÉ berechnete erstmals den Einfluss des Überlaufes auf die Kontaktbedingungen beim Schleifen [Sal76]. JIANG erklärte den Zusammenhang zwischen steigenden Rauheiten und Verschleiß über die Zunahme des Überlaufes $l_{\bar{u}}$, was gleichbedeutend ist mit der Veränderung der maximalen Kontaktlänge l_g (bei $l_{\bar{u}} = 0$) [Mar00]. Durch Veränderung der Überlaufwege soll die Planparallelität beeinflusst werden. Alle Werkstücke weisen eine Mittenballigkeit auf [Sal92].

Einfluss der Werkstückgeometrie und Werkstückgröße

Für den stationären Schleifprozess spielt nach grundlegenden Berechnungen von SALJÉ die Werkstückgeometrie eine entscheidende Rolle, während die Werkstückgröße einen geringen Einfluss auf das Zeitspanungsvolumen Q_w ausübt [Sal92]. Der Verlauf von Zeitspanungsvolumina und Schleifkräften als Funktion der Vorschubwege wird von geometrischen Bedingungen, wie Größe und Form des Werkstückes, mit beeinflusst. Die Werkstücke ergeben beim Durchlauf der Kontaktzone veränderliche Zeitspanungsvolumina Q_w und damit auch periodisch verlaufende Schleifkräfte F . Ein instationärer Schleifprozess entsteht. Die Geometrie der Werkstücke verändert den Anstieg und den Abfall der Zeitspanungsvolumina und damit auch der Kräfte. Kreisrunde Werkstücke verursachen bei ihrem Einlauf in die Schleifzone einen langsameren Anstieg des Zeitspanungsvolumens Q_w und der Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n als rechteckige. Zusätzlich wirkt sich die Werkstückform gravierend auf den Werkzeugverschleiß aus [Sal84].

Geometrische Kontaktlänge l_g

Im Gegensatz zum Umfangsschleifen ist beim Seiten-Planschleifen die geometrische Kontaktlänge l_g , in der sich Werkzeug und Werkstück in Kontakt befinden [Kön96], nicht konstant, sondern von der Auflagefläche des Werkstückes und der entsprechenden Bogenlänge bezüglich des Scheibenradius abhängig. **Bild 2.3** zeigt die Kontaktlänge l_g für das Umfangs- und das Seiten-Planschleifen.

Das aus den je nach Auflagefläche zugehörigen Kontaktlängen l_g gebildete Flächenintegral kann als Kriterium für den Grad des Schleifscheibenverschleißes beim Seiten-Planschleifen herangezogen werden. Aus den im Vergleich zu den jeweils dazugehörigen Radien r sehr kleinen und deshalb in der weiteren Betrachtung vereinfacht als entsprechende gerade Sehnen

behandelten Bogenlängen, der geometrischen Kontaktlängenschar l_g , wird das Flächenintegral gebildet.

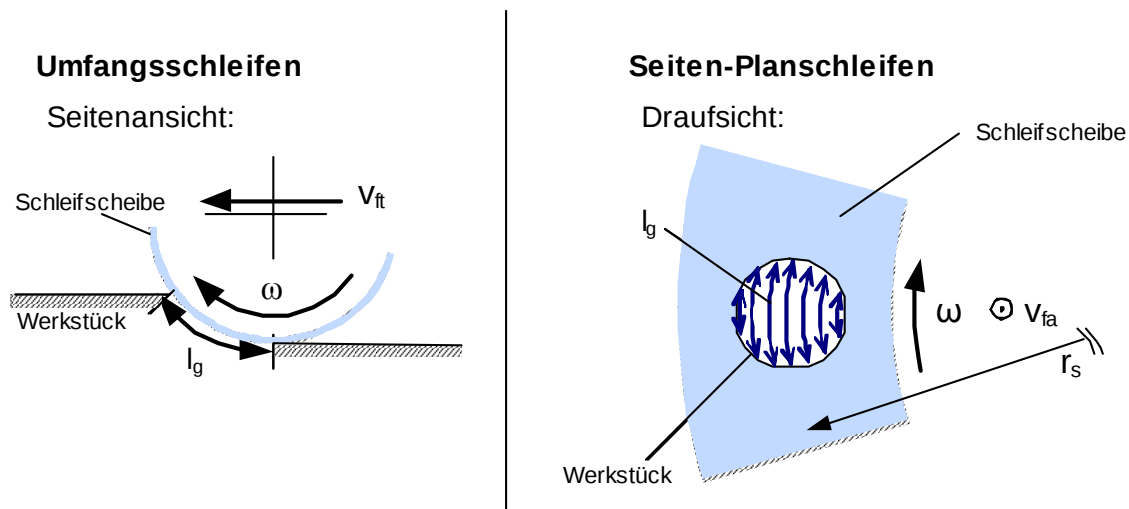


Bild 2.3: Kontaktlänge l_g für das Umfangs- und Seiten-Planschleifen

Einfluss der Diamantschleifscheibe

Beim Quer-Seiten-Doppelplanschleifen kommen bei der Bearbeitung von Aluminiumoxid-keramik die gleichen Schleifscheibenspezifikationen beziehungsweise Schleifmittel (meist Diamant) zum Einsatz wie bei anderen Verfahren. Die auf Grundkörper aus Aluminium oder Stahl aufgetragenen Schneidstoffe werden in Kunstharz-, metallischen oder keramischen Bindungen gehalten. In der Großserie werden hauptsächlich kunstharzgebundene, seltener auch keramisch gebundene Diamantschleifscheiben eingesetzt. Die Schleifscheiben können mit unterschiedlichen Belaggeometrien versehen werden. So wird mit vollflächigen, genuteten, sowie pelletierten Werkzeugen gearbeitet. Oft wird bei Schleifscheiben mit großen Flächen eine dreistufige Konzentrationsabstufung des Schleifmittels vom Innen- zum Außendurchmesser empfohlen. Auf diese Weise soll den unterschiedlichen Schnittgeschwindigkeiten über dem Schleifscheibendurchmesser und dem damit zusammenhängenden inhomogenen Verschleiß der Schleifscheibe Rechnung getragen werden. Bei pelletierten Schleifscheiben kann durch die Verringerung der Abstände der Pellets zueinander die beste Anpassung an die auftretenden Relativgeschwindigkeiten gewährleistet werden [Kar98, Stä99]. Für die Bearbeitung von kleinen Werkstücken oder dünnwandigen Ringen sind vollflächige Schleifscheiben besser geeignet [Wol98, Ard01].

Die Oberflächengüte bei kunstharzgebundenen Diamantschleifscheiben wird hauptsächlich von der Körnungsgröße beeinflusst. Mit feineren Diamantkörnungen und höheren Konzentrationen werden bessere Oberflächengüten erzeugt. Bei großen Kontaktlängen und feinen Körnungen sollen niedrige Konzentrationen eingesetzt werden, um die thermische Belastung klein zu halten [Spu89, Tio90, Fri99, Kar96, Egg01].

Bei den Seiten-Doppelpfanschleifverfahren sind die Schneiden über die gesamte Werkstückbreite und oft auch -länge und somit über eine große Kontaktfläche im Eingriff. Daraus resultieren hohe bezogene Zeitspannungsvolumina Q_w'' . Außerdem bewirkt die Oszillation der Werkstücke eine gleichmäßige Belastung des Schleifbelages. Aufgrund der daraus resultierenden überdurchschnittlichen Arbeitsgenauigkeit eignet sich dieses Verfahren für das Schleifen von Massenartikeln, wie zum Beispiel den Dichtscheiben aus Al_2O_3 . Nachteile dieses Verfahrens sind die thermische Belastung der Werkzeuge aufgrund der großen Kontaktfläche und die schlechten Zuführbedingungen des Kühlschmierstoffes in den Arbeitsraum. [Zet81, Spu89, Lie96].

2.2.2 Seiten-Planschleifen von Aluminiumoxid

Nach FRIEMUTH, TIO und INASAKI sind eine Reduzierung der Prozesskräfte und somit des Werkzeugverschleißes sowie die Verbesserung der Werkstückrauheit über die Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit v_c zu erreichen. Weiterhin resultiert aus den kürzeren Eingriffszeiten der Einzelkörner und den kleineren Spannungsdicken eine geringere Belastung der Diamantkörner [Egg01, Fri99, Ina88, Tio90].

SALJÉ und MÖHLEN untersuchten das Verschleißverhalten von Diamantschleifscheiben. Beim Schleifen von Al_2O_3 erkannten sie einen Bindungsverschleiß, verursacht durch die abrasive Wirkung der abgeschliffenen Werkstoffpartikel. Als Folge haben die Schneidkörner über das Bindungsniveau hinaus einen gleich bleibend hohen Überstand, wodurch der Kornausbruch als vorherrschende Verschleißform begünstigt wird. Bei diesen Untersuchungen wurden angeflachte Kornspitzen nur in Ausnahmefällen beobachtet [Ard01, Sal87, Möh87].

SPUR u. a. stellten für Al_2O_3 -Keramik eine bessere Schleifbarkeit fest als für andere keramische Werkstoffe. Die Schleifbarkeit sprödharter Werkstoffe wurde anhand der Bearbeitungskräfte, der erzeugbaren Oberflächengüten und des Schleifverhältnisses G , welches das zerspannte Werkstoffvolumen zum Verschleißvolumen der Werkzeuge ins Verhältnis setzt, beurteilt [Spu89].

TÖNSHOFF und ROTH beobachteten einen stationären Bereich beim Schleifen, in welchem sie nahezu statische Prozessbedingungen erhielten. In diesem Bereich konnten eine konstante Schleifscheibentopografie und konstante Schleifkräfte vermessen werden [Tön92, Rot95].

PLUTA stellte bei mikroskopischen Untersuchungen von Schleifspuren auf Aluminiumoxidkeramiken fest, dass sprödharte Abtrennmechanismen nur dann überwiegen, wenn die Spannungstiefen die mittlere Größe der Kornstruktur deutlich überschreiten. Bei wesentlich geringeren Spannungstiefen überwiegen plastische Formänderungen des Werkstoffes [Plu83]. Die zum duktilen Abtrennen erforderliche spezifische Energie ist ihren Arbeiten zufolge aufgrund des hohen Anteiles an Reibarbeit wesentlich höher als im Sprödbereich. In der Praxis kommen beide Abtrennmechanismen gleichzeitig vor [Ard01, Rot95, Tön92].

Das keramische Gefüge wurde von TÖNSHOFF und ROTH als wesentlicher Faktor für die Zerspanungsart ermittelt, neben der mittleren Spannungsdicke am einzelnen Schneidkorn

[Rot95, Tön92]. Im Bereich großer Einzelspannungsdicken wiesen sie sprödbrüchiges Werkstoffverhalten nach, bei dem die Werkstoffabtrennung zumeist durch Mikrobruchvorgänge bestimmt wird.

KARPUSCHEWSKI u. a. verdeutlichten 1998 den Einfluss der Schleifscheibenspezifikation und des Kühlschmierstoffes auf das Zeitspanungsvolumen. Mit zunehmendem Schleifdruck p und steigender Wirkgeschwindigkeit verringert sich die Formgenauigkeit der Werkstücke. Mit einer Schleifscheibe der Körnung D91 erreichten sie eine zeitbezogene Teilehöhenreduktion $\Delta \dot{h}_w$ von 350 $\mu\text{m}/\text{min}$ mit der Prognose auf weitere mögliche Steigerungen durch Einsatz modifizierter keramisch gebundener Pelletschleifscheiben [Kar98].

Beim Schleifen von Aluminiumoxid mit Schleiföl werden gegenüber dem Schleifen mit Emulsion ein geringeres Niveau sowie ein annähernd konstanter Verlauf der Prozesskräfte erzielt. Mineralöl reduziert Zusetzungen im Schleifbelag und setzt den abrasiven Kornverschleiß herab [Rot95, Fri99, Brü96, Egg01, Wob91]. Plastisches Verhalten bei der Zerspanung und somit bessere Oberflächengüten werden durch Schleiföl gefördert, während beim Einsatz von Emulsionen die Oberflächenentstehung auf spröden Materialtrennmechanismen basiert [Egg01, Lie98, Jah98, Brü96]. STORR und HASSE erklärten, begründet auf der reduzierten Reibung und der verringerten Wärmebildung durch die bessere Schmierfähigkeit von Schleifölen, dass in der Regel bei Schleifvorgängen mit Schleiföl bessere Werkstückqualitäten und ein verminderter Schleifscheibenverschleiß bei bis zu dreimal höheren Zeitspanungsvolumina vorliegen [Sto89, Has89].

Die hohe Thermoschockempfindlichkeit der Al_2O_3 -Keramik begünstigt die Materialtrennung. Der treibende Mechanismus der Oberflächenausprägung ist nach SALJÉ die Mikrorissbildung, welche interkristalline Bruchvorgänge erzeugt. Daraus leitet er die niedrige notwendige spezifische Schleifenergie ab, welche weitgehend unabhängig von den Prozessbedingungen ist [Sal88].

2.3 Quer-Seiten-Doppelplanschleifen „Prinzip Wendt“

2.3.1 Technologie

Das Quer-Seiten-Doppelplanschleifen mit dem Funktionsprinzip des Herstellers Wendt (**Bild 2.2 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].

Schnittgeschwindigkeit

Aufgrund der aus den großen Kontaktflächen entstehenden hohen Zerspankräfte ist zum Erreichen der notwendigen Schnittgeschwindigkeit eine hohe Antriebsleistung erforderlich. Die Antriebsleistung von 30 kW ist durchaus angebracht und überschreitet die Empfehlungen von SPUR [Spu89], der mindestens 20 kW forderte. Die Höhe der Zerspankräfte definiert die außerordentlichen Anforderungen an die Maschinensteifigkeit.

Vorschubgeschwindigkeit

Bei der Zustellung a_e auf Fertigmaß wird die gesamte obere Schleifspindel mit Flansch und Schleifscheibe verstellt. Die eigentliche Vorschubbewegung erfolgt in der gleichen Achse, so dass die Maschine ein kombiniertes Zustell-Vorschubsystem benötigt. Der Schleifvorschub wird erst eingeleitet, nachdem die Werkstücke sich zwischen den beiden Schleifscheiben befinden. Das bedeutet keinerlei Schädigungen der Schleifscheibenkanten, wie sie aus anderen Verfahren bekannt sind. Neben einer frei wählbaren Ausschleifzeit ist weiterhin eine geringe, im Hundertstel-Millimeter-Bereich liegende Schleifspindelanhebung eingebaut. Somit wird den Werkstücken, unterstützt von der restlichen Kühlschmierstoffmenge, ein nahezu berührungsfreies (hydrodynamisches) Verlassen des Arbeitsraumes ermöglicht.

Eine weitere wichtige Forderung an das Zustellsystem ist ein hoher Spindelhub, notwendig für das Ein- und Ausbauen der Schleifscheiben sowie zum Abrichten der Schleifscheibenplanlauffehler [Zet81].

Werkstückvorschubgeschwindigkeit

Die Werkstücke werden mittels Schieber oder Durchlaufscheiben in den Schleifraum transportiert. Zum gleichmäßigen Verschleiß der Schleifscheiben ist eine entsprechende Hubbewegung notwendig, welche die Werkstücke oszillierend über die gesamte Schleiffläche transportiert. In der Regel sollten sich die Werkstücke immer zwischen den beiden Schleifbelägen befinden, um bei den hohen Schleifleistungen keine Deformation der Schleifscheibenkanten zu erzeugen. Durch eine günstig gewählte Hubbewegung sowie Hubgröße ist der Verschleiß über die Belagbreite steuerbar. Somit lassen sich die zur Formkorrektur der Schleifscheibe notwendigen Abrichtintervalle deutlich verlängern oder es kann ganz auf sie verzichtet werden. Die Werkstückgenauigkeit kann durch die Haltezeiten in den Hubumkehrpunkten, welche die unterschiedliche zeitliche Überdeckung beim Eingriff von Werkstück und Werkzeug positiv verändern, verbessert werden. Ein vergleichbarer Einfluss ist aus dem Langhubhonen bekannt. Somit sind Planparallelität und Ebenheitsfehler f_E großserientechnisch im μm -Bereich ohne Schwierigkeiten realisierbar [Zet81].

Kühlschmierung

Das in die Maschinen eingebaute Kühlschmierstoffsystem ist ausgelegt für Emulsions- und Ölbetrieb. Der Kühlschmierstoff wird durch die obere Schleifspindel und zugleich von außen über einen Spritzring zugeführt. Der Volumenstrom liegt meistens bei 3,3 l/s, entsprechend 200 l/min [Zet81].

2.3.2 Anwendungen

Die Auslegung der Maschine lässt das Bearbeiten von Werkstücken bis zu einer Kantenlänge von 50 mm zu. Alle Materialien, welche mit kunstharzgebundenen Diamant- oder CBN-Schleifscheiben bearbeitet werden können, sind schleifbar. Demzufolge kann ein breites Spektrum an Massenartikeln gefertigt werden. Die Mengenleistung beträgt in Abhängigkeit von Werkstückgröße oder Aufmaß 600 bis 2800 Stück je Stunde. Ein entscheidendes Kriterium für die industrielle Auswahl des Verfahrens sind die besonders niedrigen spezifischen Schleifmittelkosten. Durch die Anwendung des geeigneten Schleifmittels in Verbindung mit dem Schleifsystem konnten die Kosten um das Zehnfache gegenüber herkömmlichen Verfahren reduziert werden [Zet81].

2.4 Planschleifen mit Planetenkinematik

2.4.1 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 Zweiseitenlappmaschine dargestellt, auf der auch Schleifscheiben feinsten 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.

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 2.4**. 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].

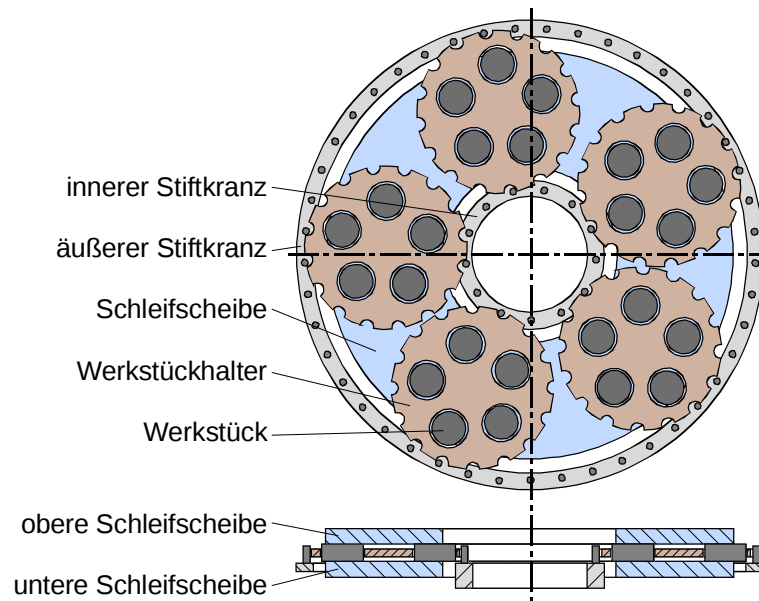


Bild 2.4: Schematische Darstellung des Arbeitsraumes beim Planschleifen mit Planetenkinematik [Ard01]

Nach CLAR [Cla82] wurden 1982 kunstharzgebundene Siliziumcarbid-schleifscheiben 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 Zeitspannungsvolumen und kinematischen Prozessparametern. Ein hohes Zeitspannungsvolumen 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.

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 2.5**). 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 2.5** [Ard01].

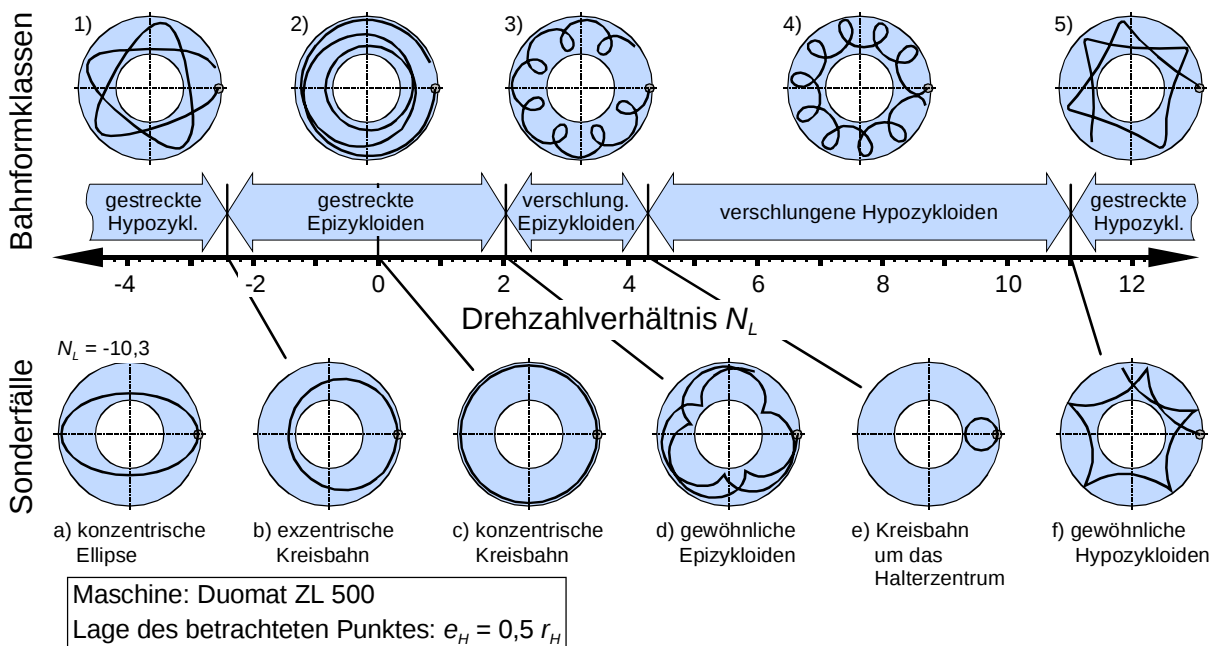
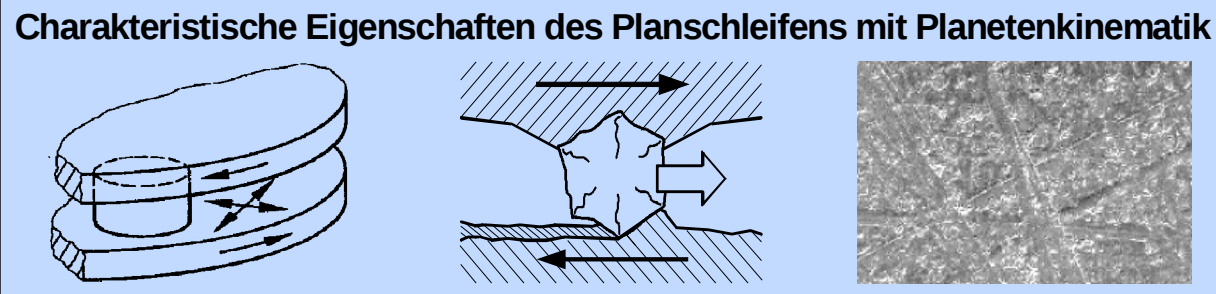


Bild 2.5: Bahnformklassen und ihre Sonderfälle beim Planschleifen mit Planetenkinematik [Ard01]

ARDELТ 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 ARDELТ bilden Untersuchungen bezüglich der in **Bild 2.5** 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 Zeitspannungsvolumen 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 ARDELТ sowohl analytisch simuliert als auch experimentell nachgewiesen. Zusätzlich wurde von ARDELТ der Einfluss der kinematischen Prozessparameter auf die Bearbeitung sowie auf die Prozessoptimierung erfasst [Ard01].

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 verschleßen schneller als Läppscheiben [Wol93]. Ardelt fasst die charakteristischen Eigenschaften des Verfahrens in **Bild 2.6** zusammen [Ard01].

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, Zeitspannungsvolumen 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 2.6: Eigenschaften des Planschleifens mit Planetenkinematik [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 $\pm 2,5 \mu\text{m}$ bewältigt. Die Nachteile dieses Großserienverfahrens sind der relativ hohe Kostenanteil für die Schleifscheiben, 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 $\pm 1,5 \mu\text{m}$ sowie länger konstante Prozessbedingungen bei 30 Prozent niedrigeren Drücken unter Reduktion der Nachschärfzeiten auf eine Minute erreicht werden [Wol93, Wol97, Wol99].

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].

Tabelle 2.2: Qualitative Auswirkungen der Einstellparameter auf Prozess- und Zielgrößen beim Quer-Seiten-Doppelschleifen mit Planetenkinematik [Ard01]

			Prozessgrößen		Zielgrößen			
			Antriebsmoment	flächenbezogenes Zeitspannungsvolumen	arithmetischer Mittenrauwert	Ebenheitsfehler	Höhenstreuung	Schleifverhältnis
++ nimmt stark zu								
+ nimmt zu								
o kein Einfluss								
- nimmt ab								
-- nimmt stark ab								
!! deutlicher Einfluss, nicht linear quantifizierbar								
			M_u	Q''_{w}	R_a	f_E	S_{hw}	G
Einstellparameter	Kühlschmierstoff	KSS	!!	!!	!			
	mittlere Diamantkörnungsgröße	D	+	+	+	o		!!
	mittlere Bahngeschwindigk.	v_{mit}	++	++	+	o		
	Schleifdruck	p	++	++	-	++	++	
	Belegung	B	++	o	-	--	-	
	Drehzahlverhältnis	N_L	!!	!!	!!	!!		

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 Verschleiß 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 Zeitspannungsvolumen Q_w . So steigt das Zeitspannungsvolumen 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 Zeitspannungsvolumina auftreten. Aus diesem Grund werden beim Planschleifen mit Planetenkinematik mehrstufige Prozesse empfohlen. Die Schrubbearbeitung erfolgt zur Reduzierung der Hauptzeiten t_h und der Schlichtprozess mit niedrigem Zeitspannungsvolumen Q_w zur Verbesserung der Werkstückqualität [Ard01].

Tabelle 2.2 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 Zeitspannungsvolumen. 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 Zeitspannungsvolumina Q_w sowie die Antriebsmomente direkt beeinflusst werden können [Ard01].

2.4.2 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 mindestens 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.

2.5 Quer-Seiten-Doppelplanschleifen Funktionsprinzip „Diskus“

2.5.1 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].

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 2.2 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 2.2 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].

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 Abschleiß 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 tangentielle Vorschubgeschwindigkeiten sowie niedrige axiale Vorschübe erreicht werden. Somit entstehen Werkstücke mit geringeren Planparallelitätsabweichungen f_k und niedrigeren Randzoneneinflüssen. Eine Kostenbetrachtung für das Schrappen 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].

2.5.2 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 2.7**) können im Durchlaufverfahren Werkstücke mit einer vielfachen Höhe des Durchmessers geschliffen werden. Weiterhin gelten dieselben Bearbeitungsmöglichkeiten wie beim Prinzip nach Wendt, bei welchem mit einem anderen Maschinentyp auch eine horizontale Bearbeitung möglich ist.



Bild 2.7: Diskusschleifmaschine mit horizontaler Lage der Werkzeugspindeln [Dis03]

2.6 Einordnung der Schleifverfahren ins Normenwerk nach DIN

2.6.1 Wirk-, Vorschub- und Schnittgeschwindigkeiten

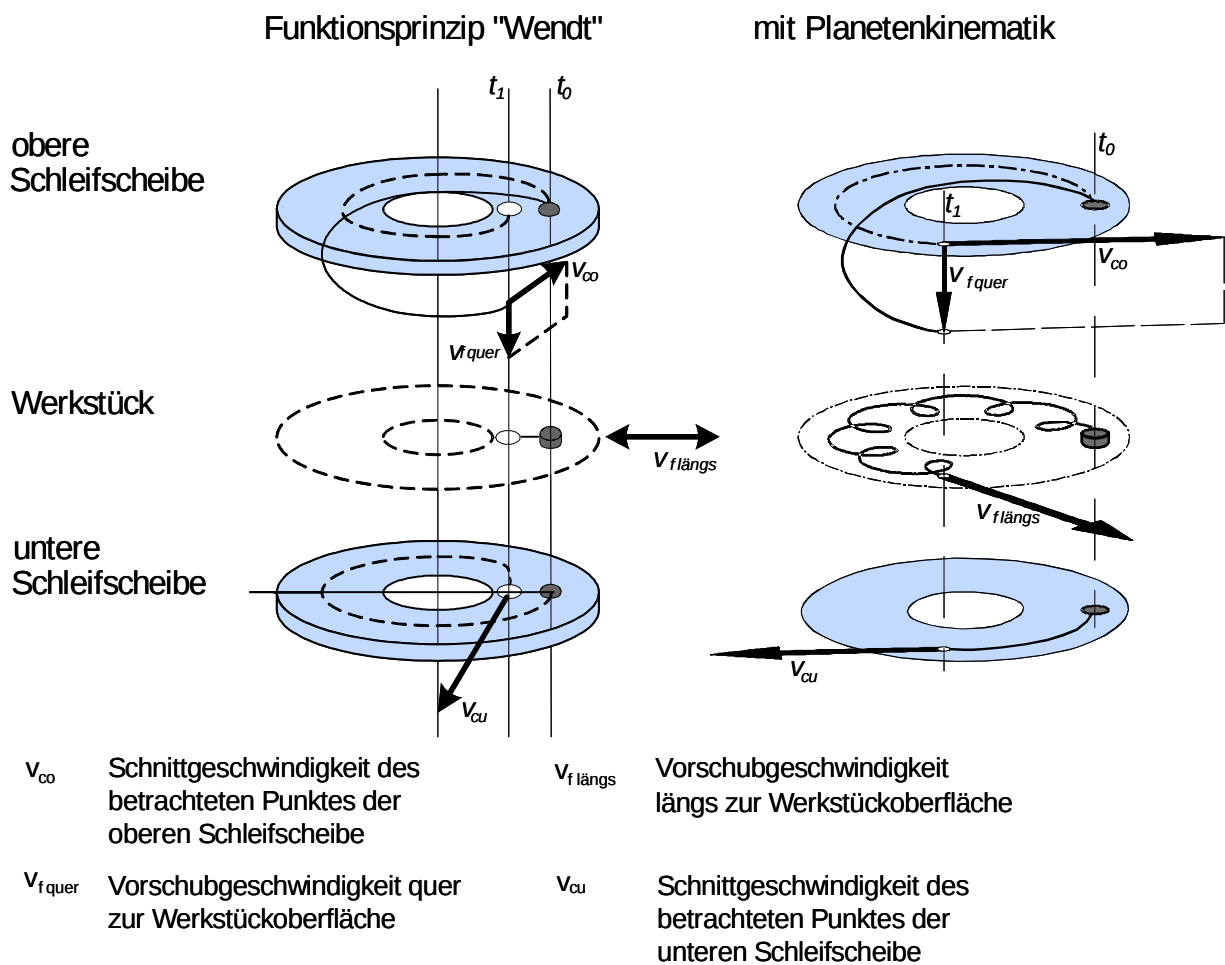
In Anlehnung an den Normungsvorschlag von ARDELT wird das Quer-Seiten-Doppelplanschleifen mit Funktionsprinzip „Wendt“ mit Hilfe der Analyse der Wirk-, Vorschub- und Schnittgeschwindigkeiten für die Einordnung in die Norm DIN 8589 vorbereitet.

Die Wirkbewegung ist in DIN 6580 als die den Zerspanungsvorgang bewirkende Bewegung zwischen Werkzeugschneide und Werkstück und als aus der Schnitt- und der Vorschubbewegung resultierend definiert. Diese Bewegungen zeigt **Bild 2.8** für die Planetenkinematik sowie für das Quer-Seiten-Doppelplanschleifen „Prinzip Wendt“.

Für das Quer-Seiten-Doppelplanschleifen „Prinzip Wendt“ gilt analog zum Quer-Seiten-Doppelplanschleifen mit Planetenkinematik:

- Die Vorschubbewegung hat zwei Komponenten und wird von unterschiedlichen Maschinenelementen ausgeführt.
- In Richtung der Schleifscheibendrehachse, quer zur Werkstückoberfläche, erfolgt das Absenken der oberen Schleifscheibe.
- Werkstück- und Schleifscheibenoberflächen befinden sich in einer Ebene senkrecht zur Scheibendrehachse.
- Die Bewegung der Werkstücke erfolgt weggebunden durch ein mechanisches Getriebe.

- Die untere Schleifscheibe führt eine rotatorische Bewegung ohne Vorschubkomponente aus.



Quelle nach [Ard01]

Bild 2.8: Vorschub- und Schnittgeschwindigkeiten von Quer-Seiten-Doppelplanschleifverfahren

Der Quervorschub der oberen Schleifscheibe ist maßgeblich für die Genauigkeit der Werkstückhöhe verantwortlich und darf bei Betrachtung der Wirkgeschwindigkeiten aufgrund der unterschiedlichen Größenordnungen der beiden Vorschubbewegungen nicht vernachlässigt werden. Unter dieser Voraussetzung liegen die aus der Schnitt- und der Quervorschubbewegung resultierenden Wirkbewegungen in einer Ebene normal zu der dann der Arbeitsebene entsprechenden Ebene der Schleifscheibenoberflächen.

Im Gegensatz dazu sind folgende Punkte aufzuführen:

- Der Quervorschub ist weggebunden und numerisch gesteuert.
- Die Zustellung a_e wird im Voraus definiert, somit ist das Zeitspannungsvolumen Q_W ein Einstellparameter.

- In der Schleifscheibenebene erfolgt die Führung der Werkstücke längs zu den zu erzeugenden Oberflächen in oszillierender Bewegung auf einer Linie.

Als verfahrenskennzeichnende Vorschubbewegung der Seiten-Doppelplanschleifverfahren ist das Zusammenwirken der weggebundenen, linearen und oszillierenden Längsvorschubbewegung der Werkstücke mit der weggebundenen Quervorschubbewegung der oberen Schleifscheibe anzusehen.

2.6.2 Vorschlag zur Einordnung der Verfahren in das Normenwerk

Die Einordnung der Verfahren ist eindeutig bis in die fünfte Stelle. Eine Entscheidung nach der Lage der Bearbeitungsstelle findet nur bei den Innen- und Außenschleifverfahren statt.

Aus diesem Grund steht als Ordnungsnummer die Null. Die sechste Stelle beziffert die Bearbeitung mit der Stirnseite der Schleifscheibe. Hieraus leitet sich die Ordnungsnummer zwei für das Seitenschleifen ab.

Die Werkstückhöhe als qualitätsrelevante Ergebniskenngröße, welche durch den Quervorschub f_a erzeugt wird, ist für die Einordnung in die Norm nach **Bild 2.9** stärker bewertet als der Längsvorschub f_w der Werkstücke. Somit werden die Verfahren mit einer Bewegung der oberen Schleifscheibe als Quer-Seiten-Doppelplanschleifverfahren bezeichnet. Die weitere Unterscheidung erfolgt anhand der Werkstückbewegung.

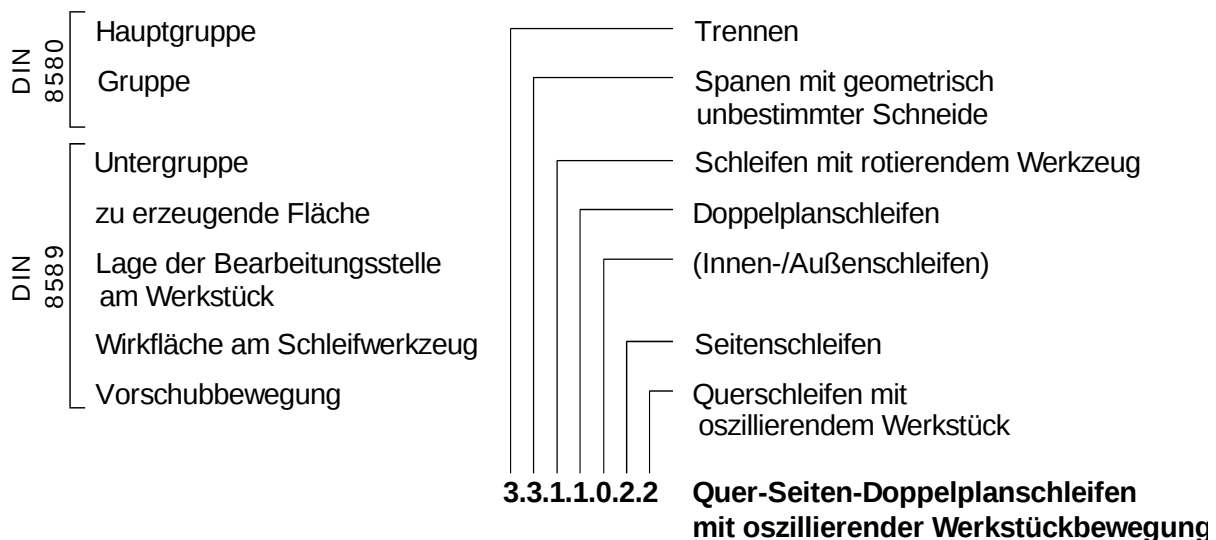


Bild 2.9: Vorschlag zur Einordnung in die Norm für das Quer-Seiten-Doppelplanschleifen „Prinzip Wendt“

Die Unterscheidung der Schleifverfahren nach der Vorschubbewegung geschieht an der siebten Stelle. Da für ARDELT das Hauptmerkmal nicht die zurückgelegte Wegstrecke sondern der konstante Schleifdruck ist, schlägt er vor, diese Verfahren mit dem Zusatz „mit

konstantem Schleifdruck“ zu kennzeichnen. Abweichend von ARDELTS Vorschlag ergibt sich für Seiten-Doppelplanschleifmaschinen als zukünftige Ergänzung des Normenwerkes die in der **Tabelle 2.3** gezeigte Benennung der Verfahren nach der Werkstückbewegung.

Tabelle 2.3: Übersicht des Vorschlages zur Normeinordnung für Seiten-Doppelplanschleifverfahren

Seiten-Doppelplanschleifen	maßgebliche Vorschubbewegung	Schleifscheibe	Norm	Werkstückbewegung
	längs	geneigte Schleifscheiben (Bild 2.2 a)	3.3.1.1.0.2.1	kreisförmig oder linear kontinuierlich
	längs	parallele Schleifscheiben (Bild 2.2 b)	3.3.1.1.0.2.1	lineare Langhuboszillation
	quer	parallele Schleifscheiben mit vertikalem Hub (Bild 2.2 d)	3.3.1.1.0.2.2	lineare Kurzhuboszillation
	quer	parallele Schleifscheiben (Bild 2.2 c)	3.3.1.1.0.2.2	zykloidal

3 ZIELSETZUNG UND ARBEITSSCHWERPUNKTE

Von allen im Ingenieurbereich verwendeten keramischen Hochleistungswerkstoffen wird Aluminiumoxid wegen der guten Grünverarbeitungs- und Werkstoffeigenschaften sowie der vielfachen Anwendungsmöglichkeiten und der geringen Kosten am häufigsten eingesetzt. Aufgrund der tribologischen Eigenschaften dieses Werkstoffes ist eines der Hauptanwendungsgebiete der Einsatz im Bereich der Planschieberventile. Hier ist insbesondere die Aluminiumoxiddichtscheibe für sanitäre Anwendungen wegen der komplexen Geometrie und der hohen Stückzahl hervorzuheben.

Die Anwendungsfelder der heutigen Hochleistungskeramik werden bezüglich des „Near-Net-Shape-Prozesses“ von der Schwindung der Keramik, den Dichteunterschieden durch Werkstücksgeometrie und den Sinterprozess geprägt. Die geforderten engen Toleranzen und verzugfreien Werkstücke sind durch diese Einflüsse nur schwer zu erhalten. Gerade in der Herstellung von Aluminiumoxiddichtscheiben, einem Comodity-Geschäft, gekennzeichnet durch die heute auf dem globalen Markt entstandenen Überkapazitäten und den damit zusammenhängenden Preisdruck, ist die konsequente Weiterentwicklung des Präzisionsplanschleifens erforderlich. Es wird heute noch mit Prozessen gearbeitet, deren technologische Potenziale zunehmend ausgeschöpft werden und die auf Maschinenanlagen ablaufen, die älter als zehn Jahre sind. Zu nennen sind hier Zweiseitenplanbearbeitungsmaschinen in der chronologischen Reihe ihrer Anwendung als Läppmaschinen, Diskus- und Wendt-Schleifmaschinen. Neue Impulse kommen heute von dem Verfahren „Planschleifen mit Planetenkinematik“, der Kombination von weiterentwickelten Läppmaschinen und Diamantschleifscheiben.

Aus den genannten Gründen leitet sich das Ziel dieser Arbeit ab, den Prozess Präzisionsplanschleifen von Al_2O_3 -Keramik unter Produktionsbedingungen zu analysieren und weiterzuentwickeln.

Ziel der Untersuchungen ist es, das technologische Potenzial des Präzisionsplanschleifens in der Großserienproduktion zu beschreiben. Anhand zweier leistungsfähiger Prozesse, dem Schleifen mittels Quer-Seiten-Doppelplanschleifmaschinen nach dem „Prinzip Wendt“ und dem Verfahren Planschleifen mit Planetengetriebe sollen die heutige Fertigungstechnologie aufgezeigt sowie Lösungsfelder zur Produktionssteigerung erarbeitet werden. Gerade die Optimierung zum grenzwertnahen Prozess kann nur unter Produktionsbedingungen erreicht werden, da die kontinuierliche Steigerung der Prozessstellgrößen einzig unter permanenter und langfristiger Überwachung des Prozesses erfolgen kann. Hierbei ist das Potenzial der Doppelseitenquerplanschleifmaschinen besonders auf der Werkzeugebene neu zu definieren.

Die technologischen Einflüsse der Prozessketten sollen innerhalb der gesamten Produktion übergreifend bewertet werden. Weiterhin ist das wirtschaftlich günstigste Fertigungsverfahren für den prozesssicheren Großserieneinsatz durch Prozessführungsstrategien vorzubereiten, da gerade die Prozesssicherheit bei höheren Qualitäten unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit heute häufig nur empirisch bestimmt ist.

Die bisherigen wissenschaftlichen Untersuchungen umfassen aus Zeit- und Kostengründen in der Regel nur Kleinserien. Besonders aufgrund des Scheibenverschleißes und des Materialchargenwechsels der Großserie können die Ergebnisse nur eingeschränkt übertragen werden, weil Teilehöhenreduktion, Zeitspannungsvolumen, bezogene Werkzeugkosten, Maß- und Formgenauigkeit und Oberflächenqualität innerhalb der Großserienproduktion gegenüber Kleinserien andere Gesetzmäßigkeiten zeigen. So sind bezüglich der Teilehöhenreduktion und der Zeitspannungsvolumina gravierende Abweichungen zu finden. Werkzeugkosten je Werkstück sind aufgrund der Einflüsse des geschliffenen Artikelspektrums stark vom funktionalen Zusammenhang zwischen Qualität und Produktivität abhängig. Somit kommt der Analyse des Prozesses unter realen Bedingungen eine große Bedeutung zu, da auf anderem Weg viele relevante Faktoren nicht erkannt werden können.

Der optimale Schleifprozess muss die Vor- oder Endprodukthanforderungen mit maximaler Kosteneffizienz erfüllen. Die wichtigste Voraussetzung hierfür ist die Kenntnis über die robusten und die sensiblen Bereiche des Prozesses. Die großen Stückzahlen, der Drei- oder Vier-Schichtbetrieb, die verschiedenen Arbeiter an der gleichen Maschine mit unterschiedlichen Strategien zur Prozessbeeinflussung (Abrichtzyklen, Drucksteuerung etc.), die nicht messbaren und somit nicht reproduzierbaren Schleifscheibenoberflächen, sowie der Einfluss der vorhergehenden Prozessketten und die hierbei entstehende Streuung der Vorprodukte stellen große Anforderungen an die Prozesstechnik.

In dieser Arbeit werden speziell die Quer-Seiten-Doppelplanschleifverfahren nach dem "Prinzip Wendt" sowie mit Planetenkinematik untersucht.

Es soll ein Bewertungsverfahren entwickelt werden, mit dem beim Schleifen eine Korrelation der technologischen Ergebnisgrößen mit den wirtschaftlichen und qualitativen Verfahrensparametern der Großserienfertigung hergestellt werden kann. Dabei sollen zunächst Verfahrensweisen aufgezeigt werden, mit welchen technologisch und wirtschaftlich nutzbare Instrumente zur Verfügung stehen, um

➤ in der Verfahrensanalyse

- den Einfluss unterschiedlicher Kinematik beim Präzisionsplanschleifen auf die Qualität und Leistungsfähigkeit darzulegen,
- die Diagnose von Schleifwerkzeugen hinsichtlich des Leistungsvermögens durchzuführen,
- einen stabilen, beherrschbaren Bearbeitungsprozess zu realisieren,
- Leistungssteigerungsstrategien und deren Einflüsse auf die Qualität der Werkstücke aufzuzeigen,

➤ in der Bewertung

- eine wirtschaftliche Bewertung mit dem Ziel der Kostenreduzierung in der Prozesskette Hartbearbeitung zu erreichen,

- den Schleifprozess an der maximalen Produktivität nach Umsetzung der Leistungssteigerungsstrategien grenzwertorientiert stabil zu führen,
- für die Prozesskette
- die Einflüsse und Folgen der Schleifprozesse auf die nachfolgende Feinstbearbeitung darzustellen und
 - Prozessführungsstrategien mit interdisziplinären Folgerungen auf die vor- und nachgeschalteten Prozesse zu entwickeln

Im Rahmen dieser Zielsetzungen ergeben sich somit folgende Arbeitsschwerpunkte:

1. Erfassen des Istzustandes sowie Definition der Leistungs- und Qualitätslagen des Präzisionsplanschleifens mit Quer-Seiten-Doppelplanschleifmaschinen nach dem “Prinzip Wendt” sowie mit Planetenkinematik.

Zu diesem Zweck soll eine Messvorrichtung an den in der Produktion eingesetzten Quer-Seiten-Doppelplanschleifmaschinen errichtet werden, mit welcher Istzustände erfasst sowie Optimierungsuntersuchungen durchgeführt werden können. Die Untersuchungen zielen in erster Linie auf Möglichkeiten der Stellgrößenoptimierung ab.

Mit beiden Planschleifmaschinen werden Versuchsreihen durchgeführt, um den Einfluss der wichtigsten Prozessparameter auf Prozessverlauf und Arbeitsergebnis aufzuzeigen.

Weiterer Schwerpunkt ist die Bewertung des Leistungsvermögens von Schleifwerkzeugen unterschiedlicher Bindung, Körnung und Konzentration.

2. Entwicklung von Vergleichskennzahlen zur Prozessbewertung

Voraussetzung für die Verfahrensauswahl ist die vollständige Beschreibbarkeit und Vergleichbarkeit bestehender und geplanter Prozessketten. Universelle Vergleichszahlen stellen heute die Bearbeitungszeit unter Bezugnahme des Maschinenstundensatzes, also der Kosten je Werkstück bei Betrachtung der gesamten Prozesskette dar. Zur Bewertung kinematisch unterschiedlicher Schleifverfahren sollen, falls erforderlich, zusätzliche Prozesskennzahlen eingeführt und definiert werden.

3. Prozessführungsstrategien

Hier sollen Restriktionen und Einflüsse des Schleifprozesses auf sich selbst und auf die nachfolgende Feinstbearbeitung dargestellt werden, um Prozessführungsstrategien zu entwickeln. Mit Hilfe interdisziplinärer Folgerungen sollen die Einflüsse der vorgeschalteten Prozesse diskutiert und die Auswirkungen auf die nachfolgenden analysiert werden. Die kontinuierliche Leistungssteigerung in der Fertigungstechnik führt zum Erreichen der Grenzlagen im Prozess. Das Streben nach Nachhaltigkeit ist ein

wesentlicher Bestandteil der Forderung, Prozesse beherrschbar an den Grenzen zu führen. Prozessführungsstrategien sollen unter diesem Aspekt betrachtet und Möglichkeiten zur prozesssicheren Produktivitätserhöhung aufgezeigt werden.

4. Strategien zur Qualitäts- und Kostenverbesserung

Aus den Untersuchungen der Prozesse sind strategische Verbesserungen abzuleiten, die dazu geeignet sind, den Prozess beherrschbar zu stabilisieren. Somit wird ein kontinuierliches Arbeitsergebnis bei konsequenter Kostenreduzierung ermöglicht. Die ökonomische Bewertung soll Auswahlkriterien für den Einsatz unter Beachtung der ermittelten Kostenstrukturen definieren.

4 VERSUCHSRANDBEDINGUNGEN UND MESSMETHODIK

4.1 Versuchsmaschinen, Kühlschmiersystem, prinzipielle Arbeitsabläufe

4.1.1 Quer-Seiten-Doppelplanschleifmaschine WBM 200

Die für die Versuche verwendete Quer-Seiten-Doppelplanschleifmaschine des Typs WBM 200 der Firma Wendt GmbH, Meerbusch, ist eine vollautomatische Sondermaschine für das Planschleifen von Hartmetallschneidplatten oder anderen Präzisionsteilen aus Hartmetall, Keramik und Stahl.



Bild 4.1: Schleifmaschine des Herstellers Wendt Typ WBM 200

Tabelle 4.1 zeigt die technischen Daten dieser Versuchsmaschine.

Tabelle 4.1: Technische Daten der verwendeten Zweischiebenschleifmaschine Wendt WBM 200

Technische Daten Wendt WBM 200				
Kinematisches System				
	Radien		Max. Drehzahl	Antriebsleistung
	r mm		$n_{\max}$ min^{-1}	P_w kW
obere Schleifscheibe	210	250	1200	20
untere Schleifscheibe			1200	20
Werkstück	5 – 25		oszillierend	
Weitere Angaben				
Baujahr				1987
max. Schnittgeschwindigkeit v_c		m s^{-1}	30	
max. Vorschubgeschwindigkeit v_{fa}		mm min^{-1}	15	
Teilehöhenreduktion Δh		mm	0,2 - 2	

Der in **Bild 4.2** gezeigte robuste Aufbau der Schleifmaschine besteht aus drei schweren Gussteilen, die über Dehnschrauben unter 10 Tonnen vorgespannt sind. Die zwei äußeren Gussteile nehmen die massiven Schleifspindeln auf und stützen somit die auftretenden Schleifkräfte ab.



Bild 4.2: Maschinenprinzip WBM 200 [Wen95]

Die obere hydrostatisch radial gelagerte Schleifspindel wird mit Hilfe von zwei Hydraulikzylindern axial bewegt. Die untere Schleifspindel ist als Hülzenspindel mit stirnseitigem Flansch ausgeführt, so können die hohen axialen Kräfte direkt über die vordere Lagergruppe in den Maschinenständer eingeleitet werden. Der Antrieb erfolgt über zwei Gleichstrommotoren mit kraftschlüssiger Drehmomentübertragung.

Für den Transport der zu schleifenden Werkstücke sind zwei Werkstückschieber vorgesehen. Die Betätigung der einzelnen Schieber erfolgt über Hydraulikzylinder, welche sowohl die Vor- und die Rückbewegung als auch den Längsvorschub des Unterschlittens ausführen.

Zum Abrichten können die Schleifscheiben bis auf 125 mm auseinander gefahren werden. Das Abrichtgerät wird wahlweise manuell oder automatisch in den Prozessraum geschwenkt. Die für das Abrichten verwendete Siliziumcarbidscheibe wird durch einen Hydraulikmotor auf 2800 min^{-1} angetrieben.

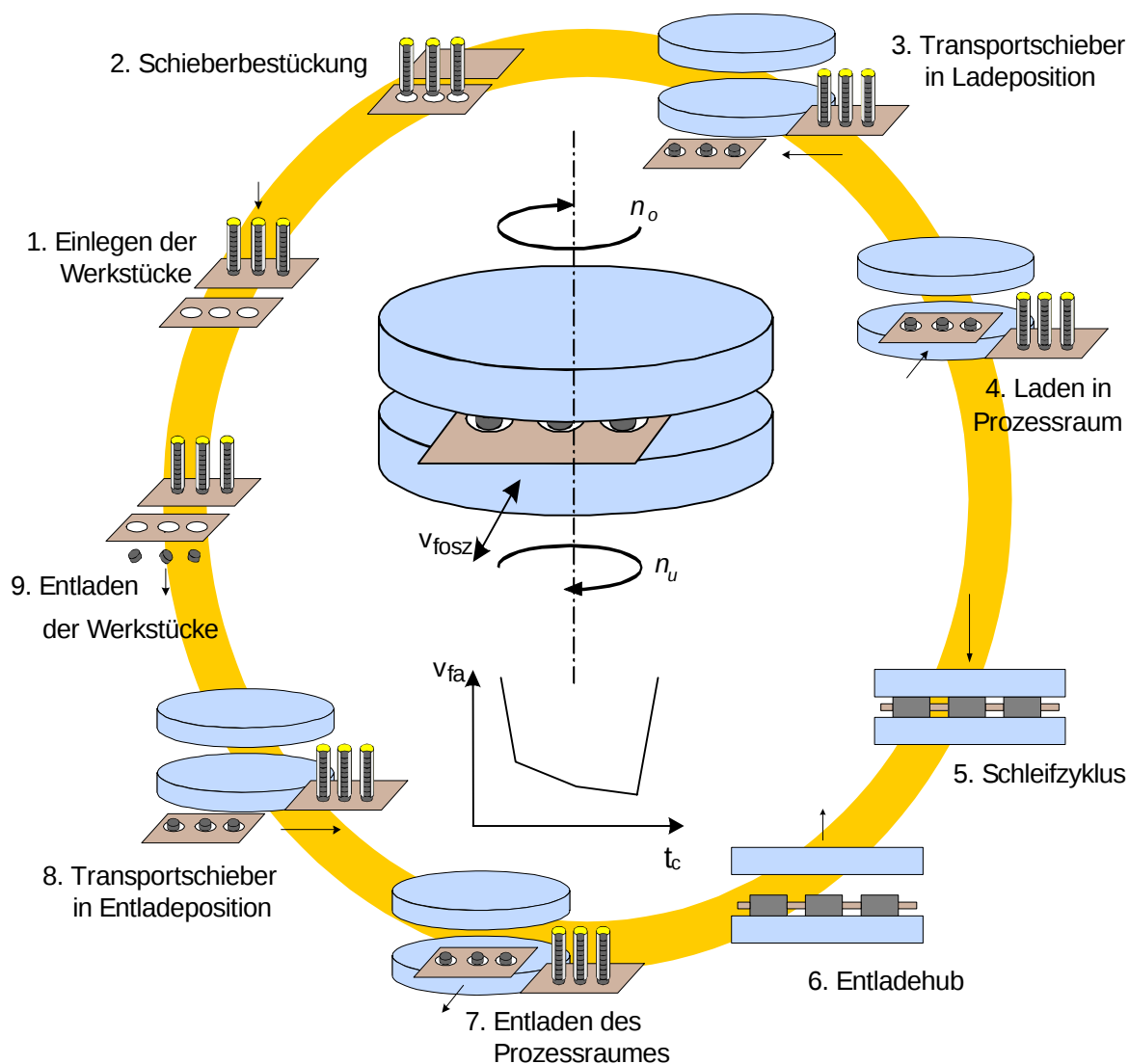


Bild 4.3: Einzelschritte einer Bearbeitung des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens „Prinzip Wendt“ [Kün02]

Bei einer typischen vollautomatisierten Maschine werden die Werkstücke, wie in **Bild 4.3** schematisch dargestellt, über Plattenschieber (Halter) zwischen das geöffnete und mit einer über den Schleifscheibenradius variierenden Schnittgeschwindigkeit v_c gegensätzlich drehende Scheibenpaar eingebracht. Beim Erreichen der Schleifscheibenkante setzt die axiale Vorschubgeschwindigkeit v_{fa} der oberen Schleifspindel ein. Während des Arbeitsvorganges 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.

4.1.2 Planschleifen mit Planetenkinematik

Die in der Produktion eingesetzte und für die Versuche verwendete Maschine ist eine DLM 700 der Firma Stähli AG aus der Schweiz. Dabei handelt es sich um eine Quer-Seiten-Doppelplanschleifmaschine mit einem Schleifscheibendurchmesser von 650 mm, zu sehen im nachfolgenden **Bild 4.4**.



Bild 4.4: Quer-Seiten-Doppelplanschleifmaschine DLM 700 C1 der Firma Stähli AG

Die Grundaufbau, bestehend aus Unterteil und Oberteil, ist in massiver Schweißkonstruktion mit schwingungsdämpfender Polymerbeton-Verstärkung ausgeführt. Der Elektroschrank mit schwenkbarem Bedienpaneel ist an der Maschinenseite angebracht. Im Unterteil befinden sich die Lagerung sowie die Antriebe der unteren Arbeitsscheibe und des

inneren Stiftkranzes. Auch die Befestigung des äußeren Stiftkranzes und ein optional einsetzbarer Außenstiftkranzdrehantrieb sind dort positioniert. Weiterhin gewährleistet eine ebenfalls im Unterteil integrierte Teil-Absenkeinrichtung des Stiftkranzes einfachstes Be- und Entladen (**Bild 4.5**).

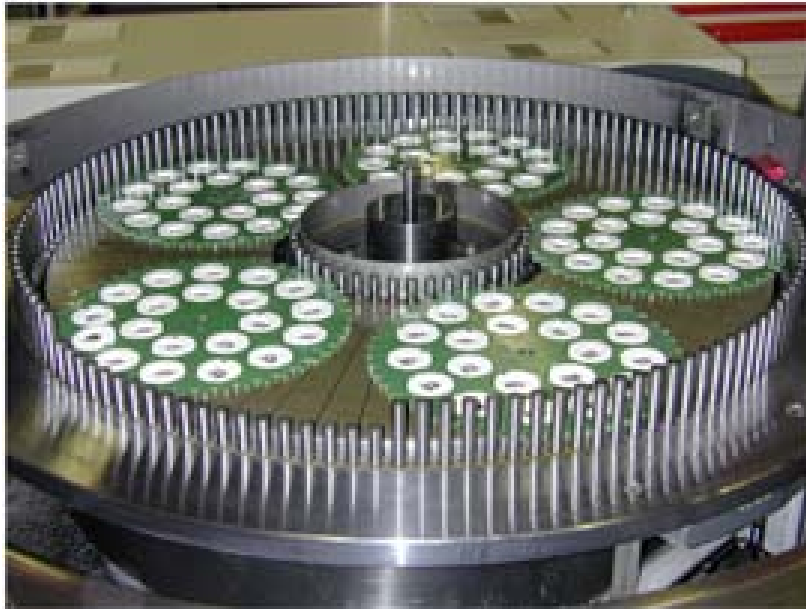


Bild 4.5: Arbeitsraum einer DLM mit Dichtscheiben in Haltern

Die obere Schleifscheibe mit Antrieb ist mittels Vertikalschlitten (z-Achse) rasch auf eine vorwählbare Distanz, das heißt, bis etwa 0,2 mm über die Werkstücke absenkbar. Die Feinzustellung erfolgt über das durch die Firma Stähli AG patentierte Waagebalkensystem. Das Gewicht des Maschinenkopfes mit der oberen Arbeitsscheibe wird über den Waagebalken durch den auf der Gegenseite angebrachten Druckkraftzylinder ausgeglichen. Dadurch erfolgt kein Aufbäumen des Maschinenkopfes. Dank dieser Konstruktion lässt sich die effektive Auflast fein und einfach steuern.

Der Be- und Entladevorgang wird durch kontrolliertes Abheben der oberen Arbeitsscheibe gewährleistet. Spaltentladung, das heißt, die Schleifscheiben öffnen weniger als die addierten Höhen von Werkstück und Läuferscheibe, sichert sowohl im Be- als auch im Entladeprozess, dass kein Werkstück im Prozessraum zurückbleibt. Der Stiftkranz außen und innen lässt sich beliebig und auf einfache Weise in der Höhe verstellen. Die Lagerung der unteren und oberen Spindel erfolgt mittels Präzisionslager. Ein Pendellager für die Aufnahme der oberen Arbeitsscheibe gewährt den erforderlichen räumlichen Freiheitsgrad für einen Parallellauf der Arbeitsscheiben. Alle wichtigen Teile der Maschine sind dauergeschmiert.

Die Aufnahmeplatten der Arbeitsscheiben (oben und unten) sind mit den nötigen Spül-Kühlmittelkanälen versehen. Ein schneller Wechsel der Arbeitsscheiben ist durch Lösen einiger Schrauben einfach zu handhaben, damit wird das Arbeiten mit verschiedenen Arbeitsscheiben für unterschiedliche Materialien begünstigt. Die Werkstückbelastung erfolgt über die stufenlos programmierbare Kraftsteuerung. Die Schleifnormalkraft in axialer

Richtung F_n wird direkt in daN eingegeben und angezeigt. Es können Kraframpen nach Maß und/oder zeitgesteuert sowie zerspanungsgesteuert vorgegeben werden. Die wichtigsten technischen Daten sind in **Tabelle 4.2** dargestellt.

Tabelle 4.2: Technische Daten der verwendeten Quer-Seiten-Doppelplanschleifmaschine Stähli DLM 700

Technische Daten Stähli DLM 700				
Kinematisches System				
	Radien		Max. Drehzahl	Antriebsleistung
	r mm		$n_{\max}$ min^{-1}	P_w kW
obere Schleifscheibe	125	325	250	7,5
untere Schleifscheibe			250	7,5
innerer Stiftkranz	105		125	4
äußerer Stiftkranz	345		feststehend	
Weitere Angaben				
Baujahr			1996	
Steuerung			Siemens S4	
maximale Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n			N	13000

Ohne eine vollautomatisierte Be- und Entladung ist dieses Maschinenkonzept für die Großserie nicht haltbar. Das Einlegen der Werkstücke von Hand in die in der Schleifmaschine verbleibenden Halter ist mühsam und aus Kostengründen nicht tragbar. Bei der zur Verfügung stehenden Maschine ist die Bestückung der Halter durch einen Roboter geregelt. Die Anlieferung der Werkstücke erfolgt in Rollenform gelagert in Kunststofftrays. Die Bedienperson legt die Werkstücke seitenrichtig orientiert in mehrere abnehmbare 500 mm hohe Stangenmagazine, deren Puffer etwa 650 Werkstücke enthält. Das Beladesystem positioniert fünf Halter lagerichtig mit Hilfe einer oder mehrerer Indexkennzeichnungen. Innerhalb von zwei Minuten werden die Halter automatisch vom Beladesystem mit Werkstücken befüllt.

Der Arbeitsablauf ist in **Bild 4.6** dargestellt. Das Absenken der oberen Schleifscheibe muss ab der Sicherheitshöhe l_s sehr feinfühlig und langsam erfolgen. Die Vorbearbeitungsstufe dient zum Nivellieren der Teilehöhen. Während der Hauptbearbeitungsstufe wird der größte Anteil des Werkstückvolumens abgeschliffen. Die Nachbearbeitungsstufe kann entweder zeit- oder aufmaßgesteuert oder, falls die Werkstückqualität ohne Nachbearbeitungsstufe erreicht wird, gar nicht geschaltet werden. Je nach verwendeter Steuerung des jeweiligen Herstellers sind nicht nur die Arbeitskräfte in den einzelnen Stufen, sondern auch noch die Drehzahlen der Schleifscheiben und des Innen- und Außenstiftkranzes für die Bewegung der Halter variabel. Nach Abschalten des Antriebes wird die obere Schleifscheibe unter einer leichten Drehung geringfügig angehoben, um auf der oberen Schleifscheibe haftende Werkstücke abzustreifen [Ard01].

Das Einschieben und Entladen der Halter in die Maschine erfolgt innerhalb einer Minute im Spalt, das heißt, der Abstand der Schleifscheiben beim Be- und Entladevorgang muss kleiner als die Summe aus der Höhe der Halter und der Werkstückhöhe sein. Ein Zurückbleiben von einzelnen Werkstücken im Prozessraum muss zu 100 Prozent vermieden werden. Die Bearbeitung der Werkstücke aus Aluminiumoxid erfolgt auf der DLM 700-CNC mit Richtigkeit ein bis zwei Minuten. Ein Reinigen der Werkstücke ist je nach nachfolgendem Prozessschritt sinnvoll, aber nicht zwingend notwendig.

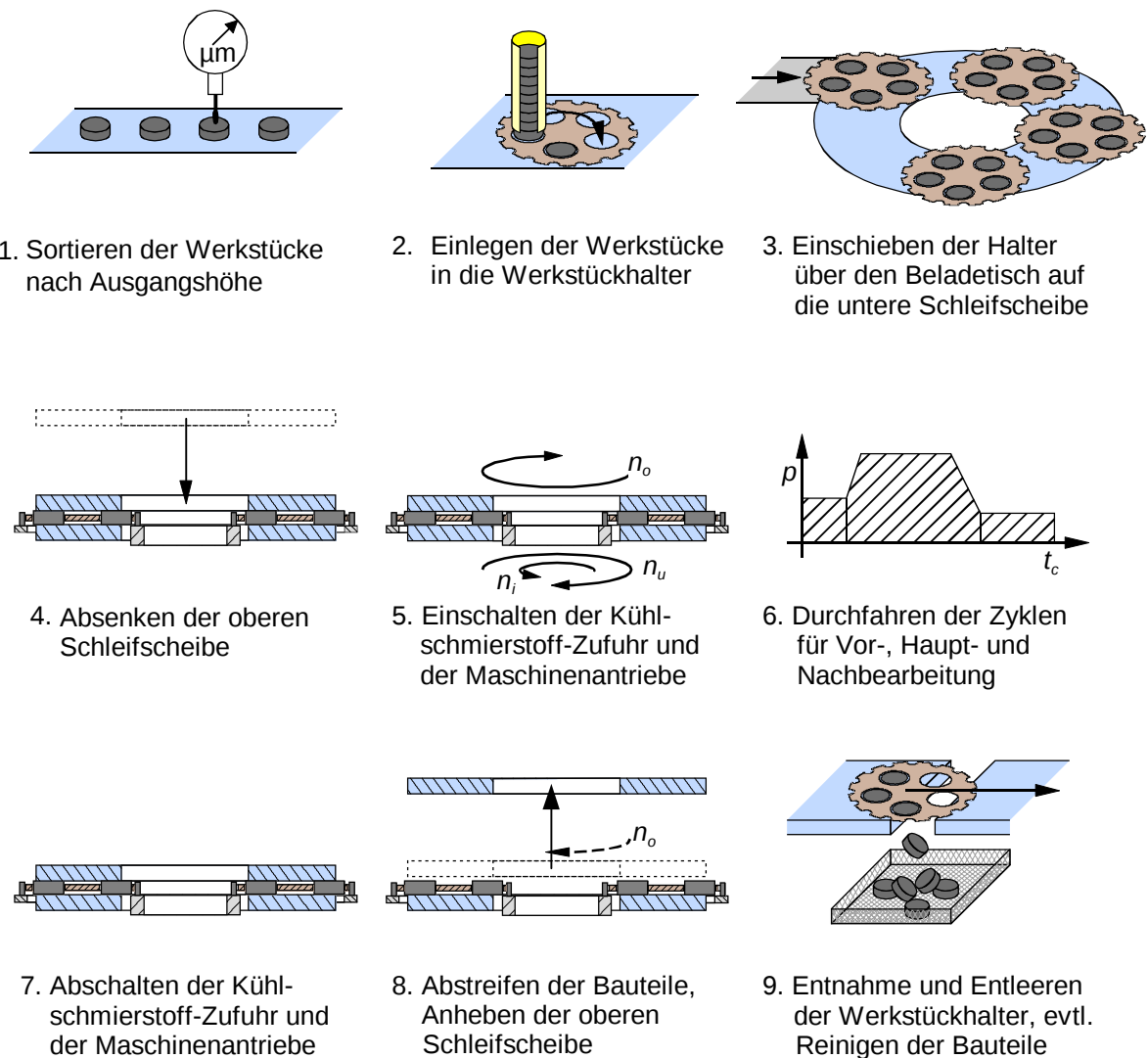


Bild 4.6: Ablauf des Fertigungsprozesses [Ard01]

4.1.3 Kühlschmiersystem

Das Kühlschmiersystem ist entscheidend für die Produktivität der Schleifmaschinen. Im Laufe der Untersuchungen wurden zwei Kühlschmierstoffe auf Ölbasis verwendet. Die wichtigsten Funktionen von Schleifölen sind die gute Schmierung des Prozesses, der Abtransport der Spanpartikel, sowie die Kühlung der Werkstücke und der Schleifscheiben.

Weitere Punkte sind die Gesundheitsverträglichkeit und die geringe Neigung zur Bildung von Schaum oder Nebel. Gerade der beim Schleifen entstehende Nebel kann in Zusammenhang mit Öl eine Explosionsquelle darstellen. Die prozessbeeinflussenden Eigenschaften der eingesetzten Kühlschmierstoffe sind in **Tabelle 4.3** aufgeführt.

Tabelle 4.3: Eigenschaften der verwendeten Kühlschmierstoffe

		Castrol Honilo 930	Castrol Honilo 989
Dichte	g/cm ³	0,825	0,820
Kinematische Viskosität	mm ² /s	4,14	2,9
Fett	%	0	11

Beide Maschinen sind an ein zentrales Kühlschmiersystem angeschlossen. Die Kühlschmiermittel Honilo 930 sowie Honilo 989 von der Firma Castrol werden jeweils von einem Sammelbecken über ein Rohrleitungssystem auf die einzelnen Maschinen verteilt. In der WBM 200 wird das Kühlschmiermittel zentral über die hohle obere Schleifspindel eingeleitet. Bei der DLM 700 wird das Kühlmedium mit einem Volumenstrom $Q_{KS} \approx 20$ l/min über in der oberen Schleifscheibe befindliche Kanäle in den Arbeitsraum verteilt. Die durchsetzte Kühlschmiermenge wurde bei der WBM mit $Q_{KS} \approx 150$ l/min konstant gehalten. Die Kühlmittelzufuhr startet automatisch beim Beginn eines Schleifzyklus und wird nach dessen Abschluss wieder beendet. Das Kühlmittel wird auf Grund der Zentrifugalkräfte über den Schleifbelag verteilt und über große Ablaufdurchlässe in einem entweder im Maschinenbett befindlichen oder extern angebrachten Kühlmittel tank zwischengelagert. Von hier aus wird das Kühlschmiermedium mit Hilfe von zwei Kühlmittelpumpen über ein Rohrleitungssystem zurück zur zentralen Aufbereitung gepumpt. Dort durchläuft die Flüssigkeit ein Absetzbecken, in dem die groben Partikel sedimentieren. Die restlichen Schwebeteilchen werden durch Zentrifugieren aus der Kühlschmierung extrahiert. Das gereinigte Kühlschmiermittel wird nun noch auf 20 °C abgekühlt und wieder dem Sammelbecken des Kühlschmiermittelkreislaufes zugeführt.

4.2 Schleifscheiben

Die Diagnose des Leistungsvermögens einer Schleifscheibe ist die wichtige Grundvoraussetzung zur Weiterentwicklung des Großserienprozesses. Folgende Informationen sind für den Anwender von besonderer Wichtigkeit:

- das Know-how der wirtschaftlich-technologischen Einsatzfelder,
- die Auswahl der günstigsten Schleifscheibe und
- die richtige Zeit des Abrichtens in Abhängigkeit der Form- und Maßtoleranzen der Werkstücke.

Die Auswahl einer geeigneten Spezifikation erfordert viel Erfahrung.

Schleifscheibenspezifikation

In diesen Untersuchungen werden ausschließlich kunstharzgebundene Diamantschleifscheiben eingesetzt. Die untersuchten Spezifikationen sind in **Tabelle 4.4** dargestellt.

Tabelle 4.4: Spezifikationen der verwendeten kunstharzgebundenen Schleifwerkzeuge

Geometrie				Spezifikation	
Maschine	r_{Si} [mm]	r_{Sa} [mm]	Nutung	Körnungs- größe	Konzen- tration
WBM	210	250	ungenutet	D46	C75 / C100
				D91	C75 / C100
				D126	C75 / C100
DLM	125	325	ungenutet	D46	C75
			8 radiale Nuten	D91	C75
				D126	C75

Schleifscheibenform

Die Form der Schleifscheiben nach FEPA 6A2 C ist in **Bild 4.7** dargestellt. Die Diamantschleifscheiben waren sämtlich mit fünf Millimeter Belaghöhe ausgestattet.

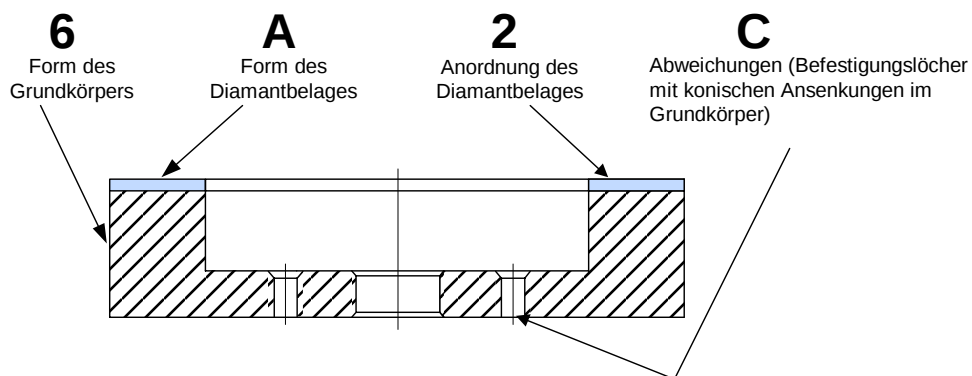


Bild 4.7: Schleifscheibenform nach FEPA

Diamantkörner, Größe und Konzentration

Die Körnung der Schleifscheiben wird in den Versuchen von D46 über D91 bis D126 variiert. Die Konzentration *C* der Diamantkörnung beträgt für die Versuchsscheiben 75 und 100 Prozent. Um eine bessere Haftung zwischen Diamant und Bindung herzustellen, werden

die Diamantkörner mit Nickel ummantelt. Eine typische Schleifscheibenoberfläche ist in **Bild 4.8** dargestellt.

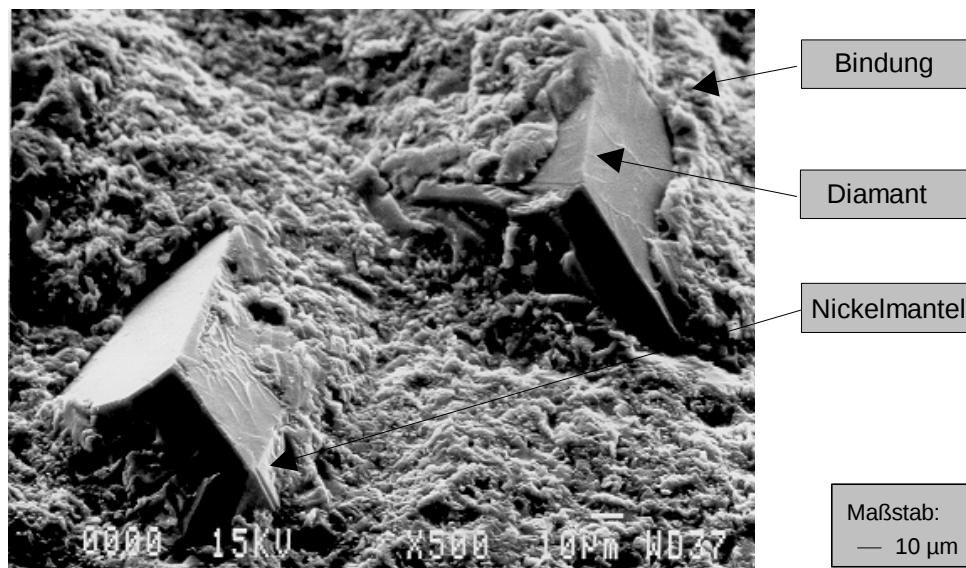


Bild 4.8: Diamantkörner in einer Schleifscheibe mit Kunstharzbindung

Eine wichtige Voraussetzung für das Verständnis der Schleifvorgänge ist das Wissen um die Anzahl der aktiven Schneiden in Bezug auf die Körnungsgröße und die Konzentration der Schleifscheibe.

Tabelle 4.5: Darstellung der Konzentration und Anzahl der Schneiden von Diamantschleifscheiben

Ges. Kornvolumen [%]		18,75	25
Körnungsgehalt (kt/cm ³) ¹		3,3	4,4
Konzentration C		75	100
Körnung	D46	3721	4962
	D54	2300	3067
	D64	1382	1842
	D76	825	1100
	D91	481	641
	D107	296	394
	D126	181	241
	D151	105	140
	D181	60	81
	D252	23	30
		Anzahl der Diamanten je mm ³	

¹ Karat je cm³ (1 Karat = 0,2g Diamant)

Die Anzahl der Diamantkörner je Kubikmillimeter für unterschiedliche Körnungen ist an den grau unterlegten Werten in **Tabelle 4.5** abzulesen.

Innerhalb der Untersuchungen zur Großserienproduktion wurden weiterhin Diamantschleifscheiben mit unterschiedlichen Körnungsgrößen eingesetzt. Speziell bei dem Quer-Seiten-Doppelplanschleifen „Prinzip Wendt“ wurden kunstharzgebundene Schleifscheiben mit den Körnungen D46, D91 und D126 jeweils mit Variation der Konzentration untersucht.

4.3 Versuchswerkstücke

Die Versuchswerkstücke, Großserienartikel für Dichtungen der Sanitärbranche, bestanden alle aus dem Werkstoff A 1896 der Firma CeramTec AG.



Bild 4.9: Versuchswerkstück: Dichtscheiben aus 96 %igem Aluminiumoxid

Die größeren dieser so genannten Dichtscheiben werden in Einhebelmischern, die kleineren in Zweihandarmaturen eingesetzt. Derzeit werden etwa 250 Millionen Teile jährlich mit dem Verfahren Quer-Seiten-Doppelplanschleifen bearbeitet. **Bild 4.9** zeigt jeweils ein Dichtungspaar für jedes Funktionsprinzip nach **Bild 4.10**. Die Mischung des Wassers ist im Funktionsprinzip farblich gekennzeichnet.

Dicht- und Regelscheiben aus der Aluminiumoxidkeramik A 1896 zeigen nach mehr als zwei Millionen Bewegungen unter Betriebsbedingungen keinen messbaren Verschleiß. Die Härte des Aluminiumoxides verhindert Beschädigungen auf der Gleitfläche durch im Wasser mitgeführte Abrasivstoffe wie Rost und Sand. Die thermische Belastbarkeit und das hohe Elastizitätsmodul E der Dichtscheiben bewirken, dass auch bei erhöhter thermischer und mechanischer Wechselbeanspruchung die Form erhalten bleibt.

Die Besonderheit der Dicht- und Regelscheiben aus Aluminiumoxidkeramik A 1896 der Firma CeramTec AG sind taschenförmige Vertiefungen in der Gleitfläche, die ein Schmiermittelreservoir bilden. Dadurch wird ein Schmierfilmaustritt verhindert und die Leichtgängigkeit der Dichtungseinheit bewahrt [Ruß85].



Bild 4.10: Funktionsprinzip der Einhandmischer und Zweigriffarmaturen

4.4 Versuchsdurchführung

Im Rahmen der Voruntersuchungen zum Präzisionsplanschleifen von Aluminiumoxid unter Produktionsbedingungen wurden unterschiedliche Strategien entworfen. Dabei zeigte sich, dass folgende Prozessschritte notwendig sind:

- Qualitätsmerkmalserfassung der Werkstücke nach dem Brand,
- Auswertung der durch die Schleiftechnik beeinflussbaren qualitätsrelevanten Toleranzen,
- Profilieren und Schärfen der Schleifscheiben,
- Durchführung der Schleifversuche an der jeweiligen Maschine mit dem selben Bediener, um die Bedienereinflüsse zu reduzieren,
- Auswertung der Ergebnisse mit statistischen Methoden.

Qualitätsmerkmalserfassung der Werkstücke

Da bei der Untersuchung von Großserien die Daten mit generell anderen Werkzeugen erfasst werden müssen als bei Kleinserien, werden die einzeln zu bearbeitenden Chargen mittels Qualitätssicherungssystemen ausgewertet. Basierend auf diesen Auswertungen werden die Sicherheitshöhe l_v und das Schleifaufmaß Δh für die Ober- und Unterseite der Werkstücke definiert.

Profilieren und Schärfen der Schleifscheiben

Die Konditionierung von Schleifscheiben ist ein umfangreiches Forschungsgebiet. Aufgrund der Erfahrungen in der Serienproduktion werden die Schleifscheiben entweder nach zeitlichen Vorgaben oder nach festgesetzten Merkmalen neu abgerichtet und/oder geschärft. Als mögliche Kriterien sind dabei das so genannte Touchierbild, welches die Qualität der geschliffenen Oberfläche bildlich zeigt, die Temperatur der Werkstücke oder die Messung der Veränderung des Körperschalls zu nennen.

Das Profilieren und Schärfen wurde zeitgleich mittels 80 Mesh großer SiC-Körner durchgeführt, die bei dem Quer-Seiten-Doppelplanschleifen „Prinzip Wendt“ in einer rotierenden Abrichtrolle gehalten werden. Die Rolle wird automatisch über die sich drehende Schleifscheibe geschwenkt. Die axiale Zustellung a_e der mit 2800 min^{-1} drehenden Abrichtrolle erfolgt in $1\text{-}\mu\text{m}$ -Schritten je Abrichtzyklus. Zum Abrichten werden die beiden Schleifscheiben 150 mm in die Abrichtstellung auseinander gefahren. Danach wird der Abrichtrollenantrieb zugeschaltet, wobei sich die Drehzahl n der Schleifscheiben auf etwa 200 1/min verringert. Es erfolgt das Abrichten der oberen Schleifscheibe. Die Anzahl der Abrichtzyklen bestimmt der Bediener durch Beobachtung der Funkenspur über die gesamte Schleifscheibenbelagsbreite. Sobald die Funkenspur durchgängig über den Schleifbelag sichtbar ist, kann die Konditionierung beendet werden, da der gewünschte Schleifscheibenebenheitsfehler erreicht wurde. Anschließend fährt die Vorrichtung in die untere Abrichtposition und richtet die untere Schleifscheibe nach dem gleichen Prinzip ab. Die Reinigung von Abrieb erfolgt manuell durch Druckluft und Einschalten der Kühlschmierung. Nach Beenden des Konditionierens erreichen die Schleifscheiben automatisch Schnittgeschwindigkeit v_c .

Das Profilieren größerer Unebenheiten erfolgt beim Planschleifen mit Planetenkinematik durch in Stahlhalter gespannte und durch das kinematische System angetriebene SiC-Schleifringe mit einem Durchmesser von 170 mm und einer Ausgangshöhe von 25 mm.

Das Verfahren Planschleifen mit Planetenkinematik benötigt zum Schärfen der Diamantwerkzeuge noch Korundschleifscheiben der Körnungsgröße 80. Es handelt sich hierbei um kleine Schleifscheiben mit einem Außendurchmesser von 32 mm und einer Höhe von 20 mm. Insgesamt werden 25 Schleifscheiben gleichmäßig innerhalb der fünf Halter verteilt. Unter einer Auflast von 1200 N werden die Diamantschleifscheiben mit einer mittleren Bahngeschwindigkeit $v_{mit} = 100 \text{ m/min}$ jeweils 30 Sekunden gegenläufig geschärft.

Durchführung der Schleifversuche

Da auf den Produktionsschleifmaschinen des Geschäftsbereiches Systemtechnik der Firma CeramTec AG noch keine wissenschaftlichen Versuche durchgeführt wurden, mussten Messvorrichtungen konstruiert, installiert und vorhandene Messsysteme der Maschinensteuerung zur Messwertaufnahme umgebaut werden (**Kapitel 4.5**). Folgende Eingangs- und Prozessgrößen sind zur Beurteilung herangezogen worden:

- Kräfte $F_x = F_{osz}$, $F_y = F_c$ und $F_z = F_n$ am Werkstück in drei Raumrichtungen
- Drehzahl n der Spindeln
- Stromaufnahme I_W der Spindelmotoren
- Oszillationsweg s_{osz} beim Quer-Seiten-Doppelplanschleifen „Prinzip Wendt“
- Drehzahl n_i des Innenstiftkranzes beim Quer-Seiten-Doppelplanschleifen mit Planetenkinematik
- axiale Vorschubgeschwindigkeit v_{fa}
- Vorschub f_a
- Anzahl der geschliffenen Werkstücke i_W

Tabelle 4.6: Eingangsparameter der Grundsatzversuche für das Quer-Seiten-Doppelplanschleifen „Prinzip Wendt“

		Parameter
Schleifmaschine Wendt WBM 200		
Konstante Versuchsparameter		
Ausfeuerzeit t_A	s	0
Kühlmitteldurchsatz Q_{KS}	lmin ⁻¹	150
Kühlmitteltemperatur T_{KS}	°C	20
Werkstückfläche A_{Wges}	mm ²	1162
Schleifscheibenfläche A_s	mm ²	57776
Belegungsfaktor B	%	2,7
Teilehöhenreduktion χ	mm	0,4
Variable Versuchsparameter		
Schnittgeschwindigkeit v_c	ms ⁻¹	5 bis 30
axiale Vorschubgeschwindigkeit v_{fa}	mm min ⁻¹	1 bis 15
Oszillationsweg s_{osz}	mm	10 bis 30
Oszillationsgeschwindigkeit v_{fosz}	mm min ⁻¹	6000

Ziel ist es, aus den bisherigen Erfahrungen der Großserienproduktion durch eine zweckmäßige Variation und Kombination der Eingangskenngrößen die Anzahl der Versuche auf ein sinnvolles Maß zu beschränken. Um den Versuchsaufwand realisierbar zu halten, wurde die Einfaktorenmethode angewendet, bei der jeweils ein Parameter variiert und die anderen konstant gehalten werden.

Die Untersuchungen wurden ausschließlich auf der selben Wendtschleifmaschine WBM 200 mit den in **Tabelle 4.6** gezeigten Eingangsparametern durchgeführt. Um die Schleifscheiben in einem definierten Verschleißzustand untersuchen zu können, wurden Produktionschargen erst ab 100 Zyklen zur Beurteilung herangezogen.

Nachdem bei dem Planschleifen „Prinzip Wendt“ nur mit linearen Bewegungsformen gearbeitet wurde, entsteht bei der Betrachtung des Planschleifens mit Planetenkinematik aufgrund der komplexeren Schleifbahngeometrie eine neue, schwierig zu erfassende Komponente. Während der Bearbeitung befinden sich mehrere Werkstücke mit stark unterschiedlichen Bewegungsrichtungen und –geschwindigkeiten im Prozessraum. Die Größe und Erreichbarkeit des Arbeitsraumes erschwert das Ermitteln werkstückspezifischer Kräfte. Bei der DLM 700 CNC als kraftgesteuerter Schleifmaschine können die spezifischen Schnittkräfte je Werkstück direkt über die Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n vorgegeben werden. Somit wird das Zeitspannungsvolumen Q_W nicht als Eingangsgröße, sondern als Prozesskenngröße definiert. **Tabelle 4.7** zeigt die Eingangsparameter der Versuche auf der Stähli DLM 700 CNC.

Tabelle 4.7: Eingangsparameter der Grundsatzversuche auf Quer-Seiten-Doppelplanschleifmaschine Stähli DLM 700

		Parameter
Schleifmaschine Stähli DLM 700 CNC		
Konstante Versuchsparameter		
Ausfeuerzeit t_A	s	0
Kühlmitteldurchsatz Q_{KS}	l min ⁻¹	25
Kühlmitteltemperatur T_{KS}	°C	20
Werkstückfläche A_{Wges}	mm ²	25383
Schleifscheibenfläche A_s	mm ²	282600
Belegungsfaktor B	%	9
Teilehöhenreduktion Δh_W	mm	0,4
Variable Versuchsparameter		
Schnittgeschwindigkeit v_c	m min ⁻¹	50 bis 400
Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n	N	1000 bis 7000

Bei der Analyse des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens wurden bisher keine zur Charakterisierung geeigneten Prozessbereiche ermittelt. Um Prozessbereiche zu definieren,

wurden die eingestellten Werte, die Abrichtzyklen und die dazugehörigen Artikel durch die Maschinenbediener dokumentiert. Im **Bild 4.11** ist das Ablaufschema dargestellt.

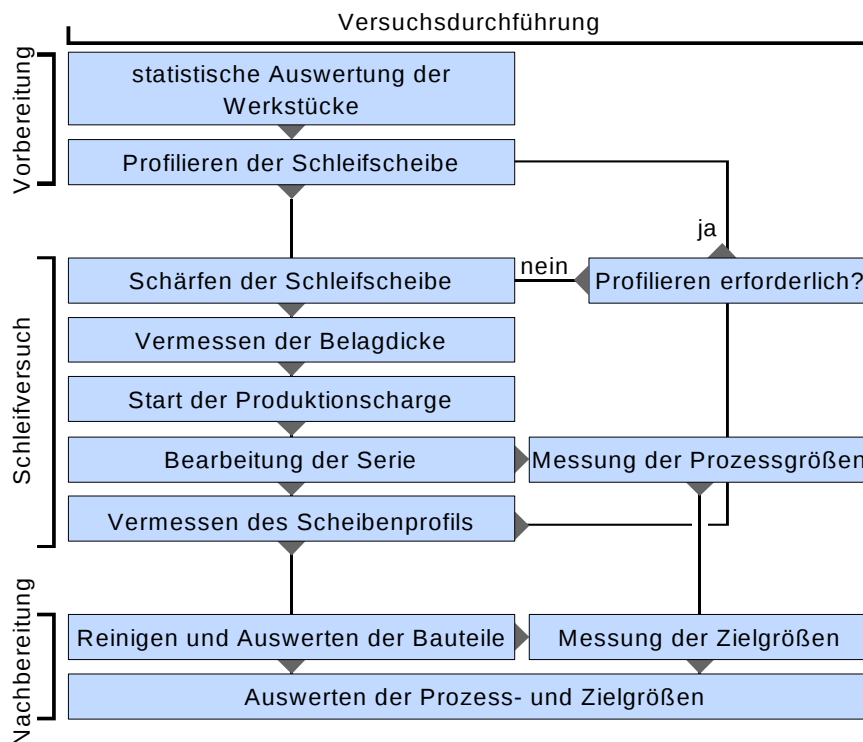


Bild 4.11: Ablaufschema der experimentellen Untersuchungen unter Produktionsbedingungen

Außerdem wurden bei jedem hundertsten Werkstück der Mittenrauwert R_a , die maximale Rautiefe R_t und der Ebenheitsfehler f_E vermessen. Somit lassen sich der Werkzeugverschleiß sowie Einflüsse auf das Arbeitsergebnis über einen langen Zeitraum feststellen.

Die Vorbereitung der Produktion umfasste die statistische Auswertung der Werkstücke sowie das definierte Vorbereiten der Schleifscheibenebenheit durch die Profilierung. Im Schleifprozess selbst wurden die Schleifscheiben zu Beginn der Charge geschärft. Für die Ermittlung von Verschleißbeträgen wurde der Schleifscheibenbelag komplett abgearbeitet. Die Produktionschargen umfassten jeweils Losgrößen von je 10.000 Stück. Das Erreichen von definierten Zeitspannungsvolumina wurde als Kriterium für das erneute Schärfen der Schleifscheiben benutzt. Nach der Produktion der Charge wurden die Schleifscheibenprofile erneut vermessen. In der Nachbereitung der Untersuchungen wurden nach dem Reinigen die Werkstücke hinsichtlich Prozess- und Zielgrößen ausgewertet.

4.5 Technologische Kenngrößen und deren Erfassung

Für die Versuchsauswertung werden die unterschiedlichsten Kenngrößen verwendet, um vergleichbare Aussagen treffen zu können. Es erfolgt eine Einteilung der Kenngrößen in drei Gruppen. Die Eingangs-, Prozess- und Ergebniskenngrößen fassen die wichtigsten Einflussfaktoren zusammen, durch die sich die beiden Quer-Seiten-Doppelplan-schleifprozesse definieren lassen. **Bild 4.12** zeigt die technologischen Kenngrößen.

Die Eingangskenngrößen beziehen sich auf das Fertigungssystem und dessen Stellgrößen. Untersucht werden von der Art der Schleifmaschine über deren Eigenschaften auch werkstückspezifische Einflüsse wie zum Beispiel die Werkstückgeometrie. Mehrere Werkzeugspezifikationen und deren Konditionierung sind neben der Art und Zuführung der Kühlschmierung ebenso wichtige Eingangskenngrößen.

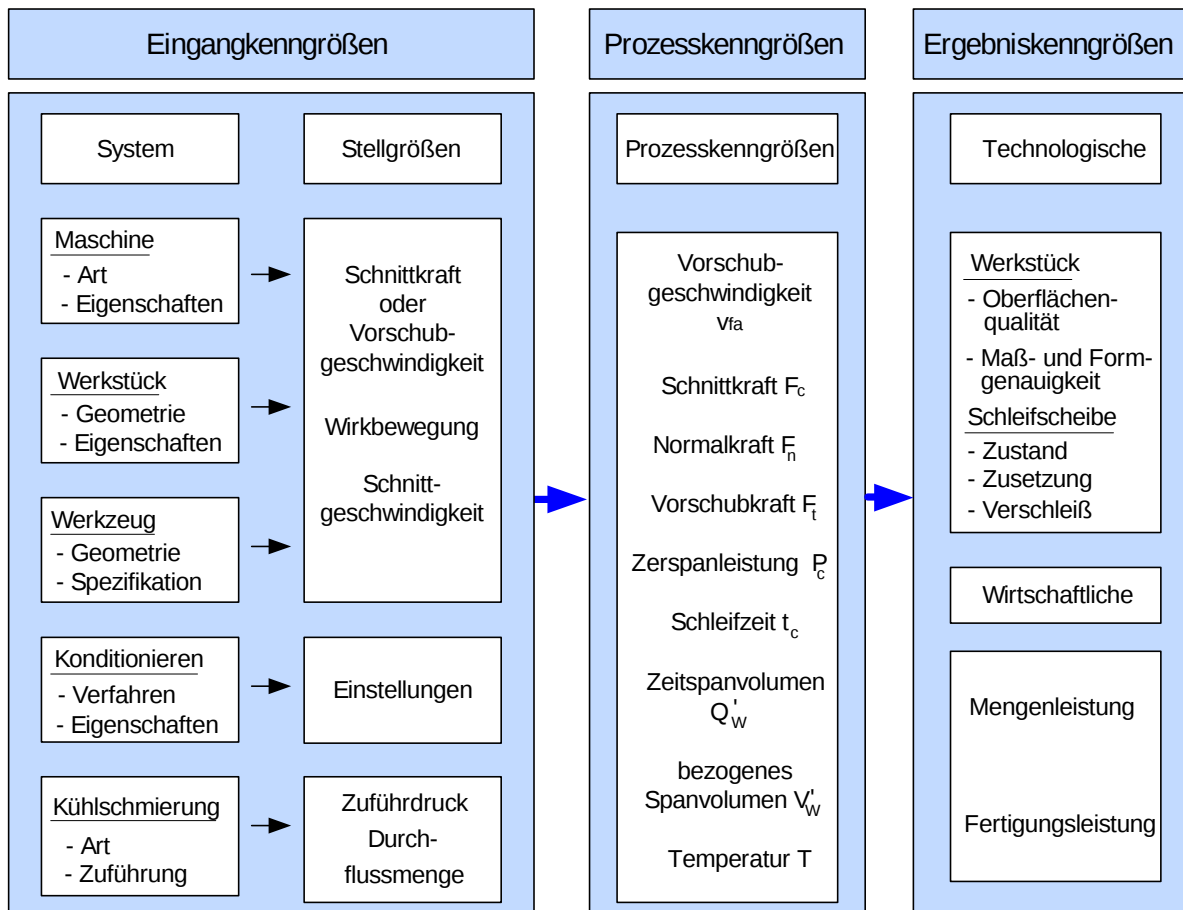


Bild 4.12: Kenngrößen nach König [Kön96]

Die Stellgrößen sind je nach Verfahren unterschiedlich. Bei dem Quer-Seiten-Doppelplanschleifen mit Planetenkinematik wird die Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n eingestellt, beim Quer-Seiten-Doppelplanschleifen "Prinzip Wendt" die axiale Vorschubgeschwindigkeit v_{fa} . Weitere Stellgrößen sind die Variation der Wirkbewegungen nach Form und Geschwindigkeit sowie die Schnittgeschwindigkeit.

Bei dem Quer-Seiten-Doppelplanschleifen mit Planetenkinematik wird die axiale Vorschubgeschwindigkeit v_{fa} und bei dem "Prinzip Wendt" die Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n jeweils als Prozesskenngröße definiert. Gemeinsame Prozesskenngrößen der Verfahren sind die Schnittkraft F_c , die Vorschubkraft F_f , die Zerspanleistung P_c , die Schleifzeit t_c , das Zeitspanvolumen Q'_w und die Temperatur T .

Die Ergebniskenngrößen werden in der Auswertung in technologische und wirtschaftliche Kenngrößen unterteilt. Beurteilungskriterien der Werkstücke sind Oberflächenqualität, Form-

und Maßgenauigkeit. Maßgeblich für die Großserienfertigung sind der Verschleiß, der Zustand und die Zusetzung der Schleifscheiben. Die wirtschaftlichen Kenngrößen umfassen die Mengenleistung und Fertigungsleistung.

4.5.1 Messdatenerfassung

Zur Aufnahme der Messwerte mittels PC werden die Messkarte PCI 20.428W-2 sowie die Messsoftware Diadem der Firma GfS Systemtechnik GmbH & Co. KG, Aachen, eingesetzt.

Die Berechnung und Darstellung der Prozessdaten Drehzahl n , axiale Vorschubgeschwindigkeit v_{fa} , Längsvorschubgeschwindigkeit v_{fw} und Oszillationsweg s_{osz} wird durch die Messsoftware Diadem durchgeführt. Durch eine übersichtliche Darstellung können die einzelnen Messsignale schon während der Aufnahme überwacht werden. Die gespeicherten Messwerte werden in einem Grafikeil entsprechend dargestellt und ausgewertet.

4.5.2 Verfahrens unabhängige Eingangskenngrößen

Beschreibung der Werkstückgeometrie durch die Gestaltfunktion

Für die numerische Berechnung der Schleifscheibenbelastung müssen die Informationen über Anzahl, Geometrie und Lage der Werkstücke im Halter berechnet werden. Dazu wird der Umstand ausgenutzt, dass alle Werkstückpunkte vom Halterzentrum zeit- und ortsversetzt die gleiche Bahnbewegung ausführen und damit den Schleifscheibenbelag in vergleichbarer Weise belasten. Diese Punkte können zusammengefasst diskutiert werden.

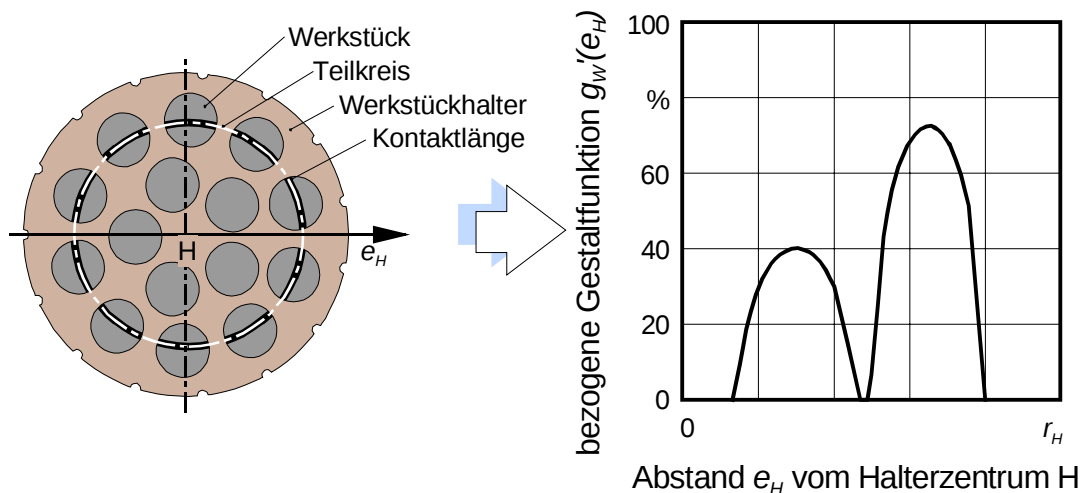


Bild 4.13: Nachbildung der Halterbelegung als zweidimensionale Gestaltfunktion [Ard01]

Zu diesem Zweck wird die Gestaltfunktion $g_w(e_H)$ definiert. Diese beschreibt, welcher Anteil der Werkstückfläche sich in einem bestimmten Abstand e_H vom Halterzentrum H befindet.

Für jede dieser Bahnkurven wird nun die Teilbogenlänge ermittelt, die innerhalb der Werkstückfläche verläuft (**Bild 4.13**).

Physikalisch hat die Gestaltfunktion $g_w(e_H)$ die Dimension einer Länge, die Fläche unterhalb der Kurve entspricht der Fläche aller erfassten Werkstücke. Zum Vergleich verschiedener Halterbelegungen bietet sich die Normierung auf die größtmögliche Kontaktlänge zwischen einem Teilkreis und den Werkstücken an. Auf diese Weise berechnet sich die bezogene Gestaltfunktion

$$g'_w(e_H) = \frac{g_w(e_H)}{2 \cdot \pi \cdot r_H}, \quad (4-1)$$

die als Quotient zweier Längen keine physikalische Einheit, sondern den Charakter eines Gewichtungsfaktors besitzt. Sie wird prozentual angegeben [Ard01].



Bild 4.14: Betrachtung der Auflageflächen Artikel 58908

Da die Werkstücke über große Produktionschargen hinweg in zwischen Vorder- und Rückseite nicht vorsortierter Ausrichtung in die Quer-Seiten-Doppelplanschleifmaschinen eingelegt werden, wurden die Werkstücke zur Vereinfachung des Rechenaufwandes zu flächengleichen Ringflächen substituiert. Dies wird in der folgenden theoretischen Betrachtung an dem Beispiel des Versuchswerkstückes Artikel 58908 der Firma CeramTec AG gezeigt.

Das bei einem Scheibenumlauf entstehende Flächenintegral aus den im Eingriff befindlichen Schleifkörnern eines Querschnittes lässt sich mit zwei einfachen Kreisfunktionen (**Bild 4.15**) berechnen:

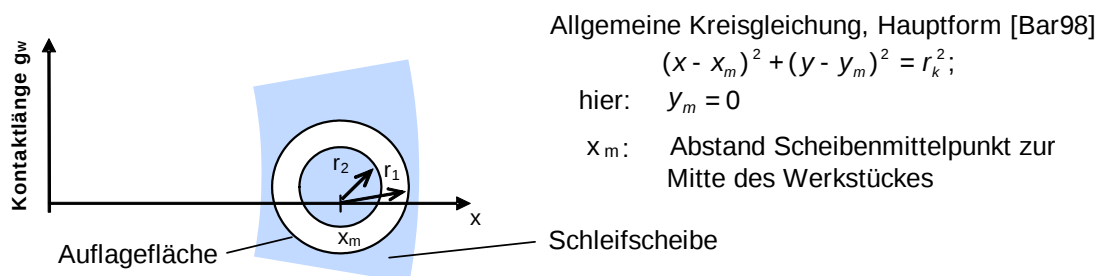


Bild 4.15: Kreisfunktion

In der folgenden Betrachtung wird die Kontaktlänge g_w des Flächenintegrals aus der Geometrie der Auflagefläche errechnet.

Die Untersuchungen der Prozesskenngrößen wurden mit einem Artikel aus einer Presscharge von 50.000 Stück durchgeführt. Aufgrund der unregelmäßigen Außen- und Innenkontur der Dichtscheibe wurde folgende, im **Bild 4.16** dargestellte Vereinfachung zu einer Kreisfläche durchgeführt. Für weitere Berechnungen von Prozesskenngrößen wird die Werkstückfläche $A_w = 1162 \text{ mm}^2$ verwendet.

Flächenintegral

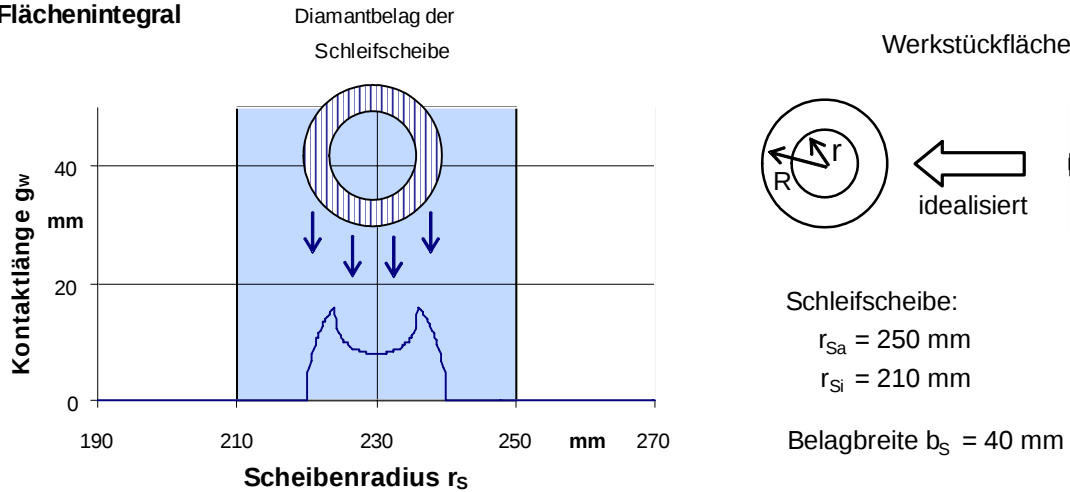


Bild 4.16: Idealisierung des Werkstückes

Durch Umformung der zwei entsprechenden Kreisgleichungen errechnet sich für die Kontaktlänge g_w somit folgende zusammengesetzte Funktion:

$$g_w = 2\sqrt{(r_1^2 - (x - x_m)^2) \operatorname{sgn}(a)} - 2\sqrt{(r_2^2 - (x - x_m)^2) \operatorname{sgn}(b)}. \quad (4.2)$$

$$\text{mit: } \operatorname{sgn}(a) = \begin{cases} 1 \text{ für } : a > 0; \\ 0 \text{ für } : a \leq 0; \end{cases} \quad \text{mit } a = r_1 - (x - x_m). \quad (4.3)$$

$$\text{und: } \operatorname{sgn}(b) = \begin{cases} 1 \text{ für } : b > 0; \\ 0 \text{ für } : b \leq 0; \end{cases} \quad \text{mit } b = r_2 - (x - x_m). \quad (4.4)$$

Im **Bild 4.16** ist das Flächenintegral für die obere Auflagefläche des Versuchswerkstückes dargestellt. Die Form der Auflagefläche ist zu einer Ringfläche mit den Radien $r = 13,10 \text{ mm}$ und $R = 6,55 \text{ mm}$ idealisiert. Das Werkstück befindet sich in der Mitte der Schleifscheibe bei $r_{Sm} = 230 \text{ mm}$.

Belegung

Als Chargenmenge definiert ARDEL die Stückzahl der gleichzeitig im Eingriff befindlichen Werkstücke. Der Belegungsfaktor

$$B = \frac{\sum A_w}{A_s} \cdot 100. \quad (4.5)$$

stellt den Quotienten der Summe aller bearbeiteten Werkstückflächen A_w prozentual zur Schleifscheibenfläche A_s dar. Da die Anzahl der zur Verfügung stehenden Kornschnelden unabhängig von der im Eingriff befindlichen Werkstückfläche A_w konstant bleibt, ist dieser Faktor zur Beschreibung des Prozessverlaufes entscheidend [Ard01].

Bei den untersuchten komplexen Werkstückgeometrien unterscheidet sich die Belegung bezüglich oberer und unterer Schleifscheibe.

4.5.3 Eingangskenngrößen Quer-Seiten-Doppelplanschleifen „Prinzip Wendt“

Schnittgeschwindigkeit

Die Schnittgeschwindigkeiten v_{co} und v_{cu} werden jeweils über die Drehzahl der Schleifspindel eingestellt. Die zwei Gleichstrommotoren lassen sich stufenlos regeln und somit Spindeldrehzahlen n von 0 bis 1200 min^{-1} erzeugen. Die untersuchten Schleifscheiben haben einen Durchmesser $d_s = 500 \text{ mm}$ und eine Belagbreite $b_s = 40 \text{ mm}$. Aus den genannten Größen lässt sich die resultierende Schnittgeschwindigkeit berechnen.

$$v_{cm} = n \cdot d_m \cdot \pi. \quad (4.6)$$

Es ergibt sich hieraus ein mittlerer Schnittgeschwindigkeitsbereich v_{cmit} von 0 bis 30 m/s. Infolge der Oszillation der Werkstücke über die Schleifscheibe variiert der Schleifscheibendurchmesser d_s vom inneren zum äußeren Rand des Schleifbelages von 420 mm bis 500 mm. Die Oszillation der Werkstücke über die gesamte Schleifscheibenbelagsbreite bedingt im Arbeitsprozess Schnittgeschwindigkeitsänderungen bis zu 20 Prozent. Es werden somit im Folgenden immer maximale Schnittgeschwindigkeiten v_{cmax} angegeben, die sich auf den maximalen Schleifscheibendurchmesser $d_{sa} = 500 \text{ mm}$ beziehen.

Drehzahlmessung

Bei der Drehzahlmessung wurden jeweils die obere und untere Schleifspindel über zwei Tachogeneratoren getrennt aufgenommen. Für die Wertaufnahme an der Messkarte ist eine Spannungsteilung 1:20 notwendig, um die vorhandene Spannung von maximal 190 V auf die Messspannung von $\pm 10 \text{ V}$ zu reduzieren.

Um die Messsoftware Diadem bezüglich des Eingangssignales zu kalibrieren, wird das optische Drehzahlmessgerät Analysator A30/T30 mit einer Messgenauigkeit von $\pm (1U + 0,1\% \text{ der Messung})$ der Firma SPM Instrument AB verwendet. Zur Kalibrierung wird eine definierte Drehzahl über die stufenlose Drehzahlregelung der Maschine eingestellt. Zur Feineinstellung wurde an den Schleifscheiben eine Reflexmarke befestigt und mit Hilfe eines mobilen Stroboskop-Drehzahlmessgerätes die momentane Drehzahl mit einer Genauigkeit

von $\pm 10 \text{ min}^{-1}$ bestimmt. Der Abgleich erfolgt in einem dafür vorgesehenen Menü in der Messsoftware. Dabei werden eine untere und eine obere Drehzahl von zum Beispiel 100 min^{-1} und 1000 min^{-1} eingestellt und jeweils die dabei auftretenden Spannungen gespeichert. Anschließend interpoliert die Software zwischen den beiden Punkten. Zur Kontrolle werden dazwischenliegende Drehzahlen angefahren und die mit dem Stroboskop gemessenen Werte mit denen der Messsoftware verglichen. Dabei wurde eine Linearitätsabweichung im oberen Drehzahlbereich von $\pm 20 \text{ min}^{-1}$ festgestellt.

Axiale Vorschubgeschwindigkeit

Der von der Maschine während eines Schleifzyklus zurückgelegte axiale Weg wird über einen zusätzlich eingebauten Lasertaster Typ M5L/4 der Firma MEL Mikroelektronik GmbH, Eching, aufgenommen. Der Messbereich bei einem Referenzabstand von 24 mm beträgt $\pm 2 \text{ mm}$ bei einer Auflösung von $1 \mu\text{m}$. Das gelieferte Messsignal von $\pm 10 \text{ V}$ kann direkt an der Messkarte angeschlossen werden. Der Messtaster ist so angeordnet, dass er ausschließlich den Arbeitshub aufnimmt, unabhängig von der eingestellten Teilehöhe. Somit kann die axiale Zustellung a_e bei Änderung der Produktionsteile mit einer Höhe von 2 bis 10 mm ohne Umbau und Neukalibrierung des Messtasters aufgenommen werden.

Die Kalibrierung erfolgt in der oberen Endlage der Schleifspindel entsprechend der Position 0 mm. Durch Einbringen eines 2 mm Endmaßes kann die Position 2 mm aufgenommen werden.

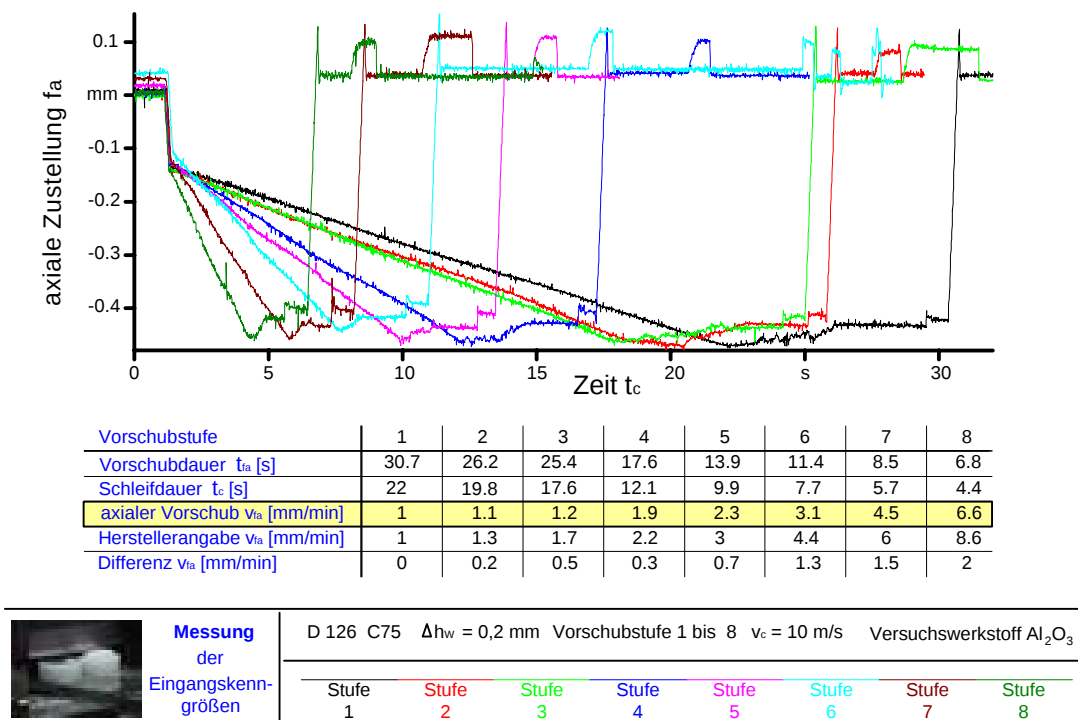


Bild 4.17: Vergleich der axialen Vorschubgeschwindigkeiten v_{fa} mit den Herstellerangaben

Zur Aufnahme der Oszillationsbewegung werden bereits eingebaute induktive Wegsensoren WIRE 200 verwendet. Das Messsignal von -10 V bis $+7\text{ V}$ kann ebenfalls direkt an die Messkarte angeschlossen werden. Durch Anfahren der vorderen und hinteren Endlage (Position 1 und 6) kann der Messsensor über die Messsoftware kalibriert werden. Die vordere Endlage Position 1 entspricht dem Nullpunkt, der Weg bis zur hinteren Endlage Position 6 wird mit einem digitalen Messschieber ausgemessen. Dieser Vorgang wird für den zweiten Schieber wiederholt.

Der axiale Vorschub kann mit Hilfe eines hydraulischen Drosselventils in zehn Stufen eingestellt werden. Durch mehrere Versuche bei unterschiedlichen Schnittbedingungen wurde die axiale Vorschubgeschwindigkeit v_{fa} gemessen und mit den Herstellerangaben verglichen (**Bild 4.17**).

Der tatsächliche axiale Vorschub ist nach **Bild 4.17** geringer als vom Hersteller angegeben, vor allem im Bereich der höheren Vorschubstufen. Für weitere Berechnungen wird der Mittelwert der fünffach gemessenen axialen Vorschubgeschwindigkeiten v_{fa} verwendet.

Axiale Vorschubbewegung

Die obere Schleifscheibe bewegt sich bei Schleifbeginn im Eilgang mit $v_{faE} = 15\text{ mm s}^{-1}$ nach unten bis zum Erreichen der Sicherheitshöhe l_v . Dort wird die Vorschubgeschwindigkeit auf die für die Schleifbearbeitung notwendige reduziert. Durch die Wegsteuerung der Maschine wird das Werkstück mit einer der zehn wählbaren axialen Schleifvorschubgeschwindigkeiten geschliffen, es sei denn, die Schleifkräfte übersteigen die auf $F_{zmax} = 11,5\text{ kN}$ ausgelegte Steifigkeit der Maschine.

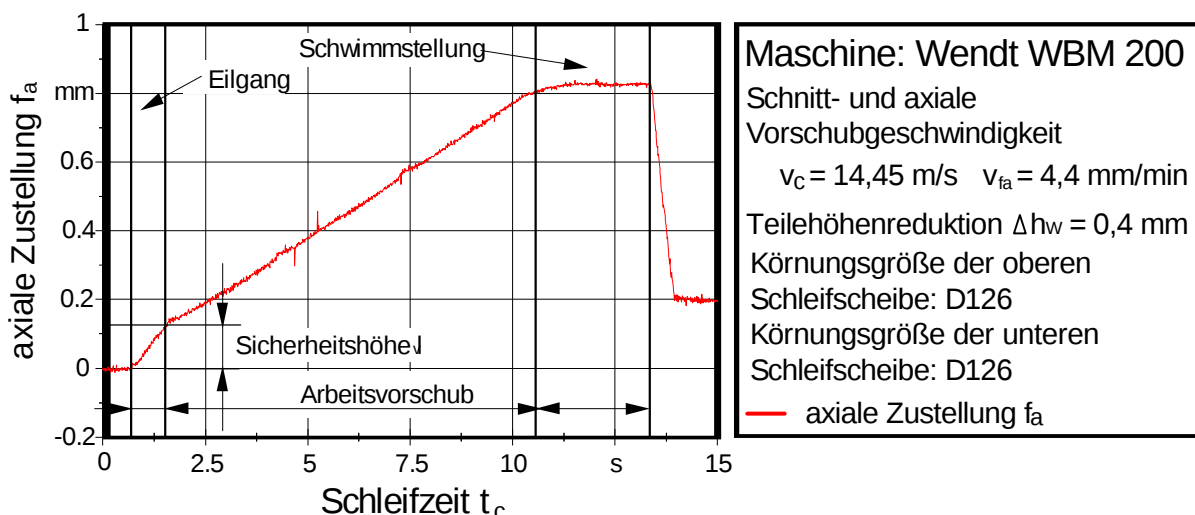


Bild 4.18: Arbeitsablauf der axialen Vorschubbewegung f_a

Die Einstellung einer Ausfeuerzeit nach Erreichen der voreingestellten Werkstückhöhe ist möglich. Unabhängig von der Ausfeuerzeit fährt die Maschine in eine Schwimmstellung, das heißt, die Schleifscheiben verharren in der Endposition und üben hierbei einen geringen

Schleifdruck auf die Teile aus. Dies ermöglicht ein Entladen der Werkstücke ohne Verschlechterung von Maß- und Formgenauigkeiten. Nach dem Entladen nimmt die obere Schleifscheibe im Eilgang die Ausgangsposition wieder ein.

Die axiale Vorschubgeschwindigkeit v_{fa} als die Hauptzeit t_h bestimmende Größe lässt sich über die zehnstufige Einstellung beeinflussen.

Oszillationsgeschwindigkeit

Die Oszillationsgeschwindigkeit v_{fosz} ist über ein hydraulisches Drosselventil stufenlos einstellbar. Der Hersteller konnte keine konkreten Angaben zu den daraus resultierenden Oszillationsgeschwindigkeiten machen. Bei den Versuchen wurde die Drossel in einer produktionsüblichen mittleren Stellung 7,2 eingestellt. Aus dem Oszillationsweg s_{osz} und der Zeit ergab sich eine Oszillationsgeschwindigkeit von $v_{fosz} = 100 \text{ mm/s}$.

$$v_{fosz} = \frac{s_{osz}}{t_{osz}}. \quad (4.7)$$

Messung des Oszillationsweges

Die Oszillationsbewegung wird mit den für die jeweiligen Schieber bereits eingebauten induktiven Wegmesssensoren WIRE 200 erfasst. Das Messsignal von -10 V bis $+7 \text{ V}$ kann ebenfalls direkt an die Messkarte angeschlossen werden. Die bereits vorgenommenen Einstellungen in der Messsoftware Diadem aus der Diplomarbeit [Poh98] konnten nach einer kurzen Überprüfung durch einen digitalen Messschieber übernommen werden.

4.5.4 Eingangskenngrößen beim Planschleifen mit Planetenkinematik

Drehzahl

Die Einstellung der Drehzahl für die obere und untere Schleifscheibe, sowohl für den inneren Stiftkranz erfolgt über die Siemens-S4-Steuerung und den verbundenen Frequenzumrichter. Die eingestellten Drehzahlen werden mit dem Drehzahlmessgerät Analysator A30/T30 überprüft. Aufgrund der guten Übereinstimmung wird mit den am Bedienpult angezeigten Werten weitergearbeitet.

Anpresskraft

Die über das Waagebalkensystem eingestellte Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n wird mittels eines Kraftsensors der Firma Kistler überprüft. Auch hier werden aufgrund der Übereinstimmung die Einstelldaten des Bedienpultes für die weiteren Analysen verwendet.

4.5.5 Verfahrensunabhängige Prozesskenngrößen

Zerspanungsvolumen V_W

Das Zerspanungsvolumen V_W gibt den Volumenverlust der Werkstücke an. Die Bestimmung erfolgt über Wägung der Werkstücke vor und nach der Bearbeitung (m_{Wv} ; m_{Wn}). Über die Sinterdichte ρ_s und die Anzahl der Werkstücke z_W kann das Volumen bestimmt werden.

$$V_W = \frac{(m_{Wv} - m_{Wn})}{\rho_s} \cdot z_W. \quad (4.8)$$

Eine weitere Möglichkeit der Bestimmung des Zerspanungsvolumens ist das Bestimmen des Volumens über die Höhendifferenz Δh_W und die Werkstückfläche A_W . Dieses Verfahren ist jedoch nur dann geeignet, wenn, wie bei den Versuchsteilen der Fall, die Werkstückfläche A_W bekannt ist und die Werkstücke prismatisch sind.

$$V_W = \Delta h_W \cdot A_W \cdot z_W. \quad (4.9)$$

Die nachfolgende **Tabelle 4.8** zeigt die laut ARDELT zur Beschreibung von Zerspanungsprozessen notwendigen Größen.

Tabelle 4.8: Größen zur Charakterisierung des Zerspanungsprozesses [Ard01]

Höhenbezogene Größen	Volumetrische Größen
Teilhöhenreduktion (Aufmaß) $\Delta h_W \quad [\mu\text{m}]$	Zerspanungsvolumen $V_W = \Delta h_W \cdot z_W \cdot A_W \quad [\text{mm}^3]$
zeitbezogene Teilehöhenreduktion $\Delta \dot{h}_W = \frac{\Delta h_W}{t_c} \quad \left[\frac{\mu\text{m}}{\text{s}} \right]$	Zeitspanungsvolumen $Q_W = \frac{\Delta h_W \cdot z_W \cdot A_W}{t_c} \quad \left[\frac{\text{mm}^3}{\text{s}} \right]$
wegbezogene Teilehöhenreduktion $\Delta h'_W = \frac{\Delta h_W}{s} \quad \left[\frac{\mu\text{m}}{\text{m}} \right]$	flächenbezogenes Zeitspanungsvolumen $Q''_W = \frac{\Delta h_W \cdot z_W \cdot A_W}{t_c \cdot A_S} \quad \left[\frac{\text{mm}^3}{\text{s} \cdot \text{mm}^2} \right]$

Zeitspanungsvolumen Q_W

Das Zeitspanungsvolumen Q_W bezieht das Spanvolumen V_W auf die Schleifzeit t_c , um somit eine Größe für den Vergleich mit anderen Schleifverfahren zu bekommen.

$$Q_W = \frac{V_W}{t_c}. \quad (4.10)$$

Bei den Quer-Seiten-Doppelplanschleifmaschinen können jedoch Schleifscheiben mit unterschiedlichen Belagflächen A_S verwendet werden. Um diesen Einfluss zu berücksichtigen, wird das Zeitspanungsvolumen auf die Schleifscheibenbelagfläche A_S bezogen.

$$Q''_w = \frac{V_w}{t_c \cdot A_s}. \quad (4.11)$$

Dieses flächenbezogene Zeitspannungsvolumen kann als Produkt aus der zeitbezogenen Teilehöhenreduktion $\Delta \dot{h}_w$ und dem Belegungsfaktor interpretiert werden.

$$Q''_w = \frac{\Delta h_w}{t_c} \cdot \frac{z_w \cdot A_w}{A_s}. \quad (4.12)$$

Kräftesystem

Die Schleifnormalkraft F_n wirkt senkrecht zur Hauptschnittbewegung und somit in der axialen Vorschubrichtung. Die Aufnahme der Kraft in z-Richtung erfolgt mit dem Drei-Komponenten-Kraftsensor. Deshalb wird die Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n oft als F_z -Komponente bezeichnet und ist bei diesem Schleifverfahren die bestimmende Kraftkomponente.

Die Schnittkraft F_c wirkt in Richtung der Hauptschnittbewegung und somit tangential zum Schleifscheibenumfang. Auch diese Kraft wird mit dem Drei-Komponenten-Kraftsensor in x-Richtung gemessen und deshalb auch als F_x -Komponente bezeichnet.

Bezogene Schleifnormalkraft in axialer Richtung

Zur Abbildung des Quer-Seiten-Doppelplanschleifprozesses muss die Schleifnormalkraftkomponente in axialer Richtung F_n betrachtet werden. Aus der Multiplikation des Schleifdruckes p mit der Werkstückfläche A_w ergibt sich die Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n zu:

$$F_n = p \cdot A_w. \quad (4.13)$$

Das Zerspanungsvolumen V_w errechnet sich aus dem Produkt der Teilehöhenreduktion Δh_w und der Werkstückfläche A_w :

$$V_w = \Delta h_w \cdot A_w. \quad (4.14)$$

Durch Umformen von (4.14) nach A_w zu

$$A_w = \frac{V_w}{\Delta h_w}. \quad (4.15)$$

folgt für die Schleifnormalkraftkomponente in axialer Richtung F_n :

$$F_n = \frac{V_w}{\Delta h_w} \cdot p. \quad (4.16)$$

Beim Quer-Seiten-Doppelplanschleifen herrscht ein Kräftegleichgewicht im Prozessraum. Die Schleifnormalkraftkomponente in axialer Richtung F_{no} auf der Oberseite muss gleich der Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_{nu} auf der Unterseite des Werkstückes sein. Weiterhin ist

$$F_{no} = F_{nu}^2. \quad (4.17)$$

Der Ansatz des Kräftegleichgewichtes ergibt mit **(4.16)**:

$$\frac{V_{wo}}{\Delta h_{wo}} \cdot p_o = \frac{V_{wu}}{\Delta h_{wu}} \cdot p_u. \quad (4.18)$$

Schleifdruck p

Der Schleifdruck p wirkt während der Zerspanung senkrecht in z-Richtung auf das Werkstück. Der Schleifdruck lässt sich aus der Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n direkt bestimmen.

$$p = \frac{F_n}{A_g}. \quad (4.19)$$

Wichtig hierbei ist, dass die Kontaktfläche A_g im Schleifraum nur dann gleichbedeutend mit der Werkstückfläche A_w ist, wenn die gesamte Werkstückfläche auf der Schleifscheibe aufliegt. Übertagt das Werkstück die Schleifscheibenränder, beträgt die im Schleifraum befindliche Werkstückfläche A_w nur einen bestimmten Prozentsatz.

Kraftmessung

Die Kraftmessung erfolgt über den Drei-Komponenten-Kraftsensor Typ 9017A der Firma Kistler Instrumente GmbH, Ostfildern. Mit diesem Kraftsensor können drei orthogonale Kraftkomponenten erfasst werden. Um die Schnittkräfte aufzunehmen, wird der Kraftsensor direkt anstelle der Werkstücke in den Prozessraum gebracht. Dazu ist es notwendig, dass der Sensor zwischen zwei Al_2O_3 -Scheiben liegt, die abgeschliffen werden können. Um die F_x - und F_y -Komponente aufnehmen zu können, ist der Sensor mit bis zu 13000 N in F_z -Richtung vorzuspannen. Die Datenübertragung erfolgt mittels Kabel direkt in den Messrechner.

² Eigengewicht des Werkstückes $G_w \ll F_u$ beziehungsweise F_o vernachlässigt

4.5.6 Prozesskenngrößen Quer-Seiten-Doppelplanschleifen „Prinzip Wendt“

Schnittleistung P_c

Die Schnittleistung kann auf zwei Arten berechnet werden, zum einen über das Produkt der Schnittkraft F_c und der Schnittgeschwindigkeit v_c .

$$P_c = F_c \cdot v_c. \quad (4.20)$$

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, dass über die Stromaufnahme der separaten Spindelantriebe Rückschlüsse auf die Schnittleistung der oberen und unteren Schleifscheibe gezogen werden.

Bei dieser Methode kann die Schnittleistung nach oberer und unterer Scheibe getrennt bewertet werden. Die Messung der Motorleistung P_{Mot} gestattet Rückschlüsse auf die Schnittleistung, wenn der Wirkungsgrad η als konstant angenommen wird.

Kontaktlänge l_g

Die Kontaktlänge l_g gibt den Weg wieder, den das Werkstück relativ zur Schleifscheibe zurücklegt. Da der Drehbewegung der Schleifscheibe eine Oszillation der Schieber überlagert wird, resultiert daraus eine spiralförmige Bahn. Die Berechnung erfolgt aus dem Abstand a zweier Spiralbahnen, dem Gesamtwinkel φ und der Anzahl der Oszillationen z_{osz} (ein Oszillationshub: äußere Endlage – innere Endlage – äußere Endlage). Zum Bestimmen der Größen kann das entworfene Berechnungsprogramm benutzt und mit Hilfe der folgenden Gleichung für Archimedische Spiralen die Kontaktlänge l_g berechnet werden [Dub95; S. A 75].

$$l_g = z_{osz} \cdot a \cdot \left(\varphi \sqrt{1 + \varphi^2} + \arcsin h \varphi \right). \quad (4.21)$$

4.5.7 Prozesskenngrößen beim Planschleifen mit Planetenkinematik

Die Einordnung des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens mit Planetenkinematik bezüglich der vielen Parameter, durch die das Arbeitsergebnis beeinflusst werden kann, wurde von ARDELT untersucht [Ard01]. Die theoretischen und universitären Untersuchungen stellen die Grundlage für die Ermittlung von produktionstechnischen Ergebnissen in der Großserie dar. Es wird deswegen in diesem Kapitel nicht explizit auf die Grundlagen eingegangen, sondern vielmehr auf die Erfahrungen der Produktion.

Kinematik

Das Besondere an der Planetenkinematik ist die zyklويدische Relativbewegung, welche zu verschlungenen Bearbeitungsspuren führt. **Bild 4.19** zeigt die Bahnbewegung eines

Werkstückes bei einer Umdrehung der Läuferscheibe auf der unteren (gestrichelten) und oberen (gepunkteten) Schleifscheibe.

Bei den in der Großserie üblichen Drehzahleinstellungen von 150 bis 200 min⁻¹ im Gegenlauf sowie einer Drehzahl des inneren Zahnkranzes von ± 100 min⁻¹ entstehen als Bahnform auf der oberen und der unteren Schleifscheibe gestreckte Epizykloiden.

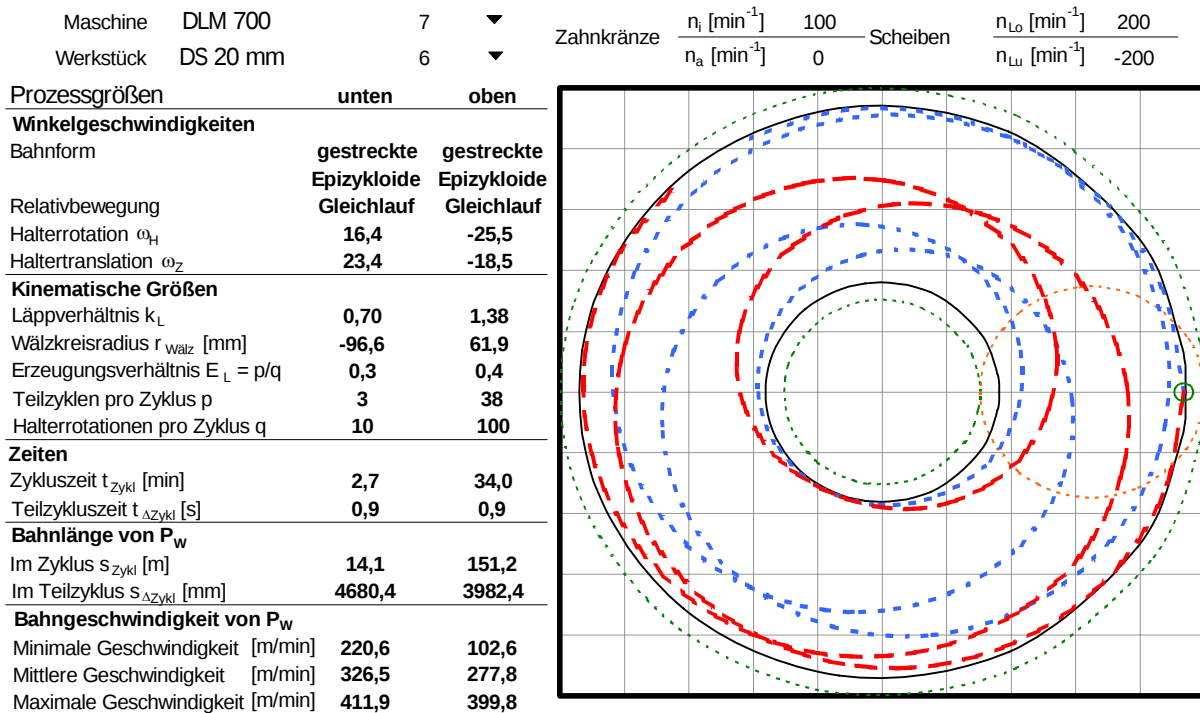


Bild 4.19: Kinematik für einen Zyklus nach ARDELT

Auf der linken Seite von **Bild 4.19** sind die Prozessgrößen angegeben, die innerhalb der Produktion eingestellt werden. Die unterschiedlichen Quer-Seiten-Doppelpfanschleifverfahren können über die mittlere Bahnlänge des Werkstückpunktes P_W verglichen werden.

Für die Bahngeschwindigkeit gilt:

$$\vec{v}(t) = \begin{pmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{y}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -a_Z \omega_Z \sin(\omega_Z t) - e_H \omega_H \sin(\omega_H t) \\ a_Z \omega_Z \cos(\omega_Z t) + e_H \omega_H \cos(\omega_H t) \end{pmatrix}. \quad (4-22)$$

Die Bildung des Betrages ergibt:

$$v(t) = |\vec{v}(t)| = \sqrt{a_Z^2 \omega_Z^2 + e_H^2 \omega_H^2 + 2 a_Z e_H \omega_Z \omega_H \cos((\omega_Z - \omega_H)t)}. \quad (4-23)$$

für die skalare Bahngeschwindigkeit $v(t)$ [Spu97].

Relativgeschwindigkeiten

Der Betrag der Bahngeschwindigkeit wird maximal, wenn die Bewegungsvektoren von Haltermittelpunkt und Werkstückpunkt in die gleiche Richtung zeigen. Bei entgegengesetzten Richtungen wird die Bahngeschwindigkeit minimal. Auf Grundlage dieser Überlegungen lassen sich die Extremwerte der Bahngeschwindigkeit eines Werkstückpunktes nach den Gleichungen

$$\begin{aligned} v_{max} &= |v_Z| + |v_H(e_H)| = |\omega_Z a_Z| + |\omega_H e_H| \\ v_{min} &= |v_Z| - |v_H(e_H)| = |\omega_Z a_Z| - |\omega_H e_H| \end{aligned} \quad (4-24)$$

ermitteln. Der arithmetische Mittelwert aus der minimalen und der maximalen Bahngeschwindigkeit entspricht nicht der mittleren Bahngeschwindigkeit v_{mit} eines Werkstückpunktes. Zur Berechnung von v_{mit} ist entsprechend dem Ausdruck

$$v_{mit} = \frac{1}{t_{\Delta Zykl}} \int_0^{t_{\Delta Zykl}} v(t) dt \quad (4-25)$$

die Betrachtung eines vollständigen Teilzyklus erforderlich. Die mittlere Bahngeschwindigkeit v_{mit} wird hier aus dem Quotienten der Weglänge pro Teilzyklus und der Teilzykluszeit berechnet. Die Weglänge wird in Gleichung (4-25) durch das Integral der Bahngeschwindigkeit über die Teilzykluszeit repräsentiert. Die Lösung von Gleichung (4-25) führt nach SPUR und EICHHORN [Spu97] auf ein elliptisches Integral zweiter Ordnung. Jede Bahnkurve kann mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten durchlaufen werden.

Bahnlängen

Eine wichtige Beurteilung des Prozesses wird über die Bahnlänge P_W durchgeführt. Für die mittlere Bahnlänge eines Werkstückpunktes P_W gelten nach SPUR und ARDELT auf der Bahnkurve zum Zeitpunkt $t_0 = 0$ die Koordinaten $x = a_Z + e_H$ und $y = 0$, dies entspricht zum Zeitpunkt t auf seiner Bahnkurve $\vec{r}(t)$ der Lage

$$\vec{r}(t) = \begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_Z \cos(\omega_Z t) + e_H \cos(\omega_H t) \\ a_Z \sin(\omega_Z t) + e_H \sin(\omega_H t) \end{pmatrix}. \quad (4-26)$$

Der Abstand zum Scheibenzentrum entspricht dem Betrag des Ortsvektors und beträgt

$$r(t) = |\vec{r}(t)| = \sqrt{a_Z^2 + e_H^2 + 2 a_Z e_H \cos((\omega_Z - \omega_H)t)}. \quad (4-27)$$

Da sich alle Werkstücke zwischen den beiden Stiftkränzen befinden, ist der Wertebereich der Beträge aller Ortsvektoren durch das Intervall $r_i < r(t) < r_a$ eingegrenzt [Spu97, Ard01].

Schleifnormalkraft in axialer Richtung

Die Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n ist für das Quer-Seiten-Doppelplanschleifen mit Planetenkinematik die maßgebliche Größe für das Zerspanungsvolumen. Abhängig von der genutzten Schleifscheibe kann die Auflast zwischen 100 N bis 10.000 N variiert werden.

Antriebsmomente

Die direkte Beurteilung des Prozessverlaufes ist über die Antriebsmomente gegeben. Da die direkte Messung der Schnittkräfte aufgrund der komplexen Bewegungsbahnen der Werkstücke nicht realisierbar ist, muss auf die Werte der Frequenzumformer zugegriffen werden.

Die Quer-Seiten-Doppelplanschleifmaschine DLM 700 der Firma Stähli AG ist mit einer Protokollfunktion ausgestattet, die es ermöglicht, die Frequenzumformerwerte über eine RS 232-Schnittstelle im Textformat auszugeben.

Schnittleistungen

Es gilt auch für das Quer-Seiten-Doppelplanschleifen mit Planetenkinematik, dass die Stromaufnahme ein wesentlicher Faktor für den Bediener ist, seinen Schleifprozess zu analysieren und zu steuern. Eine Aussage über die entstehenden Momente kann wegen des eingesetzten Gegenlaufes nicht erfolgen. Aufgrund der Erkenntnisse zwischen Stromaufnahme, Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n , sowie Schleifzeit t_c wird einzig das Intervall des Abrichtprozesses gesteuert.

4.5.8 Ergebnisgrößen

Werkstückhöhe

Mit einem Höhentaster sowie einer Bügelmessschraube der Firma Mitutoyo Messgeräte GmbH, Neuss, mit der Auflösung von jeweils 1 µm werden Höhe und Absatztiefe als relevante einzuhaltende Maße nach dem Schleifvorgang erfasst. Die gemessenen Daten werden mit Hilfe des Qualitätssicherungsprogrammes Q-DAS nach statistischen Verfahren ausgewertet. Insbesondere im Blick auf die Großserienfertigung von Werkstücken mit engen Höhentoleranzen stellt die Bandbreite der Einzelhöhen einer Teilecharge eine wichtige Kennzahl dar, die als Höhenstreuung bezeichnet wird. Der arithmetische Mittelwert der Werkstückhöhen $\bar{h}_w$ einer Charge mit z_w Werkstücken berechnet sich nach

$$\bar{h}_w = \frac{1}{z_w} \sum_{j=1}^{z_w} h_{wj} . \quad (4.28)$$

als Quotient aus der Summe der Einzelhöhen und der Anzahl z_w . Zur Verdeutlichung der Verteilung der Teilehöhen innerhalb der Höhenstreuung können die Abweichungen der

Teilehöhen vom Chargenmittelwert diskret dargestellt werden. Die Höhen der Werkstücke einer Charge wurden nach der Bearbeitung und der Reinigung der Teile mit einer Mikrometerschraube der Firma Mitutoyo Messgeräte GmbH, Neuss, gemessen.

Rauwerte R_a und R_t

Laut DIN 4768 ist der Mittenrauwert R_a der arithmetische Mittelwert der absoluten Beträge der Abstände y des Rauheitsprofils von der mittleren Linie innerhalb der Messstrecke. Der Mittenrauwert ist gleichbedeutend mit der Höhe eines Rechtecks, dessen Länge gleich der Gesamtmessstrecke l_r und das flächengleich mit der Summe der zwischen Rauheitsprofil und mittlerer Linie eingeschlossenen Fläche ist“ [Hoi99]. Die maximale Rautiefe R_t ist der Abstand vom kleinsten zum größten Wert des Rauheitsprofils und ausschlaggebend für die Bestimmung des Aufmaßes des Polierprozesses. Die Rauwerte der Keramikoberfläche werden mit einem Hommel Tester T 20 der Firma Hommelwerke GmbH, Schwenningen, erfasst. Bei den Einstellungen der Messstrecke $l_r = 4,8$ mm und der Geschwindigkeit $v_{Ra} = 0,5$ mm/s wird das Werkstück an drei verschiedenen Stellen mit unterschiedlicher Orientierung gemessen und die erhaltenen Rauheitswerte gemittelt. Es wurde ein Taststift von 60 mm Länge mit einem Spitzenradius von 2 μm und einem Spitzenwinkel von 60° verwendet. Das Tastsystem erreicht eine Auflösung von 0,01 μm [DIN 4762, DIN 4768].

Ebenheitsfehler f_E

Die Ebenheitsfehler f_E der Werkstücke wurden auf einem Gerät des Typs Flattest III der Firma Intop Precision Engineering GdB, Frickingen, vermessen. Dabei handelt es sich um ein Schräglichtinterferometer mit pneumatischer Probenzuführung und automatischer Interferenzstreifenauswertung. Das Prüffeld hat die Form eines Kreises mit einem Durchmesser von 50 mm.

Als Lichtquelle dient ein Helium-Neon-Laser mit einer Wellenlänge von 632,8 nm. Der Abstand zwischen zwei Interferenzlinien, die als Höhenlinien der Werkstückoberfläche gedeutet werden, entspricht bei senkrechter Einstrahlung der halben Lichtwellenlänge. Um bei rauen Oberflächen interferenzfähige Lichtreflexe zu erhalten, werden die Proben schräg beleuchtet. Dadurch wird allerdings die Auflösung um den Faktor $1/\cos(\alpha)$ reduziert, wobei α den Einfallswinkel des Lichtes gegenüber der Oberflächennormalen darstellt. Die pneumatische Probenzuführung sichert eine reproduzierbare Ausrichtung der zu vermessenden Fläche.

Der Ebenheitsfehler f_E wird als Peak-to-Valley-Wert, also als Differenz zwischen dem höchsten und dem niedrigsten gemessenen Wert, gegenüber einer automatisch angepassten Ebene angegeben. Die Ergebnisse werden auf 0,01 μm genau gerundet. Die graphische Ausgabe der Ergebnisse ist entweder als 3D-Darstellung, als Höhenlinien- oder als Falschfarben-Diagramm möglich. Ein großer Vorteil optischer Messverfahren besteht in der Möglichkeit, unterbrochene Flächen auszuwerten.

Oberflächentraganteil T_a

Die im jeweiligen Werkstoff vorhandene geschlossene Porigkeit wird im Zuge der Hartbearbeitung der Keramik geöffnet und ergibt eine reduzierte Kontaktfläche zum Gleitpartner. Der Traganteil T_a gibt den prozentualen Anteil dieser Kontaktfläche, der tragenden Fläche zum Gleitpartner, in einem festgelegten Messrahmen an. Der Traganteil ist eine wichtige Kenngröße des tribologischen Verhaltens von Oberflächen.

Der Oberflächentraganteil wurde mit einer auf dem Prinzip der Lichtreflexion beruhenden Messeinrichtung, dem Buehler Omnimet Image Analyzer vermessen.

Schleifverhältnis G

Das Schleifverhältnis G (von „grinding ratio“) bezieht das an den Werkstücken erreichte Zerspanungsvolumen V_W auf das Verschleißvolumen V_S der Schleifwerkzeuge. Nach der Gleichung

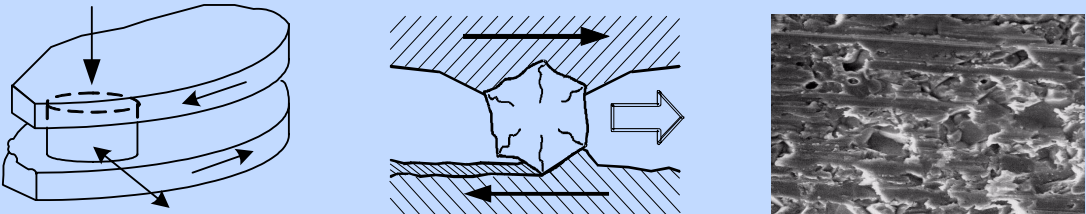
$$G = \frac{V_W}{V_S} = \frac{V_{W_o} + V_{W_u}}{V_{S_o} + V_{S_u}}. \quad (4.29)$$

muss die Definition des Schleifverhältnisses an die besonderen Bedingungen der Quer-Seiten-Doppelplanschleifverfahren derart angepasst werden, dass das Volumen werkstückseitig an allen Werkstücken einer Charge oben und unten und werkzeugseitig an beiden Schleifscheiben ermittelt wird. G ist eine Kenngröße für die Effektivität des Schleifprozesses.

5 QUER-SEITEN-DOPPELPLANSCHLEIFEN "PRINZIP WENDT"

5.1 Technologische Bewertung

Der komplexe Aufbau der Quer-Seiten-Doppelplanschleifmaschinen mit oszillierender Werkstückbewegung des Herstellers Wendt und die vielen Parameter, durch die der Bearbeitungsprozess beeinflusst werden kann, lassen sich hinsichtlich Maschinenaufbau, Prozesstechnologie und Arbeitsergebnis, wie in **Bild 5.1** dargestellt, einordnen.

Charakteristische Eigenschaften des Quer-Seiten-Doppelplanschleifverfahrens mit oszillierender Werkstückbewegung ("Prinzip Wendt")		
		
Maschinenaufbau	Prozesstechnologie	Arbeitsergebnis
- chargenweise, nichtstetige Bearbeitung der Bauteile - spannungsfreie Aufnahme der Werkstücke im Schieber - weggebundener Vorschub, vorgegebenes Zeitspannungsvolumen - preiswerte Vorrichtungen für unterschiedliche Werkstücke - kurze Umrüstzeiten - Beschränkung auf ebene Funktionsflächen - mechanischer Anschlag	- zyklische Änderung der Bearbeitungsbedingungen durch oszillierenden Werkstückschieber - undefinierte Mikrokinematik bei Werkstück-Eigendrehung - gleichmäßige Belastung der gesamten Funktionsflächen durch flächenhaften Eingriff - Wirkrichtung parallel zur Werkstückoberfläche - inhomogene Belastung der Schleifscheiben - relativ hohe Schnittgeschwindigkeiten und hohe Schleifdrücke, daher hohe Temperaturen	- parallel verlaufende, sich nicht überlagernde Bearbeitungsspuren - sehr gute Oberflächengüten und Formgenauigkeiten - Verbesserung der Formgenauigkeit gegenüber dem Ausgangszustand möglich - Verminderung der Höhenstreuung der Werkstücke - Ausrichtung von Funktion zur Mantelfläche nicht möglich - bei nicht rotierenden Werkstücken gleiche Ausrichtung der Bearbeitungsspuren

Quellen: in Anlehnung an Ard01, Uhl99b

Bild 5.1: Eigenschaften des Quer-Seiten-Doppelplanschleifverfahrens „Prinzip Wendt“ mit oszillierender Wirkbewegung

Die im Werkstückhalter spannungsfrei aufgenommenen Werkstücke werden nichtstetig und chargenweise bearbeitet. Aufgrund des weggebundenen Vorschubes ist das Zeitspannungsvolumen Q_W vorgegeben und nur durch einzelne Restriktionen des Arbeitsergebnisses beschränkt. Entsprechend einer der wichtigsten Forderungen sind die Werkstücke innerhalb der geforderten Qualitätslagen zu bearbeiten. Kosteneinsparungen

bezüglich der Vorrichtungen werden durch den Einsatz derselben Halter für unterschiedliche Durchmesserbereiche der Werkstücke aufgrund spannungsfreier Werkstückaufnahme erreicht. Das Verfahren wird durch die ebenen Funktionsflächen und ein maximales Durchmesser-Höhenverhältnis von 1:1 beschränkt.

Die Prozesstechnologie ist gekennzeichnet durch den oszillierenden Werkstückhalter und die damit zyklischen Änderungen der Bearbeitungsbedingungen. Die spannungsfreie Werkstückhalterung und die dadurch mögliche Eigenrotation führen zu einer undefinierten Mikrokinematik im Schleifspalt. Durch den flächenhaften Eingriff der gesamten Funktionsflächen entstehen gleichmäßige Belastungen auf der Werkstückober- und Werkstückunterseite, deren Wirkrichtungen parallel zu den Seitenflächen sind. Aufgrund der geometrischen Kontaktbedingungen werden die Schleifscheiben inhomogen belastet. Je nach Werkzeugauswahl können die Vorschubgeschwindigkeiten hohe Schleifdrücke und Temperaturen bewirken.

Das Arbeitsergebnis des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens mit oszillierender Werkstückbewegung zeichnet sich durch die Verbesserung der Formgenauigkeit, insbesondere der Planparallelität, und das Erreichen von sehr guten Oberflächengüten aus. Nicht rotierende Werkstücke verursachen parallel verlaufende, sich nicht überlagernde Bearbeitungsspuren. Die Ausrichtung der Funktions- zur Mantelfläche ist nicht möglich, das heißt, die Rechtwinkligkeit wird durch die Qualität des Vorproduktes bestimmt.

5.1.1 Technologiekenngößen

Kinematik

Die Vorschubbewegung dieses Verfahrens verläuft, wie in **Bild 2.8** zu sehen, zum einen durch das Absenken der oberen Schleifscheibe mit der axialen Vorschubgeschwindigkeit v_{fa} (v_{fquer}) in Richtung der Schleifscheibendrehachse, quer zur Werkstückoberfläche. Dieser Vorschubweg entspricht dem abzuschleifenden Werkstückaufmaß. Durch die Oszillation der Werkstücke über die Breite des Schleifscheibenbelages bedingt ergibt sich des Weiteren eine Vorschubbewegung längs zur Werkstückoberfläche mit der Werkstückvorschubgeschwindigkeit v_{fosz} ($v_{flängs}$). Die Bewegungsrichtung der Werkstückvorschubgeschwindigkeit v_{fosz} ist normal gegenüber der Schnittgeschwindigkeit v_c ausgerichtet, somit handelt es sich hierbei nicht um eine überlagerte Schnittgeschwindigkeit.

Bahnlängen

Ein Punkt, der sich auf einem Leitstrahl vom Ursprung aus mit konstanter Vorschubgeschwindigkeit v_{fosz} bewegt, während sich der Leitstrahl selbst mit konstanter Winkelgeschwindigkeit ω um den Pol dreht, beschreibt eine Archimedische Spirale [Bar98]. Die Bahngeometrie bei der Oszillationsbewegung im Schleiftakt entspricht einer archimedischen Spirale, wie in **Bild 5.2** dargestellt. Die archimedische Spirale gilt nur für eine Vorschubgeschwindigkeit $v_{fosz} = \text{const.}$, nicht für den Beschleunigungsbereich.

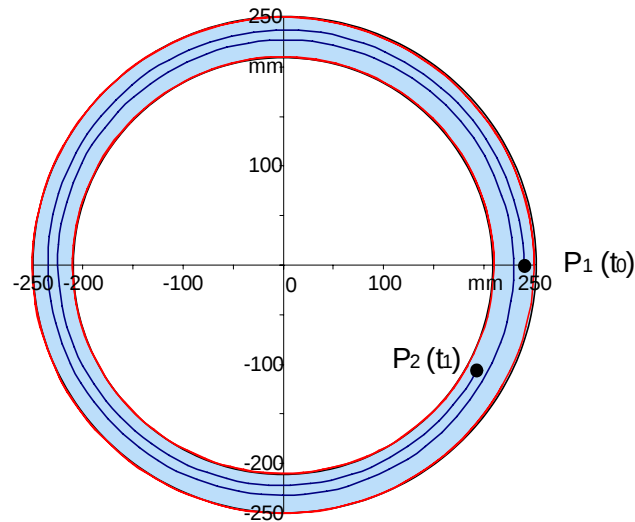


Bild 5.2: Archimedische Spirale als Bahnform des Quer-Seiten-Doppelplanschleifverfahrens „Prinzip Wendt“

Die Gleichung für die Bogenlänge s_{0P} einer Archimedischen Spirale vom Ursprung 0 bis Punkt P lautet:

$$s_{0P} = 0P = \frac{a}{2} \left(\varphi \sqrt{\varphi^2 + 1} + a r \sinh \varphi \right). \quad (5.1)$$

mit: $r = a \cdot \varphi$. (5.2)

$$a = \frac{v_{osz}}{\omega} > 0. \quad (5.3)$$

Für große Winkel gilt:

$$s_{0P} = 0P \approx \frac{a \cdot \varphi^2}{2}. \quad (5.4)$$

Die Bahnlänge eines Oszillationshubes zu den Zeitpunkten t_1 und t_2 entspricht dem Bahnstück auf einer archimedischen Spirale zwischen den Winkeln φ_1 und φ_2 , das sich mit (5.4) wie folgt berechnet:

$$s_{21} = s_2 - s_1 = \frac{a \cdot \varphi_2^2}{2} - \frac{a \cdot \varphi_1^2}{2} = \frac{a}{2} (\varphi_2^2 - \varphi_1^2) = \frac{v_{osz}}{2 \cdot \omega} (\varphi_2^2 - \varphi_1^2). \quad (5.5)$$

φ ergibt sich mit (5.2) und (5.3) zu:

$$\varphi = \frac{r \cdot \omega}{v_{osz}}. \quad (5.6)$$

Somit folgt:

$$s_{21} = \frac{v_{osz}}{2 \cdot \omega} \left[\left(\frac{r_2 \cdot \omega}{v_{osz}} \right)^2 - \left(\frac{r_1 \cdot \omega}{v_{osz}} \right)^2 \right]. \quad (5.7)$$

beziehungsweise:

$$s_{21} = \frac{\omega}{2 \cdot v_{osz}} (r_2^2 - r_1^2). \quad (5.8)$$

Hierbei stellen r_1 und r_2 die Umkehrpunkte in der Oszillationsbewegung auf der Schleifscheibe dar. Nur ein einziger Oszillationshub von außen nach innen muss berechnet werden, denn anschließend wiederholt sich die Geometrie spiegelbildlich. Für die Berechnung des gesamten Schleifweges s eines Schleifzyklus ist die Bahnlänge s_{21} mit der Anzahl i_{osz} der Oszillationshübe zu multiplizieren.

$$s = s_{21} \cdot i_{osz}. \quad (5.9)$$

Oszillationsbewegung

Aus **Bild 5.3** wird die ungleichmäßige Belastung des Schleifscheibenbelages deutlich. Über längere Zeit würde dies zu einer konkaven Abnutzung der Schleifscheibe mit entsprechenden Formfehlern der Werkstücke führen. Die Schnittgeschwindigkeit v_c nimmt proportional mit dem Durchmesser der Schleifscheibe zu. Um eine gleichmäßige Abnutzung der Schleifscheibe über die gesamte Belagbreite b_s zu erreichen, oszilliert der Werkstückschieber während des Schleifvorganges quer zur Schleifrichtung. Der Startpunkt des Oszillationsweges s_{osz} befindet sich hierbei immer am äußeren Durchmesser des Schleifscheibenbelages. Durch die Zunahme der Schnittgeschwindigkeit v_c zum Außenrand über den Durchmesser ergibt sich für die Überlagerung der beiden Geschwindigkeiten das in **Bild 5.3** gezeigte Verhältnis für einen halben Oszillationshub.

Aus **Bild 5.3** wird ersichtlich, dass die Schnittgeschwindigkeit v_c durch die oszillierende Werkstückvorschubgeschwindigkeit v_{fosz} eine Änderung sowohl in der Größe als auch in der Richtung erfährt. Die beiden Geschwindigkeiten wirken senkrecht zueinander. Die Richtungsänderung ist nicht konstant, sondern bewegt sich im Bereich von Winkel γ bis δ . Für einen kompletten Oszillationshub verändern sich die Winkel von $-\delta$ bis δ und $-\gamma$ bis γ aufgrund des Richtungswechsels der Längsvorschubgeschwindigkeit von $-v_{fosz}$ bis v_{fosz} . Im später durchgeführten Schleifversuch ist der Unterschied zwischen Winkel γ und δ so gering³, dass in der nachfolgenden Betrachtung nur der Durchschnitt in der Schleifscheibenbelagmitte $r_{Sm} = 230$ mm herangezogen wird. Da die betrachtete Auflagefläche kreissymmetrisch ist und sich nur die Richtung und die Größe des Geschwindigkeitsvektors ändern, wird das Flächenintegral je Scheibenumdrehung aus den Auflageflächen, wie in **Bild 5.3** dargestellt, lediglich minimal verschoben.

³ Längsvorschubgeschwindigkeit v_{fosz} ist kleiner 1 Prozent der Schnittgeschwindigkeit v_c

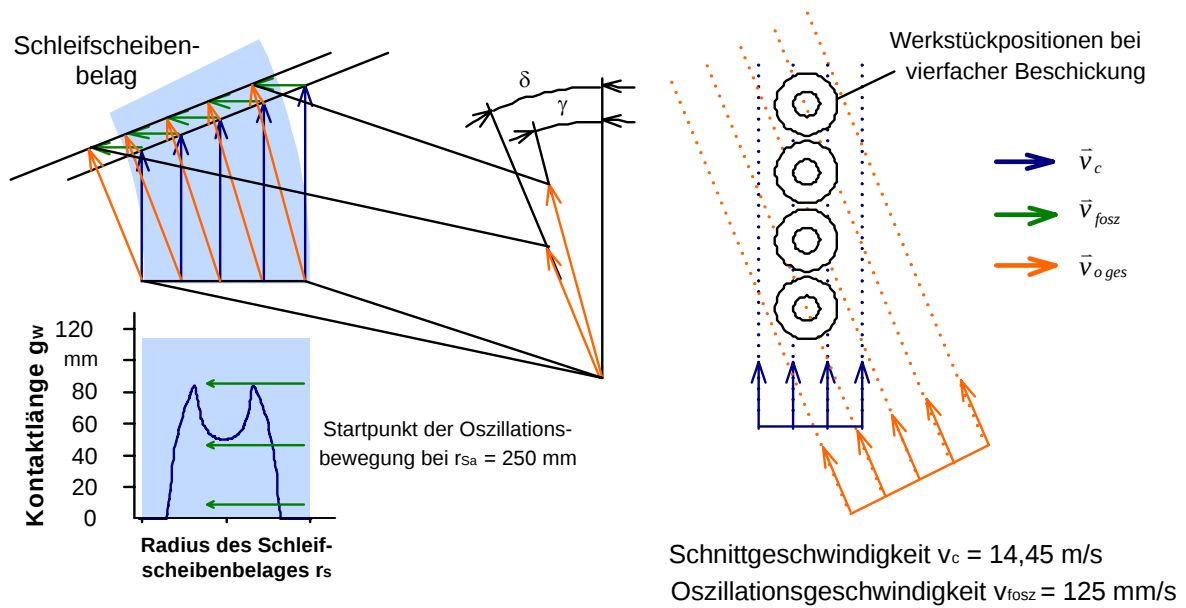


Bild 5.3: Geschwindigkeitsverhältnis zwischen Schnittgeschwindigkeit v_c und der Längsvorschubgeschwindigkeit v_{fosz} sowie das entstehende Flächenintegral der Kontaktfläche des Werkstückes

Im Schleifzyklus werden je nach Werkstücksgröße ein bis sieben Werkstücke gleichzeitig bearbeitet. Im nachfolgenden Beispiel ist das Flächenintegral für die Oberseite des Versuchswerkstückes dargestellt. Dabei sind folgende Parameter eingestellt: mittlere Schnittgeschwindigkeit $v_{cmit} = 14,45$ m/s (600 min^{-1}) und Oszillationsgeschwindigkeit $v_{fosz} = 125$ mm/s mit Bewegungsrichtung zur Scheibenmitte. Bei diesem Artikel werden immer vier Werkstücke je Schleifzyklus gleichzeitig bearbeitet. Für einen Scheibenumlauf ergibt sich das in **Bild 5.3** eingezeichnete Flächenintegral.

Durch Addition der Flächenintegrale je Scheibenumlauf mit der Oszillationsposition auf der Schleifscheibe und anschließende Division durch die Anzahl der Scheibenumläufe je Zyklus lässt sich die durchschnittliche Belastung je Zyklus ermitteln. Dabei ist der Oszillationsweg s_{osz}^4 während der Produktion auf 46,2 mm bezüglich der Scheibenmitte einzustellen, so dass der Überlauf $l_{ü}$ des Werkstückes jeweils 3,1 mm, entsprechend 11 Prozent des Werkstückdurchmessers, über die Schleifbelagbreite hinaus läuft. Die Anzahl der Oszillationshübe je Zyklus errechnet sich aus der gewünschten Teilehöhenreduktion $\Delta h = 0,2$ mm und der axialen Vorschubgeschwindigkeit v_{fa} . Für das nachfolgende Diagramm wurden für v_c und v_{fosz} die gleichen Maschineneinstellungen gewählt. Der Startpunkt des ersten Umlaufes wurde hierbei auf den Außenradius des Schleifscheibenbelages ($r_{sa} = 250$ mm) mit Oszillationsrichtung Innenradius des Schleifscheibenbelages ($r_{si} = 210$ mm) gelegt. Ebenso werden in **Bild 5.4** nur die vollständigen Scheibenumläufe berücksichtigt. Aus dem durchschnittlichen Flächenintegral eines Schleifzyklus mit standardmäßigen Maschineneinstellungen wird mit **Bild 5.4 a** deutlich, dass die Schleifscheibe in der Mitte am stärksten beansprucht wird.

⁴ Oszillationsweg: $s_{osz} = b_s + 2 l_{ü}$

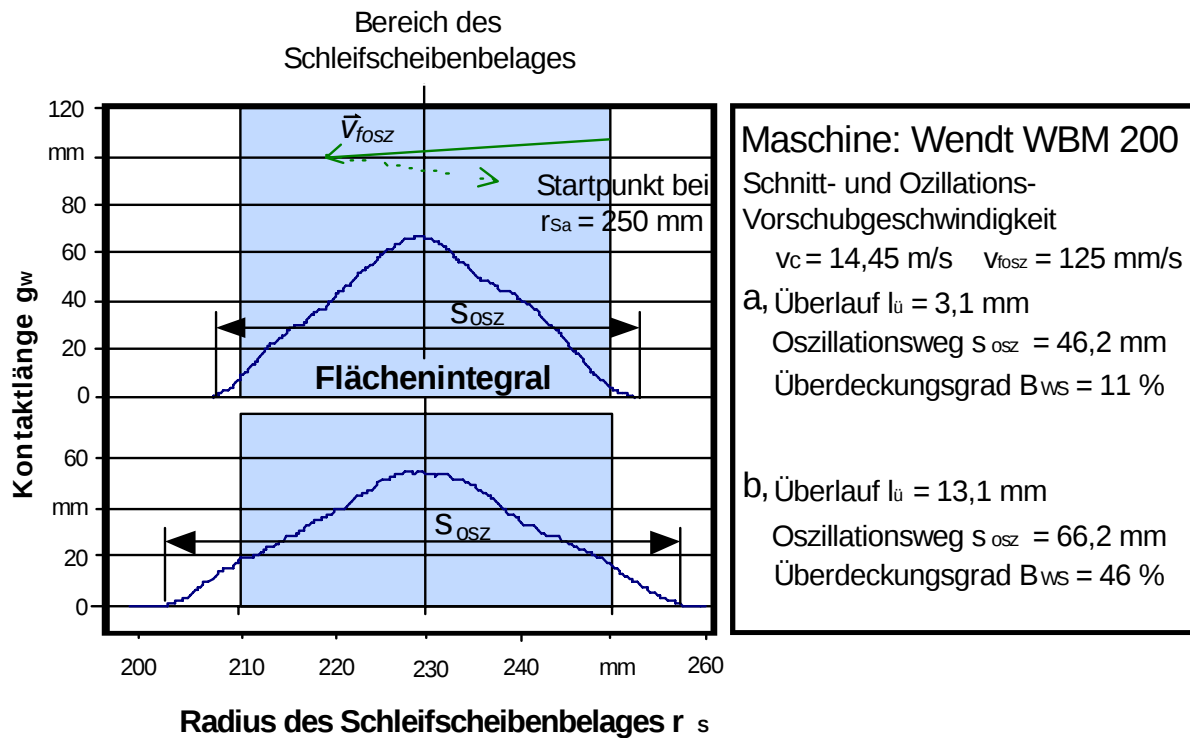


Bild 5.4: Durchschnittliches und optimiertes Flächenintegral des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens „Prinzip Wendt“

An den Umkehrpunkten der Oszillation beträgt der Überdeckungsgrad⁵ B_{ws} 11 Prozent. Eine Verbesserung der Schleifscheibenbelastung kann durch die Vergrößerung des Oszillationsweges s_{osz} auf 66,2 mm, entsprechend einem Überlauf l_u von 13,1 mm, erreicht werden. Der Überdeckungsgrad B_{ws} beträgt dann 46 Prozent (**Bild 5.4 b**).

5.2 Programm zur Berechnung eines durchschnittlichen Flächenintegrals

Die Berechnung der durchschnittlichen Flächenintegrale wurde mit Hilfe eines speziell dazu entwickelten Computerprogrammes durchgeführt. In dem über Visual Basic for Applications in Excel 97 erstellten Programm können die unterschiedlichen Maschineneinstellungen und die notwendigen Kenndaten des zu schleifenden Werkstückes in die Bedienoberfläche (**Bild 5.5**) eingegeben werden.

Das Programm führt die Berechnung des Flächenintegrals wahlweise für ein Werkstück, einen Schleifscheibenumlauf oder für ein durchschnittliches Flächenintegral eines gesamten Schleifzyklus aus. Zur Berechnung eines durchschnittlichen Flächenintegrals für einen Schleifzyklus werden die Einzelintegrale je Scheibenumlauf nach jeweiliger Schieberposition über den Oszillationsbereich aufaddiert und durch die Anzahl der Scheibenumläufe dividiert. Die Startposition P_0 für den ersten Scheibenumlauf wird hierbei am Außenradius des Schleifscheibenbelages r_{Sa} definiert. Im Programm ist festgelegt, dass zur Berechnung der

⁵ Überdeckungsgrad: $B_{ws} = [0,5 \cdot (s_{osz} - b_s)] / d_w = l_u / d_w$

einzelnen Schieberpositionen während der Simulation eines Schleifzyklus die Oszillationsbewegung v_{osz} von der Startposition P_0 beginnend immer zuerst zur Schleifscheibenmitte hin ausgeführt wird.

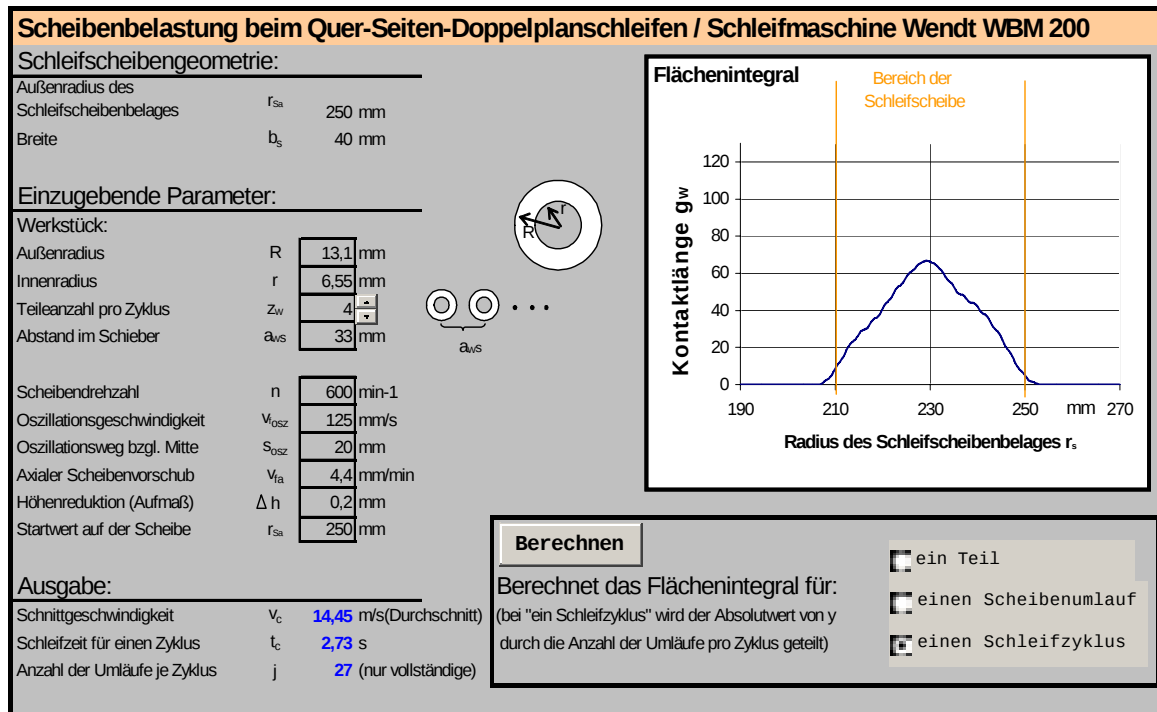


Bild 5.5: Bedienoberfläche des Programmes zur Berechnung eines durchschnittlichen Flächenintegrales

Das Programm betrachtet nur die je Scheibenumlauf überstrichene Fläche. Mit zunehmendem Radius ist der Verschleiß einer Seitenplanschleifscheibe kleiner, da aufgrund des größer werdenden Umfanges immer mehr Diamantkörner an der Zerspanung beteiligt sind und sich das Zeitspanungsvolumen Q_w auf mehr Körner verteilt [Lan02].

Korneingriffswinkel, Spanraum und Spanungsdicke

Die Berechnung des Korneingriffswinkels φ erfolgt über den Arcus Tangens des Quotienten aus der axialen Vorschubgeschwindigkeit v_{fa} und der Schnittgeschwindigkeit v_c . Die doppelseitigen Bearbeitung der Werkstücke teilt die axiale Vorschubgeschwindigkeit v_{fa} zwischen der unteren und oberen Schleifscheibe auf.

$$\varphi = \arctan \frac{\frac{1}{2} v_{fa}}{v_c} \quad (5.10)$$

Werden in Gleichung (5.10) die möglichen Eingangsgrößen eingesetzt, so verändert sich der Korneingriffswinkel φ innerhalb der in **Bild 5.6** aufgezeigten Werte. Der Korneingriffswinkel φ ändert sich über die Schnittgeschwindigkeit v_c und die axiale Vorschubgeschwindigkeit v_{fa} zwischen $3,3 \cdot 10^{-7}$ Grad und $2,5 \cdot 10^{-5}$ Grad.

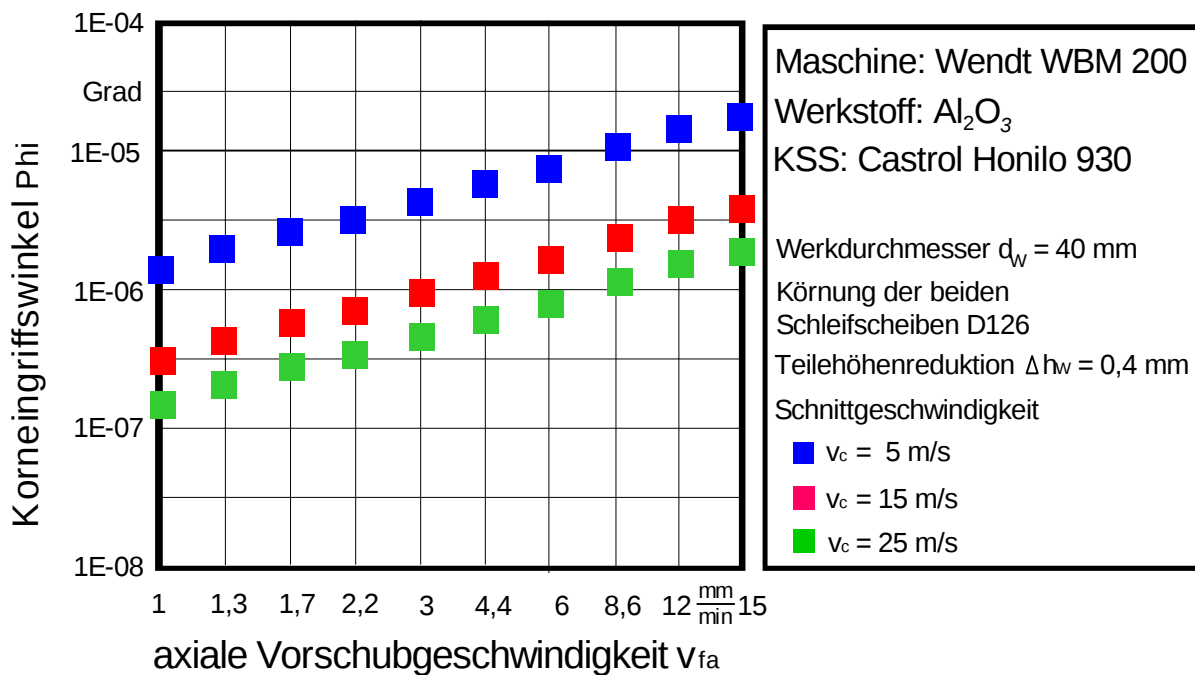


Bild 5.6: Korneingriffswinkel ϕ für verschiedene axiale Vorschub- und Schnittgeschwindigkeiten des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens „Prinzip Wendt“

Bild 5.7 zeigt den Korneingriffswinkel ϕ . Die eingezeichneten Spanräume sind bei unterschiedlichen Schnittgeschwindigkeiten der wichtigste Kennwert für die Aufheizung der Werkstücke.

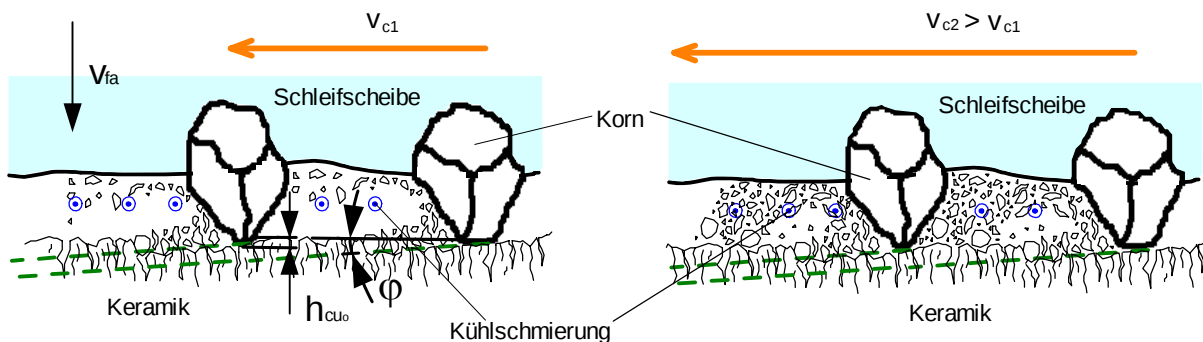


Bild 5.7: Korneingriffswinkel und Spanraum bei unterschiedlichen Schnittgeschwindigkeiten

Ein großer Spanraum ist entscheidend für die Standzeit der Schleifscheibe und eine geringere Temperaturbelastung auf das Werkstück. So entsteht bei großen frei gespülten Spanräumen ein Werkstück mit deutlich besseren Genauigkeiten. Aufgefüllte Spanräume sind für schlechtere Genauigkeiten und erhöhten Verschleiß der Schleifscheibe verantwortlich.

Die Spanungsdicke h_{cuges} kann entweder aus dem Korneingriffswinkel ϕ oder aus dem Verhältnis des Quotienten der axialen Vorschubgeschwindigkeit v_{fa} zu der Schnittgeschwindigkeit v_c und des Quotienten der Spanungsdicke h_{cuges} zum Werkstückdurchmesser d_w ermittelt werden.

$$h_{cuges} = 2 \cdot \tan \varphi \cdot d_w. \quad (5.11)$$

Aufgrund der Tatsache, dass sich für Seiten-Doppelplanschleifverfahren das Werkstück im Arbeitsraum zwischen zwei Schleifscheiben befindet, muss die Spanungsdicke h_{cuges} aus Formel (5.11) aufgeteilt werden auf die zwei Werkstückseiten. **Bild 5.7** zeigt die obere Spanungsdicke h_{cuo} . Somit gilt:

$$h_{cuges} = h_{cuo} + h_{cuu}. \quad (5.12)$$

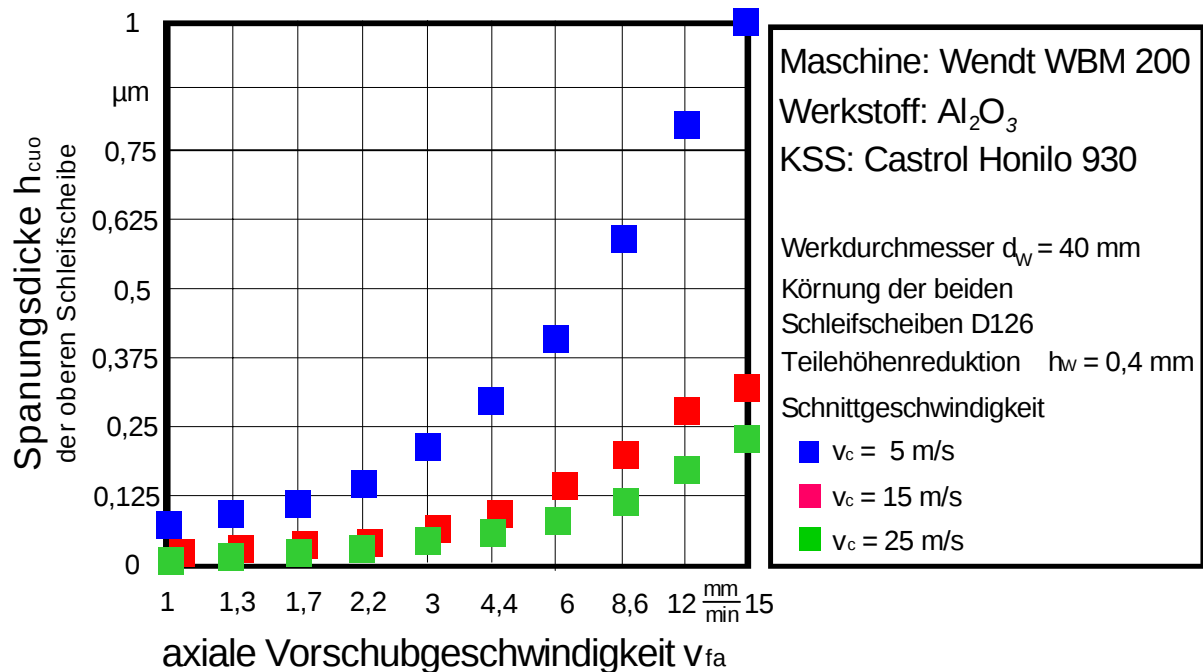


Bild 5.8: obere Spanungsdicke für verschiedene axiale Vorschub- und Schnittgeschwindigkeiten des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens „Prinzip Wendt“

Bild 5.8 zeigt die mit zunehmender axialer Vorschubgeschwindigkeit v_{fa} ansteigende Spanungsdicke h_{cuo} für einen Werkstückdurchmesser $d_w = 40$ mm. Die Werte der Spanungsdicke bewegen sich in einem Bereich von 0,013 μm bis 1 μm.

5.2.1 Prozesskenngrößen

Spezifische Flächenpressungen

Das nachfolgende **Bild 5.9** zeigt den Schleifdruck einer Schleifscheibenkombination mit der Körnungsgröße D126 für den unteren Schleifscheibenbelag und D126 für den oberen Schleifscheibenbelag in Abhängigkeit der Schnittgeschwindigkeit v_{cmax} und der Vorschubgeschwindigkeit v_{fa} . Die Betrachtung des Schleifprozesses vor und nach dem Abrichtintervall zeigt die Abweichungen des entstehenden Schleifdruckes p_{cmax} nach dem Schleifen einer Serie von 1.000 Werkstücken. Deutlich ist hier der Anstieg des Schleifdruckes p_{cmax} um das 3,72-fache bei einer Schnittgeschwindigkeit $v_{cmax} = 5 \text{ ms}^{-1}$, die Veränderung um

das 2,24-fache bei einer Schnittgeschwindigkeit $v_{cmax} = 15 \text{ ms}^{-1}$, sowie die Erhöhung um das 1,34-fache bei einer Schnittgeschwindigkeit $v_{cmax} = 25 \text{ ms}^{-1}$ zu sehen. Die Erklärung hierfür ist der weitaus geringere Verschleiß der Diamantkörner bei höheren Schnittgeschwindigkeiten.

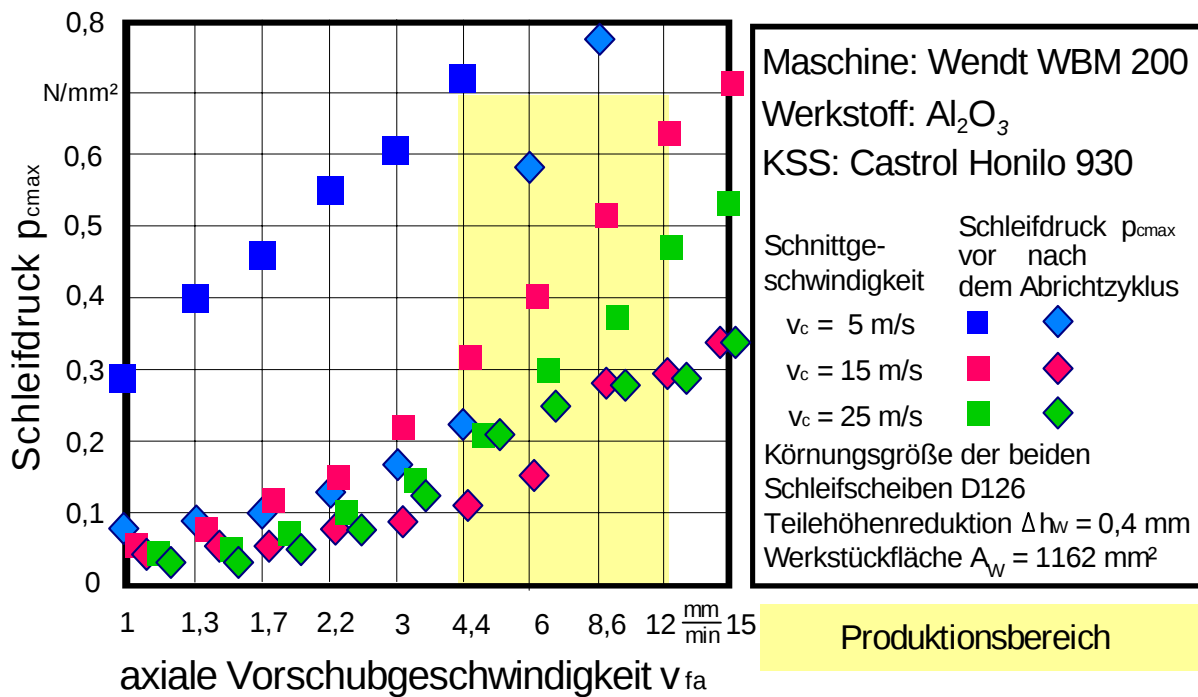


Bild 5.9: Schleifdruck p_{cmax} in Abhängigkeit der axialen Vorschubgeschwindigkeit v_{fa} und der Schnittgeschwindigkeit v_c des Quer-Seiten-Doppelpfanschleifens „Prinzip Wendt“

Mit zunehmender Schnittgeschwindigkeit wird die Einzelkornspanungsdicke deutlich kleiner. Dies führt zwar zu einer Erhöhung der spezifischen Schnittkraft k_c , jedoch zu einer deutlichen Verringerung des Schleifdruckes, welcher aus der Schleifnormalkraftmessung berechnet wurde. Der Unterschied des Schleifdruckes vor und nach dem Abrichten mittels einer SiC-Formrolle, die sich senkrecht zur Schleifscheibenebene über die Fläche bewegt, ist durch den deutlich höheren Kornüberstand zu erklären, welcher für den Zerspanungsprozess niedrigere Kräfte benötigt. Die Anflächungen der Schleifkörner während der Zerspanung sind die Ursache für die Erhöhung des Schleifdruckes.

Stromaufnahme

Ein wesentlicher Hinweis auf die Notwendigkeit eines Abrichtzyklus ist aus der Stromaufnahme abzuleiten. Die Untersuchungen basieren auf den in **Bild 5.10** exemplarisch dargestellten Datenanalysen. Der Schleifzyklus wurde hinsichtlich der Kräfte in den drei Raumebenen x-y-z und der Stromaufnahme der Motoren für die untere und die obere Schleifscheibe analysiert. Weiterhin wurden die axiale Zustellung f_a sowie der Oszillationsweg s_{osz} über die Zeit aufgenommen.

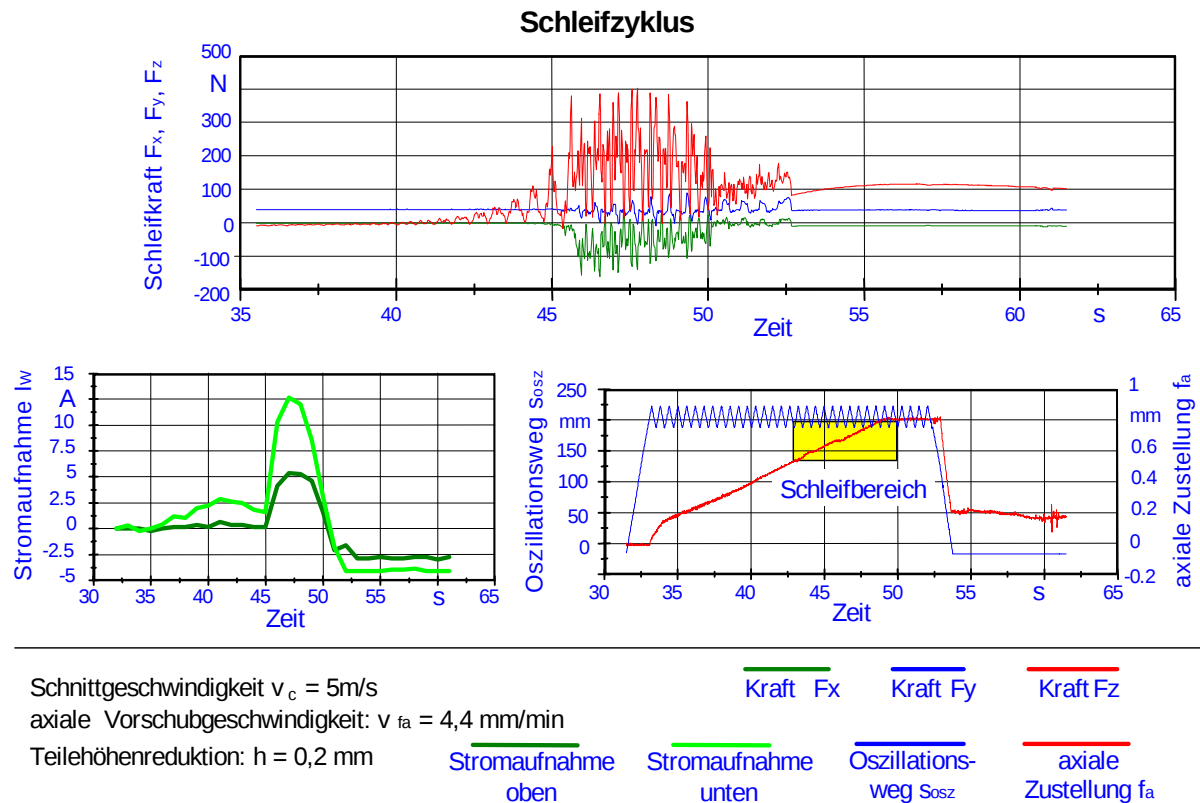


Bild 5.10: Stromaufnahme I_w des Quer-Seiten-Doppelplanschleifverfahrens „Prinzip Wendt“

Der Bediener erhält aus der Stromaufnahme eine Aussage über seinen Schleifprozess. Aufgrund der Erkenntnisse über die Zusammenhänge zwischen Stromaufnahme und Vorschubgeschwindigkeit v_{fa} , wird der Prozess innerhalb der möglichen Grenzen gesteuert. Die in **Bild 5.11** aufgezeigten Stromaufnahmen wurden für zwei Schleifscheiben mit der Körnungsgröße D126 für den unteren Schleifscheibenbelag und D126 für den oberen Schleifscheibenbelag erfasst.

Die Stromaufnahme folgt dem Verlauf des Schleifdruckes, welcher mit zunehmender Schnittgeschwindigkeit abnimmt. Aufgrund der unterschiedlichen Zeitspannungsvolumina zwischen oberer und unterer Werkstückseite differiert die Stromaufnahme zwischen dem unteren und dem oberen Motor.

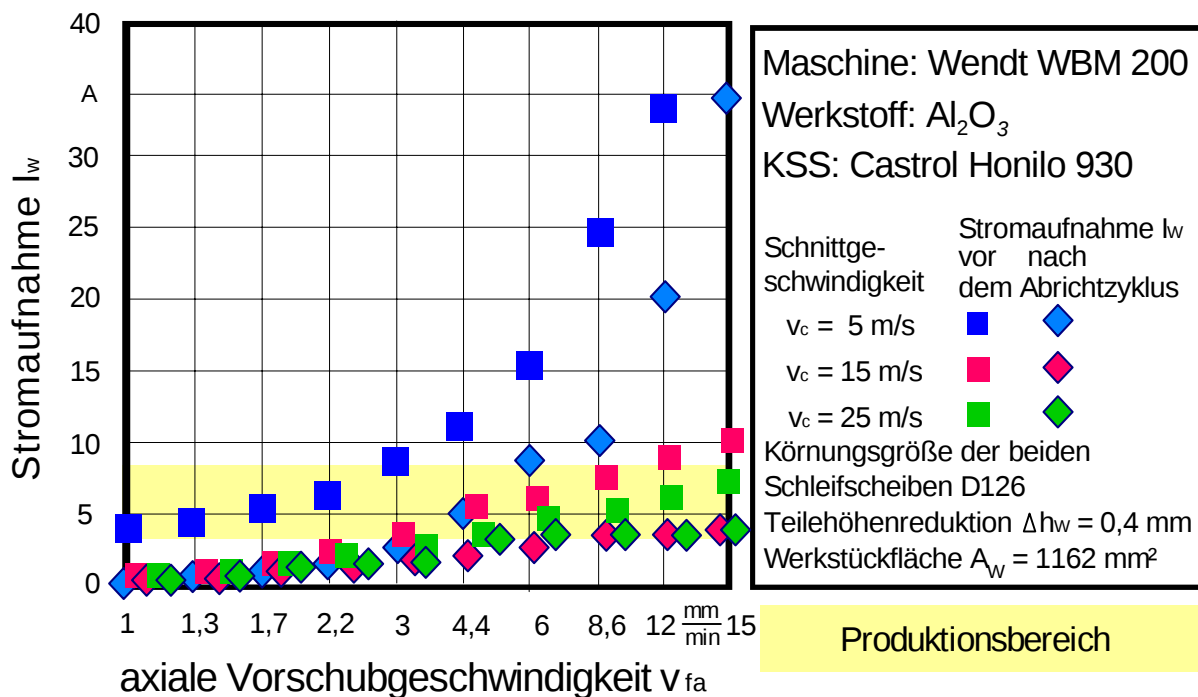


Bild 5.11: Stromaufnahme I_W in Abhängigkeit der axialen Vorschubgeschwindigkeit v_{fa} und der Schnittgeschwindigkeit v_c des Quer-Seiten-Doppelschleifens „Prinzip Wendt“

Bezogene Schleifnormalkraft in axialer Richtung

Bild 5.12 zeigt die Zusammenhänge beim Präzisionsplanschleifen von Aluminiumoxid zwischen der Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n , der Schnittgeschwindigkeit v_{cmax} und der axialen Vorschubgeschwindigkeit v_{fa} . Mit zunehmender Schnittgeschwindigkeit v_{cmax} nimmt die Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n ab, um mit steigender axialer Vorschubgeschwindigkeit v_{fa} wieder zuzunehmen.

Das deutet bezogen auf die funktionale Abhängigkeit je zerspantem Volumenelement innerhalb eines Schnittgeschwindigkeitsbereiches mit zunehmender axialer Vorschubgeschwindigkeit auf die deutlich größer werdende Einzelkornspanungstiefe h_{cu} hin.

Die Schleifkräfte verhalten sich bei Verdoppelung der axialen Vorschubgeschwindigkeit und bei einer Schnittgeschwindigkeit von $v_{cmax} = 5 \text{ ms}^{-1}$ im Verhältnis 1:2,5, bei $v_{cmax} = 15 \text{ ms}^{-1}$ im Verhältnis 1:2 und bei $v_{cmax} = 25 \text{ ms}^{-1}$ nicht mehr konstant, sondern im Bereich eines Verhältnisses von 1:1,6 bis 1:2.

Analog zu den Untersuchungen von KRUG steigt die Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n mit der axialen Vorschubgeschwindigkeit v_{fa} progressiv an [Kru57]. KRUG stellt in Bezug auf die Schnittgeschwindigkeit v_{cmax} ein lineares Verhalten zur Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n fest, während unter Produktionsbedingungen die Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n über die Schnittgeschwindigkeit v_{cmax} stark abnimmt, wie aus Untersuchungen von BOCK, MARKSCHAT und HOFFMEISTER bekannt ist [Kru57, Boc93].

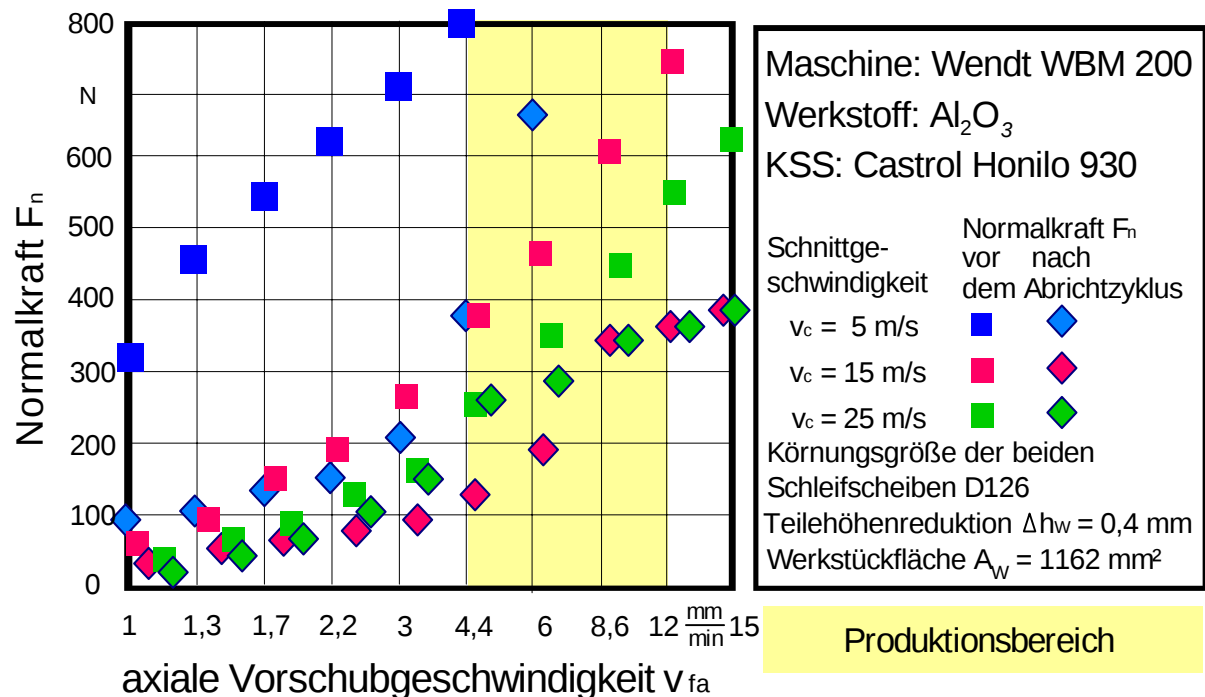


Bild 5.12: Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n in Abhängigkeit der axialen Vorschubgeschwindigkeit v_{fa} und der Schnittgeschwindigkeit v_c des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens „Prinzip Wendt“

Die Forderung nach qualitativ hochwertigen Eingangsoberflächen auf der Dichtfläche der Werkstücke kann für den nachfolgenden Prozessschritt Polieren durch eine feinere Schleifscheibenkörnung für den oberen Schleifscheibenbelag erfüllt werden. **Bild 5.13** zeigt die gemessenen Normalkräfte F_n .

Von großer Bedeutung ist hier der Einfluss der Schnittgeschwindigkeit v_c . Die Schleifkräfte verhalten sich bei Verdoppelung der axialen Vorschubgeschwindigkeit v_{fa} im Verhältnis 1:1,5 bei einer Schnittgeschwindigkeit $v_{cmax} = 5 \text{ ms}^{-1}$. Bei $v_{cmax} = 15 \text{ ms}^{-1}$ im Verhältnis 1:1,4 und bei $v_{cmax} = 25 \text{ ms}^{-1}$ von 1:1,9.

Bei einer Schnittgeschwindigkeit $v_{cmax} = 5 \text{ ms}^{-1}$ reduziert das kleinere, $91 \mu\text{m}$ große Diamantkorn aufgrund der geringeren Flächenreibung der Einzelkornschnelden die Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n geringfügig. Im Gegensatz dazu steigen bei höheren Schnittgeschwindigkeiten sowohl die Belastung der Einzelkornschnelden je zerspantem Volumenelement als auch die Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n an. Die Differenz der Schleifnormalkräfte in axialer Richtung F_n zeigt **Bild 5.14**.

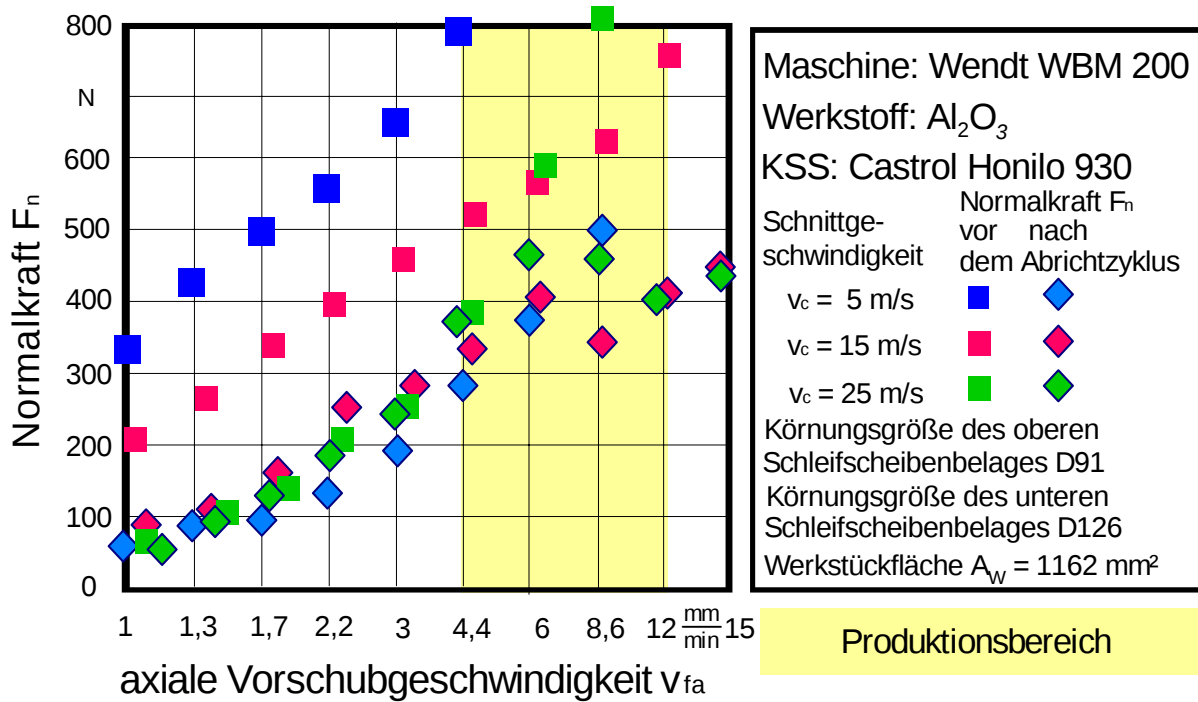


Bild 5.13: Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n in Abhängigkeit der axialen Vorschubgeschwindigkeit v_{fa} und der Schnittgeschwindigkeit v_c des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens „Prinzip Wendt“

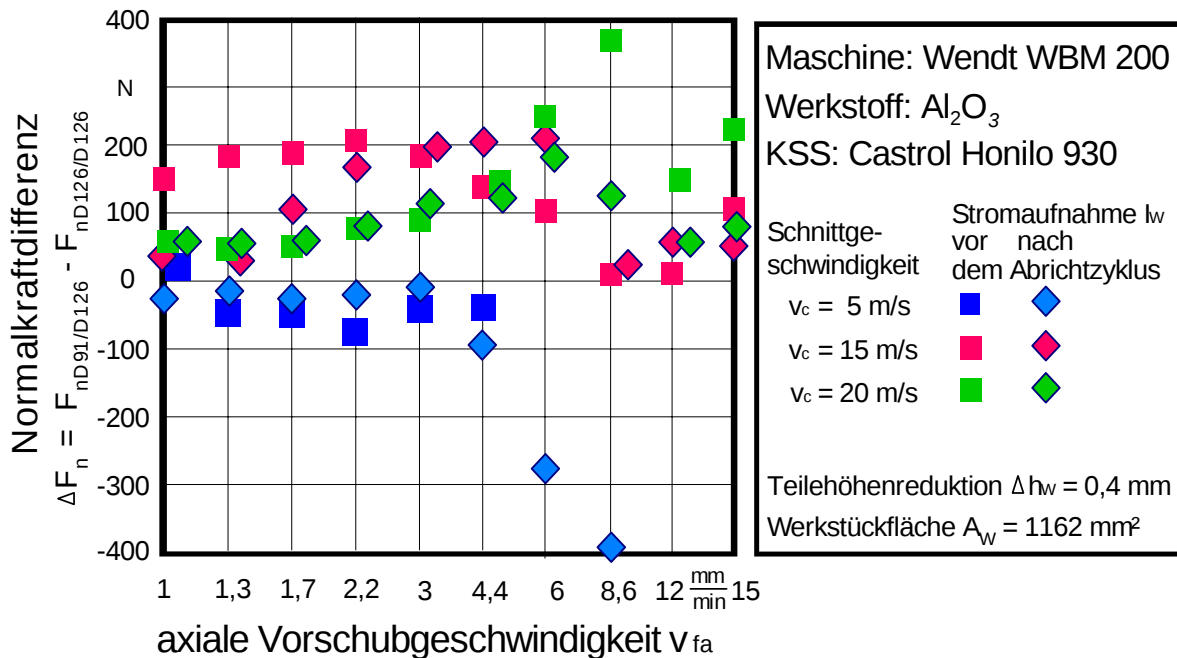


Bild 5.14: Vergleich der Schleifnormalkräfte F_n der Schleifscheibenkombinationen D126/D126 sowie D91/D126

Langzeitverhalten der Schleifnormalkraft in axialer Richtung

Das Langzeitverhalten der Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n wurde innerhalb mehrerer Acht-Stunden-Schichten aufgenommen. Festzustellen ist, dass sich die Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n ohne ein Abricht- oder Schärfintervall über diese Zeit erhöht (**Bild 5.15**).

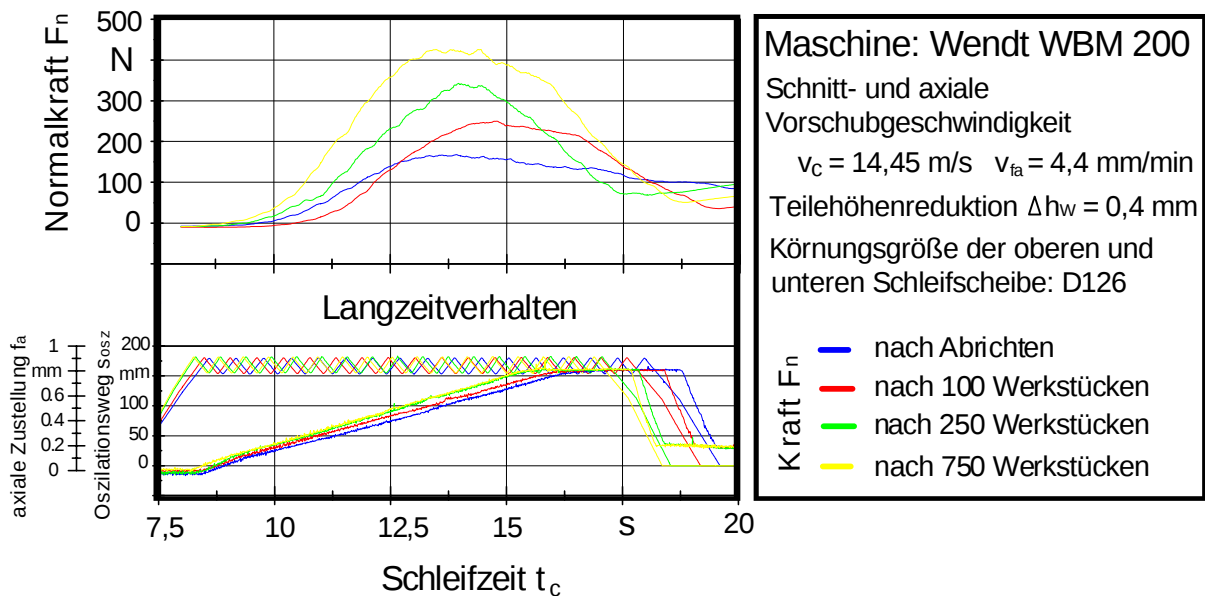


Bild 5.15: Langzeitverhalten der Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens „Prinzip Wendt“

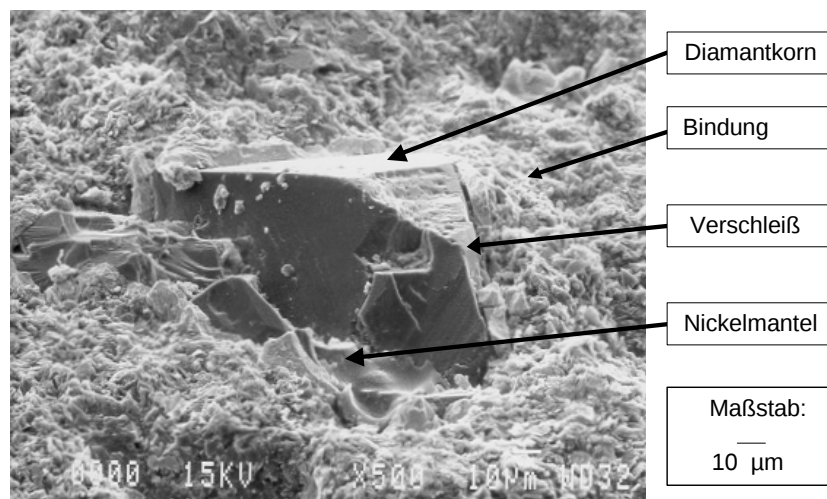


Bild 5.16: Diamantkorn der Körnungsgröße D126 nach mehreren geschliffenen Aluminiumoxidwerkstücken

Durch den Verschleiß der Kornspitzen in Form von Abflachen steigt die Flächenreibung innerhalb des Schleifprozesses an. Der Vergleich der Diamantkörner der abgerichteten Schleifscheibe mit entsprechend scharfen Kornspitzen in **Bild 4.8** und **Bild 5.16** belegt diese

Tatsache. Der Verschleiß der Diamantschleifscheibe innerhalb von acht Stunden reduziert die Belaghöhe je Schleifscheibe um $4\text{ }\mu\text{m}$.

Aus **Bild 5.16** wird deutlich, dass ein D126-Schleifkorn etwa $30\text{ }\mu\text{m}$ aus der Bindungsebene hervorragt.

Mit $4\text{ }\mu\text{m}$ entspricht der Verschleiß je Schicht daher nur etwa 5 Prozent vom Kornüberstand. Ein Korn bricht etwa bei einem Kornüberstand von 30 Prozent des Körnungsgröße D126, also bei $38\text{ }\mu\text{m}$ aus, da die Haltekräfte des nickelummantelten Kornes deutlich höher sind als die auf das Diamantkorn wirkenden Schleifkräfte. Somit schleift im Schnitt ein Schleifkorn etwa $88\text{ }\mu\text{m}$, also 22 Acht-Stunden-Schichten, mit.

Einfluss der Werkstückfläche auf die Schleifnormalkraft in axialer Richtung

Wird die Schleiffläche durch das Hinzufügen eines zweiten Werkstückes in den Werkzeugschieber verdoppelt, verringert sich die Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n um 25 bis 40 Prozent (**Bild 5.17**). Aus einer Verdoppelung der Schleiffläche eines einzelnen Werkstückes folgt hingegen eine 220 Prozent höhere Schleifnormalkraft in axialer Richtung. Aufgrund der konstanten Vorschubgeschwindigkeit beeinflusst die Werkstückgröße die Schleifzeit t_c nicht.

Bei großen Werkstückdurchmessern kann das Ansteigen der Schleifnormalkraft in axialer Richtung durch das Auftreten eines Kühlschmiermittelstaus und die damit verbundene schlechte Spanabfuhr erklärt werden.

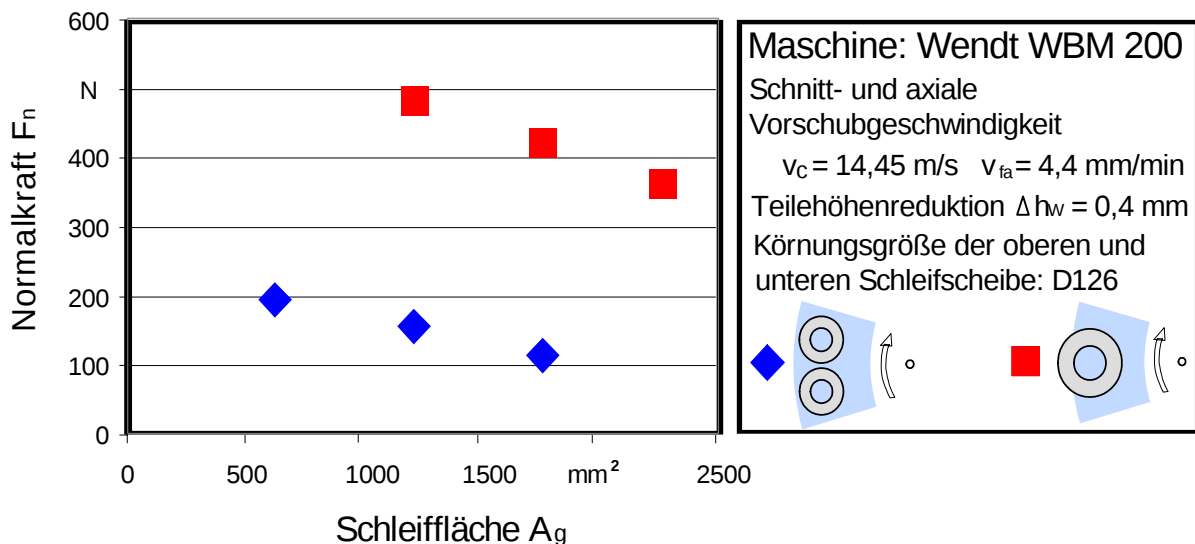


Bild 5.17: Einfluss der Werkstückfläche auf die Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens „Prinzip Wendt“

Besteht die Summe der zu schleifenden Werkstückflächen aus einer Vielzahl kleiner Werkstücke anstatt aus wenigen größeren Werkstücken, bleibt das Zeitspanungsvolumen Q_w weiterhin aufgrund der axialen Vorschubgeschwindigkeit v_{fa} konstant. Im Gegensatz dazu

vermutet EGGER hier 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 Spannungsdicken entstehen. Somit wäre das Zeitspannungsvolumen Q_W von kleinen zu großen Werkstückdurchmessern unterschiedlich [Egg01].

Schnittkraft F_c

Im Vergleich zur Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n sinkt auch die Schnittkraft F_c mit zunehmender Schnittgeschwindigkeit v_{cmax} . Die Schnittkraft F_c verhält sich bei Verdoppelung der axialen Vorschubgeschwindigkeit v_{fa} im Verhältnis 1:1,5 (**Bild 5.18**).

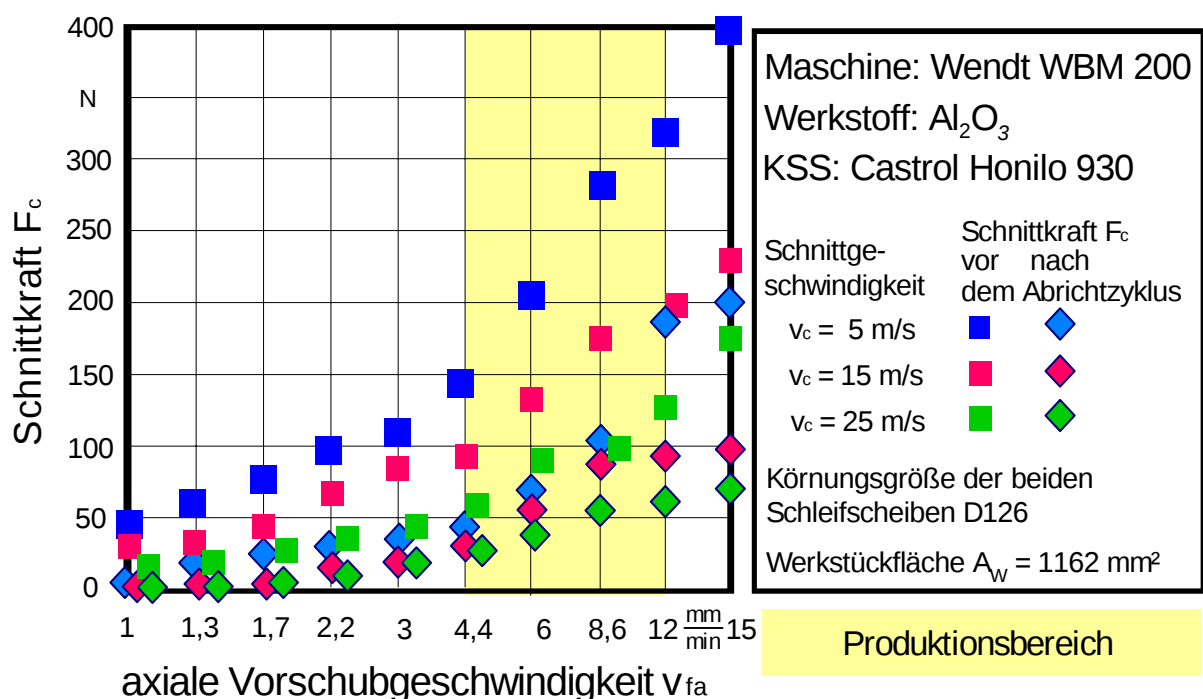


Bild 5.18: Schnittkraft F_c in Abhängigkeit der axialen Vorschubgeschwindigkeit v_{fa} und der Schnittgeschwindigkeit v_c des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens „Prinzip Wendt“

Tabelle 5.1 zeigt, dass der Quotient der Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n zur Schnittkraft F_c bei der Schnittgeschwindigkeit $v_{cmax} = 5 \text{ ms}^{-1}$ vor dem Abrichten im Mittel um den Faktor 6,6 liegt, nach dem Abrichten um den Faktor 7,3. Bei $v_{cmax} = 15 \text{ ms}^{-1}$ steigt der Faktor von 3,2 vor auf 4,9 nach dem Abrichten. Die Faktoren ändern sich bei einer Schnittgeschwindigkeit $v_{cmax} = 25 \text{ ms}^{-1}$ im Mittel von 3,8 auf 7,1 nach dem Abrichten. Insgesamt konnten also Werte erreicht werden, die aus dem Rundschleifen und den Untersuchungen von KRUG zum einseitigen Planschleifen durchweg bekannt sind [Kru57].

Tabelle 5.1: Quotient der Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n zur Schnittkraft F_c der Schleifscheibenkombination D126/D126

Schnittgeschwindigkeit $v_{cmax} [ms^{-1}]$		5		15		25		
		vor Abrichten	nach Abrichten	vor Abrichten	nach Abrichten	vor Abrichten	nach Abrichten	
axiale Vorschubgeschwindigkeit $v_{fa} [mm \min^{-1}]$	1	6,9	8,3	2,0	5,6	2,3	5,4	Quotient Normalkraft / Schnittkraft
	1,3	7,6	6,8	2,4	6,5	3,2	6,4	
	1,7	7,0	6,4	3,2	7,0	3,4	7,9	
	2,2	6,5	5,6	2,8	4,7	3,7	8,5	
	3	6,2	5,5	3,5	4,8	4,1	8,1	
	4,4	5,7	8,3	4,2	4,6	4,5	9,4	
	6	•	9,3	3,3	3,6	4,3	8,2	
	8,6	•	8,5	3,5	3,9	4,6	6,1	
	12	•	•	3,7	3,9	•	5,6	
	15	•	•	3,5	4,2	•	5,2	
Produktionsbereich		Quotient Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n zu Schnittkraft F_c						

Schnittleistung

Die Schnittleistung wird aus der Kraft F_c und der Schnittgeschwindigkeit v_c gemäß Gleichung (4.20) errechnet.

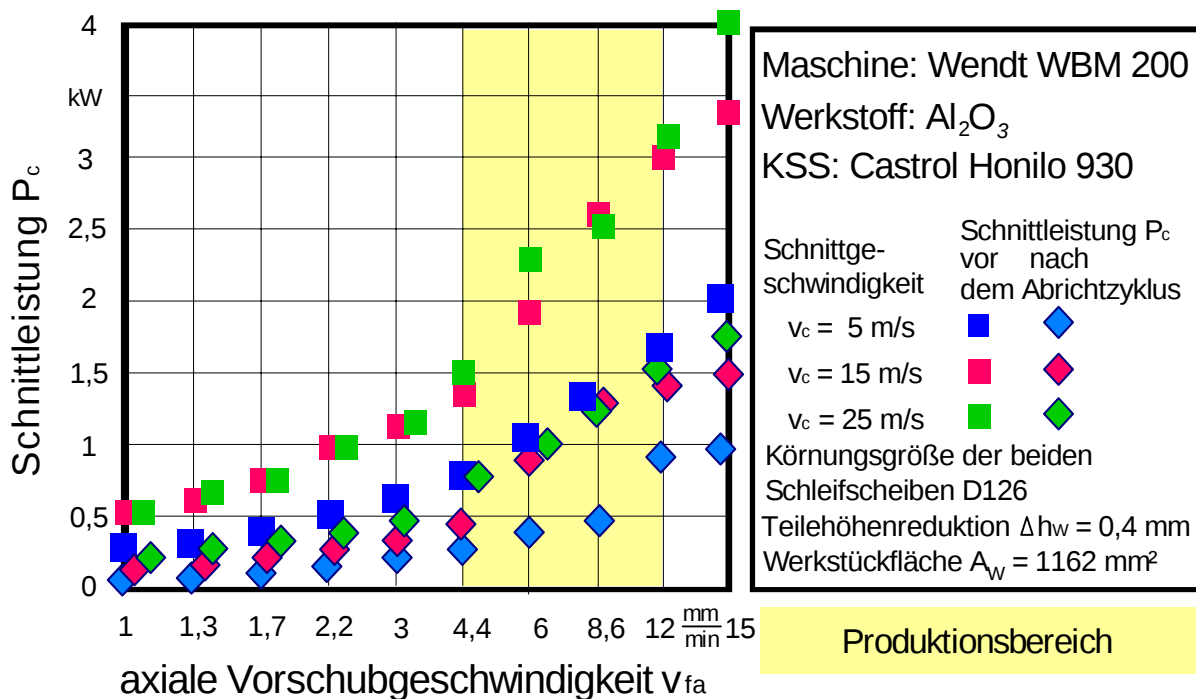


Bild 5.19: Schnittleistung P_c in Abhängigkeit der axialen Vorschubgeschwindigkeit v_{fa} und der Schnittgeschwindigkeit v_c des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens „Prinzip Wendt“

Mit steigender Schnittgeschwindigkeit v_c und zunehmender axialer Vorschubgeschwindigkeit v_{fa} steigt die Schnittleistung P_c der beiden Schleifscheiben an. Das Schleifen von Aluminiumoxid erfordert, je nach Zustand der Schleifscheiben, Schnittleistungen P_c zwischen 100 W bis 4000 W. Einen deutlichen Einfluss auf die Schnittleistung P_c übt der Abrichtzyklus aus. Bei der im Produktionsbereich üblicherweise eingesetzten axialen Vorschubgeschwindigkeit $v_{fa} = 4,4 \text{ mm/min}$ bei einer Schnittgeschwindigkeit $v_c = 15 \text{ m/s}$ wird die Schnittleistung aufgrund des Rücksetzens der Bindungsrücken um die Schleifkörner nahezu gedrittelt. Über eine Charge von 1000 Werkstücken nimmt somit die Schnittleistung aufgrund des Verschleißes des Schleifscheibenbelages zu.

Einfluss der Oszillationsbewegung auf das Kraftsystem

Die Einstellung der Oszillationsbewegung im Schleifprozess Quer-Seiten-Doppelplanschleifen „Prinzip Wendt“ ist für das Produktionsergebnis bezüglich der Prozesszeitverkürzung, des Schleifscheibenverschleißes, der erzielten Oberfläche und des Ebenheitsfehlers f_E am Werkstück von entscheidender Bedeutung.

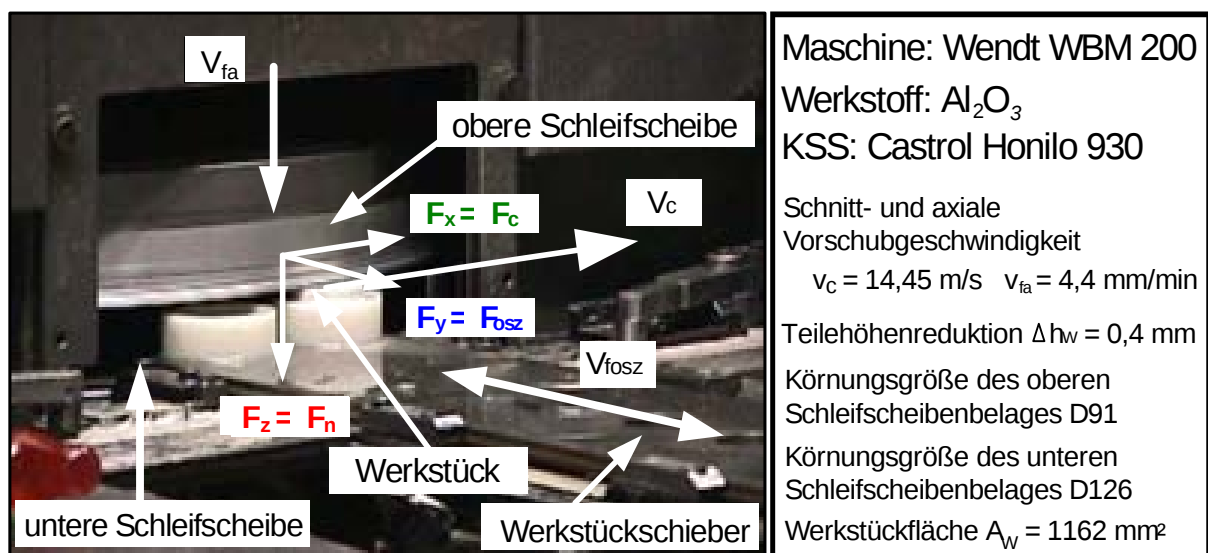


Bild 5.20: Kinematik und Prozesskräfte im Prozess Quer-Seiten-Doppelplanschleifen „Prinzip Wendt“

Die an der Maschine eingestellten Oszillationswege und Geschwindigkeiten beruhen zumeist auf Erfahrungswerten der Maschinenhersteller und -anwender. Um einen analytischen Ansatz zur Optimierung dieser Bewegung zu erarbeiten, wurden die drei Prozessgeschwindigkeiten und die Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n aufgezeichnet (**Bild 5.20**).

Bild 5.21 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.

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

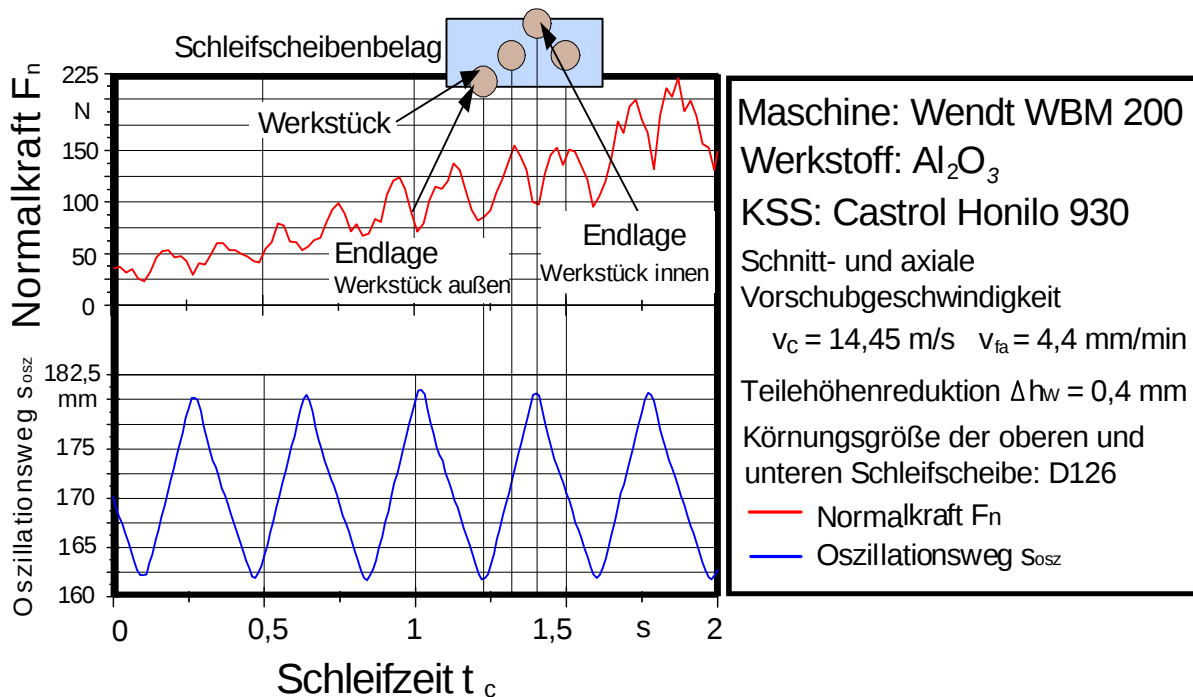


Bild 5.21: Einfluss des Oszillationsweges s_{osz} auf die Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n im Prozess Quer-Seiten-Doppelplanschleifen „Prinzip Wendt“

Bild 5.22 zeigt den Verlauf der Oszillationskraft F_{osz} über der Schnittgeschwindigkeit v_{cmax} und der axialen Vorschubgeschwindigkeit v_{fa} . Ein typisches Kennzeichen der Oszillationskraft ist die Abnahme auf 0 N während des Richtungswechsels, um dann sofort auf den Maximalwert anzusteigen und daraufhin über die zunehmende Kontaktfläche der Werkstücke wieder abzunehmen. Die Oszillationskraft besitzt ungefähr den 1,5-fachen Wert der Schnittkraft F_c .

Bild 5.23 zeigt den Überlauf $l_{\bar{u}}$ der Werkstücke im Prozess Quer-Seiten-Doppelplanschleifen „Prinzip Wendt“. Die überlaufende Werkstückfläche ist dem Schleifprozess zeitweise entzogen. Zur Verdeutlichung zeigt die Skizze rechts in Bild 5.23 zu verschiedenen Zeitpunkten ein Werkstück, welches mit der Oszillationsgeschwindigkeit v_{fosz} über den Schleifscheibenbelag hinaus partiell freiläuft. Während das Werkstück die dargestellte Bewegung ausführt, senkt sich die obere Schleifscheibe mit konstanter Geschwindigkeit auf die untere Schleifscheibe ab. Während der zwischen den Schleifscheiben befindliche Teil des Werkstückes der zeitbezogenen Teilehöhenreduktion $\Delta \dot{h}_w$ unterliegt, behält jeder Punkt der überlaufenden Werkstückfläche die Höhe bei, die er bei seinem Austritt aus der Kontaktzone

besitzt. Wird das Werkstück wieder zwischen die beiden Schleifscheiben gezogen, wird diese zusätzliche Werkstückhöhe abgeschliffen, was in den Wendepunkten der Oszillationsbewegung zu dem 1,5-fachen Wert der Schnittkraft F_c führt.

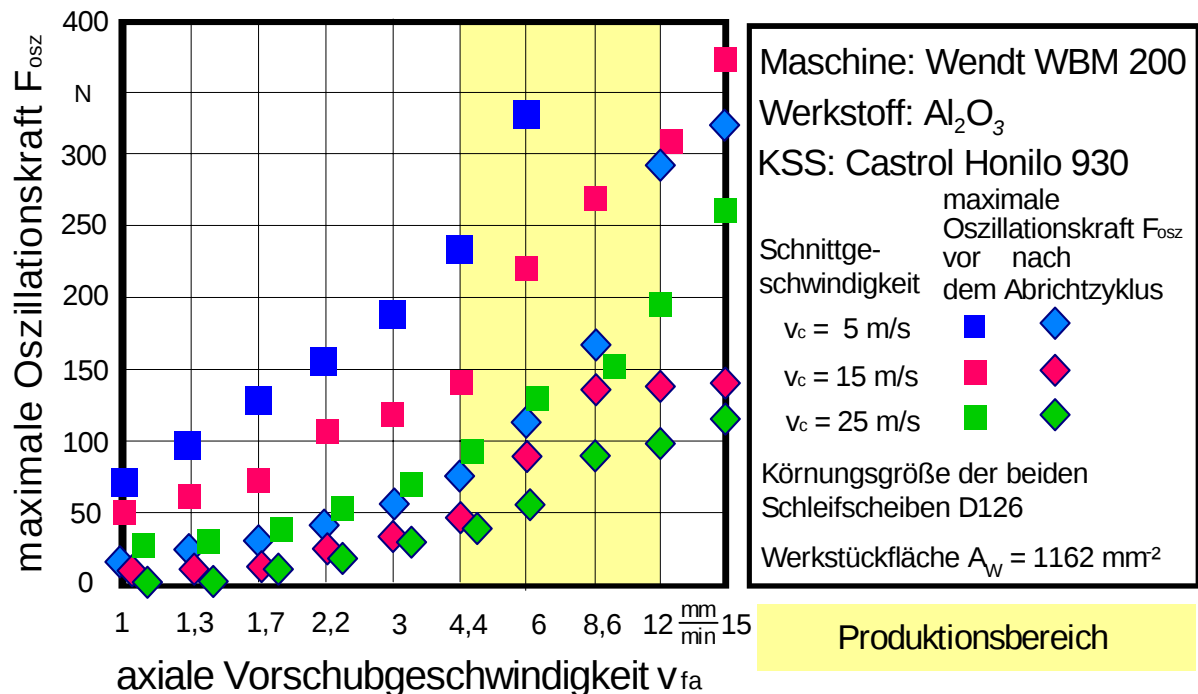


Bild 5.22: Oszillationskraft F_{osz} in Abhängigkeit der axialen Vorschubgeschwindigkeit v_{fa} und der Schnittgeschwindigkeit v_c des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens „Prinzip Wendt“

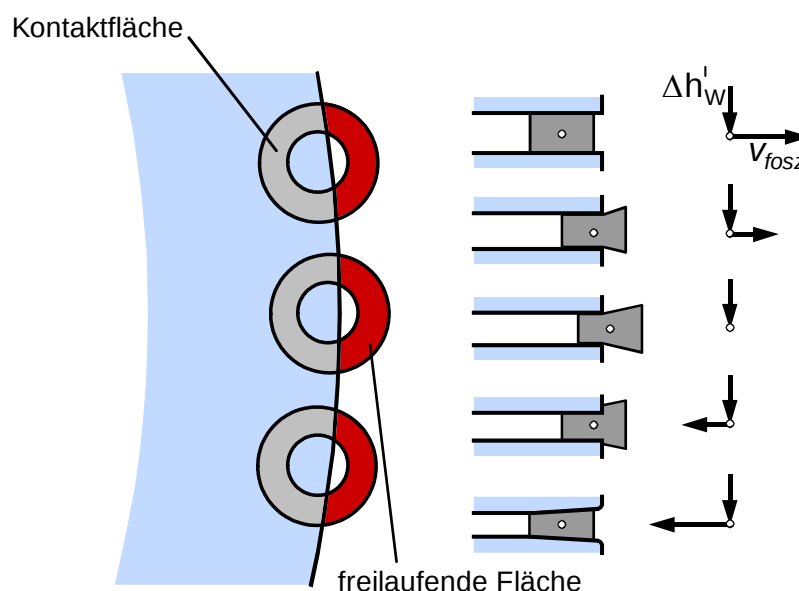


Bild 5.23: Überlauf $l_{ü}$ der Werkstücke über den Schleifscheibenrand [Ard01]

Neben den auftretenden Schleifkräften sind die wechselnden geometrischen Kontakte auf dem Schleifbelag ein entscheidender Faktor für den Verschleiß. Um den Oszillationsweg bezüglich

des jeweiligen Werkstückes optimal einzustellen, wurden folgende theoretische Überlegungen angestellt:

Da beim Seiten-Doppelplanschleifen die Schleifkörner während der Bearbeitung mit der gesamten Werkstückoberfläche im Kontakt sind, ist die jeweilige Oberflächenkontur des Werkstückes maßgebend für die jeweilige Belastung der Schleifscheibe.

Aufgrund der kleineren Schleiffläche wird in der vorderen und hinteren Endlage der Schieber ein Minimum, bei Bedeckung der gesamten Schleifscheibenbreite durch das Werkstück ein Maximum der Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n erreicht. Der Unterschied zwischen Maximum und Minimum kann bis zu 200 N betragen.

Bei der Berechnung des Schleifdruckes bezogen auf die auf dem Schleifscheibenbelag befindliche gesamte Werkstückfläche A_{Wges} ist der Einfluss der Werkstückoszillation rechnerisch kompensiert. Doch auch hier sind, in **Bild 5.24** dargestellt, deutliche Schwankungen zu erkennen.

Bei genauerer Betrachtung des p - t_c -Diagrammes ist jedoch festzustellen, dass der Schwankung durch die Oszillation noch eine weitere Schwankung mit längerer Phasengeschwindigkeit vorgelagert ist. Diese Zwischenmaxima treten bei allen Versuchen mit der Schleifscheibe in regelmäßigen zeitlichen Abständen auf. Bei einem axialen Vorschub von $v_{fa} = 4,4$ mm/min und einer Schnittgeschwindigkeit $v_c = 15$ m/s durchläuft die Schwebung bei $\Delta t_c = 2,3$ s jeweils ein Maximum.

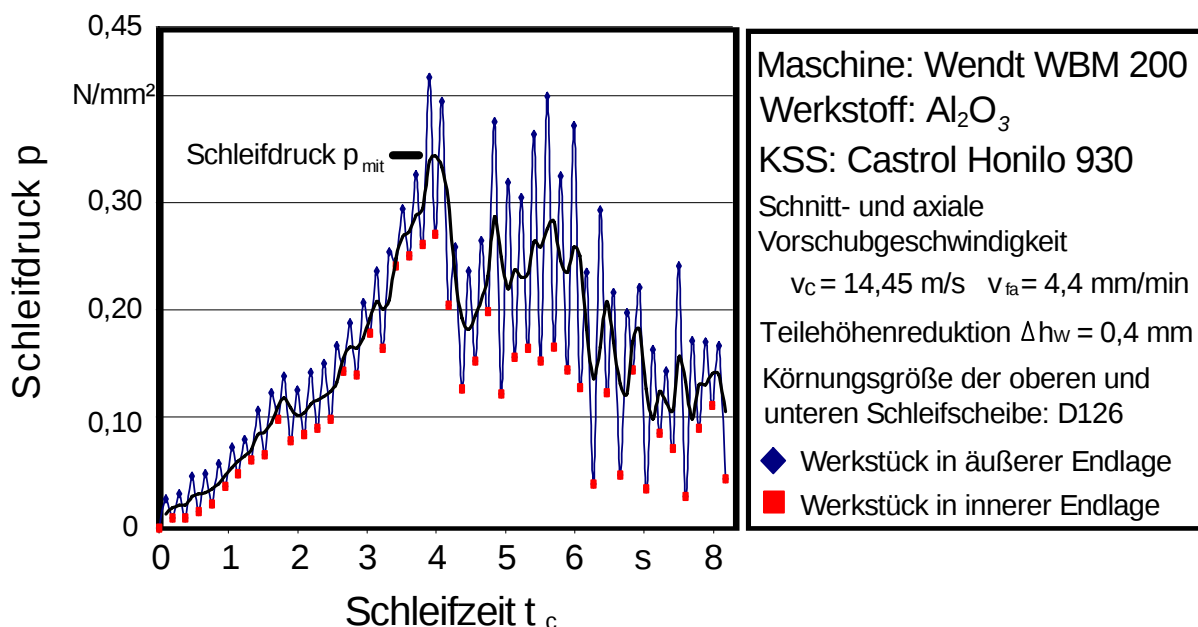


Bild 5.24: Schleifdruck p in Abhängigkeit des Oszillationsweges s_{osz} des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens „Prinzip Wendt“

Eine Vermessung der Schleifscheibe mittels Haarlineal führte zu einer Welligkeit der Schleifscheibe in der Umfangsrichtung. Da das Werkstück nicht bei jeder Oszillation genau

die gleiche Stelle der Schleifscheibe überfährt, kann diese langgezogene Schwebung entstehen. Der Ebenheitsfehler f_E des Schleifscheibenbelages nimmt durch die daraus resultierende Auf- und Abbewegung der Werkstücke auf dem Schleifscheibenbelag direkten Einfluss auf die Standzeit der Schleifscheiben und damit auf das Arbeitsergebnis.

Ein konstantes Arbeitsergebnis ohne Form- und Maßabweichungen ist über einen möglichst gleich bleibenden Schleifscheibenzustand zu erreichen. Bei Eingabe der Werte in das Simulationsprogramm zur Berechnung des durchschnittlichen Flächenintegrals ist festzustellen, dass das Werkstück bei jedem Umlauf genau die gleiche Schleifscheibenstelle überfährt.

Die Analyse des Überdeckungsgrades B_{WS} der Oszillationsbewegung ist in **Bild 5.25** dargestellt. Das Ebenheitsfehler (f_E) - Überdeckungsgrad (B_{WS}) - Diagramm hat den Verlauf einer Becherkurve. Der geringste Ebenheitsfehler f_E von $3,5 \mu\text{m}$ wird bei dem Quer-Seiten-Doppelplanschleifen „Prinzip Wendt“ von Aluminiumoxid unter Produktionsbedingungen bei etwa 21 Prozent Überdeckung erreicht. Die Maschinen sind innerhalb der Produktion auf diesen Wert einzustellen. Die Erhöhung des Überdeckungsgrades erzeugt ein Verkippen der Werkstücke durch den KSS-Strom, wodurch ein größerer Ebenheitsfehler entsteht, während bei einem niedrigen Überdeckungsgrad, durch die Belastung des Schleifscheibenbelages aufgrund geometrischer Einflüsse bei ebenem Belag, nach dem Abrichten bessere Ebenheitsfehler f_E gemessen wurden, welche jedoch schnell auf die in **Bild 5.25** gezeigten Werte ansteigen.

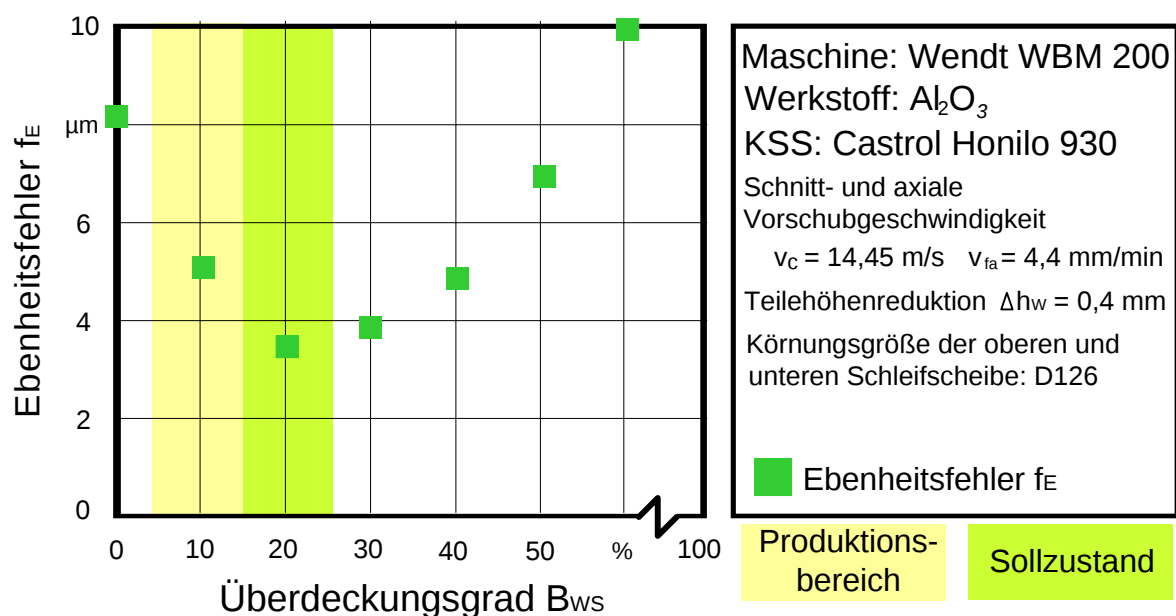


Bild 5.25: Einfluss des Überdeckungsgrades B_{WS} auf den Ebenheitsfehler f_E des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens „Prinzip Wendt“ für die Schleifkörnung D126

5.3 Bewertung der Werkstückqualität

Das Ziel der Vorbearbeitung ist das Erreichen des geringsten Ebenheitsfehlers bei dem Quer-Seiten-Doppelplanschleifen.

Für die Verkürzung der Hauptzeiten des Polierens sind der Ebenheitsfehler des Vorproduktes zu 80 Prozent und der R_t -Wert der geschliffenen Fläche zu 20 Prozent maßgebend. Insgesamt müssen beim Polieren etwa 20 μm Werkstoff homogen über die gesamte Fläche abgetragen werden. Aus diesen Gründen wurde bei der Analyse der Großserie das Hauptaugenmerk auf den Ebenheitsfehler f_E gelegt.

Bild 5.26 zeigt den Einfluss der Schnittgeschwindigkeit v_{cmax} für die drei getesteten Schleifscheiben mit den Körnungen D46, D91 sowie D126 und der Konzentration 75 auf den Ebenheitsfehler f_E . Auffallend ist, dass bei den beiden größeren Körnungen das lokale Minimum des Ebenheitsfehlers bei Schnittgeschwindigkeiten v_{cmax} zwischen 20 bis 25 ms^{-1} erreicht wird. Ganz anders verhält sich das deutlich kleinere Diamantkorn der Körnung D46. Hier steigt der Ebenheitsfehler f_E mit zunehmender Schnittgeschwindigkeit v_{cmax} von drei auf knapp fünf μm an. Die Spanräume der Schleifscheibe D46 setzen sich mit einem mit steigender Schnittgeschwindigkeit zunehmenden flächigen Film aus zerspannten Partikeln zu. Dies bewirkt eine schlechtere Zerspanung bei zunehmendem Ebenheitsfehler f_E . Innerhalb der Produktion ist die Schnittgeschwindigkeit v_{cmax} auf 20 ms^{-1} zu erhöhen, um den niedrigeren Ebenheitsfehler f_E zu nutzen.

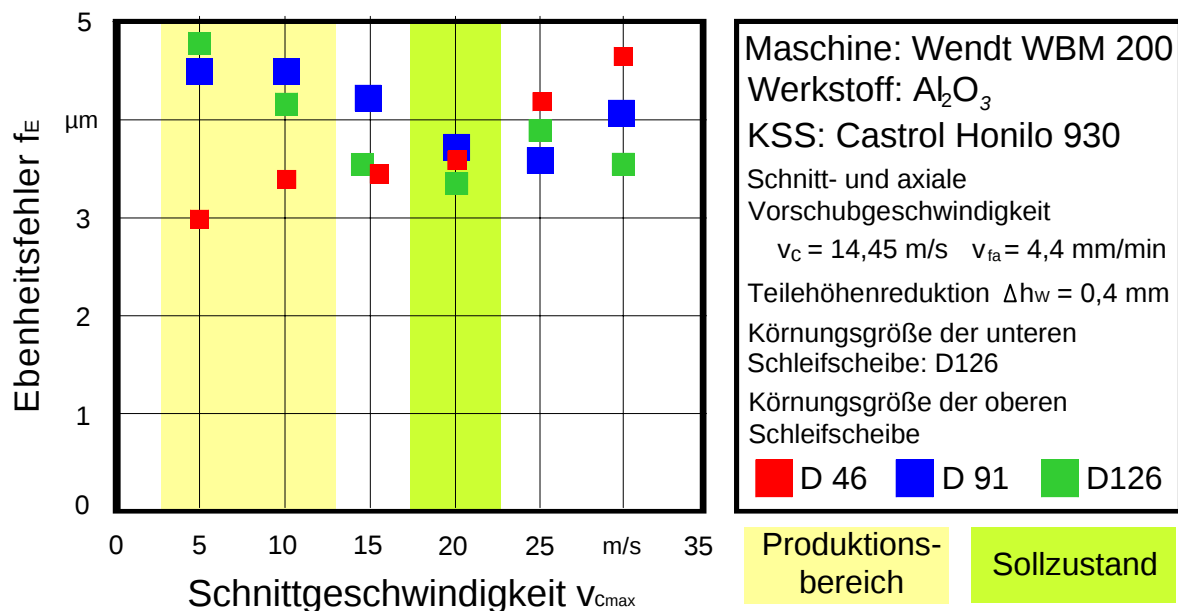


Bild 5.26: Einfluss der Schnittgeschwindigkeit auf den Ebenheitsfehler f_E des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens „Prinzip Wendt“

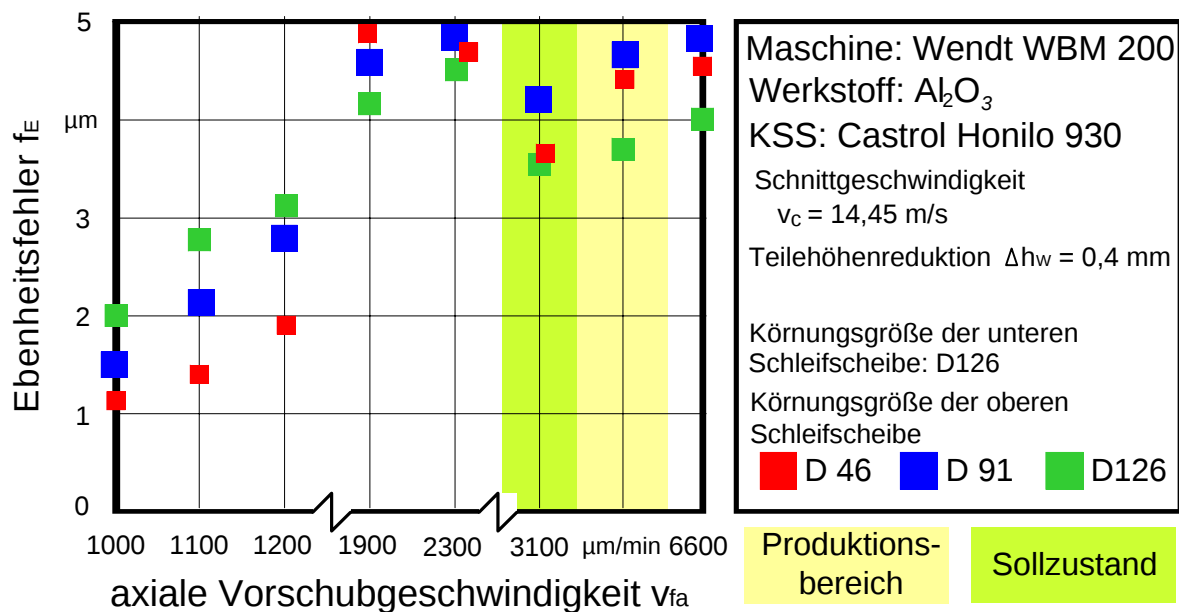


Bild 5.27: Einfluss der axialen Vorschubgeschwindigkeit v_{fa} auf den Ebenheitsfehler f_E des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens „Prinzip Wendt“ für verschiedene Schleifkörnungen

Bild 5.27 zeigt den Einfluss der axialen Vorschubgeschwindigkeit v_{fa} auf den Ebenheitsfehler f_E bei konstanter Schnittgeschwindigkeit $v_{cmax} = 15 \text{ ms}^{-1}$. Die Hauptzeit für das Schleifen wird am stärksten von der axialen Vorschubgeschwindigkeit v_{fa} beeinflusst. Somit wird die Wirtschaftlichkeitsrechnung für das Schleifen in Abhängigkeit der axialen Vorschubgeschwindigkeit v_{fa} durchgeführt. Der nachfolgende Prozess ist je Zeiteinheit kostenintensiver, daher ist zum Erreichen einer besseren Qualität bei reduzierter Produktivität zu schleifen. Der Ebenheitsfehler f_E kann sehr gut mittels der axialen Vorschubgeschwindigkeit v_{fa} beeinflusst werden. Je geringer die axiale Vorschubgeschwindigkeit gewählt wird, desto geringere Ebenheitsfehler f_E entstehen. So kann bei dem Quer-Seiten-Doppelplanschleifen „Prinzip Wendt“ durchaus ein Ebenheitsfehler von $1 \mu\text{m}$ mit der Körnung D46 erreicht werden. Mit zunehmender Körnungsgröße und niedrigen axialen Vorschubgeschwindigkeiten nimmt der Ebenheitsfehler f_E auffallend ab, während bei höheren axialen Vorschubgeschwindigkeiten eine Qualitätsverschlechterung zu verzeichnen ist. Alle drei Körnungsgrößen besitzen bei einer axialen Vorschubgeschwindigkeit v_{fa} von $3100 \mu\text{m/min}$ ein lokales Minimum mit einem Ebenheitsfehler f_E von $3,5$ bis $4,5 \mu\text{m}$. Die wirtschaftlich beste Lösung wäre, einen zweistufigen Prozess mit zwei unterschiedlichen axialen Vorschubgeschwindigkeiten zu nutzen. Dies ist aufgrund der Maschinensteuerung jedoch nicht möglich. Eine genauere Kostenanalyse innerhalb der Prozesskette zeigt hingegen, dass lediglich eine Reduzierung der Hauptzeit beim Schleifen auf die axiale Vorschubgeschwindigkeit $v_{fa} = 3100 \mu\text{m/min}$ wirtschaftlich ist. Der Ebenheitsfehler f_E ist in diesem Geschwindigkeitsbereich jedoch deutlich höher.

5.3.1 Maß- und Formgenauigkeit

Die Werkstücke wurden zwischen zwei Abrichtvorgängen in regelmäßigen Zeitabständen dem Schleifprozess entnommen und vermessen. Primär soll das Einwirken der

Werkstückeigenschaften gesinterter Dichtscheiben auf das Schleifergebnis in Hinblick auf die Streuung der Werkstückdicke untersucht werden. Ohne Belang hingegen ist der Einfluss der Oberflächenwerte der gesinterten Proben.

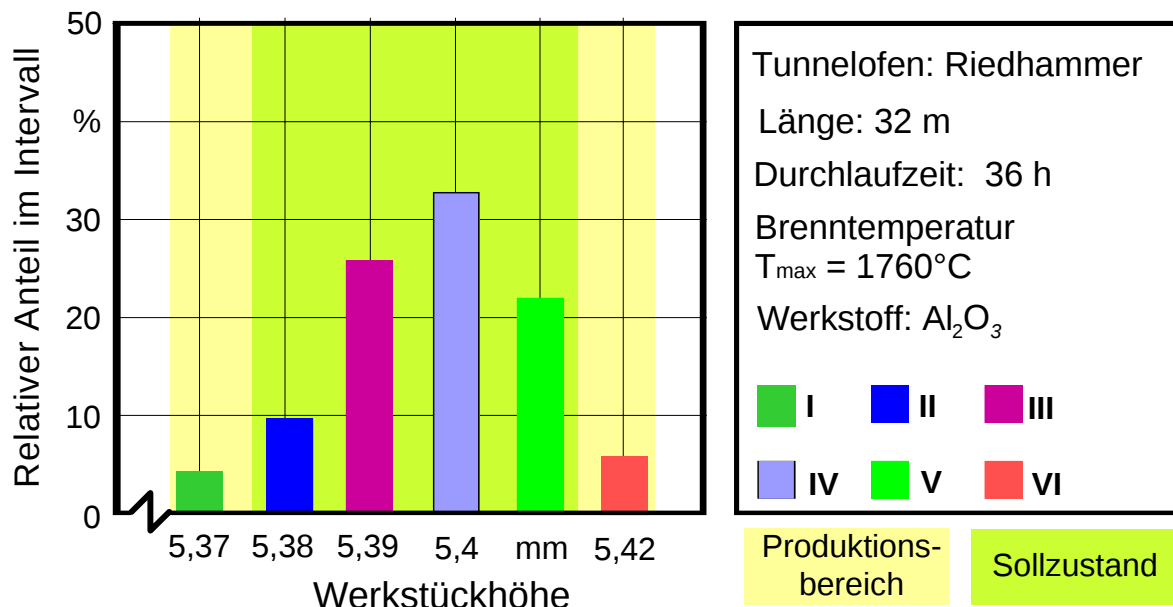


Bild 5.28: Streuung der Werkstückhöhen nach dem Sintern

Die Herstellung von Aluminiumoxiddichtscheiben unterliegt einer Schwindung während des Sinterprozesses zwischen 17 und 20 Prozent. Aus diesem Grund wurde in den nachfolgenden Untersuchungen die Toleranz sowie deren Einfluss auf den Ebenheitsfehler f_E bei dem Quer-Seiten-Doppelplanschleifen untersucht. Die folgenden Grafiken wurden aufgrund der statistischen Auswertung innerhalb der laufenden Großserienproduktion erstellt.

Nach dem Sintern unterscheiden sich die untersuchten Werkstücke in der Höhe um 0,05 mm. Die Verteilung ist dem **Bild 5.28** zu entnehmen. Insgesamt liegt eine für beherrschte Prozesse typische Gaußsche Normalverteilung vor. Die einzelnen Bereiche der verschiedenen Werkstückhöhen wurden für die nachfolgenden Auswertungen von I bis VI klassifiziert.

In **Bild 5.29** ist der Einfluss der gesinterten Ausgangshöhe auf die geschliffene Werkstückhöhe in Abhängigkeit des unterschiedlichen Abschliffes dargestellt. Der Abschleiß der Werkstücke muss aufgrund von Durchbiegungen sowie Randzonenschichten aus dem Sinterprozess 0,4 mm betragen.

Weiterhin sind in **Bild 5.29** die oberen und unteren Eingriffsgrenzen der geforderten Werkstückhöhe eingetragen. Aufgrund der Toleranzen innerhalb der Hauptspindellagerung ergibt sich hier eine Schwankung der Werkstückhöhe von über 0,04 mm.

Insgesamt wird jedoch kein Einfluss der gesinterten Werkstückhöhe auf das Schleifergebnis deutlich. Sämtliche Klassen sind über die verschiedenen Werkstückhöhen normalverteilt. Die eingezeichnete untere und obere Eingriffsgrenze zeigt, dass nur mittels permanenter Nachregelung des Schleifprozesses der Fertigungsprozess innerhalb der geforderten

Toleranzen zu halten ist. Eine Halbierung der Werkstückhöhenstreuung ist notwendig für die Reduzierung der gesamten Herstellkosten. Eine Verringerung der Werkstückhöhenstreuung konnte nicht erreicht werden.

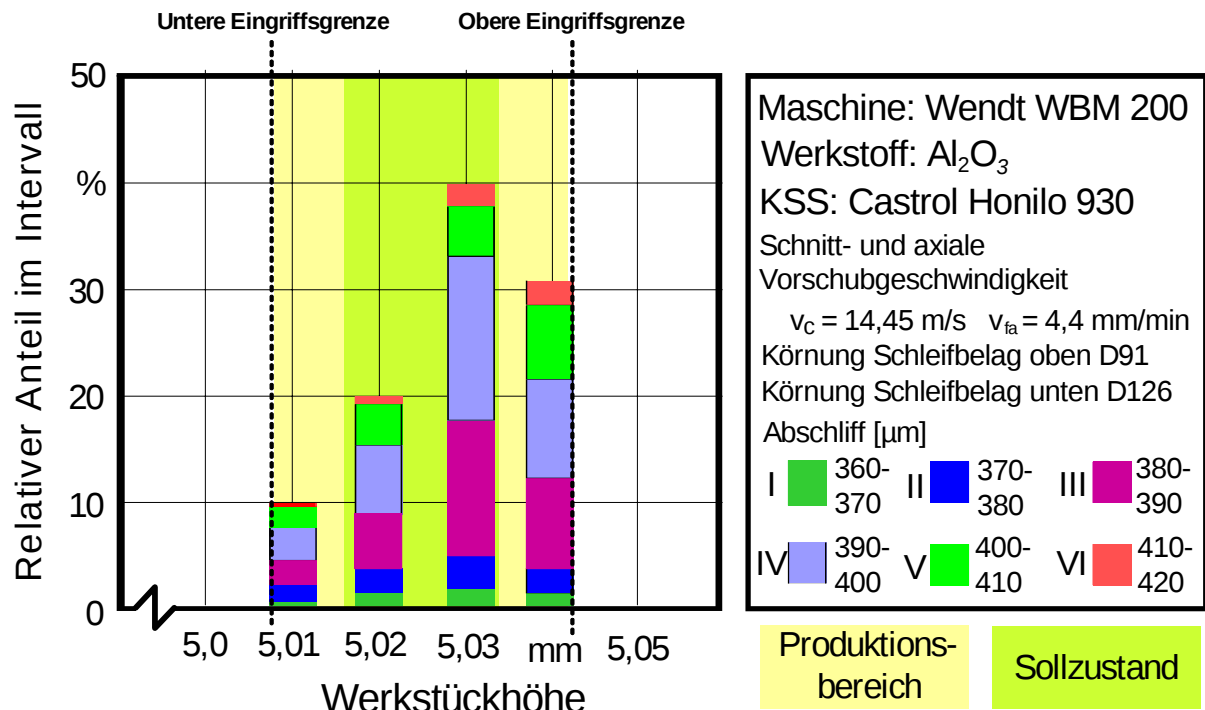


Bild 5.29: Einfluss der gesinterten Ausgangshöhe auf die geschliffene Werkstückhöhe des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens „Prinzip Wendt“

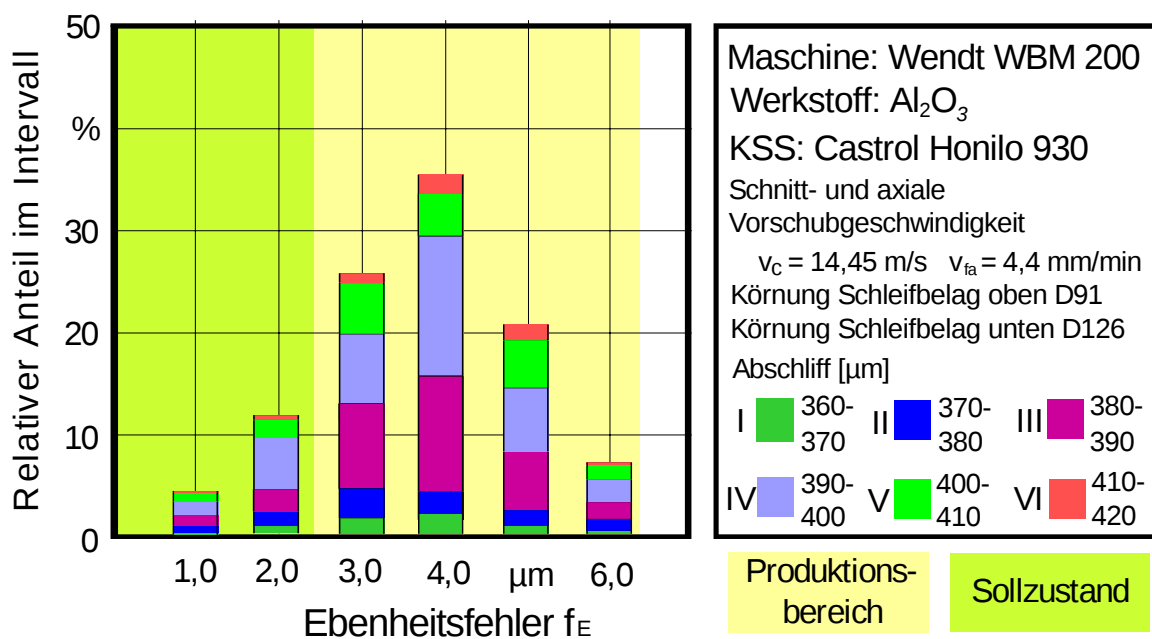


Bild 5.30: Einfluss der gesinterten Ausgangshöhe auf den Ebenheitsfehler des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens „Prinzip Wendt“

Bei der Betrachtung des Ebenheitsfehlers f_E zeigt sich wiederholt die Unabhängigkeit von der gesinterten Werkstückhöhe (**Bild 5.30**). Im Mittelwert liegt der Ebenheitsfehler bei 3,5 μm .

5.3.2 Oberflächenqualität

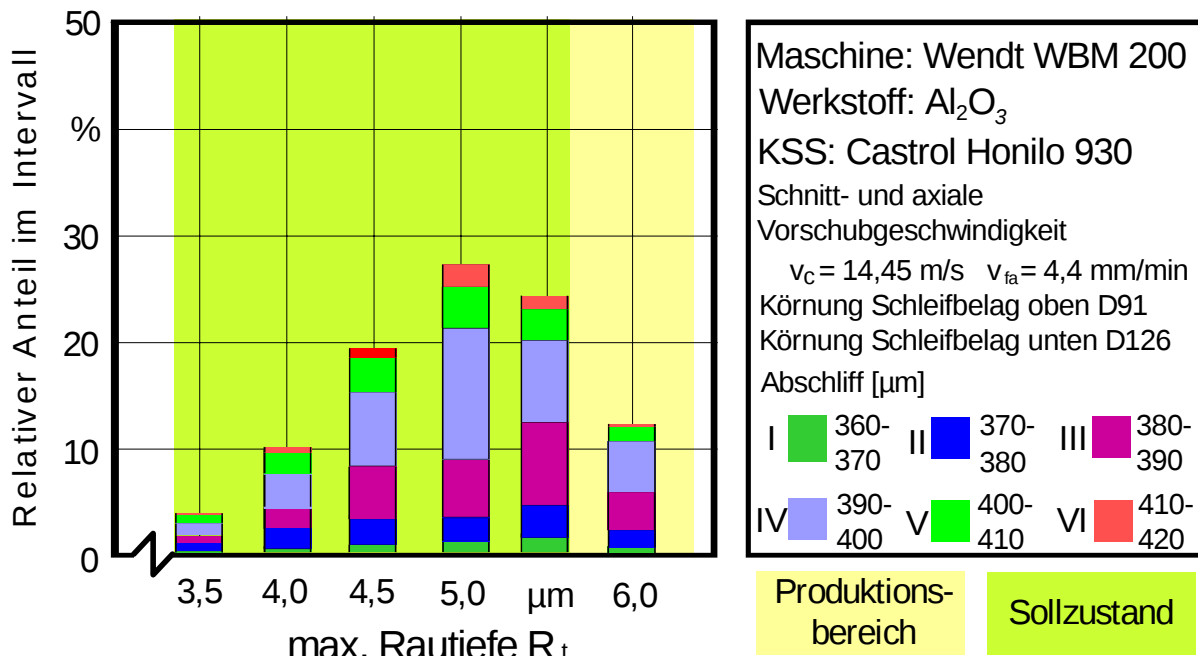


Bild 5.31: Einfluss der gesinterten Ausgangshöhe auf die Rautiefe R_t des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens „Prinzip Wendt“

Bild 5.31 zeigt die Unabhängigkeit der maximale Rautiefe R_t vom zerspannten Volumen und von der Ausgangslage. Damit bleiben die geschliffenen Werkstücke von den Abmessungen gesinterner Ausgangswerkstücke unbeeinflusst.

Die maximale Rautiefe R_t liegt normalverteilt zwischen 3,5 bis 6,0 μm .

Bestimmend für die Prozesszeit des nachfolgenden Polierverfahrens sind die drei Ergebnisgrößen Werkstückhöhenstreuung, Ebenheitsfehler f_E und maximale Rautiefe R_t in der Reihenfolge der Aufzählung.

5.3.3 Einflussgrößen auf das Arbeitsergebnis

Langzeitbetrachtung

Im Rahmen von Langzeituntersuchungen wurde der Prozess, ohne Änderung von Maschinenparametern, über einen Zeitraum von sechs Monaten protokolliert.

Zu diesem Zweck wurde an die Maschinenbediener ein Maschineneinstellblatt ausgegeben, in das die artikelabhängigen Einstelldaten einzutragen waren. Somit konnten die in der

Produktion eingestellten Maschinenparameter wie Schnittgeschwindigkeit v_c , axiale Vorschubgeschwindigkeit v_{fa} und Oszillationsgeschwindigkeit v_{fosz} in Abhängigkeit der einzelnen Artikel aufgenommen werden.

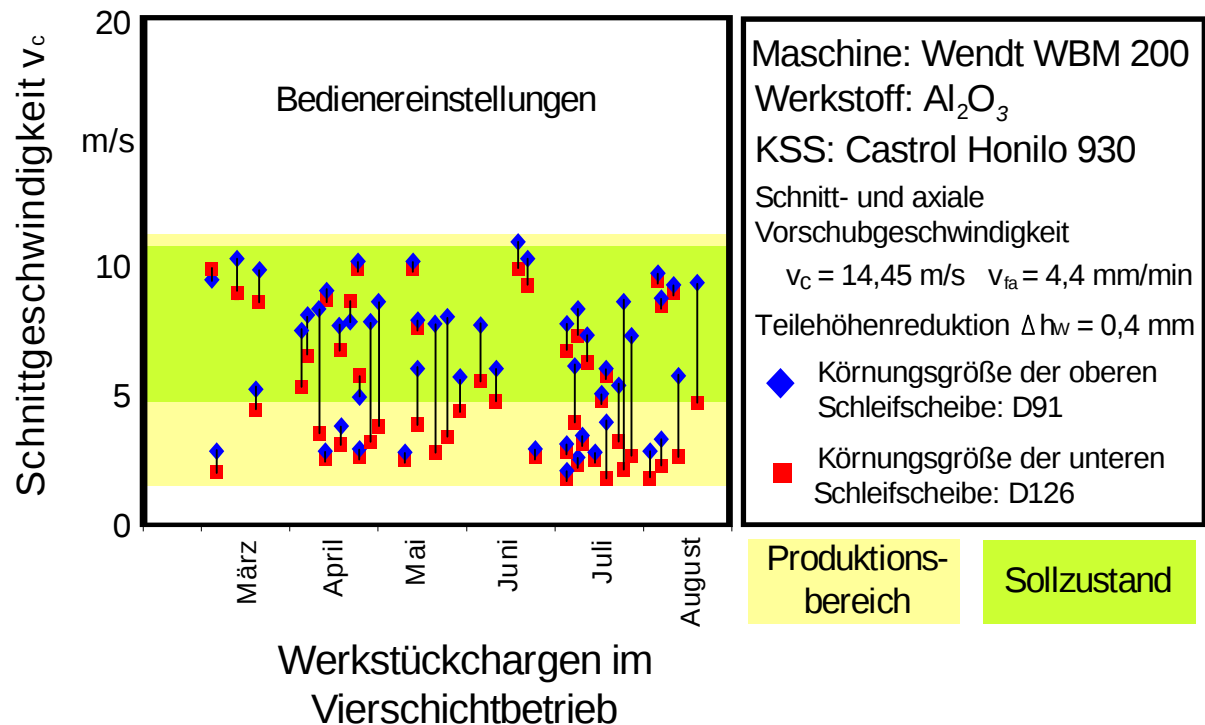


Bild 5.32: Einstellung der Schnittgeschwindigkeit v_c je Bediener in der Langzeituntersuchung im Vierschichtbetrieb des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens „Prinzip Wendt“

Die Bediener wählen die Einstellungen der Quer-Seiten-Doppelplanschleifmaschine „Prinzip Wendt“ selbst. Zur Bearbeitung der verschiedenen Keramikscheiben wurden aufgrund der unterschiedlichen Zerspanvolumina veränderte Einstellungen der Schnittgeschwindigkeit v_c vorgenommen.

Eine Auswertung für einen Artikel über die Schnittgeschwindigkeit v_c in Abhängigkeit von 50 Produktionschargen oder 500.000 Stück und unterschiedlichen Maschinenbedienern führt zu den Ergebnissen in **Bild 5.32**.

Es ist zu erkennen, dass je nach Bediener und Charge unterschiedliche Schnittgeschwindigkeiten v_c gefahren werden, wobei die Schnittgeschwindigkeitsdifferenz Δv_c oft unterschiedlich zwischen der Werkstückvorder- beziehungsweise -rückseite war. Da die Einstellungen der Schnittgeschwindigkeiten aufgrund der geringen Artikel-toleranz je Abschleißseite großen Einfluss auf die Polierzeiten ausüben, werden die Einstellungen der Maschine zukünftig artikelabhängig vorgegeben.

Mit im Mittel um 5 ms^{-1} liegt die Höhe der Schnittgeschwindigkeit deutlich unter den erwarteten Werten.

Kurzzeitbetrachtung

Die Analyse der Steigerung der axialen Vorschubgeschwindigkeit v_{fa} zeigt, parallel zu den Untersuchungen von SALJÉ, BOCK und PAHLITSCH, eine Erhöhung der Werkstückrautiefen R_a , die aus einer Zunahme der Einzelkornspanungsdicke und einer damit erhöhten Belastung der Kornschneide resultiert [Sal88; Boc93; Pah65].

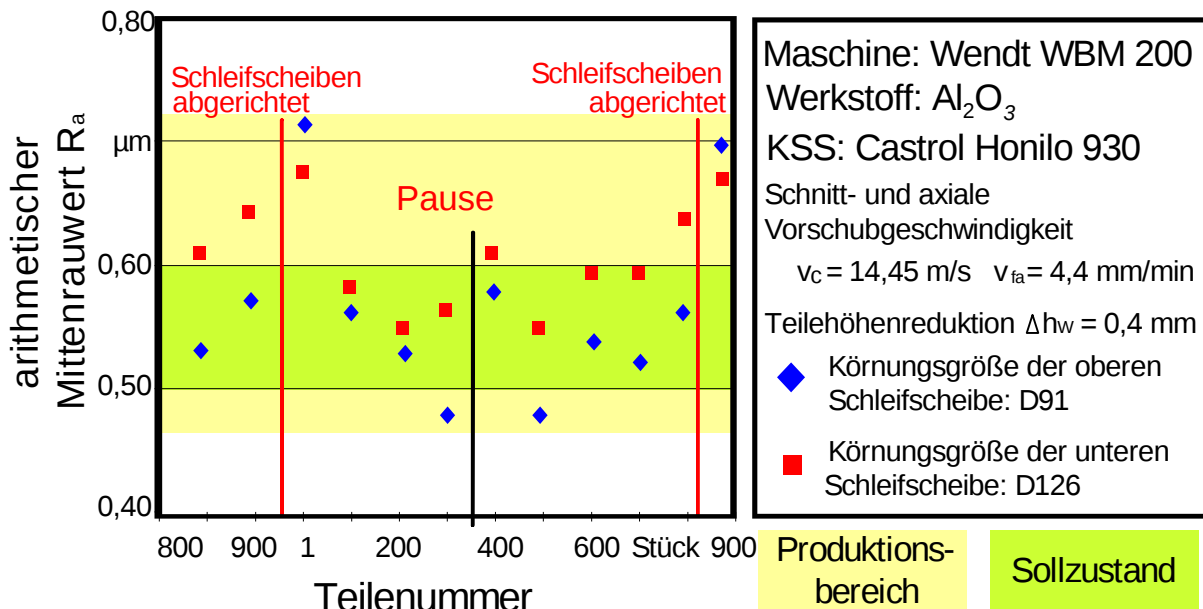


Bild 5.33: Entwicklung des R_a -Wertes zwischen zwei Abrichtintervallen des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens „Prinzip Wendt“

Insgesamt steigt der R_a -Wert von $0,48 \mu\text{m}$ auf $0,57 \mu\text{m}$ über den axialen Vorschubgeschwindigkeitsbereich $\Delta v_f = 1000$ bis $6000 \mu\text{m/min}$.

Einen deutlich stärkeren Einfluss zeigt die Auswertung der R_a -Werte über eine Schichtleistung von 1100 Werkstücken unter Betrachtung der Abrichtintervalle und der Pausenzeit nach **Bild 5.33**. Unabhängig von der Körnung weisen die frisch geschärften Schleifscheiben einen höheren, über die nächsten 200 Werkstücke kontinuierlich abnehmenden Rauheitswert auf. Der Einfluss der Körnung zwischen D126 und D91 ist mit $\Delta R_a = 0,05 \mu\text{m}$ abzulesen. Die Pausenzeit von 30 Minuten bedingt durch das Abkühlen der Schleifmaschine einen deutlichen Anstieg. Nach dem Schleifen von 700 Werkstücken nehmen die R_a -Werte sowie die Werkstücktemperatur wieder zu, es folgt das nächste Abrichtintervall.

Innerhalb der Großserienproduktion ist der von TÖNSHOFF und ROTH beobachtete stationäre Bereich nicht festzustellen [Tön92; Rot95]. Die Schleifscheibentopologie sowie die Abflachung der Kornspitzen sind für die sich rasch verändernden Prozessbedingungen verantwortlich.

5.4 Ökonomische Bewertung

5.4.1 Zeitspannungsvolumen

Die Berechnung des bezogenen Zeitspannungsvolumens ist die in der Industrie übliche Vorgehensweise für den Vergleich der Leistungsfähigkeit unterschiedlicher Schleifprozesse.

Aufgrund der über den Radius veränderten kinematischen Prozessbedingungen wird bei Seitenschleifverfahren das Zeitspannungsvolumen bezogen auf die Schleifscheibenfläche A_S definiert [ARD01]. Unter Berücksichtigung des zurückgelegten Schleifweges s in der Gleichung (5.8) auf der Diamantschleifscheibe und der Anzahl der Oszillationshübe i_{osz} folgt für das wegbezogene Zeitspannungsvolumen aus Gleichung (4.12):

$$\frac{Q''_w}{s} = \frac{\Delta h_w \cdot i_{osz} \cdot z \cdot A_w}{s \cdot t_c \cdot A_S} = \frac{\Delta h_w \cdot 2 \cdot v_{osz} \cdot i_{osz} \cdot z \cdot A_w}{\omega \cdot (r_2^2 - r_1^2) \cdot t_c \cdot A_S}. \quad (5.13)$$

Tabelle 5.2: Maximales Zeitspannungsvolumen in Abhängigkeit des Werkstückdurchmessers für $\Delta h = 0,4 \text{ mm}$

		Vollflächige runde Teile im Werkstückschieber						bez. Zeitspannungsvolumen
		1	2	3	4	5	6	
		Ø 55	Ø 50	Ø 40	Ø 30	Ø 20	Ø 15	
Vorschubgeschwindigkeit $v_{fa} [\text{mm min}^{-1}]$	1	0,0027	0,0045	0,0043	0,0033	0,0018	0,0012	
	1,3	0,0036	0,0059	0,0057	0,0042	0,0024	0,0016	
	1,7	0,0047	0,0077	0,0074	0,0055	0,0031	0,0021	
	2,2	0,0060	0,0100	0,0096	0,0072	0,0040	0,0027	
	3	0,0082	0,0136	0,0130	0,0098	0,0054	0,0037	
	4,4	0,0121	0,0199	0,0191	0,0143	0,0080	0,0054	
	6	0,0164	0,0272	0,0261	0,0196	0,0109	0,0073	
	8,6	0,0236	0,0389	0,0374	0,0280	0,0156	0,0105	
	12	0,0329	0,0543	0,0522	0,0391	0,0217	0,0147	
	15	0,0411	0,0679	0,0652	0,0489	0,0272	0,0183	
Produktionsbereich		bezogenes Zeitspannungsvolumen $Q''_w [\text{mm}^3 \text{s}^{-1} \text{mm}^{-2}]$						

mit $A_S = 14444 \text{ mm}^2$ und $\Delta h = 0,4 \text{ mm}$.

Die Betrachtung des bezogenen Zeitspannungsvolumens Q''_w in **Tabelle 5.2** zeigt auch den technisch sinnvoll nutzbaren Bereich auf. Die Temperatur der Werkstücke ist stark vom Zeitspannungsvolumen abhängig. Ein Schleifergebnis ohne Thermoschockrisse ist nur für Zeitspannungsvolumina kleiner $0,028 \text{ mm}^3 \text{s}^{-1} \text{mm}^{-2}$ beim Quer-Seiten-Doppelplanschleifen „Prinzip Wendt“ möglich.

5.4.2 Bezogene Werkzeugkosten

Für die Betrachtung der Werkzeugkosten wurden insgesamt zehn verschiedene Schleifscheibentypen jeweils drei Mal komplett verschliffen. Aufgrund der statistischen Verteilung der gesamten Dichtscheibenproduktion über sämtliche Schleifmaschinen wurde für die Vergleichbarkeit von unterschiedlichen Konzentrationen und Diamantkörnungen der Diamantverbrauch je Dichtscheibe errechnet. Insgesamt wurden 23 Millionen Dichtscheiben geschliffen.

Den Zusammenhang zwischen Körnungsgröße, Konzentration und Anzahl der Schleifkörner je mm^3 zeigt **Tabelle 4.5**. Die exemplarische Betrachtung zweier ausgewählter Schleifscheiben D46 und D126 der Konzentration C75 zeigt, dass die Anzahl der Schleifkörner mit zunehmender Körnungsgröße von 3721 auf 181 je mm^3 zurückgeht. Mittels **Tabelle 4.5** errechnet sich für Schleifscheiben des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens „Prinzip Wendt“ mit dem Außendurchmesser d_{sa} von 250 mm, einer Belagbreite b_s von 40 mm und der Belaghöhe von 4 mm die Anzahl der verarbeiteten Diamanten.

Tabelle 5.3: Verschleißdaten unterschiedlicher Schleifscheiben und Körnungsgrößen des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens „Prinzip Wendt“

		Konzentration	Körnung je mm^3	Anzahl Diamanten	Anzahl Werkstücke	Diamanten je Werkstück
Schleifscheibe	D 46 # 1	75	3721	555.269.946	498.400	1114
	D 46 # 2				514.600	1079
	D 46 # 3				464.200	1595
	D91 # 1	75	481	71.777.706	706.800	101
	D91 # 2				741.200	97
	D91 # 3				796.066	90
	D91 # 4	100	641	95.653.866	748.300	128
	D91 # 5				793.600	120
	D126 # 1	75	181	27.009.906	1.258.023	21
	D126 # 2				1.212.685	30

Wider Erwarten zeigt das Ergebnis der Verschleißanalyse (**Tabelle 5.3**), dass aus einer Erhöhung der Konzentration um 25 Prozent keine Erhöhung der Anzahl der geschliffenen Werkstücke resultiert. Dies ist durch die öfter durchzuführenden Abrichtintervalle, welche zu einem erhöhten Verschleiß der Schleifscheiben mit Konzentration C100 führen, begründet. Die Betrachtung der Körnungsgröße D91 (C75) ergibt immer einen Verbrauch von 90 bis 100 Diamanten je Dichtscheibe. Innerhalb verschiedener Schleifscheibenhersteller ist ein maximaler Unterschied von bis zu 15 Prozent in der Standzeit zu verbuchen.

Tabelle 5.3 zeigt die Anzahl der geschliffenen Werkstücke je Schleifscheibensatz. Aufgrund der höheren Kornhaltekräfte können mit Schleifscheiben der D126 etwa 60 Prozent mehr Werkstücke geschliffen werden. Die Zahl der verbrauchten Diamanten je Werkstück reduziert

sich von 1100 Stück bei D46 auf 96 Stück bei D91 auf 21 Stück bei der größten eingesetzten Körnungsgröße D126.

Die bezogenen Werkzeugkosten bei konstanten Schleifbelagvolumina je 100 Werkstücke liegen im Durchschnitt bei der Körnungsgröße D91 bei 0,16 € und D126 bei 0,096 €, also gesamt bei 0,26 €. Da die Schleifscheiben nahezu identische Kosten verursachen, ist die Standzeit die maßgeblich die Kosten beeinflussende Größe.

5.4.3 Schleifverhältnis

Das Schleifverhältnis G kann unter Produktionsbedingungen aus dem gesamten zerspannten Volumen aller Werkstücke zu dem Volumen beider verschlissenen Schleifscheiben berechnet werden. Hierbei wurde das Werkstückvolumen über die Produktvielfalt mit $\overline{V_w} = 153 \text{ mm}^3$ gemittelt. Tabelle 5.4 stellt die Schleifverhältnisse G für diese Versuchsreihe dar. Die Schleifscheibenpaare der Spezifikation D46 C75 weisen ein Schleifverhältnis von $G = 133$ auf. Die Paare der Spezifikation D91 C75 erreichen mit $G = 197$ einen höheren Wert. Fast doppelt so ergiebig zeigt sich mit einem Wert von 333 das Scheibenpaar der Körnungsgröße D126 C75. Die Scheibensätze mit der größeren Konzentration C100 weisen über alle Körnungsgrößen niedrigere Werte auf als diejenigen mit der Konzentration C75. Diese niedrigen Werte sind auf die häufigen Abrichtintervalle zurückzuführen, die aufgrund der steigenden Werkstücktemperatur nötig wurden.

Tabelle 5.4: Schleifverhältnis G für verschiedene Schleifscheibenhersteller und Körnungsgrößen des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens „Prinzip Wendt“

		Konzentration	Anzahl Werkstücke	Werkstückvolumen V_{wges} [mm ³]	Schleifscheibenvolumen V_{sges} [mm ³]	Schleifverhältnis G
Schleifscheibe	D 46 # 1	75	498.400	76.255.200	577.760	131
	D 46 # 2		514.600	78.733.800		136
	D 46 # 3	100	464.200	71.022.600		122
	D91 # 1	75	706.800	108.140.400		187
	D91 # 2		741.200	113.403.600		196
	D91 # 3		796.066	121.798.098		210
	D91 # 4	100	748.300	114.489.900		198
	D91 # 5		793.600	121.420.800		210
	D126 # 1	75	1.258.023	192.477.519		333
	D126 # 2	100	1.212.685	185.540.805		321

5.4.4 Produktivität

Die mögliche Produktivität für vollflächige kreisförmige Teile im Werkstückschieber ist in der **Tabelle 5.5** aufgeführt.

Tabelle 5.5: Produktivität von Werkstücken je Stunde des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens „Prinzip Wendt“

		vollflächige runde Teile im Werkstückschieber					
		1 Ø 55	2 Ø 50	3 Ø 40	4 Ø 30	5 Ø 20	6 Ø 15
Vorschubgeschwindigkeit v_{fa} [mm min ⁻¹]	1	56	112	168	224	280	336
	1,3	73	146	218	291	364	437
	1,7	95	190	286	381	476	571
	2,2	123	246	370	493	616	739
	3	168	336	504	672	840	1008
	4,4	246	493	739	986	1232	1478
	6	336	672	1008	1344	1680	2016
	8,6	482	963	1445	1926	2408	2890
	12	672	1344	2016	2688	3360	4032
	15	840	1680	2520	3360	4200	5040
Produktionsbereich		Produktivität [Stück je Stunde]					

mit $A_S = 14444 \text{ mm}^2$ und $\Delta h = 0,4 \text{ mm}$.

Der markierte Bereich zeigt die Restriktionen der Produktivität in Werkstücken je Stunde auf. Exemplarisch wird der Durchmesserbereich 30 mm herausgenommen. Je nach dem Zustand der Schleifscheibe können zwischen 986 und 1344 Werkstücke geschliffen werden.

Der Bediener muss, abhängig von der Anzahl der geschliffenen Werkstücke und somit dem Verschleiß der Schleifkörner, ab einem bestimmten Zeitpunkt die axiale Vorschubgeschwindigkeit v_{fa} um eine Stufe zurücknehmen, das heißt, die Dauerleistung errechnet sich aus dem Mittelwert der beiden Zahlen zu im Durchschnitt 1165 Werkstücken je Stunde.

5.4.5 Fertigungskosten je Stück

Grundlagen

Zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit bietet sich die Bestimmung der Stückkosten an. Die Grundlage für die Berechnung ist der Maschinenstundensatz K_{MH} . Dieser errechnet sich aus der Summe der kalkulatorischen Abschreibung K_A , den kalkulatorischen Zinsen K_Z , den

Raumkosten K_R , den Energiekosten K_E , den Instandhaltungskosten K_I dividiert durch die Nutzungszeit T_N .

$$K_{MH} = \frac{K_A + K_Z + K_R + K_E + K_I}{T_N} . \quad (5.14)$$

Kostenrecherche nach Betriebsabrechnung

Tabelle 5.6 zeigt die zugrunde liegenden Anschaffungskosten und die resultierenden Kapital- und Investitionskosten in €. Zur Gegenüberstellung mit den Arbeiten von ARDELT, der den Vergleich zwischen Läppen und Schleifen mit Planetenkinematik durchgeführt hat, wurden dieselben Rechnungsgrundlagen verwendet [Ard01].

Tabelle 5.6: Kapital-, Instandhaltungs- und Raumkosten für Maschinen und Zusatzaggregate

	Planschleifen „Prinzip Wendt“
Maschine	365.000 €
KSS-Reinigung	35.000 €
	400.000 €
kalkulatorische Abschreibung K_A	36.800 €
kalkulatorische Zinsen K_Z	18.400 €
Instandhaltungskosten K_I	12.000 €
Raumkosten K_R	3.000 €

Der Restwert wird mit acht Prozent nach einer Nutzungsdauer von zehn Jahren errechnet. Die Kosten für die Instandhaltung werden über der gesamten Nutzungszeit mit 30 Prozent des Neuwertes angesetzt. Die Raumkosten werden mit $K_R = 3.000,00 \text{ €/a}$ veranschlagt.

Den veranschlagten Energiebedarf und die jährlichen Energiekosten beider Anlagen zeigt **Tabelle 5.7**. Der Preis je Kilowattstunde wird mit 0,12 € angesetzt. Als jährliche Nutzungszeit im Einschichtbetrieb werden 260 Nutzungstage á 8 Stunden, also $T_N = 2080 \text{ h}$ angenommen.

Tabelle 5.7: Veranschlagter Energiebedarf und Energiekosten

	Planschleifen „Prinzip Wendt“
Maschine	40 kWh
KSS-Reinigung	8,0 kWh
durchschnittlich 50 % Last	24 kWh
Energiekosten K_E	5.990 €

Für das Quer-Seiten-Doppelplanschleifen nach dem "Prinzip Wendt" ergibt sich ein Maschinenstundensatz von 36,63 €/h. Unter Berücksichtigung der Werkzeugkosten, welche aus zwei Satz Schleifscheiben für 4800,00 €, Abrichtscheiben für 1000,00 € und etwa 1200 Liter Schleiföl Honilo 930 zu 1600,00 € bestehen, ergibt sich der Maschinenstundensatz K_{MHW} zu 36,63 € + 3,56 € also 40,19 €.

Der Schleifscheibensatz verschleißt im Mittel über eine Million Dichtscheiben und errechnet sich über die jährliche Nutzungszeit T_N . Die Stückkosten K_F berechnen sich nach der Gleichung

$$K_F = \left(K_{MHW} + \frac{K_{Lohn} + K_X}{T_N} \right) \cdot T_E . \quad (5.15)$$

Neben dem Maschinenstundensatz K_{MHW} fließen hier die Lohnkosten K_{Lohn} und die Restfertigungsgemeinkosten K_X mit ein, die alle noch nicht erfassten Kosten beinhalten. In diesem Beispiel werden die Lohnkosten bei einem Stundenlohn von 30,00 €/h mit $K_{Lohn} = 62.400,00$ €/a angesetzt. Die Restfertigungsgemeinkosten K_X werden mit 10 Prozent angenommen. Durch Multiplikation der je Stunde entstehenden Kosten mit der Maschinenzeit je Werkstück T_E ergeben sich die Stückkosten K_F , zu sehen in **Tabelle 5.8**. Ein Vergleich der Quer-Seiten-Doppelplanschleifverfahren ist in **Kapitel 7.3.2** zu finden.

Unter den oben angenommenen Daten kostet die doppelseitige Schleifbearbeitung von 100 Werkstücken 7,25 €.

Tabelle 5.8: Abschätzung der Werkzeugkosten und der Stückkosten

	Planschleifen „Prinzip Wendt“
Werkstückanzahl je Werkzeug	1.000.000
Bearbeitungszeit je Ladung	10,7 s
Chargenmenge	3
Chargen je Stunde	336
Teile je Stunde	1008
Teile je Jahr	2.096.640
Maschinenstundensatz K_{MH}	36,63 €/h
Werkzeugkosten je Jahr	7.400,00 €
Werkzeugkosten je 100 Stück	0,35 €
Maschinenstundensatz mit Werkzeugkosten K_{MWH}	40,19 €
Stückkosten K_F je 100 Stück	7,25 €

6 QUER-SEITEN-DOPPELPLANSCHLEIFEN MIT PLANETENKINEMATIK

6.1 Technologische Bewertung

6.1.1 Technologiekenngößen

Bahnlängen

Eine wichtige Beurteilung der beiden untersuchten unterschiedlichen Schleifverfahren wird mittels der bezogenen Teilehöhenreduktion $\Delta h'_W$ durchgeführt. Diese bezogene Kenngröße ermittelt die zerspante Höhe des Werkstückes je Meter zurückgelegter Bahnlänge auf der Schleifscheibe. Hierfür wird aus der Schnittgeschwindigkeit v_c und der Schleifzeit t_c die mittlere Bahnlänge P_{Wmit} errechnet.

Tabelle 6.1: Mittlere Bahnlänge P_{Wmit} in Abhängigkeit der Schleifzeit t_c und der Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n bei gegenläufigen Drehzahlen der Schleifscheiben für das Quer-Seiten-Doppelplanschleifen mit Planetenkinematik

Drehzahl [min^{-1}]			-200	200
Schnittgeschwindigkeit v_{cmit} [ms^{-1}]			unten 5,43	oben 4,59
[m/min]			325,8	275,4
Schleifnormalkraft F_n [N] Schleifzeit t_c [s]	1000	120	652	551
	2000	95	516	436
	3000	81	440	372
	4000	70	380	321
	5000	63	342	289
	6000	56	304	257
	7000	49	266	225
	8000	45	244	207
	9000	42	228	193
	10000	38	206	174
F_n [N] t_c [s]			Bahnlänge P_{Wmit} [m]	

Werkstückdurchmesser $d_W = 40$ mm

Tabelle 6.1 zeigt die mittlere Bahnlänge als Funktion der Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n , welche die bestimmende Größe für die Schleifzeit ist. Es wird hierbei nur die Bahnlänge bezogen auf die Mitte des Schleifscheibenbelages berücksichtigt. Je nachdem, bei welcher Schleifscheibe die Drehrichtung mit der des inneren Zahnkranzes übereinstimmt, unterscheiden sich die Bahnlängen. Aufgrund der größeren Werkstückfläche A_{Wu} auf der Unterseite der Werkstücke empfiehlt es sich, die untere Schleifscheibe im Gegenlauf zum

inneren Zahnkranz zu benutzen, wodurch höhere mittlere Schnittgeschwindigkeiten auf dieser Werkstückseite erzeugt werden.

Die eingestellte Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n bewegt sich je nach Kornverschleiß der Diamantkörner zwischen 2000 N und 4000 N. Das bedeutet bei einem Aufmaß von 0,4 mm eine Schleifzeit t_c zwischen 70 s bis 95 s. Das Werkstück legt je nach Schleifzeit t_c eine mittlere Bahnlänge P_{Wmit} zwischen 380 m und 516 m auf der unteren und zwischen 321 m und 436 m auf der oberen Schleifscheibe zurück.

Relativgeschwindigkeiten und Beschleunigungen

Die Schnittgeschwindigkeit v_c wird beim Quer-Seiten-Doppelplanschleifen mit Planetenkinematik üblicherweise in Meter je Minute angegeben. **Bild 6.1** zeigt die Veränderung der Schnittgeschwindigkeit für ein Werkstück innerhalb einer Halterumdrehung. Bei der unteren Schleifscheibe mit der Drehrichtung des inneren Zahnkranzes entstehen kleinere Geschwindigkeitsverhältnisse.

Die Schnittgeschwindigkeit v_c variiert in diesem Fall für die obere Schleifscheibe zwischen 100 und 400 m/min ($1,67$ und $6,67 \text{ ms}^{-1}$), für die untere zwischen 225 und 410 m/min ($3,75$ und $6,83 \text{ ms}^{-1}$) innerhalb einer Teilzykluszeit t_c von 0,9 Sekunden. Die obere und untere Schleifscheibe drehte gegenläufig mit 200 1/min. Der Zahnkranz drehte mit 100 1/min.

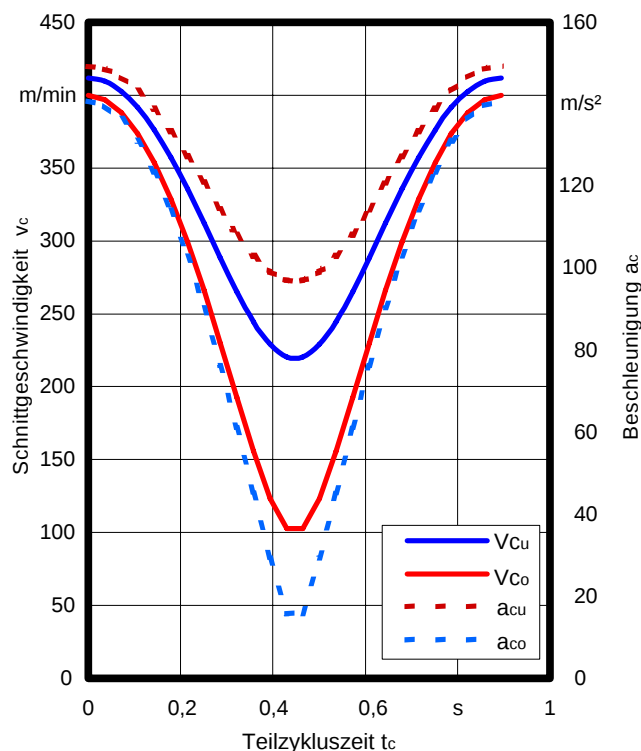


Bild 6.1: Schnittgeschwindigkeit v_c und Beschleunigung a_c während eines Zyklus des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens mit Planetenkinematik

6.1.2 Prozesskenngrößen

Die Untersuchungen der Prozesskenngrößen wurden mit den in **Kapitel 4.3** beschriebenen Werkstücken durchgeführt. Insgesamt wurde für die Ermittlung der Daten etwa eine Jahresproduktion untersucht. Das entspricht circa 10 Millionen Werkstücken auf der Quer-Seiten-Doppelplanschleifmaschine DLM 700.

Schleifzeit und Schleifnormalkraft in axialer Richtung

Die Schleifzeit t_c besitzt einen degressiven Verlauf über die Zunahme der Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n . Die in der Produktion üblicherweise notwendigen Schleifzeiten liegen je nach Schärfegrad des Schleifscheibenbelages zwischen 60 und 100 Sekunden. **Bild 6.2** zeigt den Verlauf der Schleifzeit t_c für eine Teilehöhenreduktion $\Delta h_w = 0,4$ mm bei gegenläufig drehenden Schleifscheiben.

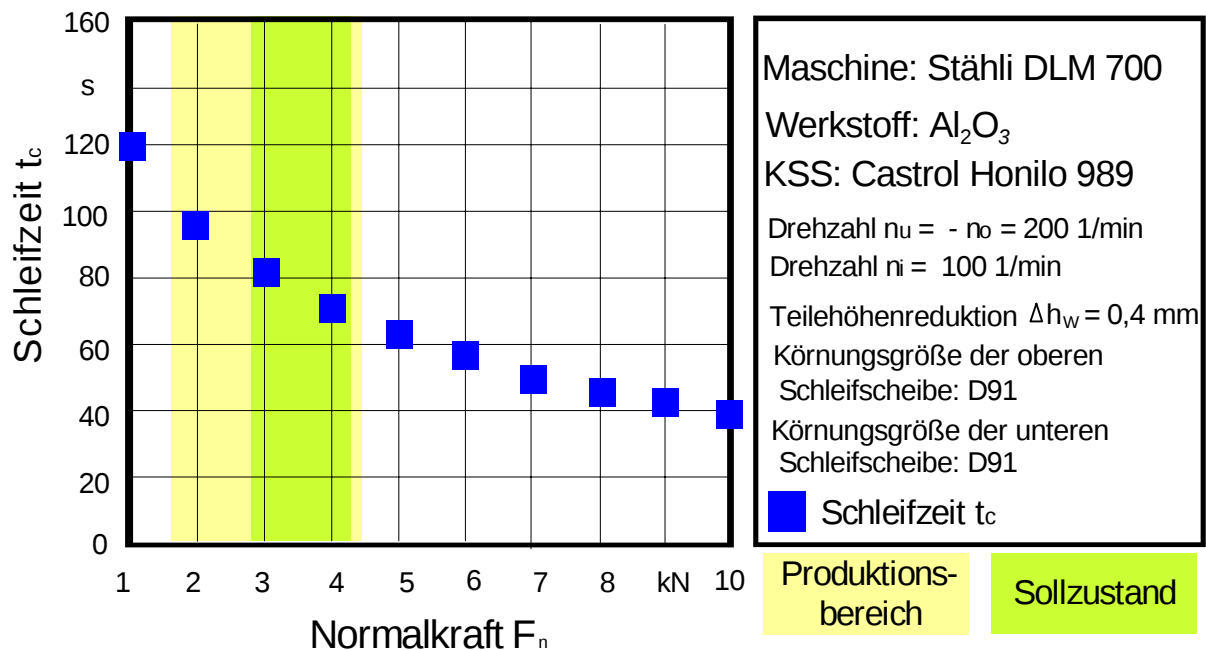


Bild 6.2: Schleifzeit t_c in Abhängigkeit der Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens mit Planetenkinematik

Mit der Steigerung der Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n erhöht sich die Teilehöhenreduktion Δh_w . **Tabelle 6.2** zeigt den Zusammenhang zwischen einzelnen Kenngrößen für zwei Diamantschleifscheiben der Körnungsgröße D91.

Der Schleifdruck verändert sich proportional zu der Kraft, während die zeitbezogene Teilehöhenreduktion Δh_w sich bei der zehnfachen Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n nur um den Faktor drei verändert. Dieser Zusammenhang kann mit den vielen Spänen in der Kontaktzone erklärt werden, die durch den KSS-Strom nicht mehr abtransportiert werden. Es entsteht ein weißer Film aus zerspannten Partikeln auf dem Schleifscheibenbelag.

Tabelle 6.2: zeitbezogene Teilehöhenreduktion $\Delta \dot{h}_w$ Schleifzeit in Abhängigkeit der Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n für das Quer-Seiten-Doppelplanschleifen mit Planetenkinematik

Schleifnormalkraft F_n [N]	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
bez. Teilehöhenreduktion $\Delta \dot{h}_w$ [mm min ⁻¹]	0,25	0,32	0,37	0,43	0,48	0,54	0,61	0,67	0,71	0,79
Schleifdruck p_{cmax} [N cm ⁻²]	0,028	0,055	0,083	0,111	0,138	0,166	0,193	0,221	0,249	0,276

Werkstückdurchmesser $d_w = 40$ mm; gesamte Werkstückfläche $A_{wges} = 36190$ mm²

Halterbelegung

Ein wichtiger produktionsrelevanter Punkt des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens mit Planetenkinematik ist die Belegung der Halter. **Bild 6.3** nach ARDELТ zeigt die Belegung für die Quer-Seiten-Doppelplanschleifmaschine mit Planetenkinematik.

Angaben zur Halterbelegung

Maschine: DLM 700

Werkstücke: DS 20 mm

Werkstücküberlauf (in % vom Radius) 80

Stegbreite [mm] 8

Freilauf [mm] 0,5

Belegung auf zwei Teilkreisen

Teilkreisradius 1 [mm]

Werkstückanzahl (Kreis 1)

Teilkreisradius 2 [mm]

Werkstückanzahl (Kreis 2)

Teilkreisradius 3 [mm]

Werkstückanzahl (Kreis 3)

Gesamtbelegung

Maximale Halteranzahl

Maximale Werkstückanzahl (gesamt)

Gesamte Werkstückfläche [cm²]

Gesamte Scheibenfläche [cm²]

Belegungsverhältnis [%]

Maximale Eingriffsfläche [%]

Minimale Eingriffsfläche [%]

Differenz [%]

5

180

361,9

2827,4

12,8

96,4

95,4

1,0

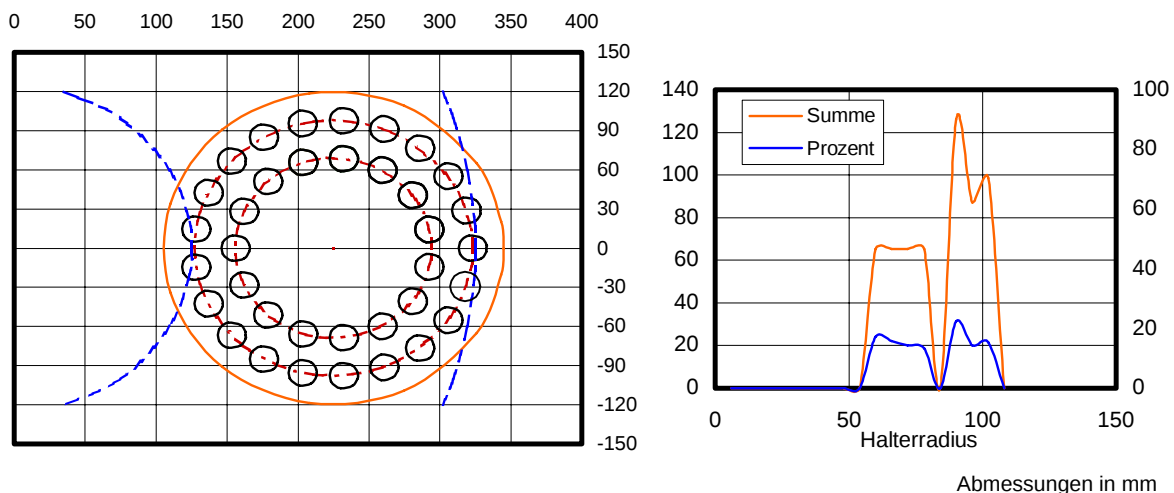


Bild 6.3: Geometrische Größen des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens mit Planetenkinematik nach ARDELТ [Ard01]

Insgesamt sind fünf Halter in der verwendeten Maschine vorhanden. Die Werkstücke rotieren zwingend über den Belagrand der Schleifscheiben. Der Abstand zwischen zwei Bohrungen liegt bei 8 mm. Somit sind insgesamt zwei Teilkreise, Teilkreis eins mit 21 und Teilkreis zwei

mit 15 Werkstücken maximal zu belegen, daraus ergibt sich eine Ladung aus 180 Werkstücken.

Eine weitere wichtige Angabe für die Auslegung des Prozesses Quer-Seiten-Doppelplanschleifen mit Planetenkinematik ist das Belegungsverhältnis B , das maximal bei 20 Prozent liegen sollte, da sonst zu viele Späne in der Kontaktzone der Schleifscheiben eine Reduzierung der Produktivität bewirken. Das Belegungsverhältnis B berechnet sich aus dem Quotienten der gesamten Werkstückfläche A_{Wges} zur Schleifscheibenfläche A_S .

Schleiföl

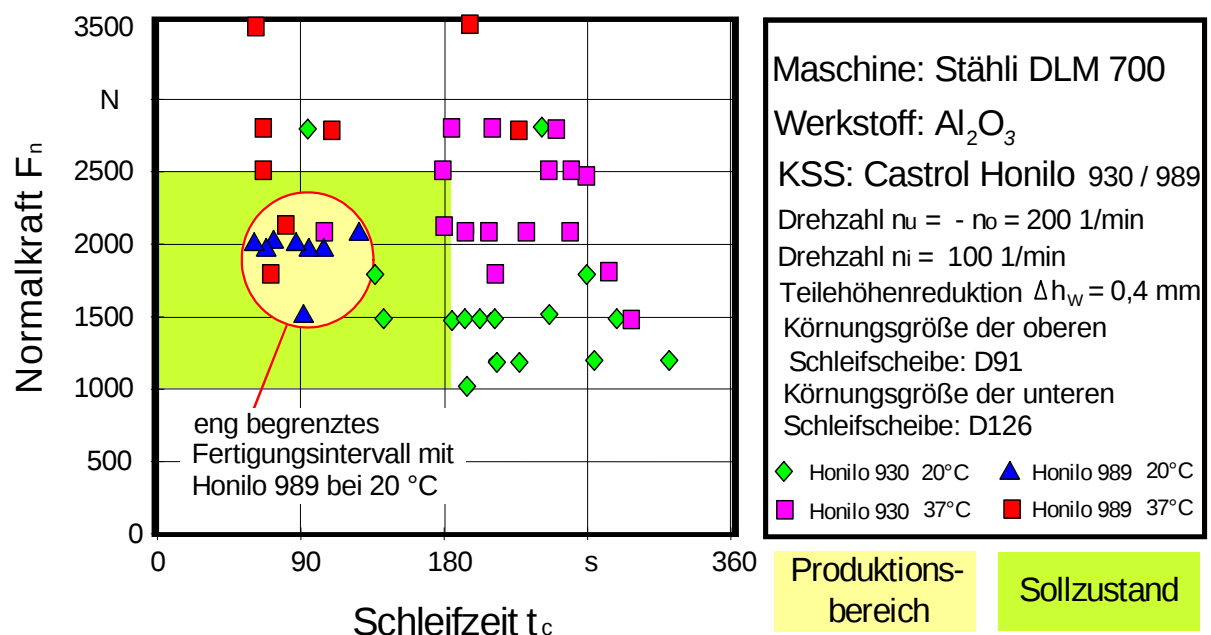


Bild 6.4: Einfluss von Ölsorte und Öltemperatur auf die Schleifzeit t_c und Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n

Besonderes Augenmerk ist dennoch auf die Wahl des geeigneten Schleiföles zu richten. Das seit etwa 20 Jahren in der keramischen Industrie eingesetzte Honilo 930 begrenzt das Fertigungsintervall stark. **Bild 6.4** zeigt den Einfluss von Honilo 930 und 989 gekühlt bei 20°C und ungekühlt bei 37°C. Generell gilt, dass ein bei 20°C gekühltes Schleiföl unabhängig von der Ölsorte deutlich geringere Schleifkräfte verursacht.

Honilo 989 unterscheidet sich neben seiner um 40 Prozent geringeren kinematischen Viskosität weiterhin zu Honilo 930 dadurch, dass es insgesamt 11 Prozent Fett beinhaltet, wodurch die Schleifzeit t_c bei einem eng begrenzten Fertigungsintervall von 180 bis 270 Sekunden auf 60 bis 100 Sekunden reduziert werden konnte. Die geringere Viskosität und der höhere Anteil an natürlichem Fett erhöhen die Reinigungswirkung des Schleiföles, wodurch deutlich weniger Späne in der Kontaktzone zurückbleiben.

6.2 Bewertung der Werkstückqualität

Innerhalb der Prozesskette übt der Ebenheitsfehler f_E des Werkstückes einen starken Einfluss auf die nachfolgende Prozesszeit des Polierens aus. Die Forderung, einfache und regelbare Parameter in der Produktion einzusetzen, reduziert die komplexen Möglichkeiten des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens mit Planetenkinematik auf die Einstellparameter Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n , die Drehzahlen der oberen Schleifscheibe n_o und der unteren Schleifscheibe n_u sowie die des Innenstiftkranzes.

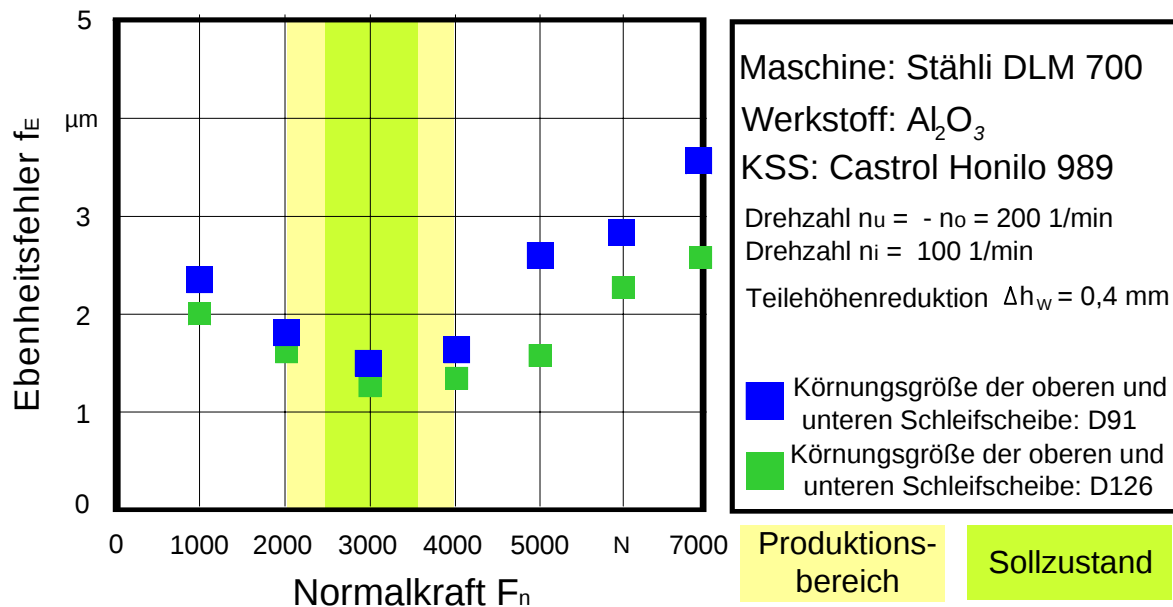


Bild 6.5: Einfluss der Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n auf den Ebenheitsfehler f_E des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens mit Planetenkinematik

Die Abhängigkeit des Ebenheitsfehlers f_E von der Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n folgt einer Becherkurve (**Bild 6.5**) mit dem absoluten Minimum bei $F_n = 3000$ N. Unter Einwirkung höherer Kräfte steigt der Ebenheitsfehler f_E bei kleineren Körnungsgrößen bedingt durch das abzutragende Zeitspannungsvolumen und die schlechte Zugänglichkeit des Prozessraumes für den Kühlschmierstoff schneller an als bei gröberen. Bei niedrigeren Normalkräften F_n konnte eine Schwingung bemerkt werden, welche sich negativ auf den Ebenheitsfehler f_E auswirkte.

Bild 6.6 zeigt den Einfluss der Drehzahl n und somit der Schnittgeschwindigkeit v_c auf den Ebenheitsfehler f_E . Es ist im Vergleich mit Bild 6.5 zu erkennen, dass die Schnittgeschwindigkeit v_c bei weitem nicht den Einfluss auf den Ebenheitsfehler besitzt wie die Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n . Beide Schleifscheiben haben ein Minimum bei $n_o = 200 \text{ min}^{-1}$. Bei niedrigeren Drehzahlen war nach etwa fünf Stunden ein Belag aus Spanpartikeln auf der unteren Schleifscheibe festzustellen, welcher sich negativ auf den Ebenheitsfehler f_E auswirkte. Die Kraft wurde bei $F_n = 3000$ N konstant gehalten.

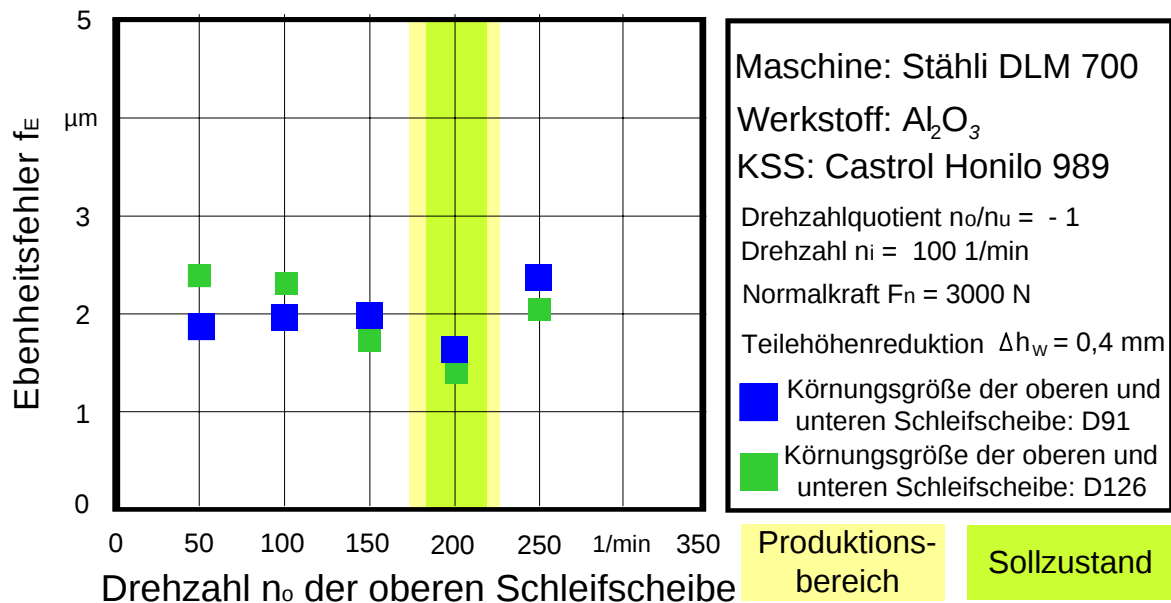


Bild 6.6: Einfluss der Drehzahlen auf den Ebenheitsfehler f_E für verschiedene Körnungsgrößen des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens mit Planetenkinematik

6.2.1 Maß- und Formgenauigkeit

Aus den Auswertungen der Qualitätslagen ist abzuleiten, dass das Aufmaß der Werkstücke aufgrund von Durchbiegungen sowie Randzonenschichten aus dem Sinterprozess 0,4 mm beträgt.

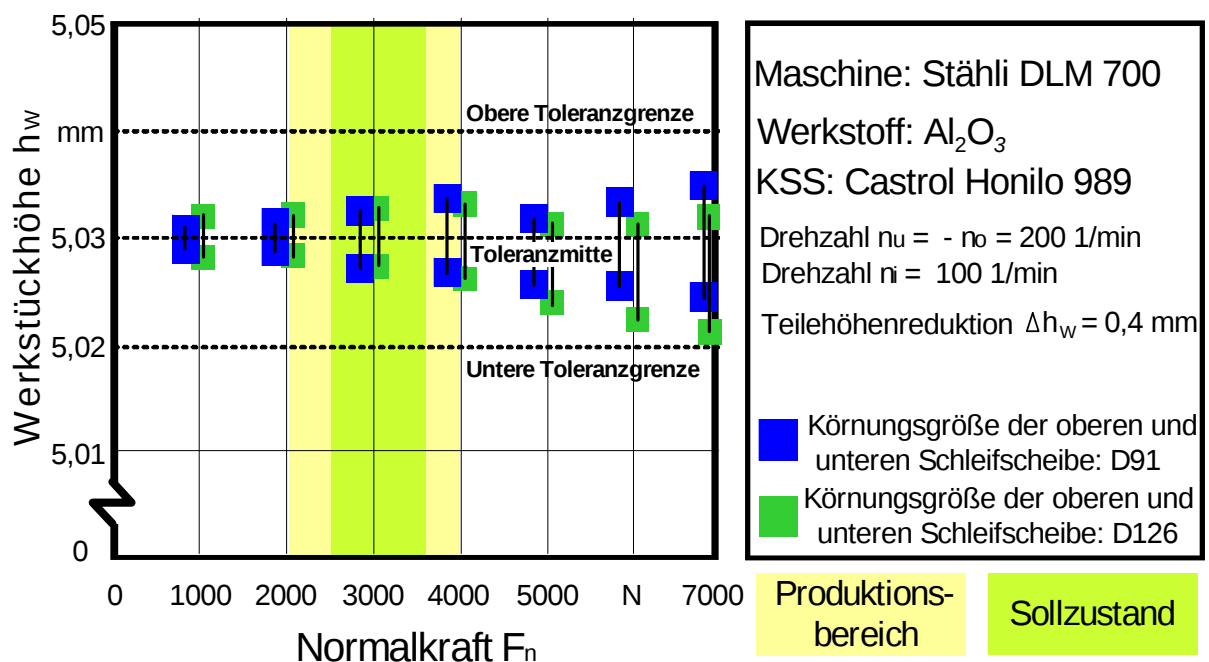


Bild 6.7: Einfluss der Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n auf die Werkstückhöhe des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens mit Planetenkinematik

Im **Bild 6.7** ist die Toleranzmitte bei 5,03 mm, sowie die obere und die untere Toleranzgrenze der geforderten Werkstückhöhe h_w eingetragen.

Bei Betrachtung der Datenreihe für die Schleifscheibe D91 ist deutlich zu sehen, dass bei geringen Kräften die Streuung um den Mittelwert der Werkstückhöhe sehr gering ist. Mit zunehmenden Normalkräften im Bereich von 3000 N bis 4000 N, den in der Produktion hauptsächlich eingesetzt, erhöht sich die Streuung der Werte bis zu einer Abweichung von 9 μm . Ab einer Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n von 5000 N vergrößert sich die Standardabweichung. Ein ähnlicher Verlauf ist mit etwas höheren Standardabweichungen bei der Schleifscheibenkombination D126 zu finden. Anhand dieser Erkenntnisse sollten die Werkstücke mit einer maximalen Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n von 1000 N geschliffen werden, dies geht jedoch mit einer deutlich längeren Schleifzeit einher. In Abwägung der Toleranzfelder und der Produktivität wird heute in erster Stufe mit einer Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n von 3000 N und in zweiter Stufe, die letzten 50 μm der Werkstückhöhe vor Erreichen der Toleranzmitte, mit einer Schleifnormalkraft in axialer Richtung $F_n = 1000$ N gearbeitet, um die bestmöglichen Ergebnisse zu erreichen.

Die Untersuchungen des Drehzahleinflusses bei konstanter Schleifnormalkraft in axialer Richtung $F_n = 3000$ N zeigt **Bild 6.8**. Deutlich ist zu erkennen, dass mit abnehmender Schnittgeschwindigkeit v_c die benötigte Toleranz zum Herstellen der Werkstückhöhe größer wird. Die Schleifscheibenkombination D91 hat ein Minimum bei einer Drehzahl n von 200 min^{-1} . Ähnlich verhält sich auch die Schleifscheibenkombination D126. Einzig bei der Drehzahl n von 250 min^{-1} schleift diese Kombination unter die gewünschte Werkstückhöhe, jedoch bei unveränderter Streuung des Prozesses.

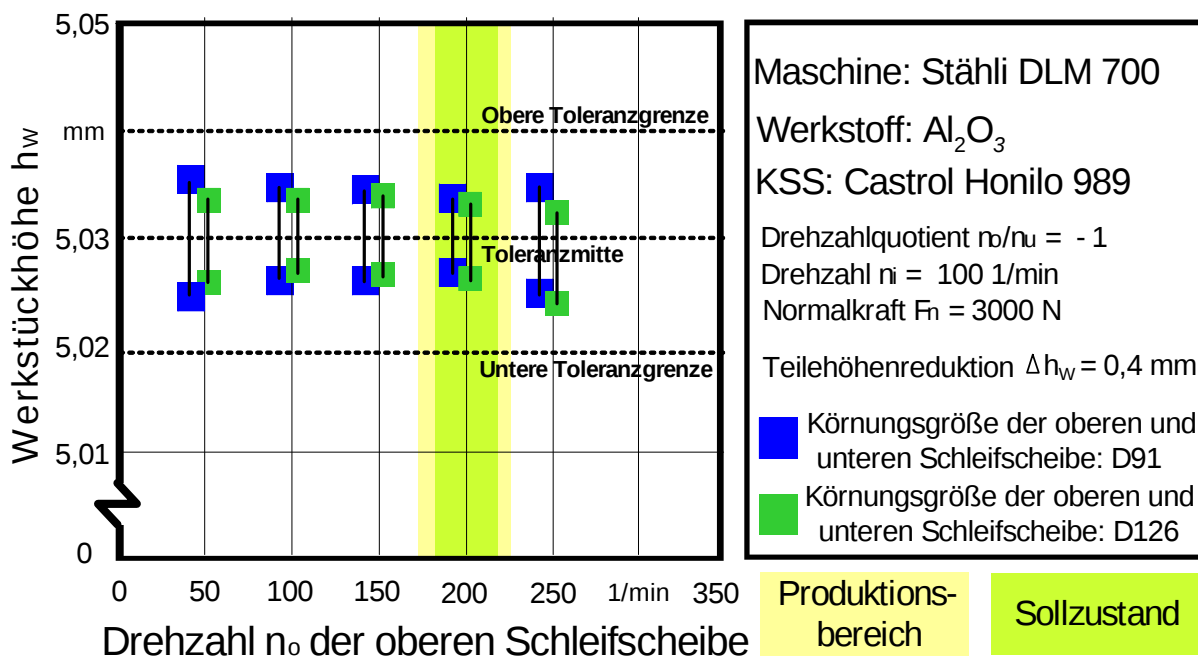


Bild 6.8: Einfluss der Drehzahlen auf die Werkstückhöhe des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens mit Planetenkinematik

6.2.2 Oberflächenqualität

Mit zunehmender Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n nimmt, wie in **Bild 6.9** dargestellt, die Rautiefe R_t zu. Die Schleifscheibenkombination D126 schleift aufgrund der größeren Körnungsgröße etwas rauer.

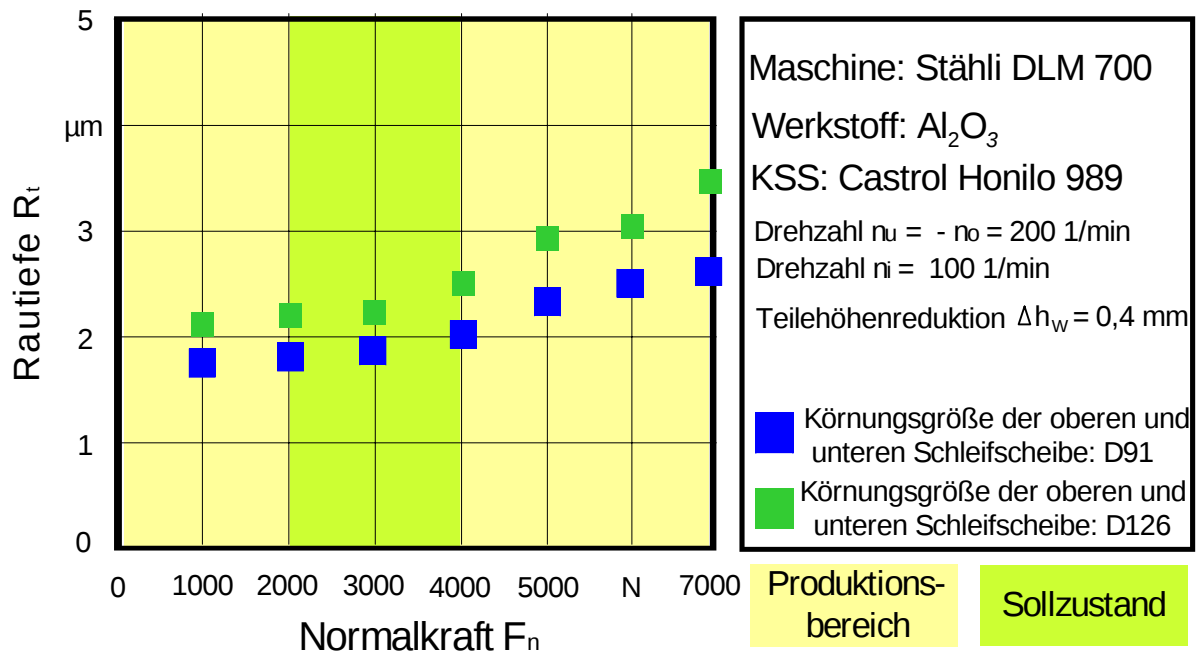


Bild 6.9: Rautiefe R_t in Abhängigkeit der Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens mit Planetenkinematik

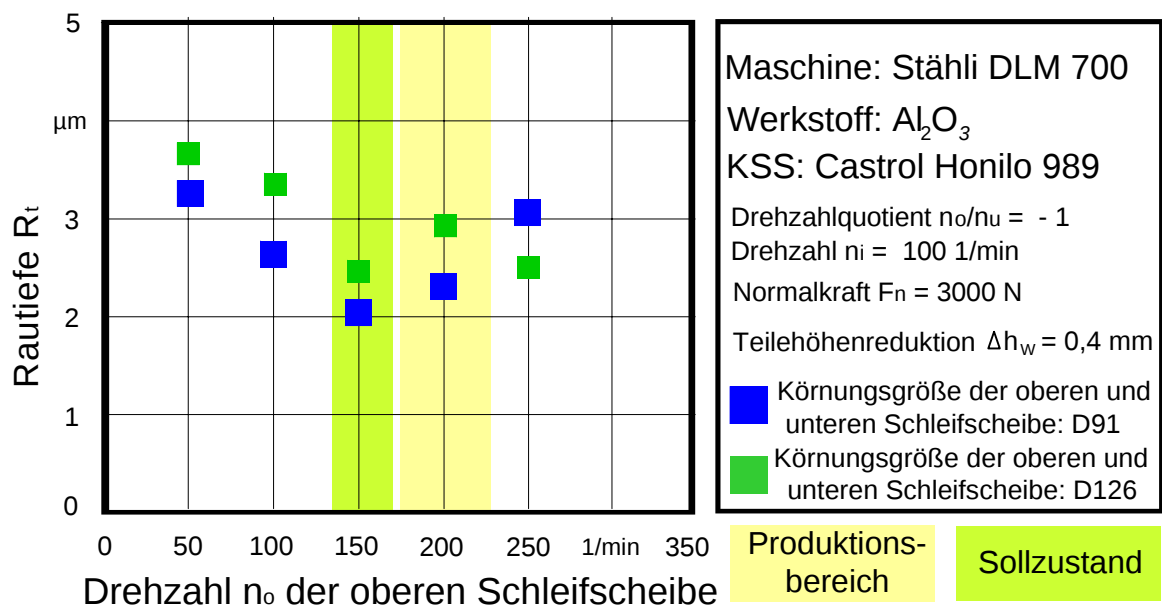


Bild 6.10: Rautiefe R_t in Abhängigkeit der Drehzahlen des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens mit Planetenkinematik

Dies Ergebnis entspricht auch den Untersuchungen nach FRIMUTH, TIO und INASAKI, denen zufolge durch die Reduzierung der Prozesskräfte eine Verbesserung der Werkstückrauheit zu erreichen ist [Fri99; Tio90; Ina96].

Die Analyse des Prozesses bei der gewählten Schleifnormalkraft in axialer Richtung $F_n = 3000 \text{ N}$ ergibt den im **Bild 6.10** dargestellten Verlauf der Rautiefe R_t in Abhängigkeit von der Drehzahl der oberen Schleifscheibe.

Je höher die Schnittgeschwindigkeit v_c ist, desto niedriger wird die Rautiefe R_t . Insgesamt besitzt die Rautiefe R_t bei beiden Schleifscheiben ein Minimum im Verlauf bei einer Drehzahl von 150 min^{-1} . Hier liegen die Werte der Schleifscheibe D91 bei knapp $2 \mu\text{m}$ und bei der Schleifscheibe D126 bei $2,4 \mu\text{m}$.

Das Minimum der Rautiefe R_t ist ausschlaggebend für die Produktionsstandardeinstellung der Drehzahl n bei 150 min^{-1} . Aufgrund des stärkeren Einflusses der Ebenheit auf die Gesamtkosten der Prozesskette bleibt jedoch die Standardeinstellung der Drehzahl n bei 200 min^{-1} .

6.3 Ökonomische Bewertung

6.3.1 Zeitspanungsvolumen

Die Betrachtung des bezogenen Zeitspanungsvolumens Q_w'' in **Tabelle 6.3** zeigt auch den technisch sinnvoll nutzbaren Bereich auf. Die Temperatur der Werkstücke ist stark vom Zeitspanungsvolumen abhängig. Beim Quer-Seiten-Doppelplanschleifen mit Planetenkinematik ist ein Schleifergebnis ohne Thermoschockkrisse oder eine Zerstörung von Werkstücken nur für Zeitspanungsvolumina kleiner $0,001 \text{ mm}^3 \text{ s}^{-1} \text{ mm}^{-2}$ möglich. Die fehlende Schleifscheibenkühlung ist die Hauptursache für zu hohe Werkstücktemperaturen bei größeren Zeitspanungsvolumina. Nur mit gekühltem Schleiföl kann Einfluss auf die entstehenden Temperaturen im Schleifspalt genommen werden.

6.3.2 Bezogene Werkzeugkosten

Die auf das Werkstück bezogenen Werkzeugkosten wurden aus dem mittleren Verschleiß der gesamten Schleifscheibe ermittelt und in **Tabelle 6.4** dargestellt. Unter Berücksichtigung von **Tabelle 4.5** enthalten die Schleifscheiben der Körnung D91 Konzentration C75 im Belagvolumen knapp 0,68 Milliarden Diamantkörner. Die Standzeit der Schleifscheibe beträgt 6,3 Millionen Werkstücke. Es ergibt sich hierbei eine mittlere Standzeit der Schleifscheiben über 8,8 Millionen Werkstücke. Die längste Standzeit besitzt die Körnung D126 mit 14 Millionen Stück. Dies ergibt für die Schleifscheibe mit Körnung D91 einen mittleren Verbrauch von etwa 78 Diamanten, für die Körnungsgröße D126 von 18 Diamanten je geschliffenes Werkstück.

Tabelle 6.3: Maximales Zeitspannungsvolumen in Abhängigkeit des Werkstückdurchmessers für $\Delta h = 0,4 \text{ mm}$

Durchmesser D_W [mm] Werkstückfläche A_{Wges} [mm ²]		Vollflächige runde Teile je Ladung					
		35 Ø 55	40 Ø 50	60 Ø 40	95 Ø 30	195 Ø 20	250 Ø 15
		83112	78500	75360	67118	61230	44156
Schleifnormalkraft F_n [N]	1000	0,000653	0,000617	0,000592	0,000528	0,000481	0,000347
	2000	0,000759	0,000716	0,000688	0,000613	0,000559	0,000403
	3000	0,000834	0,000788	0,000756	0,000673	0,000614	0,000443
	4000	0,000904	0,000854	0,000820	0,000730	0,000666	0,000481
	5000	0,000956	0,000903	0,000867	0,000772	0,000704	0,000508
	6000	0,001014	0,000957	0,000919	0,000819	0,000747	0,000539
	7000	0,001079	0,001019	0,000978	0,000871	0,000795	0,000573
	8000	0,001120	0,001058	0,001015	0,000904	0,000825	0,000595
	9000	0,001153	0,001089	0,001045	0,000931	0,000849	0,000612
	10000	0,001200	0,001133	0,001088	0,000969	0,000884	0,000637
Produktionsbereich		bezogenes Zeitspannungsvolumen Q_w'' [mm ³ s ⁻¹ mm ⁻²]					

mit $A_S = 282740 \text{ mm}^2$, $v_c =$ und $\Delta h = 0,4 \text{ mm}$.

Tabelle 6.4: Bezogene Werkzeugkosten Diamanten je Werkstück des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens mit Planetenkinematik

		Konzentration	Körnung je mm ³	Anzahl Diamanten	Anzahl Werkstücke	Diamanten je Werkstück
Schleifscheibe	D46 # 1	75	3721	5.260.377.700	6.322.569	832
	D91 # 1				8.831.035	77
	D91 # 2	75	481	679.989.700	8.095.115	84
	D91 # 3				9.444.301	72
	D126 # 1	75	181	255.879.700	14.215.538	18

6.3.3 Schleifverhältnis G

Das Schleifverhältnis G kann unter Produktionsbedingungen aus dem gesamten zerspannten Volumen aller Werkstücke zu dem Volumen beider verschlissenen Schleifscheiben berechnet werden. Hierbei wurde das gesamte Werkstückvolumen über die Produktvielfalt mit $V_W = 153 \text{ mm}^3$ gemittelt.

Tabelle 6.5 stellt die Schleifverhältnisse G für die laufende Produktion dar. Das Schleifscheibenpaar der Spezifikation D46 C75 weist ein Schleifverhältnis von $G = 342$ auf. Die Paare der Spezifikation D91 C75 erreichen mit $G = 475$ einen höheren Wert. Deutlich ergiebiger zeigt sich mit einem Wert von 770 das Scheibenpaar der Körnungsgröße D126

C75. Insgesamt zeichnet sich das Verfahren mit für Planbearbeitungen hervorragenden Schleifverhältnissen G aus.

Tabelle 6.5: Schleifverhältnis G des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens mit Planetenkinematik

		Konzentration	Anzahl Werkstücke	Werkstückvolumen V_{Wges} [mm ³]	Schleifscheibenvolumen V_{Sges} [mm ³]	Schleifverhältnis G
Schleifscheibe	D46 # 1	75	6.322.569	9.673.553.057	2.826.000	342
	D91 # 1	75	8.831.035	1.351.148.355		478
	D91 # 2		8.095.115	1.238.552.595		438
	D91 # 3		9.444.301	1.444.978.053		511
	D126 # 1	75	14.215.538	2.174.977.314		770

6.3.4 Produktivität

Tabelle 6.6 zeigt die Produktivität in Werkstücke je Stunde in Abhängigkeit des Werkstückdurchmessers d_W .

Tabelle 6.6: Werkstücke je Stunde in Abhängigkeit des Werkstückdurchmessers für $\Delta h = 0,4$ mm des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens mit Planetenkinematik

		Vollflächige runde Teile je Ladung					
		35 Ø 55	40 Ø 50	55 Ø 40	115 Ø 30	235 Ø 20	325 Ø 15
Schleifnormalkraft F_n [N]	1000	560	640	960	1520	3120	4000
	2000	650	743	1115	1765	3623	4645
	3000	715	817	1277	1940	3983	5106
	4000	775	886	1329	2105	4320	5538
	5000	820	937	1405	2224	4566	5854
	6000	869	993	1490	2359	4841	6207
	7000	925	1057	1585	2510	5152	6606
	8000	960	1097	1646	2606	5349	6857
	9000	988	1129	1694	2682	5506	7059
	10000	1029	1176	1763	2792	5731	7347
Produktionsbereich		Leistung [Stück je Stunde]					

mit $A_S = 282.740$ mm² und $\Delta h = 0,4$ mm.

Eine Dauerleistung mit einer Schleifnormalkraft in axialer Richtung $F_n = 5000$ N kann aufgrund der ungenügenden Schleifscheibenkühlung nicht erreicht werden. Es entstehen konstante Temperaturen über 60°C auf dem Scheibenbelag und den Werkstücken.

Die Kostenrecherche wird mit einem Werkstückdurchmesser von $d_w = 40$ mm und einem Aufmaß von $\Delta h = 0,4$ mm durchgeführt. Bei einer Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n von 3000 N werden 1277 Werkstücke je Stunde geschliffen.

6.3.5 Fertigungskosten je Stück

Kostenrecherche nach Betriebsabrechnung

Die Kostenrecherche wird nach dem gleichen Prinzip durchgeführt wie in **Kapitel 5.4.5**. Die Anschaffungskosten der Maschine liegen bei 385.000,00 € inklusive Vollautomation. Bei allen verglichenen Verfahren wird die gleiche Kühlmittelaufbereitung eingesetzt, die mit 35.000,00 € zu Buche schlägt. Die Raumkosten K_R betragen 3.000,00 € jährlich. **Tabelle 6.7** zeigt die kalkulatorische Abschreibung K_A , die kalkulatorische Zinsen K_Z sowie die Instandhaltungskosten K_I .

Tabelle 6.7: Kapital-, Instandhaltungs- und Raumkosten für Maschinen und Zusatzaggregate

	Planschleifen mit Planetenkinematik
Maschine	385.000 €
KSS-Reinigung	35.000 €
	420.000 €
kalkulatorische Abschreibung K_A	38.640 €
kalkulatorische Zinsen K_Z	19.320 €
Instandhaltungskosten K_I	12.600 €
Raumkosten K_R	3.000 €

Die veranlagten Energiekosten liegen bei 3.369,00 € im Jahr, wobei von einer durchschnittlichen Last ausgegangen wird. Den Energiebedarf und die jährlichen Energiekosten der Anlagen zeigt **Tabelle 6.8**.

Tabelle 6.8: Veranschlagter Energiebedarf und Energiekosten

	Planschleifen mit Planetenkinematik
Maschine	19 kW
KSS-Reinigung	8 kW
durchschnittlich 50 % Last	13,5 kW
Energiekosten K_E	3.369 €

Es ergibt sich für das Quer-Seiten-Doppelpfanschleifen mit Planetenkinematik ein Maschinenstundensatz von 36,99 €/h. Die Werkzeugkosten, welche aus einem Satz

Schleifscheiben für 12.000,00 €, Abrichtscheiben für 1000,00 € und etwa 2000 Liter Schleiföl Honilo 989 zu 4.000,00 € bestehen, umgerechnet auf die jährlichen Kosten über die Standzeit der Schleifscheiben ergeben sich zu 5131,00 €. Somit errechnet sich der Maschinenstundensatz K_{MHW} zu 36,99 € + 2,47 €, also 39,46 €.

Der Schleifscheibensatz verschleißt im Mittel über 8,8 Millionen Werkstücke. Hieraus errechnet sich die jährliche Nutzungszeit T_N .

Tabelle 6.9: Abschätzung der Werkzeugkosten und der Stückkosten

	Planschleifen mit Planetenkinematik
Werkstückanzahl je Werkzeug	8.790.000
Bearbeitungszeit je Ladung	177 s
Chargenmenge	55
Chargen je Stunde	20
Teile je Stunde	1277
Teile je Jahr	2.656.160
Maschinenstundensatz K_{MH}	36,99 €/h
Werkzeugkosten je Jahr	5.131,00 €
Werkzeugkosten je 100 Stück	0,19 €
Maschinenstundensatz mit Werkzeugkosten K_{MWH}	39,46€
Stückkosten K_F je 100 Stück	6,48 €

Neben dem Maschinenstundensatz K_{MHW} fließen hier die Lohnkosten K_{Lohn} ein sowie die Restfertigungsgemeinkosten K_X mit 33,00 €, die alle noch nicht erfassten Kosten beinhalten. Durch Multiplikation der je Stunde entstehenden Kosten mit der Maschinenzeit je Werkstück T_E ergeben sich die Stückkosten K_F . Ein Vergleich der Quer-Seiten-Doppelplanschleifverfahren ist in **Kapitel 7.3.2** zu finden.

Unter den in **Tabelle 6.9** angenommenen Daten kostet die Bearbeitung von 100 Werkstücken 6,48 €.

7 RICHTLINIEN FÜR DEN WIRTSCHAFTLICHEN EINSATZ UNTER PRODUKTIONSBEDINGUNGEN

7.1 Fertigungsnahe Kennzahlen zur Prozesssteuerung

7.1.1 Ablauf der Schleifoperation mit Aufteilung des Schleifaufmaßes

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 $\Delta h_{wo} = \Delta h_{wu}$ auszulegen. Bei diesen geometrisch gleichen Verhältnissen sind die Zeitspannungsvolumina sowie die Schnittgeschwindigkeiten v_c an der Werkstückober- und Werkstückunterseite konstant.

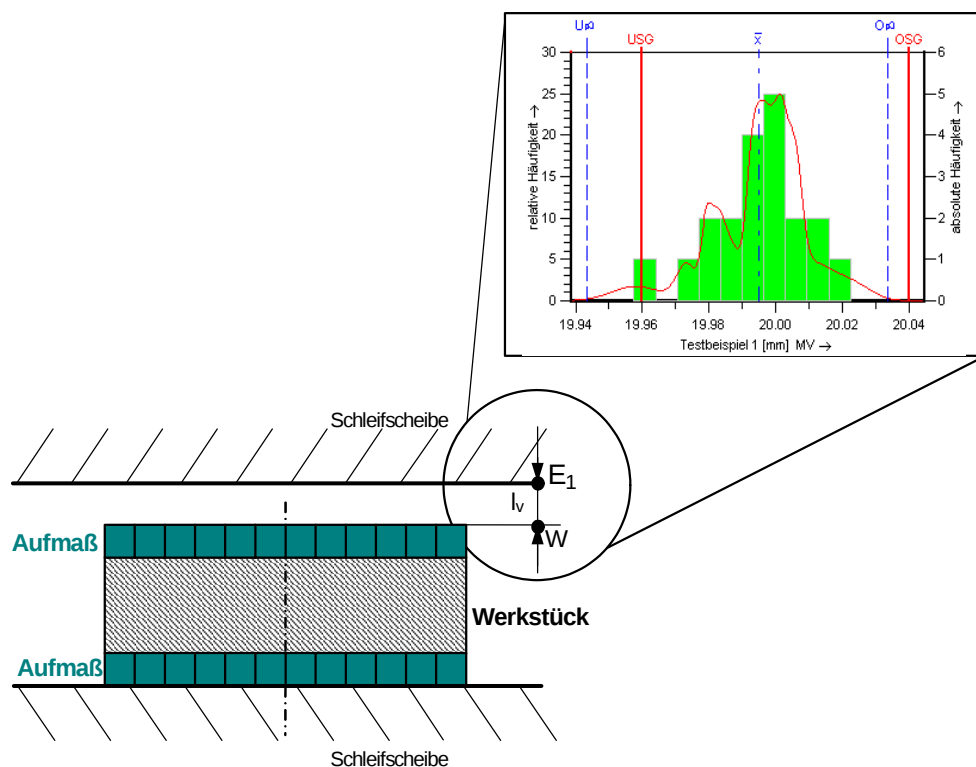


Bild 7.1: Prozessraum der Seiten-Doppelplanschleifverfahren mit eingezeichneter Sicherheitshöhe l_v

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 7.1** 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 Maschinengrundeinstellung 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 Seiten-Doppelpfanschleifverfahren 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 7.2** zeigt einige Auslegungen des Schleifaufmaßes.

7.1.2 Schleifzeiten und Hauptzeiten

Unter Einbeziehung der größtmöglichen Produktivität, das heißt, der entsprechenden Hauptzeiten bei dem Flächenverhältnis 1:2, bedeutet die Erhöhung des Schleifaufmaßes auf $\Delta h_{wo} = 2 \cdot \Delta h_{wu}$, dass nach Bild 7.2 a 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

$$t_c = \frac{(\Delta h_{wo} + \Delta h_{wu})}{v_{fa}} + \frac{l_v}{v_{fa}} = \frac{2 \cdot \Delta h_{wu}}{v_{fa}} + \frac{l_v}{v_{fa}}. \quad (7-1)$$

Flächenverhältnis: 1:2

$$t_c = \frac{3 \cdot \Delta h_{wu}}{v_{fa}} + \frac{l_v}{v_{fa}}. \quad (7-2)$$

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.

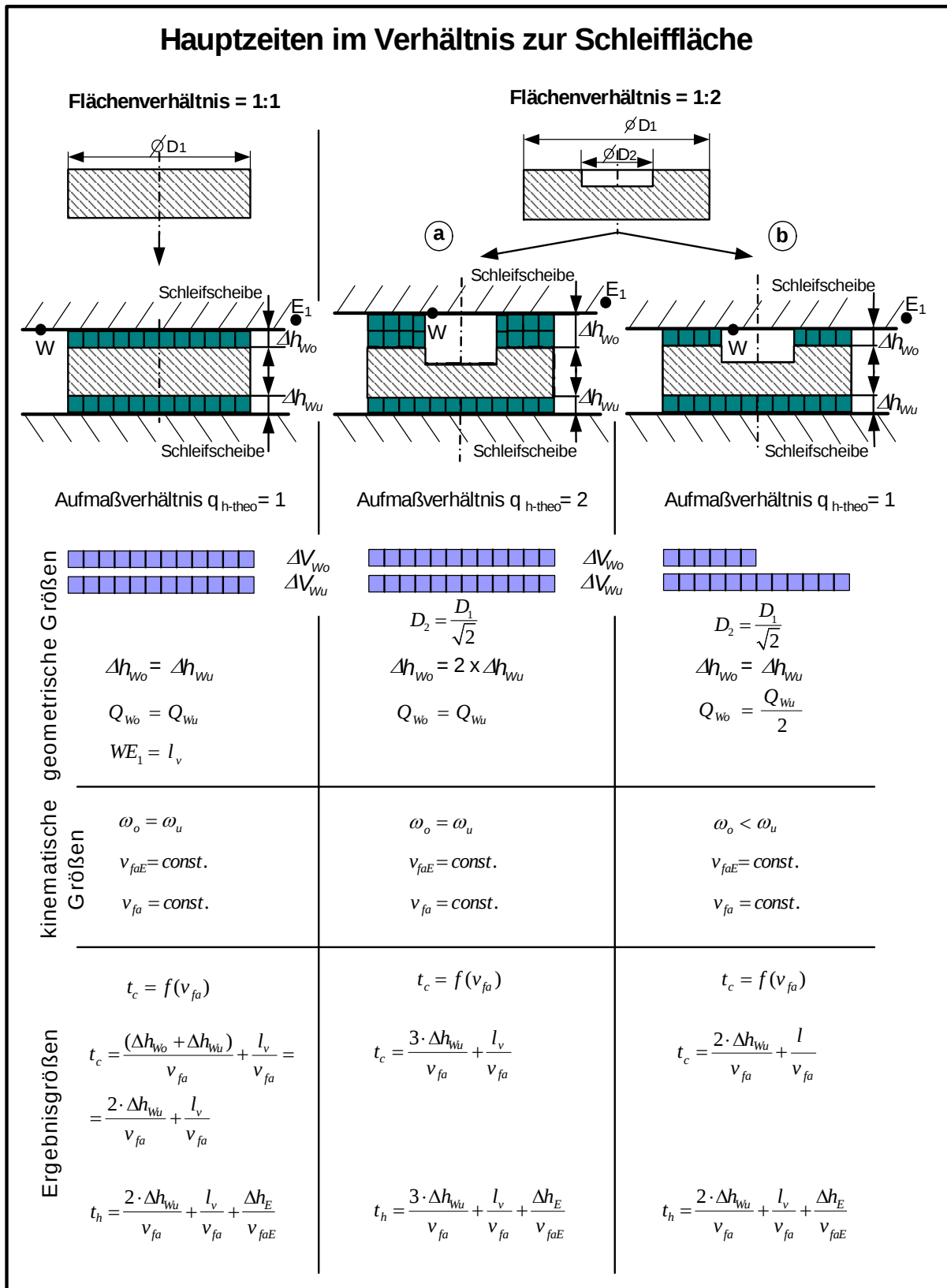


Bild 7.2: Prozesskenngrößen des Quer-Seiten-Doppelschleifens

Bei Maschinen mit stufenlos regelbaren Schleifspindeln setzt an dieser Stelle die mögliche Optimierung der Hauptzeiten ein, indem das Schleifaufmaß auf das minimal notwendige

$\Delta h_{w_o} = \Delta h_{w_u}$ reduziert wird. Es gilt, wie in Bild 7.2 b gezeigt, die Reduzierung des Zerspanungsvolumens auf der Werkstückoberseite zu

$$\Delta V_{w_o} = \frac{\Delta V_{w_u}}{2}. \quad (7-3)$$

oder wiederum zu: $\Delta h_{w_o} = \Delta h_{w_u}$. Somit errechnet sich die Hauptzeit nach Einstellen eines Drehzahlverhältnisses von $\omega_o < \omega_u$ wieder nach (7-1).

7.2 Prozessführungsstrategie

7.2.1 Prozesskette Quer-Seiten-Doppelplanschleifen und Polieren

Beim nachfolgenden Produktionsschritt Polieren handelt es sich um die Bearbeitung der geschliffenen Werkstückoberseite auf einen maximalen Ebenheitsfehler f_E von $0,6 \mu\text{m}$, einen Oberflächentraganteil $T_a = 60$ bis 80 Prozent, sowie auf einen Mittenrauwert $R_a = 0,1$ bis $0,3 \mu\text{m}$. Der Vergleich der untersuchten Fertigungsverfahren bezüglich des arithmetischen Mittenrauwertes R_a ist in **Bild 7.3** dargestellt. Die y-Achse zeigt den relativen Anteil von Werkstücken im Intervall.

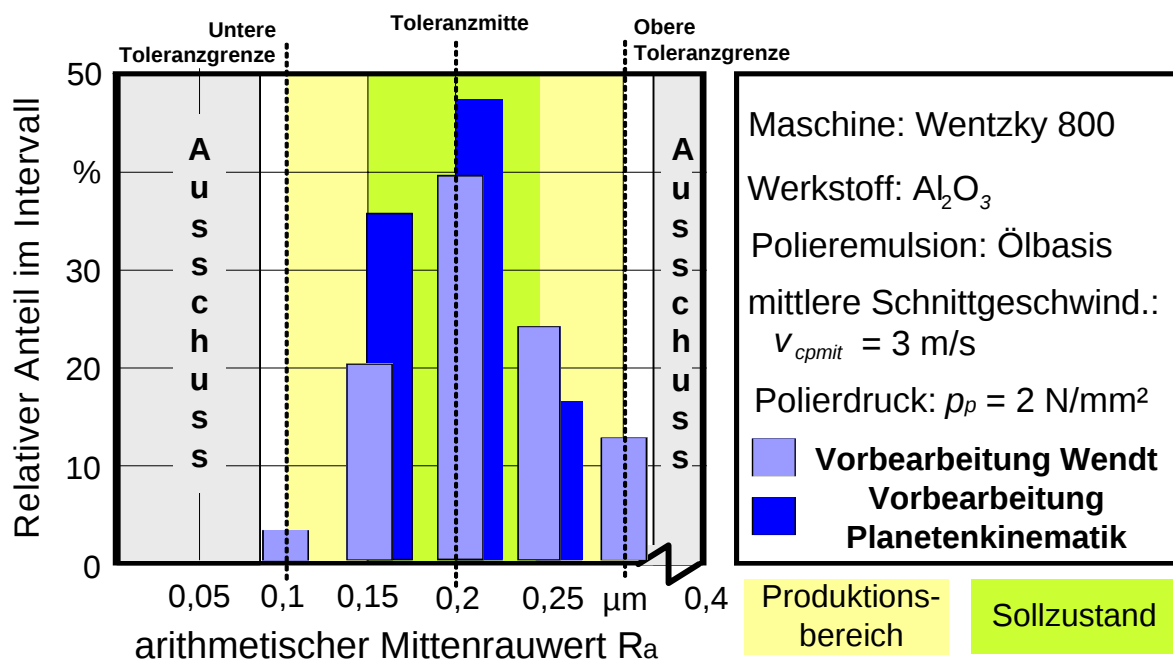


Bild 7.3: Mittenrauwert R_a der polierten keramischen Dichtscheibe

Die polierten Werkstücke besitzen im Rauheitswert R_a nach der Vorproduktion auf Anlagen mit Planetenkinematik eine Streuung zwischen $0,15 \mu\text{m}$ bis $0,25 \mu\text{m}$, während die auf der Wendt WBM 200 geschliffenen Werkstücke die gesamte Toleranzbreite von $0,1 \mu\text{m}$ bis $0,3 \mu\text{m}$ aufweisen.

Die Betrachtung der Qualitätsgröße Oberflächentraganteil T_a ergibt ein vergleichbares Ergebnis, welches in **Bild 7.4** dargestellt ist. Deutlich ist hier die Ausprägung der Vorbearbeitung Planetenkinematik in der Toleranzmitte zu erkennen. Die quer-seiten-doppelplangeschliffenen Werkstücke nach dem “Prinzip Wendt” zeigen eine weitaus breitere Streuung. Eine Unterschreitung der oberen und der unteren Toleranzgrenzen war jedoch nicht festzustellen.

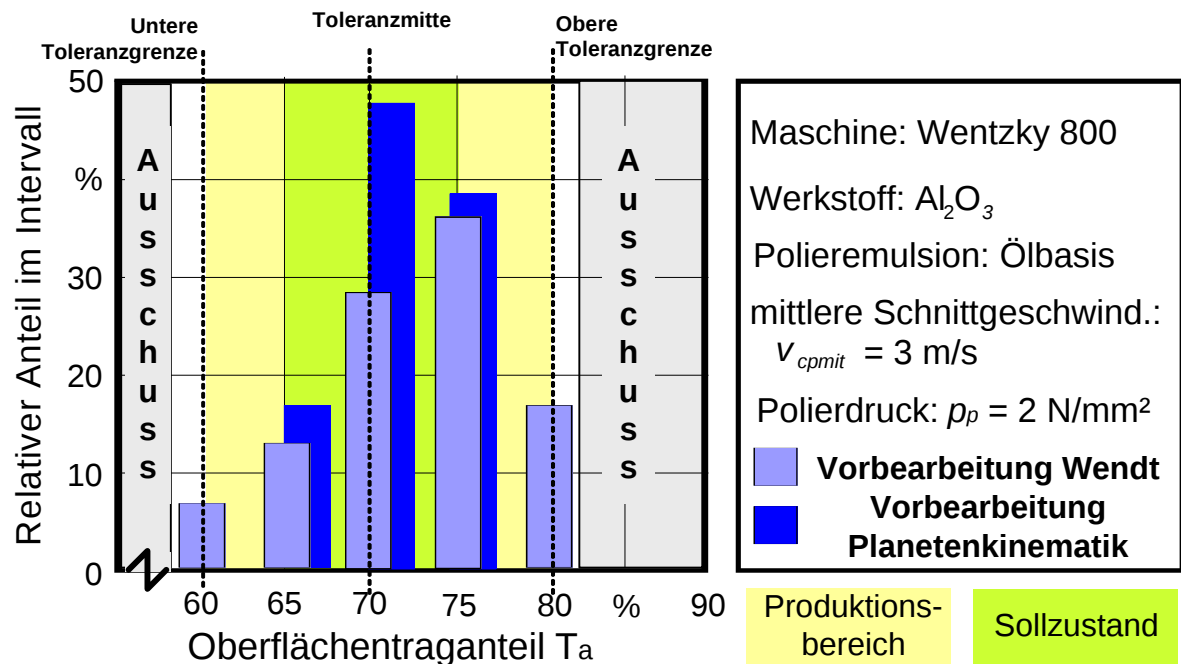


Bild 7.4: Oberflächentraganteil T_a der keramischen Dichtscheibe nach dem Polierprozess

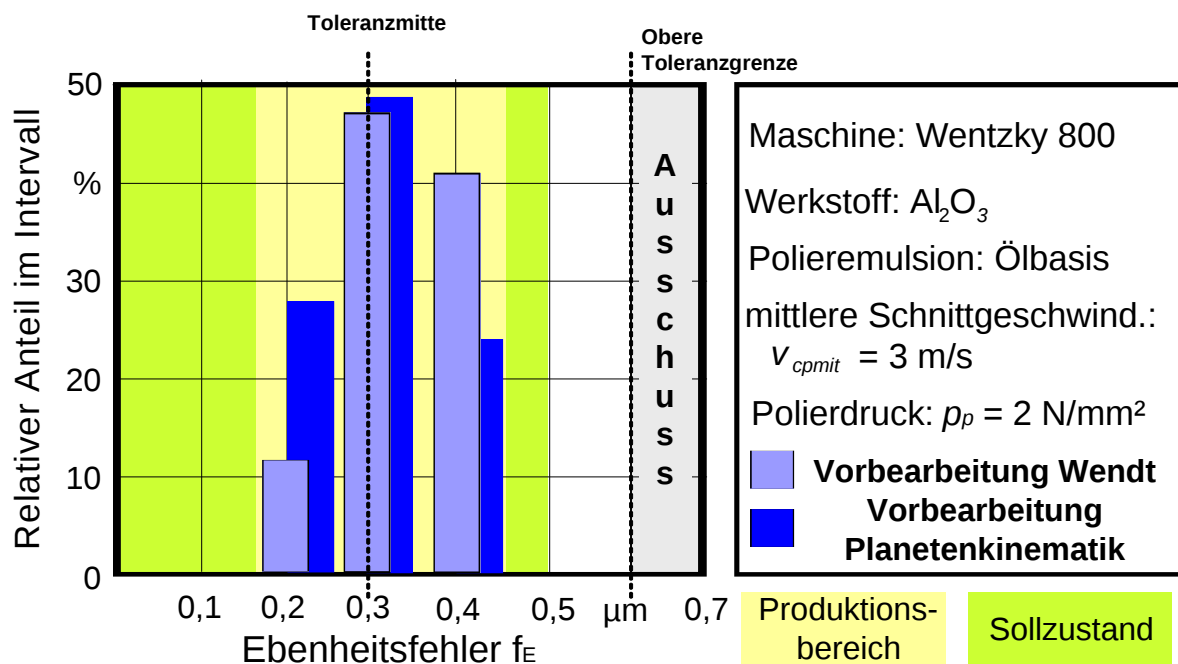


Bild 7.5: Statistische Streuung des Ebenheitsfehlers f_E polierter Werkstücke

Die Analyse des Ebenheitsfehlers f_E ergibt einen nur sehr geringen Vorteil für das Quer-Seiten-Doppelplanschleifen mit Planetenkinematik.

Ein zwischen geschliffenem Ebenheitsfehler f_E und poliertem Ebenheitsfehler f_E unterschiedlicher Einfluss konnte nicht nachgewiesen werden.

7.2.2 Einfluss der Vorbearbeitung auf die Polierzeit

Die kontinuierliche Leistungssteigerung in der Fertigungstechnik führt zum Erreichen der Grenzlagen im Prozess. Das Streben nach Nachhaltigkeit ist ein wesentlicher Bestandteil der Forderung, Prozesse beherrschbar an den Grenzen zu führen.

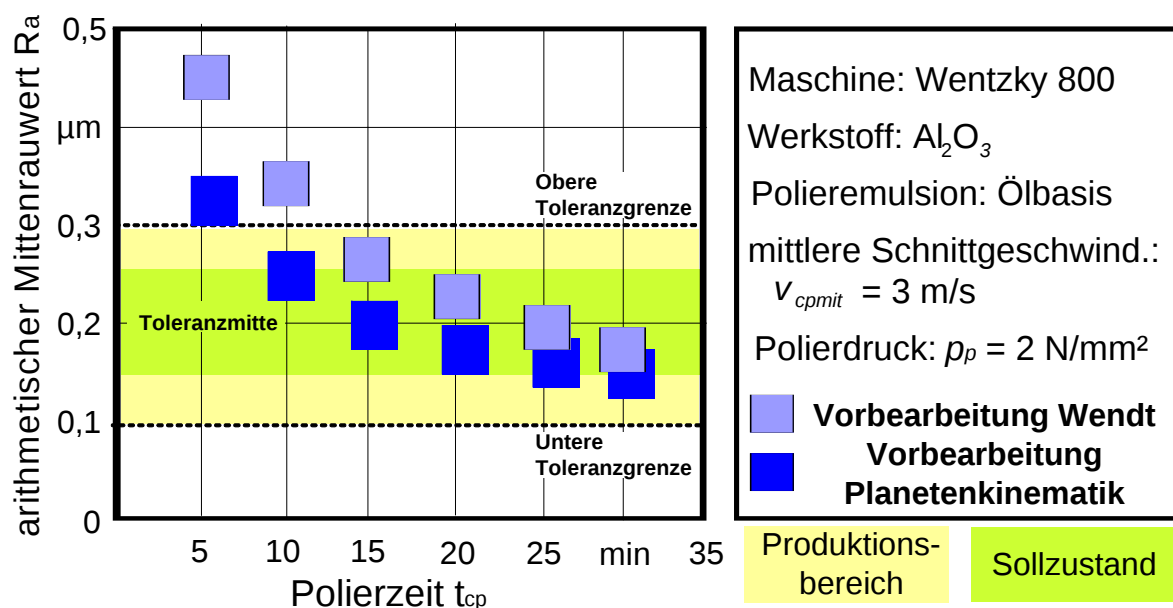
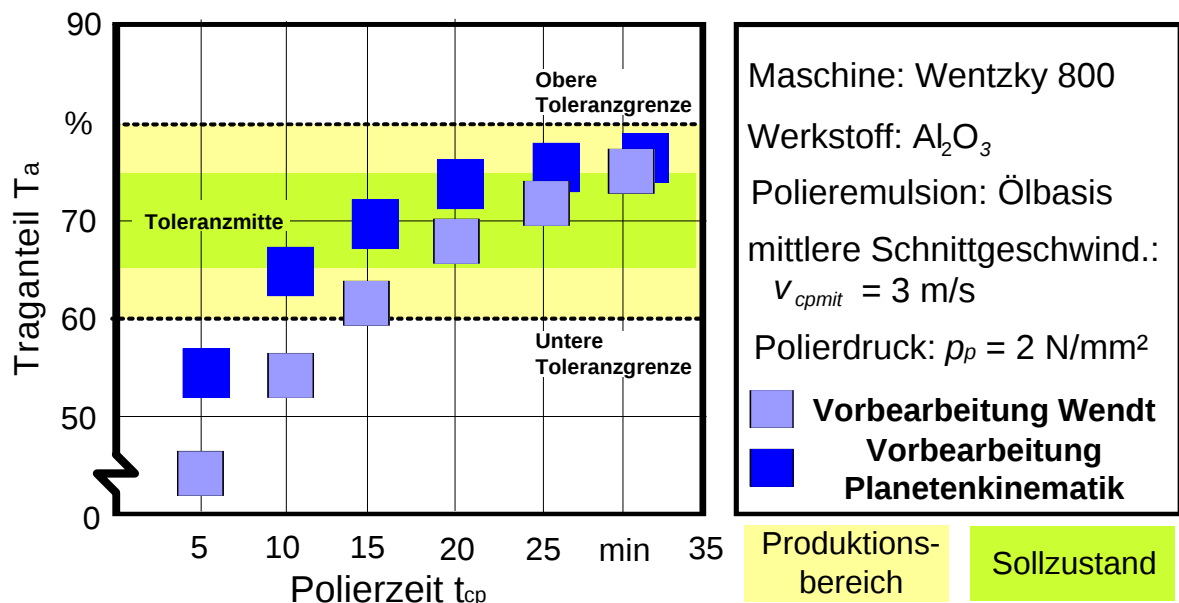


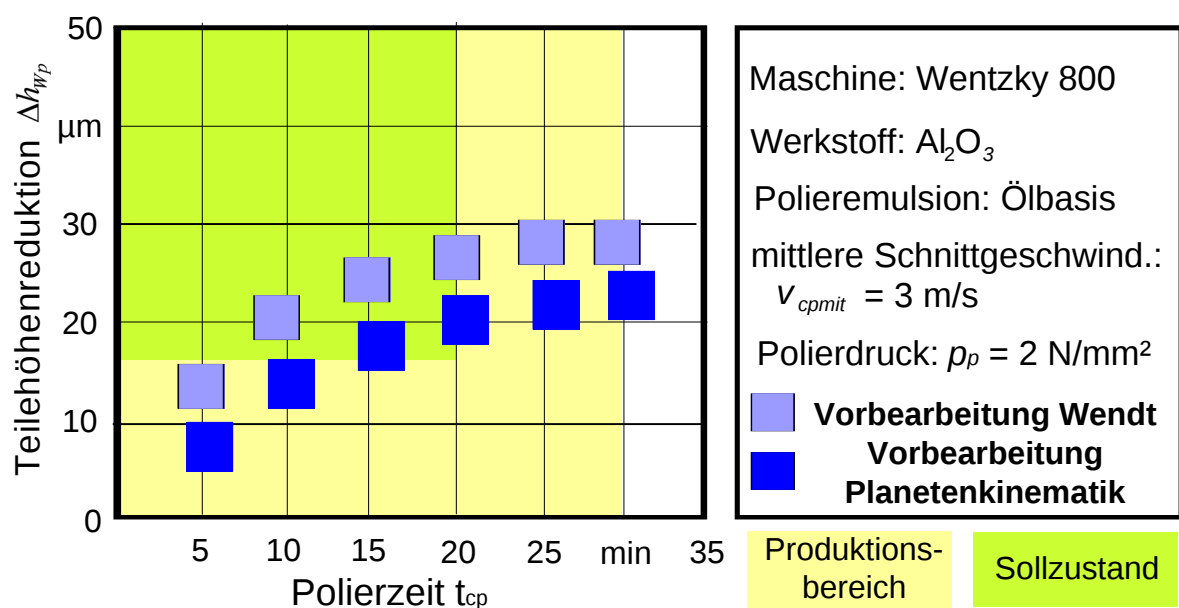
Bild 7.6: Mittenrauwert R_a in Abhängigkeit der Polierzeit

Die technologischen Einflüsse der Prozessketten werden innerhalb der gesamten Produktion übergreifend bewertet. Weiterhin ist das wirtschaftlich günstigste Fertigungsverfahren für den prozesssicheren Großserieneinsatz durch Entwicklung von Prozessführungsstrategien vorzubereiten. Das Bewertungskriterium der optimierten Prozesse ist das prozesssichere Erreichen der Werkstückqualität.

Bild 7.6 zeigt den arithmetischen Mittenrauwert R_a in Abhängigkeit der Polierzeit. Aufgrund der in **Kapitel 6.2** beschriebenen Werkstückqualitäten des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens mit Planetenkinematik wird eine zehnminütige Einsparung der Polierzeit gegenüber dem Quer-Seiten-Doppelplanschleifen „Prinzip Wendt“ erreicht. Die Toleranzmitte wird nach 15 Minuten Polierzeit erreicht, gegenüber 25 Minuten bei der Bearbeitung mit dem Quer-Seiten-Doppelplanschleifen „Prinzip Wendt“.

Bild 7.7: Traganteil T_a in Abhängigkeit der Polierzeit

Der aus der Vorbearbeitung resultierende Ebenheitsfehler f_E sowie die Rautiefe R_t beeinflussen die Polierzeit maßgeblich. **Bild 7.7** zeigt eine deutlich verkürzte Polierzeit für die Bearbeitung mit dem Quer-Seiten-Doppelplanschleifen mit Planetenkinematik. Die Toleranzmitte des Traganteiles T_a von 70 Prozent wird nach 17 Minuten Polierzeit bei der Vorbearbeitung Quer-Seiten-Doppelplanschleifen mit Planetenkinematik und nach 22 Minuten bei der Vorbearbeitung Quer-Seiten-Doppelplanschleifen „Prinzip Wendt“ erreicht.

Bild 7.8: Teilehöhenreduktion Δh_{wp} der unterschiedlichen Vorbearbeitung als Funktion der Polierzeit

Das Zusammenwirken des erreichten geschliffenen Ebenheitsfehlers f_E mit der Teilehöhenreduktion Δh_{wp} bei dem Polieren zeigt **Bild 7.8**. Mit dem Quer-Seiten-Doppelplanschleifen

„Prinzip Wendt“ bearbeitete Werkstücke zerspanen einerseits durch ihren größeren Ebenheitsfehler f_E , andererseits aufgrund der größeren Werkstückhöhenstreuung vieler geschliffener Chargen innerhalb eines Polierringes in den ersten zehn Minuten je Zeiteinheit mehr Volumen. Sobald die unterschiedlichen Werkstückhöhen ausgeglichen sind, nimmt die Steigung der beiden Kurven den gleichen Wert an. Dies bedeutet eine ab Polierbeginn über die tragende Werkstückfläche homogenere Druckverteilung innerhalb eines Polierringes bei der Vorbearbeitung durch das Quer-Seiten-Doppelplanschleifen mit Planetenkinematik.

7.3 Verfahrensvergleich

Eine wichtige Kennzahl für den Vergleich der unterschiedlichen kinematischen Bewegungen der verglichenen Schleifmaschinen ist die Bahnlänge P_W , die das Werkstück über der Schleifscheibe zurücklegt. Unter anderem kann hierdurch der geringere Ebenheitsfehler f_E sowie die bessere Oberflächenqualität des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens mit Planetenkinematik erklärt werden.

Eine für das Quer-Seiten-Doppelplanschleifen „Prinzip Wendt“ typische Einstellung beim Schleifen des Versuchswerkstückes in der Großserie ist in **Tabelle 7.1** bei den Schnittgeschwindigkeiten 10 ms^{-1} bis 20 ms^{-1} farblich unterlegt. Unter diesen Schleifbedingungen legt das Werkstück auf der Schleifscheibe die Bahnform einer archimedischen Spirale mit der Bahnlänge 68 m bis 136 m zurück.

Tabelle 7.1: Berechnete Bahnlänge P_W des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens „Prinzip Wendt“ für 0,5 mm Aufmaß und Belegungsfaktor $B = 12$ Prozent

Schnittgeschwindigkeit $v_{\text{cmax}} [\text{ms}^{-1}]$		5	10	15	20	25
Vorschubgeschwindigkeit $v_{\text{fa}} [\text{mm min}^{-1}]$	1	150	300	450	600	750
	1,3	115	230	230	460	575
	1,7	88	176	264	352	440
	2,2	68	136	204	272	340
	3	50	100	150	200	250
	4,4	34	68	102	136	170
	6	25	50	75	100	125
	8,6	17	34	51	68	85
	12	12	24	36	48	60
	15	10	20	30	40	50
Produktionsbereich		Bahnlänge P_W [m]				

Im Gegensatz hierzu legt das Werkstück beim Quer-Seiten-Doppelplanschleifen mit Planetenkinematik die drei- bis vierfache Wegstrecke zurück. Die damit geringere

Eindringtiefe des Schleifkornes ermöglicht ein schonenderes Schleifen und wirkt sich positiv auf den Ebenheitsfehler f_E und die Oberflächenqualität aus (**Tabelle 7.2**).

Tabelle 7.2: Berechnete Bahnlänge des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens mit Planetenkinematik für 0,5 mm Aufmaß und Belegungsfaktor $B = 12$ Prozent

Drehzahl [min^{-1}]			-250	-200	-150	-100	-50	50	100	150	200	250
Schnittgeschwindigkeit v_{cmit} [ms^{-1}]			6,67	5,43	4,19	2,95	1,73	1,05	2,14	3,36	4,59	5,83
Schleifnormalkraft F_n [N] Schleifzeit t_c [s]	1000	120	800	652	503	354	208	218	257	403	551	652
	2000	95	634	516	398	280	164	173	203	319	436	516
	3000	81	540	440	339	239	140	147	173	272	372	440
	4000	70	467	380	293	207	121	127	150	235	321	380
	5000	63	420	342	264	186	109	114	135	212	289	342
	6000	56	374	304	235	165	97	102	120	188	257	304
	7000	49	327	266	205	145	85	89	105	165	225	266
	8000	45	300	244	189	133	78	82	96	151	207	244
	9000	42	280	228	176	124	73	76	90	141	193	228
	10000	38	253	206	159	112	66	69	81	128	174	206
	F_z [N]	t_c [s]	Bahnlänge P_w [m]									
Produktionsbereich												

Die zeitbezogene Teilehöhenreduktion $\Delta \dot{h}_w$ ermöglicht den Vergleich der Zerspanleistungen der untersuchten Verfahren. **Bild 7.9** verdeutlicht die Unterschiede der zeitbezogenen Teilehöhenreduktion $\Delta \dot{h}_w$. Das Planschleifen "Prinzip Wendt" erreicht die ein- bis zehnfachen Werte mit der gleichen Schleifwerkzeugspezifikation. Das bedeutet, die Zerspanung beim Quer-Seiten-Doppelplanschleifen mit Planetenkinematik hat bisher noch nicht die Möglichkeiten der Schleifscheiben ausgereizt. Mit Einbringen von höheren Normalkräften sollte sich dieses Potenzial noch ausschöpfen lassen.

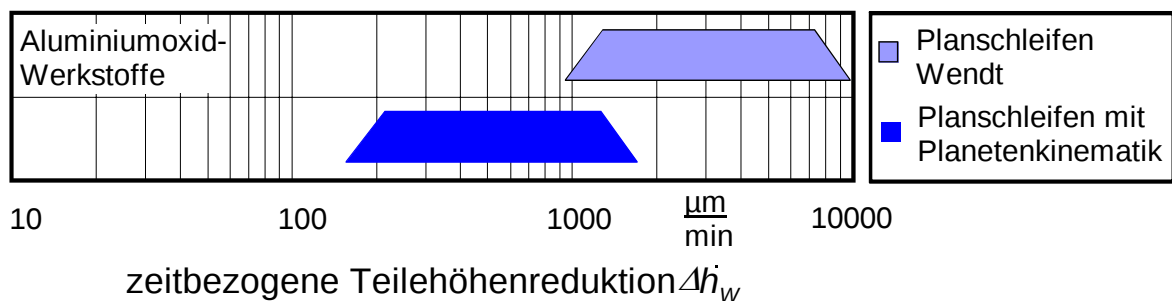


Bild 7.9: Mögliche zeitbezogene Teilehöhenreduktionen unter Produktionsbedingungen

7.3.1 Stückzeiten

Die Reduzierung der Stückzeit ist für das Quer-Seiten-Doppelplanschleifen “Prinzip Wendt” ausschließlich über die Erhöhung der axialen Vorschubgeschwindigkeit v_{fa} zu erreichen. Im Gegensatz dazu ist für das Quer-Seiten-Doppelplanschleifen mit Planetenkinematik der größere Schleifscheibendurchmesser und somit die höhere Beladung mit Werkstücken neben der Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n eine maßgebliche Möglichkeit, die Mengenleistungen zu erhöhen.

Den Vergleich der Bearbeitungszeit je Stück zeigt **Bild 7.10**. Es ergibt sich im Vergleich eine Stückzeit von 2,81 Sekunden mittels Quer-Seiten-Doppelplanschleifen mit Planetenkinematik zu 3,57 Sekunden mit Schleifen “Prinzip Wendt”. Hauptverantwortlich dafür sind die größeren Schleifscheibenflächen sowie das bessere Verhältnis der Beladezeit des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens mit Planetenkinematik von 60 zu 75 Sekunden für dieselbe Anzahl geschliffener Werkstücke.

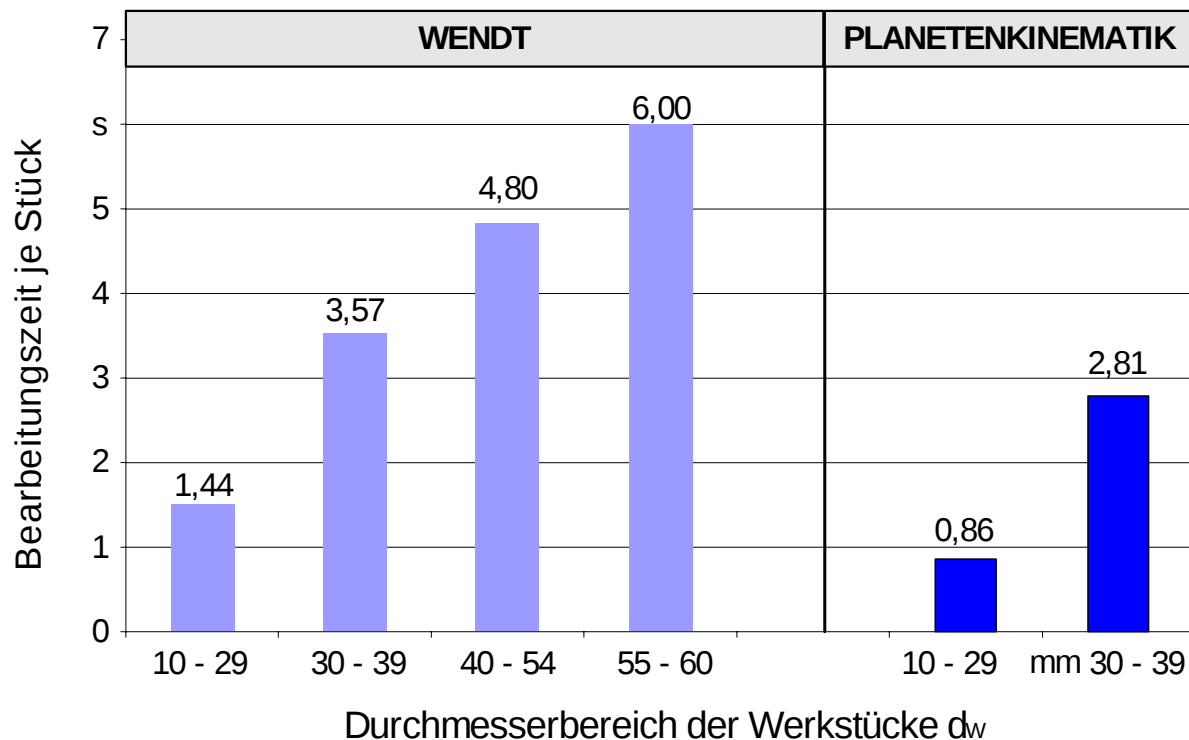


Bild 7.10: Bearbeitungszeit je Stück der untersuchten Quer-Seiten-Doppelplanschleifverfahren

7.3.2 Kostenvergleich der untersuchten Quer-Seiten-Doppelplanschleifverfahren

In den Kapiteln 5.4.5 und 6.3.5 wurden die entstehenden Kosten für die einzelnen Schleifverfahren dargelegt. **Tabelle 7.3** zeigt in der Zusammenfassung, dass bei demselben Artikel durch das Quer-Seiten-Doppelplanschleifen mit Planetenkinematik eine zehnprozentige Ersparnis erreicht werden konnte. Weiterhin wirkt sich das Verfahren kostensenkend auf die nachgeschaltete Feinstbearbeitung Polieren aus.

Tabelle 7.3: Abschätzung der Werkzeugkosten und der Stückkosten

	Wendt Schleifen	Planetenkinematik
Werkstückanzahl je Werkzeug	1.000.000	8.790.000
Bearbeitungszeit je Ladung	10,7 s	177 s
Chargenmenge	3	55
Chargen je Stunde	336	20
Werkstückanzahl je Stunde	1008	1277
Werkstückanzahl je Jahr	2.096.640	2.656.160
Maschinenstundensatz K_{MH}	36,63 €/h	36,99 €/h
Werkzeugkosten je Jahr	7.400,00 €	5.131,00 €
Werkzeugkosten je 100 Stück	0,35 €	0,19 €
Maschinenstundensatz mit Werkzeugkosten K_{MWH}	40,19 €	39,46 €
Stückkosten K_F je 100 Stück	7,25 €	6,48 €

7.3.3 Verbesserung der Qualität

Bei beiden untersuchten Quer-Seiten-Doppelplanschleifmaschinen werden Werkstücke beidseitig bearbeitet. Dabei wird ein Gesamtaufmaß Δh_w abgeschliffen, dessen Aufteilung in eine obere Teilehöhenreduktion Δh_{wo} und eine untere Teilehöhenreduktion Δh_{wu} nicht definiert ist und weiterhin Prozessschwankungen unterliegt. Die Verteilung der Teilehöhenreduktion durch die Zerspanleistung der oberen und der unteren Schleifscheibe kann aufgrund der Nichtmessbarkeit in den Quer-Seiten-Doppelplanschleifmaschinen nicht geregelt, jedoch beeinflusst werden. Aufgrund der vielen unterschiedlichen Eingangsparameter, wie zum Beispiel Schnittgeschwindigkeit v_c , zurückgelegter Schleifweg s , KSS-Strom und Spantransport, ist anzunehmen, dass $\Delta h_{wo} \neq \Delta h_{wu}$ ist. Das Verhältnis wird als Abschleißverhältnis q_w definiert.

Im Folgenden wird eine Vorgehensweise zur Steuerung des Abschleißverhältnisses q_w entwickelt, die auf den Ergebnissen der untersuchten Quer-Seiten-Doppelplanschleifmaschinen aufbaut.

Abschleißverhältnis q_w

Das Abschleißverhältnis q_w kann aufgrund des Kräftegleichgewichtes als Quotient der wegbezogenen Zeitspannungsvolumina Q''_{ws} an der oberen und der unteren Seite des Werkstückes definiert werden. Mit (4.12) folgt:

$$q_w = \frac{Q''_{Wso}}{Q''_{Wsu}} = \frac{\frac{\Delta h_{Wo} \cdot A_{Wo}}{s_o(r_{So}) \cdot A_{So}}}{\frac{\Delta h_{Wu} \cdot A_{Wu}}{s_u(r_{Su}) \cdot A_{Su}}} = \frac{\Delta h_{Wo} \cdot A_{Wo} \cdot s_u(r_{Su})}{\Delta h_{Wu} \cdot A_{Wu} \cdot s_o(r_{So})}. \quad (7-4)$$

Die Teilehöhenreduktion Δh_w kann aus wegbezogener Sichtweise nach

$$\Delta h_w = s(r_s) \cdot \Delta h'_w(r_s) \quad (7-5)$$

als Produkt aus Schleifweg s und wegbezogener Teilehöhenreduktion $\Delta h'_w$ ermittelt werden [Fun94]. Für das konkrete Beispiel Quer-Seiten-Doppelplanschleifen ergibt sich, dass die beiden Werkstücke A und B bei ihrer Bewegung auf unterschiedlichen Wegstrecken $\Delta s_A \neq \Delta s_B$ die gleiche Teilehöhenreduktion Δh_w erfahren. Durch Umstellen der Gleichung (7-5) ergibt sich für die wegbezogene Teilehöhenreduktion $\Delta h'_w$ die Gleichung

$$\Delta h'_w(t, r_s) = \frac{\Delta h_w(t)}{\Delta s(t, r_s)} = \frac{\Delta \dot{h}_w(t)}{v(t, r_s)}, \quad (7-6)$$

nach der die wegbezogene Teilehöhenreduktion $\Delta h'_w$ indirekt proportional vom zurückgelegten Weg beziehungsweise von der Bahngeschwindigkeit v eines Werkstückes abhängt [Ard01]. Zur Ermittlung des Abschleißverhältnisses q_w wird noch die Bahngeschwindigkeit $\vec{v}(t)$ der Werkstücke benötigt, welche über die erste Ableitung der Bahnkurve $\vec{r}(t)$ nach der Zeit berechnet wird.

Allgemein gilt für das Abschleißverhältnis q_w :

$$q_w = \frac{Q''_{Wso}}{Q''_{Wsu}} = \frac{\frac{s_o(r_{So}) \cdot \Delta h'_{Wo}(r_s) \cdot z_w \cdot A_{Wo}}{s_u(r_{Su}) \cdot \Delta h'_{Wu}(r_s) \cdot z_w \cdot A_{Wu}}}{\frac{s_u(r_{Su}) \cdot t_c \cdot A_{Su}}{s_o(r_{So}) \cdot t_c \cdot A_{So}}} = \frac{\frac{\Delta \dot{h}_{Wo}(t_c) \cdot A_{Wo}}{v_{co}(t_c, r_{So}) \cdot A_{So}}}{\frac{\Delta \dot{h}_{Wu}(t_c) \cdot A_{Wu}}{v_{cu}(t_c, r_{Su}) \cdot A_{Su}}} = \frac{\Delta \dot{h}_{Wo}(t_c) \cdot A_{Wo} \cdot v_{cu}(t_c, r_{Su})}{\Delta \dot{h}_{Wu}(t_c) \cdot A_{Wu} \cdot v_{co}(t_c, r_{So})} \quad (7-7)$$

Bahnkurve Quer-Seiten-Doppelplanschleifen “Prinzip Wendt” und Abschleißverhältnis q_w

Das Quer-Seiten-Doppelplanschleifen “Prinzip Wendt” ist gekennzeichnet durch die gleiche Anzahl der Werkstücke z_w und Oszillationshübe i_{osz} sowie die gleiche Bahnform $(r_2^2 - r_1^2)$ im Prozessraum zwischen oberer und unterer Schleifscheibe. Es gilt für den oberen Schleifweg s_o und den unteren Schleifweg s_u :

$$s_o = \frac{\omega_o \cdot (r_2^2 - r_1^2)}{2 \cdot v_{osz}} \quad (7-8)$$

$$s_u = \frac{\omega_u \cdot (r_2^2 - r_1^2)}{2 \cdot v_{osz}} \quad (7-9)$$

mit (7-8) und (7-9) folgt:

$$q_W = \frac{Q''_{So}}{Q''_{Su}} = \frac{\frac{\Delta h_{Wo} \cdot i_{osz} \cdot z_W \cdot A_{Wo}}{s_o \cdot t_c \cdot A_{So}}}{\frac{\Delta h_{Wu} \cdot i_{osz} \cdot z_W \cdot A_{Wu}}{s_u \cdot t_c \cdot A_{Su}}} = \frac{\frac{\Delta h_{Wo} \cdot 2 \cdot v_{osz} \cdot i_{osz} \cdot z_W \cdot A_{Wo}}{\omega_o \cdot (r_2^2 - r_1^2) \cdot t_c \cdot A_{So}}}{\frac{\Delta h_{Wu} \cdot 2 \cdot v_{osz} \cdot i_{osz} \cdot z_W \cdot A_{Wu}}{\omega_u \cdot (r_2^2 - r_1^2) \cdot t_c \cdot A_{Su}}} \quad (7-10)$$

Weiterhin ist auch die Schleifzeit t_c und die Schleifscheibenbelagsfläche $A_{So} = A_{Su}$ gleich. Somit errechnet sich q_W zu:

$$q_W = \frac{\frac{\Delta h_{Wo} \cdot A_{Wo}}{\omega_o \cdot A_{So}}}{\frac{\Delta h_{Wu} \cdot A_{Wu}}{\omega_u \cdot A_{Su}}} = \frac{\Delta h_{Wo} \cdot A_{Wo} \cdot \omega_u}{\Delta h_{Wu} \cdot A_{Wu} \cdot \omega_o} \quad (7-11)$$

Bahnkurve Quer-Seiten-Doppelplanschleifen mit Planetenkinematik und Abschleißverhältnis q_W

Aufgrund der zyklischen Bewegung des Werkstückes im Schleifspalt der Quer-Seiten-Doppelplanschleifmaschinen mit Planetenkinematik ändert sich die Berechnung des allgemein gültigen Abschleißverhältnisses q_W nach **Gleichung (7-7)**.

Der arithmetische Mittelwert aus der minimalen und der maximalen Bahngeschwindigkeit entspricht nicht der mittleren Bahngeschwindigkeit v_{cmit} eines Werkstückpunktes (vgl. 5.1.1). Zur vereinfachten Berechnung des Abschleißverhältnisses q_W ist entsprechend nach SPUR der Ausdruck für die mittlere Schnittgeschwindigkeit v_{cmit} auf der oberen und der unteren Schleifscheibe zu nutzen, da die mathematisch exakte Berechnung zu einem unlösbaren elliptischen Integral zweiter Ordnung führt [Spu97].

$$v_{cmit} = \frac{1}{t_{\Delta Zykl}} \int_0^{t_{\Delta Zykl}} v(t) dt \quad (7-12)$$

somit gilt für das Abschleißverhältnis q_W

$$q_W = \frac{\Delta \dot{h}_{Wo}(t_c) \cdot A_{Wo} \cdot \int_0^{t_c} v_{cmitu}(t) dt}{\Delta \dot{h}_{Wo}(t_c) \cdot A_{Wu} \cdot \int_0^{t_c} v_{cmito}(t) dt} \quad (7-13)$$

Schleifscheibenfläche

In der Verfahrenspraxis werden nur flächengleiche Schleifscheiben ($A_{So} = A_{Su}$) eingesetzt. Bei dem Bearbeiten von Werkstücken mit flächengleicher Ober- und Unterseite ($A_{Wo} = A_{Wu}$) sind aufgrund des Kräftegleichgewichtes im Prozessraum für die gleiche Teilehöhenreduktion

$$\Delta \dot{h}_{wo}(t_c) = \Delta \dot{h}_{wu}(t_c)$$

jeweils gleiche Schnittgeschwindigkeiten v_c

$$\int_0^{t_c} v_{co}(t) dt = \int_0^{t_c} v_{cu}(t) dt$$

für die obere und die untere Schleifscheibe einzustellen. Nach SALJÉ gilt diese theoretische Gesetzmäßigkeit unter Berücksichtigung der gleichen Schleifscheibenspezifikationen, da sich dann der axiale Vorschub f_a je zur Hälfte auf beide Seiten verteilt [Sal92].

Abschliffverhältnis q_W für Quer-Seiten-Doppelplanschleifmaschinen

Somit folgt für die untersuchten Quer-Seiten-Doppelplanschleifmaschinen bei gleicher Werkstückfläche das Abschliffverhältnis q_W :

$$q_W = \frac{\Delta h_{wo}}{\Delta h_{wu}}. \quad (7-14)$$

Reales Abschliffverhältnis

Unter Produktionsbedingungen sind für das qualitative Ergebnis einzig Ebenheitsfehler f_E , Parallelität, Rautiefe R_t und die Genauigkeit der Werkstückhöhe als Kenngrößen notwendig. Die Bestätigungsversuche für das Abschliffverhältnis q_W wurden unter Einsatz von jeweils zwei gleichen Schleifscheiben aus einer Produktionscharge auf beiden Quer-Seiten-Doppelplanschleifmaschinen durchgeführt. Weitere vorab festgelegte Parameter sind die Werkstückflächen A_{wo} und A_{wu} .

Prozessgrößen Wendt:

Schnittgeschwindigkeit v_c und Schleifnormalkraft in axialer Richtung $F_n = f(v_{fa})$ in Abhängigkeit der axialen Vorschubgeschwindigkeit v_{fa}

Prozessgrößen Planetenkinematik:

Schnittgeschwindigkeit v_c und Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n

Die experimentell ermittelten und in Versuchswiederholungen bestätigten Werte der zwei untersuchten Schleifscheibenkörnungen D91 und D126 weichen von $q_W = 1$ ab. Ein Abschliffverhältnis $q_W < 1$ bedeutet, dass auf der Werkstückunterseite mehr als $0,5 \Delta h_{ges}$ abgeschliffen wird. **Bild 7.11** zeigt, dass je nach Schnittgeschwindigkeit das Zeitspannungsvolumen der oberen Schleifscheibe nur zwischen 43 und 47 Prozent der unteren Schleifscheibe beträgt.

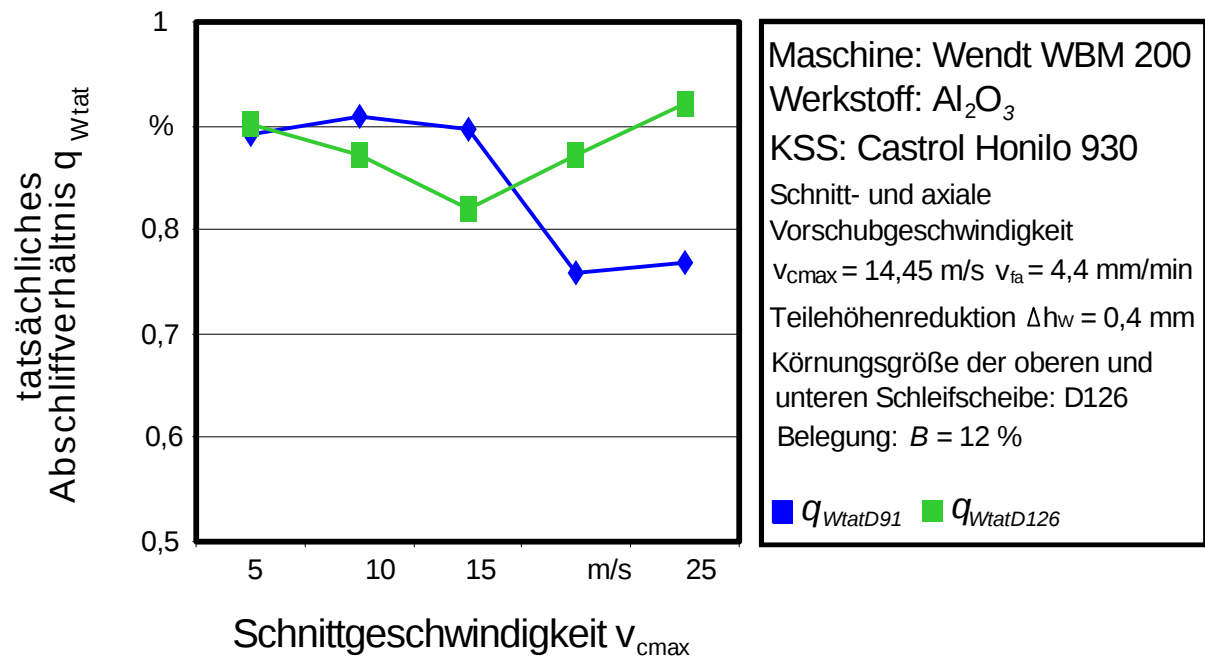


Bild 7.11: Abschleißverhältnis q_{Wtat} in Abhängigkeit von der Schnittgeschwindigkeit $v_{c\max}$ am maximalen Schleifscheibenradius für das Quer-Seiten-Doppelplanschleifen „Prinzip Wendt“

Weiterhin ist ein großer Einfluss der eingesetzten Schleifscheibenkörnung (D91 und D126) sowie der Schnittgeschwindigkeit $v_{c\max}$ zu erkennen. **Tabelle 7.4** zeigt das tatsächliche Abschleißverhältnis q_{Wtat} für unterschiedliche Schleifscheibenkörnungen.

Tabelle 7.4: tatsächliches Abschleißverhältnis q_{Wtat} für unterschiedliche Schleifscheibenpaarungen für das Quer-Seiten-Doppelplanschleifen „Prinzip Wendt“

Schnittgeschwindigkeit v_{cmax} [m/s]		5	10	15	20	25	Abschliffverhältnis q_{wrat}
Schleifscheibe	D46	0,9003	0,8982	0,8899	0,8954	0,9006	
	D64	0,9021	0,9001	0,8992	0,9010	0,9003	
	D91	0,8926	0,9080	0,8961	0,7574	0,7677	
	D126	0,9011	0,8719	0,8208	0,8709	0,9216	
		Abschliffverhältnis q_{wrat} Planschleifen „Prinzip Wendt“					

Ein entsprechendes Verhalten zeigt auch das Quer-Seiten-Doppelplanschleifen mit Planetenkinematik, dargestellt in **Bild 7.12**.

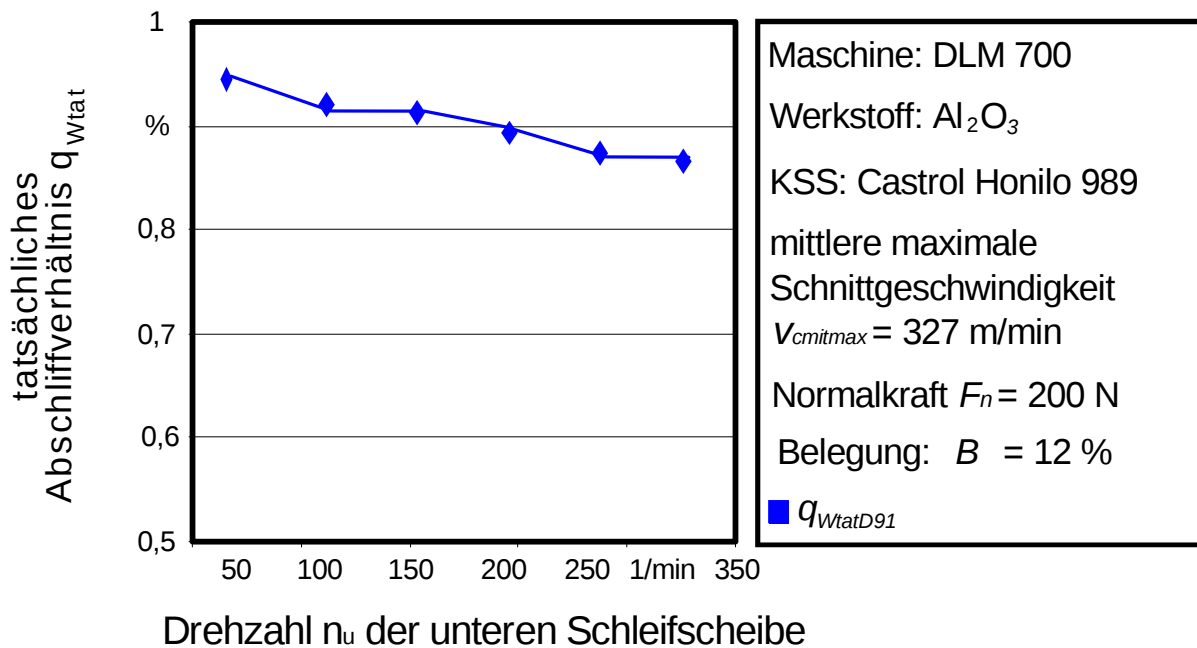


Bild 7.12: Abschleißverhältnis q_w in Abhängigkeit von der Drehzahl n_u der unteren Schleifscheibe für das Quer-Seiten-Doppelplanschleifen mit Planetenkinematik

Das tatsächliche Abschleißverhältnis zieht die Notwendigkeit eines Korrekturfaktors K_S in der allgemein gültigen Gleichung zur Auslegung der Doppelseitenquerplanbearbeitung nach sich.

Daraus folgt für das Abschleißverhältnis ein prozessspezifischer Korrekturfaktor K_S :

$$q_{Wtat} = q_{Wtheor} \cdot K_S \quad (7-15)$$

Der Korrekturfaktor K_S ist unter anderem eine Funktion der Schnittgeschwindigkeiten v_{co} und v_{cu} und eine einfach zu beeinflussende Eingangskenngröße (**Bild 7.11, Bild 7.12**). Damit sind in der Massenproduktion an erster Stelle die Schnittgeschwindigkeiten der oberen und der unteren Schleifscheibe zu variieren. Für die Kinematik des Planetenantriebes kann der Korrekturfaktor K_S aufgrund der von verschiedenen Autoren erkannten linearen Abhängigkeit des Zeitspannungsvolumens von der mittleren Bahngeschwindigkeit bestimmt werden [Fun94; Sab91; Uhl00].

Zur Auslegung aller Quer-Seiten-Doppelplanschleifprozesse beeinflussen, unter Betrachtung aller weiteren funktionalen Zusammenhänge des Abschleißverhältnisses q_w , die in Gleichung (7-7) bestimmten Variablen den Prozess. Mit der Kenntnis der oberen und unteren Werkstückflächen, der gewünschten Teilehöhenreduktion Δh_w sowie der Schleifscheibenflächen A_S ist also jederzeit eine Festlegung der Schleifparameter für unterschiedliche Werkstückspezifikationen möglich. Der Korrekturfaktor K_S muss nur einmalig je Maschine bei unterschiedlichen Drehzahlen bestimmt werden. Unter diesen Voraussetzungen lassen sich die geforderten Werkstückhöhen in der Großserienproduktion innerhalb engerer Toleranzen fertigen.

Aufmaßverhältnis q_h

Der Prozess Quer-Seiten-Doppelplanschleifen ist hinsichtlich der erreichbaren Toleranzen stark abhängig von der Auslegung des Aufmaßverhältnisses

$$q_{htheo} = \frac{\Delta h_{wo}}{\Delta h_{wu}} \quad (7-16)$$

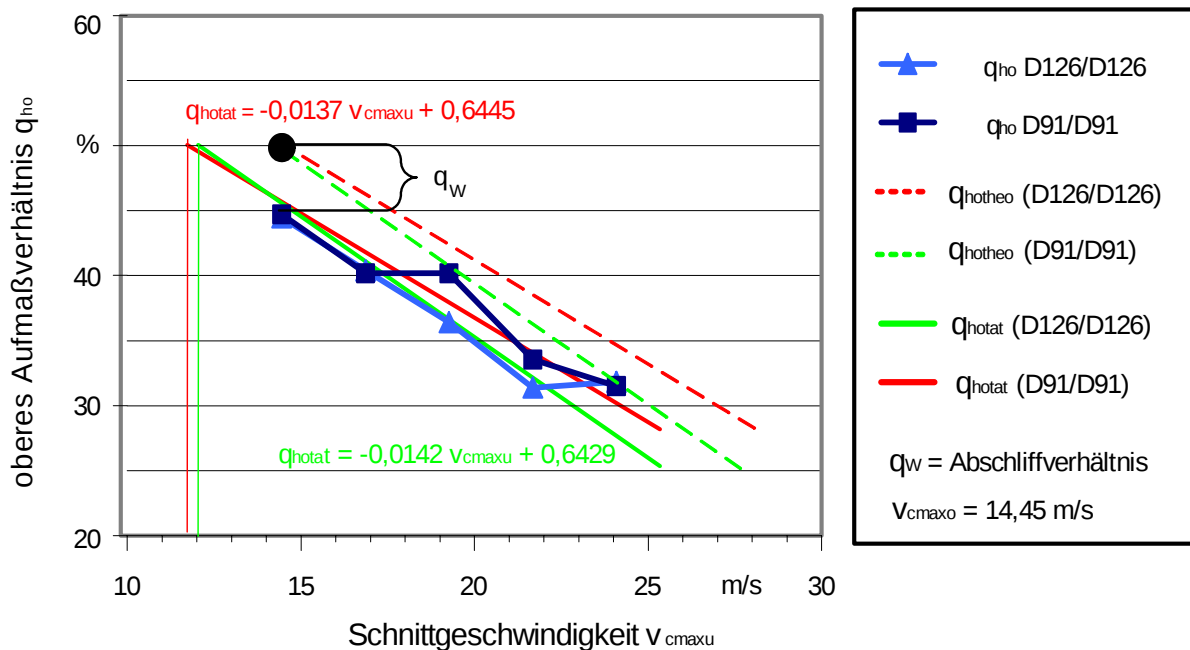


Bild 7.13: Oberes Aufmaßverhältnis q_{ho} in Abhängigkeit der unteren Schnittgeschwindigkeit v_{cmaxu} der Quer-Seiten-Doppelplanschleifmaschine „Prinzip Wendt“

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 7.13** 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.

Einfluss des Abschleißverhältnisses auf die Zeitspannungsvolumina und Toleranzen

Eine weitere wichtige Erkenntnis ist in **Bild 7.13** dem Bereich der Schnittgeschwindigkeit von $v_{cmaxo} = 14,45 \text{ m/s}$ zu entnehmen. Da sich beide Schleifscheiben mit der gleichen Schnittgeschwindigkeit bewegen, sollte hier das Aufmaßverhältnis bei 50,0 Prozent liegen. Am Punkt $v_{cmaxu} = 14,45 \text{ m/s}$ und $q_{hotat} = 50 \%$ ist jetzt wiederum das in Gleichung (7-7) definierte Abschleißverhältnis q_w zu sehen. Aufgrund des unterschiedlichen 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 . Im Prozess Quer-Seiten-Doppelpfanschleifen ist daher die obere Schnittgeschwindigkeit zwingend auf die neue berichtigte Schnittgeschwindigkeit

$$v_{cq_w} = v_c + v_c(1 - q_w) \quad (7-17)$$

zu setzen. Exakt definierte Schleifaufmäße bewirken hier einen produktionsrelevanten Vorteil. Trotz unterschiedlicher Flächenverhältnisse können die Werkstücke unorientiert in Lage dem Schleifspalt zugeführt werden (**Bild 7.14**). Solange die Forderung „Zerspanungsvolumen oben = Zerspanungsvolumen unten“ beachtet wird, werden die Werkstücke innerhalb der benötigten Toleranzen fertigbar.

Die Ergebnisse dieser Optimierung sind in **Bild 7.15** dargestellt. Es wurden jeweils vier Werkstücke innerhalb eines Schleifzyklus bearbeitet. Der Werkstoff Aluminiumoxid wurde bei einer Schnittgeschwindigkeit von 15 m/s unter einem Schleifdruck von 20 N/cm^2 zwischen kunstharzgebundenen Schleifscheiben der Diamantkörnung D91 zerspannt.

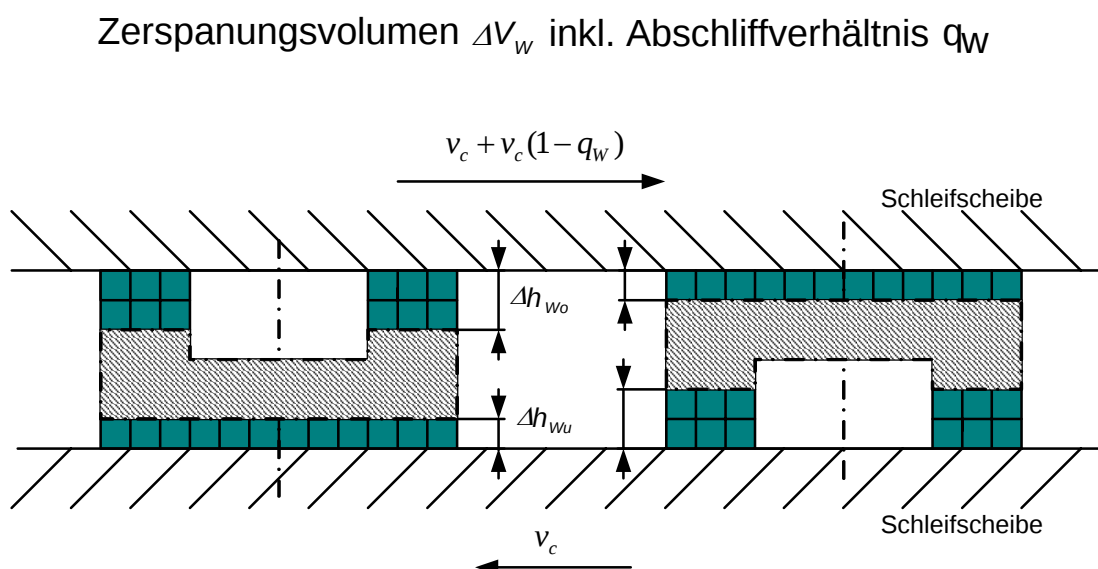


Bild 7.14: Schnittgeschwindigkeitsanpassung um den Betrag des ermittelten Abschleißverhältnisses q_w

Klassisch geschliffene Werkstücke erreichen aufgrund der Vorschubsteuerung zwar das gleiche Endmaß, jedoch mit einem Abschleißunterschied von 5 Prozent zwischen unterer und

oberer Werkstückseite. Das Ergebnis der Werkstücke mit um q_w angepasster Schnittgeschwindigkeit liegt bei genau 50 Prozent. Die Belegung B wurde hierbei bei 12 Prozent festgelegt. Dieser Wert ist das Verhältnis der gesamten Werkstückfläche A_{Wges} zur Schleifscheibenfläche A_s und ein Hinweis auf die Belastung der Schleifscheibe hinsichtlich vorhandenen Abschliffes und der benötigten ausreichenden Kühlschmierstoffmenge.

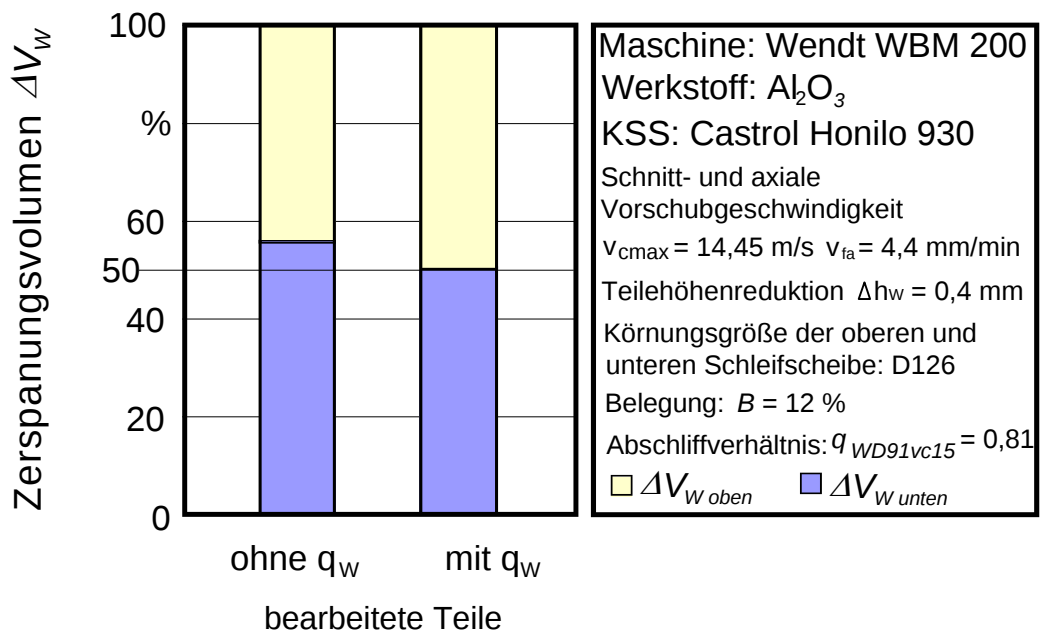


Bild 7.15: Einfluss des Abschleißverhältnisses q_w auf das Zerspanungsvolumen ΔV_w

Potenziale für die Großserienfertigung

Als Vorteil für die industrielle Großserienfertigung werden die geschliffenen Werkstückhöhen je Werkstückseite um eine Zehnerpotenz verbessert. Das Ergebnis ist in **Tabelle 7.5** zusammengefasst.

Tabelle 7.5: Teilehöhenreduktion Δh_w je Werkstückseite für das Quer-Seiten-Doppelplanschleifen „Prinzip Wendt“

Schleifseite	Schleifaufmaß Werkstück	ohne q_w	Abweichung	mit q_w	Abweichung
oben	0,2	0,18	0,02	0,199	0,001
unten	0,2	0,22	0,02	0,201	0,001
Teilehöhenreduktion Δh_w [mm]					

Die gefertigten Werkstücke wurden auf $1 \mu\text{m}$ genau vorsortiert um eine entsprechend prozessfähige Aussage zu erzielen. Mit einem Schleifaufmaß von 0,2 mm je Seite wurden jeweils vier Werkstücke ungerichtet gleichzeitig geschliffen.

Die Grundgesamtheit der analysierten Werkstücke lag bei 1000 Stück. Das Schleifergebnis ohne Abschleißverhältnis q_w ergab die erwarteten Werte der Teilehöhenreduktion Δh_w von 0,18 mm auf der oberen Schleifscheibe und 0,22 mm auf der unteren Schleifscheibe und somit eine Abweichung von jeweils 0,02 mm je Werkstückseite. Unter Anwendung des Korrekturfaktors K_s jedoch war eine Genauigkeit je Seite von 1 μm feststellbar. Die Gesamtstreuung der Werkstückhöhen lag bei 2 μm . Hierbei werden jetzt Prozessfähigkeiten mit Prozessstreuungen bis zu sechs Sigma möglich. Das lagerichtige Zuführen der Werkstücke fällt weg.

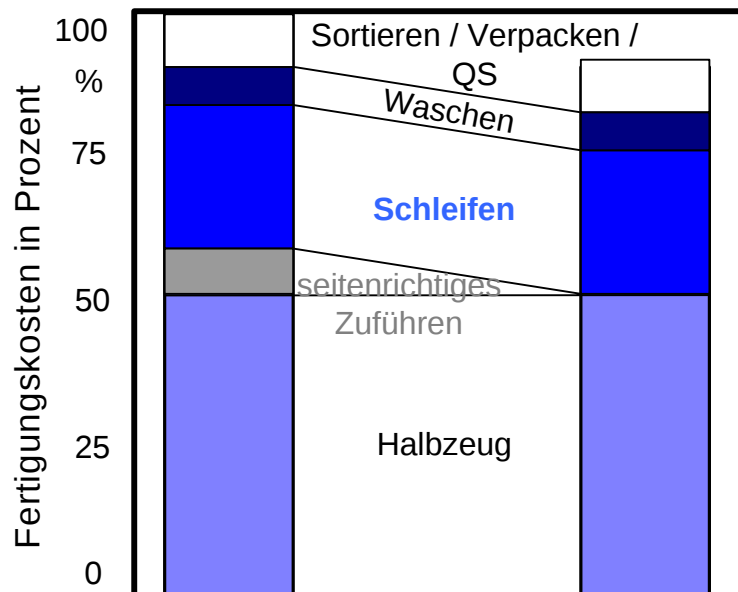


Bild 7.16: Einsparung der Auflegkosten

Die Analyse der Fertigungskosten zeigt eine Kostenersparnis von etwa 10 Prozent durch das Entfallen eines Arbeitsschrittes. Die Einsparungen durch prozesssicheres Einhalten von Werkstücktoleranzen belaufen sich aufgrund der Reduzierung der Prozesszeiten des nachfolgenden Prozessschrittes Polieren auf weitere 15 Prozent der Gesamtkosten.

8 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK AUF WEITERFÜHRENDE UNTERSUCHUNGEN

Diese Arbeit zeigt grundlegende Zusammenhänge zwischen den Eingangskenngrößen und den Arbeitsergebnissen für zwei ausgewählte Doppelseitenquerschleifmaschinen unter Produktionsbedingungen auf. Im Unterschied zu den allgemeinen Ausgangspunkten der schleiftechnologischen Forschung wurde hier das Erzeugen von Werkstücken hoher Qualität in Bezug auf die Prozesskette in den Vordergrund gestellt. Das charakteristische Verfahrensmerkmal der Quer-Seiten-Doppelplanschleifmaschine besteht in dem Vorhandensein der Schnittgeschwindigkeit und einer längs zur Werkstückebene verlaufenden Vorschubgeschwindigkeit $v_{\text{längs}}$. Die Vorschubbewegung besteht somit aus zwei von unterschiedlichen Maschinenelementen ausgeführten Komponenten. Bei Auswahl der geeigneten Eingangskenngrößen ist die Überlagerung der Vorschubbewegungen für die guten Arbeitsergebnisse und die homogene Werkzeugbelastung verantwortlich. Diese Arbeit zielte darauf ab, unter Betrachtung der Vor- oder Endprodukthanforderungen den optimalen Schleifprozess mit maximaler Kosteneffizienz unter Produktionsbedingungen zu finden.

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen wurden großserientechnische Werkstücke aus Aluminiumoxid mittels Diamantschleifscheiben bearbeitet. Abhängig von der eingesetzten Schleifmaschine wurden die Spezifikation der Schleifscheibe, die Schnittgeschwindigkeit, der Schleifdruck, die axiale Vorschubgeschwindigkeit, der Überdeckungsgrad sowie das Kühlschmiermedium variiert.

Analyse und Ergebnisse des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens "Prinzip Wendt"

Die Formgenauigkeit wurde in Bezug auf die Qualität des Vorproduktes analysiert. Auf die Formgenauigkeit des geschliffenen Endproduktes war jedoch kein Einfluss der gesinterten Werkstückhöhe festzustellen. Mit zunehmender Diamantkörnungsgröße stiegen die Zeitspannungsvolumina und die Rauheit an, eine höhere Kornkonzentration hingegen übte keinerlei positiven Einfluss auf die Standzeit und die Oberflächenwerte aus. Der geringste Ebenheitsfehler trat bei Schnittgeschwindigkeiten zwischen 20 und 25 m/s auf. Grundsätzlich konnte gezeigt werden, dass technologische Vorteile mit höheren Schnittgeschwindigkeiten einhergehen. Mit zunehmender axialer Vorschubgeschwindigkeit über 3100 $\mu\text{m}/\text{min}$ steigt der Ebenheitsfehler nach einem lokalen Minimum wieder kontinuierlich an. Kleinere Fehlerwerte wurden bei niedrigeren Vorschubgeschwindigkeiten, deren Einsatz jedoch für die Großserienproduktion zu kostenintensiv ist, festgestellt. Die besten Ergebnisse des Überlaufes von Werkstück zu Schleifscheibe in Hinblick auf den Ebenheitsfehler wurden bei einem Überdeckungsgrad von 21 Prozent erreicht. Die Untersuchung zu der Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n ergab eine Oszillation synchron mit der zur Werkstückebene normal verlaufenden Längsvorschubgeschwindigkeit. Das Verhältnis der Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n zur Schnittkraft F_c beträgt in Abhängigkeit der Schnittgeschwindigkeit zwischen drei bis sechs. Über einen längeren Produktionszeitraum stiegen die Schleifkräfte aufgrund des Verschleißes der Kornspitzen um den Faktor drei an. Abhängig von dem Schärfzustand der Schleifscheiben und von der Schnittgeschwindigkeit betrug die unter

Produktionsbedingungen benötigte Schnittleistung zwischen 2000 bis 11000 W. Das G-Verhältnis steigt mit zunehmender Körnungsgröße an und ist unabhängig von der eingesetzten Konzentration. Die Qualität der geschliffenen Werkstücke liegt innerhalb der geforderten Toleranzen. Die Kosten für 100 Werkstücke liegen bei 7,25 €.

Analyse und Ergebnisse des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens mit Planetenkinematik

Wichtigste Eingangskenngrößen sind beim Quer-Seiten-Doppelplanschleifen mit Planetenkinematik die Schnittgeschwindigkeit v_c und die Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n . Die Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n ergab einen minimalen Ebenheitsfehler f_E bei 3000 N. Der Einfluss der Schnittgeschwindigkeit auf den Ebenheitsfehler war gering. In Bezug auf die erzielbaren Oberflächengüten, Form- und Maßgenauigkeiten konnte mit zunehmender Diamantkörnungsgröße ein Ansteigen des Zeitspanungsvolumens, der Formabweichung und somit der Rauheit der geschliffenen Werkstückflächen ermittelt werden. Durch Erhöhung der mittleren Schnittgeschwindigkeit konnten Werkstückhöhenstreuung und Rauheit verbessert werden, während die steigende Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n sich aufgrund der erhöhten Tiefe des Korneingriffes negativ auswirkte. Ein entscheidender Punkt war die Wahl des geeigneten Kühlschmierstoffes, welcher die Schleifzeit und die benötigte Schleifnormalkraft in axialer Richtung beeinflusste. In Abhängigkeit des eingesetzten Kühlmediums und der Temperatur war eine Zunahme der Zeitspanungsvolumina um den Faktor drei möglich. Alle geforderten Toleranzsysteme innerhalb der Großserienfertigung wurden erreicht. Die Kosten für 100 Werkstücke sind mit 6,48 € um 10 Prozent geringer als beim Quer-Seiten-Doppelplanschleifen "Prinzip Wendt".

Richtlinien für den Einsatz unter Produktionsbedingungen

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 geringere Wirtschaftlichkeit des Poliervorganges für Dichtscheiben zieht die Notwendigkeit der Abstimmung des wirtschaftlichen Zieles innerhalb der Prozesskette auf die Optimierung des Polierprozesses nach sich. Indem im Polierprozess eine größere Zahl von Werkstücken in einem Arbeitsgang bearbeitet wurde, konnte der Höhenstreuung 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 dieses Verfahren wirtschaftlicher.

Prozessbedingt sind die Unterschiede des Abschliffes zwischen Werkstückober- und Werkstückunterseite festgestellt worden. Um diesem Phänomen Rechnung zu tragen wurde das Abschleißverhältnis q_w mit dem Ziel definiert, eine Verbesserung der Werkstücktoleranzen für abgesetzte Funktionsflächen zu erreichen. Die Herleitung der allgemeingültigen Gleichungen für beide Verfahren schafft die Möglichkeit, in der Auftragsvorbereitung die Schleifmaschineneinstellungen nach Werkstückaufmaß vorzugeben, sowie um den Faktor 10 genauer zu produzieren.

Ausblick auf weiterführende Untersuchungen

Das Planschleifen mit Planetenkinematik wird in den nächsten Jahren deutlich Marktanteile erobern. Aufgrund der inzwischen serienmäßig erhältlichen Automationskonzepte zum Be- und Entladen der Halter mit Werkstücken konnte die Produktivität um 200 Prozent gesteigert werden. Der Trend geht nicht mehr in Richtung Schleifscheiben mit einem Durchmesser größer als 1200 mm, sondern vielmehr zu höheren Schnittgeschwindigkeiten.

Die Problematik des Schärfens und Abrichtens von Schleifscheiben dieses Durchmessers besteht weiterhin. Ein Lösungsansatz könnte hierbei das Abrichten mittels Abrichtrolle sein. Hierbei muss die Abrichtrolle jedoch über den Schleifscheibenradius drehzahlkorrigiert eingesetzt werden, um immer dieselbe Wirkrautiefe auf der Schleifscheibe zu erzielen. Der Einsatz einer Abrichteinheit bedingt auch die Sperrung des oberen Pendellagers, um die obere Schleifscheibe für die Abrichtzeit parallel zu der unteren zu fixieren. Weiterhin muss in der Abrichteinheit eine Anschliffkennung eingebaut sein, da die Zustellung der Abrichtrolle im μm -Bereich erfolgt. Nur mit Hilfe der Anschliffkennung mittels Körperschallsensor kann ermittelt werden, ob alle Formgenauigkeiten auf der Schleifscheibe wieder den Erfordernissen entsprechen. Die bisherigen Lösungsansätze finden sich in einer Regelungsstrategie zur Selbstschärfung der Schleifscheiben, was jedoch innerhalb einer Großserienproduktion mit vielen wechselnden Werkstückgeometrien nicht einhaltbar ist. Die Schärfung der Schleifscheiben kann hierbei lediglich in deutlich längeren Zeitabständen erfolgen.

Eine weitere Herausforderung stellt die Gewährleistung der ausreichenden Kühlschmiermittelzuführung dar. Wünschenswert ist hierbei eine starke Flutung des Schleifspaltes, um die Zerspanpartikel zuverlässig von den Schleifscheiben zu entfernen. Vermutlich könnte dann das Abschleißverhältnis näher bei 1 liegen. Untersuchungen über die hierbei einzusetzenden Mengen an Schleiföl gibt es bis heute nicht.

9 SCHRIFTTUM

Buchbeiträge und Zeitschriftenartikel

- [Ard99] Ardelt, Th.:
On the Effect of Path Curves on Process & Wheel Wear in Grinding on Lapping Machines. Session 314: Lapping & Finishing.
Pp. 307-321, 3rd International Machining & Grinding Conference October 4-7, 1999, Westin Hotel, Cincinnati, Ohio.
- [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).
- [Bar98] Bartsch, H-J.
Taschenbuch mathematischer Formeln
Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München Wien 1998.
- [Blu80] Blum, G.:
Läppen.
Handbuch der Fertigungstechnik. Hrsg.: Spur. G.; Stöferle, Th.. Band 3/2: Spanen. München: Hanser, 1980, S. 366-383.
- [Blu87] Blum, G.:
Flachhonen und Planparallel-Läppen von Kugellagerringen.
Werkstatt und Betrieb 120, 1987, S. 117-119.
- [Boc93] Bock, R.; Markschat, H.:
Neue Untersuchungen zum Doppelseitigen Planseitenschleifen.
Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren, Vulkan Verlag Essen, 57 Ausgabe, 1993.
- [Brü96] Brücher, Th.:
Kühlschmierung beim Schleifen keramischer Werkstoffe
Dissertation TU Berlin, 1996.
- [Car93] Carlsburg, H.:
Hartbearbeitung keramischer Verbundstoffe
Dissertation TU Berlin, 1993.
- [Cla82] Clar, R.:
Zweischeiben-Läppen und Feinschleifen.
Feinwerktechnik & Messtechnik 90, 1982, 5, S. 242-244.

- [Dis03] Diskus Werke Schleiftechnik GmbH, Firmenprospekt Baureihe DDW 400 XR Robert-Bosch-Str. 11, D-63128 Dietzenbach-Steinberg, 2003.
- [Dub95] Beitz, W.; Grote, K.H.
Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau
Springer Verlag, ISBN 3-540-67777-1, 1995.
- [Egg98] Egger, R.:
Emissionsarmes Feinstschleifen von Keramikwerkstoffen.
Abschlußbericht im BMBF-Verbundprojekt, Hannover, April 1998.
- [Egg01] Egger, R.:
Planschleifen von Keramik mit zyklodischer Wirkbewegung
Fortschr.-Ber. VDI Reihe 2 Nr. 588. VDI-Verlag Düsseldorf; 2001.
- [Eng97] Engel, H.:
Läppen von einkristallinem Silicium
Dissertation TU Berlin, 1997.
- [Fri99] Friemuth, T.:
Schleifen hartstoffverstärkter keramischer Werkzeuge
Dissertation Universität Hannover, 1998.
- [Fun94] Funck, A.:
Planschleifen mit Läppkinematik.
Dissertation TU Berlin, 1994.
- [Gel77] Gellert, W. (Hrsg.):
Kleine Enzyklopädie Mathematik.
Thun und Frankfurt: Verlag Harry Deutsch 1977.
- [Has89] Hasse, G.-J.:
Reinigung des Kühlschmiermittels.
Seminar Feinschleifen, Läppen und Polieren.
Schorndorf: Hahn & Kolb, Januar 1989.
- [Hoi99] Hoischen, H.:
Technisches Zeichnen.
Berlin: Cornelsen Verlag, 27. Auflage, 1999.
- [Ina96] Inasaki, I.:
Application of Simulation Technologies for Grinding Operations.
VDI Berichte Nr. 1276, 1996, S.197-211.
- [Jan96] Janssen, J.M.:
Neue Maschinenkonzepte für die Hart- und Präzisionstechnik.

Tagungsband zum 8. Int. Braunschweiger Feinbearbeitungskolloquium 24.-26. April 1996.

- [Kar96] Karpuschewski, B.; Friemuth, T.:
Feinschleifen tribologisch beanspruchter Oberflächen.
Konferenz-Einzelbericht: Werkstoffe für die Fertigungstechnik, Werkstoffwoche 96, Symp. 5, Stuttgart, D, 28.-31. Mai, 1996, Band 5 (1996) Seite 249-254 (6 Seiten, 5 Bilder, 4 Quellen), Frankfurt: DGM Informationsges., ISBN 3-88355-233-X.
- [Kar96a] Karpuschewski, B.; Lierse, T.:
Feinbearbeitung von Hochleistungskeramik.
VDI-Berichte 1276, 1996, S.261-273.
- [Kar98] Karpuschewski, B.; Egger, R.; v. Mackensen, V.; Longerich, W.; Dennis, P.A.:
Feinschleifen übertrifft das Läppen beim Fertigen von Keramik-Dichtscheiben.
Maschinenmarkt, Würzburg 104, 1998, 21, S. 34-39.
- [Kön96] König, W.; Klocke, F.:
Fertigungsverfahren Bd. 2: Schleifen, Honen, Läppen.
Düsseldorf: VDI-Verlag, 1996, 3. Auflage.
- [Kru57] Krug, H.:
Die Schnittkräfte beim Flachsleifen. Teil I: Einflüsse der Zerspanbedingungen.
Werkstatttechnik und Maschinenbau 47, 1957, 1, S.23-35.
- [Kün02] Künanz, K.; Rußner, C.; Langhans, S.:
Abschliffverhältnis beim Präzisionsplanschleifen
Diamond Business, 02, 2002, S.23-35.
- [Kün03] Künanz, K.; Rußner, C.; Langhans, S.:
Wirtschaftliche Prozessauslegung beim Quer-Seiten-Doppelplanschleifen
Diamond Business, 01, 2003, S.64-68.
- [Lan02] Langhans, Sebastian
Untersuchung der Abtragsverhältnisse beim Quer-Seiten-Doppelplanschleifen von Al₂O₃-Keramik.
Diplomarbeit an der FH-Nürnberg, Fachbereich Maschinenbau, 2002.
- [Lät50] Lätzig, W.:
Läppen. Grundlagen und praktische Anwendung.
München: Hanser, 1950.
- [Lie96] Liebe, I.:
Neue Verfahren zum Abrichten hochharter Schleifscheiben.
Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb TU Berlin, 27.03.1995
(Informativer Arbeitskreis Keramikbearbeitung).

- [Lie98] Lierse, T.; Friemuth, T.:
Schleifen keramischer Funktionsflächen.
Industrie Diamanten Rundschau 32, 1998, Nr.3, S. 228-235.
- [Mar93] Markschat, H.; Hoffmeister, H.-W.:
Seitenschleifen mit CBN.
57. Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren, 1993.
- [Mar00] Markschat, H.:
Maßnahmen zur Steigerung von Leistungsfähigkeit und Prozesssicherheit beim
Planseitenschleifen.
Vulkan Verlag Essen, 2000.
- [Möh87] Möhlen, H.:
Entwicklungstendenzen beim Schleifen keramischer Werkstoffe.
Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der TU Braunschweig
15.1 – 15.16.
- [Pah65] Pahlitzsch, G.:
Schleifen oxydkeramischer Werkstoffe,
Fachberichte für Oberflächentechnik 3, 1965, S. 35-43.
- [Per03] persönliche Telefonate mit der Fa. Melchiorre, Peter Wolters, Stähli und Wendt,
- [Plu83] Pluta, Z., Kacalak, W.:
Mikroskopische Untersuchung von Diamantkorn-Spanspuren auf
Aluminiumoxid-Keramik.
Industrie Diamanten Rundschau 17, 1983, 3, S. 124-130.
- [Poh98] Pohley, K.:
Schleifscheibenspezifikation zum wirtschaftlichen Schleifen von
Aluminiumoxid.
Diplomarbeit an der FH-Nürnberg, Fachbereich Nachrichten und
Feinwerktechnik, 1998.
- [Rot95] Roth, P.:
Abtrennmechanismen beim Schleifen von Aluminiumoxidkeramik.
VDI Verlag, Düsseldorf, 1995.
- [Ruß85] Rußner, K.:
Keramik – Grundlagen, Technische Eigenschaften.
TU Kopenhagen, Denmark, 4.6.1985.
- [Ruß92] Rußner, C.:
Tribologische Untersuchungen an den Werkstoffen Al_2O_3 und SiC
Diplomarbeit TU-München, Fachbereich Werkstoffkunde, 1992.

- [Sab91] Sabotka, I.:
Läppen technischer Keramik.
München: Hanser, Dissertation TU Berlin, 1991.
- [Sal76] Saljé, E., Brandin, H.:
Begriffe der Schleiftechnik, Bezeichnungen und Definitionen.
Vulkan Verlag Dr. W. Classen Nachf. GmbH & Co. KG, Essen, 1976.
- [Sal83] Salmang, H.; Scholze, H.:
Keramik, Teil 2: Keramische Werkstoffe.
6. verb. u. erw. Auflage Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokio,
1983.
- [Sal84] Saljé, E.; Pu, X. F.; Damlos, H. H.:
Dimensionslose Kenngrößen zur Beschreibung des Schleifscheibenverschleißes.
VDI-Zeitschrift 126, 1984, 3, S. 45-47.
- [Sal85] Saljé, E.:
Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren.
Bd. 53. Hrsg. E. Saljé, Essen: Vulkan Verlag, 1985.
- [Sal87] Saljé, E.:
Feinbearbeitung als Schlüsseltechnologie - Herausforderung durch höhere
Genauigkeiten und neue Werkstoffe.
5. Internationales Braunschweiger Feinbearbeitungskolloquium,.
TH Braunschweig, 1987.
- [Sal88] Saljé, E.:
Tischvorlage zum Besuch der Firma Höchst CeramTec, Bereich
Aluminiumoxid.
TU Braunschweig, 30.6.1988.
- [Sal90] Saljé, E.:
Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren.
Bd. 56. Hrsg. E. Saljé, Essen: Vulkan Verlag, 1990. S. 1-18.
- [Sal91] Saljé, E.:
Bis aufs Korn – Kräfte, Volumenströme und Energieflüsse beschreiben den
Schleifprozess ziemlich umfassend.
Maschinenmarkt 97, 1991, 20, S. 52-56.
- [Sal92] Saljé, E.; Zillig, E.; Heidenfelder, H.:
Ein Beitrag zum Doppel-Planseitenschleifen.
ZwF 87, 1992, 4, S. 225-229.

- [Sim88] Simpfendörfer, D.:
Entwicklung und Verifizierung eines Prozessmodells beim Planläppen.
Dissertation TU Berlin, 1988.
- [Spu89] Spur, G.:
Keramikbearbeitung – Schleifen, Honen, Läppen, Abtragen
Hanser Verlag, München Wien, 1989.
- [Spu95] Spur, G.; Funck, A.; Engel, H.:
Problems of Flatness in Plane Surface Grinding.
Transactions of NAMRI/SME 13, 1995, S. 97-102.
- [Stä98] Stähli, A. W.:
Substitution des Flachsleifens.
Schweizer Maschinenmarkt (SMM) Nr. 10/1998, S. 30-32.
- [Stä99] Stähli, A. W.:
Das Flachhonen mit Diamant- oder CBN-Arbeitsscheiben.
Industrie Diamanten Rundschau IDR 33, 1999, 4, S. 314-318.
- [Sto89] Storr, M.:
Kühlschmierstoffe für das Feinschleifen.
Hahn & Kolb, Seminar Feinschleifen, Läppen und Polieren, 24./25.1.89
- [Tio90] Tio, T. H.:
Planschleifen nichtoxidischer Keramiken.
Dissertation TU-Berlin, 1990.
- [Tön92] Tönshoff, H.K.; Peters, J.; Inasaki, I.:
Modelling and Simulation of Grinding Processes.
Annals of the CIRP 41, 1992, 2, S. 677- 688.
- [Tön98b] Tönshoff, H. K.; Egger, R.; v. Mackensen, V.; Preising, D.:
Fine Grinding of Engineering Ceramics as Substitution for Double-Side
Lapping.
ASPE Proceedings Vol. 18, 1998, S. 161-164.
- [Uhl93] Uhlmann, E. G.:
Tiefschleifen hochfester keramischer Werkstoffe.
Dissertation TU Berlin, 1993.
- [Uhl99a] Uhlmann, E.:
Innovative Schleifverfahren zur Keramikbearbeitung
Teil 2: Abrichttechnologie und Kühlschmierung.
ZWF: Innovative Technologien, Jahrg. 94, 1999, 3. S. 90-96.

- [Uhl99b] Uhlmann, E.:
Projektarbeitskreis „Technologie- und Markt-Trendanalyse“
Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb TU Berlin, 15.03.1999
(Informativer Arbeitskreis Keramikbearbeitung).
- [Web89] Weber, E.:
Einsatzgebiete des Läppens und Feinschleifens.
Praxis-Seminar Feinschleifen, Läppen und Polieren.
Schorndorf: Firmenschrift Hahn & Kolb, 1989.
- [Wes95] Westkämper, E; Hoffmeister H. W.; Markschat H.:
Einfluss der Tiltung beim Planschleifen.
wt – Produktion und Management 85, 1995, S.438-440. Springer-Verlag 1995.
- [Wol93] Wolters, P.:
Feinstbearbeitung ebener und zylindrischer Flächen.
Peter Wolters Werkzeugmaschinen GmbH, D-24768 Rendsburg, 01.10.1993.
- [Wol97] Wolters, P., v. Mackensen, V.; Longerich, W.; Dennis, P.; Preising, D.:
Feinschleifen ebener Flächen auf Maschinen mit Läppkinematik.
58. Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren, 1997, S. 215-226.
- [Wol98] Wolters, P.; Egger, R.; Friemuth, T.; von Mackensen, V.; Preising, D.:
Feinbearbeitung sprödharter Werkstoffe.
mav 10 – 1998, S. 24-26.
- [Wol99] Wolters, P.; v. Mackensen, V.; Longerich, W.; Dennis, P.; Preising, D.:
Feinschleifen ebener Flächen auf Maschinen mit Läppkinematik.
SS 215-226, 1999.
- [Zet81] Zettel, H.D.:
Flachschleifverfahren für Kleinteile aus harten Werkstoffen.
wt- Z. ind. Fertig. 71, 1981, S. 391-396.

Firmenschriften

- [CT04] N. N.:
Die Werkstoffe der Systemtechnik. Werkstofftabelle.
CeramTec AG, Lauf , 2004.
- [Stää] Stähli, A. W.:
Flathoning. Das Doppelscheiben-Maschinenprogramm für Spitzenleistungen in
der Flachhon- und Läpp-Technik.
A.W. Stähli AG, Pieterlen, Schweiz, 2004.
- [Stäb] Stähli, A. W.:
Läppen und Flachhonen mit Zweiseiben-Maschinen.
A.W. Stähli AG, Pieterlen, Schweiz, 2004.
- [Wen95] Wendt:
Diamant / CBN Schleif- und Abrichtwerkzeuge
Allgemeine Informationen.
Wendt GmbH; Meerbusch, 1995. – Katalog H/S/G-1

Zitierte Normen und Richtlinien

- DIN 4762 DIN 4762: Oberflächenrauheit. Begriffe. Oberflächen und ihre Kenngrößen.
Berlin: Beuth Verlag, 1989.
- DIN 4768 DIN 4768: Ermittlung der Rauheitskenngrößen R_a , R_z , R_{max} mit elektrischen
Tastschrittgeräten. Begriffe, Messbedingungen.
Berlin: Beuth Verlag, 1990.
- DIN 6580 Begriffe der Zerspantechnik; Bewegungen und Geometrie des
Zerspanvorganges.
Berlin: Beuth, 1985.
- DIN 8580 Einteilung der Fertigungsverfahren.
Berlin: Beuth, 1987.
- DIN 8589 T0 Fertigungsverfahren Spanen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe.
Berlin: Beuth, 1981.
- DIN 8589 T11 Fertigungsverfahren Spanen; Schleifen mit rotierendem Werkzeug;
Einordnung, Unterteilung, Begriffe.
Berlin: Beuth, 1985.
- DIN 8589 T12 Fertigungsverfahren Spanen; Bandschleifen; Einordnung, Unterteilung,
Begriffe.
Berlin: Beuth, 1985.
- DIN 8589 T14 Fertigungsverfahren Honen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe.
Berlin: Beuth, 1985.
- DIN 8589 T15 Fertigungsverfahren Läppen. Einordnung, Unterteilung, Begriffe.
Berlin: Beuth Verlag, 1985.

Bild 2.1:	Prozesskette für die Herstellung oxidkeramischer Dichtscheiben [CT03].....	14
Bild 2.2:	Seiten-Doppelplanschleifverfahren für den Großserieneinsatz.....	16
Bild 2.3:	Kontaktlänge l_g für das Umfangs- und Seiten-Planschleifen	20
Bild 2.4:	Schematische Darstellung des Arbeitsraumes beim Planschleifen mit Planetenkinematik [Ard01].....	25
Bild 2.5:	Bahnformklassen und ihre Sonderfälle beim Planschleifen mit Planetenkinematik [Ard01].....	26
Bild 2.6:	Eigenschaften des Planschleifens mit Planetenkinematik [Ard01]	27
Bild 2.7:	Diskusschleifmaschine mit horizontaler Lage der Werkzeugspindeln [Dis03]	32
Bild 2.8:	Vorschub- und Schnittgeschwindigkeiten von Quer-Seiten-Doppelplanschleifverfahren.....	33
Bild 2.9:	Vorschlag zur Einordnung in die Norm für das Quer-Seiten-Doppelplanschleifen „Prinzip Wendt“	34
Bild 4.1:	Schleifmaschine des Herstellers Wendt Typ WBM 200	40
Bild 4.2:	Maschinenprinzip WBM 200 [Wen95]	41
Bild 4.3:	Einzelschritte einer Bearbeitung des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens „Prinzip Wendt“ [Kün02]	42
Bild 4.4:	Quer-Seiten-Doppelplanschleifmaschine DLM 700 C1 der Firma Stähli AG.....	43
Bild 4.5:	Arbeitsraum einer DLM mit Dichtscheiben in Haltern	44
Bild 4.6:	Ablauf des Fertigungsprozesses [Ard01]	46
Bild 4.7:	Schleifscheibenform nach FEPA.....	48
Bild 4.8:	Diamantkörner in einer Schleifscheibe mit Kunstharzbindung.....	49
Bild 4.9:	Versuchswerkstück: Dichtscheiben aus 96 %igem Aluminiumoxid.....	50
Bild 4.10:	Funktionsprinzip der Einhandmischer und Zweigriffarmaturen	51
Bild 4.11:	Ablaufschema der experimentellen Untersuchungen unter Produktionsbedingungen	55
Bild 4.12:	Kenngrößen nach König [Kön96]	56
Bild 4.13:	Nachbildung der Halterbelegung als zweidimensionale Gestaltfunktion [Ard01]	57
Bild 4.14:	Betrachtung der Auflageflächen Artikel 58908.....	58
Bild 4.15:	Kreisfunktion	58
Bild 4.16:	Idealisierung des Werkstückes	59
Bild 4.17:	Vergleich der axialen Vorschubgeschwindigkeiten v_{fa} mit den Herstellerangaben	61
Bild 4.18:	Arbeitsablauf der axialen Vorschubbewegung f_a	62
Bild 4.19:	Kinematik für einen Zyklus nach ARDEL T	68
Bild 5.1:	Eigenschaften des Quer-Seiten-Doppelplanschleifverfahrens „Prinzip Wendt“ mit oszillierender Wirkbewegung	73

Bild 5.2:	Archimedische Spirale als Bahnform des Quer-Seiten-Doppelplanschleifverfahrens „Prinzip Wendt“	75
Bild 5.3:	Geschwindigkeitsverhältnis zwischen Schnittgeschwindigkeit v_c und der Längsvorschubgeschwindigkeit $v_{f_{osz}}$ sowie das entstehende Flächenintegral der Kontaktfläche des Werkstückes	77
Bild 5.4:	Durchschnittliches und optimiertes Flächenintegral des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens „Prinzip Wendt“	78
Bild 5.5:	Bedienoberfläche des Programmes zur Berechnung eines durchschnittlichen Flächenintegrals	79
Bild 5.6:	Korneingriffswinkel φ für verschiedene axiale Vorschub- und Schnittgeschwindigkeiten des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens „Prinzip Wendt“	80
Bild 5.7:	Korneingriffswinkel und Spanraum bei unterschiedlichen Schnittgeschwindigkeiten	80
Bild 5.8:	obere Spanungsdicke für verschiedene axiale Vorschub- und Schnittgeschwindigkeiten des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens „Prinzip Wendt“	81
Bild 5.9:	Schleifdruck p_{cmax} in Abhängigkeit der axialen Vorschubgeschwindigkeit v_{fa} und der Schnittgeschwindigkeit v_c des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens „Prinzip Wendt“	82
Bild 5.10:	Stromaufnahme I_W des Quer-Seiten-Doppelplanschleifverfahrens „Prinzip Wendt“	83
Bild 5.11:	Stromaufnahme I_W in Abhängigkeit der axialen Vorschubgeschwindigkeit v_{fa} und der Schnittgeschwindigkeit v_c des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens „Prinzip Wendt“	84
Bild 5.12:	Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n in Abhängigkeit der axialen Vorschubgeschwindigkeit v_{fa} und der Schnittgeschwindigkeit v_c des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens „Prinzip Wendt“	85
Bild 5.13:	Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n in Abhängigkeit der axialen Vorschubgeschwindigkeit v_{fa} und der Schnittgeschwindigkeit v_c des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens „Prinzip Wendt“	86
Bild 5.14:	Vergleich der Schleifnormalkräfte F_n der Schleifscheibenkombinationen D126/D126 sowie D91/D126.....	86
Bild 5.15:	Langzeitverhalten der Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens „Prinzip Wendt“	87
Bild 5.16:	Diamantkorn der Körnungsgröße D126 nach mehreren geschliffenen Aluminiumoxidwerkstücken	87
Bild 5.17:	Einfluss der Werkstückfläche auf die Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens „Prinzip Wendt“	88
Bild 5.18:	Schnittkraft F_c in Abhängigkeit der axialen Vorschubgeschwindigkeit v_{fa} und der Schnittgeschwindigkeit v_c des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens „Prinzip Wendt“	89

Bild 5.19: Schnittleistung P_c in Abhängigkeit der axialen Vorschubgeschwindigkeit v_{fa} und der Schnittgeschwindigkeit v_c des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens „Prinzip Wendt“	90
Bild 5.20: Kinematik und Prozesskräfte im Prozess Quer-Seiten-Doppelplanschleifens „Prinzip Wendt“	91
Bild 5.21: Einfluss des Oszillationsweges s_{osz} auf die Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n im Prozess Quer-Seiten-Doppelplanschleifens „Prinzip Wendt“	92
Bild 5.22: Oszillationskraft F_{osz} in Abhängigkeit der axialen Vorschubgeschwindigkeit v_{fa} und der Schnittgeschwindigkeit v_c des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens „Prinzip Wendt“	93
Bild 5.23: Überlauf $l_{\bar{u}}$ der Werkstücke über den Schleifscheibenrand [Ard01]	93
Bild 5.24: Schleifdruck p in Abhängigkeit des Oszillationsweges s_{osz} des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens „Prinzip Wendt“	94
Bild 5.25: Einfluss des Überdeckungsgrades B_{WS} auf den Ebenheitsfehler f_E des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens „Prinzip Wendt“ für die Schleifkörnung D126	95
Bild 5.26: Einfluss der Schnittgeschwindigkeit auf den Ebenheitsfehler f_E des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens „Prinzip Wendt“	96
Bild 5.27: Einfluss der axialen Vorschubgeschwindigkeit v_{fa} auf den Ebenheitsfehler f_E des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens „Prinzip Wendt“ für verschiedene Schleifkörnungen.....	97
Bild 5.28: Streuung der Werkstückhöhen nach dem Sintern.....	98
Bild 5.29: Einfluss der gesinterten Ausgangshöhe auf die geschliffene Werkstückhöhe des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens „Prinzip Wendt“	99
Bild 5.30: Einfluss der gesinterten Ausgangshöhe auf den Ebenheitsfehler des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens „Prinzip Wendt“	99
Bild 5.31: Einfluss der gesinterten Ausgangshöhe auf die Rautiefe R_t des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens „Prinzip Wendt“	100
Bild 5.32: Einstellung der Schnittgeschwindigkeit v_c je Bediener in der Langzeituntersuchung im Vierschichtbetrieb des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens „Prinzip Wendt“	101
Bild 5.33: Entwicklung des R_q -Wertes zwischen zwei Abrichtintervallen des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens „Prinzip Wendt“	102
Bild 6.1: Schnittgeschwindigkeit v_c und Beschleunigung a_c während eines Zyklus des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens mit Planetenkinematik.....	110
Bild 6.2: Schleifzeit t_c in Abhängigkeit der Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens mit Planetenkinematik	111
Bild 6.3: Geometrische Größen des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens mit Planetenkinematik nach ARDELT [Ard01]	112
Bild 6.4: Einfluss von Ölsorte und Öltemperatur auf die Schleifzeit t_c und Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n	113
Bild 6.5: Einfluss der Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n auf den Ebenheitsfehler f_E des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens mit Planetenkinematik.....	114

Bild 6.6:	Einfluss der Drehzahlen auf den Ebenheitsfehler f_E für verschiedene Körnungsgrößen des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens mit Planetenkinematik	115
Bild 6.7:	Einfluss der Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n auf die Werkstückhöhe des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens mit Planetenkinematik	115
Bild 6.8:	Einfluss der Drehzahlen auf die Werkstückhöhe des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens mit Planetenkinematik	116
Bild 6.9:	Rautiefe R_t in Abhängigkeit der Schleifnormalkraft in axialer Richtung F_n des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens mit Planetenkinematik	117
Bild 6.10:	Rautiefe R_t in Abhängigkeit der Drehzahlen des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens mit Planetenkinematik	117
Bild 7.1:	Prozessraum der Seiten-Doppelplanschleifverfahren mit eingezeichneter Sicherheitshöhe l_v	123
Bild 7.2:	Prozesskenngrößen des Quer-Seiten-Doppelplanschleifens	125
Bild 7.3:	Mittenrauwert R_a der polierten keramischen Dichtscheibe	126
Bild 7.4:	Oberflächentraganteil T_a der keramischen Dichtscheibe nach dem Polierprozess	127
Bild 7.5:	Statistische Streuung des Ebenheitsfehlers f_E polierter Werkstücke	127
Bild 7.6:	Mittenrauwert R_a in Abhängigkeit der Polierzeit	128
Bild 7.7:	Traganteil T_a in Abhängigkeit der Polierzeit	129
Bild 7.8:	Teilehöhenreduktion Δh_{wp} der unterschiedlichen Vorbearbeitung als Funktion der Polierzeit	129
Bild 7.9:	Mögliche zeitbezogene Teilehöhenreduktionen unter Produktionsbedingungen	131
Bild 7.10:	Bearbeitungszeit je Stück der untersuchten Quer-Seiten-Doppelplanschleifverfahren	132
Bild 7.11:	Abschliffverhältnis q_{wtat} in Abhängigkeit von der Schnittgeschwindigkeit v_{cmax} am maximalen Schleifscheibenradius für das Quer-Seiten-Doppelplanschleifen „Prinzip Wendt“	137
Bild 7.12:	Abschliffverhältnis q_w in Abhängigkeit von der Drehzahl n_u der unteren Schleifscheibe für das Quer-Seiten-Doppelplanschleifen mit Planetenkinematik	138
Bild 7.13:	Oberes Aufmaßverhältnis q_{ho} in Abhängigkeit der unteren Schnittgeschwindigkeit v_{cmaxu} der Quer-Seiten-Doppelplanschleifmaschine „Prinzip Wendt“	139
Bild 7.14:	Schnittgeschwindigkeitsanpassung um den Betrag des ermittelten Abschliffverhältnisses q_w	140
Bild 7.15:	Einfluss des Abschliffverhältnisses q_w auf das Zerspanungsvolumen ΔV_w	141
Bild 7.16:	Einsparung der Auflegkosten	142

