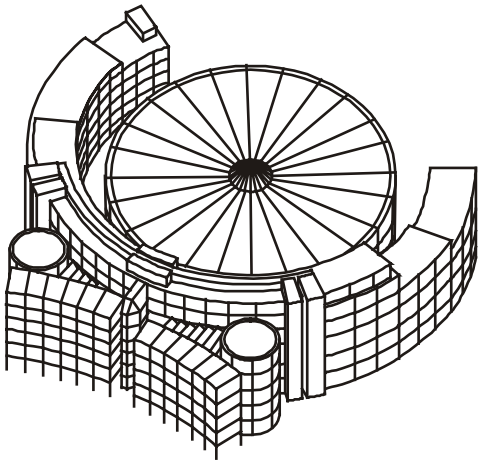
Berichte aus dem
Produktionstechnischen
Zentrum Berlin



Thomas Ardelt

Einfluss der Relativbewegung auf den Prozess und das Arbeitsergebnis beim Planschleifen mit Planetenkinematik

Einfluss der Relativbewegung auf den Prozess und das Arbeitsergebnis beim Planschleifen mit Planetenkinematik

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Thomas Ardelt
aus Arnsberg

Vom Fachbereich 11 Maschinenbau und Produktionstechnik
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs
genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:
Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. D. Severin
Berichter: Prof. em. Dr. h. c. mult. Dr.-Ing. E. h. mult. Dr.-Ing. G. Spur
Berichter: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. mult. H. K. Tönshoff
Berichter: Prof. Dr.-Ing. E. Uhlmann

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 18.10.2000

Berlin 2000
D 83

Herausgeber: **Prof. Dr.-Ing. Eckart Uhlmann**

Mitherausgeber: **Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Adam**
Prof. Dr.-Ing. Joachim Herrmann
Prof. Dr.-Ing. Frank-Lothar Krause
Prof. Dr.-Ing. Kai Mertins
Prof. Dr.-Ing. Günther Seliger
Prof. em. Dr. h.c. mult. Dr.-Ing. Günter Spur

Thomas Ardelt

Einfluss der Relativbewegung auf den Prozess und das Arbeitsergebnis beim Planschleifen mit Planetenkinematik

Produktionstechnisches Zentrum Berlin (PTZ)

Fraunhofer IPK
Institut
Produktionsanlagen und
Konstruktionstechnik

IWF
Institut für
Werkzeugmaschinen und
Fabrikbetrieb
Technische Universität Berlin

Berlin 2001
D 83

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Ardelt, Thomas:
Einfluss der Relativbewegung auf den Prozess und das Arbeitsergebnis beim Planschleifen mit Planetenkinematik / Thomas Ardelt.
Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik, IPK Berlin. - Berlin: IPK, 2001
(Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin)
Zugl.: Berlin, Techn. Univ., Diss. 2000
ISBN 3-8167-5609-3
Für die Dokumentation:
Planschleifen – Aluminiumoxid – Zweischeiben-Schleifmaschine – Bahnkurve – Relativbewegung

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.
Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdrucks und der Vervielfältigung des Buches oder von Teilen daraus, vorbehalten.

Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Herausgebers in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung, reproduziert, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© FhG/IPK Berlin 2001
Gesamtherstellung: Druckhaus Berlin-Mitte GmbH, Berlin
Printed in Germany

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb der Technischen Universität Berlin.

Herrn Prof. em. Dr. h. c. mult. Dr.-Ing. E. h. mult. Dr.-Ing. G. Spur, dem ehemaligen Direktor des Instituts, gilt mein besonderer Dank für seine wohlwollende Unterstützung, seine großzügige Förderung und seinen fachlichen Rat, mit denen er diese Arbeit begleitet hat.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. mult. H. K. Tönshoff, dem Direktor des Instituts für Fertigungstechnik und Spanende Werkzeugmaschinen der Universität Hannover, danke ich für die Übernahme des Korreferats und die wissenschaftlich interessante Diskussion meiner Arbeit. Meinem zweiten Korreferenten, Herrn Prof. Dr.-Ing. E. Uhlmann, Inhaber des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb der Technischen Universität Berlin sowie Leiter des Fraunhofer-Instituts für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik Berlin, danke ich für das meiner Arbeit über mehrere Jahre entgegengebrachte Interesse, die eingehende Durchsicht und seine wertvollen Anregungen. Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. D. Severin, dem Leiter des Instituts für Fördertechnik und Getriebetechnik der Technischen Universität Berlin, für die Übernahme des Vorsitzes im Promotionsausschuss. Auch Herrn Prof. em. Dr.-Ing. M. Feld von der Technischen Universität Danzig danke ich für das meiner Arbeit entgegen gebrachte Interesse.

Die fachlichen Diskussionen und die persönliche Zusammenarbeit mit Herrn Dipl.-Ing. Carsten Rußner von der CeramTec AG in Lauf, Herrn Dr.-Ing. Thomas Magg von der Diamant-Gesellschaft Tesch GmbH in Ludwigsburg und Herrn Dipl.-Ing. (FH) Axel Reiser von der Stähli Läpp-Technik GmbH in Schönaich waren für meine Arbeit besonders wertvoll. Durch ihre Unterstützung haben die genannten Firmen wesentlich zur Entstehung dieser Arbeit beigetragen.

Mein freundschaftlicher Dank gilt den Kollegen und Freunden im Produktionstechnischen Zentrum Berlin, die diese Arbeit durch fachlichen und persönlichen Gedankenaustausch gefördert haben. Mit ihrer stets engagierten und gewissenhaften Mitarbeit haben insbesondere meine studentischen Mitarbeiter Volker Stoof, cand. ing. Stefan Klare, Marcel Achtsnick und cand. ing. Leopold Große-Siestrup maßgeblich zur Entstehung und zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Schließlich danke ich meinen Eltern, die durch die Förderung meiner Ausbildung die Grundlagen für diese Arbeit geschaffen haben. Meiner Partnerin Sabine Ruppert und meiner Mutter danke ich besonders für die Durchsicht des Manuskripts.

Berlin, im Dezember 2000

Thomas Ardelt

Einfluss der Relativbewegung auf den Prozess und das Arbeitsergebnis beim Planschleifen mit Planetenkinematik

INHALT

0 Abkürzungen und Formelzeichen 4

1 Einleitung 9

2 Stand der Technik 11
2.1 Verfahrensentwicklung des Planschleifens mit Planetenkinematik 11
2.2 Eigenschaften des Verfahrens 25
2.3 Vorschlag einer normengerechten Verfahrensbezeichnung 28
2.3.1 Wirk-, Vorschub- und Schnittgeschwindigkeiten 28
2.3.2 Vorschlag zur Einordnung des Verfahrens ins Normenwerk 29
2.3.3 Verfahrensbenennung 31
2.4 Anwendungsbeispiele 32

3 Aufgabenstellung und Zielsetzung 34

4 Analyse der Planetenkinematik 38
4.1 Grundlagen 38
4.1.1 Begriffsbestimmungen 38
4.1.2 Geometrische und kinematische Parameter der Relativbewegung 41
4.1.3 Berechnung von Bahnkurven und -bewegungen 43
4.2 Beschreibung der Bewegungsform durch das Drehzahlverhältnis 46
4.2.1 Bedingungen bei stillstehendem äußerem Stiftkranz 46
4.2.2 Kinematische Kenngrößen 48
4.3 Mögliche Bahnbewegungen 51
4.3.1 Bestimmung der Bahnform eines Werkstückpunkts 53
4.3.2 Bahngeschwindigkeit, -beschleunigung und -krümmung 55
4.4 Kinematische Flexibilität von Zweischeibenschleifmaschinen 61
4.5 Schleifscheibenbelastung 63
4.5.1 Profil- und Kornverschleiß bei der Zweischeibenbearbeitung 63
4.5.2 Definition der Schleifscheibenbelastung 66
4.5.3 Schleifscheibenbelastung durch die Planetenkinematik 67
4.6 Simulation der Schleifscheibenbelastung 70
4.6.1 Vorgehensweise bei der Modellbildung 70
4.6.2 Gültigkeitsbereich des Modells 72

4.6.3 Numerischer Algorithmus 73
4.6.4 Optimierung der Halterbelegung 87
4.6.5 Überlauf der Werkstücke über die Schleifscheibenränder 90
4.7 Zusammenfassung allgemeiner Aussagen zur Planetenkinematik 92

5 Versuchsbedingungen und Messmethoden 94
5.1 Versuchsmaschinen 94
5.1.1 Duomat ZL 500 94
5.1.2 Duomat ZL 700 CNC 100
5.2 Schleifwerkzeuge 101
5.3 Kühlschmierstoffe 102
5.4 Versuchswerkstücke 103
5.5 Versuchsdurchführung 105
5.6 Technologische Kenngrößen und deren Erfassung 108
5.6.1 Einstellparameter 108
5.6.2 Prozessgrößen 109
5.6.3 Zielgrößen 112

6 Verfahrenstypische Wirk- und Verschleißmechanismen 119
6.1 Allgemeines 119
6.2 Messung der Schleiftangentialkraft 120
6.3 Kornbelastungswinkel 122
6.3.1 Definition des Kornbelastungswinkels 123
6.3.2 Verlauf des Kornbelastungswinkels über dem Drehzahlverhältnis 124
6.3.3 Einfluss des Kornbelastungswinkels auf den Schleifscheibenverschleiß 126
6.4 Einfluss der Bewegungsform auf die Teilehöhenreduktion 130

7 Experimentelle Prozessanalyse 132
7.1 Versuchsplanung 132
7.2 Einfluss des Kühlschmierstoffs 134
7.3 Einfluss der Schleifscheibenspezifikation 137
7.4 Einfluss der Bahngeschwindigkeit 142
7.5 Einfluss des Schleifdrucks 146
7.6 Einfluss der Belegung 150
7.7 Einfluss des Drehzahlverhältnisses 155
7.8 Einfluss der Geometrie der Werkstückhalter 161
7.9 Einfluss der Drehrichtung der oberen Schleifscheibe 164
7.10 Zusammenfassung der experimentellen Ergebnisse 165

8 Verfahrensvergleich 168
8.1 Allgemeines 168
8.2 Technologischer Verfahrensvergleich 168

8.2.1 Allgemeines 168
8.2.2 Maschinenaufbau 169
8.2.3 Werkzeugtechnik 172
8.2.4 Bearbeitungsprozess 174
8.3 Ökonomischer Verfahrensvergleich 178
8.3.1 Allgemeines 178
8.3.2 Belegung und Ausnutzung der Maschinen 178
8.3.3 Kostenrechnung 181
8.3.4 Einsparpotenziale 184
8.4 Empfehlungen für die Verfahrensauswahl 186

9 Zusammenfassung 187

10 Literatur 190

0 ABKÜRZUNGEN UND FORMELZEICHEN

Abkürzungen

Al_2O_3	Aluminiumoxid
AWF	Ausschuss für wirtschaftliche Fertigung
B_4C	Borkarbid
CBN	kubisches Bornitrid
FEPA	Federation of the European Producers of Abrasives
KSS	Kühlschmierstoff
PC	Personal Computer
REM	Rasterelektronenmikroskop
RKW	Reichskuratorium für Wirtschaftlichkeit
Si_3N_4	Siliciumnitrid
SiC	Siliciumkarbid
ZrO_2	Zirkonoxid

Lateinische Formelzeichen

$\vec{a}$		Bahnbeschleunigung eines Werkstückpunkts
a'	%	bezogene Bahnbeschleunigung eines Werkstückpunkts
a	m/s²	Betrag der Bahnbeschleunigung eines Werkstückpunkts
a_H	mm	Abstand zwischen dem Halter- und dem Werkstückmittelpunkt
a_m	m/s²	mittlere Bahnbeschleunigung eines Werkstückpunkts
a_s	m/s²	skalare Beschleunigung eines Punkts in Richtung der Bahnkurve
a_W	mm	Abstand eines Punkts vom Werkstückzentrum
a_Z	mm	Abstand zwischen Schleifscheiben- und Halterzentrum
A		diskreter Punkt
$A_{H\,ges}$	mm²	Fläche aller Werkstückhalter
A_H	mm²	Fläche eines Werkstückhalters
$A_{S\,Ki}$	mm²	Flächeninhalt der Schleifscheibenklasse *i*
A_S	mm²	Schleifscheibenfläche
$A_{W\,Ki}$	mm²	Klassenflächenanteil aller Werkstückflächen
A_W	mm²	Fläche eines Werkstücks
A_W‘	%	bezogene Aufenthaltswahrscheinlichkeit aller Werkstückflächen
A_W‘$_{Ki}$	%	bezogener Klassenflächenanteil aller Werkstückflächen
b_S		Belastungsfaktor
$b_{S\,Ki}$		Klassenbelastungsfaktor
b_S‘	%	bezogener Belastungsfaktor

$b_S{}'_{Ki}$	%	bezogener Klassenbelastungsfaktor
B		diskreter Punkt
B	%	Belegung, Belegungsfaktor
B_S	mm³	Schleifscheibenbelastung
$B_S{}'$	%	bezogene Schleifscheibenbelastung
$B_{S\,Ki}$	mm³	Schleifscheibenklassenbelastung
$B_{S\,sum}$	mm³	summarische Schleifscheibenbelastung
$B_S{}'_{sum}$	%	bezogene summarische Schleifscheibenbelastung
C	Karat/cm³	Diamantkonzentration (C100 entspricht 4,4 Karat/cm³)
D	µm	mittlere Diamantkorngröße im Schleifbelag
e_H	mm	Abstand eines Punktes vom Halterzentrum H
f_E	µm	Ebenheitsfehler
$F_{n\,Ki}$	N	Klassennormalkraft
F_n	N	Schleifnormalkraft
F_t	N	Schleiftangentialkraft
$F_{t\,Ki}$	N	Klassentangentialkraft
g_W	mm	Gestaltfunktion
$g_W{}'$	%	bezogene Gestaltfunktion
G		Schleifverhältnis
h	mm	Höhe
Δh	mm	Höhendifferenz
h_{eq}	µm	bezogene äquivalente Spanungsdicke
h_S	mm	Höhe des Schleifscheibenbelags
Δh_S	mm	Schleifscheibenverschleiß, Höhendifferenz am Schleifbelag
$\overline{h_W}$	mm	Mittelwert der Werkstückhöhen einer Charge
h_W	mm	Werkstückhöhe
Δh_W	mm	Teilehöhenreduktion, Aufmaß
$\Delta h'_W$	µm/m	wegbezogene Teilehöhenreduktion
$\Delta \dot{h}_W$	µm/s	zeitbezogene Teilehöhenreduktion, Abtrenngeschwindigkeit
H		Mittelpunkt des Werkstückhalters
i		Anzahl der Schleifscheibenklassen
j		Zählindex
k'	%	bezogene Bahnkrümmung
k	1/m	Krümmung einer Bahnkurve
K_A	€/a	kalkulatorische Abschreibung
K_E	€/a	Energiekosten
K_F	€	Fertigungskosten pro gefertigter Einheit
K_i		Schleifscheibenklasse mit dem Index i

K_I	€/a	Instandhaltungskosten
K_L		Winkelgeschwindigkeitsverhältnis
K_{Lohn}	€/a	Lohnkosten
K_{MH}	€/h	Maschinenstundensatz
K_{MHW}	€/h	Maschinenstundensatz inklusive Werkzeugkosten
K_R	€/a	Raumkosten
K_x	€/a	Restfertigungsgemeinkosten
K_Z	€/a	kalkulatorische Zinsen
M_i	Nm	Antriebsmoment des inneren Stiftkranzes
M_o	Nm	Antriebsmoment der oberen Schleifscheibe
M_{R1}	%	Materialanteil
M_{R2}	%	Materialanteil
M_u	Nm	Antriebsmoment der unteren Schleifscheibe
$M_{u\ normiert}$	%	normiertes Antriebsmoment der unteren Schleifscheibe
MZ		Momentanzentrum einer Drehbewegung
n		numerischer Parameter
n_a	min^{-1}	Drehzahl des äußeren Stiftkranzes
n_i	min^{-1}	Drehzahl des inneren Stiftkranzes
n_o	min^{-1}	Drehzahl der oberen Schleifscheibe
n_u	min^{-1}	Drehzahl der unteren Schleifscheibe
N_{GA}		Anzahl der aktiven Kornschneiden
N_L		Drehzahlverhältnis
p		Anzahl der Teilzyklen in einem Bahnzyklus
p	N/cm²	Schleifdruck
P	%	Bruchwahrscheinlichkeit
$P_{Kühl}$	kW	Kühlleistung einer Zweischeibenmaschine
P_L	kW	Antriebsleistung der Läppscheibe
P_S	kW	Antriebsleistung der Schleifscheibe
P_W		Punkt der Werkstückoberfläche
q		Anzahl der Umrundungen des Scheibenzentrums im Bahnzyklus
Q_W	mm³/s	Zeitspanungsvolumen
Q_W'	mm³/(mm·s)	auf die Schleifscheibenbreite bezogenes Zeitspanungsvolumen
Q_W''	mm³/(mm²·s)	auf die Schleifscheibenfläche bezogenes Zeitspanungsvolumen
$Q_{W\ normiert}$	%	normiertes Zeitspanungsvolumen
$\vec{r}$		Ortsvektor eines Werkstückpunkts, Bahnkurve
r	mm	Betrag des Ortsvektors
r_a	mm	Teilkreisradius des äußeren Stiftkranzes
$r_{a\ Ki}$	mm	Außenradius der Schleifscheibenklasse i

r_H	mm	Radius des Werkstückhalters
r_i	mm	Teilkreisradius des inneren Stiftkranzes
$r_{i\,Ki}$	mm	Innenradius der Schleifscheibenklasse *i*
$r_{m\,Ki}$	mm	mittlerer Radius der Schleifscheibenklasse *i*
r_S	mm	Abstand vom Schleifscheibenzentrum
r_{Sa}	mm	Außenradius der Schleifscheibe
r_{Si}	mm	Innenradius der Schleifscheibe
r_W	mm	Außenradius des Werkstücks
$r_{Wälz}$	mm	Wälzkreisradius
R_a	µm	arithmetischer Mittenrauwert
R_K	µm	Kernrautiefe
R_{PK}	µm	reduzierte Spitzenhöhe
R_{VK}	µm	reduzierte Riefentiefe
$R_{Z\,DIN}$	µm	gemittelte Rautiefe
s	mm	Bahnlänge, Schleifweg
s'		bezogene Bahnlängenverteilung
s_{Ki}	mm	Klassenbahnlänge
s'_{Ki}	%	bezogene Klassenbahnlänge
S_{hw}	µm	Höhenstreuung einer Werkstückcharge
$s_{PW\,Ki}$	mm	Bahnkurvenabschnitt in einer Schleifscheibenklasse
t	s	Zeit
t_0, t_1	s	diskrete Zeitpunkte
t_{1i}	s	Eintrittszeitpunkt in die Schleifscheibenklasse *i*
t_{2i}	s	Austrittszeitpunkt aus der Schleifscheibenklasse *i*
t_c	s	Schleifzeit
t'_{Ki}	%	bezogene Klassenaufenthaltsdauer
t_{Ki}	s	Klassenaufenthaltsdauer
t_{Zykl}	s	Zykluszeit
$t_{\Delta Zykl}$	s	Teilzykluszeit
T_E	h	Maschinenzeit pro gefertigter Einheit
T_N	h/a	jährliche Nutzungszeit einer Maschine
$\vec{v}$		Bahngeschwindigkeit eines Werkstückpunkts
v	m/s	Betrag der Bahngeschwindigkeit
v'	%	bezogene Bahngeschwindigkeit eines Werkstückpunkts
v_a	m/min	Geschwindigkeit eines Punktes auf dem äußeren Stiftkranz
v_c	m/min	Schnittgeschwindigkeit
$v_{f\,quer}$	m/min	Vorschubgeschwindigkeit quer zur Werkstückoberfläche
$v_{f\,längs}$	m/min	Vorschubgeschwindigkeit längs zur Werkstückoberfläche

v_H	m/min	Rotationsgeschwindigkeit des Werkstückhalters
v_i	m/min	Geschwindigkeit eines Punktes auf dem inneren Stiftkranz
v_{Ki}	m/min	Klassenbahngeschwindigkeit
v_m	m/min	mittlere Bahngeschwindigkeit eines Werkstückpunktes
v_{max}	m/min	maximale Bahngeschwindigkeit eines Werkstückpunktes
v_{min}	m/min	minimale Bahngeschwindigkeit eines Werkstückpunktes
v_Z	m/min	Translationsgeschwindigkeit des Werkstückhalters
$\dot{V}_{KSS}$	l/min	Volumenstrom des Kühlschmierstoffs
V_S	mm³	Schleifscheibenverschleißvolumen
$V_{W\,Ki}$	mm³	Klassenzerspanungsvolumen
V_W	mm³	Zerspanungsvolumen
V_W'	mm³/mm	auf die Schleifscheibenbreite bezogenes Zerspanungsvolumen
V_W‘	%	bezogenes Zerspanungsvolumen
V_W‘$_{Ki}$	%	bezogenes Klassenzerspanungsvolumen
W		Werkstückmittelpunkt
X		Koordinate der Arbeitsebene der Schleifscheibenoberfläche
x	mm	Abstand vom Schleifscheibenzentrum in Richtung der Koordinate X
Y		Koordinate der Arbeitsebene der Schleifscheibenoberfläche
y	mm	Abstand vom Schleifscheibenzentrum in Richtung der Koordinate Y
z_H		Anzahl der Werkstückhalter
z_W		Anzahl der gleichzeitig bearbeiteten Werkstücke, Chargenmenge
Z		Schleifscheibenmittelpunkt, Drehachse der Schleifscheiben

Griechische Formelzeichen

α	°	Winkel
$\beta_{\Delta Zykl}$	°	Teilzykluswinkel
κ	°	Kornbelastungswinkel
μ_S		Schleifkräfteverhältnis
$\mu_{S\,Ki}$		Klassenschleifkräfteverhältnis
ω	2π/min	Winkelgeschwindigkeit
ω_a	2π/min	Winkelgeschwindigkeit des äußeren Stiftkranzes
ω_H	2π/min	Winkelgeschwindigkeit des Werkstückhalters um sein Zentrum
ω_i	2π/min	Winkelgeschwindigkeit des inneren Stiftkranzes
ω_o	2π/min	Winkelgeschwindigkeit der oberen Schleifscheibe
ω_u	2π/min	Winkelgeschwindigkeit der unteren Schleifscheibe
ω_W	2π/min	Winkelgeschwindigkeit des Werkstücks
ω_Z	2π/min	Winkelgeschwindigkeit des Werkstückhaltes um das Scheibenzentrum

1 EINLEITUNG

Für technische Bauteile mit zwei planparallelen Funktionsflächen existieren viele Anwendungsbeispiele aus einem breiten Spektrum an Geometrien und Werkstoffen. Zur Bearbeitung solcher Werkstücke eignen sich insbesondere Fertigungsverfahren, bei denen beide Funktionsflächen gleichzeitig im Eingriff sind. Auf diese Weise lassen sich Fehlerquellen vermeiden, die durch das Positionieren oder Spannen des Werkstücks entstehen. Zweischeibenschleif- und Läppmaschinen ermöglichen eine solche Bearbeitung und werden besonders zur Herstellung von mittleren und großen Serien eingesetzt.

In der industriellen Fertigung setzt sich das Planschleifen mit Planetenkinematik immer mehr gegenüber dem traditionellen Planparallelläppen durch. Das Schleifverfahren erlaubt bei qualitativ gleichwertigem Arbeitsergebnis eine signifikante Senkung der Fertigungskosten pro Werkstück. Einsparungspotenziale ergeben sich durch deutlich reduzierte Bearbeitungszeiten und eine wesentlich bessere Ausnutzung der Schneidstoffe. Mit dem Übergang vom losen zum gebundenen Korn ist aber mehr verbunden als eine innerbetriebliche Umstellung auf eine innovative Technologie: ein gesamtes Marktsegment befindet sich im Wandel. Ein großes Geschäftsfeld für die Hersteller der vergleichsweise preisgünstigen Läppmaschinen besteht traditionell in der Versorgung der Anwender mit Verbrauchsmaterialien wie Läppkörnern und Abrichtwerkzeugen. Mit jeder neuen Anwendung für das Planschleifen mit Planetenkinematik verlagert sich dieser Markt in Richtung der Schleifscheibenhersteller. Während das Angebot an Diamantschleifscheiben mit Durchmessern von bis zu zwei Metern bis vor wenigen Jahren noch sehr überschaubar war, bietet der Markt heute ein breites Spektrum an CBN- und Diamantschleifscheiben in verschiedensten Ausführungen an. Auch im Bereich des Einscheibenläppens wird versucht, die konventionellen Werkzeuge durch Schleifscheiben zu ersetzen.

Die Prozessauslegung beim Planschleifen mit Planetenkinematik gestaltet sich gegenüber dem Läppen wesentlich schwieriger. Das Verfahren ist vergleichsweise jung, und viele Anwender konnten bisher kein ausreichendes Erfahrungswissen sammeln. Maschinen- und Werkzeughersteller sind daher gefordert, über die Maschinenausstattung hinaus auch die erforderliche Prozesstechnologie zu liefern. Die Auswahl von Werkzeugspezifikation und Kühlschmierstoff sowie die Festlegung der Bearbeitungsparameter sind von entscheidender Bedeutung für die Wirtschaftlichkeit des Planschleifens mit Planetenkinematik. Die Werkzeugkosten pro Werkstück liegen beim Schleifen zwar um Größenordnungen niedriger als beim Läppen. Die Anschaffungskosten für ein Schleifscheibenpaar liegen aber so hoch, dass das Risiko einer Fehlinvestition potenzielle Anwender vom Einsatz des Verfahrens abschreckt. Zur Senkung der Entwicklungskosten entwickeln Maschinen- und Werkzeughersteller oft gemeinsam die Prozesstechnologie und bieten Maschine und Werkzeug zusammen als System an, dass den Bedürfnissen und Anforderungen des Kunden angepasst ist.

In der Anfangsphase des Planschleifens mit Planetenkinematik wurden umgerüstete Läppmaschinen verwendet. Für die Bearbeitung metallischer Werkstoffe mit keramisch gebundenen Siliciumkarbid-Schleifscheiben reichten die Möglichkeiten dieser Maschinen zunächst aus.

Viele Anwender wollten sich trotz aller Fortschritte bei der Bearbeitung mit gebundenem Korn die Möglichkeit der Läppbearbeitung weiterhin offen halten. Aus diesem Grund wurden flexible Maschinen angeboten, die wahlweise Läpp- oder Schleifscheiben aufnehmen konnten und den Kundenwünschen entsprechend mit den erforderlichen Zusatzaggregaten ausgerüstet wurden. Die Auslegung dieser Maschinensysteme hinsichtlich Drehzahlen, Antriebsleistungen und Gestellbauweise orientierte sich weitgehend an den vom Läppen bekannten Anforderungen. Auf diese Weise bremste die Entstehung des Planschleifens mit Planetenkinematik aus dem traditionellen Läppen die Entwicklung von Zweischeibenschleifmaschinen, die den speziellen Anforderungen der Schleifbearbeitung gerecht werden.

Wie bei den meisten fertigungstechnischen Entwicklungen ist auch bei der Entwicklung des Planschleifens mit Planetenkinematik die industrielle Anwendungstechnik als treibende Innovationskraft anzusehen. Das Verfahren wird seit Jahren mit Erfolg in Bereichen eingesetzt, in denen die Jahresproduktionsmengen einzelner Werkstücke groß, die Anzahl unterschiedlicher Werkstücke und Werkstoffe aber eingeschränkt sind. Bei der Erschließung neuer Einsatzfelder zeigen sich immer wieder Grenzen, die mit empirischem Erfahrungswissen nur schwer zu überwinden sind. Gerade im Laufe der neunzehnhundertneunziger Jahre entwickelten sich potenzielle Anwendungsgebiete für das Planschleifen mit Planetenkinematik, für deren Erschließung neben angepassten Maschinensystemen auch das prozesstechnische Grundlagenwissen fehlte. Beispielhaft seien hier die zunehmende Verwendung keramischer Kleinteile in großen Stückzahlen im Armaturenbereich, im Motorenbau oder als Schneidkeramiken erwähnt. Hier ergaben sich gegenüber dem Läppen erweiterte Anforderungen in den Bereichen Konstruktion, Steuerung, Messtechnik, Werkzeugauslegung, Kühlschmierung, Prozessführung, Automatisierung und Qualitätssicherung.

Die Verfahrensentwicklung vom Läppen zum Planschleifen mit Planetenkinematik spiegelt sich in weltweiten Forschungsaktivitäten wider. Zielsetzung vieler Untersuchungen zum Läppen war es, eine durch empirisches Erfahrungswissen geprägte Technologie systematisch und analytisch zu untermauern. Einen wichtigen Meilenstein bildete dabei die mathematische Beschreibung der Relativbewegungen zwischen Werkstücken und Läppscheiben, durch die eine Simulation der bearbeitungsbedingten Verschleißprofile beim einseitigen Planläppen möglich wurde. Einen weiteren Schwerpunkt bildete die Erarbeitung von Prozesstechnologien zur Bearbeitung bestimmter Werkstoffgruppen wie ausgewählter Stahlsorten, technischer Keramiken oder Halbleiterwerkstoffen. Als Folge der zunehmenden Verdrängung konventioneller Läppprozesse haben sich auch die Forschungsschwerpunkte zur Bearbeitung zwischen zwei Schleifscheiben hin verschoben. Inhalte bisheriger Untersuchungen waren u. a. die Schleifbearbeitung von Kaltarbeitsstählen und keramischen Werkstoffen sowie die Analyse von Temperatur- und Kraftgradienten, die sich aufgrund der Größe der Kontaktflächen einstellen und negative Auswirkungen auf das Arbeitsergebnis besitzen.

Diese Arbeit soll einen grundlegenden Beitrag hinsichtlich der Erweiterung der Einsatzfelder des Planschleifens mit Planetenkinematik leisten. Am Beispiel der keramischen Werkstoffe Aluminiumoxid und Siliciumnitrid wird eine systematische Vorgehensweise zur Beherrschung der Prozesstechnologie aufgezeigt, die analytische und praktische Ansätze einschließt.

2 STAND DER TECHNIK

2.1 Verfahrensentwicklung des Planschleifens mit Planetenkinematik

Im Jahr 1932 verlegte der Ausschuß für wirtschaftliche Fertigung AWF in Zusammenarbeit mit dem Reichskuratorium für Wirtschaftlichkeit RKW einen Übersichtsband mit dem Titel „Feinstbearbeitung“ [AWF32]. Darin wird eine Bauart von Zweischeibenläppmaschinen (**Bild 2.1**) wie folgt beschrieben: „Bei diesen Maschinen werden nicht nur gußeiserne Läppscheiben, sondern auch Schleifscheiben feinster Körnung verwendet. Durch letztere wird nach Angabe der amerikanischen Firma Norton & Co. Worcester eine erhebliche Steigerung der Leistung erzielt, die bis zu 400 % geht, jedoch erreicht man mit diesen Scheiben nicht so hohen Glanz der Oberflächen und nicht so hohe Genauigkeit. Zum genauen planparallelen Abrichten der Schleifscheiben ist bei diesen Läppmaschinen eine besondere Diamantabdrehvorrichtung vorgesehen, mit der beide Schleifscheiben gleichzeitig abgerichtet werden. Die Haltbarkeit der Schleifscheiben ist so gut, daß nach Angabe einer Herstellerfirma erst nach 3000 bis 4000 Werkstücken ein Abdrehen notwendig ist.“ Zur Führung der Werkstücke diente bei diesen Maschinen ein einzelner, exzentrisch geführter Werkstückhalter. Über der oberen Riemenscheibe sind Leitungen für die hydraulische Druckaufbringung zu erkennen.

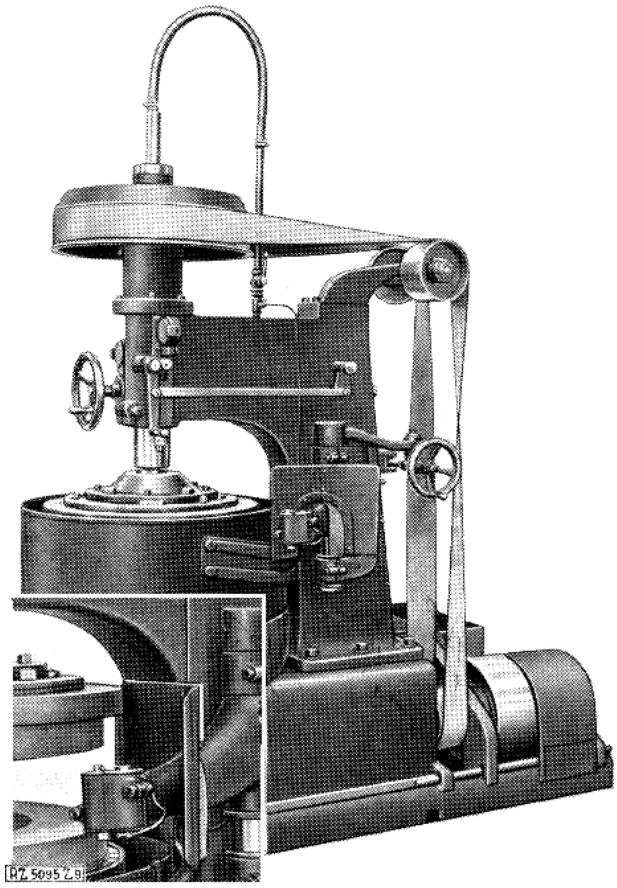


Bild 2.1: Zweischeibenläppmaschine mit Schleifscheiben und Diamant-Abdrehvorrichtung [AWF32]

Die Maschine weist bereits die meisten Merkmale der heute üblichen Systeme zum Zweischeibenschleifen auf. In Deutschland wurde das Verfahren erst in den fünfziger Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts wieder erwähnt. In dieser Zeit beschrieben verschiedene Autoren erstmals die bis heute verfahrenstypische Planetenkinematik. Zur Bearbeitung werden die Werkstücke in außenverzahnte Werkstückhalter eingelegt. Diese werden von zwei Stiftkränzen zwischen den beiden waagerecht angeordneten Schleifscheiben geführt [Fin50, Grö54, Lät50, Lic54]. Die Relativbewegungen zwischen den Wirkpartnern wird durch Drehbewegungen beider Schleifscheiben und des inneren Stiftkranzes erzeugt. In Ausnahmefällen ist auch der äußere Stiftkranz drehbar. Den prinzipiellen Maschinenaufbau zum Planschleifen mit Planetenkinematik zeigt **Bild 2.2**. LÄTZIG [Lät50] nannte als wichtige Unterscheidungsmerkmale zwischen dem Planschleifen mit Planetenkinematik und dem Planparallelläppen die höheren Relativgeschwindigkeiten und die Verwendung von Kühlschmierstoff. Als problematisch bei der Schleifbearbeitung nannte er das Zusetzen der Spanräume und den ungleichmäßigen Profilverschleiß der Schleifscheiben.

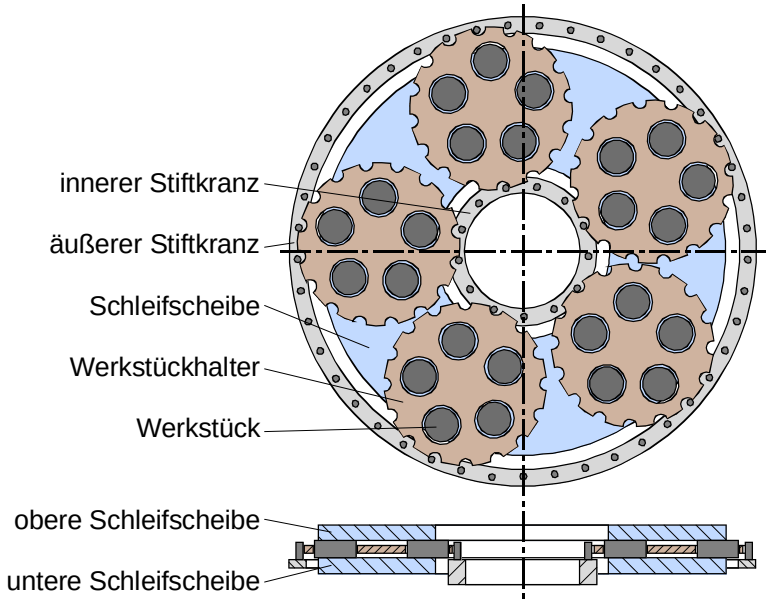


Bild 2.2: Anordnung zum Planschleifen mit Planetenkinematik

Im Jahr 1965 veröffentlichte FISCHER [Fis65b] Fotografien von Zweischeibenmaschinen, die unter der Bezeichnung „Außenläpp- und Ziehschleifmaschinen“ vom VEB Werkzeugmaschinenfabrik Naumburg angeboten wurden. Angaben zur Prozesstechnologie oder den verwendeten Werkzeugen machte er nicht. Auch die Verfahrensbenennung Ziehschleifen ist in diesem Zusammenhang ungewöhnlich und wurde von anderen Autoren schon seit Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts für das Honen verwendet [Kie43, Läz50]. Im Jahr 1982 beschrieb CLAR [Cla82] den Einsatz von Schleifscheiben auf Zweischeibenmaschinen. Wichtige Vorteile gegenüber dem Läppen waren für ihn kürzere Bearbeitungszeiten und die geringere Verschmutzung der Werkstücke ohne anhaftendes Läppmittel. Als nachteilig nannte er die geringeren Oberflächengüten, die er mit kunstharzgebundenen Siliciumkarbid-Schleifscheiben erreichte.

Nach BLUM [Blu87] waren bereits 1987 durch Planschleifen mit Planetenkinematik dem Läppen vergleichbare qualitative Arbeitsergebnisse zu erreichen. Als Haupteinsatzgebiet nannte er die Herstellung von Lagerringen, bei denen zeitbezogene Teilehöhenreduktionen von bis zu 25 µm/min möglich waren. Als Nachteil des Verfahrens führte er die Beschränkung in der Größe der Werkstücke an, deren Durchmesser 250 mm nicht überschreiten sollte. Als wichtige Faktoren für die Arbeitsgenauigkeit erwähnte er neben einer stabilen Gestellbauweise auch die Temperierung der Schleifscheiben und des Kühlschmierstoffs. Als problematisch erkannte er die Auswahl der richtigen Werkzeugspezifikation und eines geeigneten Kühlschmierstoffs. WEBER [Web89] wies darauf hin, dass hohe Schleifdrücke zu elastischen Verformungen der Werkstücke führen können. Diese gehen nach der Entlastung reversibel zurück und wirken sich deutlich negativ auf die Formgenauigkeiten der Werkstücke aus.

Neben dem Planschleifen mit Planetenkinematik stellt das Armieren metallischer Scheiben mit Schneidkörnern eine seit langem angewendete Technologie dar. Bereits 1937 beschrieb BUXBAUM [Bux37] das Flachschleifen mit Metallscheiben aus Weichmetall oder Gusseisen, in die Schleifpulver eingedrückt, gewalzt oder aufgeklebt wurden. Von FELD und BARYLSKI [Fel91] stammt ein Vorschlag zum Armieren von stählernen Läppwerkzeugen mit einer Diamantschicht. Das Einpressen der Diamanten erfolgte mit Hilfe von Kegelrollen, die pneumatisch auf das Läppwerkzeug gedrückt wurden. Die Autoren bezeichneten das Verfahren, welches sich durch eine verhältnismäßig niedrige Produktivität und geringe Rauheiten der bearbeiteten Flächen auszeichnet, als Feinläppen. Als Anwendungen nannten die Autoren die Bearbeitung von hitzebeständigen Stählen, Sinterhartmetallen und Keramiken. HOFFMEISTER und GÄBLER [Hof97] klebten Folienwerkzeuge auf Trägerscheiben und erreichten damit gegenüber dem Läppen wesentlich bessere Oberflächengüten, was sie auf ein Eindrücken der Körner in die nachgiebige Folie zurückführten. Je nach Spezifikation des Werkzeugs lagen die erreichbaren Zeitspanungsvolumina geringfügig höher als beim Läppen.

SPUR und FUNCK [Fun94, Spu95c] untersuchten das Planschleifen mit Planetenkinematik unter einer stark werkstückbezogenen Betrachtungsweise. Sie bearbeiteten Werkstücke aus Getriebe- und Kaltarbeitsstählen mit keramisch gebundenen SiC-Schleifscheiben und schenkten den Störkomplexen in der Kontaktzone besondere Aufmerksamkeit. So gelang es ihnen, Temperaturen und Kräfte am Werkstück während der Bearbeitung aufzunehmen, die Werte mit Hilfe einer telemetrischen Funkübertragung an einen PC zu leiten und auszuwerten. Weiterhin errechneten sie Temperaturfelder in beidseitig bearbeiteten Werkstücken und deren Einflüsse auf Ebenheitsfehler der Werkstücke. Sie definierten die Kontaktflächen des Werkstücks mit den Schleifscheiben als Wärmequellen und die vom Kühlschmierstoff umgebene Mantelfläche als Wärmesenke. Mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode bestimmten sie die elastische Verformung der Schleifscheiben unter Belastung durch Werkstücke unterschiedlicher Geometrie. Ihnen gelang der Nachweis, dass die Kantenverrundung der Werkstücke auf die elastische Verformung der Schleifwerkzeuge zurückzuführen ist. Im Rahmen seiner experimentellen Untersuchungen entdeckte FUNCK [Fun94] einen Zusammenhang zwischen dem Zeitspanungsvolumen und den kinematischen Prozessparametern. Weiterhin stellte er fest, dass hohe Zeitspanungsvolumina zumeist mit schlechten Ebenheiten einhergehen.

1996 bemängelte JANSSEN [Jan96] den von Konzept und Konstruktion her nicht optimalen Aufbau von Zweischeibenläppmaschinen für die Schleifbearbeitung. Er präsentierte eine sehr steife Maschine, die sich unter anderem durch ihre Portalbauweise und eine Evolventenverzahnung von Werkstückhaltern und Stiftkränzen auszeichnete. Für ein optimales Arbeitsergebnis und besonders hohe Zeitspanungsvolumina beim Schleifen von Stahlwerkstoffen empfahl er eine Temperatur der Schleifscheiben von 20 bis 25 °C. Am Beispiel stählerner Ölmotor-Rotoren wies er nach, dass durch Planschleifen mit Planetenkinematik unter bestimmten Bedingungen höhere Werkstückqualitäten erreichbar sind als durch Läppen.

HESSE u. a. [Hes96] untersuchten das Planschleifen mit Planetenkinematik unter ökologischen Gesichtspunkten. Einen Hauptvorteil gegenüber dem Läppen sahen sie im geschlossenen Kühlschmierstoffkreislauf und den dadurch wesentlich geringeren Abfallmengen. Auch KARPUSCHEWSKI u. a. [Kar98a] bemängelten den offenen Stoffkreislauf beim Läppen. Nach ihren Aussagen stellen die Kosten für die Entsorgung der Läppsuspensionen langfristig die Wirtschaftlichkeit des Läppens in Frage. Als Gründe führten Sie das gewachsene Ökologiebewusstsein sowie die verschärften rechtlichen Rahmenbedingungen an.

Im Rahmen einer Untersuchung zur Bearbeitung von Aluminiumoxidkeramiken durch Planschleifen mit Planetenkinematik stellten KARPUSCHEWSKI u. a. [Kar98b] fest, dass die Auswahl von Schleifscheibenspezifikation und Kühlschmierstoff entscheidend für die erreichbaren Zeitspanungsvolumina ist. Sie beobachteten eine Verringerung der Formgenauigkeiten der Werkstücke mit zunehmendem Schleifdruck und steigender Wirkgeschwindigkeit. Mit einer Schleifscheibe der Körnung D91 erreichten sie zeitbezogene Teilehöhenreduktionen von bis zu 350 µm/min und prognostizierten zukünftig weiter steigende Zeitspanungsvolumina.

Automatisiertes Be- und Entladen

Noch 1989 bezeichnete WEBER [Web89] das automatisierte Be- und Entladen von Zweischeibenschleifmaschinen als teurer, langsamer und unsicherer als die manuelle Bestückung. Aufgrund verbesserter Systeme finden die Möglichkeiten des automatisierten Betriebs seitdem jedoch verstärkte Aufmerksamkeit. Als Halbautomatisierung bezeichnet man das manuelle Bestücken der Werkstückkäfige und deren automatisierten Transport in den Arbeitsraum. Bei Vollautomatisierung erfolgt auch das Einlegen der Werkstücke in die Halteraussparungen mechanisch, z. B. aus Stangenmagazinen oder über Wendelförderer. Die Verkettung mehrerer Maschinen zu Fertigungslinien ist möglich. Auch die nachfolgende Reinigung der Werkstücke kann automatisiert erfolgen. Zum Ausgleich des Werkzeugverschleißes sind Automatisierungseinrichtungen in der Regel höhenverstellbar [Kar98a, Mac97, Stä99].

Durch den Einsatz automatisierter Konzepte lassen sich Nebenzeiten deutlich verkürzen. Zum einen ist der Arbeitsraum bei großen Schleifscheibendurchmessern von bis zu zwei Metern nur mit Hilfsmitteln zugänglich. Zum anderen kann das Beladen der Werkstückhalter bei kleinen Werkstücken und großen Chargenmengen länger dauern als die Schleifbearbeitung.

Werkzeugtechnik

Beim Planschleifen mit Planetenkinematik kommen in Abhängigkeit vom zu bearbeitenden Werkstoff die gleichen Schneidstoffe zum Einsatz wie bei anderen Schleifverfahren. Zum Schleifen von Eisen- und Stahlwerkstoffen werden Korund und Siliciumkarbid verwendet, für härtere Werkstoffe kommen kubisch kristallines Bornitrid (CBN) und Diamant in Belagsdicken zwischen drei und sechs Millimetern zum Einsatz [Loo89]. Diese Schneidstoffe werden in Kunstharz, keramisch oder metallisch gebunden und auf Grundkörper aus Aluminium oder Stahl aufgebracht [Wol98]. Schleifscheiben sind mit vollflächigen Belägen erhältlich, in die zum verbesserten Transport von Spänen und Kühlschmierstoff Nuten unterschiedlicher Geometrie eingebracht werden können. Es kommen aber auch Pelletscheiben zum Einsatz, bei denen runde oder hexagonale CBN- oder Diamantpellets mit einer speziellen Klebetechnik auf Trägerscheiben befestigt werden. Beide Arten von Schleifbelägen können über dem Schleifscheibenradius Gradienten bezüglich Kornkonzentration und Korngröße aufweisen, wodurch sich ein ungleichmäßiger Verschleiß kompensieren lässt. So empfehlen WOLTERS u. a. [Wol98], die Schleifmittelkonzentration vom Außen- zum Innenradius der Schleifscheibe zu erhöhen, um einen gleichmäßigen Verschleiß der gesamten Belagsfläche zu erzielen. Für die Bearbeitung sehr kleiner Werkstücke oder dünnwandiger Ringe sind vollflächig belegte Schleifscheiben besser geeignet. Schleifmittelpellets ermöglichen die Belegung von Trägerscheiben beliebiger Größe und können bei Beschädigung einzeln ausgetauscht werden. Durch Variation ihrer Anordnung auf der Trägerscheibe können unterschiedliche Belastungen einzelner Bereiche der Schleifbeläge ausgeglichen werden [Kar98a, Stä99].

Die Schneidkörner unterliegen unterschiedlichen Verschleißmechanismen, die in **Bild 2.3** dargestellt sind. In den oberflächennahen Kristallschichten des Korns lösen die Bearbeitungsdrücke und -temperaturen Diffusions- und Oxidationsvorgänge aus. Wird diese Druckerweichungsschicht durch die mechanische Beanspruchung abgetrennt, entstehen Anflächungen. Durch die dynamischen Belastungen, denen das Korn im Prozess ausgesetzt ist, können an Schadstellen im Gittergefüge Ermüdungsrisse entstehen. Die Ausbreitung solcher Risse und die Bildung von Risssystemen können zum Ausbrechen von Kristallgruppen oder ganzer Kornteile führen. Die Bildung einer Anflächung an der Kornschneide kann aufgrund der vergrößerten Kontaktfläche zu einem Anstieg der Reibung und damit der mechanischen Kornbelastung führen, die die Festigkeit des Bindungswerkstoffs übersteigt. In diesem Fall kommt es zum Ausbrechen einzelner Körner oder ganzer Korngruppen [Kön96].

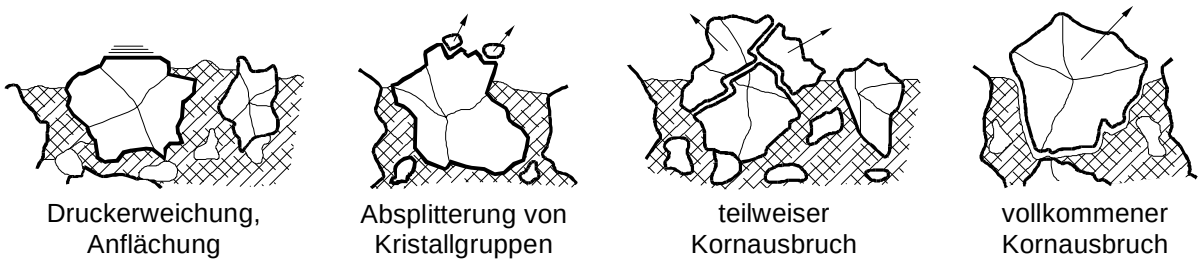


Bild 2.3: Verschleißformen am Schneidkorn [nach Pek58]

Als wichtiges wirtschaftliches Kriterium nennt STÄHLI [Stä99] die Selbstschärfung der Schleifscheiben, die für einen stationären Betrieb erforderlich ist. Teilweise können bis zu 10.000 Werkstückchargen nacheinander ohne Nachschärfen der Schleifscheiben bearbeitet werden. Dem Verschleißvolumen der Schleifscheiben kommt dabei nur eine untergeordnete Bedeutung zu. Wichtiger ist die Vermeidung von ungleichmäßigem Verschleiß, der zu Abweichungen von der ebenen Schleifscheibengeometrie führt. Ebenheitsfehler der Schleifscheiben wirken sich nicht nur negativ auf die Formgenauigkeiten der Werkstücke aus. Ist aufgrund von größeren Formabweichungen ein vollflächiger Kontakt zwischen Werkstücken und Schleifscheiben nicht mehr möglich, so kann dies zu einem wesentlichen Anstieg der Bearbeitungszeiten führen. Wichtigstes Kriterium für den Selbstschärfeffekt ist nach LOOK [Loo89] die Einstellung der richtigen Schleifscheibenhärte, also dem Widerstand der Bindung gegen Kornausbruch. Die Härte einer Schleifscheibe wird über die Spezifikation des Bindungswerkstoffs und die Höhe des Porenanteils festgelegt. Das Korn muss so lange eingebunden bleiben, bis seine Kanten abgestumpft sind. Durch die zunehmenden Reibungskräfte soll es anschließend aus der Bindung herausbrechen. Bricht ein abgestumpftes Korn nicht aus, wirkt es nicht mehr spanend, sondern erzeugt nur noch Reibung. Bricht es zu früh aus, wird der Schneidstoff nicht optimal ausgenutzt. Nach SPUR und WEIGMANN [Spu95d, Wei97] ist ein hauptzeitparalleles Schärfen der Schleifbeläge bei Verfahren mit flächenhaftem Eingriff nicht möglich. Sie definieren den Selbstschärfbereich als Gleichgewicht zwischen Abstumpfen und Regeneration von Kornschneiden. Durch Kornabstumpfen geht bei kraftgebundener Zustellung die Reibung zwischen den Wirkpartnern zurück, und die Tangentialkräfte und Antriebsmomente nehmen ab. Bei weggebundener Zustellung werden Zwangszustände erzeugt, durch die die Kräfte ansteigen können. Ziel der Prozessauslegung ist ihren Arbeiten zufolge die Einstellung stationärer Bedingungen hinsichtlich der Selbstschärfung der Schleifscheiben als Voraussetzung für ein gleichmäßiges Arbeitsergebnis.

Bei Untersuchungen von TÖNSHOFF und ROTH [Rot95, Tön92] zum Schleifen von Aluminiumoxidkeramiken (Al_2O_3) stellten sich nach einer Periode starken Anfangsverschleißes der Schleifscheiben nahezu statische Prozessbedingungen ein. Im stationären Bereich beobachteten sie eine konstante Schleifscheibentopografie und konstante Schleifkräfte. SPUR und UHLMANN [Spu93, Uhl93] stellten beim Tiefschleifen von gesintertem Siliciumnitrid (Si_3N_4) einen stetigen Anstieg der Normalkräfte mit zunehmendem Zeitspanungsvolumen fest, bei dem kein Übergang in einen stationären Bereich stattfand. Als Hauptursachen nannten sie eine unzureichende Selbstschärfung der Schleifscheiben und die Verringerung des Spanraums. SPUR u. a. [Spu89] beurteilten die Schleifbarkeit mehrerer keramischer Werkstoffe anhand der Bearbeitungskräfte, der erzeugbaren Oberflächengüten und des Schleifverhältnisses *G*, welches das zerspante Werkstoffvolumen zum Verschleißvolumen der Werkzeuge ins Verhältnis setzt. Sie stellten für Al_2O_3 eine bessere Schleifbarkeit fest als für heißgepresstes Siliciumnitrid.

SALJE und MÖHLEN [Möh87, Sal87] untersuchten das Verschleißverhalten von Diamantschleifscheiben beim Schleifen unterschiedlicher keramischer Werkstoffe. Bei der Bearbeitung von Si_3N_4 beobachteten sie einen starken Verschleiß der Kornspitzen durch Anflächun-

gen, wodurch die Struktur der Schleifscheibenoberfläche zunehmend eingeebnet wurde. Eine Belastung der Bindung erfolgte nur durch Reibung mit den Werkstückoberflächen. Im Gegensatz dazu beobachteten sie beim Schleifen von Al_2O_3 einen Bindungsverschleiß durch die abrasive Wirkung der abgetrennten Werkstoffpartikel. Als Folge dieses Bindungsverschleißes stellte sich ein gleichbleibend großer Überstand der Schneidkörner über das Bindungsniveau hinaus ein, der den Kornausbruch als vorherrschende Verschleißform begünstigt. Angeflachte Kornspitzen beobachteten sie bei diesem Werkstoff nur in Ausnahmefällen.

Abtrennmechanismen

Die beim Planschleifen mit Planetenkinematik wirksamen Mechanismen der Werkstoffabtrennung unterscheiden sich nicht grundsätzlich von denen anderer Schleifverfahren. Als Besonderheiten sind jedoch die recht niedrigen Schleifdrücke und -geschwindigkeiten sowie die großen Kontaktlängen zu nennen, die sich durch die flächenhafte Berührung von Werkstücken und Schleifscheiben ergeben.

Bild 2.4 zeigt zwei Darstellungen der Spanbildung beim Schleifen, die von KÖNIG [Kön96] für duktile und von SALJE [Sal87] für sprödharte Werkstoffe entwickelt wurden. Nach der Beschreibung von KÖNIG dringt ein Schneidkorn auf seiner Bewegungsbahn in einen duktilen Werkstoff ein. In Abhängigkeit von der Eindringtiefe ergeben sich Bereiche elastischer Verformungen, die in plastisches Fliessen und Werkstoffabtrennung übergehen. Ein plastisches Verformen des Werkstoffs ist nach SALJE bei sprödharten Werkstoffen nicht möglich. Die Werkstoffabtrennung beruht hier auf der Ausbildung von Mikrorissen, die sich vernetzen und dadurch einzelne Partikel aus der Oberfläche lösen.

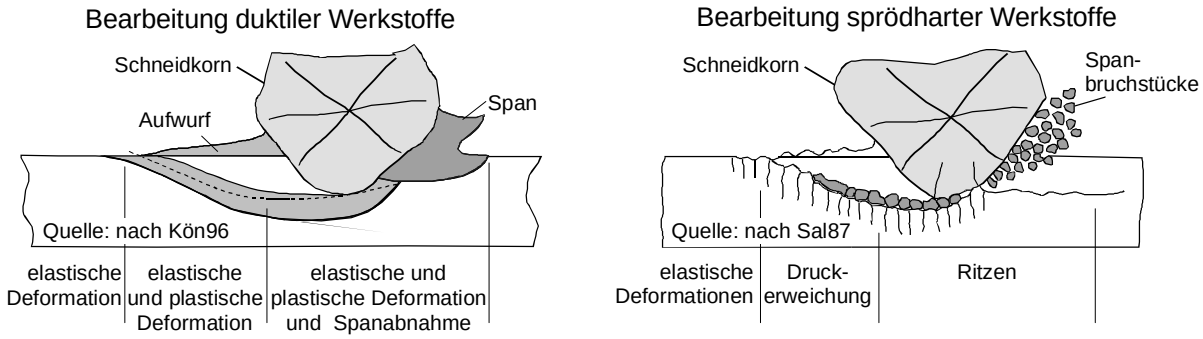


Bild 2.4: Spanbildung bei duktilen und sprödharten Werkstoffen [Kön96, Sal87]

In der Erforschung der Abtrennmechanismen spiegelt sich die Entwicklung vom Läppen zum Planschleifen mit Planetenkinematik wider. So haben sich mehrere Autoren mit den unterschiedlichen Abtrennmechanismen beim Läppen mit rollendem oder mit verankertem Korn beschäftigt, die auch für das Planschleifen mit Planetenkinematik von Interesse sind. SPUR u. a. [Spu87a, Spu87b] sowie SIMPFENDÖRFER [Sim88] wiesen beim Läppen von Keramiken sowohl das Auftreten läpptypischer, ungerichteter Kraterstrukturen durch stochastischen

Korneingriff als auch Ritzspuren nach, die durch in der Läppscheibe verankerte Schneidkörner entstehen.

ABRAHAMSON u. a. [Abr91] untersuchten die Abtrennmechanismen bei der Bearbeitung von Metallen und Keramiken durch Läppen und Schleifen unter unterschiedlichen Kühlschmierbedingungen. Sie bestimmten die am Werkstück wirkenden Kräfte während der Bearbeitung und stellten fest, dass für die Zerspanung durch Schleifen höhere spezifische Energien erforderlich sind als für das Läppen. Sie erreichten bei der Bearbeitung keramischer Werkstücke unter Verwendung von Öl wesentlich höhere Zeitspanungsvolumina als mit Wasser. Abschließend stellten sie fest, dass Gläser und Keramiken durch Läppen wirtschaftlicher zu bearbeiten seien als durch Schleifen.

KOMANDURI und RAMAMOHAN [Kom94] untersuchten die Abtrennmechanismen beim Feinschleifen und Polieren von Keramiken und Gläsern. Sie wiesen bei Werkstoffen, die eine Glasphase enthalten, plastische Verformungen nach und unterteilten die möglichen Abtrennmechanismen in Sprödbruch und plastische Deformation. Sie beschrieben zwei Theorien der Werkstoffabtrennung: Nach der Hypothese des duktilen Schleifens gehen alle Werkstoffe mit abnehmender Zustellung vom Sprödbruchverhalten zu einem duktilen Spanverhalten über. Unterhalb einer Grenzspanungstiefe ist zum Einbringen von Rissen mehr Energie erforderlich als für plastische Deformationen. Eine zweite Hypothese geht davon aus, dass nicht die Höhe der Belastung, sondern die Art des Belastungszustands über das Auftreten von spröden oder duktilen Abtrennmechanismen entscheidet. Durch eine Verminderung der Kornzustellung nimmt zwar die Höhe der Spannung im Werkstoff ab, der Spannungszustand ändert sich aber nicht. Demnach bilden sich bei kleinen Zustellungen nur sehr kleine Risssysteme aus, die sich nicht untereinander verbinden und daher eine andere Oberflächenausbildung zur Folge haben.

Bei mikroskopischen Untersuchungen von Schleifspuren auf Aluminiumoxidkeramiken kam PLUTA [Plu83] zu dem Ergebnis, dass sprödharte Abtrennmechanismen dann überwiegen, wenn die Spanungstiefen die mittlere Größe der Kornstruktur beträchtlich überschreiten. Bei wesentlich geringeren Spanungstiefen überwiegen seinen Beobachtungen zufolge plastische Formänderungen des Werkstoffs. Auch TÖNSHOFF und ROTH [Roth95, Tön92] beschäftigten sich intensiv mit den Abtrennmechanismen beim Schleifen von Aluminiumoxidkeramik. Als Einflussgrößen auf die Zerspanungsvorgänge identifizierten sie neben Wechselwirkungen zwischen der Werkzeugspezifikation und den Prozessstellgrößen, die sie in der mittleren Spanungsdicke am einzelnen Schneidkorn zusammenfassten, das keramische Gefüge als wesentlichen Faktor. Im Bereich großer Einzelspanungsdicken wiesen sie spödbrüchiges Werkstoffverhalten nach, bei dem die Werkstoffabtrennung zumeist durch Mikrobruchvorgänge bestimmt wird. Für sehr kleine Einzelspanungsdicken beschrieben sie ein duktiles Verhalten der Al_2O_3-Keramiken, bei dem keine Bruchmechanismen, sondern ausschließlich plastische Verformungen auftreten und welches auf die Bearbeitung mit sehr feinen Körnern begrenzt ist. Die zum duktilen Abtrennen erforderliche spezifische Energie ist ihren Arbeiten zufolge aufgrund des hohen Anteils an Reibarbeit wesentlich höher als im Sprödbruchbereich. In der Praxis kommen beide Abtrennmechanismen gleichzeitig vor.

Im Rahmen der Untersuchungen von SALJE und MÖHLEN [Möh87, Sal87] zeigten sich beim Schleifen von gesintertem Si_3N_4 stark wechselnde Schleifkräfte, die sie auf diskontinuierliche Änderungen des Schärfezustandes der Schleifbeläge zurückführten. Auch bei Si_3N_4 ist ein Übergang von der plastischen Verformung zum Auftreten spröder Trennmechanismen zu beobachten [Spu89]. Mit zunehmender Spanungstiefe zeigen sich verstärkt Abplatzungen, die im Ritzgrund teilweise zu Schuppen übereinandergeschoben werden. Eine starke Abhängigkeit vom Werkstoffgefüge ist hier nicht festzustellen. Nach WÖTTING u. a. [Wöt96] bildet sich beim Sintern von Si_3N_4 an den Außenflächen der Werkstücke eine sogenannte Sinterhaut, deren Werkstoffkennwerte sich von denen des Kernmaterials unterscheiden. Zur Herstellung homogener Bauteileigenschaften ist eine Bearbeitung also auf jeden Fall erforderlich.

Kühlschmierung

Hauptaufgabe des Kühlschmierstoffs ist die Ableitung von Wärme und Zerspanungsprodukten aus der Kontaktzone sowie die Verminderung der Reibung zwischen den Wirkpartnern. Dazu sind eine gute Benetzung und gutes Haftvermögen, Druck- und Temperaturbeständigkeit sowie Korrosionsschutz erforderlich. Nach der VDI-Richtlinie 3396 werden die Kühlschmierstoffe nach ihrer Mischbarkeit in Wasser unterteilt. Der Bereich der wassermischbaren Arten umfasst Emulsionen und Lösungen.

STORR [Sto89] wies darauf hin, dass mit Schleifölen beim Planschleifen mit Planetenkinematik in der Regel sowohl bezüglich der Werkstückqualität als auch hinsichtlich des Schleifscheibenverschleißes bessere Ergebnisse zu erzielen seien als mit wassermischbaren Produkten. Auch HASSE [Has89] berichtete bei Verwendung von Schleiföl von bis zu dreimal höheren Zeitspanungsvolumina und verbesserten Oberflächengüten gegenüber dem Einsatz von Emulsion. Seiner Meinung nach sind Schleiföle zusätzlich vorteilhaft zur Reduzierung des Werkzeugverschleißes und eignen sich zur Herstellung guter Formgenauigkeiten. Beide Autoren begründeten ihre Aussagen mit der reduzierten Reibung und der verringerten Wärmebildung aufgrund der besseren Schmierfähigkeit von Öl. STORR [Sto89] formulierte die Regel, dass Öle mit abnehmender Viskosität höhere Zeitspanungsvolumina ermöglichen. Nach dem Abfallgesetz von 1986 sind benutzte Schleiffluide grundsätzlich als Sondermüll zu entsorgen. Dieser Punkt trägt dazu bei, dass aus wirtschaftlicher Sicht der Einsatz von Emulsionen oder Lösungen zumeist erheblich günstiger ist als die Verwendung von Ölen.

SPUR und BRÜCHER [Brü96, Spu94] untersuchten die Auswirkung der Kühlschmierstoffauswahl auf die Bearbeitbarkeit von Siliciumnitrid durch Umfangsschleifen. Sie schreiben der Ölsorte und seiner Viskosität einen deutlichen Einfluss zu. Die Zusammensetzung von Lösungen und Emulsionen sowie die Additivierung von Schleifölen sind nach ihren Ergebnissen nur von untergeordneter Bedeutung. Bei der Bearbeitung von Si_3N_4 mit wassergemischten Kühlschmierstoffen stellten sie wesentlich stärkere Kraftanstiege mit steigendem Zerspanungsvolumen fest als bei der Verwendung von Schleifölen. Diesen Effekt führten sie auf einen erhöhten Kornmikroverschleiß und -ausbruch bei den wassergemischten Kühlschmierstoffen zurück, der sich auch in einem insgesamt deutlich erhöhten Verschleißvolumen zeigte.

ROTH [Rot95] beschäftigte sich mit dem Einfluss des Kühlschmierstoffs beim Schleifen von Al_2O_3. Er stellte unter Verwendung von Öl im Vergleich zu wasserbasierten Kühlschmierstoffen einen wesentlich niedrigeren Anstieg der Schleifkräfte mit zunehmendem Spanungsvolumen und einen geringeren Gesamtverschleiß der Schleifscheiben fest.

HASSE [Has89] betonte den Einfluss der Reinigung des Kühlschmierstoffs auf die Oberflächengüten, die Maßgenauigkeiten und die Verschleißverhältnisse. Auch zur Schonung der Maschinen trage eine Filtration des Kühlschmierstoffs bei. Als Richtwert gab er an, dass Filtersysteme Partikel ab der zehnfachen Größe der gewünschten Rautiefe aus dem Kühlschmierstoff herausfiltern sollten. WEBER [Web89] wies darauf hin, dass temperaturbedingte Änderungen der Viskosität des Kühlschmierstoffs die Filtergüte erheblich beeinflussen können. WARNECKE u. a. [War94] verglichen handelsübliche Kühlschmierstoff-Reinigungsanlagen unterschiedlicher Wirkungsweisen. Bei einem Vergleich der Abscheidevermögen unterschiedlicher Reinigungssysteme kam BRÜCHER [Brü96] zu dem Ergebnis, dass die zum Planschleifen mit Planetenkinematik üblicherweise eingesetzten Zentrifugen keramische Partikel oberhalb eines Durchmessers von etwa 3 bis 4 µm abscheiden können. Nach seinen Messungen lag der Feststoffgehalt der filtrierten Fluide unterhalb von 100 mg/l.

ERBEL [Erb89] erarbeitete eine Übersicht über die Möglichkeiten zur Reinigung feinbearbeiteter Oberflächen. Ausschlaggebend sind seiner Arbeit zufolge die Empfindlichkeit des zu reinigenden Werkstücks und der während der Bearbeitung verwendete Kühlschmierstoff. Sowohl wasserlösliche Kühlschmierstoffe als auch Öle seien in wässrigen Reinigungssystemen gut zu entfernen.

Kinematik

Nahezu sämtliche Untersuchungen zur Bearbeitungskinematik beim Planbearbeiten auf Zweischeibenmaschinen stammen aus dem Bereich des Läppens. Für diese konventionelle Technologie wurde schon früh ein Zusammenhang zwischen der relativen Bewegung der Wirkpartner und dem Profilverschleiß der Läppscheiben vermutet und nachgewiesen. Motivation für die meisten Arbeiten war es, Strategien zur Minimierung des Profilverschleißes der Werkzeuge zu entwickeln.

LEONARDO DA VINCI [Vin1493] skizzierte bereits in der Zeit um 1493 Maschinen, bei denen durch flächenhaften Kontakt sowie ständig wechselnde Bearbeitungsrichtungen und Geschwindigkeiten Werkstücke auf Scheiben planbearbeitet wurden. Bei der Skizze links in **Bild 2.5** handelt es sich um eine Poliermaschine zur Einebnung und zum Polieren von Spiegeln aus Stahl und anderen Werkstoffen. Über ein Wasserrad und ein Getriebe erfolgte der Antrieb der Werkzeugscheibe. Der mit dieser Scheibe fest verbundene innere Stiftkranz versetzte die ortsfest gelagerten Werkstückhalter in Rotation. Bewegt man in der rechts dargestellten Skizze den Werkstückhalter per Hand um das Zentrum der Werkzeugscheibe, so wird er durch die Verzahnung zusätzlich in eine Rotation um sein eigenes Zentrum versetzt. Die Problematik des inhomogenen Werkzeugverschleißes war DA VINCI bekannt. So schrieb er zu der rechts

dargestellten Skizze: „Bei der Bewegung im Kreis ist immer der in der Nähe des Mittelpunkts befindliche Teil langsamer als der entferntere Teil. Aufgrund des Gesagten verbraucht sich also das Rad um so stärker, wenn der Ort, auf dem es sich bewegt, an der Außenseite liegt, als wenn er gegen die Mitte zu liegt. Und dadurch kommt es, daß sich die Kontaktstellen des genannten Rades mit der Fläche, auf der es sich bewegt, bei dem sich stärker verschleißenden Material aushöhlen. Aber hier hat sich die Kunst mit der zusammengesetzten Bewegung geholfen, (...) und diese verhindert die Aushöhlung.“ [Vin1493]. Aufgrund der Kopplung zwischen Werkzeugscheibe und innerem Stiftkranz können die Bahnbewegungen der Werkstücke bei diesen Maschinen nicht variiert werden.

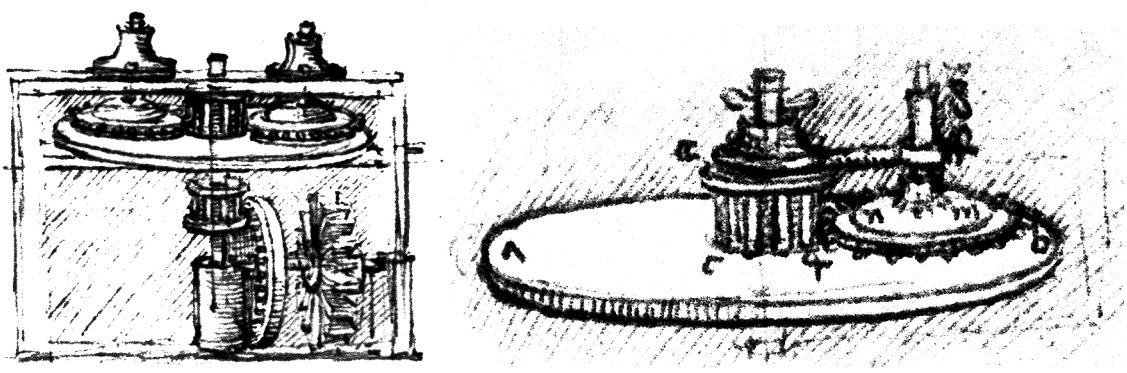


Bild 2.5: Abwälzvorrichtungen zum Polieren von Spiegeln [Vin1493]

Für die Läppbearbeitung auf Zweischeibenmaschinen wurde ein ähnliches, aber flexibleres Antriebskonzept erst in den fünfziger Jahren des 20. Jahrhunderts eingesetzt. FINKELNBURG [Fin53] beschrieb 1953 die Entwicklung der heute noch gebräuchlichen Abwälzvorrichtung aus zwei Stiftkränzen und Werkstückhaltern. Durch Langzeitbelichtung einer Filmplatte ermittelte er fotografisch zykloidale Bewegungsbahnen eines gekennzeichneten Werkstückpunkts. Für besonders günstig hielt er diejenigen Bewegungsbahnen, die sich erst nach vielen Umdrehungen um das Scheibenzentrum wieder schließen. Er wies auf die Abhängigkeit des Läppscheibenverschleißes von der Geometrie der Werkstücke hin. Als Kenngröße für den Verschleiß einer Läppscheibe als Funktion ihres Radius nannte er die Übereinstimmung von Tangentialgeschwindigkeit der Läppscheibe und Überdeckungshäufigkeit durch die zykloiden Bewegungskurven.

LICHTENBERGER [Lic54] formulierte die Hypothese, dass der Profilverschleiß einer Läppscheibe der Verteilung der Werkstückbahnen über dem Schleifscheibenradius, der sogenannten Bahnlängenverteilung, proportional sei. Er unterteilte die Läppscheibenoberfläche in ringförmige Klassen gleicher Breite und ermittelte grafisch die Weglängen der Werkstücke in den einzelnen Klassen. Auch STAUDINGER [Sta55] wies auf die grundsätzliche Bedeutung der Bewegung des Werkstücks gegenüber dem formübertragenden Gegenstück beim Läppen hin. Aufgrund ihres optischen Eindrucks bewertete er verschiedene Bahnkurven als günstig oder ungünstig für die Abnutzung der Läppscheibe.

In den sechziger und siebziger Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts beschäftigte sich FISCHER [Fis64] mit den Bewegungsabläufen unterschiedlicher Läpptechnologien. Er analysierte die kinematischen Systeme von Planläppmaschinen mit Zwangsführung und Reibungskopplung ebenso wie die Bewegungsverhältnisse an Schwingkäfig-, Schwingscheiben- und Pendelläppmaschinen. Für die Selbstkorrektur von Werkstück- und Läppscheibenebenheiten formulierte er die Bedingung, dass sich die obere Läppscheibe „den Abmessungen der Werkstücke durch entsprechende Pendelbewegungen und axiale Verschiebemöglichkeiten anpassen kann, d. h. die eine Läppscheibe wird in axialer Richtung durch das Werkstück selbst geführt". Er berechnete epi- und hypozykloide Bahnkurven einzelner Werkstückpunkte auf der Läppscheibe und vermutete einen Zusammenhang zwischen der Liniendichte und dem Verschleißverhalten. Für eine maximale Oberflächenqualität hielt er ein gleichmäßiges Anströmen des Werkstücks durch das Läppfluid aus allen Richtungen für erforderlich. Eine optimale Bewegungsform konnte er nicht ermitteln. Zur Vorhersage des Zerspanungsvolumens sowohl am Werkstück als auch an den Läppscheiben entwickelte er die Theorie der Überdeckung und berechnete die flächenhafte Kontaktierung zwischen Werkstücken und Läppscheiben. Weiterhin identifizierte er die Anordnung der Werkstücke als gütebestimmenden Faktor und bildete erstmals die Halterbelegung durch eine zweidimensionale Funktion nach. Die Überdeckungen zwischen Werkstücken und Läppscheiben ermittelte er weiterhin grafisch [Fis65a, Fis65b. Fis65c, Fis66, Fis70]. Experimentelle Verifikationen der Theorien finden sich in seinen Arbeiten nicht.

BER und GUEVA [Ber68] bildeten die kinematischen Bewegungsverhältnisse der reibungsgekoppelten Läppbearbeitung grafisch nach. Sie simulierten den Profilverschleiß der Läppscheiben und wiesen diese Profile in experimentellen Untersuchungen nach. SWAN [Swa73] maß der Bewegung der Werkstückhalter auf der Läppscheibe eine größere Bedeutung für den Prozess bei als dem Scheibenwerkstoff und dem Läppdruck. Seiner Meinung nach sind durch kinematische Variationen die Zeitspanungsvolumina in weiten Grenzen gezielt steuerbar. Experimentelle Ergebnisse legte er allerdings nicht vor.

ERMAKOVA und SAVELOVA [Erm77] beschrieben den Einfluss der Kinematik auf den Prozessverlauf in der Art, dass das Zeitspanungvolumen durch zyklische Geschwindigkeitsänderungen ansteigt. Die unterschiedlichen Geschwindigkeiten, denen die Werkstücke gegenüber der Läppscheibe ausgesetzt sind, errechneten sie vereinfacht aus den mathematischen Grundlagen der Getriebelehre. Wie auch Fischer schon vorgeschlagen hatte, benutzten sie ihre kinematischen Betrachtungen nicht nur zur Analyse von Läppprozessen, sondern auch zum Vergleich von Maschinen unterschiedlicher Bauart.

BOUTZAKIS und MITSI [Bou82] stellten 1982 ein Modell des einseitigen Läppprozesses vor, welches neben der relativen Bewegung auch die Druckverteilung zwischen zwei Wirkpartnern berücksichtigt. Neben dem Zeitspanungsvolumen simuliert ihr Modell auch die herstellbaren Rautiefen, wobei hier als Startwert die Ausgangsrautiefe des Werkstücks zu Beginn der Bearbeitung herangezogen wird.

SPUR und SIMPFENDÖRFER [Sim88, Spu86] formulierten ein makrokinematisches Modell für das einseitige, zwangsgeführte Läppen zwischen zwei Stiftkränzen. Sie abstrahierten die mathematische Beschreibung von den einstellbaren Drehzahlen auf die Winkelgeschwindigkeit der Werkstückhalter um ihr eigenes Zentrum und die Winkelgeschwindigkeit, mit der die Werkstückhalter um das Schleifscheibenzentrum kreisen. Auf diese Weise gelang ihnen der Nachweis, dass Maschinen mit zwei unabhängig voneinander antreibbaren Stiftkränzen kinematisch überbestimmt sind: jede mögliche Bewegungsform lässt sich auch dann erzeugen, wenn einer der beiden Stiftkränze oder die Läppscheibe festgesetzt wird. Sie stellten die Bewegungsgleichungen in einem ortsfesten, maschinengebundenen Koordinatensystem auf und analysierten erstmals die Eigendrehung der Werkstücke in ihren Halteraussparungen. Sie setzten die Beschreibung der Relativbewegungen in einen numerischen Algorithmus um und simulierten mit einem PC-Programm den Profilverschleiß von Läppscheiben bei der Bearbeitung und beim Abrichten. SIMPFENDÖRFER [Sim88] verifizierte diese Modellvorhersagen für die einseitige Bearbeitung von Kaltarbeitsstählen. Er wies experimentell nach, dass bei einer Bewegung der Werkstücke auf exzentrischen Kreisbahnen um das Läppscheibenzentrum die besten Teileebenheiten herstellbar sind. Diese Beobachtungen begründet er mit einem besonders gleichmäßigen Verschleiß der Läppscheiben. Auf der Grundlage dieser analytischen Vorarbeiten entwickelten SPUR u. a. [Spu87b] ein rechnergestütztes System zur Messung von Scheibenverschleißprofilen beim Planläppen.

SPUR und EICHHORN [Spu97] formulierten das von SPUR und SIMPFENDÖRFER [Spu86] entwickelte kinematische Modell in ein mitbewegtes, im Zentrum der Schleifscheibe festes Koordinatensystem um. Auf diese Weise vereinfachten sie die bewegungsbeschreibende Mathematik erheblich, behielten die allgemeine Formulierung für Maschinen mit beweglichem äußeren Stiftkranz aber bei. In weiteren Arbeiten untersuchten SPUR und EICHHORN [Spu95a, Spu95b] die Übertragbarkeit des Verschleißmodells für das einseitige Planläppen auf die Zweischeibenbearbeitung. Sie stellten prinzipielle Übereinstimmungen zwischen den berechneten und den nach kurzer Bearbeitungszeit gemessenen Profilen fest. Mit zunehmender Bearbeitungszeit kam es jedoch nicht zu proportionalen Verstärkungen der Profilabweichungen, sondern zu einem gleichmäßig flächenhaften Verschleiß der unteren Läppscheibe unter Beibehaltung des ursprünglichen Verschleißprofils. Diese Abweichung von der Modellvorhersage wurde mit zunehmender Abweichung der Wirkpartner von der vorausgesetzten, ideal ebenen Geometrie und den Wechselwirkungen zwischen beiden Läppscheiben begründet.

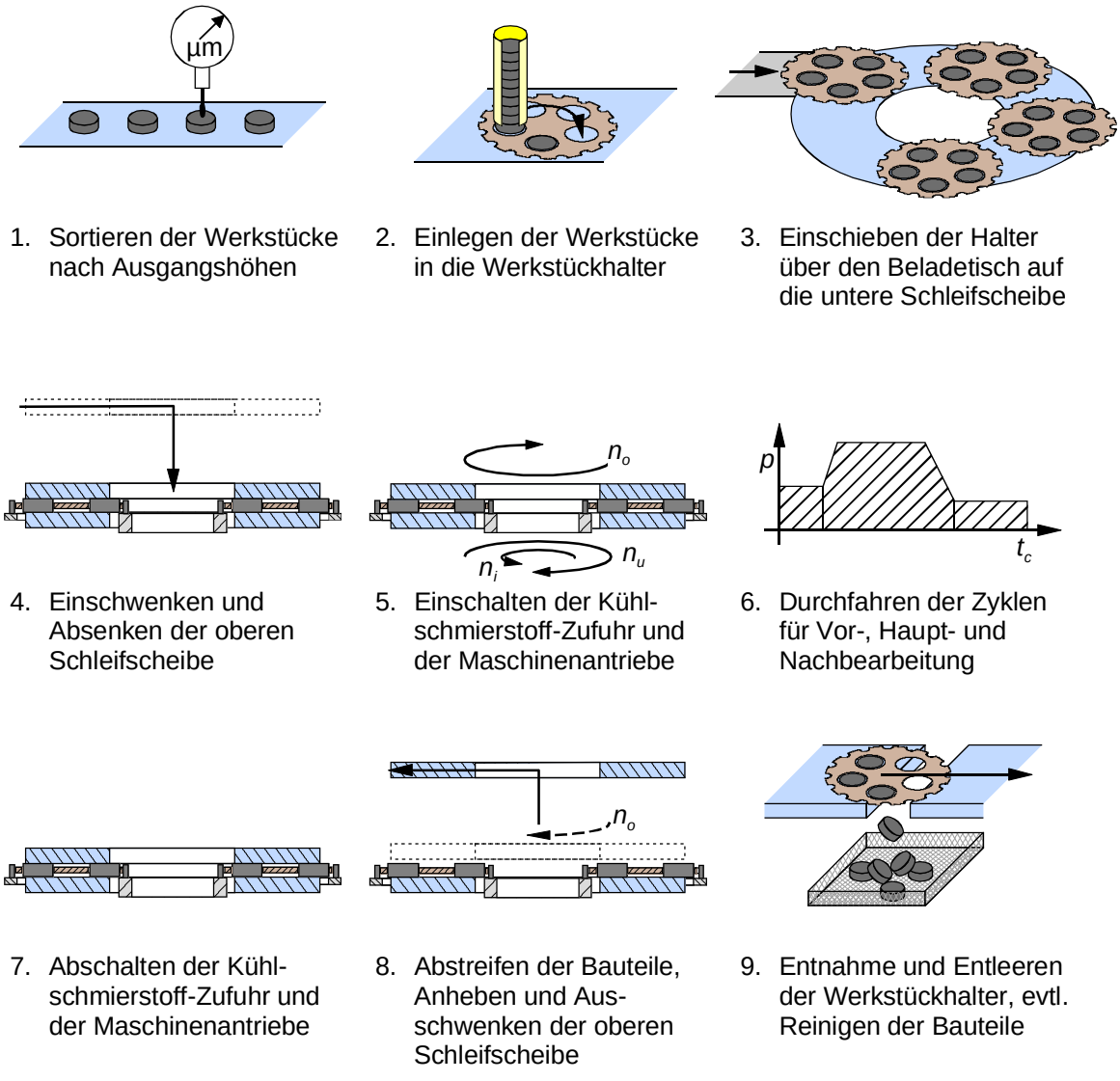
DENNIS und V. MACKENSEN [Den96] wiesen bezüglich der Schleifbearbeitung zwischen zwei Scheiben erstmals darauf hin, dass die Wahl der Antriebsdrehzahlen von Schleifscheiben und dem inneren Stiftkranz nicht nur den Verschleiß der Schleifscheiben entscheidend beeinflusst, sondern auch von großer Bedeutung für das Bearbeitungsergebnis ist. Informationen über den Zusammenhang zwischen Kinematik und Arbeitsergebnis gaben sie allerdings nicht.

CHANG u. a. [Cha99] bildeten die kinematischen Prozessbedingungen erstmals nicht für das Läppen, sondern im Hinblick auf das Planschleifen mit Planetenkinematik nach. Sie entwickelten eine Abtrennhypothese, nach der das zerspante Volumen sowohl an den Schleifscheiben als auch an den Werkstücken proportional ist zum Produkt aus der zurückgelegten Bahn-

länge und dem dabei herrschenden Schleifdruck. Den Druck nahmen sie als über der gesamten Schleifscheibenfläche konstant an. Sie schlugen vor, ihren theoretisch ermittelten Schleifscheibenverschleißprofilen durch eine geeignete Anordnung von Pellets entgegenzuwirken.

Ablauf der Arbeitsoperation

In **Bild 2.6** sind die wichtigsten Prozessschritte beim Planschleifen mit Planetenkinematik in ihrer zeitlichen Abfolge dargestellt. Diese sind teilweise identisch mit der Bearbeitung durch Planparallelläppen [Eng97, Sab91].



1. Sortieren der Werkstücke nach Ausgangshöhen
2. Einlegen der Werkstücke in die Werkstückhalter
3. Einschieben der Halter über den Beladetisch auf die untere Schleifscheibe
4. Einschwenken und Absenken der oberen Schleifscheibe
5. Einschalten der Kühlschmierstoff-Zufuhr und der Maschinenantriebe
6. Durchfahren der Zyklen für Vor-, Haupt- und Nachbearbeitung
7. Abschalten der Kühlschmierstoff-Zufuhr und der Maschinenantriebe
8. Abstreifen der Bauteile, Anheben und Ausschwenken der oberen Schleifscheibe
9. Entnahme und Entleeren der Werkstückhalter, evtl. Reinigen der Bauteile

Bild 2.6: Die Einzelschritte einer Bearbeitung durch Planschleifen mit Planetenkinematik

Die Schritte eins bis drei und neun sehen je nach Maschinenausstattung und Seriengröße unterschiedlich aus: eine vollautomatisierte Be- und Entladung lohnt sich nur in der Fertigung sehr großer Stückzahlen. Bei kleinen oder mittleren Serien verbleiben die Halter oft in der

Maschine, und das Einlegen und Entnehmen der Werkstücke erfolgt per Hand. Das Absenken der oberen Schleifscheibe muss so feinfühlig erfolgen, dass spröde und empfindliche Werkstücke nicht beschädigt werden. Im Gegensatz zum Läppen ist eine Benetzung der Wirkflächen mit dem Kühlschmierstoff vor dem Starten der Antriebe nicht unbedingt erforderlich. Die Vorbearbeitung dient zum Nivellieren der Teilehöhen. Während der Haupt- oder Schruppbearbeitung wird der größte Teil des Werkstoffvolumens abgetrennt. Nach einer festgelegten Zeit oder bei Erreichen eines Restaufmasses schaltet die Maschine auf die Nachbearbeitungs- oder Schlichtphase um, in der die Qualität der bearbeiteten Funktionsflächen optimiert wird. Während die Maschinen einiger Baureihen diese drei Bearbeitungsphasen ausschließlich über eine Druckänderung realisieren, erlauben andere Steuerungen auch die Anpassung der Antriebsdrehzahlen von Schleifscheiben und Stiftkränzen. Nach dem Abschalten der Antriebe wird die obere Schleifscheibe unter einer leichten Drehung geringfügig angehoben, um anhaftende Werkstücke abzustreifen. Ein Reinigen der Werkstücke ist nicht in jedem Fall erforderlich; insbesondere bei der Verwendung von Öl als Kühlschmierstoff können anhaftende Fluidreste zur Konservierung der Werkstücke bis zum nächsten Bearbeitungsschritt dienen.

2.2 Eigenschaften des Verfahrens

Obwohl der Maschinenaufbau zum Planschleifen mit Planetenkinematik vergleichsweise einfach gestaltet ist, wird der Bearbeitungsprozess von vielen Parametern beeinflusst. **Tabelle 2.1** stellt diese Parameter unterteilt in die Kategorien Maschine, Werkzeug, Halter, Werkstück, Kühlschmierstoff und Prozess dar. Jede dieser Kategorien mit Ausnahme des Kühlschmierstoffs beinhaltet als Untergruppe der allgemeinen technologischen Parameter auch kinematische Merkmale, die sich auf die Bearbeitung auswirken. Vielfach bestehen zwischen den Parametern komplexe Wechselwirkungen. Überschneidungen mit dem Läppen ergeben sich durch den ähnlichen Maschinenaufbau mit der gleichen Kinematik [Eng97, Sab91].

Das Planschleifen mit Planetenkinematik unterscheidet sich im Maschinenaufbau, in der Prozesstechnologie und im Arbeitsergebnis von anderen Schleifverfahren. Die wichtigsten verfahrenstypischen Merkmale sind in **Bild 2.7** aufgelistet. Da es vom Anwendungsfall abhängt, ob einzelne dieser Faktoren Vor- oder Nachteile für den Anwender darstellen, wurde auf eine Bewertung verzichtet.

Ein wichtiger Grund für die zunehmende Verbreitung des Planschleifens mit Planetenkinematik ist in der vergleichsweise unkomplizierten Prozesssteuerung zu sehen. Die obere Schleifscheibe ist durch eine Gelenkkonstruktion über Mitnehmerbolzen mit einer Antriebswelle verbunden und liegt auf den höchsten Werkstückpunkten auf. Profilhöhen an Werkzeug und Werkstücken werden daher bevorzugt abgearbeitet. Verformungen des Maschinengestells wirken sich kaum auf die Lage der beiden Schleifscheiben zueinander aus. Diese Selbstkorrektur der Wirkpartner erlaubt die Herstellung von Flächen, deren Ebenheiten diejenigen der Werkzeuge übersteigen. Die Maschinensysteme kommen daher ohne numerisch gesteuerte

Achsen aus. Von großer Bedeutung für die Arbeitsgenauigkeit ist die Genauigkeit, mit der die aktuelle Höhe der Werkstücke im Prozess bestimmt werden kann.

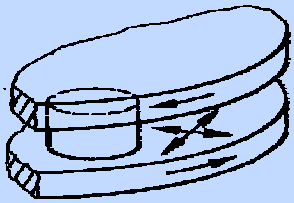
Tabelle 2.1: Parameter beim Planschleifen mit Planetenkinematik

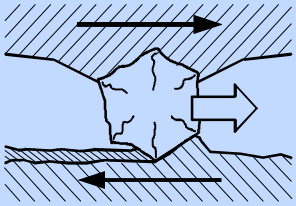
	Parameter des Verfahrens	davon kinematische Parameter
Maschine	Gestellbauweise Baugröße, Bauform, statische, dynamische und thermische Steifigkeit Antriebsleistungen Schleifdruckerzeugung Regelgüte, Hydraulik / Pneumatik Steuerung integrierte Messsysteme, Umfang der programmierbaren Prozessstufen Schleifscheibentemperierung Automatisierungsgrad	Radien der Stiftkränze maximale Halteranzahl maximale Bedeckung des Schleifbelags kinematische Flexibilität Anzahl der unabhängigen Antriebe maximale Drehzahlen der einzelnen Antriebe
Werkzeug	Spezifikation Kornart, -größe, -form, -konzentration, Bindungswerkstoff, Porenanteil Betriebszustand Schärfe, Ebenheit, Temperatur Grundkörperwerkstoff mechanische und thermische Steifigkeit	Geometrie des Belags Innen- und Außenradius Nutung oder Segmentierung des Schleifbelags, Anordnung von Pellets
Halter	Werkstoff Steifigkeit, Abriebfestigkeit, Verschleißfestigkeit, Dämpfungsverhalten Verzahnung Laufruhe	Halteranzahl Geometrie Anordnung und Anzahl der Aussparungen Überlauf über den Schleifscheibenrand Winkellage in der Maschine
Werkstück	Werkstoff Festigkeit, Härte, Gefügestruktur, thermische Eigenschaften Vorbearbeitungszustand Ebenheiten, Rauheiten, Höhenstreuung	Geometrie Rotationssymmetrie, Flächeninhalt an Ober- und Unterseite Anzahl Anordnung im Halter
KSS	Art des Kühlschmierstoffs Viskosität, Oberflächenspannung, Wärmeleitfähigkeit, Rostschutz Zuführung Volumenstrom, Ort der Zuführung Aufbereitung Reinigung, Temperierung	
Prozess	mittlere Bahngeschwindigkeit Schleifdruck Belegung Obere Schleifscheibe pendelnd / fixiert	Bewegungsform Bahnformgeometrie, Krümmung, Geschwindigkeit und Beschleunigung, Bahnlängenverteilung Schleifscheibendrehrichtung Drehrichtung von Ober- und Unterscheibe

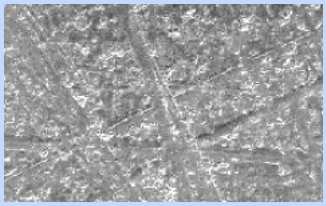
Aufgrund des flächenhaften Kontakts der Werkstücke und der vergleichsweise niedrigen Arbeitsdrücke unterliegen die Funktionsflächen im Prozess gleichmäßig niedrigen Belastungen, was sich positiv auf einen möglichen Werkstückverzug durch Temperaturgradienten oder Eigenspannungen auswirkt. Ein Nachteil der Planetenkinematik liegt im ungleichmäßigen

Verschleiß, dem die Werkzeugflächen unterliegen. Gegenüber dem konventionellen Schleifen liegen die Schnittgeschwindigkeiten beim Planschleifen mit Planetenkinematik wesentlich niedriger und werden in der Regel in Metern pro Minute angegeben. Die Kontaktlängen zwischen einzelnen Körnern und Werkstücken können den Werkstückdurchmesser noch überschreiten. Der ständige Kontakt der Werkstücke mit dem Werkzeug und die geringen Schleifdrücke führen zu einer besonders gleichmäßigen, schonenden Bearbeitung. Die ständig wechselnden Schnittbedingungen durch die Bearbeitungskinematik sind insbesondere im Bezug auf den Kornverschleiß problematisch [Fun94, Stä99, Tön98a].

Charakteristische Eigenschaften des Planschleifens mit Planetenkinematik







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

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

Bild 2.7: Eigenschaften des Planschleifens mit Planetenkinematik

Im Arbeitsergebnis zeigen die Oberflächen sich undefiniert überlagernde Schleifspuren. Es lassen sich hervorragende Oberflächenqualitäten mit plateauartigen Strukturen erzeugen, die für tribologische Anwendungen gut geeignet sind. Sowohl die Planparallelität der beiden bearbeiteten Flächen eines Werkstücks als auch die Höhenstreuung der gleichzeitig bearbeiteten Werkstücke können verbessert werden. Eine Ausrichtung der Funktionsflächen zur Mantelfläche des Werkstücks ist jedoch nicht möglich, und auch die Verteilung des gesamten Aufmasses auf die Ober- und Unterseite des Werkstücks lässt sich nicht vorhersagen.

2.3 Vorschlag einer normengerechten Verfahrensbezeichnung

2.3.1 Wirk-, Vorschub- und Schnittgeschwindigkeiten

Die Wirkbewegung ist nach DIN 6580 definiert als diejenige Bewegung zwischen Werkzeugschneide und Werkstück, die den Zerspanungsvorgang bewirkt. Sie resultiert aus der Schnitt- und der Vorschubbewegung. Diese Bewegungen zeigt **Bild 2.8** für jeweils einen Punkt der oberen und unteren Schleifscheibe sowie für einen Punkt der Werkstückoberfläche.

Die Schnittbewegung ist als die Bewegung zwischen Werkzeugschneide und Werkstück definiert, die ohne Vorschubbewegung nur eine einmalige Spanabnahme während einer Umdrehung bewirken würde. Diese Konstellation tritt dann auf, wenn die Werkstücke stillstehen und sich die Schleifscheiben drehen. In diesem Fall erzeugt ein aktives Schneidkorn beim ersten Kontakt mit dem Werkstück eine Schleifspur und durchfährt dann seine eigene Spur bei jeder weiteren Scheibenumdrehung. Sobald auch die Werkstücke angetrieben werden, wird ein aktives Schneidkorn aufgrund der zykloidalen Bewegungsbahn seine eigene Schleifspur nicht wieder durchlaufen. Aus diesem Grund ist die Werkstückbewegung eine Vorschubbewegung. Als Schnittbewegung ist beim Planschleifen mit Planetenkinematik die Rotationsbewegung der beiden Schleifscheiben relativ zum ortsfesten, im Maschinenbett ruhenden Koordinatensystem anzusehen.

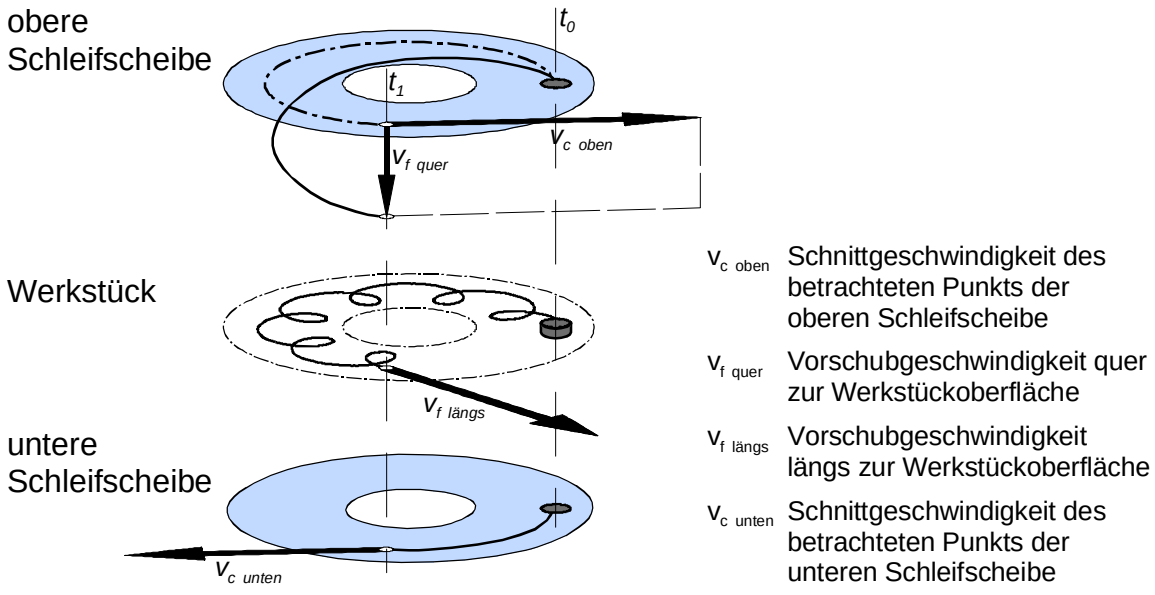


Bild 2.8: Vorschub- und Schnittgeschwindigkeiten beim Planschleifen mit Planetenkinematik

Die Vorschubbewegung besitzt bei diesem Verfahren zwei Komponenten, die von unterschiedlichen Maschinenelementen ausgeführt werden. In Richtung der Schleifscheibendrehachse, also quer zur Werkstückoberfläche, erfolgt das Absenken der oberen Schleifscheibe. Der Vorschubweg in dieser Richtung entspricht dem abzutrennenden Werkstückaufmaß und liegt daher in der Praxis in Bereichen von unter einem Millimeter. Dieser Quervorschub er-

folgt nicht wie bei anderen Schleifverfahren weg-, sondern kraftgebunden durch die Vorgabe einer bestimmten Auflast, die während der Bearbeitung variieren kann. Die Absenkbewegung wird nicht numerisch gesteuert, sondern nur überwacht und bei Erreichen des Sollmaßes abgebrochen. Eine Zustellung, die eine Dicke der abzunehmenden Schicht im voraus bestimmt, kann nicht definiert werden. Das Zeitspanungsvolumen beim Planschleifen mit Planetenkinematik ist daher kein Einstellparameter, sondern eine Prozesskenngröße. Eine Kornspitze der oberen Schleifscheibe führt im Prozess eine nach unten gerichtete, schraubenförmige Bewegung aus. Dieser axiale Vorschub kann im Verlauf eines Bearbeitungsschritts aufgrund sich ändernder Querschnittsfläche oder Härte der Werkstücke oder durch Veränderungen des Schleifscheibenzustands schwanken. Das Hauptmerkmal dieser Bewegung ist sowohl aus steuerungstechnischer als auch aus prozessbezogener Sichtweise nicht die Absenkbewegung der oberen Schleifscheibe, sondern der konstante Schleifdruck in der Kontaktzone.

Werkstück- und Schleifscheibenoberflächen befinden sich in einer Ebene senkrecht zur Scheibendrehachse. In dieser Ebene erfolgt längs zur zu erzeugenden Oberfläche die Führung der Werkstücke auf zykloidalen Bahnkurven. Der Vorschubweg entlang dieser Bahnkurve hängt von der mittleren Bahngeschwindigkeit und der Prozessdauer ab und liegt im praktischen Einsatz des Verfahrens im Bereich zwischen einigen Metern und mehreren Kilometern. Die Bewegung der Werkstücke erfolgt weggebunden durch ein mechanisches Getriebe.

Die untere Schleifscheibe führt eine rein rotatorische Bewegung ohne Vorschubkomponente aus. Hier liegen sowohl die Schnitt- als auch die werkstückseitige Längsvorschubbewegung immer in der Ebene der Scheibenoberfläche, die der Arbeitsebene nach DIN 6580 entspricht. Der Quervorschub der oberen Schleifscheibe kann bei den Betrachtungen der Wirkgeschwindigkeiten aufgrund der unterschiedlichen Größenordnungen der beiden Vorschubbewegungen vernachlässigt werden. Unter dieser Voraussetzung liegen die aus den Schnitt- und der Längsvorschubbewegung resultierenden Wirkbewegungen immer in der Ebene der Schleifscheibenoberflächen, die dann den Arbeitsebenen entsprechen.

Beide Vorschubbewegungen sind für den Prozessverlauf und die Arbeitsgenauigkeit des Verfahrens von Bedeutung. Der kraftgebundene Quervorschub erzeugt einen konstanten Schleifdruck in der Kontaktzone. Die Messung der aktuellen Teilehöhe und insbesondere die Abschaltung dieser Vorschubbewegung regeln die Genauigkeit, mit der die vorgegebene Werkstückhöhe erreicht wird. Die Geschwindigkeit und die geometrischen Parameter des zykloidalen Längsvorschubs beeinflussen maßgeblich das Zeitspanungsvolumen und die Qualität der erzeugten Flächen. Als verfahrenskennzeichnende Vorschubbewegung ist das Zusammenwirken der weggebundenen, zykloidalen Längsvorschubbewegung der Werkstücke mit der kraftgebundenen Quervorschubbewegung der oberen Schleifscheibe anzusehen.

2.3.2 Vorschlag zur Einordnung des Verfahrens ins Normenwerk

Mit der zunehmenden Verbreitung, die das Planschleifen mit Planetenkinematik erfährt, ergibt sich auch Bedarf zur Normung und zur Vereinheitlichung der Verfahrensbezeichnung.

Das Normenwerk gibt bezüglich der Haupt- und Untergruppen einige Hilfestellungen, eine genaue Bezeichnung ist aber bis heute nicht enthalten.

Eindeutig ist die Zuordnung des Planschleifens mit Planetenkinematik nach DIN 8580 in die Hauptgruppe der Fertigungsverfahren „Trennen“ und „Spanen mit geometrisch unbestimmter Schneide“. Die weitere Unterteilung erfolgt in DIN 8589 Teil 0, nach dem das Planschleifen mit Planetenkinematik in die Untergruppe „Schleifen mit rotierendem Werkzeug“ einzuordnen ist. In Teil 11 derselben Norm erfolgt die weitere Untergliederung dieser Verfahren. Nach der Geometrie der zu erzeugenden Flächen und aufgrund der beidseitigen Bearbeitung der Werkstücke ist das Verfahren als Doppelplanschleifen zu bezeichnen. Eine Unterscheidung nach der Lage der Bearbeitungsstelle findet nur beim Schleifen von zylindrischen Innen- oder Außenflächen Anwendung. Aus diesem Grund ist die fünfte Stelle der Ordnungsnummer eine Null. Die sechste Stelle bezeichnet eine Bearbeitung mit der Stirnseite der Schleifscheibe. Die daraus abzuleitende Ordnungsnummer zeigt **Bild 2.9**.

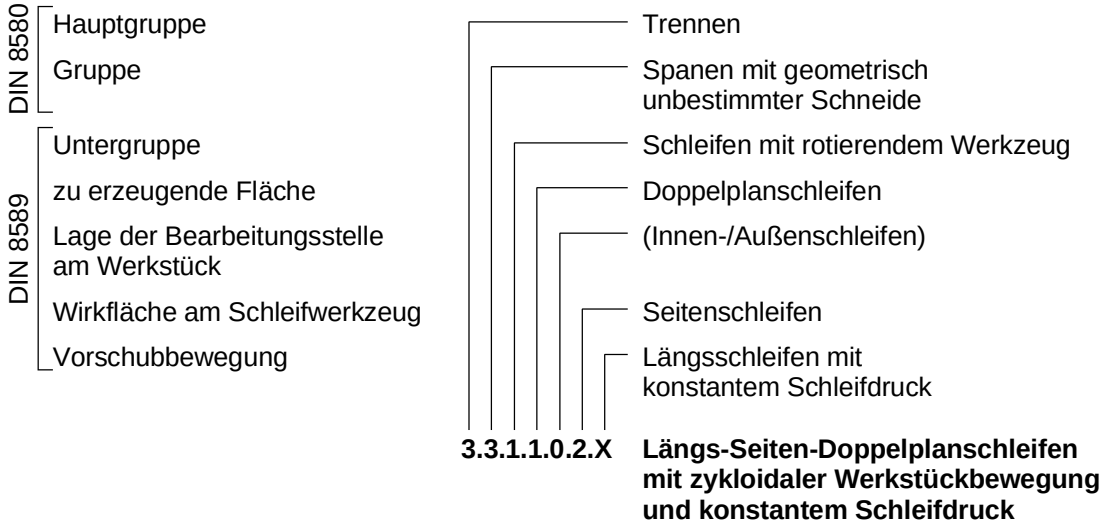


Bild 2.9: Ordnungsnummer des Planschleifens mit Planetenkinematik nach DIN 8580 und DIN 8589

In der siebten Stelle der Ordnungsnummer werden Schleifverfahren nach der Vorschubbewegung unterschieden. Diese besitzt beim Planschleifen mit Planetenkinematik zwei wesentliche Komponenten. Von den neun in DIN 8589 Teil 11 genannten Möglichkeiten zur Beschreibung der Vorschubbewegung wird keine dieser speziellen Verfahrenskinematik gerecht. Eine Einordnung von Verfahren mit kraftgebundenem Vorschub fehlt; auch in DIN 8589 Teil 12 „Bandschleifen“ wird eine kraftgebundene Vorschubbewegung nicht erwähnt. Für den zykloidalen Zwangsantrieb der Werkstücke findet sich im Normenwerk keine Bezeichnung. Eine Benennung für eine weggebundene Werkstückbewegung existiert ebenfalls nicht. Auch im Teil 15 der Norm „Läppen“ findet sich kein Hinweis auf eine normgerechte Bezeichnung für diese spezielle Art des Werkstückantriebs.

Da das Hauptmerkmal des Schleifscheibenquervorschubs nicht die zurückgelegte Wegstrecke, sondern der gleichbleibende Schleifdruck in der Kontaktzone ist, könnten diese Verfahren durch den Zusatz „mit konstantem Schleifdruck“ gekennzeichnet werden. Auf der Grundlage dieser Vorschläge für eine zukünftige Ergänzung des Normenwerks ergibt sich die Verfahrensbezeichnung „Längs-Seiten-Doppelplanschleifen mit zykloidaler Werkstückbewegung und konstantem Schleifdruck“.

2.3.3 Verfahrensbenennung

Der Vorschlag für eine Einordnung des Planschleifens mit Planetenkinematik ins Normenwerk bezeichnet das Verfahren zwar eindeutig, ist aufgrund seiner Länge aber für den praktischen Gebrauch kaum geeignet. Wie problematisch eine Verfahrensbenennung sein kann, zeigt sich in der Fachliteratur, nach der allein im deutschsprachigen Raum eine Unmenge unterschiedlicher Begriffe für das Planschleifen mit Planetenkinematik verwendet werden. Aufgrund der fehlenden Normung und der ungewöhnlichen Kinematik des Verfahrens haben Unternehmen und Institute eigene Benennungen geprägt. Die von den Maschinenherstellern verwendeten Begriffe sind den Kunden gegenüber zu Markenzeichen geworden, so dass eine nachträgliche Vereinheitlichung schwer fällt. Allen bisherigen Benennungen ist gemeinsam, dass sie sich auf ein Merkmal des Verfahrens oder des Arbeitsergebnisses oder auf die Entstehung des Planschleifens mit Planetenkinematik aus dem konventionellen Läppen beziehen. Eine weitere Gemeinsamkeit besteht leider darin, dass keiner der bisher verwendeten Begriffe eindeutig dem Planschleifen mit Planetenkinematik zuzuordnen ist.

So lässt sich aus den Begriffen Feinschleifen [Ale94, Cla82, Den96, Kar98a, Kar98b, Mac97, Reh00, Web89] und Feinstschleifen [Hes96] zwar auf ein Verfahren zur Herstellung ausgezeichneter Oberflächengüten schließen. Solche Qualitätsmerkmale sind aber nicht auf das Planschleifen mit Planetenkinematik beschränkt, sondern lassen sich mit entsprechenden Werkzeugen und Prozessparametern mit nahezu jedem Schleifverfahren erzielen.

Als Argumente für die Verfahrensbenennungen Flachhonen und Planparallelhonen [Blu87, Kar98a, Mac97, Reh00, Stä97a, Stä97b, Stä98a] werden neben den honähnlichen Relativgeschwindigkeiten auch Übereinstimmungen bei den Bewegungsverhältnissen angeführt. In DIN 8589 Teil 14 wird das Honen als Spanen mit einer Schnittbewegung aus zwei Komponenten bezeichnet, von denen mindestens eine hin- und hergehend ist, so dass die bearbeitete Oberfläche sich definiert überkreuzende Spuren aufweist. Man kann durchaus die Bewegung der Werkstücke beim Planschleifen mit Planetenkinematik als oszillierend und die der Schleifscheibe als rotierend beschreiben. Definierte Bearbeitungsspuren lassen sich aber auch unter Ausschluss einer Eigendrehung der Werkstücke in ihren Halteraussparungen nicht auf den Werkstückoberflächen erzeugen.

Viele Verfahrensbenennungen dokumentieren die Entwicklung des Planschleifens mit Planetenkinematik aus dem konventionellen Läppen, ohne den charakteristischen Unterschieden gerecht zu werden. Die Benennung Läppschleifen [Kar98a, Mac97] weckt nicht so sehr Asso-

ziationen zum Planschleifen mit Planetenkinematik, sondern erinnert eher an das Läppen mit Weich- oder Multimetall-Läppscheiben, in denen sich die Läppkörner zeitweise verankern. Der Bezug auf die speziellen relativen Bewegungen im Begriff Schleifen mit Läppkinematik [Fun94, Uhl99b] ist nicht eindeutig, weil die Läppkinematik ebenso auf das mikroskopische Abrollen der Läppkörner zwischen den Wirkpartnern bezogen werden kann wie auf die makroskopischen Relativbewegungen. Die Verfahrensbezeichung Schleifen auf Läppmaschinen [Fun93, Uhl00] setzt die Kenntnis des läpptypischen Maschinenaufbaus voraus. Auch die Begriffe sauberes Läppen [Stä99, Stäb] und Läppen mit gebundenem Korn [Aba96] deuten mehr auf eine Verfahrensvariante des Läppens als auf einen Schleifprozess hin. Insbesondere der zweitgenannte Begriff ist leicht mit einer Läppvariante zu verwechseln, bei der Schleifmittelkörper bündig in eine Läppscheibe eingelassen werden und während der Bearbeitung einzelne Körner freigeben, die die Werkstücke sodann läppend bearbeiten [Bar99].

Gerade vor dem Hintergrund, dass sich das Planschleifen mit Planetenkinematik durch intensive Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in den letzten Jahren deutlich gegenüber dem Läppen weiterentwickelt hat, ist ein Bezug auf das Läppen in der Verfahrensbenennung als nicht mehr zeitgemäß anzusehen. Umschreibungen wie weiches Schleifen [Stä99] geben jedoch auch keine Vorstellung von den technologischen Gegebenheiten.

Als charakteristisches Merkmal, welches das beschriebene Verfahren eindeutig von anderen Schleiftechnologien abhebt, ist die Form der Relativbewegung zwischen Werkstücken und Schleifscheiben anzusehen. Diese gleicht den Bewegungen von Planetenrädern in einem Planetenrad-Umlaufgetriebe. Die Bewegung aller Werkstücke über unterschiedliche radiale Bereiche der Werkzeugbeläge ist als der eigentliche Grund für die guten Arbeitsergebnisse, aber auch für den unregelmäßigen Werkzeugverschleiß anzusehen. Aus den dargelegten Gründen wird in dieser Arbeit die Verfahrensbenennung Planschleifen mit Planetenkinematik verwendet.

2.4 Anwendungsbeispiele

Aufgrund einer sprunghaften Entwicklung in den letzten Jahren hat sich für das Planschleifen mit Planetenkinematik eine Fülle von Anwendungen aus den unterschiedlichsten technologischen Bereichen ergeben (**Tabelle 2.2**). Noch im Jahr 1989 nannte WEBER [Web89] das Bearbeiten von Keramik und Glas „eindeutig eine Domäne des Läppens“. Heute wird das Planschleifen mit Planetenkinematik vielfach zur Keramikbearbeitung eingesetzt.

Prinzipiell können alle Werkstücke auf Zweischeiben-Schleifmaschinen bearbeitet werden, die zwei planparallele Funktionsflächen aufweisen. Das Werkstoffspektrum ist nur durch eine Mindestfestigkeit begrenzt: die Werkstückkanten müssen der Bearbeitung und dem Transport im Werkstückkäfig standhalten. Um eine stabile Bewegung zu gewährleisten, sollte die Werkstückhöhe den Durchmesser nicht wesentlich überschreiten. Die bearbeiteten Flächen weisen gute Rauheitseigenschaften mit plateauartigen Strukturen auf, die für tribologische Anwendungen geeignet sind. In Abhängigkeit vom Werkstoff und der Werkzeugspezifikation sind

Arbeitsergebnisse möglich, die mit dem Läppen durchaus vergleichbar sind. Gegen eine Bearbeitung durch Planschleifen mit Planetenkinematik und für das Planparallelläppen zwischen zwei Scheiben sprechen eine zu große Härte des Werkstoffs oder zu große Werkstückflächen [Web89].

Für eine Bearbeitung durch Planschleifen mit Planetenkinematik sprechen Anforderungen hoher Dichtheit, langer Lebensdauer, Geräuscharmut oder geringer Reibung [Pau91]. Bedenken hinsichtlich der Dichtwirkungen bedingt durch die schleiftypische Oberflächentopographie haben sich nicht bestätigt. Drucksysteme mit geschliffenen Dichtelementen haben sich im praktischen Einsatz bewährt. Für bestimmte Funktionen können zu feine Oberflächen unerwünscht sein. So müssen beispielsweise Klebeeffekte im Bereich von Ventilzungen an der anliegenden Oberfläche unterbunden werden. Die plateauartige Struktur von mit Planetenkinematik geschliffenen Oberflächen kommt dieser Forderung entgegen [Web89].

Tabelle 2.2: Anwendungsbeispiele für das Planschleifen mit Planetenkinematik

Werkstoffgruppe	**Anwendungsbeispiele**
Eisen Stahl	Zahnräder und Zwischenscheiben für Zahnradpumpen, Flügel und Nutenräder für Flügelzellenpumpen, Rotoren und Statoren in Ölpumpen Ventilplatten für hydraulische oder pneumatische Steuerungen Wälzlagerringe, Stirnflächen von Zylinderrollen, Anlaufscheiben für Axiallager Motorenteile: Abstimmscheiben, Pleuel, Kolbenringe Sonstiges: Kurvenringe, Kupplungs- und Distanzringe, Gleitringe, Messschieber, Fräserdornringe, Schneidräder, Grund- und Zwischenplatten aller Art
Hartmetall	Kreismesser, Wendeschneidplatten, Drehmeißel, Gleitringe
Aluminium	Pumpenteile und -gehäuse Zwischenringe für Festplatten, Festplattengrundkörper Pleuel
Graphit, Kunststoff	Dichtungsringe, Gleitringe
Si_3N_4	Dichtungsringe, Ventileinstellplättchen
Al_2O_3	Regelscheiben für Wassermischer, Dichtscheiben, Benzinpumpendeckel, Gleitringe
ZrO_2	Kolben, Stecker

Quellen: Cla82, Fun94, H&Kb, Jan96, Klo97, Leu00, Stä98, Web89

3 AUFGABENSTELLUNG UND ZIELSETZUNG

Das Planschleifen mit Planetenkinematik bietet die Möglichkeit, Werkstücke mit zwei planparallelen Funktionsflächen in großen Stückzahlen kostengünstig zu bearbeiten. Diese Eigenschaften bewirken in den Bereichen der metall- und keramikverarbeitenden Industrie seit einigen Jahren ein steigendes Interesse am Einsatz dieses Verfahrens, wodurch sich wiederum neue Anwendungsfelder und Einsatzgebiete ergeben. Um diese zu erschließen, werden die Maschinensysteme und die Prozesstechnologie für das Planschleifen mit Planetenkinematik zur Zeit mit viel Energie weiterentwickelt. Zu den treibenden Kräften gehören die Hersteller von Maschinen und Schleifscheiben, die neben der Systemtechnik auch das Know-how für die Bearbeitung an ihre Kunden weitergeben müssen. Auch Lohnbearbeitungsunternehmen, die mit Anforderungsprofilen aus unterschiedlichsten Anwendungsgebieten konfrontiert werden, leisten einen bedeutenden Anteil an der Entwicklung der Prozesstechnologie. Mit ihren praktischen Erfahrungen bei der Werkstückbearbeitung sind industrielle Anwender der universitären Forschung zumeist weit voraus.

Ein Nachteil der weitgehend empirischen Verfahrensentwicklung besteht darin, dass bestimmte Potenziale zur Steigerung der Arbeitsqualität oder der Wirtschaftlichkeit nicht erkannt oder nicht genutzt werden. Hier ist es Aufgabe der universitären Grundlagenforschung, durch systematisches, analytisches Vorgehen Zusammenhänge aufzudecken und die Nutzung versteckter Potenziale zu ermöglichen. Auf das Planschleifen mit Planetenkinematik bezogen beinhaltet beispielsweise die Verfahrenskinematik solche Potenziale. Die Art der Relativbewegungen zwischen Werkstücken und Schleifscheiben wirkt sich nicht nur auf den Verschleiß der Werkzeuge und darüber indirekt auf die Formgenauigkeit der hergestellten Funktionsflächen aus. Sie besitzt vielmehr einen signifikanten Einfluss auf das Zeitspanungsvolumen und die Antriebsmomente von Schleifscheiben und innerem Stiftkranz. Da die Verfahrenskinematik von einer Vielzahl von geometrischen Parametern beeinflusst wird und die Bandbreite der kinematischen Einstellungen unendlich groß ist, lassen sich diese Zusammenhänge mit einer rein experimentellen Vorgehensweise nicht allgemeingültig erfassen.

Den Schwerpunkt dieser Arbeit bilden analytische und experimentelle Untersuchungen bezüglich der Bewegungsformen der Planetenkinematik. Das Gesamtziel besteht darin, die relativen Bewegungen zwischen Werkstücken und Schleifscheiben zu beschreiben und ihre Auswirkungen auf den Prozessverlauf und das Arbeitsergebnis sowohl analytisch zu simulieren als auch experimentell nachzuweisen. Die Arbeitspunkte und Teilziele, die sich aus diesem Gesamtziel ergeben, können den Arbeitsfeldern „Analyse der Planetenkinematik“ und „Experimentelle Untersuchungen“ zugeordnet werden. Aufgrund ähnlicher Verfahrenseigenschaften steht das Planschleifen mit Planetenkinematik in Konkurrenz zum konventionellen doppelseitigen Planparallelläppen. Zur Einordnung wird in einem dritten Arbeitsfeld ein technologischer und ökonomischer Verfahrensvergleich zwischen diesen beiden Verfahren durchgeführt. **Bild 3.1** zeigt die drei Arbeitsfelder mit den jeweiligen Teilzielen.

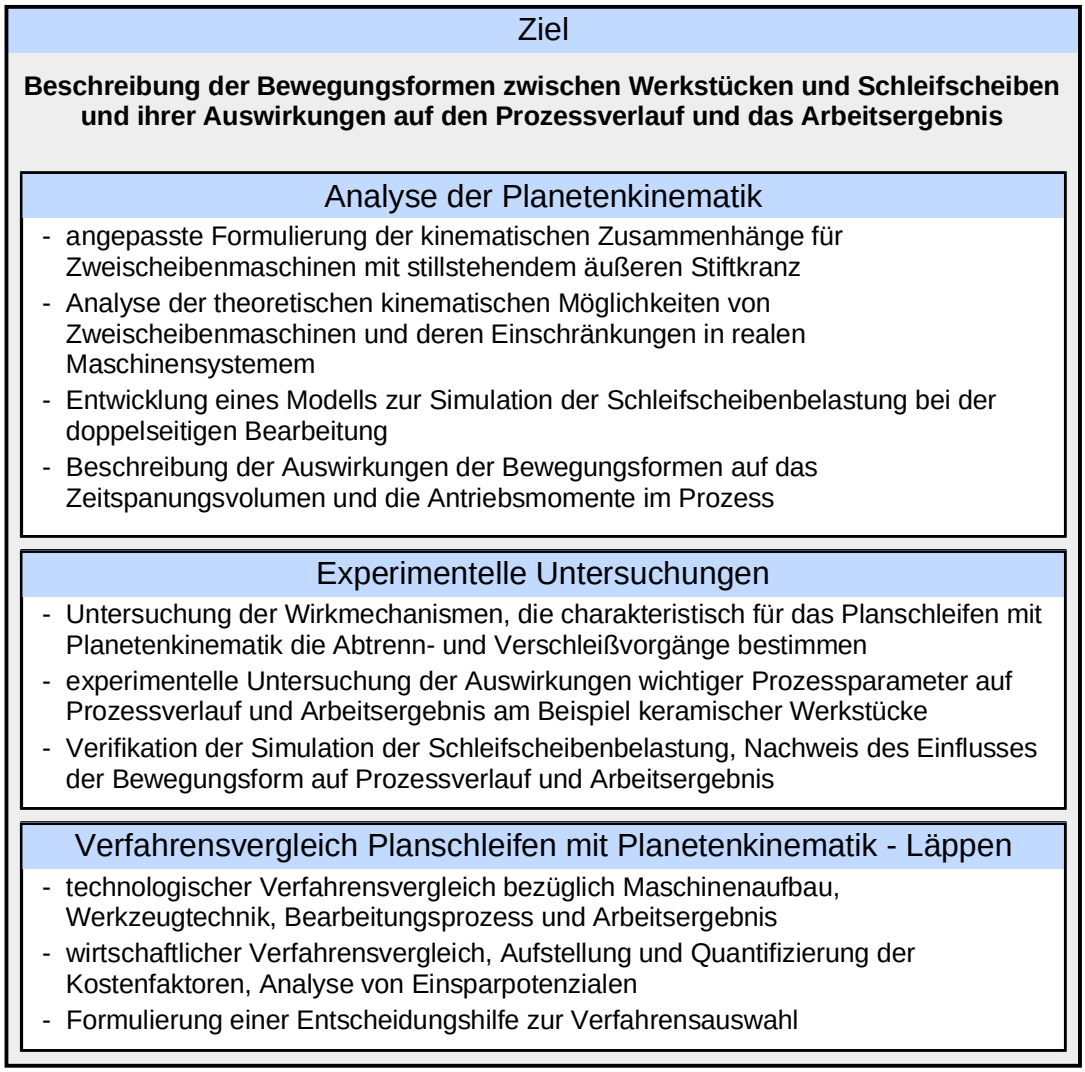


Bild 3.1: Arbeitsfelder und Teilziele dieser Arbeit

Analyse der Planetenkinematik

Die heute gängige mathematische Beschreibung der Bahnkurven, auf denen sich die Werkstücke beim Planschleifen mit Planetenkinematik relativ zu einer der beiden Schleifscheiben bewegen, berücksichtigt die Drehzahlen der Schleifscheibe sowie des inneren und äußeren Stiftkranzes. Jede mögliche Bahnbewegung kann durch unendlich viele Kombinationen dieser drei Drehzahlen erzeugt werden. Daraus ergibt sich der entscheidende Nachteil dieser Beschreibung: sie ist sehr abstrakt. Bildliche Vorstellungen von den Bewegungsverhältnissen im Arbeitsraum sind nur über Umrechnungen möglich. Aus diesem Grund findet diese konventionelle Beschreibung der Planetenkinematik in der industriellen Anwendung nur geringe Beachtung.

Beim weitaus größten Teil aller weltweit existierenden Zweischeibenschleif- und Läppmaschinen ist der äußere Stiftkranz nicht drehbar, sondern fest im Maschinenbett verankert. Alle denkbaren Bewegungsformen sind in diesem Fall durch die beiden Drehzahlen von Schleif-

scheibe und innerem Stiftkranz eindeutig bestimmt. Unter dieser Voraussetzung wird eine vereinfachte Formulierung der mathematischen Beschreibung der Bewegungsformen gesucht. Diese soll einen eindeutigen Zusammenhang zwischen jeder Bahnbewegung und den Einstellparametern herstellen und eine praxistaugliche Anwendung der kinematischen Beschreibung ermöglichen. Auf der Grundlage dieser Beschreibung der Bewegungsformen erfolgt eine Analyse der kinematischen Möglichkeiten, die Zweischeibenmaschinen mit Zahnkränzen in Form eines Planetengetriebes theoretisch bieten. Anschließend werden die Einschränkungen analysiert, denen diese theoretischen Möglichkeiten durch Drehzahlbegrenzungen realer Maschinensysteme unterliegen.

Aufgrund der charakteristischen zykloidalen Bahnkurven, entlang der sich die Werkstücke auf den Schleifscheiben bewegen, verteilen sich die zurückgelegten Wegstrecken und das zerspante Volumen nicht gleichmäßig über alle Bereiche der Schleifscheibenoberfläche. Aus diesen Verteilungen resultieren inhomogene Belastungen, die im Prozess zunehmende Abweichungen der Schleifscheiben von der ebenen Geometrie und unterschiedliche Formen von Kornverschleiß verursachen können. Nur ein gleichmäßiger Verschleiß der gesamten Schleifscheibenoberfläche ermöglicht eine stationäre Bearbeitung über längere Zeiträume. Aufgrund der unendlich großen Bandbreite der kinematischen Einstellmöglichkeiten ist eine praktische Erarbeitung des Zusammenhangs zwischen Drehzahlen und Schleifscheibenverschleiß nicht mit vertretbarem Aufwand möglich. Daher ist für das Planschleifen mit Planetenkinematik eine Zerspanungshypothese zu erarbeiten, mit der die unterschiedlichen Schleifscheibenbelastungen als Funktion des Schleifscheibenradius simuliert werden können. Für das Planläppen entwickelte Prozessmodelle sind hier nur beschränkt anwendbar. Durch diese Simulationsrechnung wird die Prozessauslegung hinsichtlich einer homogenen Schleifscheibenbelastung oder eines maximalen Zeitspanungsvolumens möglich.

Experimentelle Untersuchungen

Die experimentellen Untersuchungen wurden unter prozessorientierter Betrachtungsweise geplant und durchgeführt. Dabei standen nicht die Werkstoffe, sondern der Prozessverlauf und das Arbeitsergebnis in Abhängigkeit von den kinematischen Parametern im Vordergrund. Als Werkstücke für die Schleifversuche wurden Benzinpumpendeckel aus Aluminiumoxid und Ventileinstellplättchen aus Siliciumnitrid ausgewählt. Die Bearbeitungseigenschaften beider Werkstoffe unterscheiden sich deutlich.

Aufgrund der Unzugänglichkeit des Arbeitsraums und der ständig wechselnden Richtung der Werkstückbewegungen ist das Messen werkstückbezogener Prozessgrößen wie der tangentialen Schleifkraft beim Planschleifen mit Planetenkinematik kaum möglich. Daher werden für die Verfahrenskinematik charakteristische Effekte an einzelnen Werkstücken modellhaft untersucht. Ziel ist die isolierte Variation einzelner Einstellgrößen. Diese unterliegen im realen Schleifprozess Wechselwirkungen, die eine getrennte Ermittlung ihrer Auswirkungen auf den Prozess und das Arbeitsergebnis unmöglich machen.

Das Ziel jeder Prozessauslegung besteht darin, die Bearbeitung hinsichtlich Zeitspanungsvolumen und Qualität zu optimieren. Im industriellen Einsatz des Planschleifens mit Planetenkinematik werden in der Regel mehrstufige Prozesse durchgeführt, bei denen auf ein Schruppen mit hohen Zeitspanungsvolumina eine Nachbearbeitungsphase zur Optimierung des Arbeitsergebnisses folgt. Um anhand der Werkstückqualität Rückschlüsse auf den Prozessverlauf zu ermöglichen, wurde im Rahmen dieser Arbeit generell auf eine Nachbearbeitungsphase verzichtet. Das bedeutet, dass die dargestellten Arbeitsergebnisse nicht die bestmöglichen herstellbaren Qualitäten repräsentieren, sondern die Bedingungen im Arbeitsraum widerspiegeln. Zu den grundlegenden Bearbeitungsparametern zählen neben dem Werkstückwerkstoff die Schleifscheibenspezifikation und die Kühlschmierstoffart. Darüber hinaus werden die mittlere Bahngeschwindigkeit, der Schleifdruck und die Anzahl der gleichzeitig bearbeiteten Werkstücke variiert. Besondere Beachtung finden entsprechend der Zielsetzung dieser Arbeit diejenigen Prozessparameter, die die Verfahrenskinematik beeinflussen. Zu diesen zählen die Drehzahlen von innerem Stiftkranz und Schleifscheibe ebenso wie die Anordnung der Werkstücke im Werkstückhalter.

Die Charakterisierung der Prozesse erfolgt anhand der Zeitspanungsvolumina und der Antriebsleistungen. Kriterien zur Beurteilung der Werkstückqualität sind Rauheit und Ebenheit der geschliffenen Funktionsflächen. Im Hinblick auf die gleichzeitige Bearbeitung von vielen Werkstücken ist die Höhenstreuung innerhalb dieser Werkstückchargen von Bedeutung.

Verfahrensvergleich Planschleifen mit Planetenkinematik - Planparallelläppen

Die analytischen und experimentellen Untersuchungen dieser Arbeit werden durch einen technologischen und wirtschaftlichen Verfahrensvergleich zwischen dem Planschleifen mit Planetenkinematik und dem Läppen abgerundet. Die Motivation für eine Substitution des Läppens durch das Planschleifen mit Planetenkinematik ist im industriellen Einsatz zumeist nicht technologisch, sondern ökonomisch begründet. In Abhängigkeit vom Werkstückwerkstoff lassen sich mit dem Schleifen gegenüber dem Läppen wesentlich höhere Zeitspanungsvolumina und wesentlich niedrigere Stückkosten erreichen. Qualitative Anforderungen an die Funktionsflächen können jedoch den Einsatz eines der beiden Verfahren ausschließen.

Grundlagen des Verfahrensvergleichs sind neben den erarbeiteten Ergebnissen Veröffentlichungen aller Art und Prospektmaterial mehrerer Maschinenhersteller. Der technologische Teil des Verfahrensvergleichs zeigt die qualitativen Aspekte auf, anhand derer die prinzipielle Möglichkeit zur Verfahrenssubstitution erkennbar wird. Im wirtschaftlichen Teil des Verfahrensvergleichs werden die Ursachen für die Entstehung der Fertigungskosten bei beiden Verfahren dargelegt. Im Rahmen einer Sensibilitätsanalyse werden Potenziale zur Kostensenkung aufgezeigt, die durch Prozessauslegung oder zukünftige Forschungsarbeiten erschlossen werden können. Ziel dieses Verfahrensvergleichs ist es, eine Grundlage für die Verfahrensauswahl zu bieten.

4 ANALYSE DER PLANETENKINEMATIK

4.1 Grundlagen

4.1.1 Begriffsbestimmungen

Eine der Grundlagen für die Simulation der Schleifscheibenbelastung und die Interpretation der experimentellen Ergebnisse ist die Analyse der Relativbewegungen zwischen den Wirkpartnern. Das Planschleifen mit Planetenkinematik wurde aus dem doppelseitigen Planläppen entwickelt, und der konstruktive Aufbau von Zweischeibenmaschinen zum Schleifen und zum Läppen ist weitgehend identisch. Daher lassen sich viele Begriffe zur Beschreibung der kinematischen Verhältnisse übertragen.

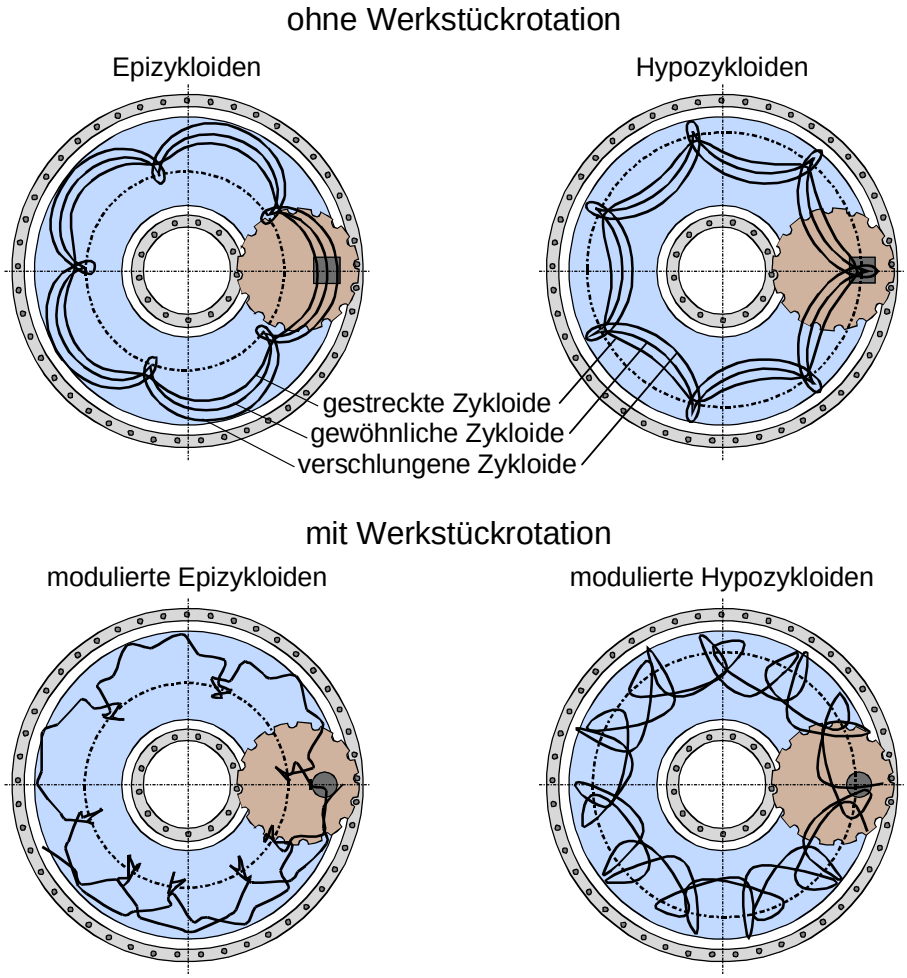


Bild 4.1: Mögliche Bewegungsformen der Werkstücke relativ zur Schleifscheibe [nach Sim88, Spu95b]

Die effektive Relativbewegung zwischen den Werkstücken und einer Schleifscheibe entsteht durch Überlagerung zweier Drehbewegungen: der Rotation der Schleifscheibe und dem Ab-

rollen des Werkstückhalters zwischen den beiden Stiftkränzen. Die Bewegung der Werkstückhalter entspricht derjenigen der Planetenräder in einem Planetenrad-Umlaufgetriebe. Die Werkstücke bewegen sich relativ zu den Schleifscheiben auf Rollkurven, den sogenannten Zykloiden (**Bild 4.1**). Eine Epizykloide entsteht, wenn ein Kreis auf der Außenseite eines festen Wälzkreises abrollt. Eine Hypozykloide entsteht durch das Abrollen an der Innenseite des Wälzkreises. Sowohl abrollender Kreis als auch Wälzkreis sind abstrakte Gebilde, die nicht durch die Geometrie der Maschine, sondern durch die gewählten Drehzahlen festgelegt werden. Je nach Abstand des betrachteten Punkts vom Wälzzentrum unterscheidet man gestreckte, gewöhnliche und verschlungene Zykloiden. Gewöhnliche Zykloiden besitzen Spitzen, die den Wälzkreis punktuell berühren. Verschlungene Zykloiden weisen Schleifen auf, so dass Funktionswerte doppelt angenommen werden. Gestreckte Zykloiden zeichnen sich durch verrundete Spitzen aus. Die Berechnung der Rollkurven, die im Folgenden als Bahnkurven bezeichnet werden, fällt mathematisch in den Bereich der Differentialgeometrie ebener Kurven. Bei allen Bahnkurven handelt es sich um stetige Funktionen, nicht alle sind jedoch stetig differenzierbar [Gel77].

In rotationssymmetrischen Halteraussparungen können sich die Werkstücke drehen. In diesem Fall überlagert sich den beiden oben genannten Bewegungen als zusätzliche Komponente die Werkstückeigendrehung, wodurch die sogenannten moduliert-zykloidalen Bewegungsformen entstehen. Die Eigendrehung der Werkstücke wird durch Reaktionsmomente im Bearbeitungsprozess verursacht, die durch unterschiedliche Relativgeschwindigkeiten der Schleifkörner über der Werkstückoberfläche, durch Unregelmäßigkeiten im Schleifbelag sowie durch die Reibung der Werkstücke an der Halterwand entstehen. Bis heute existiert keine geschlossene analytische Beschreibung dieser Momente im Prozess [Sim88]. Eine Eigendrehung der Werkstücke ist daher bei allen folgenden Betrachtungen ausgenommen.

Die Art der Werkstückbewegungen unterscheidet sich zwischen dem Läppen und dem Planschleifen mit Planetenkinematik nicht. Die mikroskopischen Verhältnisse an der Kornschneide und damit die Abtrennmechanismen weisen jedoch grundlegende Differenzen auf. Aus diesem Grund ist es nach SIMPFENDÖRFER [Sim88] sinnvoll, die Relativbewegungen auf Zweischeibenschleif- und Läppmaschinen in die Makro- und Mikrokinematik zu unterteilen.

Makrokinematik

Als Makrokinematik bezeichnet man die Bewegungen der Werkstücke relativ zu den Schleifscheiben. Im Rahmen makrokinematischer Betrachtungen werden alle Wirkpartner in ihrer idealen geometrischen Form angenommen. Synonym für die Makrokinematik werden die Begriffe Läpp- und Planetenkinematik verwendet. In dieser Arbeit sind die makrokinematischen Kenngrößen mit dem Index L gekennzeichnet. Inhalt dieses Kapitels sind makrokinematische Zusammenhänge bei der Bearbeitung auf Zweischeibenschleif- und Läppmaschinen.

Normalerweise legt ein Werkstückpunkt relativ zu beiden Schleifscheiben unterschiedliche Bahnkurven zurück. Im Folgenden werden ausschließlich die Bewegungen zwischen

Werkstücken und unterer Schleifscheibe betrachtet. Die kinematischen Verhältnisse relativ zur oberen Schleifscheibe sind analog zu ermitteln.

Bahnkurve

Als Bahnkurve wird die Linie bezeichnet, entlang der sich ein Werkstückpunkt relativ zu einer Schleifscheibe bewegt. Würde man in einem Werkstückpunkt einen Stift befestigen, so würde dieser Stift im Verlauf seiner Bewegung eine Bahnkurve auf die Schleifscheibe zeichnen. Der Begriff der Bahnkurve umfasst ausschließlich die geometrischen Eigenschaften der zurückgelegten Bahn, also deren Koordinaten und daraus abgeleitete Größen wie die Weglänge oder die Krümmung [Spu96]. Bahnkurven werden ihren geometrischen Merkmalen entsprechend verschiedenen Klassen zugeordnet, wie beispielsweise den gewöhnlichen, gestreckten oder verschlungenen Epi- oder Hypozykloiden.

Bahnbewegung

Der Begriff der Bahnbewegung schließt über die Geometrie einer Bahnkurve hinaus auch die Bewegung eines Werkstückpunkts entlang dieser Bahn mit ein. Diese Bahnbewegung wird durch die zeitabhängigen Größen Bahngeschwindigkeit und die Bahnbeschleunigung des betrachteten Punkts charakterisiert [Spu96].

Zyklus und Teilzyklus

Unter Vernachlässigung einer möglichen Eigendrehung der Werkstücke setzen sich die Bahnkurven eines Werkstückpunkts aus gleichförmigen, zyklisch wiederkehrenden geometrischen Elementen zusammen (vgl. Bild 4.1). Diese Bahnkurvenelemente werden als Teilzyklen bezeichnet. Der Startpunkt einer Bahnbewegung wird im Rahmen dieser Arbeit stets so gewählt, dass der betrachtete Werkstückpunkt hier seinen maximalen Abstand vom Schleifscheibenzentrum besitzt. Sobald er diesen Abstand ein zweites Mal erreicht, ist ein Teilzyklus beendet. Ein Zyklus ist genau dann durchlaufen, wenn sich der betrachtete Punkt nach mehreren vollständig durchlaufenen Teilzyklen wieder an seinem Ausgangspunkt relativ zur Schleifscheibe befindet [Spu97].

Mikrokinematik

Unter Mikrokinematik versteht man die Eingriffsverhältnisse in der Kontaktzone zwischen Werkstück und Werkzeug. Beim Schleifen treffen gebundene Körner und die dreidimensionale Werkstücktopografie unter Einwirkung einer Flächenpressung und eines Kühlschmierstoffs zusammen. Beim Läppen bewegen sich lose Schneidkörner in einer Flüssigkeit zwischen den dreidimensionalen Oberflächenstrukturen von Werkzeug und Läppscheibe.

4.1.2 Geometrische und kinematische Parameter der Relativbewegung

Nur die Relativbewegungen zwischen Werkstück und Schleifscheibe beeinflussen den Prozess, Bewegungen bezüglich des Maschinengestells sind für die Bearbeitung ohne Bedeutung. Aus diesem Grund werden die Gleichungen zur Beschreibung der Relativbewegungen in einem relativ zur Schleifscheibe ruhenden Koordinatensystem formuliert. Die Z-Achse dieses kartesischen Koordinatensystems entspricht der Drehachse der unteren Schleifscheibe. Die X- und Y-Achse spannen die Arbeitsebene bezüglich der unteren Schleifscheibe auf und sind in dieser Schleifscheibe fest verankert. Für einen neben der Schleifmaschine stehenden Betrachter rotiert dieses Koordinatensystem mit der unteren Schleifscheibe. Ein Punkt kann in dieser Ebene zwei translatorische Freiheitsgrade, ein starrer Körper zwei translatorische und einen rotatorischen Freiheitsgrad haben. Die Beschreibung der Bewegungsverhältnisse stützt sich auf geometrische und kinematische Größen (**Bild 4.2**). Geometrische Parameter sind die Abmessungen der einzelnen Maschinenelemente und Werkstücke sowie die Anordnung der Werkstücke im Halter. Die kinematischen Parameter umfassen die Winkelgeschwindigkeiten von Stiftkränzen, Schleifscheibe, Werkstückhalter und Werkstück [Sim88, Spu97].

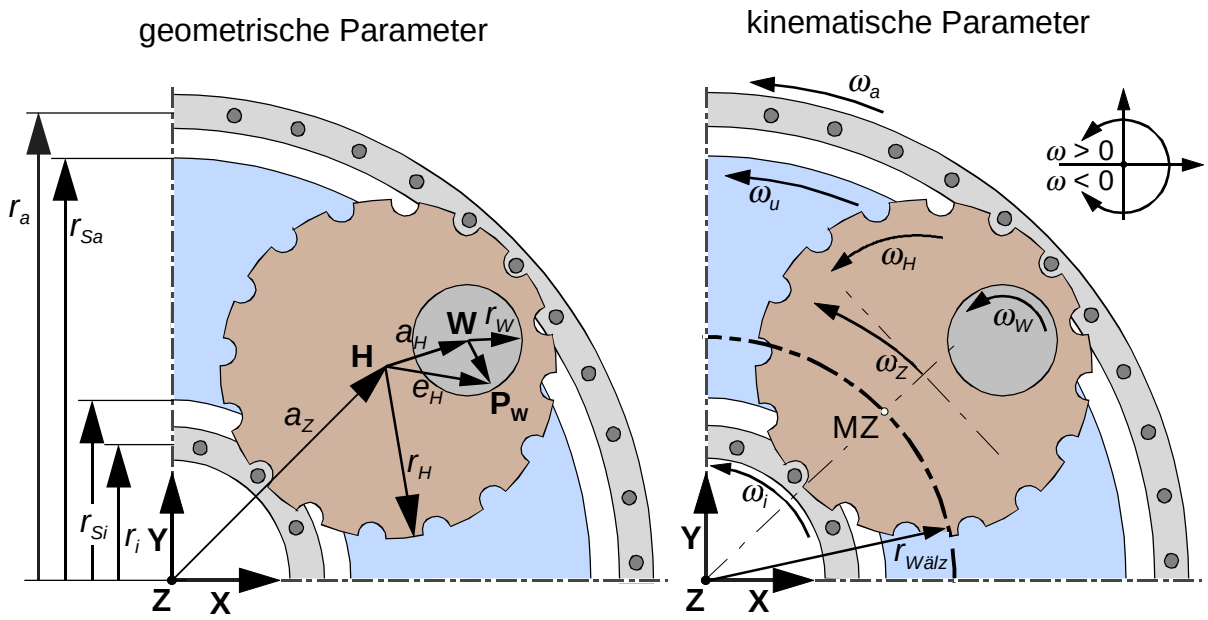


Bild 4.2: Geometrische und kinematische Parameter der Planetenkinematik [nach Fun94, Sim88, Spu95a]

Zur Berechnung der Bahnkurve eines Werkstückpunkts ist es notwendig, die Winkelgeschwindigkeiten des Werkstückhalters im Schleifscheibenkoordinatensystem zu berechnen. Die Winkelgeschwindigkeit ω_H kennzeichnet hierbei die Rotation des Halters um seine Mittelpunktsachse H, ω_Z bezeichnet die translatorische Bewegung des Halters um die Scheibendrehachse Z. Zur Berechnung dieser Winkelgeschwindigkeiten zeigt **Bild 4.3** die vektoriellen Geschwindigkeiten am Werkstückhalter. Setzt man für die dargestellten Geschwindigkeitsvektoren die skalaren Größen der Winkelgeschwindigkeiten und der Radien ein, dann folgt für Punkt A die Gleichung

$$\begin{aligned} |\vec{v}_Z| + |\vec{v}_H| &= |\vec{v}_a| \\ \omega_Z a_Z + \omega_H r_H &= 2\pi n_u r_a \end{aligned} \quad . \tag{4-1}$$

Für Punkt B folgt durch adäquate Herleitung

$$\begin{aligned} |\vec{v}_Z| - |\vec{v}_H| &= |\vec{v}_i| \\ \omega_Z a_Z - \omega_H r_H &= 2\pi (n_i - n_u) r_i \end{aligned} \quad . \tag{4-2}$$

Für die Vorzeichen der Drehzahlen gelten die in der Mathematik üblichen Konventionen. Ein positives Vorzeichen entspricht einer Drehung entgegen dem Uhrzeigersinn. Setzt man die geometrischen Beziehungen $r_H = (r_a - r_i)/2$ und $a_Z = r_i + r_H$ in diese Gleichungen ein, dann ergibt sich die Matrixgleichung

$$\begin{bmatrix} \omega_H \\ \omega_Z \end{bmatrix} = 2\pi \begin{bmatrix} -\frac{r_i}{r_a - r_i} & \frac{r_a}{r_a - r_i} & -1 \\ \frac{r_i}{r_a + r_i} & \frac{r_a}{r_a + r_i} & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} n_i \\ n_a \\ n_u \end{bmatrix} \tag{4-3}$$

als Zusammenhang zwischen den Winkelgeschwindigkeiten und den maschinenseitigen Einstellparametern [Spu97].

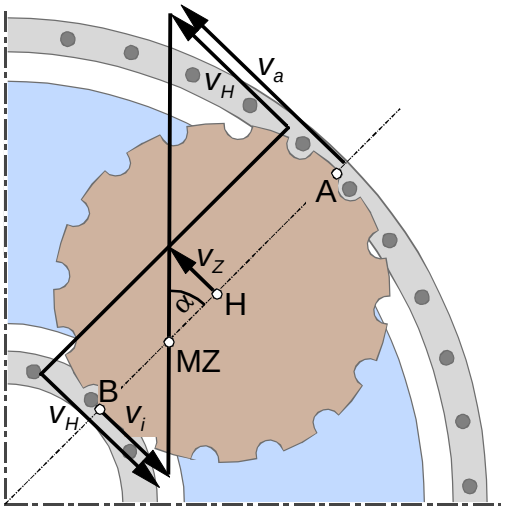


Bild 4.3: Geschwindigkeiten am Werkstückhalter im Schleifscheiben-Koordinatensystem [nach Sim88]

In der Literatur findet sich zur Beschreibung der Bewegungsverhältnisse zumeist das Winkelgeschwindigkeitsverhältnis K_L, dass durch den Quotienten

$$K_L = \frac{\omega_H}{\omega_Z} \tag{4-4}$$

aus der Halterrotation um sein Zentrum ω_H zu seiner Winkelgeschwindigkeit um das Schleifscheibenzentrum ω_Z definiert ist. Diese Kennzahl wird auch Läppverhältnis, kinematischer Faktor oder *K*-Faktor genannt [Spu97].

Dieses Winkelgeschwindigkeitsverhältnis beschreibt eindeutig die Bahnkurven, die bestimmte Werkstückpunkte auf der Schleifscheibe zurücklegen. Die Geometrie dieser Kurven hängt nicht von der Höhe der Winkelgeschwindigkeiten, sondern nur von deren Verhältnis zueinander ab. Dementsprechend kann jede Bahnkurve mit beliebigen Geschwindigkeiten durchlaufen werden. Das Winkelgeschwindigkeitsverhältnis ermöglicht Aussagen darüber, ob sich die Werkstücke auf Epi-, Hypozykloiden oder auf besonderen Bahnformen bewegen. Zur Unterscheidung zwischen gestreckten, gewöhnlichen und verschlungenen Bahnkurven ist zusätzlich die Kenntnis der Lage eines Werkstückpunkts im Halter notwendig.

4.1.3 Berechnung von Bahnkurven und -bewegungen

In diesem Abschnitt werden die Gleichungen zur Beschreibung der Bahnkurven und zur Analyse der Bahnbewegungen hergeleitet. Als Übersicht zeigt **Tabelle 4.1** die verwendeten geometrischen und kinematischen Größen. Die im Folgenden dargelegte Herleitung der Größen baut maßgeblich auf den Arbeiten von SPUR und EICHHORN [Spu95b, Spu97] auf.

Tabelle 4.1: Kenngrößen zur Beschreibung von Bahnkurven und Bahnbewegungen

Bahnkurve		**Bahnbewegung**			
Geometrie		Geschwindigkeiten		Beschleunigungen	
$\vec{r}(t)$	Bahnkurve, Ortsvektor	$\vec{v}(t)$	Bahngeschwindigkeit	$\vec{a}(t)$	Bahnbeschleunigung
$r(t)$	Betrag des Ortsvektors	$v(t)$	Betrag der Bahngeschwindigkeit	$a(t)$	Betrag der Bahnbeschleunigung
		v_m	mittlere Bahngeschwindigkeit	a_m	mittlere Bahnbeschleunigung
		$v'(t)$	bezogene Bahngeschwindigkeit	$a'(t)$	bezogene Bahnbeschleunigung
				$a_s(t)=\dot{v}(t)$	skalare Beschleunigung in Richtung der Bahnbewegung

Bahnkurve

Ein beliebiger Werkstückpunkt P_W mit dem Abstand e_H vom Haltermittelpunkt durchläuft in der X, Y-Ebene die Bahnkurve $\vec{r}(t)$. Weist dieser Punkt zum Zeitpunkt $t_0 = 0$ die Koordinaten $x = a_Z + e_H$ und $y = 0$ auf, dann hat er zum Zeitpunkt t auf seiner Bahnkurve $\vec{r}(t)$ die Lage

$$\vec{\mathbf{r}}(t) = \begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_Z \cos(\omega_Z t) + e_H \cos(\omega_H t) \\ a_Z \sin(\omega_Z t) + e_H \sin(\omega_H t) \end{pmatrix}. \tag{4-5}$$

Der Abstand zum Scheibenzentrum entspricht dem Betrag des Ortsvektors und beträgt

$$r(t) = \left|\vec{\mathbf{r}}(t)\right| = \sqrt{a_Z^2 + e_H^2 + 2\, a_Z\, e_H\, cos\left((\omega_Z - \omega_H)t\right)}\,. \tag{4-6}$$

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].

Bahngeschwindigkeit

Die Bahngeschwindigkeit $\vec{\boldsymbol{v}}(t)$ wird als die erste Ableitung der Bahnkurve $\vec{\boldsymbol{r}}(t)$ nach der Zeit ermittelt. Die Anteile der Bahngeschwindigkeit in Richtung der Koordinaten ergeben sich zu

$$\vec{\mathbf{v}}(t) = \begin{pmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{y}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -a_Z\omega_Z \sin(\omega_Z t) - e_H\omega_H \sin(\omega_H t) \\ a_Z\omega_Z \cos(\omega_Z t) + e_H\omega_H \cos(\omega_H t) \end{pmatrix}. \tag{4-7}$$

Die Bildung des Betrags ergibt den Ausdruck

$$v(t) = \left|\vec{\mathbf{v}}(t)\right| = \sqrt{a_Z^2\omega_Z^2 + e_H^2\omega_H^2 + 2\, a_Z\, e_H\omega_H\omega_Z\, cos\left((\omega_Z - \omega_H)t\right)}\,. \tag{4-8}$$

für die skalare Bahngeschwindigkeit $v(t)$ [Spu97]. Der Haltermittelpunkt H bewegt sich grundsätzlich bei allen kinematischen Parametern auf einer Kreisbahn um das Schleifscheibenzentrum Z. Seine Winkelgeschwindigkeit ω_Z relativ zum Schleifscheibenzentrum unterliegt keinen Änderungen. Um den Haltermittelpunkt H rotiert ein Werkstückpunkt P_W mit der Geschwindigkeit $v_H(e_H)$, die sich aus der Halterrotation ω_H und dem Abstand des Punkts vom Halterzentrum e_H ergibt. 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 Werkstückpunkts nach den Gleichungen

$$\begin{aligned} v_{max} &= |v_Z| + |v_H(e_H)| = |\omega_Z a_Z| + |\omega_H e_H| \\ v_{min} &= |v_Z| - |v_H(e_H)| = |\omega_Z a_Z| - |\omega_H e_H| \end{aligned} \tag{4-9}$$

ermitteln. Der arithmetische Mittelwert aus der minimalen und der maximalen Bahngeschwindigkeit entspricht nicht der mittleren Bahngeschwindigkeit v_m eines Werkstückpunkts. Zur Berechnung von v_m ist entsprechend dem Ausdruck

$$v_m = \frac{1}{t_{\Delta Zykl}} \int_0^{t_{\Delta Zykl}} v(t)\,dt \tag{4-10}$$

die Betrachtung eines vollständigen Teilzyklus erforderlich. Die mittlere Bahngeschwindigkeit v_m wird hier aus dem Quotienten der Weglänge pro Teilzyklus und der Teilzykluszeit berechnet. Die Weglänge wird in Gleichung (4-10) durch das Integral der Bahngeschwindigkeit über die Teilzykluszeit repräsentiert. Die Lösung von Gleichung (4-10) führt nach SPUR und EICHHORN [Spu97] auf ein elliptisches Integral. Jede Bahnkurve kann mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten durchlaufen werden. Um den Verlauf der Bahngeschwindigkeit ent-

lang einer Bahnkurve unabhängig von den gewählten Drehzahlen darstellen zu können, wird die bezogene Bahngeschwindigkeit v' definiert. Diese gibt nach der Formel

$$v'(t) = \frac{v(t)}{v_m} \cdot 100 \tag{4-11}$$

das Verhältnis der momentanen zur mittleren Bahngeschwindigkeit in Prozent an.

Bahnbeschleunigung und skalare Beschleunigung

Die Parameterdarstellung der Bahnbeschleunigung ergibt sich nach SPUR und EICHHORN [Spu97] durch die zweite Ableitung von Gleichung (4-5) nach der Zeit und lautet

$$\vec{\mathbf{a}}(t) = \begin{pmatrix} \ddot{x}(t) \\ \ddot{y}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -a_Z \omega_Z^2 \cos(\omega_Z t) - e_H \omega_H^2 \cos(\omega_H t) \\ -a_Z \omega_Z^2 \sin(\omega_Z t) - e_H \omega_H^2 \sin(\omega_H t) \end{pmatrix}. \tag{4-12}$$

Die Betragsgleichung der Bahnbeschleunigung ergibt sich zu

$$a(t) = |\vec{\mathbf{a}}(t)| = \sqrt{e_H^2 \omega_H^4 + a_Z^2 \omega_Z^4 + 2 a_Z e_H \omega_H^2 \omega_Z^2 \cos((\omega_Z - \omega_H)t)}\,. \tag{4-13}$$

Die Bahnbeschleunigung beinhaltet einerseits die Änderung der Geschwindigkeit des Punkts P_W in Richtung der Bahnkurve, andererseits aber auch die zur Änderung der Bewegungsrichtung selbst erforderliche Winkelbeschleunigung. Auf einer Kreisbahn, die mit konstanter Geschwindigkeit zurückgelegt wird, ist die Bahnbeschleunigung also nicht Null, sondern nimmt einen konstanten Wert an, der diese stetige Richtungsänderung beschreibt. Um den Verlauf der Bahnbeschleunigung von den absoluten Drehzahlen unabhängig beschreiben zu können, wird in Analogie zur bezogenen Bahngeschwindigkeit die bezogene Bahnbeschleunigung $a'(t)$ definiert. Diese gibt nach der Gleichung

$$a'(t) = \frac{a(t)}{a_m} \cdot 100 \tag{4-14}$$

die Abweichungen der momentanen von der mittleren Bahnbeschleunigung prozentual an.

Die betragsmäßige Änderung der Geschwindigkeit in Richtung einer Bahnkurve ohne Berücksichtigung der Richtungsänderungen wird im Folgenden als skalare Beschleunigung $a_s(t)$ bezeichnet. Sie berechnet sich als Ableitung der Betragsgleichung der Bahngeschwindigkeit, Gleichung (4-8), nach der Zeit zu

$$a_s(t) = |\dot{v}(t)| = \frac{a_Z e_H \omega_H \omega_Z (\omega_Z - \omega_H)(\sin(\omega_Z - \omega_H)t)}{\sqrt{e_H^2 \omega_H^2 + a_Z^2 \omega_Z^2 + 2 a_Z e_H \omega_H \omega_Z \cos((\omega_Z - \omega_H)t)}}\,. \tag{4-15}$$

Wurde ein Teilzyklus vollständig durchlaufen, so besitzt der Punkt P_W nach Verzögerungen und Beschleunigungen wieder die gleiche Geschwindigkeit wie zum Zeitpunkt $t = 0$. Da der Mittelwert der skalaren Beschleunigung über einem Teilzyklus immer Null beträgt, ist die Definition einer auf ihren Mittelwert bezogenen skalaren Beschleunigung nicht sinnvoll.

Bahnkrümmung

Aus den parametrisierten Gleichungen für Bahngeschwindigkeit und -beschleunigung lässt sich die Krümmung *k* einer Bahnkurve zum Zeitpunkt *t* nach der Formel

$$\begin{aligned} k(t) &= \frac{\dot{x}\ddot{y} - \ddot{x}\dot{y}}{\sqrt{\left(\dot{x}^2 + \dot{y}^2\right)^3}} \\ &= \frac{e_H^2\omega_H^3 + a_Z^2\omega_Z^3 + a_Z e_H \omega_Z \omega_H (\omega_H + \omega_Z) cos((\omega_Z - \omega_H)t)}{\sqrt{\left[e_H^2\omega_H^2 + a_Z^2\omega_Z^2 + 2a_Z e_H \omega_Z \omega_H \, cos((\omega_Z - \omega_H)t)\right]^3}} \end{aligned} \tag{4-16}$$

berechnen [Spu95b]. Die Einheit der Bahnkrümmung lautet m^{-1}. Ein Vorzeichenwechsel deutet auf einen Wendepunkt der zugehörigen Kurve hin. Definitionsgemäß kann der Krümmungsradius einer Bahnkurve in einem bestimmten Punkt als Kehrwert der Bahnkrümmung berechnet werden. Einem geraden Bahnelement ist demnach der Krümmungswert $k = 0$ zugeordnet, und der Krümmungsradius strebt gegen unendlich. Analog zur bezogenen Bahngeschwindigkeit wird die bezogene Bahnkrümmung k' definiert. Nach der Gleichung

$$k'(t) = \frac{k(t)}{k_m} \cdot 100 \tag{4-17}$$

gibt sie das Verhältnis der momentanen zur mittleren Bahnkrümmung in Prozent an.

4.2 Beschreibung der Bewegungsform durch das Drehzahlverhältnis

4.2.1 Bedingungen bei stillstehendem äußerem Stiftkranz

Die Wahl der kinematischen Parameter für einen Bearbeitungsvorgang legt die Bewegungsform der Werkstücke relativ zur unteren Schleifscheibe fest. Die konstruktive Einschränkung, die sich durch Stillsetzen des äußeren Stiftkranzes unter der Bedingung

$$n_a = 0 \tag{4-18}$$

ergibt, reduziert die frei wählbaren kinematischen Parameter auf die Drehzahlen des inneren Stiftkranzes n_i und der Schleifscheibe n_u. Daraus folgt, dass alle Bewegungsformen zwischen Werkstücken und der unteren Schleifscheibe durch n_i und n_u eindeutig definiert sind. Auf dieser Basis wird das Drehzahlverhältnis N_L

$$N_L = \frac{n_i}{n_u} \tag{4-19}$$

als Quotient beider frei einstellbaren Drehzahlen zur Beschreibung der Bearbeitungskinematik zwischen Werkstück und unterer Schleifscheibe definiert. Die Drehzahlen von Stiftkränzen und Scheiben sind im praktischen Einsatz des Verfahrens vorgegeben und an der Maschine abzulesen und stellen damit einfach zugängliche und handhabbare Größen dar. Neben diesen

beiden Drehzahlen werden zur Beschreibung sämtlicher kinematischer Zusammenhänge lediglich die Radien der beiden Stiftkränze r_i und r_a angewendet.

Abgrenzung zum Winkelgeschwindigkeitsverhältnis K_L

Die Beschreibung der Bewegungen durch das Winkelgeschwindigkeitsverhältnis K_L hat sich in der Praxis als unvorteilhaft herausgestellt, da weder die Winkelgeschwindigkeiten ω_H und ω_Z noch K_L direkt an der Maschine abgelesen oder eingestellt werden können.

Die Gesamtheit der kinematischen Parameter ist als dreidimensionaler Raum vorstellbar, der von den Drehzahlen n_i, n_a und n_u aufgespannt wird. Jedem Punkt in diesem Raum ist eindeutig ein Funktionswert $K_L = f(n_i, n_a, n_u)$ zugeordnet. Jeder Wert für K_L kann aber durch unendlich viele Kombinationen der drei Drehzahlen erzeugt werden. Wird eine der drei Drehzahlen festgelegt, so spannen die beiden anderen Variablen eine Ebene auf, innerhalb der jeder beliebige K_L-Wert enthalten ist. Eine solche Ebene bildet auch der Wertebereich des Drehzahlverhältnisses $N_L = f(n_i, n_u)$ unter der Voraussetzung $n_a = 0$ (4-18). Alle denkbaren Funktionswerte von K_L sind im Wertebereich von N_L enthalten. Die Einschränkung ist aus technologischer Sicht sinnvoll, weil sie den praktischen Gegebenheiten stillstehender äußerer Stiftkränze entspricht und somit für den größten Teil aller weltweit existierenden Zweischeibenschleif- und Läppmaschinen zutrifft. Aus mathematischer Sicht ist die Festlegung auf $n_a = 0$ vorteilhaft, weil sich die bewegungsbeschreibenden Gleichungen um eine Dimension vereinfachen. Die im Folgenden dargelegten mathematischen Zusammenhänge sind nicht auf Parametersätze mit beliebiger, aber fester Drehzahl des äußeren Stiftkranzes $n_a \neq 0$ übertragbar.

SIMPFENDÖRFER [Sim88] beschäftigte sich mit der Frage, ob der Einbau unabhängiger Antriebe für beide Stiftkränze sinnvoll ist. Er wies analytisch nach, dass alle Bewegungsformen, die über die Drehzahlen von Scheibe und beider Stiftkränze einstellbar sind, auf eine kongruente Bewegungsform transformiert werden können, bei der wahlweise die Scheibe oder einer der beiden Stiftkränze still steht. Daraus folgt, dass Maschinen mit Antrieben an der Schleifscheibe und an beiden Stiftkränzen kinematisch überbestimmt sind. Durch die Voraussetzung (4-18) ergibt sich also keine Einschränkung der erzeugbarer Bewegungsformen.

Die mathematische Aussagekraft von Drehzahlverhältnis und Winkelgeschwindigkeitsverhältnis ist gleichwertig. Beide kennzeichnen eine Bewegungsform, erlauben jedoch keine Aussage über die vorliegenden Relativgeschwindigkeiten. Wichtige Charakteristika beider Größen sind folgende:

- Das Winkelgeschwindigkeitsverhältnis K_L kennzeichnet eine Bewegungsform unabhängig von der verwendeten Maschine und deren geometrischen Parametern. Die Verwendung dieser Kenngröße bietet Vorteile bei der Übertragung spezieller Bahnkurven auf verschiedene Maschinentypen. Für die Realisierung einer Bahnform müssen die kinematischen Parameter für jede Maschine neu berechnet werden.

- Das Drehzahlverhältnis N_L ordnet eindeutig jedem Satz kinematischer Maschinenparameter eine Bewegungsform zu, die allerdings von der Geometrie der verwendeten Maschine abhängt. Das bedeutet, dass gleiche Drehzahlverhältnisse auf unterschiedlichen Maschinen zu unterschiedlichen Bahnkurven führen können. N_L eignet sich demnach zur praxisnahen Darstellung des Zusammenhangs zwischen den kinematischen Parametern und den entstehenden Bewegungsformen für eine Maschine. Da sich die Größenverhältnisse der meisten handelsüblichen Konstruktionen und insbesondere die Verhältnisse der beiden Stiftkranzradien r_a und r_i zueinander stark ähneln, sind die Fehler bei der Übertragung von Ergebnissen auf andere Maschinentypen recht klein.

Das Winkelgeschwindigkeitsverhältnis lässt sich für Maschinen mit stillstehendem äußeren Stiftkranz mathematisch eindeutig auf das Drehzahlverhältnis zurückführen. Gleichung (4-4) kann zu diesem Zweck durch Einsetzten von (4-3) in den Ausdruck

$$K_L = \frac{N_L r_i + r_a - r_i}{-N_L r_i + r_a + r_i} \cdot \frac{r_a + r_i}{r_a - r_i} \tag{4-20}$$

umgeformt werden. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird ausschließlich das Drehzahlverhältnis N_L zur Charakterisierung der Relativbewegungen verwendet.

4.2.2 Kinematische Kenngrößen

Im Folgenden werden Kenngrößen zur Beschreibung der kinematischen Verhältnisse definiert. In Abhängigkeit vom Winkelgeschwindigkeitsverhältnis K_L wurden diese Größen bereits von SPUR, SIMPFENDÖRFER und EICHHORN [Sim88, Spu95b, Spu97] ermittelt. An dieser Stelle werden die mathematischen Formulierungen vorgestellt, die sich in Abhängigkeit vom Drehzahlverhältnis N_L ergeben.

Zyklus- und Teilzykluszeit

Die Zeit, die zum Durchlaufen eines vollständigen Zyklus notwendig ist, heißt Zykluszeit t_{zykl}. Die für ein einzelnes Bahnelement benötigte Zeit heißt Teilzykluszeit $t_{\Delta zykl}$ und hängt nach

$$t_{\Delta Zykl} = \frac{t_{Zykl}}{p} \tag{4-21}$$

von der Zykluszeit ab. Legt man für den Beginn eines Teilzyklus den Zeitpunkt fest, zu dem der betrachtete Werkstückpunkt seinen maximalen Abstand vom Scheibenzentrum einnimmt, so ist er beendet, sobald der Punkt den maximalen Abstand zum zweitenmal erreicht [Spu97]. Der Abstand zwischen Werkstückpunkt und Scheibenzentrum wird von der Schleifscheibendrehzahl nicht beeinflusst, er hängt nur von der Drehzahl der Stiftkränze ab. Für $n_a = 0$ lässt sich die Teilzykluszeit nach

$$t_{\Delta Zykl} = \frac{r_a^2 - r_i^2}{2 r_a r_i} \frac{1}{|n_i|} \tag{4-22}$$

auf einen geometrischen Faktor und die Drehzahl des inneren Stiftkranzes n_i zurückführen.

Wälzkreisradius

Mechanisch entsteht eine Epizykloide als Bahn eines Punkts, wenn auf der Außenseite eines Wälzkreises ein Kreis abrollt; eine Hypozykloide entsteht, wenn die Abrollbewegung des bewegten Kreises an der Innenseite des Wälzkreises stattfindet (vgl. Bild 4.1) [Gel77]. Sowohl beim Wälz- als auch beim abrollenden Kreis handelt es sich um abstrakte Gebilde, die nicht im Aufbau der Maschine, sondern in der Wahl der Drehzahlen ihren Ursprung haben und im Regelfall nicht mit den Radien der Maschinenelemente übereinstimmen. Die Relativgeschwindigkeit im Kontaktpunkt beider Kreise ist gleich Null. Dieser Kontaktpunkt wird als Momentanzentrum MZ der Bewegung bezeichnet, und seine Bahnkurve entspricht dem Wälzkreis. Im Momentanzentrum ist die effektive Haltergeschwindigkeit bezüglich der Schleifscheibe gleich Null. Für den Winkel α im Bild 4.3 gilt die trigonometrische Beziehung

$$\tan\alpha = \frac{v_i}{r_i - r_{Wälz}} = \frac{v_a}{r_a - r_{Wälz}} \ . \tag{4-23}$$

Ersetzt man in dieser Gleichung die beiden Geschwindigkeiten v_i und v_a entsprechend der Gleichungen (4-1) und (4-2), so ergibt sich für den Wälzkreisradius $r_{Wälz}$ der Ausdruck

$$r_{Wälz} = \frac{N_L r_i r_a}{N_L r_i + r_a - r_i} \ . \tag{4-24}$$

Dieser Ausdruck beschreibt eine Funktion mit einer Unendlichkeitsstelle mit Vorzeichenwechsel.

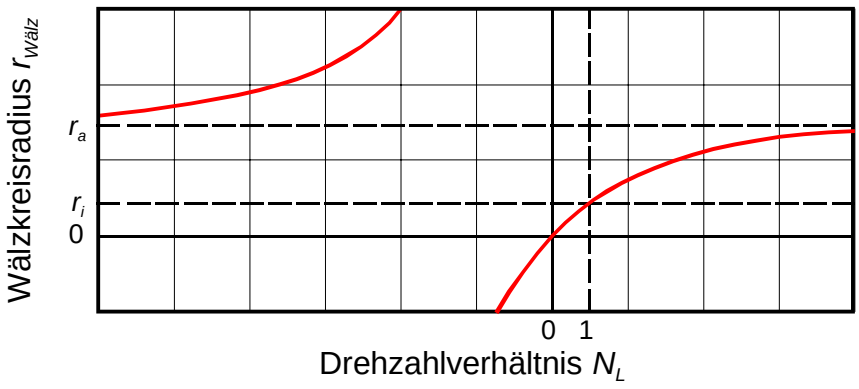


Bild 4.4: Zusammenhang zwischen Wälzkreisradius und Drehzahlverhältnis

Die grafische Darstellung des Wälzkreisradius $r_{Wälz}$ als Funktion des Drehzahlverhältnisses N_L zeigt **Bild 4.4.** Bei großen Drehzahlverhältnissen $|n_i| >> |n_u|$ nähert sich der Wälzkreisradius

asymptotisch an den Radius des äußeren Stiftkranzes r_a an. Die Schleifscheibendrehzahl fällt gegenüber der Stiftkranzdrehzahl nicht ins Gewicht, und die Relativbewegung wird durch ein Abrollen des Werkstückhalters am äußeren Stiftkranz bestimmt. Für $N_L = 0$ nimmt auch $r_{Wälz}$ den Wert Null an. Bei $N_L = 1$ rotieren Schleifscheibe und Stiftkranz mit der gleichen Drehzahl. Relativ zur Schleifscheibe rollen die Werkstückhalter dann am inneren Stiftkranz ab, der Wälzkreisradius hat den Wert r_i.

Zyklus- und Teilzykluswinkel

Als Teilzykluswinkel $\beta_{\Delta zykl}$ wird derjenige Winkel bezeichnet, um den sich der betrachtete Werkstückpunkt P_W innerhalb eines Teilzyklus gegenüber dem Schleifscheibenzentrum Z fortbewegt. Der Teilzykluswinkel entspricht demjenigen Winkel, den der Haltermittelpunkt H innerhalb der Teilzykluszeit zurücklegt, und kann nach der Gleichung

$$\beta_{\Delta Zykl} = \omega_Z \cdot t_{\Delta Zykl} \tag{4-25}$$

berechnet werden. Durch Einsetzen dieser beiden Werte ergibt sich der Teilzykluswinkel zu

$$\beta_{\Delta Zykl} = \pi\left(\frac{r_a - r_i}{r_a} - \frac{r_a^2 - r_i^2}{r_a r_i}\frac{1}{N_L}\right). \tag{4-26}$$

Ein vollständiger Zyklus ist genau dann durchlaufen, wenn ein Werkstückpunkt P_W seinen Startpunkt auf der Schleifscheibe zum zweiten Mal erreicht und sich die Bahnkurve schließt. Diese Bedingung ist erfüllt, wenn die Summe der p überstrichenen Teilzykluswinkel

$$p \cdot \beta_{\Delta Zykl} = q \cdot 2\pi \ . \tag{4-27}$$

ein ganzzahliges Vielfaches des Vollkreiswinkels 2π beträgt. Die Bedingung (4-27) führt auf das Erzeugendenverhältnis der Planetenkinematik. Dieses ist definiert als Quotient der beiden Faktoren p und q. Der Faktor p im Zähler des Bruches steht für die Anzahl der Teilzyklen, die pro Zyklus durchlaufen werden. Der Nenner des Bruchs q gibt die Anzahl der Umrundungen des Scheibenzentrums wieder, nach denen sich der Zyklus schließt. Das Erzeugendenverhältnis der Planetenkinematik kann nach der Gleichung

$$\frac{p}{q} = \frac{2}{\frac{r_a - r_i}{r_a} - \frac{r_a^2 - r_i^2}{r_a r_i}\frac{1}{N_L}} \ . \tag{4-28}$$

auf die geometrischen Parameter und das Drehzahlverhältnis zurückgeführt werden. Die bei der Berechnung von Gleichung (4-28) entstehende Dezimalzahl wird durch Primfaktorzerlegung derart zu einem Bruch p/q umgeformt, dass p und q teilerfremd sind. Für $q = 1$ schließt sich die Bahnkurve nach einer Umkreisung des Scheibenzentrums. Ist eine Umformung von p und q in natürliche Zahlen nicht möglich, schließt sich die Bahnkurve nie [Spu97].

4.3 Mögliche Bahnbewegungen

Mit Hilfe der zuvor definierten mathematischen Grundlagen lassen sich die Formen relativer Bewegungen beim Planschleifen mit Planetenkinematik mit feststehendem äußeren Stiftkranz analysieren. Kennzeichnend für die Bahnbewegung eines Werkstückpunkts sind neben der Geometrie seiner Bahnkurve die Verläufe von Bahngeschwindigkeit und -beschleunigung im Verlauf eines Teilzyklus.

Alle Werkstückpunkte mit dem gleichen Abstand vom Halterzentrum e_H legen zeitlich versetzt die gleiche Bahnkurve zurück. Die Beträge ihrer Ortsvektoren nehmen in einem Teilzyklus alle Werte zwischen $a_Z - e_H$ und $a_Z + e_H$ an. Berührt ein Werkstückpunkt auf seiner Bahn den Wälzkreisradius punktförmig, so legt er relativ zur Schleifscheibe eine gewöhnliche Epi- oder Hypozykloide zurück (vergleiche Bild 4.1). Schneidet seine Bahn den Wälzkreisradius, so treten verschlungene, andernfalls gestreckte Zykloiden auf. Zur Bestimmung der aktuellen Bahnform müssen das Drehzahlverhältnis N_L und der Abstand des Punkts vom Halterzentrum e_H bekannt sein. **Tabelle 4.2** zeigt, wie sich in Abhängigkeit von e_H entscheidet, ob ein Punkt eine gestreckte, gewöhnliche oder verschlungene Zykloide ausführt.

Tabelle 4.2: Zusammenhang zwischen Teileposition im Halter und auftretender Bahnform [nach Spu97]

Position des Punkts	zugehörige Bahnform
$e_H > \lvert a_Z - r_{Wälz}\rvert$	verschlungene Zykloide
$e_H = \lvert a_Z - r_{Wälz}\rvert$	gewöhnliche Zykloide
$e_H < \lvert a_Z - r_{Wälz}\rvert$	gestreckte Zykloide

Aus den Bedingungen in Tabelle 4.2 lässt sich ableiten, welche kinematischen Kenngrößen an der Maschine zur Erzeugung gewöhnlicher Zykloiden eingestellt werden müssen. Setzt man die Beziehung $r_{Wälz} = |a_Z - e_H|$ in Gleichung (4-24) ein, so folgt

$$N_{L\ \text{gewöhnliche Zykloiden}} = \frac{\pm\frac{r_a + r_i}{2e_H} - 1}{\pm\frac{r_i}{2e_H} + \frac{r_i}{r_a - r_i}} \begin{cases} + & \text{gewöhnliche Epizykloide} \\ - & \text{gewöhnliche Hypozykloide} \end{cases} \tag{4-29}$$

als Formulierung für das zugehörige Drehzahlverhältnis.

Besondere Bahnformen

Für bestimmte Werte, die der Wälzkreisradius $r_{Wälz}$ annehmen kann, entstehen besondere Bewegungsverhältnisse, die sich dadurch auszeichnen, dass alle Werkstückpunkte unabhängig von ihrer Lage im Halter geometrisch gleichartige Bahnkurven durchlaufen. Im folgenden Abschnitt werden diese Sonderfälle erläutert und die zugehörigen Drehzahlverhältnisse be-

rechnet. Auch hier gilt immer die Voraussetzung, dass eine Werkstückdrehung in den Halteraussparungen ausgeschlossen ist.

Besitzt der Wälzkreisradius den Wert $r_{Wälz} = r_i + r_a$, so ist der Umfang des Wälzkreises genau doppelt so groß wie der Umfang des abrollenden Kreises. Dieser dreht sich dann in einem Zyklus genau zweimal. In diesem Fall entstehen als geschlossene Bahnkurven aus zwei Teilzyklen Ellipsen, auf denen sich alle Werkstückpunkte zentrisch um das Schleifscheibenzentrum bewegen. Setzt man diese Bedingung in Gleichung (4-24) ein, so ergibt sich

$$N_{L\,\text{zentrische Ellipse}} = -\frac{r_a^2 - r_i^2}{r_i^2} \tag{4-30}$$

für das zugehörige Drehzahlverhältnis. Bei diesem Drehzahlverhältnis legen alle Werkstückpunkte Ellipsen auf der Schleifscheibe zurück, deren Geometrie von der Entfernung e_H eines Punkts vom Halterzentrum abhängt.

Strebt der Wälzkreisradius im positiven oder im negativen Bereich gegen unendlich, so geht die Winkelgeschwindigkeit ω_H der Drehung des Halters um seinen Mittelpunkt H gegen Null. Relativ zur Schleifscheibe liegt dann eine rein translatorische Halterbewegung vor, so dass die Werkstücke exzentrische Kreisbahnen um das Drehzentrum der Schleifscheibe ausführen. Setzt man die Bedingung $r_{Wälz}$ lim $\pm\infty$ in Gleichung (4-24) ein, so ergibt sich der Ausdruck

$$N_{L\,\text{exzentrische Kreisbahn}} = -\frac{r_a - r_i}{r_i} \tag{4-31}$$

für das zugehörige Drehzahlverhältnis. In diesem Fall legen alle Werkstückpunkte exzentrische Kreise gleicher Geometrie auf der Schleifscheibe zurück.

Bei einem Wälzkreisradius von Null ist Gleichung (4-24) nur für den trivialen Fall

$$N_{L\,\text{zentrische Kreisbahn}} = 0 \tag{4-32}$$

lösbar. Bei diesem Drehzahlverhältnis steht der innere Stiftkranz mit $n_i = 0$ still, nur die Schleifscheibe dreht sich. Relativ zum Scheibenzentrum bewegen sich die Werkstücke also auf zentrischen Kreisbahnen. Bei diesem Drehzahlverhältnis besteht eine Definitionslücke in der kinematischen Beschreibung, da die zentrische Kreisbahn nicht in gleichförmige Bahnelemente aufgeteilt werden kann. Dementsprechend weisen die Formeln für die Teilzykluszeit und den Teilzykluswinkel an dieser Stelle Definitionslücken auf. Daraus folgt wiederum, dass für einen Werkstückpunkt keine mittlere Bahngeschwindigkeit berechnet werden kann. Dieser Effekt ist darauf zurückzuführen, dass die Geschwindigkeit eines Punkts bei stillstehendem inneren Stiftkranz nicht nur von seiner Position im Halter, sondern auch von dessen momentaner Lage relativ zum Schleifscheibenzentrum abhängt. Diese Lage ist aber in der hier gezeigten Beschreibung der kinematischen Verhältnisse nicht definiert.

Bei $r_{Wälz} = a_Z$ verläuft der Wälzkreis direkt durch das Drehzentrum des Werkstückhalters. Für das Drehzahlverhältnis ergibt sich durch Einsetzen der Bedingung in Gleichung (4-24)

$$N_{L\,\text{Kreisbahn um das Halterzentrum}} = \frac{r_a + r_i}{r_i} \,. \tag{4-33}$$

Bei diesem Drehzahlverhältnis bewegt sich der Haltermittelpunkt nicht relativ zur Scheibe. Es liegt reine Halterrotation vor, und alle Werkstückpunkte bewegen sich auf kreisförmigen Bahnkurven, deren Radius dem jeweiligen Abstand e_H vom Halterzentrum entspricht, um das Halterzentrum H.

4.3.1 Bestimmung der Bahnform eines Werkstückpunkts

Bild 4.5 zeigt wie Bild 4.4 den Wälzkreisradius $r_{Wälz}$ als Funktion des Drehzahlverhältnisses N_L. In diesem Bild ist jedoch der Bereich zwischen den beiden Stiftkranzradien r_a und r_i, zwischen denen sich Werkstückpunkte befinden können, größer dargestellt. Der Zusammenhang zwischen dem Diagramm und der Maschinengeometrie wird durch die Zeichnung am rechten Bildrand verdeutlicht. Nach den Bedingungen aus Tabelle 4.2 ist der Bereich, in dem Werkstückpunkte liegen können, in Felder aufgeteilt, welche die unterschiedlichen Bewegungsformen kennzeichnen. Die Betragsgleichungen werden durch die Spiegelung der Wälzkreisradiusfunktion am Halterzentrum repräsentiert, die als gestrichelte Linie eingezeichnet ist. Die dunkel gefärbte Fläche in der Diagrammmitte kennzeichnet Epizykloiden, die beiden hell gefärbten Flächen an den Seiten Hypozykloiden. Durch unterschiedliche Schraffuren sind die Felder für verschlungene und gestreckte Zykloiden markiert. Für einen Punkt P_W auf der Werkstückoberfläche ist der Abstand e_H vom Halterzentrum als waagerechte, gestrichelte Linie im Diagramm eingetragen. Für jedes Drehzahlverhältnis N_L kann an dieser Linie die aktuelle Bewegungsform abgelesen werden.

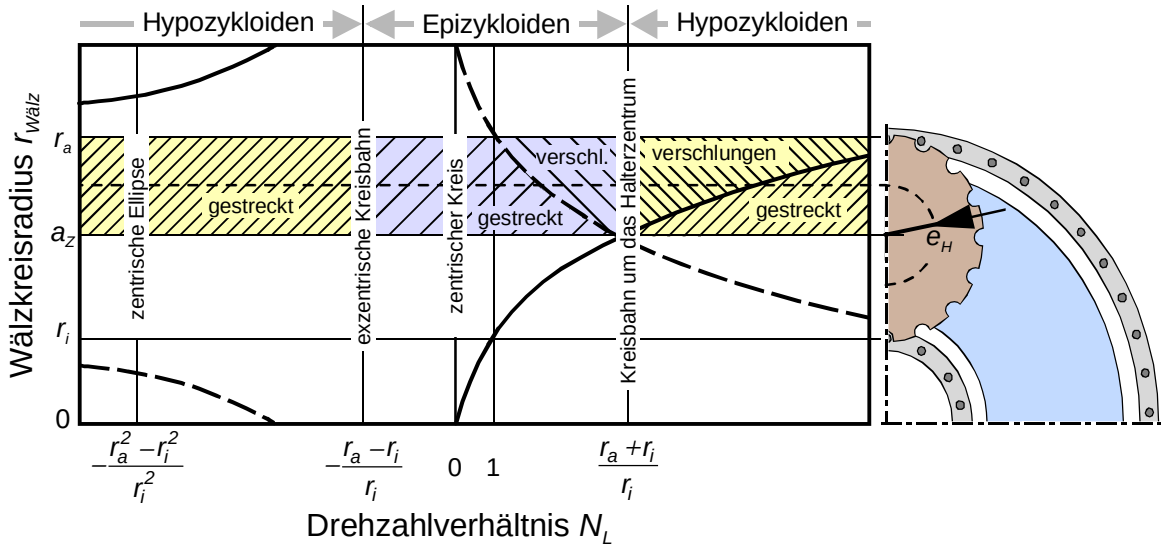


Bild 4.5: Bestimmung der Bahnform eines Werkstückpunkts

Im gesamten Definitionsbereich von N_L treten Hypozykloiden dann auf, wenn der Wälzkreisradius größer ist als der Abstand a_Z zwischen Drehzentrum Z und Haltermittelpunkt H. Ist

$r_{Wälz}$ kleiner als a_Z, so treten Epizykloiden auf. Bei Drehzahlverhältnissen $N_L \leq 1$ liegt der Wälzkreisradius außerhalb der Stiftkränze, so dass die Bahnkurven der Werkstückpunkte ihn nicht schneiden können. Hier ist die auftretende Bahnform unabhängig von e_H eindeutig definiert. Bei Drehzahlverhältnissen $N_L > 1$ liegt der Wert des Wälzkreisradius im Bereich zwischen den Stiftkränzen. Hier können also für unterschiedlich angeordnete Werkstückpunkte gleichzeitig verschlungene, gewöhnliche und gestreckte Zykloiden auftreten.

Zur Konkretisierung werden diese Betrachtungen am Beispiel einer realen Maschine nachvollzogen. Den kinematischen Analysen dieses Kapitels liegt die Geometrie einer Duomat ZL 500 der Stähli Läpp-Technik GmbH, Schönaich, zugrunde. Charakteristische geometrische Merkmale sind die Stiftkranzradien mit $r_i = 86$ und $r_a = 289{,}5$ mm. Aufgrund der Linearität aller hier erläuterten Zusammenhänge sind die vorgestellten Zahlenwerte für alle Maschinen mit dem gleichen Stiftkranz-Radienverhältnis von $r_a/r_i = 3{,}37$ gültig. Viele Maschinen unterschiedlicher Hersteller weisen ein Radienverhältnis in der Nähe dieses Werts auf. Für Maschinensysteme mit deutlich abweichenden Radienverhältnissen müssen die Zahlenwerte erneut berechnet werden. Für die folgenden Betrachtungen wurde ein Werkstückpunkt P_W mit dem Abstand $e_H = 0{,}5 \cdot r_H = 50{,}86$ mm ausgewählt. Dieser Wert entspricht dem in Bild 4.4 als gestrichelte Linie eingezeichneten Beispiel. **Tabelle 4.3** zeigt die Drehzahlverhältnisse, die für bestimmte Bahnkurven an der ausgewählten Maschine eingestellt werden müssen.

Tabelle 4.3: Berechnung der Drehzahlverhältnisse für besondere Bahnkurven auf der Duomat ZL 500

Bahnform	Berechnung	N_L
Ellipse um das Scheibenzentrum	Gl. (4-30)	-10,3
exzentrische Kreisbahn	Gl. (4-31)	-2,4
gewöhnliche Epizykloide	Gl. (4-29)	2,1
Kreisbahn um das Halterzentrum	Gl. (4-33)	4,4
gewöhnliche Hypozykloide	Gl. (4-29)	11,1

Bild 4.6 zeigt Bahnformen, die bei verschiedenen Drehzahlverhältnissen zwischen Werkstücken und Schleifscheibe auftreten. Bei den mit den Zahlen 1 bis 5 bezeichneten Bildern handelt es sich um Bahnformklassen, die in bestimmten Bereichen des Drehzahlverhältnisses N_L auftreten. Die mit den Buchstaben a bis f gekennzeichneten Kurven stellen Sonderfälle dar, die jeweils nur bei einem bestimmten Verhältnis der Drehzahlen zueinander entstehen.

Bei großen negativen Drehzahlverhältnissen legt der betrachtete Werkstückpunkt P_W gestreckte Hypozykloiden (1) auf der Schleifscheibe zurück. Diese bestehen aus vergleichsweise großen Formelementen, die sich um das Zentrum der Schleifscheibe schlingen. Als Sonderfall treten in diesem Bereich zentrische Ellipsen bei $N_L = -10{,}3$ (a) auf. Mit zunehmendem Drehzahlverhältnis strecken sich diese Formelemente immer weiter, bis sie bei $N_L = -2{,}4$ in exzentrische Kreisbahnen (b) übergehen. Diese Sonderform bildet den Übergang zu den gestreckten Epizykloiden (2). Als Sonderform im Bereich der gestreckten Epizykloiden entstehen bei $N_L = 0$ Kreisbahnen um das Drehzentrum der Schleifscheibe (c). Bei einem Drehzahlverhält-

nis von 2,1 gehen die Bahnkurven in den Sonderfall der gewöhnlichen Epizykloiden (d) über, die sich durch eine Spitze in der Nähe des Schleifscheibenzentrums auszeichnen. Im mathematischen Sinn sind die Kurven in diesem Punkt zwar stetig, aber nicht differenzierbar. Bei weiter zunehmenden Drehzahlverhältnissen gehen die Bahnen in verschlungene Epizykloiden (3) über, deren Formelemente kleiner als die der vorhergehenden Bahnformen sind und sich auf einer Hälfte des Schleifbelags wiederholen. Mit zunehmendem Drehzahlverhältnis nimmt auch die Größe der entstehenden Schlingen zu, bis diese bei $N_L = 4{,}4$ in Kreisbahnen (e) übergehen, die zentrisch um das Halterzentrum verlaufen. Bei weiter zunehmendem Drehzahlverhältnis entstehen verschlungene Hypozykloiden (4), die bei $N_L = 11{,}1$ in den Sonderfall gewöhnlicher Hypozykloiden (f) übergehen, die wiederum nicht differenzierbare Spitzen aufweisen. Im weiteren Verlauf gehen die Bahnkurven in gestreckte Hypozykloiden (5) über.

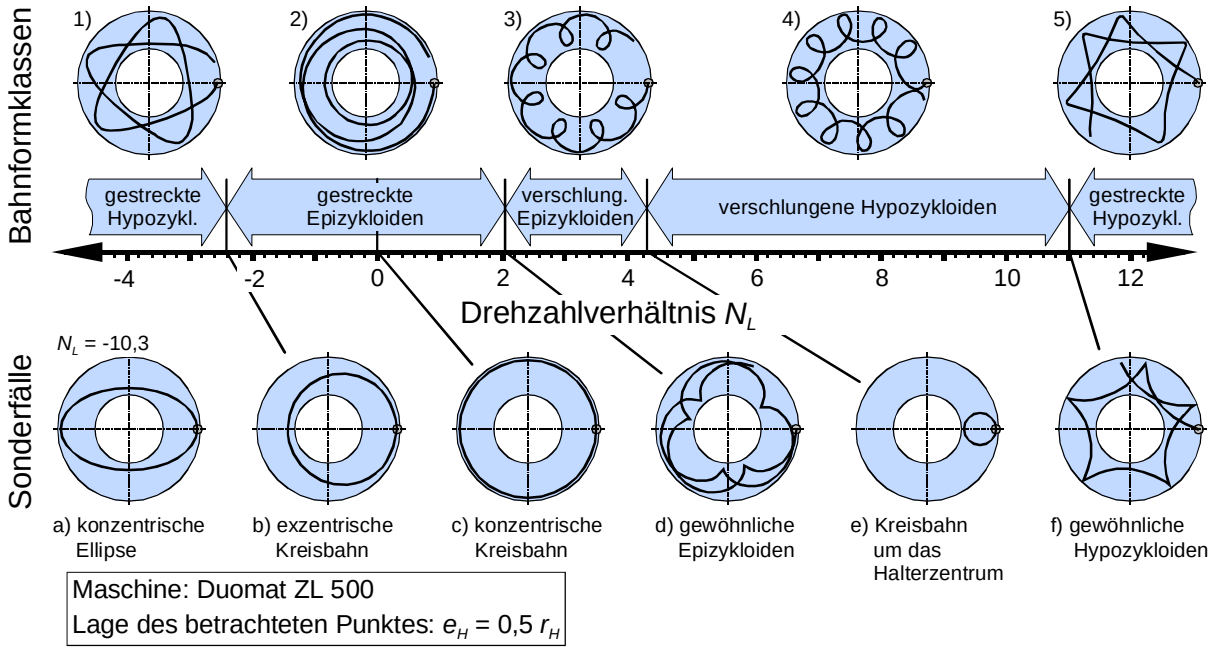


Bild 4.6: Auftretende Bahnformen in Abhängigkeit vom Drehzahlverhältnis

4.3.2 Bahngeschwindigkeit, -beschleunigung und -krümmung

Zu jeder Bahnbewegung eines Punkts P_W treten im Teilzyklus charakteristische Verläufe von Bahngeschwindigkeit, -beschleunigung und -krümmung auf. **Bild 4.7** zeigt an zwei Beispielen, dass sich diese Verläufe je nach Art der Kurve signifikant unterscheiden.

Die linke Spalte des Bildes bezieht sich auf einen Teilzyklus einer gestreckten Epizykloide mit dem Drehzahlverhältnis $N_L = 0{,}5$, die rechte Spalte auf eine verschlungene Hypozykloide mit $N_L = 5{,}5$. Aufgrund der wesentlich höheren Drehzahl n_i durchläuft der Punkt P_W einen Teilzyklus der ausgewählten Hypozykloide in $t_{\Delta Zykl} = 0{,}16$ s, während sich die Formelemente bei der epizykloidalen Bahnform erst nach $t_{\Delta Zykl} = 1{,}84$ s wiederholen. Die Epizykloide schlingt sich in dieser Zeit 2,75 mal um das Scheibenzentrum, die Hypozykloide weniger als

0,8 mal. Zur besseren Vergleichbarkeit sind die Größen in beiden Spalten im gleichen Maßstab dargestellt. Bei beiden Kurven beginnt ein Teilzyklus, wenn der betrachtete Punkt seinen maximalen Abstand vom Scheibenzentrum hat, und endet, sobald dieser Abstand zum zweiten Mal erreicht wird.

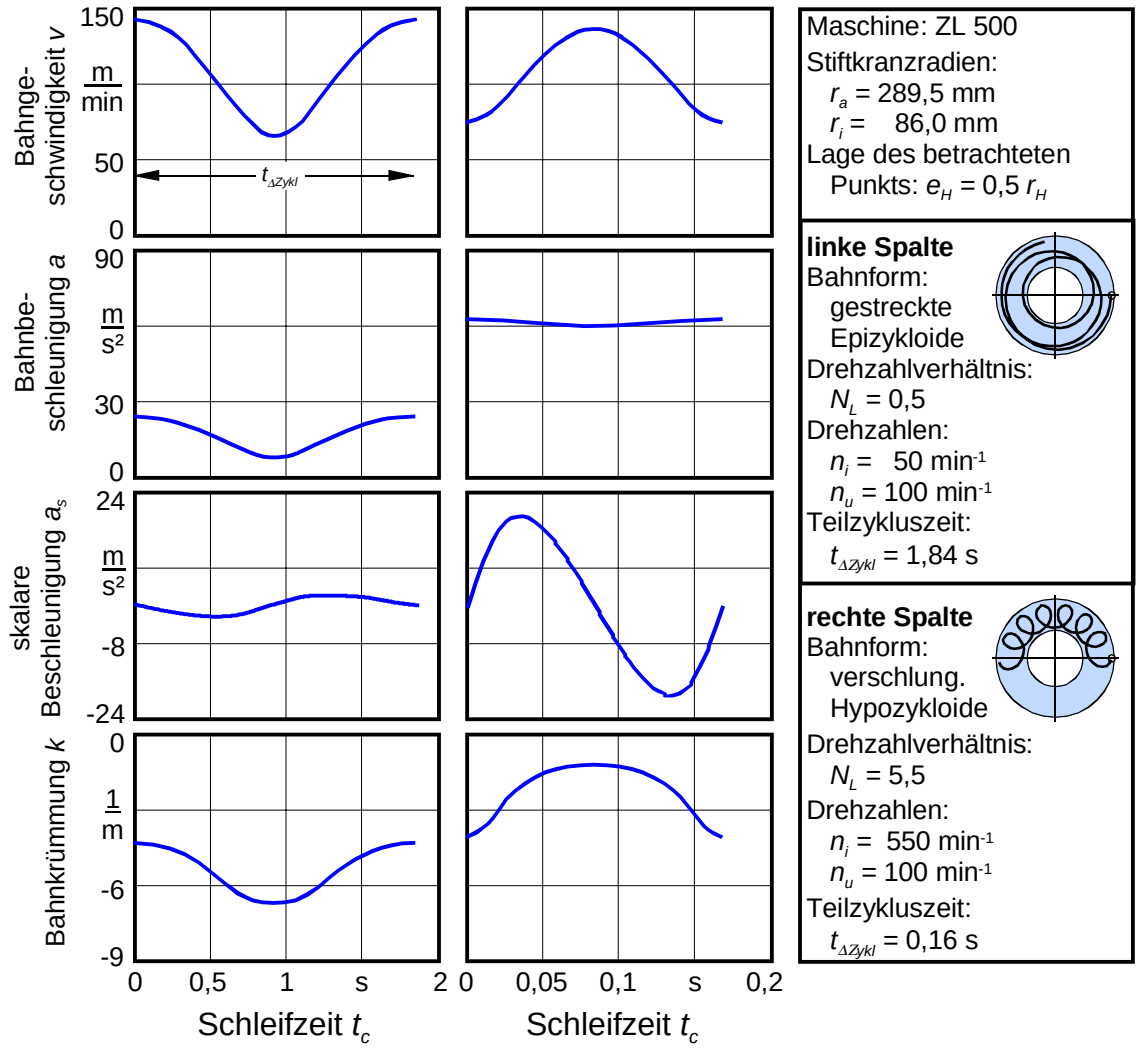


Bild 4.7: Verlauf der charakteristischen Größen zweier Bahnkurven über einem Teilzyklus

Unter dieser Voraussetzung besitzt der Punkt P_W zu Beginn eines Teilzyklus auf der gestreckten Epizykloide seine maximale Bahngeschwindigkeit von v_{max} = 143,2 m/min. Auf seinem Weg zum Scheibenzentrum wird P_W auf seine minimale Bahngeschwindigkeit v_{min} = 65,7 m/min abgebremst, die er im Punkt des geringsten Abstands vom Scheibenzentrum erreicht. In spiegelverkehrtem Ablauf wird P_W danach wieder auf v_{max} beschleunigt. Den gleichen Verlauf zeigt die Bahnbeschleunigung a, die ohne Vorzeichenwechsel von ihrem Maximalwert 24,33 auf 7,96 m/s² zurückgeht und wieder ansteigt. Im Gegensatz dazu weist die skalare Beschleunigung a_s einen Vorzeichenwechsel zum Zeitpunkt $t = 0{,}5 \cdot t_{\Delta zykl}$ auf. Also wird der Werkstückpunkt P_W in der ersten Hälfte jedes Teilzyklus abgebremst und danach wieder beschleunigt. Im Vergleich zur Bahnbeschleunigung sind die maximalen Werte der

skalaren Beschleunigung mit ± 2,2 m/s² gering. Die Kurve verläuft im Uhrzeigersinn, also mathematisch negativ, und weist keine Wendepunkte auf. Daher liegt die Bahnkrümmung *k* im negativen Bereich zwischen -4,27 und -6,63 m^{-1}.

Auf der verschlungenen Hypozykloide beginnt der Werkstückpunkt P_W jeden Teilzyklus mit der minimalen Bahngeschwindigkeit und wird zum Scheibenzentrum hin beschleunigt. Mit v_{min} = 75,6 und v_{max} = 136,9 m/min sind die extremen Geschwindigkeitswerte der zuvor besprochenen Kurve vergleichbar. Aufgrund der geringeren Teilzykluszeit finden diese Geschwindigkeitsänderungen aber in weniger als 10 % der Zeit statt. Daher liegen Werte der Bahnbeschleunigungen in diesem Fall mehr als doppelt so hoch. Bei zunehmender Geschwindigkeit sinkt *a* zur Mitte des Teilzyklus leicht von 63 auf 60 m/s² ab. Dieser Effekt ist durch die deutlich geringere Bahnkrümmung und die damit niedrigere Winkelbeschleunigung in diesem Bereich zu erklären. Die Darstellung der skalaren Beschleunigung a_s zeigt, dass der Werkstückpunkt auf seinem Weg vom äußeren zum inneren Schleifscheibenrand beschleunigt, auf dem Weg zurück zum Außenrand stark abgebremst wird. Obwohl sich diese Bahnkurve insgesamt entgegen dem Uhrzeigersinn um das Scheibenzentrum schlingt, verlaufen die einzelnen Schlingen im mathematisch negativen Sinne und die Bahnkrümmung *k* damit durchgehend negativ. Die Bogenradien dieser Kurven liegen zwischen 86 und 25 mm.

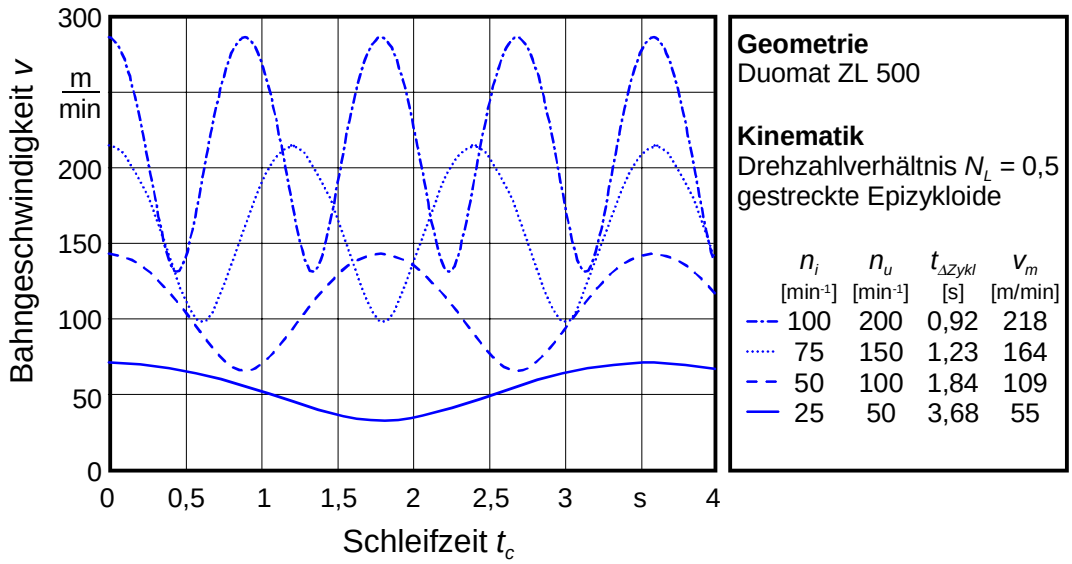


Bild 4.8: Bahngeschwindigkeiten bei konstanter Bahnkurvengeometrie unter Variation der Drehzahlen

Die Geometrie einer Bahnkurve hängt vom Drehzahlverhältnis ab. Die Geschwindigkeiten, mit denen ein Werkstückpunkt P_W diese Kurve zurücklegt, wird von der absoluten Höhe der eingestellten Drehzahlen an Stiftkränzen und Schleifscheiben bestimmt. Diesen Sachverhalt verdeutlicht **Bild 4.8**, in dem für das Drehzahlverhältnis von N_L = 0,5 die Bahngeschwindigkeiten für unterschiedliche Drehzahlen eingetragen sind. Den vier dargestellten Geschwindigkeitsverläufen liegen von unten nach oben jeweils eine um 25 min^{-1} erhöhte Drehzahl n_i und eine dementsprechend um 50 min^{-1} erhöhte Drehzahl n_u zugrunde. Dabei wird deutlich, dass sich die Teilzykluszeit $t_{\Delta zykl}$ durch eine Verdoppelung der beiden Drehzahlen halbiert. Die

absoluten Werte der Bahngeschwindigkeit verdoppeln sich gleichzeitig. Das Verhältnis von maximaler zu minimaler Bahngeschwindigkeit ist bei festem N_L konstant.

Bezogene Bahngeschwindigkeit, -beschleunigung und -krümmung

Die Verläufe von Bahngeschwindigkeiten, -beschleunigungen und -krümmungen stellen charakteristische Bearbeitungsparameter dar, deren Einfluss auf den Prozessverlauf und die Bearbeitungsqualität in folgenden Kapiteln dieser Arbeit deutlich werden wird. Um aus der kinematischen Beschreibung der Relativbewegungen bei der Bearbeitung auf Zweischeibenmaschinen ein Werkzeug zur Auswahl geeigneter Schleifparameter zu gewinnen, müssen diese Kenngrößen für das gesamte kinematische Spektrum einer Maschine dargestellt werden. Die Beschreibung einzelner ausgewählter Bahnformen reicht dazu nicht aus. Zur Einschränkung der Menge an Informationen werden im Folgenden nicht die Verläufe der charakteristischen Größen dargestellt. Vielmehr wird der Mittelwert aller entlang einer Bahnkurve auftretenden Werte gebildet. Die auftretenden Maxima und Minima werden auf diesen Mittelwert bezogen dargestellt. Diese Darstellungsart hat weiterhin den Vorteil, dass die abgebildeten Kurven unabhängig von den absoluten Drehzahlen sind.

Bild 4.9 zeigt in drei Diagrammen für ein breites Spektrum möglicher Drehzahlverhältnisse N_L die Bandbreiten der bezogenen Bahngeschwindigkeit v', der bezogenen Bahnbeschleunigung a' und der bezogenen Bahnkrümmung k' im Vergleich. Je nach Bahnform zeigen sich signifikante Unterschiede in der Ausprägung dieser Größen. Auch dieser Darstellung liegen wieder die geometrischen Abmaße der Maschine Duomat ZL 500 und ein Werkstückpunkt in der Entfernung $e_H = 0{,}5 \cdot r_H$ vom Haltermittelpunkt zugrunde.

Im Bereich der gestreckten Hypozykloiden bei negativen Drehzahlverhältnissen liegen die Bandbreiten aller drei Kenngrößen nahezu symmetrisch zu ihren Mittelwerten. Auf den hier vorliegenden langgestreckten Formelementen ohne Wendepunkte (vgl. Bild 4.6) variieren die Bahngeschwindigkeiten, -beschleunigungen und -krümmungen nur geringfügig. Beim Übergang zu den gestreckten Epizykloiden schneiden sich die Kurven für den maximalen, mittleren und minimalen Funktionswert bei $N_L = -2{,}4$. Dieser Schnittpunkt bedeutet, dass die hier exzentrisch um das Scheibenzentrum verlaufenden Kreisbahnen mit konstanter Bahngeschwindigkeit, -beschleunigung und -krümmung zurückgelegt werden. Der Wert der skalaren Beschleunigung a_s beträgt an diesem Punkt konstant Null.

Mit weiter steigendem N_L nehmen die Variationen der drei beschriebenen Größen um die jeweiligen Mittelwerte deutlich zu. Sie erfolgen auch nicht mehr symmetrisch um den Mittelwert; vielmehr weichen die Minima weiter vom Mittelwert ab als die Maxima. An dieser Darstellung zeigt sich, dass die Mittelwerte der drei Größen nicht dem arithmetischen Mittel aus Maximum und Minimum entsprechen. Der Punkt $N_L = 0$ stellt in der mathematischen Beschreibung der Relativbewegungen eine Definitionslücke dar. Im Bereich um den Nullwert zeigt die Bandbreite der bezogenen Krümmung k' ein lokales Maximum. Die minimale und die maximale Bahnkrümmung repräsentieren die Kreisbahnen um das Schleifscheibenzent-

rum, die zwei stillstehende Werkstückpunkte mit minimalem bzw. maximalem Abstand vom Schleifscheibenzentrum beschreiben.

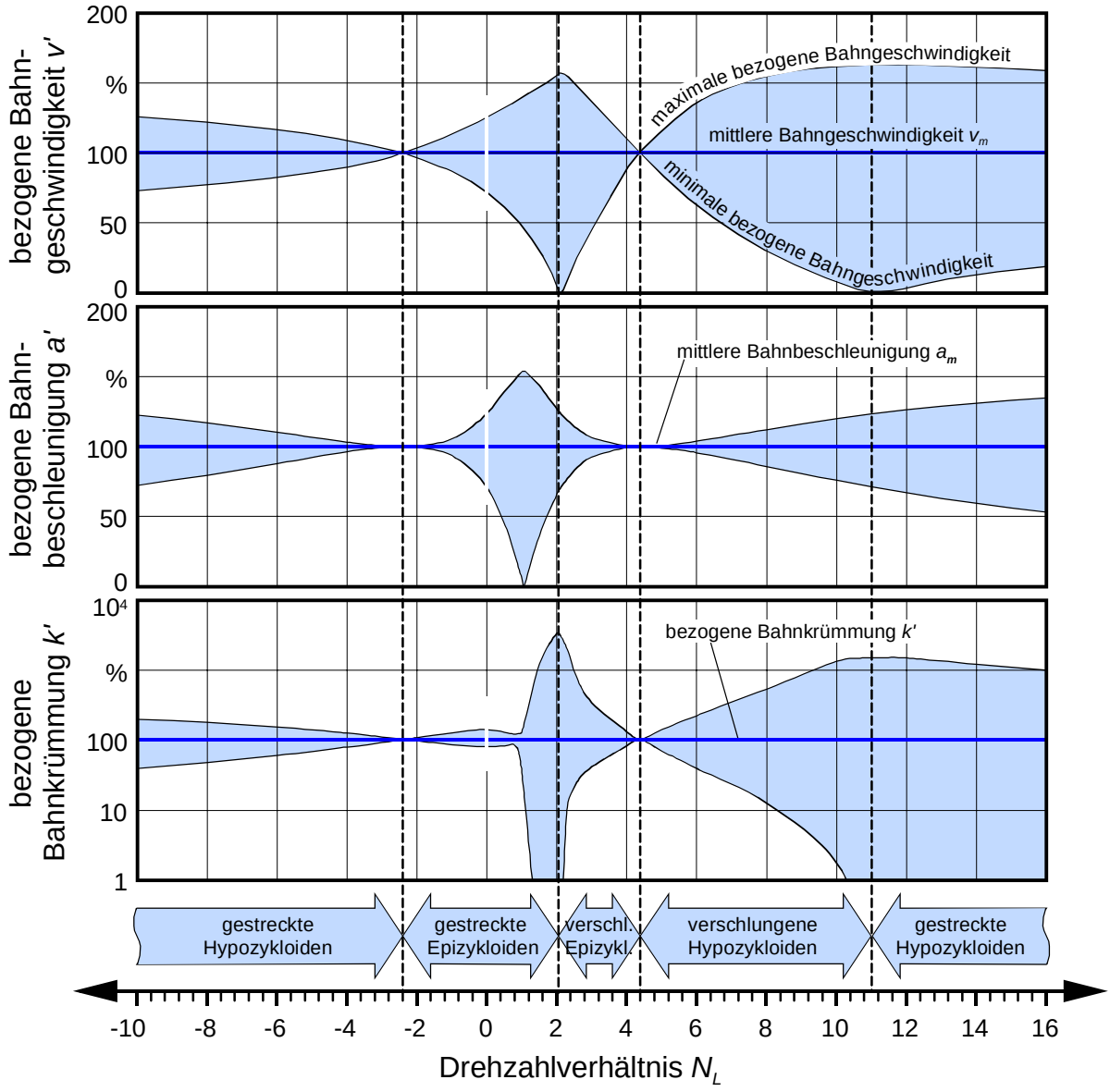


Bild 4.9: Bezogene Bahngeschwindigkeit, -beschleunigung und -krümmung als Funktion des Drehzahlverhältnisses

Bei $N_L = 1$ wird die Bandbreite der bezogenen Bahnbeschleunigung maximal. Dieser Effekt ist dadurch zu erklären, dass an dieser Stelle der Wälzkreisradius mit $r_{Wälz} = r_i$ den Wert des inneren Stiftkranzradius annimmt. Die in diesem Fall auftretende Bahnbewegung stimmt mit derjenigen überein, die bei Stillstand von Schleifscheibe und innerem Stiftkranz durch einen drehenden äußeren Stiftkranz verursacht würde. Auf dem Punkt der Bahnkurve, der dem Scheibenzentrum am nächsten liegt, nimmt die Bahnbeschleunigung des betrachteten Punkts den Extremwert Null an. In der Nähe des äußeren Schleifscheibenrandes wird die Bahnbeschleunigung maximal. Bei $N_L = 2{,}1$ legt der betrachtete Werkstückpunkt gewöhnliche Epi-

zykloiden auf dem Schleifbelag zurück. In den Spitzen dieser Kurven nehmen die Krümmungen sehr große Werte an. Bei diesem Drehzahlverhältnis zeigen sich maximale Geschwindigkeitsänderungen: der betrachtete Werkstückpunkt wird bis zum momentanen Stillstand abgebremst und anschließend auf über 150 % der mittleren Geschwindigkeit beschleunigt.

Im Bereich der verschlungenen Epizykloiden nehmen die Bandbreiten aller drei Größen mit steigendem Drehzahlverhältnis ab, bis sich die Funktionen für den maximalen und den minimalen Wert bei $N_L = 4{,}4$ wiederum schneiden. Auch die hier entstehenden Kreisbahnen um das Halterzentrum werden also mit konstanter Bahngeschwindigkeit, -beschleunigung und -krümmung zurückgelegt. Mit weiter zunehmenden Drehzahlverhältnissen nehmen die Bandbreiten wiederum stark zu, bis bei $N_L = 11{,}1$ gewöhnliche Hypozykloiden mit bezogenen Bahngeschwindigkeiten zwischen $0 \le v' \le 166\,\%$ zurückgelegt werden. Die minimalen Krümmungen werden in diesem Bereich so klein, dass sie in der logarithmischen Darstellung nicht mehr aufgetragen werden können. Mit weiter zunehmendem Drehzahlverhältnis nehmen die Variationen der Bahngeschwindigkeit und der Bahnkrümmung ab, die der Bahnbeschleunigung dagegen zu.

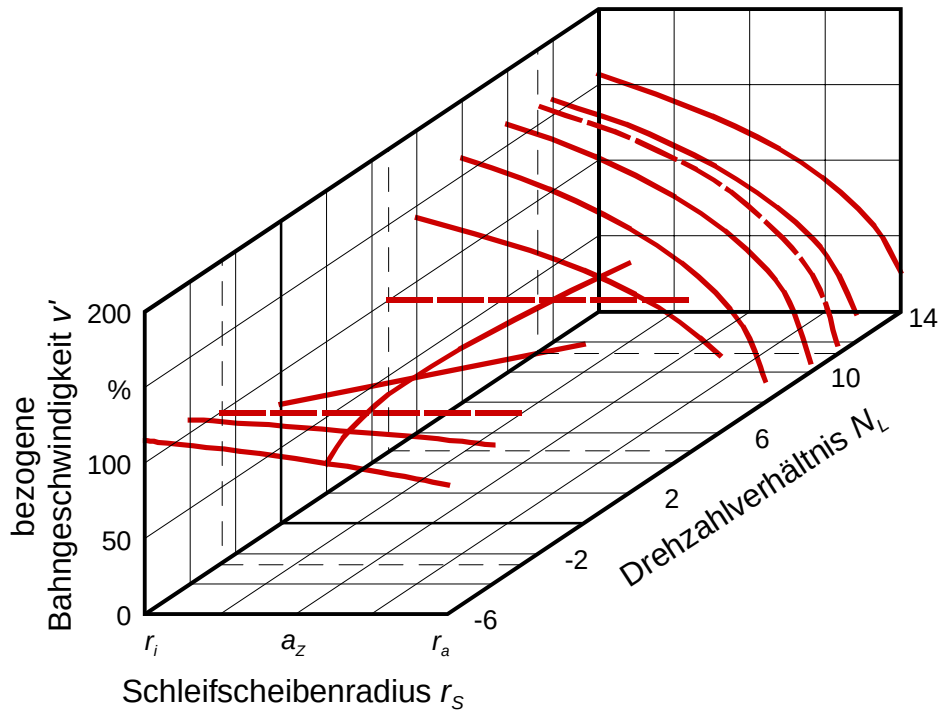


Bild 4.10: Bezogene Bahngeschwindigkeit *v'* als Funktion des Schleifscheibenradius r_S für verschiedene Drehzahlverhältnisse N_L

Verteilung der Bahngeschwindigkeit über dem Schleifscheibenradius

In diesem Abschnitt wird der Verlauf der Bahngeschwindigkeiten über dem Schleifscheibenradius untersucht. Zu diesem Zweck zeigt **Bild 4.10** die bezogene Bahngeschwindigkeit *v'* als Funktion des Schleifscheibenradius r_S für verschiedene Drehzahlverhältnisse N_L. Aus Grün-

den der Übersichtlichkeit wurde hier auf die Darstellung der Funktionen für einige Sonderfälle verzichtet.

Im Bereich hypozykloidaler Bahnformen fallen die Kurven für v' mit steigendem Schleifscheibenradius monoton. Bei gewöhnlichen Hypozykloiden nimmt die Bahngeschwindigkeit am Außenrand der Scheibe den Wert Null an. Bei Epizykloiden steigen die bezogenen Bahngeschwindigkeiten mit zunehmendem Radius monoton an, und im Fall gewöhnlicher Epizykloiden tritt am Innenrand der Schleifscheibe eine Nullstelle auf. Die Übergänge zwischen diesen beiden Gruppen bilden die exzentrische Kreisbahn sowie die Kreisbahn um das Halterzentrum, bei denen die Bahngeschwindigkeiten über dem gesamten Schleifscheibenbelag konstant sind. Auffällig ist, dass alle dargestellten Kurven monoton verlaufen.

4.4 Kinematische Flexibilität von Zweischeibenschleifmaschinen

Die hier vorgestellte Beschreibung von Bahnformen und deren Eigenschaften bei der Bearbeitung auf Zweischeibenschleif- und Läppmaschinen bezieht sich auf einen sehr breiten Bereich des Drehzahlverhältnisses. Diese theoretische Analyse wurde ohne Rücksicht auf die an realen Maschinen tatsächlich einstellbaren Drehzahlen durchgeführt. Die meisten handelsüblichen Bauweisen erlauben Drehzahlen des inneren Stiftkranzes von 50 bis 80 % der Scheibendrehzahlen. Das bedeutet im Umkehrschluss, dass ein Drehzahlverhältnis von beispielsweise $N_L = 10$ nur mit 5 bis 8 % der maximalen Schleifscheibendrehzahl erreicht werden kann. Diese minimale Ausnutzung der Maschinenleistung schränkt die einstellbaren Bahngeschwindigkeiten deutlich ein.

Nur im Bereich von $-1 \le N_L \le 1$ liegt die Drehzahl der Schleifscheibe vom Betrag her höher als die des inneren Stiftkranzes. Im Intervall zwischen $|N_L| < \pm n_{i,max} / n_{u,max}$ wird die Höhe der einstellbaren mittleren Bahngeschwindigkeiten durch die maximale Drehzahl der Schleifscheibe bestimmt. Bei Drehzahlverhältnissen außerhalb dieses Bereichs schränkt die maximale Stiftkranzdrehzahl die wählbaren Parameterkombinationen ein. Zur Verdeutlichung dieses Sachverhalts zeigt **Bild 4.11** für eine Maschine des Typs Duomat ZL 700 die Drehzahlen n_i und n_u, die erforderlich sind, um bei allen Drehzahlverhältnissen eine mittlere Bahngeschwindigkeit von $v_m = 50$ m/min zu erreichen. Die maximalen Drehzahlen des inneren Stiftkranzes mit $n_{i,max} = \pm 75$ min^{-1} und der unteren Schleifscheibe mit $n_{u,max} = \pm 120$ min^{-1} sind durch die waagerechten Linien angegeben. Die Bahnformen, die mit diesem Maschinensystem bei $v_m = 50$ m/min realisiert werden können, werden durch die maximale Drehzahl des inneren Stiftkranzes im Intervall zwischen $-4{,}4 \le N_L \le 1{,}7$ eingegrenzt. Je größer die mittlere Bahngeschwindigkeit v_m gewählt wird, desto kleiner wird dieses Intervall.

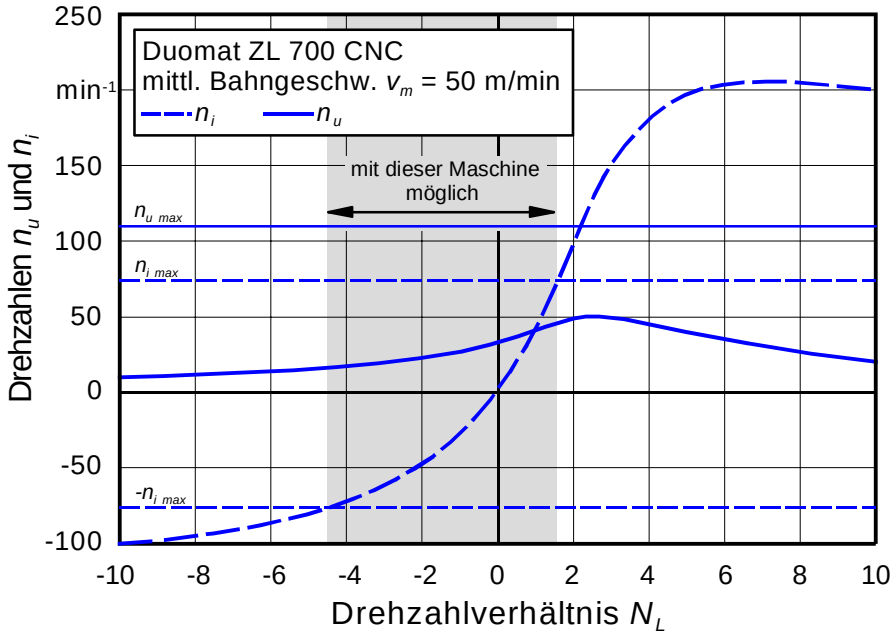


Bild 4.11: Mögliche Bahnformen einer ZL 700 bei der mittleren Bahngeschwindigkeit v_m = 50 m/min

Die kinematische Flexibilität einer Zweischeibenmaschine bildet ein Feld aus der Bandbreite aller möglichen Bahnformen und den auf diesen Formen realisierbaren Bahngeschwindigkeiten. Diese Flexibilität kann übersichtlich im Geschwindigkeits-Bahnform-Diagramm dargestellt werden, das die zur Verfügung stehenden kinematischen Möglichkeiten übersichtlich zeigt. Weiterhin erlaubt es den Vergleich der kinematischen Möglichkeiten von Maschinen unterschiedlicher Größe und Geometrien.

Bedingt durch den technologischen Fortschritt in der Antriebstechnik einerseits und durch Erkenntnisse bezüglich der Planetenkinematik andererseits wurden die kinematischen Möglichkeiten von Zweischeibenmaschinen beständig erweitert und verbessert. Die gesteigerten technologischen Anforderungen durch die Bearbeitung keramischer und anderer schwer zerspanbarer Werkstoffe führte zu einer Steigerung der maximalen Drehzahlen von Schleifscheiben und Stiftkränzen.

Bild 4.12 zeigt für verschiedene Maschinen der ZL-Familie die maximalen mittleren Bahngeschwindigkeiten v_m als Funktion des Drehzahlverhältnisses N_L. Es werden sowohl Maschinen unterschiedlicher Geometrien als auch verschiedener Baujahre verglichen. Bei einer Maschine der Baureihe ZL 800 (Baujahr 1980) ist das Drehzahlverhältnis durch ein Getriebe fest vorgegeben. Durch Polumschaltung am Antriebsmotor und Umlegen von Keilriemen sind vier verschiedene Geschwindigkeiten möglich. Die Bauart Duomat ZL 500 (Baujahr 1996) erlaubt durch frei wählbare Drehzahlen bis zu $n_{i,max} = \pm 52$ min^{-1} und $n_{u,max} = \pm 96$ min^{-1} beliebige Drehzahlverhältnisse zwischen Stiftkranz und Schleifscheiben. Durch die geringeren Radien fallen die möglichen Bahngeschwindigkeiten aber geringer aus als bei der Bauart Duomat ZL 700 CNC (Baujahr 1989). Bei den zum Schleifen erforderlichen Bahngeschwindigkeiten ist jedoch bei beiden Modellen die Bandbreite der möglichen Bahnformen eng eingegrenzt. Bei der neu entwickelten Maschine der Bauart Duomat ZL 500 (Baujahr 1999) liegen

die möglichen Drehzahlen wesentlich höher. An beiden Schleifscheiben sind bis zu n_o, n_u = ± 435 min^{-1}, am inneren Stiftkranz bis zu n_i = ± 268 min^{-1} möglich. Mit diesen Drehzahlen sind mittlere Bahngeschwindigkeiten von v_m > 600 m/min erreichbar.

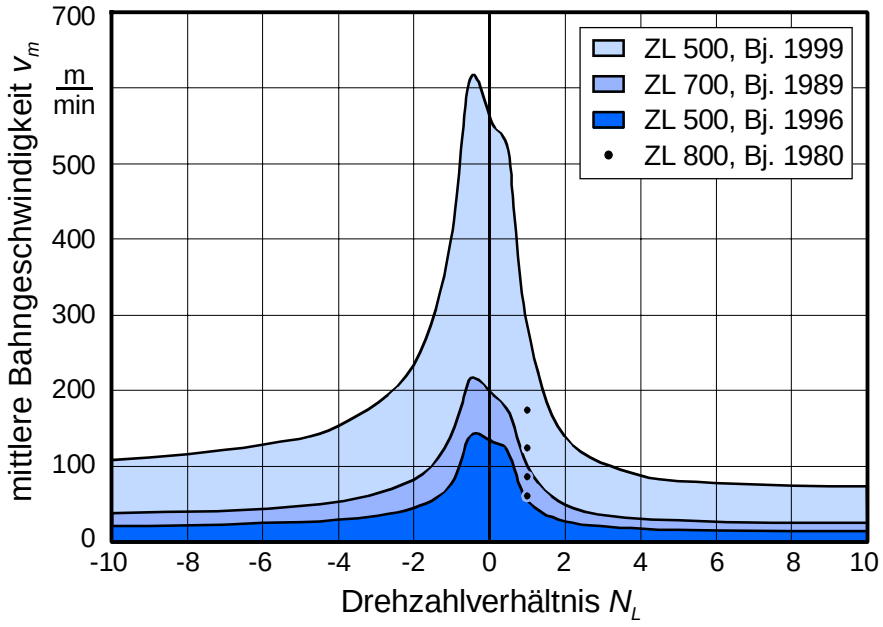


Bild 4.12: Kinematische Flexibilität von Maschinen verschiedener Geometrien und Baujahre

Die hier dargestellte Möglichkeit einer Maschine, bestimmte Bahnformen mit bestimmten Geschwindigkeiten darzustellen, wird als kinematische Flexibilität bezeichnet. Durch eine Erhöhung der maximalen Scheibendrehzahlen einer Maschine erhöhen sich die möglichen mittleren Bahngeschwindigkeiten im Zentrum des Diagramms. Zur Erhöhung der kinematischen Flexibilität einer Maschine ist eine Erhöhung der Stiftkranzdrehzahl im Vergleich zur Scheibendrehzahl erforderlich. Dadurch werden die möglichen mittleren Bahngeschwindigkeiten für große Drehzahlverhältnisse angehoben.

4.5 Schleifscheibenbelastung

4.5.1 Profil- und Kornverschleiß bei der Zweischeibenbearbeitung

Wie alle Werkzeuge unterliegen die Schleifscheiben beim Planschleifen mit Planetenkinematik einem bearbeitungsbedingten Verschleiß. Im Prozess sind die Werkzeuge äußeren Belastungen wie Kräften, Temperaturen und Relativbewegungen in der Kontaktzone ausgesetzt. In Abhängigkeit von den Eigenschaften der Schleifscheiben resultieren daraus Beanspruchungen, die für die qualitative und quantitative Ausprägung des Werkzeugverschleißes maßgeblich sind [Luc91, Pah97]. Aufgrund der Bewegungsformen beim Planschleifen mit Planetenkinematik halten sich die Werkstücke in einzelnen radialen Bereichen der Schleifbeläge un-

terschiedlich lange auf und legen dabei ungleiche Wegstrecken zurück. Daraus entstehen inhomogene Belastungen, die sich in inhomogener Verschleißbeanspruchung ausprägen.

Fast alle bisher veröffentlichten Methoden zur Berechnung der Scheibenbelastung beziehen sich auf das einseitige Planläppen. Alle Autoren gehen davon aus, dass sowohl das am Werkstück als auch das an der Läppscheibe abgetrennte Volumen der Weglänge proportional ist, die beide Wirkpartner relativ zueinander zurücklegen. Beim Werkstück, dass in ununterbrochenem Kontakt zur Läppscheibe steht, sind der zurückgelegte Weg und die Länge seiner Bahnkurve identisch. Ein Flächenelement der Läppscheibe besitzt keinen ständigen Werkstückkontakt, sondern wird im Prozess vielfach von einzelnen Werkstücken überstrichen. Daraus ergibt sich die Verschleißhypothese, dass der Verschleiß eines Flächenelements der Läppscheiben der Häufigkeit proportional ist, mit der es im Prozess von Werkstücken kontaktiert wird [Fis65a, Fis65c, Lic54, Sim88, Spu95b]. Ziel der Verschleißsimulationen beim Planläppen war es daher, durch grafische oder numerische Methoden die Verteilung der von allen Werkstücken zurückgelegten Bahnkurven über dem Läppscheibenradius zu ermitteln. Entsprechend der Verschleißhypothese gibt diese Bahnlängenverteilung das zu erwartende Verschleißprofil der Läppscheibe qualitativ wieder.

Mit einem Gedankenexperiment lässt sich nachweisen, dass diese Verschleißhypothese nicht auf die Bearbeitung zwischen zwei Schleifscheiben übertragbar ist: Lässt man beide Scheiben mit gleicher Drehzahl in der gleichen Richtung rotieren, so ergibt die Bewegung der Werkstücke bezüglich der oberen wie der unteren Scheibe die gleiche Bahnlängenverteilung mit umgekehrtem Vorzeichen. Diesen Sachverhalt verdeutlicht die Skizze links in **Bild 4.13**. Wäre der Profilverschleiß den Bahnlängenverteilungen proportional, würden beide Scheiben im gleichen Abstand vom Drehzentrum Verschleißmaxima aufweisen, zwischen denen der Arbeitsspalt höher wäre als im restlichen Kontaktbereich. Aufgrund dieses vergrößerten Abstands könnte der Arbeitsdruck an dieser Stelle nicht mehr übertragen werden, so dass weder weitere Zerspanungsarbeit noch weiterer Verschleiß möglich wäre.

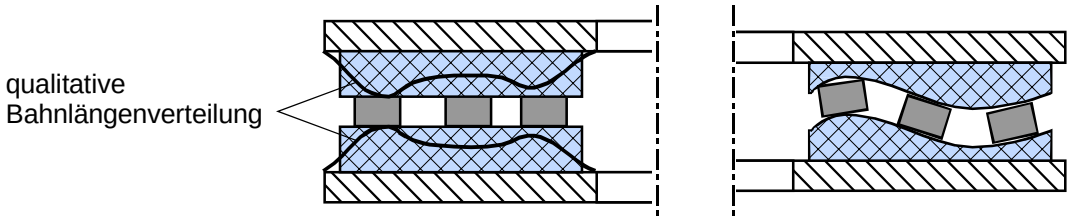


Bild 4.13: Selbstkorrektur der Höhe des Arbeitsspalts beim Schleifen zwischen zwei Scheiben

Diesen Überlegungen zufolge herrscht bei der Bearbeitung zwischen zwei Scheiben der größte Arbeitsdruck immer dort, wo der Profilverschleiß am geringsten ist. Auf diese Weise ist in Form einer Selbstkorrektur gewährleistet, dass sich die Höhe des Arbeitsspalts über dem Scheibenradius stets ausgleicht (Bild 4.13 rechts). Für den Verschleiß bei der doppelseitigen Bearbeitung ergeben sich daraus im Gegensatz zur einseitigen Bearbeitung zwei zusätzliche Randbedingungen:

- Im Rahmen der Elastizitäten von Schleifscheiben und Werkstücken weist der Schleifspalt unabhängig vom Scheibenradius überall die gleiche Höhe auf. Diese Höhe unterliegt im Prozess zeitlichen Schwankungen, lokale Änderungen gleichen sich aber automatisch aus. Daraus folgt, dass die Höhen aller Werkstücke theoretisch zu jedem Zeitpunkt gleich sind.

- Die Übertragung der Arbeitskraft erfolgt von der oberen Schleifscheibe über die Werkstücke auf die untere Schleifscheibe. Bei prismatischen Werkstücken ist der Druck an Ober- und Unterseite gleich groß. Es ist daher nicht abschätzbar, ob ein Verschleißvorgang eher an seiner oberen oder der unteren Kontaktfläche auftritt. Die Vorhersage von Verschleißprofilen, die aus der Belastung der Schleifscheibe resultieren, ist daher nicht möglich.

Beim Läppen beschränkt sich die Verschleißproblematik auf das Ebenhalten der Läppscheiben. Der Kornverschleiß besitzt hier nur eine untergeordnete Bedeutung, da dem Prozess über die Läppsuspension ständig Körner mit scharfkantigen Schneiden zugeführt werden. Beim Schleifen treten neben makroskopischem Profilverschleiß der Schleifscheiben auch mikroskopische Verschleißformen an den Schneidkörnern wie Anflächungen oder Kornausbrüche auf. Da die Schneidkörner lange Zeit in der aktiven Zone verbleiben, kommt diesem mikroskopischen Verschleiß eine ausschlaggebende Bedeutung für den Prozessverlauf zu. Liegen über dem Schleifscheibenradius unterschiedliche Zerspanungsbedingungen vor, so können in einzelnen Bereichen des Schleifbelags unterschiedliche Kornverschleißmechanismen überwiegen. Als Folge können Gradienten in der Schärfe des Schleifbelags auftreten. Auf das einzelne Schneidkorn bezogen erzeugen hohe Spanungsdicken bei niedrigen Schnittgeschwindigkeiten eher ein Kornsplittern, während niedrige Spanungsdicken bei hohen Geschwindigkeiten eher zu einer Kornabstumpfung durch thermischen Verschleiß führen. Abnehmende Schnittfreudigkeit wirkt sich verlängernd auf die Schleifzeiten und damit negativ auf die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens aus. Ein stationäres Bearbeiten ist nur dann möglich, wenn auf dem gesamten Schleifscheibenbelag eine Selbstschärfung stattfindet. Ein Abstumpfen oder Anflächen der Körner auf einem geringen Flächenanteil der Schleifscheiben kann den gesamten Zerspanungsprozess zum Erliegen bringen. Durch makroskopischen Verschleiß treten Abweichungen von der ebenen Belagsgeometrie, sogenannte Verschleißprofile, auf. Diese Formabweichungen der Schleifbeläge übertragen sich auf die Werkstücke und verschlechtern das Arbeitsergebnis.

In den folgenden Abschnitten wird ein Algorithmus vorgestellt, mit dessen Hilfe die Belastung der Schleifscheiben in Abhängigkeit von den geometrischen und kinematischen Parametern simuliert werden kann. Damit lassen sich die belastungsbeeinflussenden Größen ermitteln und mit geringem Aufwand theoretisch untersuchen. Das Ziel der Simulation der Schleifscheibenbelastung ist es, ein Werkzeug zur Suche nach optimalen Prozessparametern hinsichtlich Prozessverlauf und Arbeitsergebnis zu geben.

4.5.2 Definition der Schleifscheibenbelastung

Entscheidend für den Verschleiß einer Schleifscheibe ist nicht nur das Zerspanungsvolumen, sondern auch die Bedingungen, unter denen dieses Volumen abgetrennt wird. Zu diesen gehören die Werkstoffeigenschaften von Werkstück und Schleifscheibe, die Kühlschmierbedingungen und die Prozesskenngrößen wie Schleifdruck oder Schnittgeschwindigkeit.

Bei den Umfangsschleifverfahren besitzen alle aktiven Körner nahezu den gleichen Abstand von der Rotationsachse der Schleifscheibe und unterliegen daher den gleichen kinematischen Eingriffsbedingungen hinsichtlich Schnittgeschwindigkeit und Kontaktlänge. Aus diesem Grund ist es möglich, alle Prozesskenngrößen auf die Breite der Schleifscheibe zu normieren und den gesamten Prozess zweidimensional in einer Ebene darzustellen, die senkrecht zur Rotationsachse der Schleifscheibe angeordnet ist. Als eine charakteristische Größe für den Prozessverlauf und die Werkzeugbelastung wird bei diesen Schleifverfahren die bezogene äquivalente Spanungsdicke h_{eq} angesehen [Fun94, Heu92, ISO3002/5, Kön96, Sal92]. Diese ist nach

$$h_{eq} = \frac{Q'_W}{v_c} \tag{4-34}$$

definiert als Quotient aus dem auf die Schleifscheibenbreite bezogenen Zeitspanungsvolumen Q'_W und der Schnittgeschwindigkeit v_c. Gleichwertig kann die bezogene äquivalente Spanungsdicke auch nach

$$h_{eq} = \frac{V'_W}{s} \tag{4-35}$$

durch das auf die Breite der Schleifscheibe bezogene Zerspanungsvolumen und den Schleifweg ausgedrückt werden. Die bezogene äquivalente Spanungsdicke besitzt die Dimension einer Länge und wird in Mikrometern angegeben.

Die Anwendung der bezogenen äquivalenten Spanungsdicke ist beim Planschleifen mit Planetenkinematik aus mehreren Gründen nicht möglich. Die Definition einer Spanungsdicke oder Spanungsschicht macht beim flächenhaften Kontakt keinen Sinn, denn die Schleifscheiben liegen ohne vorherige Zustellung auf den Werkstücken auf. Weiterhin ist der Bezug der beschreibenden Größen auf die Breite der Schleifscheiben nicht zulässig, da sich die Prozessbedingungen über dem Scheibenradius signifikant unterscheiden. Erstens besitzen die aktiven Schneidkörner bei allen Stirnschleifverfahren unterschiedliche Abstände von der Rotationsachse der Schleifscheibe und weisen daher unterschiedliche Schnittgeschwindigkeiten auf. Zweitens verteilt sich das Zerspanungsvolumen als Folge der speziellen Verfahrenskinematik nicht gleichmäßig über der Breite der Schleifscheibe. Drittens stehen mit zunehmendem Schleifscheibenradius mehr aktive Schneidkörner zur Zerspanung zur Verfügung.

Um den Besonderheiten des Planschleifens mit Planetenkinematik gerecht zu werden, wird in Anlehnung an Gleichung (4-35) der Belastungsfaktor b_S nach dem Ausdruck

$$b_S = \frac{V_W}{s \cdot A_S} = \frac{\Delta h_W \cdot z_W \cdot A_W}{s \cdot A_S} \tag{4-36}$$

definiert als Quotient aus dem auf die Schleifscheibenfläche A_S bezogenen Zerspanungsvolumen V_W und dem Schleifweg s. Die Belastung eines Flächenelements der Schleifscheibe nimmt mit dem in ihm zerspanten Volumen zu und mit dem zur Zerspanung zur Verfügung stehenden Weg ab. Alle drei Größen hängen vom Radius der Schleifscheibe ab, so dass auch der Belastungsfaktor eine Funktion des Schleifscheibenradius $b_S(r_S)$ darstellt. Der Belastungsfaktor ist ein einheitsloser Gewichtungswert zur Charakterisierung der kinematisch beeinflussten Zerspanungsbedingungen. Wie die folgende Überlegung zeigt, reicht er aber zur Beurteilung der tatsächlichen Schleifscheibenbelastung nicht aus: Verdoppelt man die Werkstückanzahl z_W, so steigen bei gleicher Höhendifferenz Δh_W, die im Folgenden als Teilehöhenreduktion bezeichnet wird, auch das Zerspanungsvolumen V_W und die Summe der insgesamt zurückgelegten Wegstrecken s jeweils um den Faktor zwei. Der resultierende Belastungsfaktor bleibt nach Gleichung (4-36) konstant, obwohl die Schleifscheibe mehr Zerspanungsarbeit leisten muss. Um diese zu berücksichtigen, wird die Schleifscheibenbelastung B_S nach

$$B_S = V_W \cdot b_S \tag{4-37}$$

definiert als Produkt aus dem Zerspanungsvolumen V_W und dem Belastungsfaktor b_S. Auch die Schleifscheibenbelastung B_S ist eine Funktion des Schleifscheibenradius.

4.5.3 Schleifscheibenbelastung durch die Planetenkinematik

Von verschiedenen Autoren wird berichtet, dass das Zeitspanungsvolumen sowohl beim Planschleifen mit Planetenkinematik als auch beim Planläppen linear mit der mittleren Bahngeschwindigkeit ansteigt [Fun94, Sab91, Uhl00]. Dies bedeutet, dass das Zerspanungsvolumen pro zurückgelegtem Schleifweg von der Bahngeschwindigkeit unabhängig ist. Diese makroskopischen Beobachtungen beziehen sich durchweg auf das Prozessergebnis als Mittelwert über einen längeren Bearbeitungszeitraum und eine größere Werkstückanzahl. Bei einer kurzzeitigen Betrachtung der Vorgänge im Arbeitsraum ist die Annahme einer mittleren Bahngeschwindigkeit jedoch unzulässig, da der momentanen Relativgeschwindigkeit ein bedeutender Einfluss auf die Beteiligung einzelner Schleifscheibenbereiche am Zerspanungsprozess zukommt.

Die Skizze links in **Bild 4.14** zeigt beispielhaft zwei Werkstücke A und B, die sich entlang einer gestreckten Epizykloiden bewegen. Bei dieser Bahnform steigt die Bahngeschwindigkeit mit dem Schleifscheibenradius monoton an, wie das Diagramm rechts im Bild verdeutlicht. Im Mittelwert über einen Teilzyklus besitzen beide Werkstücke die gleiche Bahngeschwindigkeit und legen gleiche Wege zurück. Betrachtet man jedoch ein kürzeres Zeitintervall $\Delta t_c < t_{\Delta zykl}$, so zeigen sich signifikante Unterschiede. Das Werkstück B, welches sich zum Zeitpunkt t_0 am Innenrand der Schleifscheibe befindet, legt im Zeitintervall Δt_c eine kürzere Bahnstrecke zurück als das Werkstück A, das in der Nähe des Scheibenaußenrands startet.

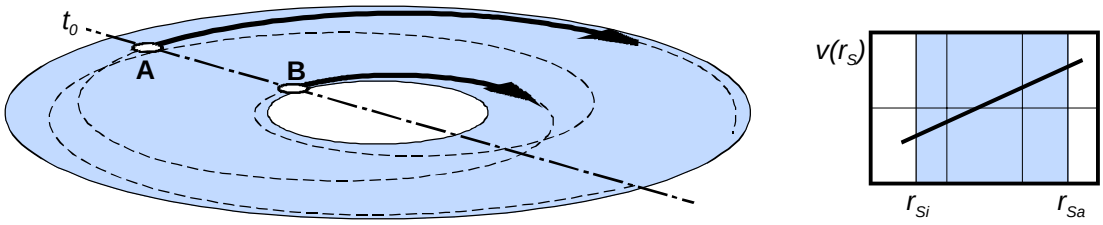


Bild 4.14: Bahnkurvenabschnitte zweier Werkstückpunkte im Zeitintervall Δt_c

Während des Zeitintervalls Δt_c sinkt die obere Schleifscheibe um den Betrag Δh_W der Teilehöhenreduktion auf die untere Schleifscheibe ab. Ihre Vorschubgeschwindigkeit ergibt sich aus der Teilehöhenreduktion Δh_W und der Schleifzeit t_c zu

$$\Delta \dot{h}_W = \frac{\Delta h_W}{t_c} \tag{4-38}$$

und wird nach einem Vorschlag von FUNCK [Fun94] als zeitbezogene Teilehöhenreduktion $\Delta \dot{h}_W$ bezeichnet. Da alle Werkstücke im Arbeitsraum unabhängig von ihrer radialen Lage zu jedem Zeitpunkt die gleiche Höhe besitzen, muss auch die zeitbezogene Teilehöhenreduktion vom Radius der Schleifscheibe unabhängig sein. Im Prozess kann sie zwar zeitlichen Schwankungen unterliegen, muss aber örtlich konstant sein, da die Schleifscheibe nicht auf bestimmten Radien schneller absinken kann als auf anderen.

Die Teilehöhenreduktion kann aus wegbezogener Sichtweise nach

$$\Delta h_W = s(r_S) \cdot \Delta h'_W(r_S) \tag{4-39}$$

als Produkt aus Schleifweg s und wegbezogener Höhenreduktion $\Delta h'_W$ ermittelt werden [Fun94]. Der Weg, den ein Werkstückpunkt in einem Zeitintervall zurücklegt, errechnet sich aus seiner Bahngeschwindigkeit $v(t,r_S)$, die funktionell von der Zeit und vom Schleifscheibenradius abhängt. Aus diesem Grund gilt auch für den zurückgelegten Weg die Abhängigkeit $s(t,r_S)$. Nach Gleichung (4-39) ist demnach auch die wegbezogene Teilehöhenreduktion eine Funktion des Schleifscheibenradius. Für das konkrete Beispiel in Bild 4.14 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 (4-39) erhält man für die wegbezogene Teilehöhenreduktion die Gleichung

$$\Delta h'_W(t, r_S) = \frac{\Delta h_W(t)}{\Delta s(t, r_S)} = \frac{\Delta \dot{h}_W(t)}{v(t, r_S)}, \tag{4-40}$$

nach der $\Delta h'_W$ indirekt proportional vom zurückgelegten Weg beziehungsweise von der Bahngeschwindigkeit v eines Werkstücks abhängt. Demnach treten dort die höchsten wegbezogenen Teilehöhenreduktionen auf, wo die Bahngeschwindigkeiten am niedrigsten sind. In **Bild 4.15** sind die zeit- und wegbezogene Teilehöhenreduktion sowie die Bahnbewegung der beiden Werkstücke A und B als Vektoren dargestellt.

Die Skizze zeigt eine doppelseitige Bearbeitung zwischen zwei Scheiben, wie sie dem Planschleifen mit Planetenkinematik entspricht. Trotz unterschiedlicher Bahnlängen s_A und s_B reduzieren sich die Höhen beider Werkstücke gleichmäßig um die Teilehöhenreduktion Δh_W. Aufgrund der unterschiedlichen Schleifwege ergeben sich für beide Werkstücke unterschiedliche wegbezogene Teilehöhenreduktionen $\Delta h'_{WA} \neq \Delta h'_{WB}$. Diese entsprechen nach Gleichung (4-40) den Steigungen der schräg abwärts verlaufenden Vektoren. Mit der wegbezogenen Teilehöhenreduktion steigt die Belastung der Schleifscheibe. Je kürzer der Schleifweg ist, um so steiler wird der Winkel, unter dem ein Schneidkorn in die Werkstückoberfläche eindringt. Mit Gleichung (4-36) lässt sich dieser Zusammenhang quantifizieren: ersetzt man die Teilehöhenreduktion nach Gleichung (4-39), so ergibt sich

$$b_S = \Delta h'_W \frac{z_W \cdot A_W}{A_S} \tag{4-41}$$

für den Belastungsfaktor b_S. Dieser hängt proportional mit der wegbezogenen Teilehöhenreduktion $\Delta h'_W(t,r_S)$ zusammen und ist wie diese eine Funktion der Zeit und des Schleifscheibenradius $b_S(t,r_S)$.

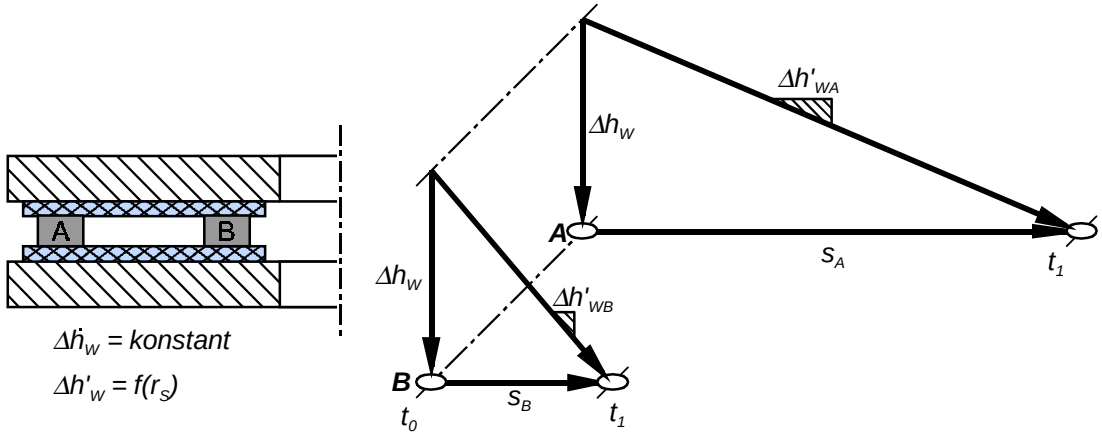


Bild 4.15: Zeit- und wegbezogene Teilehöhenreduktion bei der Bearbeitung zwischen zwei Schleifscheiben

Bild 4.16 zeigt vektoriell die zeit- und wegbezogenen Teilehöhenreduktionen bei einer einseitigen Bearbeitung zweier Werkstücke unter einzeln aufgebrachten Auflasten. Diese Darstellung entspricht den Modellvorstellungen, die der Verschleißhypothese für das einseitige Planläppen zugrunde liegen.

Die beiden Werkstücke A und B beeinflussen sich im dargestellten Fall gegenseitig nicht. Da beide mit identischen Kräften belastet werden, entspricht die an beiden Werkstücken abgetrennte Teilehöhe den jeweils zurückgelegten Wegen. Hier ist also die wegbezogene Teilehöhenreduktion $\Delta h'_W$ konstant, die pro Zeiteinheit zerspante Werkstückhöhe $\Delta h_{WA} \neq \Delta h_{WB}$ aber unterschiedlich und von der momentanen radialen Position abhängig. Folgerichtig kann man bei diesem zweiten Aufbau aus der Verteilung der Weglängen über dem Schleifscheibenradius auf die Belastung der Schleifscheibe schließen. Die Höhen der einzelnen Werkstücke unterscheiden sich in Abhängigkeit von ihrer radialen Position.

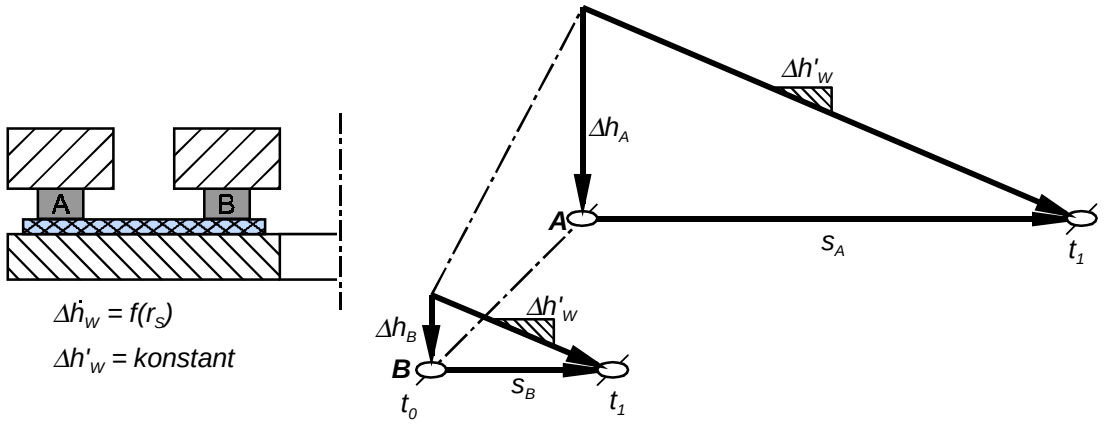


Bild 4.16: Zeit- und wegbezogene Teilehöhenreduktion bei der einseitigen Planbearbeitung

4.6 Simulation der Schleifscheibenbelastung

4.6.1 Vorgehensweise bei der Modellbildung

In den bisherigen Abschnitten dieses Kapitels wurden die Bahnbewegungen der Planetenkinematik für einzelne Punkte der Werkstückoberfläche beschrieben. Für die Simulation der Schleifscheibenbelastung müssen die Flächen und Bewegungen aller Werkstücke Berücksichtigung finden. Die Bewegung der Werkstücke im Arbeitsraum ist nicht durch die Ränder der Schleifscheibe, sondern durch die Radien der Stiftkränze eingeschränkt. Die Breite des Schleifbelags ist theoretisch für die Bewegung der Werkstücke nicht von Belang. Aus diesem Grund findet die Schleifscheibengeometrie in der folgenden Simulationsrechnung keine Berücksichtigung. Um die Verteilungen charakteristischer Prozessgrößen über dem Schleifscheibenradius darstellen zu können, wird die Fläche zwischen den Stiftkränzen in konzentrische, kreisringförmige Klassen gleicher Breite aufgeteilt, die im Folgenden als Schleifscheibenklassen bezeichnet werden. Die Anzahl der Schleifscheibenklassen stellt einen Parameter für die Genauigkeit der numerischen Berechnungen dar. Die Grundlage für diese Simulationsrechnung bildet die von SIMPFENDÖRFER [Sim88] vorgeschlagene Methode zur Ermittlung der Bahnlängenverteilung, die aus den beiden Schritten

1 Beschreibung der Werkstückgeometrie und ihrer Anordnung im Werkstückhalter durch eine zweidimensionale Gestaltfunktion sowie

2 Aufsummierung der Bahnkurvenabschnitte endlich vieler diskreter Werkstückpunkte in den einzelnen Schleifscheibenklassen zur Bahnlängenverteilung

besteht. Anschließend wird dieses Modell für die Bearbeitung von Werkstücken zwischen zwei Schleifscheiben erweitert.

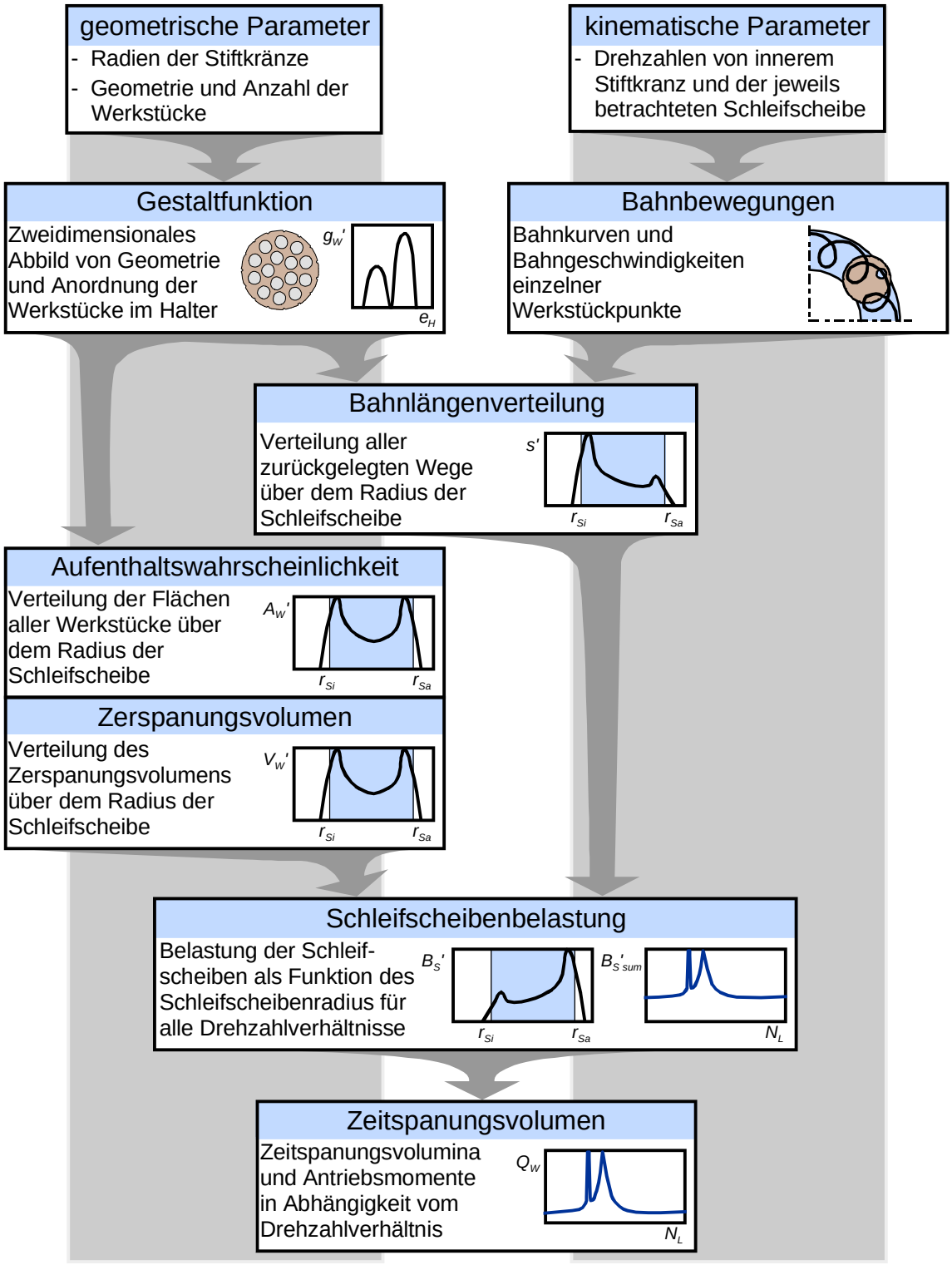


Bild 4.17: Struktur der Simulation der Schleifscheibenbelastung

Aus den vorgestellten Überlegungen zur Schleifscheibenbelastung ergeben sich darüber hinaus die folgenden vier Schritte:

3 Berechnung der Aufenthaltswahrscheinlichkeiten aller Werkstücke in den einzelnen Schleifscheibenklassen

4 Ermittlung des Zerspanungsvolumens als Funktion des Schleifscheibenradius

5 Simulation der Schleifscheibenbelastung als Funktion des Schleifscheibenradius für beliebige Drehzahlverhältnisse und Werkstückgeometrien

6 Abschätzung der Prozessgeschwindigkeit und der Prozessmomente, die sich aus den unterschiedlichen Schleifscheibenbelastungen ergeben

Im Folgenden werden die sechs Schritte zur Simulation der Schleifscheibenbelastung erläutert. In **Bild 4.17** sind alle zu berechnenden Prozesskenngrößen in der logischen Abfolge der Simulationsrechnung eingezeichnet. Die grundlegenden Parameter der Planetenkinematik können in geometrische und kinematische Prozesskennwerte unterteilt werden und sind ganz oben dargestellt. Alle im Weiteren definierten Größen basieren entweder auf einer oder auf beiden dieser Parametergruppen. Um diese Abhängigkeiten kenntlich zu machen, sind den beiden Parametergruppen dunkel hinterlegte, senkrechte Balken zugeordnet. Diejenigen Größen, die auf einem der beiden Balken eingezeichnet sind, hängen ausschließlich von der entsprechenden Parametergruppe ab. Mittig eingezeichnete Prozessgrößen werden sowohl von der Geometrie als auch von den Drehzahlen beeinflusst.

Der in Bild 4.17 skizzierte numerische Algorithmus zur Simulation der Schleifscheibenbelastung und der Prozessgeschwindigkeit wurde in ein Computerprogramm im Softwarepaket Microsoft Excel / Visual Basic umgesetzt.

4.6.2 Gültigkeitsbereich des Modells

Reale Bearbeitungsprozesse werden neben den geometrischen und kinematischen Parametern auch von physikalischen Eigenschaften der Wirkpartner beeinflusst, die zumeist im Prozessverlauf nicht konstant sind und sich einer idealisierten geometrischen Beschreibung entziehen. Aus diesem Grund gelten für die Ermittlung der Schleifscheibenbelastung die folgenden Annahmen und Festlegungen, von denen mehrere auch für Verschleißsimulation beim einseitigen Planläppen zutreffen [nach Sim88, Spu95b]:

- Die Höhe des Schleifspalts zwischen den beiden Scheiben ist keine Funktion des Schleifscheibenradius. Sie ist zeitlich variabel, aber örtlich konstant. Alle Werkstücke besitzen zu jedem Zeitpunkt die gleiche Höhe.

- Die Schärfe und damit die Zerspanungseigenschaften einer Schleifscheibe sind auf ihrer gesamten Fläche gleich und unterliegt keinen lokalen Schwankungen.

- Aufgrund der großen Anzahl von gleichzeitig bearbeiteten Werkstücken ergeben sich Gradienten hinsichtlich der Schleifscheibenbelastung ausschließlich in radialer Richtung. Alle entstehenden Belastungsprofile an den Schleifscheiben verlaufen konzentrisch zum Schleifscheibenzentrum.

- Eine mögliche Eigendrehung der Werkstücke in ihren Halteraussparungen wird nicht berücksichtigt.

- Die Oberflächen von Werkstücken und Schleifscheiben berühren sich vollflächig. Verringerte Kontaktflächen durch Abweichungen der Wirkpartner von der ideal ebenen Geometrie bleiben unberücksichtigt.

- Der Kühlschmierstoff ist gleichmäßig im Arbeitsraum verteilt und beeinflusst weder den Zerspanungsprozess noch die qualitative und quantitative Verschleißausprägung der Schleifscheiben.

- Der Schleifdruck ist in der Kontaktzone zeitlich und örtlich konstant.

4.6.3 Numerischer Algorithmus

4.6.3.1 Beschreibung der Werkstückgeometrie durch die Gestaltfunktion

Für die numerische Berechnung der Schleifscheibenbelastung müssen die Informationen über Anzahl, Geometrie und Lage der Werkstücke im Werkstückkäfig in eine handhabbare Form gebracht werden. Dazu wird der Umstand ausgenutzt, dass alle Werkstückpunkte mit dem gleichen Abstand e_H vom Halterzentrum zeit- und ortsversetzt die gleiche Bahnbewegung ausführen und damit den Schleifscheibenbelag in vergleichbarer Weise belasten. Diese Punkte können zusammengefasst diskutiert werden.

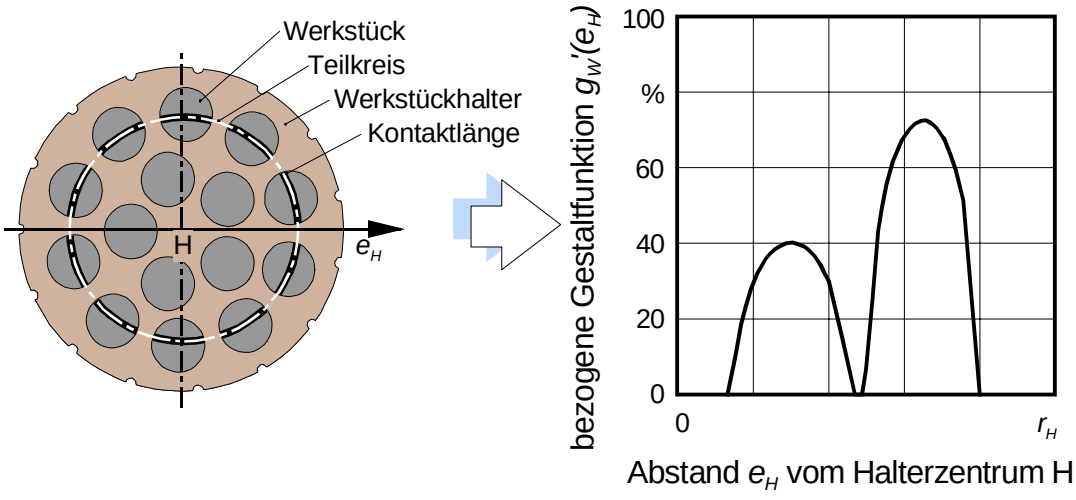


Bild 4.18: Nachbildung der Halterbelegung als zweidimensionale Gestaltfunktion

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 Haltermittelpunkt H befindet. Zur Berechnung der Gestaltfunktion werden vom Halterzentrum H ausgehend konzentrische Kreise in den Halter gelegt, die den Radius e_H und den Umfang $2\pi e_H$ aufweisen. Für jeden

dieser Kreise wird nun die Teilbogenlänge ermittelt, die innerhalb der Werkstückfläche verläuft (**Bild 4.18**). Bei kreisförmigen Werkstücken ist diese Berechnung nicht sehr aufwändig. Werden prismatische Werkstücke durch eine Gestaltfunktion nachgebildet, müssen sämtliche Werkstückkanten in Form von Gradengleichungen beschrieben werden. Auf diese Weise können die Schnittpunkte zwischen dem jeweiligen Teilkreis und den Werkstückkanten ermittelt und die Teilbogenlängen errechnet werden [Sim88, Spu95b]. Die Anzahl der äquivalent belegten Werkstückhalter wird im Weiteren faktoriell berücksichtigt.

Physikalisch hat die Gestaltfunktion $g_W(e_H)$ die Dimension einer Länge, und 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, die theoretisch dem Umfang des Werkstückhalters $2\pi\, r_H$ entspricht. Auf diese Weise erhält man die bezogene Gestaltfunktion

$$g_W'(e_H) = \frac{g_W(e_H)}{2\pi r_H}, \tag{4-42}$$

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

4.6.3.2 Bahnlängenverteilung

In **Bild 4.19** ist die Unterteilung der Arbeitsfläche in eine endliche Anzahl *i* ringförmiger Klassen K_i dargestellt. Alle Schleifscheibenklassen sind konzentrisch um das Schleifscheibenzentrum Z angeordnet und weisen die gleiche Breite auf. Jede dieser Schleifscheibenklassen wird begrenzt durch ihren inneren und äußeren Klassenradius $r_{i\,Ki}$ und $r_{a\,Ki}$ und besitzt die Kreisringfläche $A_{S\,Ki}$.

Auf der Grundlage der Schleifscheibenklassierung erfolgt die Berechnung der Bahnlängenverteilung. Es ist ausreichend, jede Bahnkurve für die halbe Teilzykluszeit $0 < t < t_{\Delta Zykl}/2$ zu ermitteln, da die weitere Bahnkurve diesem Zeitraum adäquat verläuft. Die für die halbe Teilzykluszeit berechnete Bahnlängenverteilung wird anschließend auf die gesamte Bearbeitungsdauer extrapoliert. Die Aufenthaltsdauer eines Werkstückpunkts P_W innerhalb einer Schleifscheibenklasse K_i wird bestimmt durch die Zeitpunkte t_{1i} und t_{2i}, zu denen er in die Klasse ein- bzw. wieder austritt. Die Zeitgrenzen t_{1i} und t_{2i} ergeben sich aus den Schnittpunkten der Bahnkurve mit den Grenzen der betrachteten Klasse $r_{a\,Ki}$ bzw. $r_{i\,Ki}$. Setzt man diese Radien in Gleichung (4-6) für den Betrag des Bahnkurvenvektors ein, dann ergeben sich nach SPUR und EICHHORN [Spu97] die Zeitpunkte t_{1i} und t_{2i} nach der Gleichung

$$t_{1i,2i} = \frac{1}{\omega_H - \omega_Z} \arccos\left(\frac{r_{1i,2i\,Ki}^{\,2} - a_Z^{\,2} - e_H^{\,2}}{2 a_Z e_H} \right). \tag{4-43}$$

Der in einer Schleifscheibenklasse zurückgelegte Bahnkurvenabschnitt des Punkts P_W errechnet sich aus dem Integral der Bahngeschwindigkeit in den ermittelten Zeitgrenzen zu

$$s_{P_W K_i} = \int_{t_{1i}}^{t_{2i}} v_{P_W}(t)\,dt \ . \tag{4-44}$$

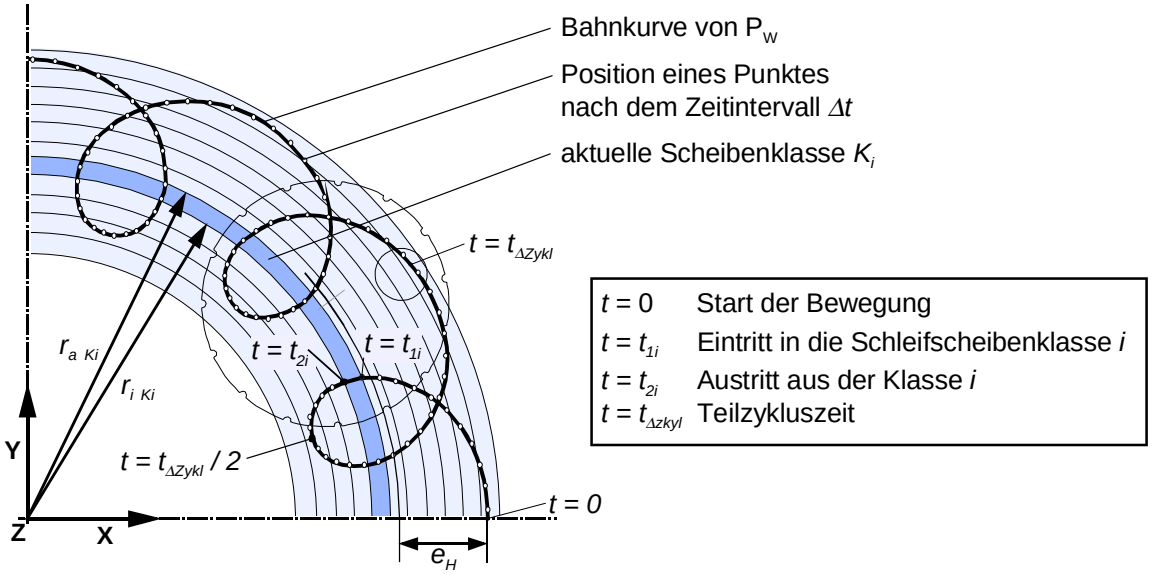


Bild 4.19: Klassierung der Schleifscheibe und Ermittlung der Bahnkurvenabschnitte in den einzelnen Schleifscheibenklassen [nach Spu97]

Um die Gesamtheit aller Werkstückflächen numerisch zu erfassen, müssen die Bahnkurven endlich vieler Werkstückpunkte ermittelt werden. Zu diesem Zweck wird der Abstand vom Halterzentrum e_H von Null ausgehend in n Inkrementen bis zum Radius des Halters r_H variiert. Für jeden Wert von e_H werden nun die Bahnkurve und die Länge ihrer Bahnkurvenabschnitte in den einzelnen Schleifscheibenklassen ermittelt. Die Menge aller Werkstückpunkte, die sich entlang dieser Bahnkurve bewegen, wird durch den Wert der bezogenen Gestaltfunktion $g_W'(e_H)$ gewichtet. Diese Vorgehensweise führt auf den Ausdruck

$$s_{Ki} = \sum_{j=0}^{n} g_W'\left(e_H = j \cdot \frac{r_H}{n}\right) \cdot \int_{t_{1i}}^{t_{2i}} v(t)\,dt \tag{4-45}$$

für die Klassenbahnlänge s_{Ki}, die in einer Schleifscheibenklasse zurückgelegt wird. Bei dieser numerischen Vorgehensweise hängen die absoluten Werte von s_{Ki} von der Anzahl der Stützstellen ab, mit denen der Algorithmus durchlaufen wird. Dementsprechend repräsentieren die Klassenbahnlängen s_{Ki} keine quantitativen Bahnlängen, sondern beschreiben qualitativ die Verteilung aller zurückgelegten Wegstrecken auf die einzelnen Schleifscheibenklassen. Um Klassenbahnlängen unabhängig von der numerischen Genauigkeit der Berechnung darstellen zu können, ist eine Normierung auf den maximal auftretenden Wert erforderlich. Auf diese Weise ist eine prozentuale Darstellung der Klassenbahnlängen ebenso möglich wie ein Vergleich unterschiedlicher Bearbeitungsfälle. Als Ergebnis der Normierung erhält man die bezogene Klassenbahnlänge s'_{Ki}. Wie **Bild 4.20** zeigt, kann man die Hüllkurve der bezogenen Klassenbahnlängen s'_{K1} bis s'_{Ki} bei ausreichender numerischer Genauigkeit als bezogene Bahnlängenverteilung $s'(r_S)$ über dem Schleifscheibenradius darstellen. Insbesondere beim

Vergleich mehrerer Berechnungsergebnisse ist die Darstellung als Kurve gegenüber dem Balkendiagramm wesentlich übersichtlicher.

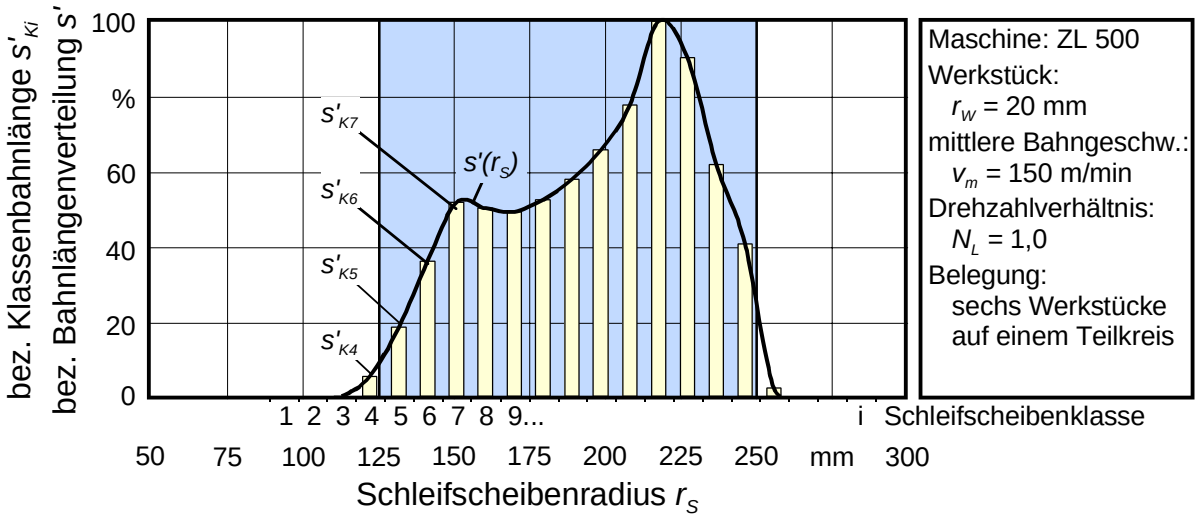


Bild 4.20: Übergang von den bezogenen Klassenbahnlängen zur bezogenen Bahnlängenverteilung

Der qualitative Verlauf der Bahnlängenverteilung ist von der Maschinengeometrie und der Bewegungsform abhängig. Ihre quantitative Höhe steigt linear mit der Schleifzeit und mit der mittleren Bahngeschwindigkeit an. In der Regel ergeben sich zwischen den Werkstücken und der oberen Schleifscheibe andere Verläufe als bezüglich der unteren Schleifscheibe.

Die beiden Diagramme in **Bild 4.21** zeigen bezogene Bahnlängenverteilungen $s'(r_S)$ für unterschiedliche Drehzahlverhältnisse N_L. Für die im linken Diagramm dargestellten Kurven wurde eine gleichmäßige Anordnung von sechs Werkstücken auf einem Teilkreis mit dem Radius 54 mm vorausgesetzt. Das rechte Diagramm zeigt Ergebnisse für die Anordnung auf zwei Teilkreisen mit den Radien 54 und 23 mm. Alle bezogenen Bahnlängenverteilungen im linken Diagramm zeigen zwei lokale Maxima, die symmetrisch zur Mitte des Schleifbelags auftreten. Die radiale Lage dieser Maxima ergibt sich aus dem Abstand der Werkstückmittelpunkte vom Halterzentrum und ist vom Drehzahlverhältnis unabhängig. Durch eine Variation von N_L ändern sich zwar die relativen Höhen der beiden Maxima zueinander, nicht aber der prinzipielle Verlauf der Kurven. Bei hypozykloidalen Bahnkurven, wie sie beim Drehzahlverhältnis N_L = -6 entstehen (vgl. Bild 4.6 auf Seite 55), liegt das absolute Maximum der bezogenen Bahnlängenverteilung am Innenrand des Schleifbelags. Bei N_L = -2,4 legen alle Werkstücke exzentrische Kreisbahnen um das Drehzentrum der Schleifscheiben zurück. In diesem Fall ergibt sich eine zum Haltermittelpunkt symmetrische Bahnlängenverteilung mit zwei gleich großen lokalen Maxima. Bei N_L = 0,6 liegt das absolute Maximum in der Nähe des Außenrandes des Schleifbelags. Legen die Werkstückmittelpunkte gewöhnliche Epizykloiden auf der Schleifscheibe zurück, so sind die Bahnkurvenabschnitte an der Innenseite des Belags vergleichsweise kurz, so dass sich hier kein lokales Maximum ausbildet.

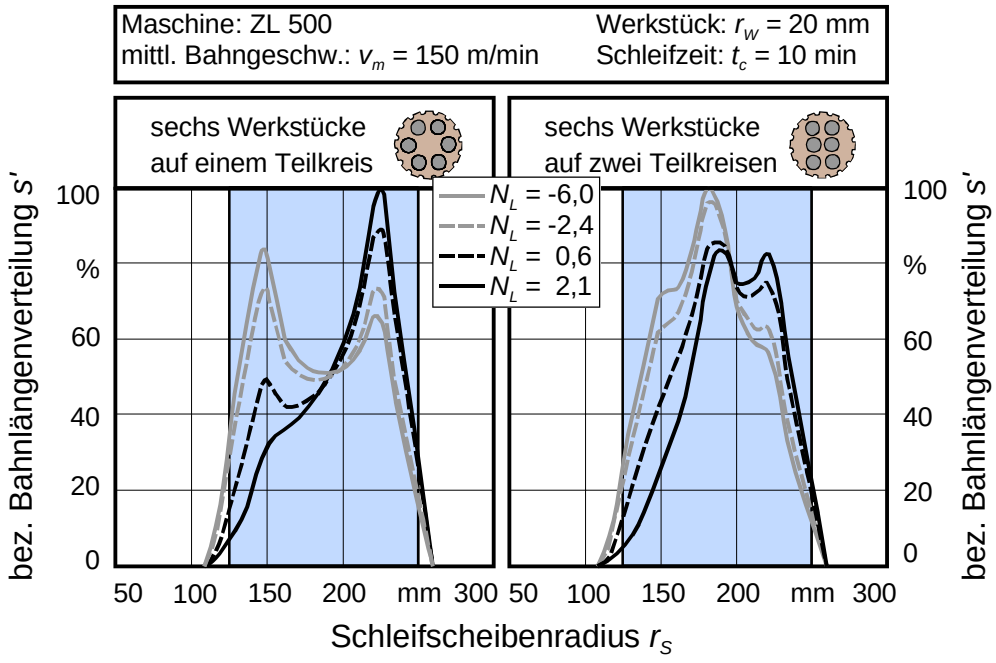


Bild 4.21: Bezogene Bahnlängenverteilungen für verschiedene Drehzahlverhältnisse und Halterbelegungen

Bei einer Anordnung der Werkstücke auf zwei Teilkreisen zeigen die bezogenen Bahnlängenverteilungen andere Verläufe als im linken Diagramm. In diesem Fall legen sie in der Mitte des Schleifbelags besonders lange Wegstrecken zurück, während die Belagsränder in Abhängigkeit vom gewählten Drehzahlverhältnis unterschiedlich häufig kontaktiert werden.

An dieser Darstellung wird deutlich, dass der Anordnung der Werkstücke im Halter ein ebenso großer Einfluss auf die bezogene Bahnlängenverteilung zukommt wie den Drehzahlen von innerem Stiftkranz und Schleifscheibe.

4.6.3.3 Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Werkstücke

Zur Berechnung des pro Schleifscheibenklasse zerspanten Volumens, des sogenannten Klassenzerspanungsvolumens $V_{W\,Ki}$, reichen die Informationen der Bahnlängenverteilung nicht aus. Darüber hinaus muss bekannt sein, wie lange sich die Werkstückpunkte auf ihren Bahnbewegungen in den einzelnen Schleifscheibenklassen aufhalten, bzw. mit welchen Geschwindigkeiten sie die Bahnlängenabschnitte in den einzelnen Schleifscheibenklassen zurücklegen.

Die Ein- und Austrittszeitpunkte eines Werkstückpunkts P_W in eine Schleifscheibenklasse t_{1i} und t_{2i} wurden bereits im Zusammenhang mit der Berechnung der Bahnlängenverteilung nach Gleichung (4-43) ermittelt. Der Betrag der Differenz dieser beiden Zeitpunkte entspricht der Aufenthaltsdauer des Punkts in der betrachteten Schleifscheibenklasse.

Zur Berechnung der Klassenaufenthaltsdauer t_{Ki} aller Werkstückpunkte in einer Schleifscheibenklasse wird ein ähnlicher Algorithmus verwendet wie zur Berechnung der Klassenbahnlänge. In diesem Fall werden für eine Anzahl n von Werkstückpunkten mit unterschiedlichen

Abständen vom Halterzentrum e_H die Aufenthaltsdauern in der Schleifscheibenklasse i berechnet, mit dem entsprechenden Wert der bezogenen Gestaltfunktion $g_W'(e_H)$ gewichtet und aufsummiert. Diese Vorgehensweise ergibt für die Klassenaufenthaltsdauer den Ausdruck

$$t_{Ki} = \sum_{j=0}^{n} g'_W\left(e_H = j \cdot \frac{r_H}{n}\right) \cdot \left|t_{2i} - t_{1i}\right|. \tag{4-46}$$

Physikalisch ergibt sich die Aufenthaltsdauer durch den Bahnkurvenabschnitt, den ein Werkstückpunkt P_W in einer Schleifscheibenklasse zurücklegt, und seine Bahngeschwindigkeit auf dieser Strecke. Übertragen auf alle Werkstückflächen kann die Klassenaufenthaltsdauer der Werkstücke in einer Schleifscheibenklasse demnach auch nach

$$t_{Ki} = \frac{s_{Ki}}{v_{Ki}} \tag{4-47}$$

als Quotient aus der Klassenbahnlänge und der mittleren Geschwindigkeit aller Werkstückpunkte in dieser Scheibenklasse ermittelt werden.

In Analogie zur Klassenbahnlänge handelt es sich bei dieser numerisch berechneten Klassenaufenthaltsdauer nicht um eine quantitative zeitliche Größe, sondern um einen qualitativen Wert, dessen absolute Höhe von der Genauigkeit der Berechnung abhängt. Die Normierung der Einzelwerte auf die Summe aller Klassenaufenthaltsdauern

$$t'_{Ki} = \frac{t_{Ki}}{\sum_{1}^{i} t_{Ki}} \tag{4-48}$$

führt auf den prozentualen Anteil t'_{Ki} der gesamten Bearbeitungszeit, den die Werkstücke in der Klasse *i* zurücklegen. Dieser Wert wird die bezogene Klassenaufenthaltsdauer genannt.

Die bezogene Klassenaufenthaltsdauer entspricht dem Teil $A_{W\,Ki}$ der gesamten Werkstückfläche $z_W \cdot A_W$, der sich durchschnittlich zu jedem Zeitpunkt in dieser Klasse befindet. Dieser Klassenflächenanteil kann demnach durch den Ausdruck

$$A_{W\,Ki} = t'_{Ki} \cdot z_W \cdot A_W \tag{4-49}$$

ermittelt werden. Mit zunehmender Anzahl von Schleifscheibenklassen sinken die einzelnen Klassenflächenanteile. Um hier eine von den numerischen Parametern unabhängige, prozentuale Darstellung zu erreichen, erfolgt wiederum eine Normierung auf den Maximalwert. Diese Normierung führt auf den bezogenen Klassenflächenanteil $A_W'_{Ki}$.

Die Verteilung des bezogenen Klassenflächenanteils $A_W'_{Ki}$ über dem Schleifscheibenradius wird im Folgenden als bezogene Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Werkstücke $A_W'(r_S)$ bezeichnet. Für einen einzelnen Werkstückpunkt stellt die bezogene Aufenthaltswahrscheinlichkeit dar, welche Anteile der gesamten Schleifzeit er in den einzelnen Schleifscheibenklassen verbringt. Für die Summe aller Werkstückflächen stellt die Aufenthaltswahrscheinlichkeit dar,

welche Anteile der Gesamtfläche $z_W \cdot A_W$ sich zu jedem Zeitpunkt in den einzelnen Schleifscheibenklassen befinden. Der Begriff einer Wahrscheinlichkeit ist deshalb zutreffend, weil die Werkstückfläche in einer Schleifscheibenklasse in der Regel nicht zu jedem Zeitpunkt gleich groß ist, sondern im Verlauf eines Teilzyklus mit der Rotation des Werkstückhalters schwankt. Aufgrund der Beschreibung der Werkstückgeometrie mit Hilfe der Gestaltfunktion können diese Schwankungen jedoch nicht erfasst werden. Die Aufenthaltswahrscheinlichkeit stellt einen Mittelwert dieser Fläche über einen Teilzyklus dar.

Das große Diagramm rechts in **Bild 4.22** zeigt die bezogenen Aufenthaltswahrscheinlichkeiten $A_W'(r_S)$ für die Anordnung von sechs Werkstücken auf einem Teilkreis. Für alle Drehzahlverhältnisse N_L ergibt sich quantitativ und qualitativ der gleiche Verlauf über dem Schleifscheibenradius. Die vier kleinen Diagramme auf der linken Seite zeigen die bezogenen Bahnlängenverteilungen $s'(r_S)$ aus Bild 4.21 als durchgezogene Linie und die Bahngeschwindigkeiten $v(r_S)$ gestrichelt. Der Quotient dieser beiden Größen führt nach Gleichung (4-47) auf die bezogene Aufenthaltswahrscheinlichkeit, die im Diagramm rechts dargestellt ist. Deren Verlauf entspricht qualitativ der Bahnlängenverteilung beim Drehzahlverhältnis von N_L = -2,4. An diesem Punkt sind die Bahngeschwindigkeiten aller Werkstückpunkte gleich und ändern sich im Teilzyklus nicht.

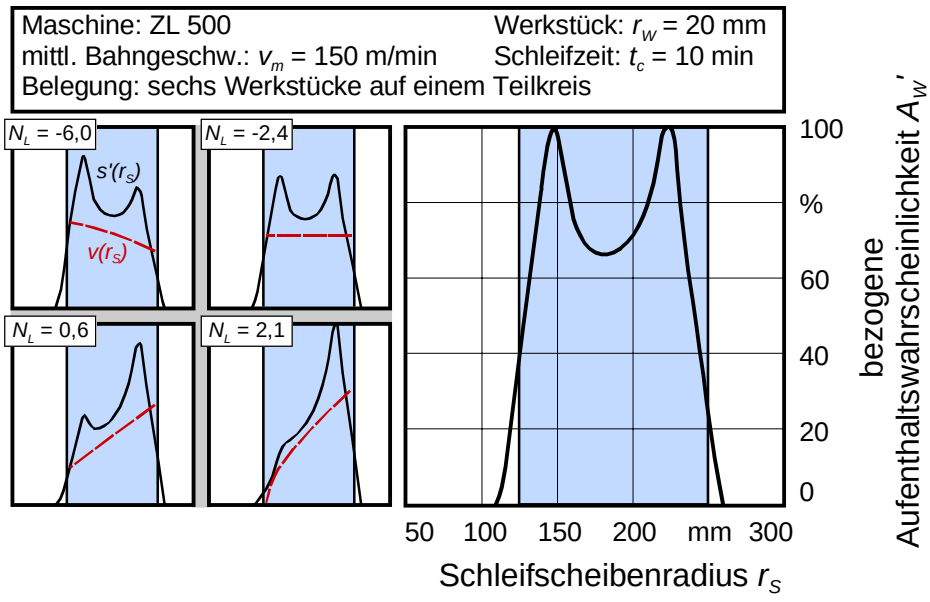


Bild 4.22: Bezogene Aufenthaltswahrscheinlichkeit bei Anordnung von sechs Werkstücken auf einem Teilkreis

In **Bild 4.23** ist der gleiche Sachverhalt für die Anordnung der Werkstücke auf zwei Teilkreisen im Werkstückhalter dargestellt. Auch hier zeigt sich unabhängig vom Drehzahlverhältnis die gleiche Verteilung der bezogenen Aufenthaltswahrscheinlichkeit über dem Schleifscheibenradius. Die Halterbelegung wirkt sich im Vergleich mit Bild 4.22 deutlich auf die entstehende Verteilung aus.

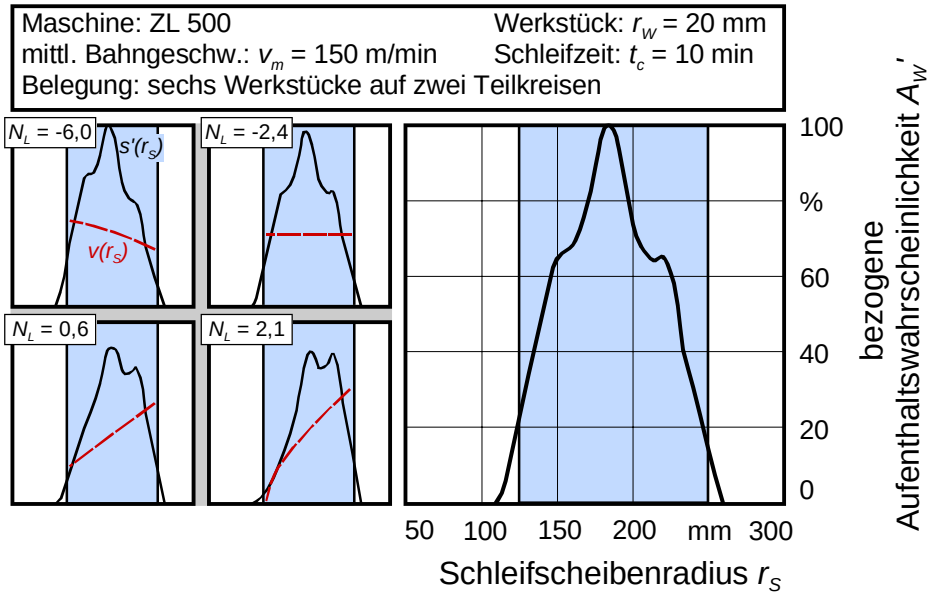


Bild 4.23: Bezogene Aufenthaltswahrscheinlichkeit bei Anordnung von sechs Werkstücken auf zwei Teilkreisen

Diese beiden Bilder zeigen, dass die bezogene Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Werkstücke in den einzelnen Schleifscheibenklassen nicht von den kinematischen, sondern ausschließlich von den geometrischen Prozessparametern abhängt. Die Aufenthaltsdauer eines Werkstückpunkts in einer bestimmten Schleifscheibenklasse muss demnach von den Drehzahlen der Schleifscheibe n_u und des Stiftkranzes unabhängig sein. Diese Überlegung verdeutlicht ein Gedankenexperiment: Bei der Bearbeitung durch Planschleifen mit Planetenkinematik rotieren beide Schleifscheiben in der Regel mit unterschiedlichen Drehzahlen, so dass jeder Werkstückpunkt bezüglich der oberen und unteren Schleifscheibe unterschiedliche Bahnkurven mit verschiedenen Geschwindigkeiten ausführt. Die radiale Position des Punkts P_W bezüglich beider Schleifscheiben ist zu jedem Zeitpunkt gleich und hängt demzufolge ausschließlich von der Drehzahl n_i des inneren Stiftkranzes ab. Mit einer Änderung von n_i ändern sich zwar die Klassenaufenthaltsdauern der Werkstückpunkte, nicht aber deren qualitative Verteilung. Bei einer Verdoppelung der Drehzahl n_i halbieren sich die Aufenthaltsdauern von P_W in den einzelnen Schleifscheibenklassen, die Klassen werden aber doppelt so häufig kontaktiert. Daher sind auch die Klassenaufenthaltsdauern konstant und von der Drehzahl n_i unabhängig.

Physikalisch kann man die gleichen Verläufe der bezogenen Aufenthaltswahrscheinlichkeit dadurch erklären, dass Bahnlängenverteilung und Bahngeschwindigkeiten keine voneinander unabhängigen Größen darstellen. Bahnkurvenabschnitte mit geringen Krümmungen werden mit großen Geschwindigkeiten zurückgelegt und verlaufen lange in der gleichen Schleifscheibenklasse. Stark gekrümmte Bahnkurvenelemente überschreiten häufig Klassengrenzen und werden mit kleinen Geschwindigkeiten durchlaufen. Durch die Bildung des Quotienten aus beiden Größen gleichen sich diese Einflüsse gegenseitig aus. Der qualitative Verlauf der Aufenthaltswahrscheinlichkeit wird ausschließlich durch die Geometrie und die Anordnung der Werkstücke im Halter beeinflusst. Die Höhe der Kurve hängt von der Schleifzeit ab.

4.6.3.4 Zerspanungsvolumen

Aus den Randbedingungen der Belastungssimulation und den bezogenen Aufenthaltswahrscheinlichkeiten der Werkstücke ergibt sich die Verteilung des Zerspanungsvolumens über dem Schleifscheibenradius, die durch das Klassenzerspanungsvolumen $V_{W\,Ki}$ gekennzeichnet ist. Das Zerspanungsvolumen V_W aller Werkstücke errechnet sich als Produkt der Teilehöhenreduktion Δh_W mit der Fläche aller im Eingriff befindlichen Werkstücke $z_W \cdot A_W$. Bei der Bearbeitung zwischen zwei Scheiben weisen alle Werkstücke theoretisch zu jedem Zeitpunkt die gleiche Höhe und dementsprechend die gleiche Teilehöhenreduktion Δh_W gegenüber ihrer Ausganghöhe auf. Dementsprechend ergibt sich das Klassenzerspanungsvolumen nach

$$V_{W\,Ki} = \Delta h_W \cdot A_{W\,Ki} \tag{4-50}$$

aus der radiusunabhängigen Teilehöhenreduktion und dem Klassenflächenanteil $A_{W\,Ki}$. Die Verteilung des zerspanten Volumens über dem Schleifscheibenradius ist demnach der Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Werkstücke proportional. Da sowohl die Klassenflächenanteile $A_{W\,Ki}$ als auch die Teilehöhenreduktion Δh_W von den kinematischen Parametern der Bewegungsform unabhängig sind, ist auch die Verteilung des zerspanten Volumens über dem Schleifscheibenradius keine Funktion des Drehzahlverhältnisses.

Die Summe aller Klassenzerspanungsvolumina $V_{W\,Ki}$

$$V_W = \sum_{1}^{i} V_{W\,Ki} \tag{4-51}$$

ergibt das gesamte Zerspanungsvolumen V_W. Die bezogenen Klassenzerspanungsvolumina $V_W{}'_{Ki}$ werden durch die Normierung auf den Maximalwert der Verteilung errechnet. Die Darstellung dieser Werte als Funktion des Schleifscheibenradius wird als bezogene Verteilung des Zerspanungsvolumens $V_W{}'(r_S)$ bezeichnet.

4.6.3.5 Schleifscheibenbelastung

Nach Gleichung (4-36) ergibt sich der Belastungsfaktor b_S aus dem Zerspanungsvolumen, dem Schleifweg und der Schleifbelagsfläche. Zur Darstellung dieser Größe als Funktion des Schleifscheibenradius werden die zuvor berechneten klassenbezogenen Werte in diese Gleichung eingesetzt. Damit ergibt sich der Klassenbelastungsfaktor

$$b_{S\,Ki} = \frac{V_{W\,Ki}}{s_{Ki} \cdot A_{S\,Ki}} \tag{4-52}$$

aus dem Klassenzerspanungsvolumen $V_{W\,Ki}$, der Klassenbahnlänge s_{Ki} und der Belagsfläche der Schleifscheibenklasse $A_{S\,Ki}$. Durch die Normierung auf den Maximalwert erhält man den bezogenen Klassenbelastungsfaktor $b_S{}'_{Ki}$, bzw. den bezogenen Belastungsfaktor $b_S{}'(r_S)$.

Das große Diagramm rechts in **Bild 4.24** zeigt die bezogenen Belastungsfaktoren $b_S{}'(r_S)$ für vier unterschiedliche Drehzahlverhältnisse N_L als Funktion des Schleifscheibenradius r_S. Der

Berechnung liegt die Anordnung von sechs Werkstücken auf einem Teilkreis zugrunde. Um die Entstehung der Kurven zu verdeutlichen, zeigen die vier kleinen Bilder auf der linken Seite des Diagramms die bezogene Verteilung des Zerspanungsvolumens $V_W'(r_S)$ gestrichelt und die bezogenen Bahnlängenverteilungen $s'(r_S)$ als durchgezogene Linie. Die vier Kurven für den bezogenen Belastungsfaktor schneiden sich etwa in der Mitte des Schleifbelags. Der Grund dafür ist die gleiche mittlere Bahngeschwindigkeit aller Bahnbewegungen. Bei allen dargestellten Drehzahlverhältnissen wird der Schleifbelag in der Nähe seiner Innenkante höher belastet als an der Außenkante. Bei N_L = -6,0 liegt der Belastungsfaktor bei r_i etwa 1,4 mal höher als bei r_a. Mit steigendem Drehzahlverhältnis nehmen die Gradienten signifikant zu. Bewegen sich die Werkstücke mit N_L = 2,1 auf gewöhnlichen Epizykloiden um das Schleifscheibenzentrum, so liegt der Belastungsfaktor an seiner Innenkante fast 15 mal höher als an seiner Außenkante. Für die Belegung des Werkstückhalters auf zwei Teilkreisen weisen die Belastungsfaktoren die gleichen Verläufe über dem Schleifscheibenradius auf.

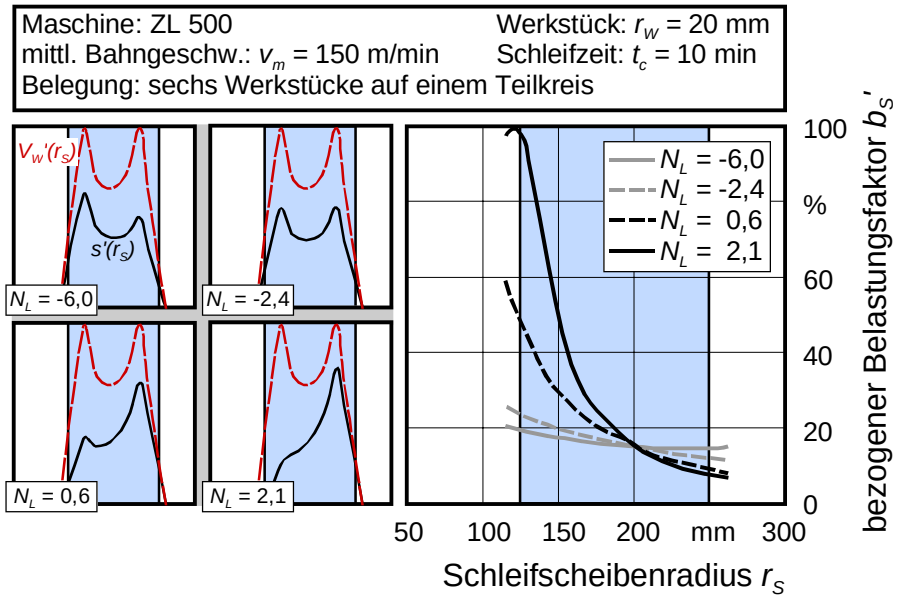


Bild 4.24: Bezogener Belastungsfaktor als Funktion des Schleifscheibenradius für unterschiedliche Drehzahlverhältnisse

Der Belastungsfaktor kennzeichnet nicht die Belastung, sondern charakterisiert die Bedingungen, unter denen das Klassenzerspanungsvolumen abgetrennt wird. Die Höhe des Volumens muss extra berücksichtigt werden. Aus dem Klassenbelastungsfaktor $b_{S\,Ki}$ und dem Klassenzerspanungsvolumen $V_{W\,Ki}$ ergibt sich nach Gleichung (4-37) die Klassenbelastung $B_{S\,Ki}$ nach dem Ausdruck

$$B_{S\,Ki} = V_{W\,Ki} \cdot b_{S\,Ki} \,. \tag{4-53}$$

Die Verteilung der Belastung über dem Schleifscheibenradius wird analog zu den zuvor definierten Größen auf ihren Maximalwert normiert und als bezogene Schleifscheibenbelastung $B_S'(r_S)$ bezeichnet.

Die gesamte Schleifscheibenbelastung, die sich aus den jeweiligen Prozessbedingungen ergeben, erhält man durch die Gleichung

$$B_{S\,sum} = \sum_{1}^{i} B_{S\,Ki} \tag{4-54}$$

aus der Summe aller Klassenbelastungen $B_{S\,Ki}$ in den i Schleifscheibenklassen. Diese Summe entspricht der Fläche unterhalb der Belastungsfunktion $B_S(r_S)$ und wird als summarische Schleifscheibenbelastung $B_{S\,sum}$ bezeichnet. Dieser Wert dient zur Darstellung der unterschiedlichen Gesamtbelastungen, der die Schleifscheibe bei verschiedenen Drehzahlverhältnissen unterworfen ist. Auf den jeweiligen Maximalwert normiert wird die bezogene summarische Schleifscheibenbelastung als $B_{S\,sum}'(N_L)$ dargestellt.

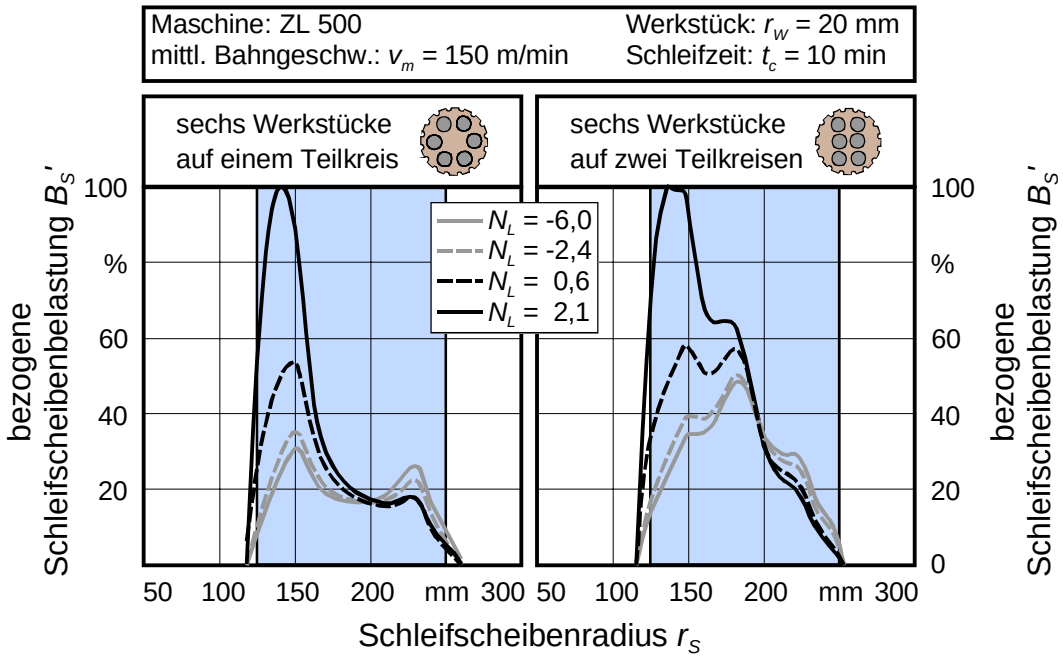


Bild 4.25: Bezogene Schleifscheibenbelastung als Funktion des Schleifscheibenradius für unterschiedliche Drehzahlverhältnisse

Bild 4.25 zeigt die bezogene Schleifscheibenbelastung $B_S'(r_S)$ als Funktion des Schleifscheibenradius r_S für unterschiedliche Drehzahlverhältnisse N_L. Das linke Diagramm zeigt Verläufe, die sich bei einer Anordnung aller Werkstücke auf einem Teilkreis ergeben. Für das rechte Diagramm wurde eine Anordnung auf zwei Teilkreisen vorausgesetzt. Es zeigt sich, dass der effektive Verlauf der bezogenen Schleifscheibenbelastung sowohl durch die kinematischen Parameter als auch durch die Anordnung der Werkstücke im Halter signifikant beeinflusst wird. Die dargestellten Kurven weisen an den gleichen Schleifscheibenradien lokale Maxima und Minima auf wie die zugehörigen Bahnlängenverteilungen in Bild 4.21. Bezüglich der Höhe der lokalen Extremwerte unterscheiden sich die Schleifscheibenbelastungen und die Bahnlängenverteilungen aber signifikant.

Zur Auswahl von kinematischen Parametern, die eine möglichst homogene Belastung der Schleifscheibe gewährleisten, ist der Vergleich der Belastungskurven für möglichst viele Drehzahlverhältnisse erforderlich. Die Darstellung der Verläufe von $B_S(r_S)$ für alle Drehzahlverhältnisse ist nicht übersichtlich möglich. Zur Einschränkung der Informationsmenge zeigt **Bild 4.26** nicht die Verläufe, sondern den Unterschied zwischen dem jeweils auftretenden minimalen und dem maximalen Wert als hinterlegten Bereich. Seine Höhe stellt ein Maß für die Homogenität der Schleifscheibenbelastung dar. Je geringer der Abstand zwischen maximaler und minimaler bezogener Schleifscheibenbelastung ist, desto gleichmäßiger wird der gesamte Schleifscheibenbelag während der Bearbeitung belastet. Weiterhin ist in diesem Bereich der Mittelwert der Schleifscheibenbelastung $B_S(r_S)$ als durchgezogene Linie eingezeichnet. Die gestrichelte Linie im oberen Diagrammteil bezeichnet die bezogene summarische Schleifscheibenbelastung $B_{S\,sum}'(N_L)$. Alle in diesem Diagramm dargestellten Werte wurden auf den maximalen Funktionswert der summarischen Schleifscheibenbelastung $B_{S\,sum}$ normiert. Bei der Berechnung wurde von einer Maschinenbelegung mit sechs Werkstücken auf einem Teilkreis ausgegangen.

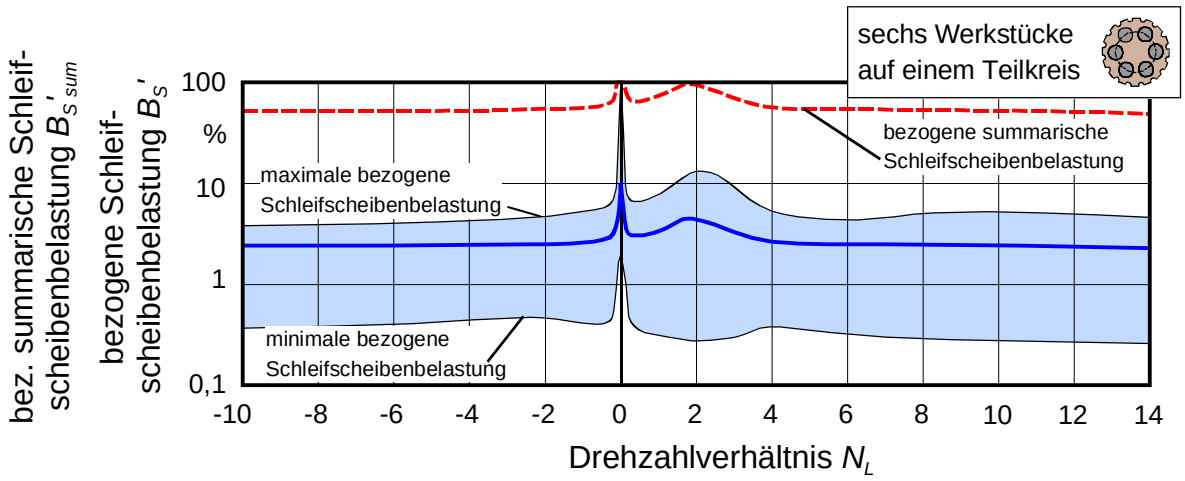


Bild 4.26: Bezogene Schleifscheibenbelastung als Funktion des Drehzahlverhältnisses

Die Linien für die minimale und maximale bezogene Schleifscheibenbelastung zeigen in diesem Diagramm keinen Schnittpunkt. Das bedeutet, dass es kein Drehzahlverhältnis gibt, an dem die Schleifscheibenbeläge überall gleichermaßen belastet werden. Geht das Drehzahlverhältnis gegen $N_L = 0$, so nehmen die Kurven für minimale und maximale bezogene Schleifscheibenbelastung sehr große Werte an. In diesem Sonderfall stehen die Werkstückhalter still, nur die Drehung der Schleifscheiben ist für den Zerspanungsprozess verantwortlich. Alle Werkstückpunkte beschreiben zentrische Kreisbahnen um das Schleifscheibenzentrum. Die Länge dieser Bahnkurven nimmt mit steigendem Schleifscheibenradius zu, und die Kurven verlaufen ständig in der gleichen Schleifscheibenklasse. Auf diese Weise befinden sich die längsten Bahnkurven immer in der Schleifscheibenklasse mit der größten Fläche.

Im Bereich von $N_L = 2{,}1$ nimmt der Abstand zwischen der maximalen und der minimalen bezogenen Schleifscheibenbelastung, abgesehen von der Unendlichkeitsstelle, sein absolutes

Maximum ein. Bei diesem Drehzahlverhältnis werden die Schleifscheiben am ungleichmäßigsten belastet. Die Werkstückmittelpunkte bewegen sich bei diesem Drehzahlverhältnis auf gewöhnlichen Epizykloiden relativ zur Schleifscheibe. Bei dieser Bewegungsform treten in der Nähe des Innenrandes der Schleifscheibe Wendepunkte auf, in denen die Bahngeschwindigkeiten klein werden und die Werkstücke daher nur kurze Bahnkurvenabschnitte zurücklegen. Da diese Wendepunkte in der Schleifscheibenklasse mit der geringsten Belagsfläche liegen, entstehen nach Gleichung (4-52) extreme Werte für die lokalen Belastungsfaktoren. Dementsprechend nimmt hier auch die bezogene summarische Schleifscheibenbelastung einen Maximalwert an. Ein weiteres, allerdings nur schwach ausgeprägtes lokales Maximum zeigt die Kurve für die maximale bezogene Schleifscheibenbelastung beim Drehzahlverhältnis von etwa $N_L = 11{,}1$. In diesem Bereich bewegen sich die Werkstücke auf gewöhnlichen Hypozykloiden, deren Wendepunkte in der Nähe des Außenrands der Schleifscheiben liegen. Die Kurvenabschnitte mit den besonders kurzen Bahnkurvenabschnitten fallen hier in die Schleifscheibenklasse mit der größten Belagsfläche, so dass hier keine deutliche Zunahme des Belastungsfaktors resultiert.

Im Bereich zwischen $N_L = -2$ und 2, der für den praktischen Einsatz des Planschleifens mit Planetenkinematik von Bedeutung ist, treten besonders inhomogene Belastungen der Schleifscheiben auf. Die Drehzahlverhältnisse mit geringeren Unterschieden zwischen maximaler und minimaler Schleifscheibenbelastung können nicht wirtschaftlich eingesetzt werden, da aufgrund der kinematischen Flexibilitäten von Zweischeibenschleifmaschinen keine ausreichenden Bahngeschwindigkeiten für eine wirtschaftliche Bearbeitung möglich sind. Um einen inhomogenen Schleifscheibenverschleiß zu verhindern, sind demnach Maßnahmen bei der Schleifscheibenauslegung unumgänglich.

4.6.3.6 Zeitspanungsvolumina und Antriebsmomente

Ein wichtiges ökonomisches Kriterium ist bei spanenden Fertigungsverfahren das Zeitspanungsvolumen, das als Quotient des zerspanten Volumens V_W und der Schleifzeit t_c definiert ist. Ersetzt man das Zerspanungsvolumen V_W nach Gleichung (4-36), so ergibt sich für das Zeitspanungsvolumen

$$Q_W = \frac{V_W}{t} = b_S \cdot v_m \cdot A_S \approx B_{S\,sum} \cdot v_m \cdot A_S \tag{4-55}$$

eine direkte proportionale Abhängigkeit vom auf die gesamte Schleifscheibe bezogenen Belastungsfaktor b_s, von der mittleren Bahngeschwindigkeit v_m und von der Fläche der Schleifscheibe A_S. Der auf die gesamte Schleifscheibe bezogene Belastungsfaktor und damit auch das Zeitspanungsvolumen sind nach Gleichung (4-37) der summarischen Schleifscheibenbelastung $B_{S\,sum}$ proportional. Wie Bild 4.26 zeigt, ist die summarische Schleifscheibenbelastung $B_{S\,sum}$ als Funktion des Drehzahlverhältnisses starken Variationen unterworfen. Diese Variationen fließen bei konstanter mittlerer Bahngeschwindigkeit linear in das Zeitspanungsvolumen mit ein: mit zunehmender summarischer Schleifscheibenbelastung wird ein konstantes Volumen V_W in kürzerer Schleifzeit zerspant. Die nach Gleichung (4-55) errechneten Funktions-

werte werden auf ihren Maximalwert bezogen und als normiertes Zeitspanungsvolumen $Q_{W\,normiert}$ über dem Drehzahlverhältnis dargestellt.

Die Schleifscheibenbelastung wirkt sich auch auf die Antriebsmomente der betrachteten Schleifscheibe aus. Das auf die Schleifscheibenachse wirkende Moment M_u resultiert aus der tangentialen Schleifkraft F_t und dem Abstand des Kraftvektors vom Schleifscheibenzentrum. Überträgt man diesen Zusammenhang auf das Modell der klassierten Schleifscheibe, so kann das Antriebsmoment der unteren Schleifscheibe M_u

$$M_u = \sum_1^i r_{m\,Ki} \cdot F_{t\,Ki} \tag{4-56}$$

summarisch aus den Klassentangentialkräften $F_{t\,Ki}$ und dem jeweiligen Abstand $r_{m\,Ki}$ vom Drehzentrum ermittelt werden.

Die Normalkraft F_n, die über die obere Schleifscheibe in die Wirkzone eingebracht wird, ist aufgrund der kraftgebundenen Zustellung im Prozessverlauf konstant. Der Anteil der Normalkraft, der in einer Schleifscheibenklasse übertragen wird, entspricht nach

$$F_{n\,Ki} = F_n \cdot A'_{W\,Ki} \tag{4-57}$$

dem in dieser Schleifscheibe befindlichen Anteil an der gesamten Werkstückfläche.

Die Tangentialkraft F_t hängt beim Schleifen über einen Proportionalitätsfaktor μ_S, das sogenannte Schleifkräfteverhältnis, von der Normalkraft F_n ab. Das Schleifkräfteverhältnis ist eine Funktion des Reibfaktors zwischen Werkstücken und Schleifscheiben und hängt von den Zerspanungsbedingungen ab. Für die folgende Berechnung wird das Klassenschleifkräfteverhältnis $\mu_{S\,Ki}$ nach

$$\mu_{S\,Ki} \approx \frac{V_{W\,Ki}}{s_{Ki} \cdot A_{W\,Ki}} = \frac{\Delta h_W}{s_{Ki}} \tag{4-58}$$

durch das Klassenzerspanungsvolumen, der Klassenbahnlänge und dem Klassenflächenanteil beschrieben. In diesem Fall ist das resultierende Schleifscheibenmoment M_u dem Ausdruck

$$M_u \approx \sum_1^i r_{m\,Ki} \cdot \frac{V_{W\,Ki}}{s_{Ki}} \tag{4-59}$$

proportional. Der Quotient rechts in dieser Gleichung entspricht der Belastung einer Schleifscheibenklasse ohne Bezug auf die Klassenfläche. Zur Darstellung des Antriebsmoments als Funktion des Drehzahlverhältnisses werden alle Funktionswerte auf ihren Maximalwert normiert und als normiertes Antriebsmoment $M_{u\,normiert}$ bezeichnet.

Bild 4.27 zeigt das normierte Zeitspanungsvolumen $Q_{W\,normiert}$ und das normierte Antriebsmoment $M_{u\,normiert}$ als Funktion des Drehzahlverhältnisses N_L. Beide Kurven wurden auf ihre jeweiligen lokalen Maxima bei $N_L = 1{,}6$ normiert. Qualitativ zeigen sowohl die normierten Zeitspanungsvolumina als auch die normierten Antriebsmomente ähnliche Verläufe wie die

bezogene summarische Schleifscheibenbelastung in Bild 4.26. Alle vier Kurven zeigen eine Unendlichkeitsstelle ohne Vorzeichenwechsel und ein lokales Maximum im Bereich von N_L = 1,6. Das obere Diagramm zeigt, dass bei der Anordnung der Werkstücke auf zwei Teilkreisen theoretisch bei jedem Drehzahlverhältnis höhere Zeitspanungsvolumina zu erwarten sind als bei der Anordnung auf einem Teilkreis. Insbesondere im Bereich großer positiver Drehzahlverhältnisse macht sich dieser Unterschied deutlich bemerkbar.

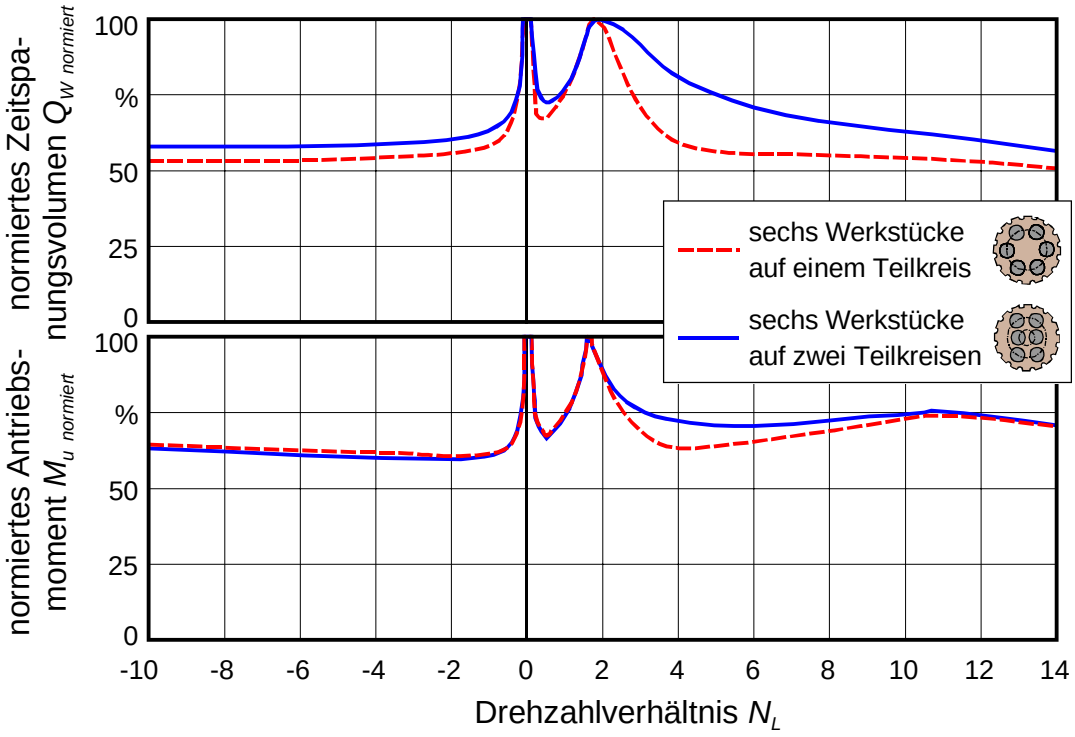


Bild 4.27: Normiertes Zeitspanungsvolumen und normiertes Antriebsmoment als Funktion des Drehzahlverhältnisses für zwei verschiedene Halterbelegungen

Bei den Antriebsmomenten wirken sich die unterschiedlichen Halterbelegungen weniger stark aus. Nur im Bereich zwischen N_L = 2 bis 10 erfordert die Anordnung der Werkstücke auf zwei Teilkreisen eine größere Antriebsleistung als bei Anordnung auf einem Teilkreis.

An dieser Grafik wird deutlich, dass sich beim Planschleifen mit Planetenkinematik das Zeitspanungsvolumen sowohl durch die Anordnung der Werkstücke im Halter als auch durch die Wahl der kinematischen Bearbeitungsparameter deutlich beeinflussen lässt. In ähnlicher Weise wie die Zeitspanungsvolumina hängen auch die Antriebsmomente von den Prozessparametern ab. Dieser Zusammenhang beinhaltet ein großes Potenzial zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit der Technologie, das bisher nicht genutzt wird.

4.6.4 Optimierung der Halterbelegung

Eine homogene Belastung der Schleifscheiben ist Voraussetzung zur Aufrechterhaltung eines stationären Prozesses über einen längeren Zeitraum. Die Verteilung der Schleifscheibenbe-

lastung wird von den geometrischen und den kinematischen Prozessparametern beeinflusst. Daraus ergibt sich die Fragestellung, ob es eine optimale Halterbelegung gibt, die eine besonders gleichmäßige Verteilung der Schleifscheibenbelastung gewährleistet. In der industriellen Praxis werden die Werkstücke meist auf konzentrischen Kreisbahnen um das Halterzentrum angeordnet. Dadurch entstehen Gestaltfunktionen mit ausgeprägten Maxima, die ihrerseits wiederum ausgeprägte Maxima in der Verteilung des Zerspanungsvolumens zur Folge haben.

Zur Erarbeitung allgemeiner Hinweise bezüglich der Halterbelegung wird im Folgenden nicht mit konkreten Werkstückgeometrien gerechnet. Vielmehr wird die bezogene Gestaltfunktion $g_W'(e_H) = f(e_H)$ verschiedenen mathematischen Funktionen gleichgesetzt. Mit diesen Funktionen wird die bezogene Schleifscheibenbelastung $b_S'(r_S)$ ermittelt und verglichen. Stellt sich eine mathematische Gestaltfunktion als besonders günstig heraus, können beliebige Werkstücke so im Halter angeordnet werden, dass sie diese Gestaltfunktion möglichst genau nachbilden. Die Ergebnisse dieser Berechnung zeigt **Bild 4.28** anhand von sechs ausgewählten Beispielen a bis f in den sechs waagerechten Diagrammreihen. Ganz links ist jeweils die gewählte Gestaltfunktion dargestellt. Das zweite Diagramm bildet die Verteilung des Zerspanungsvolumens über dem Schleifscheibenradius ab. Die vier Diagramme auf der rechten Bildseite zeigen die bezogenen Schleifscheibenbelastungen, die sich für unterschiedliche Drehzahlverhältnisse ergeben. In den Beispielen e und f finden sich praktisch realisierbare Anordnungen von kreisförmigen Werkstücken auf einem bzw. auf zwei Teilkreisen.

Eine gleichmäßige Belegung der Werkstückhalter mit einer konstanten Gestaltfunktion (Beispiel a) hat ungleichmäßige Verteilungen des Zerspanungsvolumens mit einem sehr deutlich ausgeprägten Maximum in der Belagsmitte zur Folge. Dieser Verlauf bildet sich sehr deutlich auf den Schleifscheibenbelastungskurven ab, die unabhängig vom Drehzahlverhältnis ein deutlich ausgeprägtes Maximum in der Belagsmitte zeigen. Praktisch lässt sich diese lineare Gestaltfunktion durch ein einzelnes, langgestrecktes Werkstück nachbilden, das von der Haltermitte bis zum Rand seinen Querschnitt nicht ändert. Durch die Verwendung einer wurzelförmig (Beispiel b) oder linear ansteigenden Gestaltfunktion (Beispiel c) stellen sich prinzipiell ähnliche Verteilungen des Zerspanungsvolumens ein. Die spitze Form des Maximums lässt sich gegenüber der linearen Gestaltfunktion jedoch wesentlich abmildern.

Steigt die Werkstückfläche vom Halterzentrum zu seinem Rand quadratisch nach der Funktion $g_W'(e_H) = e_H^2$ an (Beispiel d), so zeigt sich eine grundsätzlich andere Verteilung des Zerspanungsvolumens. Der Verlauf zeigt hier ein lokales Minimum im Bereich der Belagsmitte, welches beidseitig von lokalen Maxima flankiert wird. Im Vergleich mit allen anderen Kurven ist das Zerspanungsvolumen in diesem Fall am homogensten über dem Schleifscheibenradius verteilt. Im Bereich großer negativer Drehzahlverhältnisse überträgt sich diese Homogenität auch auf die Schleifscheibenbelastung. Mit zunehmenden Drehzahlverhältnissen steigen die Gradienten innerhalb der Schleifscheibenbelastungskurven jedoch deutlich an. Die Beispiele e und f machen deutlich, dass die Nachbildung theoretischer Gestaltfunktionen durch die Geometrien von Werkstücken und Haltern stark eingeschränkt ist. Bei einer kreisförmigen Belegung des Halters mit runden Werkstücken entsteht eine Verteilung des Zerspanungsvolumens, deren Verlauf dem Beispiel d ähnelt. Die Unterschiede zwischen Maxima

und Minima sind aber wesentlich deutlicher ausgeprägt. Aus der Anordnung der Werkstücke auf zwei Teilkreisen resultiert eine ähnliche Verteilung wie bei einer linearen Gestaltfunktion.

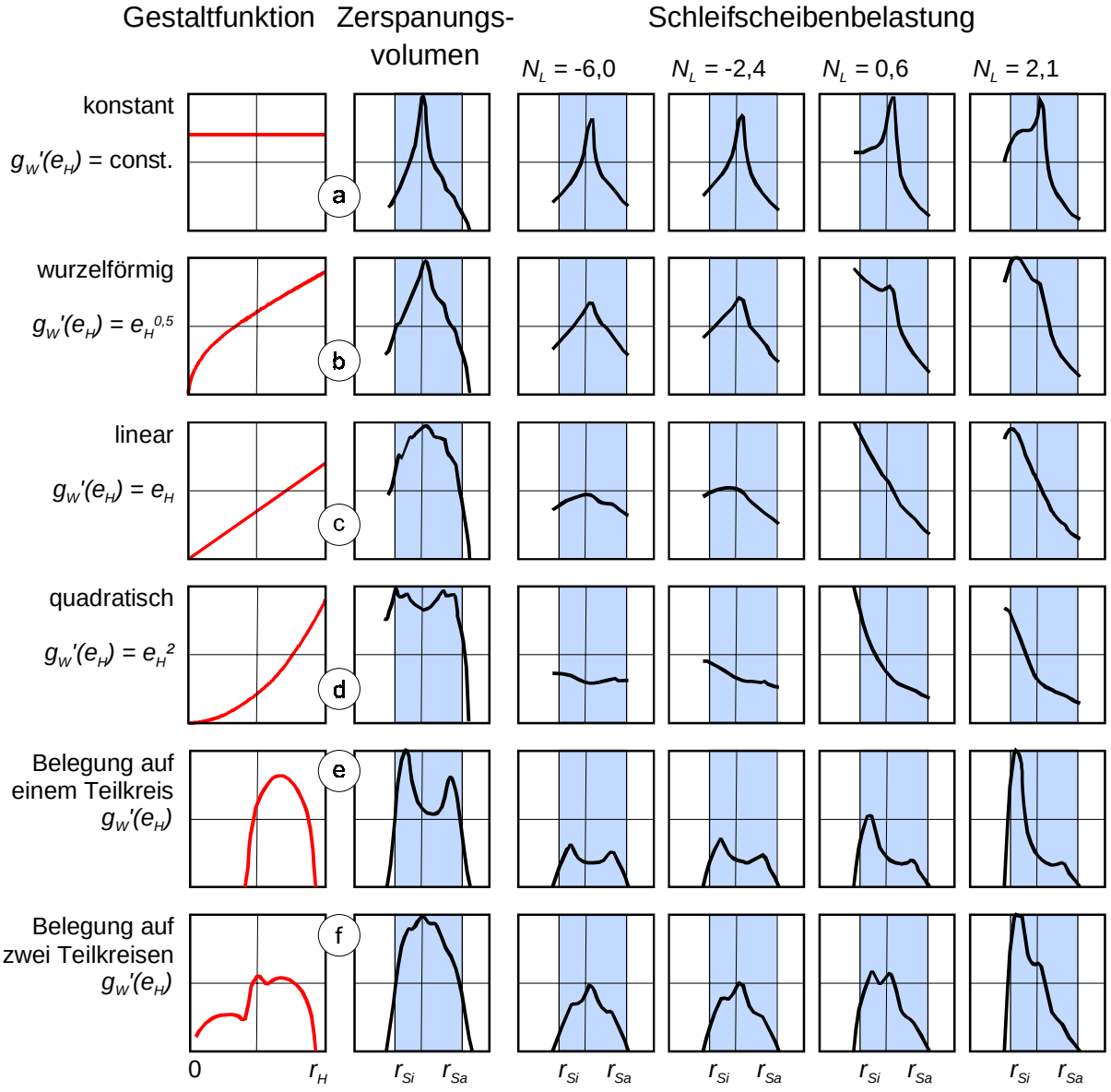


Bild 4.28: Zerspanungsvolumen und Schleifscheibenbelastung als Funktion des Schleifscheibenradius für verschiedene Gestaltfunktionen

Als Ergebnis diese Berechnungen lässt sich festhalten, dass eine besonders gleichmäßige Verteilung des Zerspanungsvolumens über dem Schleifscheibenradius dann zu erreichen ist, wenn die Fläche der Werkstücke vom Halterzentrum nach außen etwa quadratisch ansteigt. Homogene Belastungen der Schleifscheibenbeläge lassen sich jedoch auch mit diesen Belegungen nur für bestimmte Drehzahlverhältnisse erreichen.

4.6.5 Überlauf der Werkstücke über die Schleifscheibenränder

Ein Überlauf der Werkstücke über die Ränder des Schleifbelags hinaus ist aus technologischer Sicht erforderlich, damit die Schleifscheibe in ihrer gesamten Breite beansprucht und die Ausbildung von Verschleißrändern verhindert wird. Ist der Schleifbelag mittig zwischen beiden Stiftkränzen angeordnet, sind die maximalen Überläufe an beiden Kanten des Schleifbelags identisch. Bei rotationssymmetrischen Werkstücken sind Überläufe von 20 bis 100 % vom Werkstückradius r_W üblich.

Durch die Werkstückbewegung über den Rand der Schleifbeläge hinaus schwankt die Kontaktfläche zwischen den Wirkpartnern und damit der effektive Schleifdruck. Diesen Sachverhalt verdeutlicht die Skizze links in **Bild 4.29**. Die Höhe der Druckschwankungen hängt von der Geometrie der Werkstücke, von ihrer Anordnung in den Werkstückhaltern und von der Winkellage der Werkstückhalter zwischen den Stiftkränzen ab. Bei einer großen Stückzahl von kleineren Werkstücken treten summarisch nur geringe Schwankungen der Kontaktfläche auf. Werden jedoch nur wenige große Werkstücke bearbeitet, so ist je nach Größe des Überlaufs mit erheblichen Druckschwankungen zu rechnen.

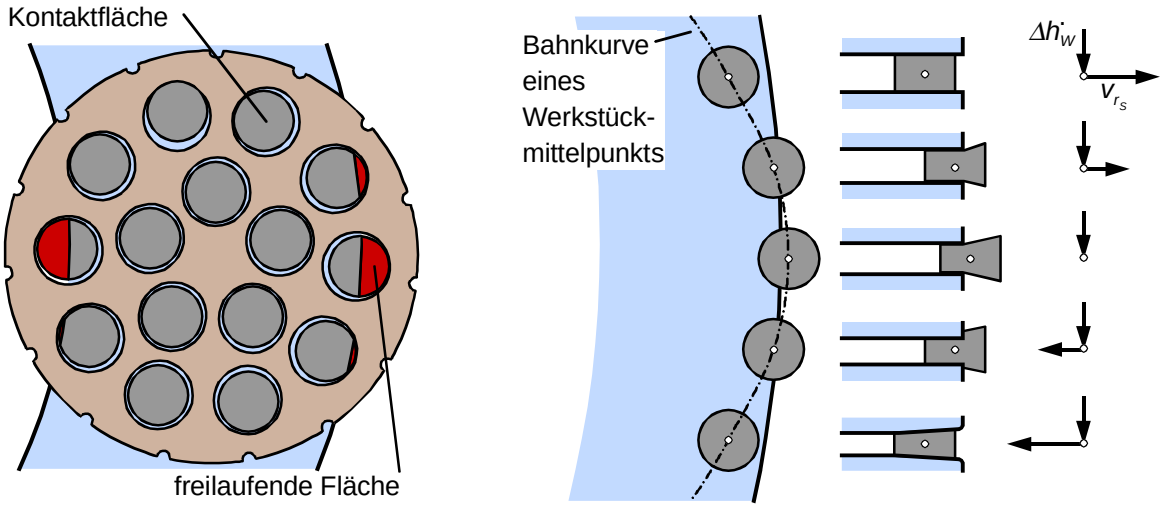


Bild 4.29: Überlauf der Werkstücke über den Schleifscheibenrand

Weiterhin ist die überlaufende Werkstückfläche dem Zerspanungsprozess zeitweise entzogen. Zur Verdeutlichung zeigt die Skizze rechts in Bild 4.29 zu verschiedenen Zeitpunkten ein Werkstück, welches auf seiner Bahnkurve über den Schleifscheibenrand 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 Werkstücks der zeitbezogenen Teilehöhenreduktion $\Delta h_W^{\cdot}$ 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 abgetrennt.

Die Weite des Überlaufs wird durch die Auslegung der Haltergeometrie bestimmt, die zeitliche Dauer im Prozess jedoch durch die kinematischen Parameter. Zur Verdeutlichung des Einflusses der Kinematik auf den Werkstücküberlauf dienen in einem Beispiel die Geometrie der Maschine ZL 500 und ein Werkstück mit dem Radius r_W = 20 mm. Dabei wird ein Punkt am Werkstückrand betrachtet, der an beiden Belagsrändern der Schleifscheibe einen maximalen Überlauf zeigt. In **Bild 4.30** ist die gesamte Bahnlänge *s*, die dieser Werkstückpunkt auf seiner Bahnkurve zurücklegt, mit 100 % angegeben. In Abhängigkeit vom Drehzahlverhältnis N_L zeigt das Diagramm, welche Anteile der Bahnlänge auf dem Schleifbelag und welche jenseits der Innen- bzw. Außenkante zurückgelegt werden. Im Ergebnis fällt auf, dass der Anteil der auf dem Belag zurückgelegten Wegstrecke nahezu unabhängig vom Drehzahlverhältnis etwa 60 % der Gesamtstrecke *s* beträgt. Die Überlaufanteile an der Innen- bzw. Außenkante verschieben sich jedoch erheblich. Im Fall gewöhnlicher Epizykloiden wird der Anteil der innerhalb des Innenrands zurückgelegten Wegstrecke minimal, bei gewöhnlichen Hypozykloiden der außerhalb des Außenrings zurückgelegte Anteil.

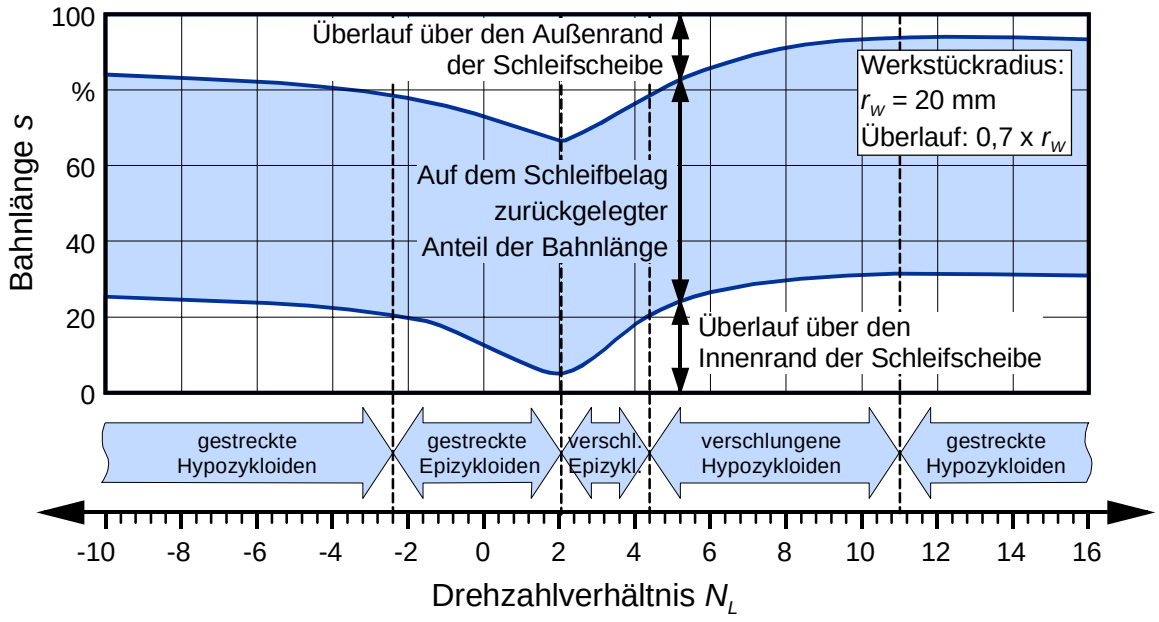


Bild 4.30: Anteil des Überlaufs der Werkstückkante an der Gesamtbahnlänge

Je länger ein Werkstückpunkt freiläuft, um so größer ist das Volumen, welches bei seinem Wiedereintritt zwischen die beiden Schleifscheiben zerspant werden muss. Dabei werden der Belag in der Nähe des Randes und insbesondere die Kante der Schleifscheibe beansprucht. Dies zeigt sich in der Praxis in einer Abrundung der Belagsränder. Das hier gezeigte Diagramm verdeutlicht, dass den kinematischen Parametern ein erheblicher Einfluss auf die Beanspruchung von Innen- und Außenkante der Schleifscheiben zukommt.

4.7 Zusammenfassung allgemeiner Aussagen zur Planetenkinematik

Die Analyse der planetenkinematischen Zusammenhänge ermöglicht konkrete Vorstellungen von den Bewegungsverhältnissen in der Wirkzone und erleichtert dadurch die Erklärung von Effekten, die im Prozessverlauf auftreten. Trotz der Einschränkungen, denen diese theoretischen Betrachtungen unterliegen, bilden sie das Prozessgeschehen mit hinreichender Genauigkeit ab, um viele Vorgänge im unzugänglichen Arbeitsraum einer Zweischeibenmaschine zu beschreiben. Die Darstellung der charakteristischen Eigenschaften verschiedener Bahnbewegungen als Funktion des Drehzahlverhältnisses erleichtert die Auswahl optimaler kinematischer Parameter hinsichtlich unterschiedlicher Zielsetzungen. Aus der Diskussion der Bahnbewegungen und ihrer Eigenschaften lassen sich allgemeine Aussagen ableiten, die auch ohne detaillierte Kenntnis der mathematischen Grundlagen das Verständnis des Prozessgeschehens erheblich erleichtern.

Bahnbewegungen

In Abhängigkeit der Drehzahlen von Stiftkränzen und Schleifscheiben entstehen zwischen Werkstücken und Scheiben bestimmte Bahnbewegungen, die sich neben ihrer Geometrie durch charakteristische Verläufe von Bahngeschwindigkeit und Beschleunigung auszeichnen.

Bei stillstehendem äußeren Stiftkranz hängt die Geometrie einer Bahnkurve vom Drehzahlverhältnis N_L ab, das als Quotient aus Stiftkranzdrehzahl n_i und Schleifscheibendrehzahl n_u definiert ist. Die Bahngeschwindigkeit, mit der ein Werkstückpunkt sich entlang dieser Kurve bewegt, wird von der absoluten Höhe der eingestellten Drehzahlen bestimmt.

Die Einschränkung $n_a = 0$ vereinfacht die bewegungsbeschreibende Mathematik erheblich, da sie einen direkten Zusammenhang zwischen den maschinenseitigen Einstellgrößen und den resultierenden Bahnformen herstellt. Durch den stillstehenden äußeren Stiftkranz ergeben sich keinerlei Einschränkungen bezüglich der realisierbaren Bahnformen. Die Geschwindigkeitsbereiche, in denen bestimmte Bahnformen erzeugt werden können, werden dadurch aber enger. Da die Bewegungsform mit dem Drehzahlverhältnis N_L durch eine einzelne Größe eindeutig festgelegt ist, wird eine Darstellung aller analytischen und experimentellen Ergebnisse als Funktion der Bewegungsform möglich. Für einzelne Bahnformen können die Ergebnisse jederzeit in den dreidimensionalen Parameterraum für Maschinen mit beweglichem äußeren Stiftkranz übertragen werden.

Über dem Radius der Schleifscheibe verlaufen die Bahngeschwindigkeiten eines Werkstückpunkts immer monoton. Die Bahngeschwindigkeiten werden dort minimal, wo die größten Krümmungen auftreten. Wird der Kurvenradius kleiner, nimmt die Geschwindigkeit ab.

Die theoretischen Bewegungsmöglichkeiten werden durch reale Maschinenkonstruktionen stark eingeschränkt. Als kinematische Flexibilität einer Maschine bezeichnet man den Zusammenhang zwischen den möglichen Drehzahlverhältnissen und den maximalen Bahngeschwindigkeiten, mit denen die jeweiligen Bewegungen erzeugt werden können.

Schleifscheibenbelastung

Während der Bearbeitung ist eine Schleifscheibe Belastungen unterworfen, die aus den geometrischen und kinematischen Prozessbedingungen resultieren. Die Belastung einer Schleifscheibe ergibt sich aus dem Zerspanungsvolumen, dem Schleifweg und der Schleifscheibenfläche.

Alle Werkstücke im Halter führen in Abhängigkeit von den eingestellten Drehzahlen festgelegte Bahnbewegungen aus. Die Wegstrecken verteilen sich dabei ungleichmäßig über der Schleifscheibenfläche. Die Summe aller zurückgelegten Wegstrecken kann in Form der Bahnlängenverteilung über dem Schleifscheibenradius dargestellt werden.

Da sich die obere Schleifscheibe gleichmäßig auf die untere absenkt, ist die zeitbezogene Teilehöhenreduktion aller Werkstücke gleich. Daher unterliegen Werkstücke, die sich mit unterschiedlichen Bahngeschwindigkeiten bewegen, unterschiedlichen wegbezogenen Teilehöhenreduktionen. In Abhängigkeit von der momentanen Bahngeschwindigkeit wird pro Meter Schleifweg unterschiedlich viel Werkstoff abgetrennt.

Die Anzahl der zur Verfügung stehenden Schneidkörner steigt mit dem Abstand vom Drehzentrum der Schleifscheiben an. Als Funktion des Schleifscheibenradius ergeben sich die Bahnlängenverteilung und die wegbezogene Teilehöhenreduktion. Aus diesen drei Größen resultiert eine für die geometrischen und kinematischen Parameter charakteristische Schleifscheibenbelastung. Neben dem Verschleiß der Schleifscheiben beeinflusst die Schleifscheibenbelastung auch die Zeitspanungsvolumina und die Antriebsmomente.

5 VERSUCHSBEDINGUNGEN UND MESSMETHODEN

5.1 Versuchsmaschinen

5.1.1 Duomat ZL 500

Für die Durchführung der experimentellen Untersuchungen standen zwei Zweischeibenschleifmaschinen der Bauart Hahn & Kolb der Firma Stähli Läpp-Technik, Schönaich (ehemaliger Hersteller: Hahn & Kolb GmbH, Schorndorf) zur Verfügung. Laut Herstellerangaben wurden weltweit insgesamt mehr als 3500 Maschinen der ZL-Baureihe verkauft. Die konstruktiven und steuerungstechnischen Details der jeweiligen Ausführungen entsprechen dem Stand der Entwicklung der jeweiligen Baujahre.

Für die experimentelle Prozessanalyse wurde die in **Bild 5.1** gezeigte Maschine des Typs Duomat ZL 500 eingesetzt. Dabei handelt es sich um eine Zweischeibenmaschine mit einem maximalen Scheibendurchmesser von 525 mm. Die untere Schleifscheibe sowie beide Stiftkränze sind im gusseisernen Maschinengestell gelagert, das auch die Säule mit dem Schwenkarm und der oberen Schleifscheibe trägt. Die vertikalen und horizontalen Bewegungen der Oberscheibe werden hydraulisch erzeugt. Mit Hilfe einer Wellenmutter kann die Oberscheibe wahlweise pendelnd oder starr zur oberen Antriebsspindel eingestellt werden. Getrennte Antriebe für obere und untere Scheibe sowie den inneren Stiftkranz erlauben die stufenlose Einstellung des Drehzahlverhältnisses.

Bild 5.1: Zweischeibenschleifmaschine Duomat ZL 500

Die Maschine ist mit einer integrierten Messeinrichtung zur Ermittlung der aktuellen Werkstückhöhe ausgerüstet. Diese Messwertsteuerung erfasst über ein inkrementales Längenmesssystem den Abstand der Schleifscheibenflansche zueinander, aus dem auch auf die aktuelle Höhe der dazwischen befindlichen Werkstücke geschlossen wird. Beim Einrichten eines neuen Bearbeitungsvorgangs wird ein Referenzpunkt angefahren und die Differenz zur Sollhöhe der Werkstücke eingegeben. Diese wird danach automatisch für jede Teilecharge neu errechnet. Der Programmablauf kann wahlweise zwischen Zeit- und Messwertsteuerung umgeschaltet werden. Die Zeitsteuerung erlaubt das Programmieren von Lastzyklen, die nach festen Schleifintervallen zwischen Vor-, Haupt- und Nachlasten umschalten. Im Messwertsteuerungsmodus ist das Umschalten auf Nachlast bei Erreichen eines vorgegebenen Restaufmasses möglich. Auf diese Weise ist gewährleistet, dass die Sollhöhe auf jeden Fall mit den Nachlastparametern erreicht wird. Weitere Besonderheiten der Maschine sind ihre Vollkapselung und das freistehende Hydraulikaggregat. Das Gehäuse bietet Vorteile hinsichtlich der Arbeitssicherheit der Maschine und verhindert eine Verschmutzung der Umgebung. **Tabelle 5.1** zeigt die technischen Daten dieser Versuchsmaschine.

Tabelle 5.1: Technische Daten der verwendeten Zweischeibenschleifmaschine Duomat ZL 500

Technische Daten Duomat ZL 500				
Kinematisches System				
	Radien mm		max. Drehzahl min^{-1}	Antriebsleistung kW
obere Schleifscheibe	125	250	435	7,5
untere Schleifscheibe			435	7,5
innerer Stiftkranz	86		268	4
äusserer Stiftkranz	289,5		feststehend	
Weitere Angaben				
Baujahr			1999	
Steuerung			Siemens S5	
maximale Arbeitsauflast		N	10000	

Diese Maschine ist mit einem Kühlaggregat vom Typ IK-V 5/ST der Etscheid Anlagen GmbH, Neustadt-Wied, ausgestattet, mit dem die Schleifscheibenflansche gekühlt werden können. Dabei handelt es sich um eine kontinuierlich arbeitende Anlage mit vollhermetischem Kompressor. Als Kältemittel kommt Wasser zum Einsatz, der interne Tank des Aggregats fasst 187 Liter.

Bei der Kühlschmierstoffzentrifuge handelt es sich um ein Gerät des Typs MR 120-B 70 der HKS Maschinenbau GmbH, Singen. Der Rotor der Zentrifuge dreht sich mit 3000 min^{-1}. Der Schlammeinsatz kann bis zu 10 kg Schleifrückstände aufnehmen. Bei einer Leistungsaufnahme von 4 kW kann dieses Aggregat pro Minute bis zu 150 l Kühlschmierstoff reinigen. Der

Reinflüssigkeitsbehälter fasst 700 l. Bei einer Unterbrechung des Schleifprozesses schaltet die Zentrifuge auf Bypass-Betrieb, so dass die Flüssigkeit intern weiter gereinigt wird. Zur Rückkühlung des Kühlschmierstoffes ist ein Aggregat mit 6 kW Kühlleistung vorhanden, mit dem Temperaturen zwischen 10 und 25 °C erreichbar sind.

5.1.1.1 Störkomplexe im Betriebszustand

In diesem Kapitel werden für die Versuchsmaschine ZL 500 die Störkomplexe analysiert, die aus dem Prozess heraus aufgrund der ungleichen Bearbeitungsbedingungen über dem Scheibenradius entstehen. Mögliche Folgen davon sind thermische und mechanische Verformungen der Schleifscheibenoberflächen.

Wiederholgenauigkeit des Höhenmesssystems

Kernstück der Maschinensteuerung ist das interne Messsystem, mit dem im Prozess der Abstand zwischen beiden Schleifscheibenflanschen in Echtzeit ermittelt wird. Die Güte dieser Messung wirkt sich direkt auf die Arbeitsgenauigkeit aus. Zur Überprüfung der Wiederholgenauigkeit des maschineninternen Höhenmesssystems wurden drei Werkstücke im Winkelabstand von 120 ° am Außenrand auf den Schleifbelag gelegt. Anschließend wurde die obere Schleifscheibe abgesenkt und das Höhenmesssystem abgenullt. Durch Auflegen unterschiedlicher Endmaße auf den Messbolzen wurde anschließend die Wegauslenkung des Messtasters im abgesenkten Zustand der oberen Schleifscheibe verringert. Durch Anheben und Absenken der oberen Schleifscheibe wurden diese Tasterstellungen insgesamt jeweils fünfmal angefahren. Die Abweichung der im Display der Maschinensteuerung angezeigten Teilehöhen von der Höhe des aufgelegten Endmaßes zeigt **Bild 5.2**. Aufgrund der maximalen Auflösung des Messsystems von einem Mikrometer entstehen hier nur ganzzahlige Werte. Es zeigt sich, dass die Messungenauigkeit unabhängig von der Höhe des Endmaßes maximal drei Mikrometer beträgt.

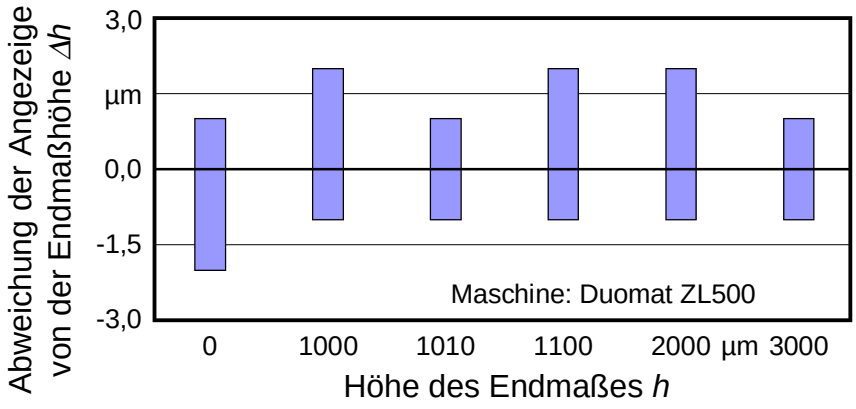


Bild 5.2: Wiederholgenauigkeit des maschineninternen Höhenmesssystems

Thermische Verformung der Schleifscheiben

Wie bei anderen Fertigungsverfahren auch bestehen die Ursachen für die Wärmeentwicklung beim Planschleifen mit Planetenkinematik in der Zerspanungsarbeit und der Reibung zwischen den Wirkpartnern. Sämtliche Werkstückflächen können als Wärmequellen interpretiert werden. Durch Abweichungen der Wirkpartner von ihrer idealen Geometrie kommt es zu Gradienten bezüglich der Kühlschmierstoff- und Druckverteilung im Arbeitsspalt. Weiterhin ändern sich die Bahngeschwindigkeiten zwischen Werkstücken und Schleifscheiben über dem Scheibenradius, so dass lokal unterschiedliche Wärmequellen auf dem Schleifbelag vorliegen.

Die thermische Ausdehnung führt zum einen zu einer Abstandsänderung der beiden Schleifbeläge voneinander. Durch eine Anpassung des Programmwerts für die Teilehöhenreduktion kann dieser Fehler kompensiert werden. Die thermische Ausdehnung hat zum anderen auch eine Verformung der Schleifscheiben zur Folge, die aus unterschiedlichen Werkstoffen von Maschinen- und Schleifscheibenflanschen oder aus einer ungünstigen Aufspannung der Schleifscheiben resultiert. Ein thermisch stabiler Zustand wird erst nach längerer Betriebsdauer erreicht, und jede Prozessunterbrechung zur Messung der Verformung führt zu einer Abweichung vom Betriebszustand.

Zur Messung der thermischen Verformung wurde zuerst eine Referenzmessung des Profils der unteren Schleifscheibe bei der Umgebungstemperatur von 20 °C aufgenommen. Danach wurde der Kühlflansch der unteren Schleifscheibe auf eine bestimmte Temperatur gebracht. Ein stationärer Zustand ohne weitere Verformung stellte sich nach jeweils etwa 20 Minuten ein. **Bild 5.3** zeigt die gemessenen Profilhöhen der unteren Schleifscheibe für Temperaturen zwischen 10 und 50 °C über dem Radius aufgetragen. Die lineare Dehnung der Maschinenelemente findet in dieser Messung keine Berücksichtigung. Die dargestellten Profile beziehen sich auf den äußeren Schleifscheibenrand.

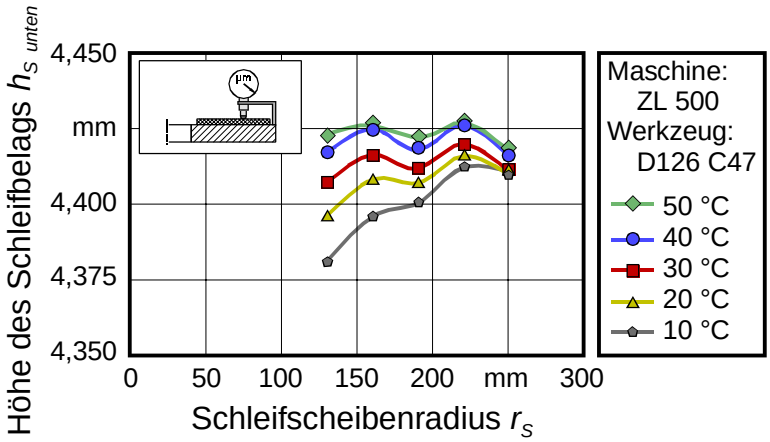


Bild 5.3: Profil des Schleifbelags in Abhängigkeit von der Temperatur

Bei allen fünf Messungen weist die untere Schleifscheibe zwei Profilmaxima bei den Radien von 160 und 220 mm auf. Bei 10 °C beträgt die Differenz zwischen dem höchsten und dem

niedrigsten gemessenen Punkt 31 µm. Mit zunehmender Flanschtemperatur steigt die gemessene Belagshöhe in der Schleifscheibenmitte um 42 µm an. Am Außenrand der Schleifscheibe beträgt die Höhendifferenz zwischen den beiden extremen Temperaturen dagegen nur 7 µm. Die radiale Lage der Minima und Maxima bleibt dabei erhalten. Diese Verformung hat zwei Ursachen. Der Schleifscheibengrundkörper aus Aluminium weist einen etwa zweimal größeren Längenausdehnungskoeffizienten auf als der maschinenseitige Kühlflansch aus Stahlguss. Der Teilkreisradius der Befestigungsschrauben beträgt 216 mm und liegt damit in der Nähe des äußeren Schleifscheibenrandes. Diese Schrauben behindern die thermische Ausdehnung der Schleifscheibe nach außen und führen dazu, dass sich der Innenrand der Schleifscheibe mit zunehmender Temperatur aufbäumt.

Gleichzeitig zur Messung der Schleifscheibenprofile wurde die lineare thermische Ausdehnung der Schleifscheibenoberfläche in Richtung der Drehachsen gemessen. Als Referenzprofil in **Bild 5.4** dient das Schleifscheibenprofil bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C. Bezogen auf dieses Profil zeigt das Diagramm die Superposition der linearen Ausdehnung und der Verformung an den einzelnen Messpunkten. Wie im vorhergehenden Bild zeigt sich das Aufkippen der Belagsinnenseite mit zunehmender Temperatur. Im Bereich zwischen 10 und 50 °C ändert sich die Höhe des Schleifbelags unter Bezug auf das Referenzprofil am Innenrand um 144 µm, am Außenrand um 109 µm. Daraus ergibt sich insgesamt eine mittlere lineare Längendehnung von 2,53 µm pro °C. Dabei steigt der innere gegenüber dem äußeren Scheibenrand um 0,7 µm pro °C an.

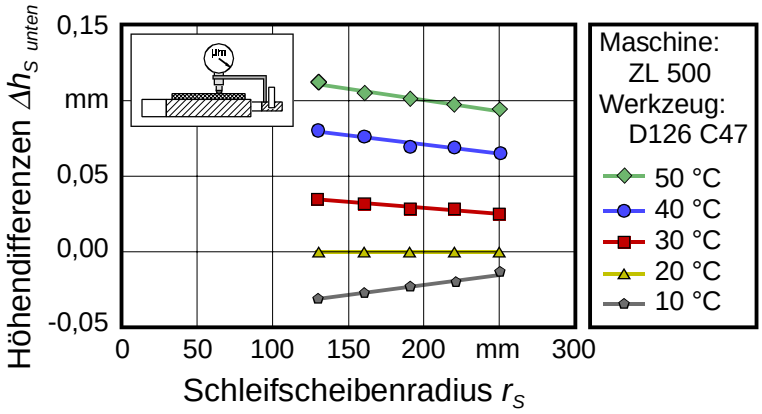


Bild 5.4: Relative Höhendifferenzen der einzelnen Profile bei verschiedenen Temperaturen

Die in die Maschinen integrierten Längenmesssysteme messen den Abstand zwischen dem oberen und dem unteren Schleifscheibenflansch. Dabei wird nicht differenziert, ob eine Änderung des Abstands durch die Verringerung der Teilehöhe, den Verschleiß der Schleifscheiben oder eine thermische Ausdehnung der Maschinenkomponenten hervorgerufen wird. Eine gleichbleibende Arbeitsqualität kann demnach nur bei konstanten Temperaturen im Arbeitsraum gewährleistet werden.

Mechanische Verformung der Schleifscheiben

Ein weiterer Störfaktor besteht in den mechanischen Verformungen der Schleifscheiben. Aufgrund der pendelnden Lagerung der oberen Schleifscheibe wirken sich Verschiebungen der Schleifscheiben gegeneinander, wie sie durch Aufbiegung des C-förmigen Maschinengestells entstehen können, nicht nachteilig auf ihre Ausrichtung zueinander aus. Verformungen der Schleifscheibenflansche zeigen sich aber direkt in der Ebenheit der Schleifbeläge. Ausschlaggebend ist das mechanische Verhalten der aufgespannten Schleifscheiben im Arbeitszustand. Die im Folgenden beschriebenen Versuchsreihen wurden daher im Arbeitsraum der Versuchsmaschine Duomat ZL 500 an einem Schleifwerkzeug der Spezifikation D151 C20 durchgeführt. Die Skizzen im oberen Teil von **Bild 5.5** zeigen, wie zur Abschätzung der statischen Steifigkeit jeweils drei gleich hohe Werkstücke im Arbeitsraum angeordnet wurden. Während der ersten Messreihe (Skizze a) befanden sich die Werkstücke zwischen den Flanschen beider Schleifscheiben innerhalb der Schleifbeläge. Zum zweiten Versuch wurden sie außerhalb der Schleifbeläge angeordnet (Skizze b). Zur dritten und vierten Versuchsreihe (Skizze c) lagen drei Werkstück am Innen- bzw. Außenrand auf den beiden Schleifbelägen.

Nach dem Einlegen der Werkstücke wurde die obere Schleifscheibe abgesenkt und bei ruhenden Antrieben mit unterschiedlichen Normalkräften F_n belastet. Die niedrigste Normalkraft von etwa 1,8 kN entspricht der Gewichtskraft der Maschinenelemente, die mit der oberen Schleifscheibe verbunden sind. Diese Normalkraft wird ohne hydraulische Belastung erzeugt und ist sehr genau reproduzierbar. Für unterschiedliche Normalkräfte wurde mit der internen Messwertsteuerung der Maschine die Abstandsänderung zwischen der oberen Schleifscheibe und dem unteren Maschinenbett gemessen. In den Diagrammen von Bild 5.5 sind die gemessenen Höhendifferenzen Δh für die unterschiedlichen Belastungszustände dargestellt.

Im Experiment a beträgt die maximale Höhendifferenz 1 µm und liegt damit unterhalb der Wiederholgenauigkeit des Messsystems. Bei einer Kraftleitung in der Nähe der Drehachse beider Schleifscheiben wirken sich auch große Normalkräfte nicht messbar auf den Abstand zwischen beiden Schleifscheiben aus. Liegen die Distanzstücke außerhalb der Schleifbeläge (Messkurve b), so zeigt das Messsystem bei zunehmender Normalkraft eine linear ansteigende Höhendifferenz, die bei F_n = 9 kN einen Wert von Δh = -17 µm erreicht. Die Linearität der Kurve und der Rückgang von Δh auf Null bei Entlastung dokumentiert rein elastische Verformungen. Ein Sprung oder Knick der Kurve, der auf ein Setzen der Lagerungen hindeuten würde, ist nicht zu sehen. Dieses Ergebnis lässt offen, ob ein solches Setzen nicht stattfindet, oder ob es sich nicht auf den Abstand zwischen beiden Schleifscheiben auswirkt.

Das untere Diagramm zeigt die Höhenmessung bei Belastung des Schleifbelags an seiner Innen- bzw. Außenkante. Zwischen den Messungen am Innen- und am Außenrand zeigen sich keine deutlichen Unterschiede. Mit zunehmender Normalkraft sinkt Δh um etwa 60 µm ab. Nach der Entlastung bleibt eine bleibende Deformation von etwa 12 µm zurück, die auf ein Eindrücken von Kornspitzen in den Werkstückwerkstoff und auf Abbrechen von Profilspitzen an Schleifscheiben und Werkstücken zurückzuführen ist.

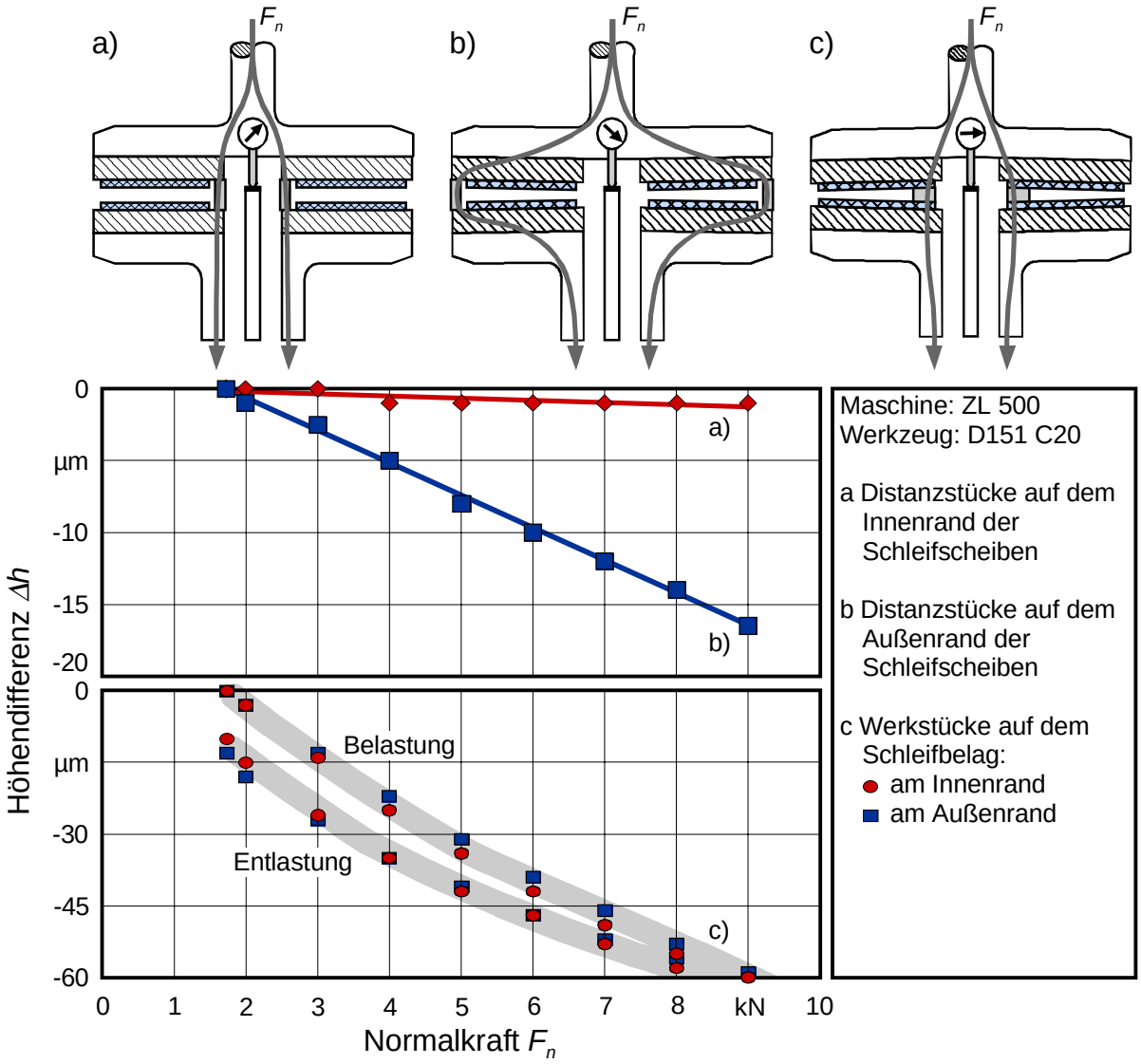


Bild 5.5: Mechanische Verformung der Schleifscheiben

Belastungen dieser Art treten bei der Werkstückbearbeitung nicht auf, da die Normalkräfte niedriger liegen und die Werkstücke im Arbeitsraum verteilt sind. Die Diagramme verdeutlichen, dass die Steifigkeit der Schleifscheibenflansche gegenüber der Elastizität der Schleifbeläge zu vernachlässigen ist.

5.1.2 Duomat ZL 700 CNC

Neben der obengenannten Maschine stand eine Zweischeibenschleif- und Läppmaschine des Typs ZL 700 CNC (Baujahr 1989) der Firma Hahn & Kolb zur Verfügung. Sie kann Schleifscheiben bis zu einem maximalen Durchmesser von 685 mm aufnehmen. **Tabelle 5.2** zeigt die technischen Daten dieser Versuchsmaschine [B&K, Fun94, H&Ka, Mül89].

Auch bei dieser Maschine ist der äußere Zahnkranz im Maschinenbett fixiert. Die CNC-Steuerung regelt das Heben und Senken der Oberscheiben im Eilgang und das sanfte Aufset-

zen der Oberscheibe auf die Werkstücke, die Verschleißkorrektur der beiden Schleifscheiben und die Tarierung des Gewichts der Oberscheibe, das in die Arbeitslast mit eingeht. Kernstück der Steuerung ist das Werkstückhöhen-Messsystem, das die Werte für die Werkstücklagekontrolle zu Prozessbeginn und die Teilehöhenmessung während der Bearbeitung generiert. Als zusätzliches Zubehör verfügt die Duomat ZL 700 über eine hydraulische Abdreheinrichtung, die zum Abrichten durch Überdrehen von konventionellen Schleif- oder Läppscheiben oder zum Einstechen von Nuten dient.

Tabelle 5.2: Technische Daten der Duomat ZL 700 CNC [B&K, Fun94, H&Ka]

Technische Daten Duomat ZL 700 CNC				
Kinematisches System				
	Radien mm		max. Drehzahl min^{-1}	Antriebs-leistung kW
obere Schleifscheibe	125	310	121	3
untere Schleifscheibe			134	3
innerer Stiftkranz	109		75	1,1
äusserer Stiftkranz	368,5		feststehend	
Weitere Angaben				
Baujahr			1989	
Steuerung			Siemens SMP	
maximale Arbeitsauflast		N	8600	

Die Reinigung des Kühlschmierstoffs erfolgt in einer Zentrifuge der Firma Turbo-Separator, Lichtensteig, Schweiz. Mit 3 kW Antriebsleistung ist eine maximale Durchflussmenge von 60 l/min möglich. Über ein Rückkühlaggregat ist die Temperatur des Fluids im Bereich von 0-60 °C wählbar. Durch einen Kühlwasserkreislauf wird die Wärme aus dem Öl an die Umgebungsluft abgegeben. Die Anlage arbeitet ohne Filterhilfsmittel oder Verschleißteile [TS].

5.2 Schleifwerkzeuge

Für die experimentellen Untersuchungen standen mehrere Paare Diamantschleifscheiben der Diamant-Gesellschaft Tesch GmbH, Ludwigsburg, zur Verfügung. Aufgrund der unterschiedlichen Durchmesser der kinematischen Systeme konnten die Scheibenpaare jeweils nur auf einer der beiden Versuchsmaschinen eingesetzt werden. **Tabelle 5.3** zeigt die Geometrien und Spezifikationen der Scheibenpaare. Die Beläge aller Werkzeugpaare waren kunstharzgebunden. Bei den experimentellen Untersuchungen kamen für obere und untere Schleifscheibe stets gleiche Spezifikationen zum Einsatz.

Tabelle 5.3: Spezifikationen der verwendeten Schleifwerkzeuge

Geometrie				Spezifikation	
Maschine	r_{Si} [mm]	r_{Sa} [mm]	Nutung	Korn-größe	Konzen-tration
ZL 700	150	325	8 radiale Nuten	D126	C47
ZL 500	125	250	ungenutet	D91	C50
	125	250	8 radiale Nuten	D126	C47
	125	250	ungenutet	D126	C47
	125	250	ungenutet	D151	C20

Für die Interpretation der experimentellen Untersuchungen ist die Anzahl der aktiven Körner N_{GA} an der Belagsoberfläche von Interesse. Verschiedene Autoren haben dies untersucht und als Grundzusammenhang eine Proportionalität zwischen N_{GA} und dem Quotienten der Kornkonzentration C und dem Quadrat des mittleren Korndurchmessers D

$$N_{GA} \approx \frac{C}{D^2} \; . \tag{5-1}$$

festgestellt [Kas69, Wei97, Wer71]. Unter Verwendung dieser Näherungsgleichung weisen die Schleifbeläge der Spezifikation D91 C50 doppelt so viele aktive Kornschneiden auf wie die der Ausführung D126 C47. Im Vergleich dazu besitzt das Scheibenpaar D151 C20 nur etwa 30 % der Kornschneiden.

5.3 Kühlschmierstoffe

Die wichtigsten Funktionen, die ein Kühlschmierstoff beim Schleifen keramischer Werkstoffe erfüllen muss, sind eine gute Schmierung des Prozesses sowie eine ausreichende Kühlung und der Transport der abgetrennten Partikel. Weitere Forderungen sind eine gute Umwelt- und Gesundheitsverträglichkeit, eine Beständigkeit gegenüber Verunreinigungen und Bakterien sowie eine geringe Neigung zur Bildung von Rückständen, Schaum oder Nebel, wobei letztere insbesondere bei Schleifölen in direktem Zusammenhang mit Brand- oder Explosionsgefahr steht [Brü96, War94]. Die Kühl- und Spülwirkung eines Kühlschmierstoffs wird durch seine Wärmeleitfähigkeit, seine Verdampfungswärme, seine spezifische Wärmekapazität, seine Viskosität und seine Benetzungsfähigkeit bestimmt.

Hinsichtlich der beiden Anforderungen Kühlung und Schmierung muss für jeden Anwendungsfall ein Kompromiss gefunden werden: Öle zeigen wesentlich bessere Schmiereigenschaften als wasserbasierte Kühlschmierstoff, die allerdings deutlich höhere Kühlwirkung besitzen. Die Schmierwirkung von Emulsionen nimmt mit deren Ölanteil zu.

Um die Auswirkungen der oben dargestellten Eigenschaften von Kühlschmierstoffen auf den Prozessverlauf zu dokumentieren, wurden im Rahmen der experimentellen Untersuchungen ein Schleiföl und eine Lösung getestet. Das Superfinishöl Diamond 80 der Oel-Held GmbH,

Stuttgart, ist ein geruchloses Syntheseöl, welches für den Einsatz beim Planschleifen mit Planetenkinematik empfohlen wird. Besonders hervorgehoben wird die Eignung für die Bearbeitung mit CBN- und Diamantschleifscheiben. Bei dem Konzentrat Rotorol Bio 6000 S des gleichen Herstellers handelt es sich um ein vollsynthetisches Mittel, welches als mineralöl-, chlor-, nitrid- und schwermetallfrei bezeichnet wird. Bei Mischung mit Wasser ergibt sich eine transparente, grünliche Lösung mit gutem Korrosionsschutzvermögen [OHa bis OHd].

Tabelle 5.4: Eigenschaften der verwendeten Kühlschmierstoffe

		Lösung 3 % Rotorol 6000 S	Öl Diamond 80
Dichte	g/cm³	1,10	0,791
Kinematische Viskosität	mm²/s	1,12	3,2
Oberflächenspannung	mN/m	64	26,5

5.4 Versuchswerkstücke

Wie im Stand der Technik dargelegt, wird das Planschleifen mit Planetenkinematik zur Bearbeitung unterschiedlichster Werkstoffe mit verschiedenen Einsatzfeldern eingesetzt. Von FUNCK [Fun94] wurden bereits die technologischen Zusammenhänge bei der Stahlbearbeitung erforscht. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Gruppe der keramischen Werkstoffe.

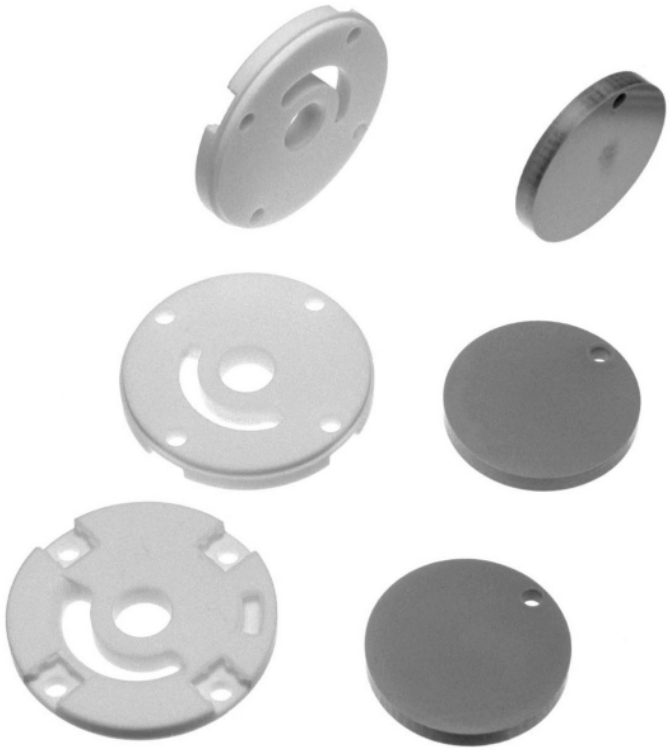


Bild 5.6: Versuchswerkstücke aus den Werkstoffen Al_2O_3 (links) und Si_3N_4 (rechts)

Aus der Gruppe der Oxidkeramiken wurde Aluminiumoxid ausgewählt, von den Nichtoxidkeramiken Siliciumnitrid. **Bild 5.6** zeigt die Versuchswerkstücke, die im Rahmen der experimentellen Untersuchungen bearbeitet wurden: dabei handelt es sich um Benzinpumpendeckel aus Al_2O_3 und Ventileinstellplättchen aus Si_3N_4. Aufgrund der unterschiedlichen thermischen und mechanischen Eigenschaften eignen sich diese unterschiedlichen Werkstoffe für spezielle technische Anwendungen. Gleichzeitig beeinflussen die spezifischen Werkstoffcharakteristika das Zerspanungsverhalten während der Schleifbearbeitung. Die erzeugbaren Oberflächentopographien und -güten werden durch Wechselwirkungen zwischen dem Bearbeitungsprozess und den jeweiligen Werkstoff- und Gefügeeigenschaften erzeugt.

Tabelle 5.5: Eigenschaften der Versuchswerkstoffe [CT]

		Aluminium-oxid	**Silicium-nitrid**
Firmenbezeichnung		V 38	CerDur 90 GS
Allgemeine Eigenschaften			
Rohdichte	g/cm³	3,75	3,24
Mechanische Eigenschaften			
Biegebruchfestigkeit (20 °C)	MPa	310	900
Druckfestigkeit	MPa	2500	3000
E-Modul (dynamisch)	GPa	350	300
Vickershärte H_{V10}		1330	1550
Bruchwiderstand K_{Ic}	$MPa \cdot m^{½}$	4,0	8,0
Thermische Eigenschaften			
Wärmeleitfähigkeit 20 - 100 °C	W/mK	20	24
Längenausdehnungskoeff. 20 - 400 °C	$10^{-6} \cdot K^{-1}$	7,6	2,1
Längenausdehnungskoeff. 20 - 1000 °C	$10^{-6} \cdot K^{-1}$	8,8	3,4
mittlere spez. Wärmekapazität	KJ/kgK	0,9	0,6
maximale Einsatztemperatur unbelastet in oxidierender Atmosphäre	°C	1200	1200

Alle Versuchswerkstücke stammen aus den Werken in Lauf und Plochingen der CeramTec AG. Die in **Tabelle 5.5** dargestellten Eigenschaften und Kennwerte dieser Werkstoffe stammen aus dem Datenblatt des Herstellers. Keiner der Werkstoffe weist eine Restporosität auf, demzufolge betragen sowohl Wasseraufnahme als auch Gasdurchlässigkeit jeweils 0 %. Die Aluminiumoxidkeramik weist mit 3,75 g/cm³ die höhere Dichte auf. Der Al_2O_3-Gehalt wird mit 96 % angegeben. Der Längenausdehnungskoeffizient liegt mit $7,6 \cdot 10^{-6}\ K^{-1}$ je nach Temperaturbereich bis 3,6 mal höher als bei Si_3N_4. Dieser Wert ist der Grund für die relativ hohe Thermoschockempfindlichkeit des Werkstoffs. Das verwendete Si_3N_4 zeigt eine sehr hohe Druckfestigkeit, einen großen dynamischen Elastizitätsmodul und mit 1550 HV die höhere Vickershärte. Weiterhin liegen die Kennwerte für die Biegefestigkeit und für den Bruchwiderstand wesentlich höher als beim eingesetzten Al_2O_3-Werkstoff. Aufgrund der hohen Fes-

tigkeiten und der geringen thermischen Dehnung ist die Thermoschockempfindlichkeit dieses Werkstoffs recht gering. Dieser Werkstoff ist für eine Bearbeitung durch Laserstrahlen bzw. eine laserunterstützte Bearbeitung geeignet. Die Siliciumkeramik zeichnet sich durch eine ausgezeichnete Beständigkeit gegenüber korrosiven oder chemischen Umgebungsbedingungen aus und zeigt ein sehr gutes Verschleißverhalten [CT, War94, Wei97].

5.5 Versuchsdurchführung

Im Rahmen von Vorversuchen wurden unterschiedliche Strategien zur Durchführung der Schleifversuche geprüft. Es zeigte sich, dass für die Bearbeitung mit reproduzierbaren Ergebnissen die Prozessschritte

- Höhensortierung der Werkstücke,
- Profilieren der Schleifscheiben,
- Schärfen der Schleifscheiben und
- Durchführung des Schleifversuchs

notwendig sind.

Höhensortierung der Werkstücke

Das Maschinenkonzept mit pendelnd gelagerter Oberscheibe hat den Nachteil, dass stark unterschiedliche Werkstückhöhen im Prozess nicht unbedingt ausgeglichen werden. Die Oberscheibe liegt zu Prozeßbeginn auf den höchsten Werkstücken auf und trennt soviel Volumen ab, bis auch niedrigere Werkstücke in Eingriff kommen. Im Idealfall besitzen alle Werkstücke nach einer bestimmten Schleifzeit die gleiche Höhe. Durch ungünstige Belegung kann der Fall eintreten, dass in einen Halter mehrere hohe Werkstücke, in einen anderen Halter nur niedrige Werkstücke eingelegt werden. In diesem Fall verkippt die Oberscheibe leicht zur Unterscheibe. Während der Werkstückbewegung ändert sie ihre Lage und führt eine taumelnde Bewegung aus, so dass ein Ausgleich der Teilehöhen nicht stattfindet. Die Höhentoleranzen der Ausgangsteile können so während der Bearbeitung erhalten bleiben oder sogar verstärkt werden. Daher wurden alle Versuchswerkstücke mit einer Bügelmessschraube vermessen und in Klassen mit einer Höhentoleranz von 20 µm sortiert.

Profilieren der Schleifscheiben

Das Profilieren von Diamantschleifscheiben der verwendeten Größen stellt für sich ein umfangreiches Forschungsgebiet dar. Aufgrund der großen Belagsflächen ergeben sich schon bei geringen Höhenunterschieden große abzuspanende Volumina. Für das Profilieren der Schleifscheiben wurde keine bestimmte Vorgehensweise festgelegt, sondern ein Qualitätskriterium.

Sobald die im Anschluss an eine Versuchsreihe festgestellte Abweichung von der ideal ebenen Geometrie den Wert von 100 µm überstieg, wurden die Schleifscheiben abgerichtet.

Dazu wurden mehrere Arten von Werkzeugen eingesetzt. Zur Beseitigung kleinerer Profilabweichungen kamen einteilige, außenverzahnte Abrichtringe aus Baustahl zur Anwendung, die wie Werkstückhalter in die Maschine eingelegt und durch das kinematische System angetrieben wurden. Das Abtrennen größerer Unebenheiten erfolgte mit Hilfe von Schleifringen mit dem Außendurchmesser 170 mm und einer Ausgangshöhe von 25 mm. Als Schneidstoff sind SiC-Körner der Korngröße 80 in einer mittelharten keramischen Bindung enthalten. Diese Schleifringe wurden in außenverzahnte Pertinaxscheiben eingeklebt, um eine Führung im kinematischen Antriebssystem der Maschine zu ermöglichen. Durch die Klebeverbindung wird im Betrieb eine ständige Drehung der Schleifringe und dadurch ein konstanter Richtungswechsel bezüglich der Diamantschleifscheiben erzwungen.

Schärfen der Schleifscheiben

Nach dem Profilieren muss die Oberfläche der Schleifscheibe im Regelfall geschärft werden. Dieser Begriff bezeichnet das Zurücksetzen der Bindung gegenüber den Kornschneiden. Bei einigen Profiliervarianten wird dieser Effekt mit erreicht. Das Schärfen der Diamantbeläge erfolgte unabhängig von der gemessenen Profilabweichung vor jeder Versuchsreihe, um reproduzierbare Ausgangsbedingungen zu Versuchsbeginn sicherzustellen.

Zum Schärfen der Diamantwerkzeuge kamen jeweils fünf keramisch gebundene, mittelharte Korundschleifscheiben der Korngröße 80 zum Einsatz. Diese Schleifscheiben besaßen einen Außen- bzw. Innendurchmesser von 32 bzw. 10 mm und eine Höhe von 20 mm. Sie wurden einzeln in fünf Werkstückhaltern angeordnet und mit einer Auflast von insgesamt 120 dN beaufschlagt. Bei einem Drehzahlverhältnis von $N_L = 0{,}6$ und einer mittleren Bahngeschwindigkeit von $v_m = 100$ m/min wurden diese Schleifscheiben von ihrer Ausganghöhe bis auf die Höhe der Werkstückkäfige von 2 mm bearbeitet. Je nach Ausgangszustand der Diamantwerkzeuge traten deutliche Unterschiede in der Bearbeitungsdauer auf. In jedem Fall reichte das Schärfspanungsvolumen von 65.314 mm³ aus, um die beiden Diamantbeläge vollflächig und reproduzierbar zu schärfen.

Durchführung des Schleifversuchs

Zuerst erfolgte die Vermessung des Profils der unteren Schleifscheibe. Lag die gemessene Profilabweichung über dem vorgegebenen Qualitätskriterium, so wurde wie zuvor beschrieben das Profil der Werkzeuge bearbeitet, bis das Qualitätskriterium erfüllt war. Daraufhin erfolgte das Schärfen der Diamantbeläge und die Messung des Ausgangsprofils für die jeweilige Versuchsreihe.

Für die Standardversuche am Werkstoff Al_2O_3 wurde die Bearbeitung von 40 Werkstückchargen bei $z_W = 15$ Teilen pro Ladung festgelegt. Diese Anzahl stellt sicher, dass die Prozess-

kenngrößen nach dem instationären Prozeßbeginn, der auf das Schärfen der Schleifscheiben zurückzuführen ist, in einen annähernd stationären Bereich übergehen. Die Mittelwerte der Prozesskennwerte im stationären Bereich sind charakteristisch für die jeweiligen Einstellparameter. In Anlehnung an Beispiele aus dem industriellen Alltag wurde für die bearbeiteten Benzinpumpendeckel aus Aluminiumoxid ein Aufmaß 500 µm gewählt. Für eine maximale Ausnutzung des zur Verfügung stehenden Werkstoffs kamen sämtliche Teile jeweils viermal mit einem Gesamtaufmass von 2 mm zum Einsatz. Auf diese Weise betrug die erforderliche Werkstückanzahl 150 Stück pro Schleifversuch. Aufgrund ihrer Vorbearbeitung wiesen die Werkstücke keinerlei Sinterhaut auf, so dass während der gesamten Bearbeitungszeit konstante Werkstoffkennwerte vorlagen. Von den Ventileinstellplättchen aus Si_3N_4 wurden standardmäßig $z_W = 10$ Werkstücke pro Charge mit einem Aufmass von 100 µm bearbeitet. Auch hier wurden die Werkstücke so oft geschliffen, wie es ihre Ausgangshöhe zuließ. Jeweils nach der 40. Charge wurden die Profile der unteren Schleifscheibe vermessen und 3 beliebige Werkstücke zur Vermessung der Rauheiten archiviert.

In **Bild 5.7** ist der Ablauf von Vorbereitung, Versuchsdurchführung und Nachbereitung in Form eines Ablaufplans dargestellt. Diese Strategie liegt allen in den folgenden Kapiteln ermittelten Ergebnissen zugrunde.

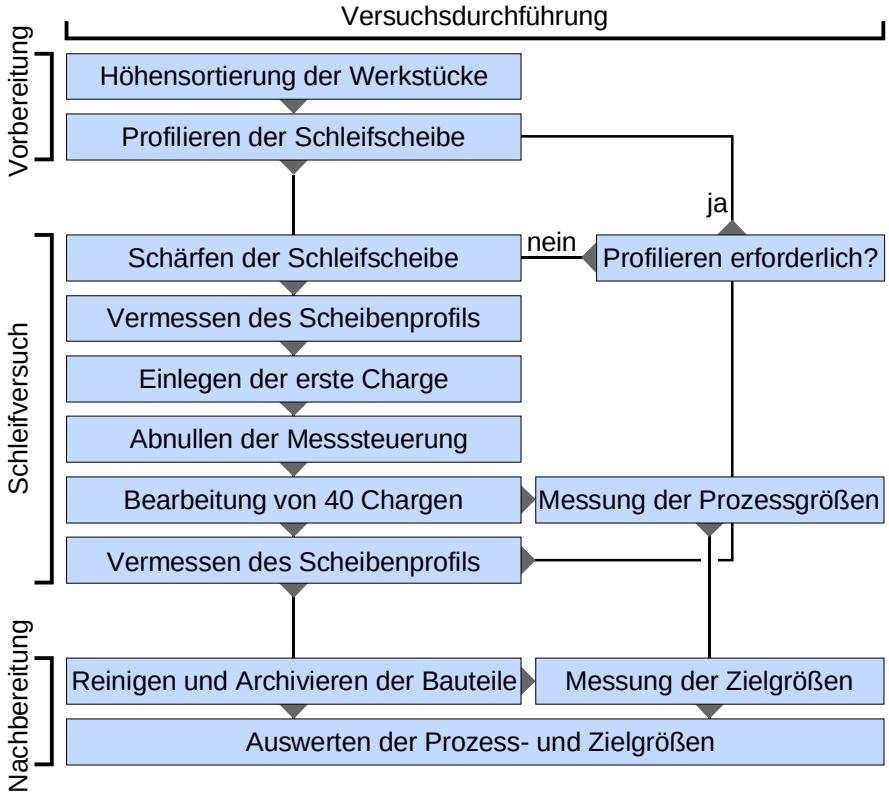


Bild 5.7: Ablaufschema der experimentellen Untersuchungen

5.6 Technologische Kenngrößen und deren Erfassung

Eine besondere Problematik beim Planschleifen mit Planetenkinematik besteht in der Definition geeigneter Kenngrößen zur Prozessbeschreibung. Während der Bearbeitung befindet sich eine größere Anzahl von Werkstücken gleichzeitig im Eingriff, die Bewegungsrichtungen und -geschwindigkeiten sind jedoch stark unterschiedlich. Daher ist sowohl die Aufnahme werkstückspezifischer Kräfte als auch die Definition von Prozesskennwerten schwierig. Aufgrund der großen Kontaktfläche und der niedrigen mittleren Relativgeschwindigkeiten unterscheiden sich die Zerspanungsbedingungen beim Planschleifen mit Planetenkinematik von denen anderer Schleifverfahren. Der Vorschub der oberen Schleifscheibe erfolgt nicht weg-, sondern kraftgebunden, so dass das sich einstellende Zeitspanungsvolumen keine Stell-, sondern eine Prozesskenngröße ist.

Als kinematische Kontaktlänge wird die Eingriffslänge eines Korns unter Berücksichtigung der Relativbewegungen zwischen Werkstücken und Schleifscheiben bezeichnet. Im Gegensatz zu anderen Schleifverfahren besitzt diese Kennzahl beim Planschleifen mit Planetenkinematik jedoch keine Aussagekraft zur Prozesscharakterisierung, denn je nach Werkstückposition und eingestellten Drehzahlen kann sie den Wert Null annehmen oder sogar den Wert des Werkstückdurchmessers übersteigen [Fun94].

Die Eingriffstiefe der einzelnen Kornschneiden ist sehr gering, da die Kornbahnen in der Ebene der zu bearbeitenden Fläche liegen. Eine äquivalente Spanungsdicke kann nicht berechnet werden, da die Zustellung durch das Aufliegen der Schleifscheibe auf den zu bearbeitenden Flächen theoretisch den Wert Null annimmt.

5.6.1 Einstellparameter

Im vorhergehenden Kapitel wurde gezeigt, auf welche Weise die Drehzahlen der beiden Schleifscheiben und des inneren Stiftkranzes berechnet werden können, um für ein bestimmtes Drehzahlverhältnis eine gewünschte mittlere Bahngeschwindigkeit zu realisieren.

Zur Einstellung eines vorgegebenen Schleifdrucks muss die Fläche aller im Eingriff befindlicher Werkstücke bekannt sein. Damit wird an der Maschine die Normalkraft eingestellt, mit der die gewünschte Flächenpressung erreicht wird. Aus der Tradition heraus wird die Normalkraft in den Steuerungen der meisten Hersteller in der Einheit Dekanewton angegeben, die dem Bediener durch ihre Ähnlichkeit mit der Gewichtskraft eines Kilogramms eine Vorstellung von der herrschenden Auflast ermöglicht.

Belegung

Die Stückzahl der gleichzeitig im Eingriff befindlichen Werkstücke wird als Chargenmenge bezeichnet. Sie beeinflusst den Prozessverlauf deutlich, da die Anzahl der zur Verfügung ste-

henden Kornschneiden unabhängig von der im Eingriff befindlichen Werkstückfläche konstant bleibt. Um diesen Effekt bewerten zu können, wird der Belegungsfaktor

$$B = \frac{\sum A_W}{A_S} \cdot 100 \tag{5-2}$$

definiert, der den Quotienten der Summe aller bearbeiteten Werkstückflächen A_W zur Scheibenfläche A_S prozentual angibt. Aufgrund der doppelseitigen Bearbeitung müssen Ober- und Unterseiten der Werkstücke sowie die Flächen beider Schleifscheiben berücksichtigt werden. Bei komplexen Werkstückgeometrien kann sich die Belegung bezüglich oberer und unterer Schleifscheibe unterscheiden. Werte von $B \geq 25$ % der Scheibenstirnflächen sind keine Seltenheit. Auch Größe und Formgebung der einzelnen Werkstücke wirken sich auf den Prozessverlauf aus, zum Beispiel nehmen mit zunehmender Werkstückgrundfläche die Probleme mit der Wärmeentwicklung und dem Abtransport der entstehenden Späne zu. Allerdings lassen sich all diese Einflussgrößen nicht ohne erheblichen Informationsverlust durch eine Kennzahl beschreiben.

5.6.2 Prozessgrößen

Antriebsmomente

Direkt messbare Größen zur Beurteilung des Prozessverlaufs stellen die Antriebsmomente der beiden Schleifscheiben und des inneren Stiftkranzes dar. Aufgrund der unterschiedlichen Bewegungsrichtungen zwischen Werkstücken und Schleifscheiben ist eine Messung der tangentialen Komponenten der Schleifkräfte am einzelnen Werkstück nicht möglich. Die Momente repräsentieren eine integrale Kenngröße für diese Schleifkräfte an allen im Eingriff befindlichen Flächen.

Die Steuerung der Versuchsmaschine Duomat ZL 500 ist mit einer Protokollfunktion ausgestattet, die wichtige Prozessdaten speichert und über eine RS 232-Schnittstelle im Textformat an einen PC übergibt. Im Text enthalten sind die Momente, mit denen die drei Antriebe die beiden Schleifscheiben und den inneren Stiftkranz bewegen. Die Maschine ist mit Frequenzumformern ausgestattet, die jeweils einzeln auf den angeschlossenen Motor eingemessen werden und wahlweise verschiedene Kenngrößen wie den Motorstrom, den Nachlaufwinkel oder das an der Motorachse anliegende Moment ausgeben können.

Schleifkräfteverhältnis

Im Rahmen der Analogieuntersuchungen sowie zur Beurteilung der Schleifscheibenschärfe wurden die auftretenden Tangentialkräfte in Abhängigkeit von den aufgebrachten Normalkräften untersucht. Zur Beurteilung der Abhängigkeiten dient das Schleifkräfteverhältnis

$$\mu_S = \frac{F_t}{F_n} \tag{5-3}$$

als Quotient beider Kraftkomponenten [Fun94, Uhl93]. Die Realisierung des kraftgebundenen Eingriffs erfolgte bei allen Modellversuchen durch Stahlgewichte unterschiedlicher Massen. Zur Messung der Tangentialkräfte diente ein piezokeramischer Kraftaufnehmer vom Typ 9211 der Firma Kistler Instrumente GmbH, Ostfildern. Ein Ladungsverstärker der Bauart 5011 B10 der gleichen Firma wandelte die Signale in eine kraftproportionale Analogspannung um, die mit Hilfe eines Computers aufgenommen und protokolliert wurde.

Charakterisierung der Zerspanleistung

Ein weiterer wichtiger Wert für die Beurteilung der Prozessführung ist die Zerspanleistung. Zur Darstellung dieser Kenngröße existieren beim Planschleifen mit Planetenkinematik verschiedene verfahrensspezifische Formen, die im Folgenden erläutert werden.

Das zu zerspanende Aufmaß wird beim Planschleifen mit Planetenkinematik grundsätzlich in Richtung der Schleifscheibendrehachsen, also werkstückbezogen in der Werkstückhöhe abgetrennt. Aus diesem Grund wird die Differenz zwischen der Ausgangshöhe der Werkstücke und ihrer Höhe nach der Bearbeitung als Teilehöhenreduktion Δh_W bezeichnet. Der Abstand der beiden Schleifscheibenflansche wird im Prozess von einem induktiven Taster erfasst, der im Rotationszentrum der oberen Schleifscheibe angebracht ist und sich auf einem Messbolzen im Bett der Maschine abstützt. Der Referenzpunkt für die Tasterstellung wird vor Prozessbeginn mit der Ausgangshöhe der Werkstücke ermittelt, so dass die Differenz zum gewünschten Endmaß im Bearbeitungsprogramm eingetragen werden muss. Die Teilehöhenreduktion wird von der Maschine protokolliert und ebenfalls über die RS 232-Schnittstelle an den PC übergeben. Dieses Messsystem bildet die Basis zur Berechnung aller in diesem Kapitel beschriebenen Spanungsgrößen. Aus der Multiplikation der Teilehöhenreduktion mit der Fläche der Werkstücke $z_W \cdot A_W$ ergibt sich das Zerspanungsvolumen V_W zu

$$V_W = \Delta h_W \cdot z_W \cdot A_W \quad \left[\text{mm}^3\right]. \tag{5-4}$$

Eine Größe, die sich aus der oben beschriebenen Teilehöhenreduktion ableiten lässt, stellt die zeitbezogene Teilehöhenreduktion

$$\dot{h}_W = \frac{\Delta h_W}{t_c} \quad \left[\frac{\mu\text{m}}{\text{s}}\right] \tag{5-5}$$

dar, die die abgetrennte Teilehöhe Δh_W auf die Schleifzeit t_c bezieht [Fun94]. Dieser Wert kann als Quotient von Weg und Zeit als Abtrenngeschwindigkeit interpretiert werden. Auf die Angabe der Flächen der bearbeiteten Werkstücke wie auch der Schleifscheiben wird in diesem Fall verzichtet. Die zeitbezogene Teilehöhenreduktion ist am laufenden Prozess durch das Abschleifen des Aufmasses in einer bestimmten Zeit konkret nachvollziehbar. Sie stellt im praktischen Einsatz des Verfahrens die wichtigste Größe zur Planung von Bearbeitungs-

zeiten und zur Berechnung der Wirtschaftlichkeit dar. Die zeitbezogene Teilehöhenreduktion ist einem auf die Kontaktfläche bezogenen Zeitspanungsvolumen vergleichbar: multipliziert man sie mit der Kontaktfläche, so ergibt sich das Zeitspanungsvolumen Q_W zu

$$Q_W = \frac{\Delta h_W \cdot z_W \cdot A_W}{t_c} \quad \left[\frac{\text{mm}^3}{\text{s}}\right]. \tag{5-6}$$

Durch die Summation aller Werkstückflächen geht aber die Information über deren Anzahl und damit das am einzelnen Werkstück abgetrennte Volumen verloren. Bei unterschiedlich großen Bearbeitungsflächen bezüglich beider Schleifscheiben muss von verschiedenen Zeitspanungsvolumina an den Ober- und Unterseiten der Werkstücke ausgegangen werden.

Die Berechnung von bezogenen Zeitspanungsvolumina stellt eine übliche Vorgehensweise für den Vergleich der Leistungsfähigkeiten unterschiedlicher Prozesse dar. Bei Umfangsschleifverfahren wird das Zeitspanungsvolumen in der Regel auf die Breite des Schleifbelags bezogen. Diese Vorgehensweise ist bei Seitenschleifverfahren nicht sinnvoll, da über dem Radius unterschiedliche Prozessbedingungen auftreten. Besser geeignet ist ein flächenbezogenes Zeitspanungsvolumen

$$Q''_W = \frac{\Delta h_W}{t_c} \cdot \frac{z_W \cdot A_W}{A_S} \quad \left[\frac{\text{mm}^3}{\text{s} \cdot \text{mm}^2}\right], \tag{5-7}$$

welches das Zeitspanungsvolumen auf die gesamte Fläche des Schleifbelags A_S bezieht. Die Beanspruchung der Werkzeugflächen in ihrer ganzen Breite ist durch den Überlauf der Werkstücke über die Scheibenränder hinaus gewährleistet. Die Angabe der Fläche ermöglicht Rückschlüsse auf die Anzahl der insgesamt zur Verfügung stehenden Kornschneiden. Das flächenbezogene Zeitspanungsvolumen kann als das Produkt aus zeitbezogener Teilehöhenreduktion und dem Belegungsfaktor interpretiert werden.

Zur Analyse der physikalischen Vorgänge am einzelnen Korn bei unterschiedlichen Bahngeschwindigkeiten oder Schleifkräften bietet sich die wegbezogene Teilehöhenreduktion

$$h'_W = \frac{\Delta h_W}{s} \quad \left[\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}\right] \tag{5-8}$$

an [Fun94]. Sie beschreibt die Teilehöhe, die ein Werkstück nach einer bestimmten Wegstrecke s relativ zur Schleifscheibe verloren hat. Bei einer makroskopischen Betrachtungsweise kann die wegbezogene Teilehöhenreduktion als Quotient von zeitbezogener Teilehöhenreduktion und mittlerer Bahngeschwindigkeit ermittelt werden. Sie erlaubt Rückschlüsse auf die Zerspanungsbedingungen an der einzelnen Kornschneide.

Bei der doppelseitigen Bearbeitung liegen die geschliffenen Funktionsflächen einer Probe im Rahmen der Ebenheit der Schleifscheiben parallel zueinander. Bei der einseitigen Bearbeitung eines einzelnen Werkstücks ist dagegen nicht unbedingt gewährleistet, dass die geschliffene Fläche auch nach der Bearbeitung noch parallel zur zweiten Fläche ausgerichtet ist. Die Be-

rechnung des Zerspanungsvolumens aus einer Höhenmessung der Werkstücke ist nur bei einer ausreichenden Planparallelität mit geringem Fehler möglich. Aus diesem Grund wurde für die Untersuchungen mit dem Modellversuchsstand die zerspante Werkstückmasse mit einer Waage vom Typ LA620S der Satorius AG, Göttingen, bestimmt. Dieses Gerät besitzt einen Wägebereich von 620 g und eine Genauigkeit von 1 µg. Mit einer Differenzmessung vor und nach der Bearbeitung lässt sich über die Dichte des jeweiligen Werkstoffs das Zerspanungsvolumen berechnen. Zur besseren Übersicht zeigt **Tabelle 5.6** alle Größen, die in den folgenden Kapiteln zur Charakterisierung der Zerspanungsprozesse angewendet werden.

Tabelle 5.6: Größen zur Charakterisierung des Zerspanprozesses

Höhenbezogene Größen	Volumetrische Größen
Teilehöhenreduktion (Aufmaß) $\Delta h_w \quad [\mu m]$	Zerspanungsvolumen $V_w = \Delta h_w \cdot z_w \cdot A_w \quad [mm^3]$
zeitbezogene Teilehöhenreduktion $\Delta \dot{h}_w = \frac{\Delta h_w}{t_c} \quad \left[\frac{\mu m}{s}\right]$	Zeitspanungsvolumen $Q_w = \frac{\Delta h_w \cdot z_w \cdot A_w}{t_c} \quad \left[\frac{mm^3}{s}\right]$
wegbezogene Teilehöhenreduktion $\Delta h'_w = \frac{\Delta h_w}{s} \quad \left[\frac{\mu m}{m}\right]$	flächenbezogenes Zeitspanungsvolumen $Q''_w = \frac{\Delta h_w \cdot z_w \cdot A_w}{t_c \cdot A_S} \quad \left[\frac{mm^3}{s \cdot mm^2}\right]$

5.6.3 Zielgrößen

Die Zielgrößen dienen zur Beurteilung des Arbeitsergebnisses hinsichtlich Qualität und Wirtschaftlichkeit. Zur Erfassung dieser Werte ist erfahrungsgemäß ein großer messtechnischer Aufwand erforderlich.

Oberflächentopografie

Photografische Aufnahmen der bearbeiteten Flächen wurden mit einem Rasterelektronenmikroskop des Typs DSM 950 der Firma Zeiss, Oberkochem, erstellt. Die Probenkammer dieses Mikroskops kann Präparate bis zu einem Durchmesser von 250 mm aufnehmen. Der Messtisch ist in drei Achsen um jeweils 25 mm verschiebbar und ohne Anschlag um 360° drehbar. Er kann zusätzlich von -15° bis + 90° gekippt werden. Bei Hochspannungen von 490 bis $30 \cdot 10^3$ V sind Vergrößerungen zwischen 2 und 200000 möglich. Bei $30 \cdot 10^3$ V beträgt die Auflösung 5 nm. Zum Fotografieren bestehen zwei Möglichkeiten: die schnelle Fotografie aus dem Bildspeicher dauert etwa 7 Sekunden, die Online-Fotografie mit $2048 \cdot 2048$ Bildpunkten wird in 40 bis 500 Sekunden durchgeführt.

Rauheit

Die Analyse der Oberflächengüte erfolgte mit einem modular aufgebauten Mess- und Analysesystem aus der Form Talysurf Instrumentenserie der Firma Rank Taylor Hobson GmbH Precision Industries, Wiesbaden. Kernstück ist eine Laservorschubeinheit, die einen interferometrischen Lasertaster beherbergt und über eine Länge von 120 mm verfahren werden kann. Es wurde ein Taststift von 60 mm Länge mit einem Spitzeradius von 2 µm und einem Spitzenwinkel von 60° verwendet. Das Tastsystem erreicht eine Auflösung von 0,01 µm. Über ein elektronisches Schnittstellenmodul werden die Messwerte in einen PC übertragen, dessen spezielle Software die Auswertung gemäß den aktuellen Normen für Parameter und Filter übernimmt [DIN 4762, DIN 4768].

Nach jedem Experiment wurden drei beliebige Werkstücke aus der Charge gereinigt. Anschließend erfolgte die Messung der gemittelten Rautiefe $R_{Z\,DIN}$ und des arithmetischen Mittenrauwerts R_a. Für jede Einzelmessung wurde gemäß DIN 4768 eine Gesamtmessstrecke von 5,6 mm aus Einzelmessstrecken von 0,8 mm ausgewertet. An jeder Messfläche wurden fünf Einzelmessungen in unterschiedlichen Orientierungen durchgeführt, so dass jeder dargestellte Messwert das arithmetische Mittel aus fünfzehn Einzelmessungen darstellt [Ard98].

Ebenheitsabweichung

Die Ebenheitsfehler der Werkstücke wurden auf einem Gerät des Typs Flattest III der Firma Intop Precision Engineering GdbR, Frickingen, vermessen. Dabei handelt es sich um ein Schräglicht-Interferometer mit pneumatischer Probenzuführung und automatischer Interferenzstreifen-Auswertung. 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 Lichts 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 (**Bild 5.8**). Ein großer Vorteil optischer Messverfahren besteht in der Möglichkeit, unterbrochene Flächen auszuwerten.

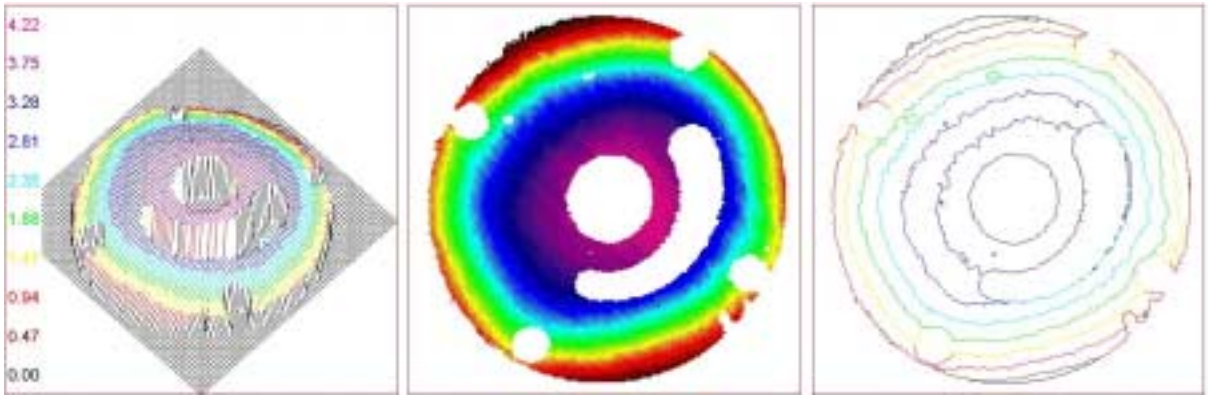


Bild 5.8: Darstellungsarten der Ebenheitsmessung

Höhenstreuung

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 $\overline{h_W}$ einer Charge mit z_W Werkstücken berechnet sich nach

$$\overline{h}_W = \frac{1}{z_W} \sum_{j=1}^{z_W} h_{Wj} \tag{5-9}$$

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 Abweichung der Ist-Höhe von der programmierten Soll-Höhe gehört aus mehreren Gründen nicht zu den Zielgrößen dieser Untersuchung. Zum einen stellt sie mehr ein steuerungs- als ein fertigungstechnisches Problem dar. Zum anderen unterscheiden sich die mittleren Höhen der Chargen aufgrund der mehrmaligen Bearbeitung. Aus diesem Grund werden nicht die absoluten Höhen der Werkstücke, sondern deren Abweichung vom Mittelwert einer Charge angegeben. Die Höhenstreuung S_{hw} einer bearbeiteten Charge ergibt sich dementsprechend nach

$$S_{h_W} = h_{W\,max} - h_{W\,min} \tag{5-10}$$

aus den Höhen des größten und des kleinsten Werkstücks. Sie kann auch als Spannweite der Werkstückhöhen bezeichnet 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.

Schleifverhältnis

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

$$G = \frac{V_W}{V_S} = \frac{V_W}{V_{S_{oben}} + V_{S_{unten}}} \tag{5-11}$$

muss die Definition des Schleifverhältnisses an die besonderen Bedingungen beim Planschleifen mit Planetenkinematik derart angepasst werden, dass das Volumen werkstückseitig an allen Werkstücken einer Charge und werkzeugseitig an beiden Schleifscheiben ermittelt wird. Problematisch wird dies deshalb, weil mit der zur Verfügung stehenden Messtechnik nur der Belag der unteren Schleifscheibe mit vertretbarem Aufwand vermessen werden konnte.

Um festzustellen, welche Anteile der gesamten Teilehöhenreduktion jeweils auf die beiden Schleifscheiben entfallen, wurden im Rahmen einer Versuchsreihe 40 Chargen Benzinpumpendeckel bearbeitet. Die Werkstücke kamen wie in allen Experimenten jeweils für vier aufeinanderfolgende Chargen zum Einsatz. Vor der 17. und der 37. Charge wurde drei genutete Werkstücke in den entsprechenden Chargen verteilt. Die Vermessung der Nuttiefe vor Bearbeitungsbeginn und nach dem Schleifen erlaubt die Bestimmung der Teilehöhenreduktionen an Ober- und Unterseite der Werkstücke.

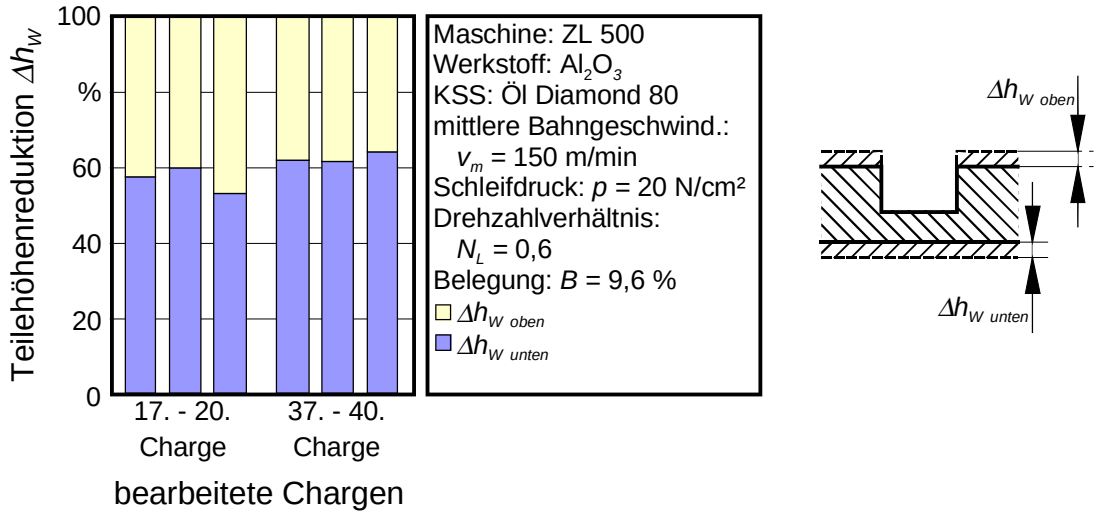


Bild 5.9: Aufteilung der Teilehöhenreduktion auf die Ober- und Unterseite der Werkstücke

Bild 5.9 zeigt die Ergebnisse der Höhenmessungen an den jeweils drei genuteten Werkstücken nach der 20. und nach der 40. bearbeiteten Charge. Es zeigt sich, dass der prozentuale Anteil der an der Werkstückunterseite abgetrennten Teilehöhe nach der 20. bearbeiteten Charge etwa 57 % ausmacht. Nach 40 bearbeiteten Chargen liegt der Anteil mit etwas über 62 % noch höher. Ein Erklärungsansatz für diese Entwicklung fußt auf den unterschiedlichen

Kühlschmierbedingungen, denen beide Schleifscheiben aufgrund der waagerechten Anordnung unterliegen. Möglicherweise wird die Kontaktzone zwischen Werkstücken und der oberen Schleifscheibe nicht ausreichend gekühlt, so dass die Kornschneiden einem stärkeren thermischen Verschleiß unterliegen. Weiterhin fallen alle abgetrennten Späne auf den Belag der unteren Schleifscheibe, wo sie die weitere Werkstoffabtrennung begünstigen oder eine Schärfung des Belags bewirken können.

Im Mittel liegt das Verhältnis zwischen den an der Werkstückober- und Unterseite erzielten Zerspanungsvolumina bei 2/3. Unter der Hypothese, dass das Verschleißvolumen einer Schleifscheibe dem auf ihrem Belag zerspanten Volumen proportional ist, beträgt das Verschleißvolumen der oberen Schleifscheibe 66,67 % des Werts der unteren Schleifscheibe. Das gesamte Verschleißvolumen V_S kann unter dieser Voraussetzung als $1{,}67 \cdot V_{S\,unten}$. ermittelt werden. Aus diesem Grund werden in dieser Arbeit die Werte für das Schleifverhältnis G nach der Gleichung

$$G = \frac{V_W}{1{,}67 \cdot V_{S_{unten}}} \tag{5-12}$$

berechnet.

In Bild 5.9 wird darüber hinaus noch eine weitere Eigenschaft des Planschleifens mit Planetenkinematik deutlich. Die Verteilung der Teilehöhenreduktion auf die Ober- und Unterseite der Werkstücke ist auch innerhalb einer Charge Schwankungen unterworfen. Durch die Wahl der Bearbeitungsparameter, wie der Drehzahlen der oberen und unteren Schleifscheibe, kann diese Verteilung nur bedingt beeinflusst oder vorherbestimmt werden.

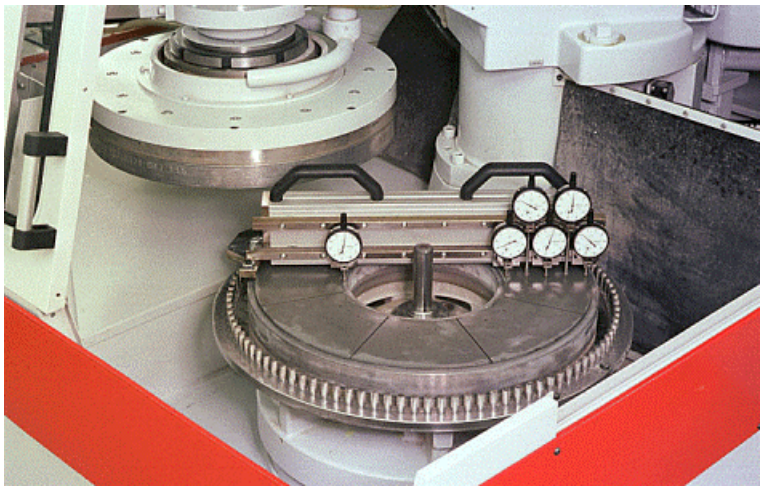


Bild 5.10: Messbrücke zur Erfassung der Profilhöhe des Schleifbelags

Für die Vermessung des Profilverschleißes an der unteren Schleifscheibe kam eine Messbrücke zum Einsatz, welche in **Bild 5.10** zu sehen ist. Diese Brücke besteht aus einem Aluminiumprofil, welches beidseitig radial auf dem äußeren Rand der unteren Schleifscheibe aufge-

legt wird. Durch drei Präzisions-Auflagekugeln und einen an der Schleifscheibe angeschraubten Anschlag ist eine reproduzierbare Positionierung gewährleistet. Diese Messmethode ermöglicht die Berechnung des abgetrennten Schleifkörpervolumens auf der Grundlage von Messungen der Höhe des Schleifbelags vor und nach der Bearbeitung.

Das Aluminiumprofil der Messbrücke trägt sechs Mikrometeruhren vom Typ NO 2110 F der Firma Mitutoyo Messgräte GmbH, Neuss. Diese Uhren besitzen über einem Messbereich von 1 mm eine Genauigkeit von 1 µm. Eine der Uhren ist auf dem inneren Rand der Schleifscheibe angebracht und dient zur Messung der Verformung des Schleifscheibenflansches. Die anderen Messuhren sind im Abstand von jeweils 30 mm über einer Belagshälfte der Schleifscheibe angeordnet. Diese fünf Messpunkte ermöglichen die Ermittlung der Belagshöhe $h_{S\ unten}$ der unteren Schleifscheibe auf fünf Radien.

Vor jedem Arbeitsgang wurden die Uhren mit Hilfe von Endmaßen auf einem Messtisch kalibriert. Messungen vor und nach jeder Versuchsreihe ermöglichen Beurteilungen der Veränderungen am Schleifscheibenprofil ebenso wie die Berechnung des absoluten Verschleißvolumens. Um eine Beeinflussung der Profilmessungen durch die Oberflächenrauheit der Schleifscheibentopographie zu verhindern, wurde ein Ausgleichsblechstreifen der Stärke 50 µm auf den Scheibenbelag unter die Messtaster gelegt. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Profile jeweils an drei um 120 ° versetzten Positionen durchgeführt. Die dargestellten Profile zeigen die arithmetischen Mittelwerte aus diesen drei Messungen.

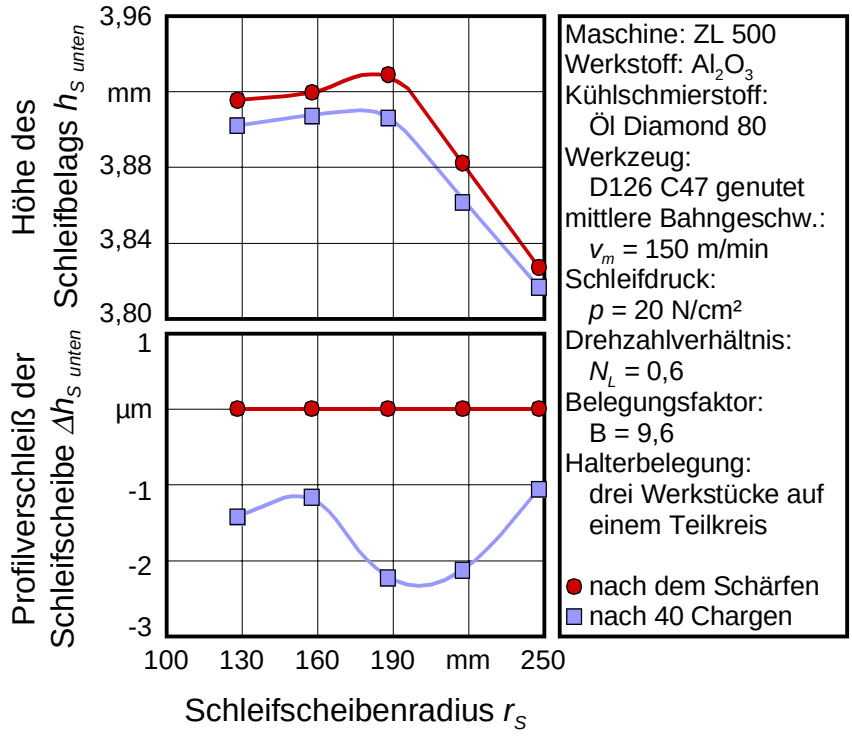


Bild 5.11: Belagshöhe und Profilverschleiß der unteren Schleifscheibe

Das obere Diagramm in **Bild 5.11** zeigt als Beispiel die gemessenen Höhen des Schleifbelags $h_{S\ unten}$ nach dem Schärfen und nach der Bearbeitung von 40 Chargen Benzinpumpendeckeln aus Al_2O_3 über dem Schleifscheibenradius r_S. Deutlich zu erkennen ist ein balliges Profil, das vom Innenrand zur Belagsmitte um einige Mikrometer ansteigt und dann zum Außenrand deutlich abfällt. Die Abweichung des Belagprofils von einer idealen Ebene liegt in beiden Fällen unter 0,1 mm. Die Differenzen zwischen beiden Profilen sind anhand dieser Darstellung nur schwer abschätzbar. Aus diesem Grund sind sie im unteren Diagramm von Bild 5.11 gesondert dargestellt. Der Zustand der Schleifscheibe nach dem Schärfen dient als Basis, auf die Messwerte vom Ende der Versuchsreihe bezogen werden. Die untere Kurve zeigt an, welchem Profilverschleiß $\Delta h_{S\ unten}$ die Schleifscheibe an den fünf Messpunkten unterlag.

Nummeriert man die fünf Messpunkte mit ansteigendem Schleifscheibenradius von 1 bis 5, so kann das Verschleißvolumen der unteren Schleifscheibe nach der Gleichung

$$V_{S_{unten}} = \sum_{i=1}^{4} \pi \left(r_{S_{i+1}}^2 - r_{S_i}^2 \right) \cdot \left[\frac{\Delta h_{S\ unten}\left(r_{S_i}\right) + \Delta h_{S\ unten}\left(r_{S_{i+1}}\right)}{2} \right] \tag{5-13}$$

berechnet werden. **Bild 5.12** dient zur Verdeutlichung dieser Formel: Jeweils zwei nebeneinander liegende Messpunkte i und i + 1 begrenzen ein Ringelement des Schleifbelags mit einem bestimmten Flächeninhalt. Aus den Werten $\Delta h_{S\ unten}(r_{S\ i})$ und $\Delta h_{S\ unten}(r_{S\ i+1})$ für den Profilverschleiß an diesen beiden Punkten wird das arithmetische Mittel gebildet und mit der Fläche des Ringsegments multipliziert. Die Summe der Verschleißvolumina der vier Segmente ergibt das Verschleißvolumen $V_{S\ unten}$.

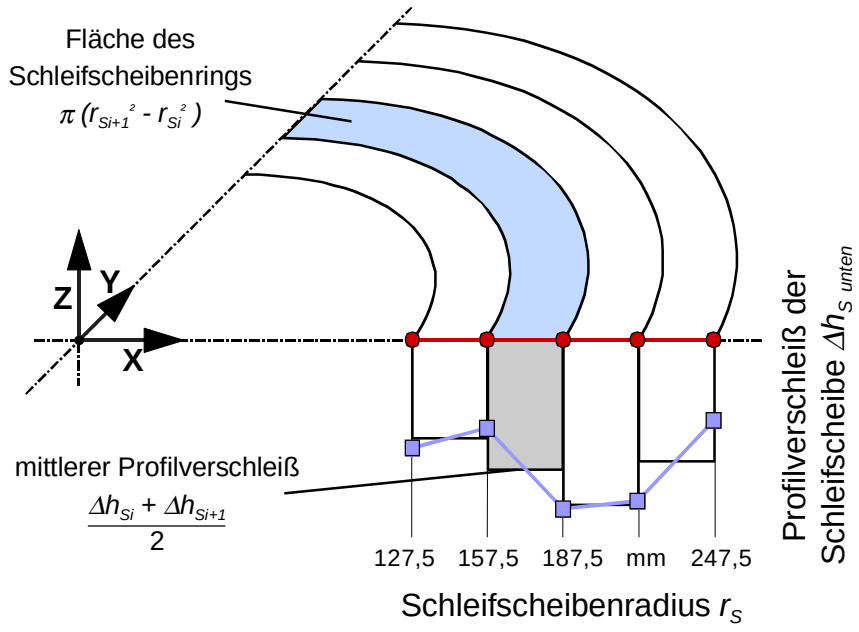


Bild 5.12: Berechnung des Verschleißvolumens der unteren Schleifscheibe

6 VERFAHRENSTYPISCHE WIRK- UND VERSCHLEIßMECHANISMEN

6.1 Allgemeines

Grundlage für die Untersuchung der verfahrenstypischen Wirk- und Verschleißmechanismen sind die Merkmale der planetenkinematischen Bewegungsformen. Mit der Geometrie einer Bahnkurve ändern sich die Verläufe von Bahngeschwindigkeit und -beschleunigung. Weiterhin ändern sich die Winkel, unter denen einzelne Schneidkörner von Werkstücken überfahren werden können. Diese Winkel werden als Kornbelastungswinkel bezeichnet und beeinflussen den Kornverschleiß. Aus der Bahnbewegung und der Anordnung der Werkstücke im Halter resultiert die Schleifscheibenbelastung. Die kinematischen Prozessbedingungen unterliegen mechanischen Zusammenhängen und sind mathematisch beschreibbar.

Die Bewegung der Werkstücke beeinflusst die Verteilung des Kühlschmierstoffs im Arbeitsraum. Auch der Schleifdruck ist nur unter idealen Bedingungen über der Kontaktfläche konstant. Im realen Prozess ergeben sich Gradienten durch die Verformung der Schleifscheiben oder ungleiche Werkstückhöhen. Die lokale Schleifscheibentemperatur hängt von den Zerspanungsbedingungen ab. Diese technologischen Prozessgrößen entziehen sich einer mathematischen Beschreibung ebenso wie einer messtechnischen Erfassung, da die Unzugänglichkeit des Arbeitsraums Messungen während der Bearbeitung verhindert. Aufgrund der großen Anzahl von Werkstücken, die sich zu jedem Zeitpunkt in verschiedenen Stadien des kinematischen Ablaufs befinden, ist die Ermittlung werkstückbezogener Prozesswerte nicht möglich. Es können nur integrale, alle Werkstücke umfassende Messwerte aufgenommen werden. Weitere Unsicherheiten verursachen Wechselwirkungen zwischen beiden Schleifscheiben sowie die unterschiedlichen Bedingungen an den Ober- und Unterseiten der Werkstücke.

Ziel dieses Kapitels ist es, einzelne Merkmale der Bewegungsformen zu isolieren und Rückschlüsse auf die verfahrenstypischen Wirk- und Verschleißmechanismen im realen Prozessverlauf abzuleiten. Dazu dienen Modellversuche, bei denen Werkstücke einseitig auf nur einer Schleifscheibe zum Eingriff kommen. Dabei liegen eindeutige kinematische Bedingungen vor, und Wechselwirkungen mit der zweiten Schleifscheibe sind ausgeschlossen. Diese Modellversuche wurden mit der Versuchsmaschine Duomat ZL 500 durchgeführt. Daher stimmen die Randbedingungen mit denen der Bearbeitungsversuche überein, so dass die Übertragbarkeit der Ergebnisse gewährleistet ist. Schwerpunkte der Untersuchungen sind

- die Schleiftangentialkräfte beim kraftgebundenen Schleifen unter verschiedenen Randbedingungen,
- die aus der Bewegungsform resultierenden Kornbelastungswinkel und deren Einfluss auf den mikroskopischen Kornverschleiß sowie
- der Einfluss der Bewegungsform auf die Teilehöhenreduktion.

6.2 Messung der Schleiftangentialkraft

Die in **Bild 6.1** dargestellte Kraftmessbrücke dient zur Aufnahme der tangentialen Schleifkraft F_t bei der kraftgebundenen Bearbeitung eines einzelnen Werkstücks. Sie besteht aus einem Aluminiumprofil, welches zentrisch in die Versuchsmaschine Duomat ZL 500 eingesetzt wird und an beiden Enden auf dem äußeren Zahnkranz aufliegt. Die Tangentialkraft wird von einem piezokeramischen Kraftaufnehmer über einen Ladungsverstärker an einen PC weitergegeben. Über mehrere kombinierbare Gewichte können Schleifdrücke im Bereich zwischen $p = 2$ und 20 N/cm² aufgebracht werden. Durch Einsetzen eines im Bild nicht dargestellten Axiallagers kann das Werkstück vom Massenträgheitsmoment des Gewichts entkoppelt und eine Eigendrehung ermöglicht werden.

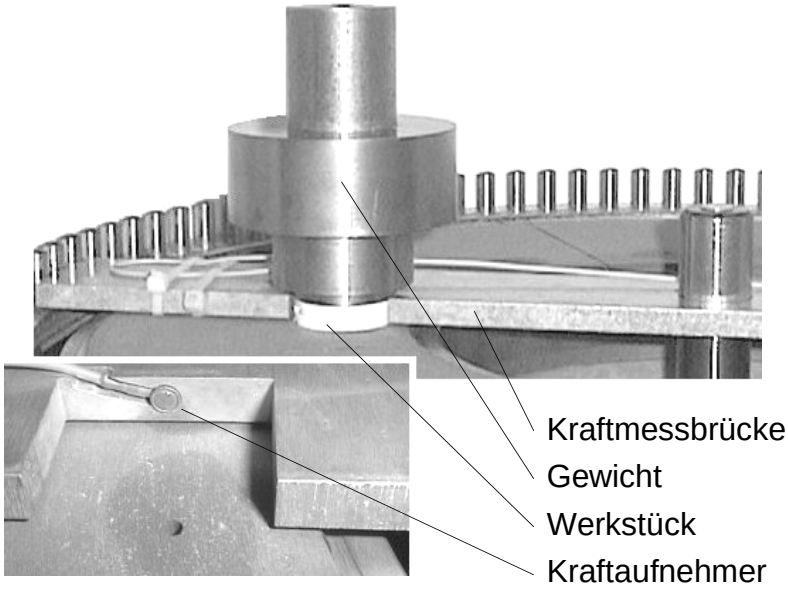


Bild 6.1: Kraftmessbrücke zur Ermittlung der Schleiftangentialkraft

Das Werkstück bewegt sich mit konstanter Bahngeschwindigkeit auf einer Kreisbahn um das Schleifscheibenzentrum. Mit Hilfe der Kraftmessbrücke können bei konstanten kinematischen Bedingungen die Bahngeschwindigkeit, der Schleifdruck und die Kühlschmierbedingungen variiert werden.

Selbstschärfung der Schleifscheiben

Das linke Diagramm in **Bild 6.2** zeigt für die Bearbeitung von Al_2O_3 mit verschiedenen Schleifdrücken den Verlauf der Tangentialkraft F_t über der Schleifzeit t_c. Die Unterbrechungen der einzelnen Kurven bedeuten jeweils einen Wechsel des Versuchswerkstücks. Mit zunehmendem Schleifdruck wurden diese Wechsel in kürzeren Abständen erforderlich. Bei Schleifdrücken von $p = 8$ und 14 N/cm² bleiben die Tangentialkräfte konstant oder nehmen leicht ab. Grundsätzlich zeigen sich nach dem Einsetzen neuer Werkstücke höhere Tangenti-

alkräfte als beim jeweils vorher bearbeiteten Werkstück. Ursache hierfür ist die Bearbeitung der Werkstücke ohne Eigendrehung: die Schleifkörner laufen bei jeder Umdrehung wieder in die selbst erzeugten Schleifspuren an der Werkstückunterseite. Sobald diese Schleifspuren nach wenigen Scheibenumdrehungen ausgeprägt sind, gehen die Tangentialkräfte zurück. Beim geringen Schleifdruck von p = 8 N/cm² zeigt sich mehrmals ein plötzliches Abfallen der Tangentialkraft, das die Ausbildung eines Kühlschmierstofffilms unter der Werkstückfläche anzeigen kann. Bei p = 20 N/cm² ist ein deutlicher Anstieg der Tangentialkräfte mit der Schleifzeit zu erkennen. Dieser Anstieg weist auf ein Selbstschärfen des Schleifbelags durch den Kontakt mit dem Werkstück hin. An dieser Versuchsreihe wird deutlich, dass es einer minimalen Belastung der Schleifkörner bedarf, um einen Selbstschärfeffekt zu erzielen.

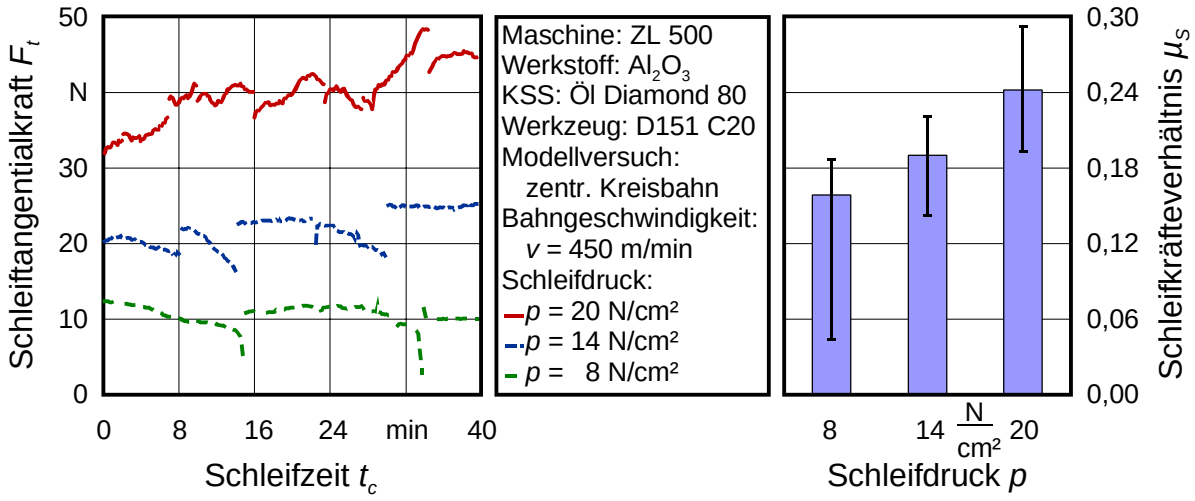


Bild 6.2: Tangentialkraft als Funktion der Schleifzeit und Schleifkräfteverhältnis bei unterschiedlichen Schleifdrücken

Das Balkendiagramm im rechten Teil von Bild 6.2 zeigt die Schleifkräfteverhältnisse μ_S für unterschiedliche Schleifdrücke. Der Wert von μ_S steigt mit dem Druck an. Diese Beobachtung beruht auf zwei Effekten. Zum einen nimmt mit dem Druck die elastische Verformung der Schleifscheibe zu, so dass tiefer liegende Körner zum Eingriff kommen und die Anzahl der aktiven Kornschneiden stiegt. Zum anderen sinkt die Stärke des Kühlschmierstofffilms unter dem Werkstück, so dass der Reibfaktor steigt.

Einfluss von Geschwindigkeit und Normalkraft

Bild 6.3 zeigt die mit der Kraftmessbrücke ermittelten Schleifkräfteverhältnisse μ_S als Funktion der Bahngeschwindigkeit v für unterschiedliche Schleifdrücke p. Die links dargestellten Ergebnisse stammen aus Versuchen ohne Eigendrehung der Werkstücke, bei den rechts dargestellten Werten war eine Eigendrehung möglich. Vor Versuchsbeginn wurde die Oberfläche der Schleifscheibe geschärft. Um den Zustand des Belags möglichst wenig zu beeinflussen, wurden die Werkstücke jeweils nur so lange bearbeitet, dass eine Messung der Tangentialkraft möglich war. Zur statistischen Absicherung wurden alle Messungen dreimal wiederholt.

Bei den Modellversuchen ohne Eigendrehung zeigt sich, wie auch in Bild 6.2, ein deutlicher Anstieg des Schleifkräfteverhältnisses mit dem Schleifdruck, der wiederum auf die ansteigende Zahl aktiver Kornschneiden und die sinkende Stärke des Kühlschmierstofffilms bei zunehmendem Druck zurückzuführen ist. Überlagert wird dieser Effekt durch eine leichte Zunahme des Schleifkräfteverhältnisses mit steigender Bahngeschwindigkeit.

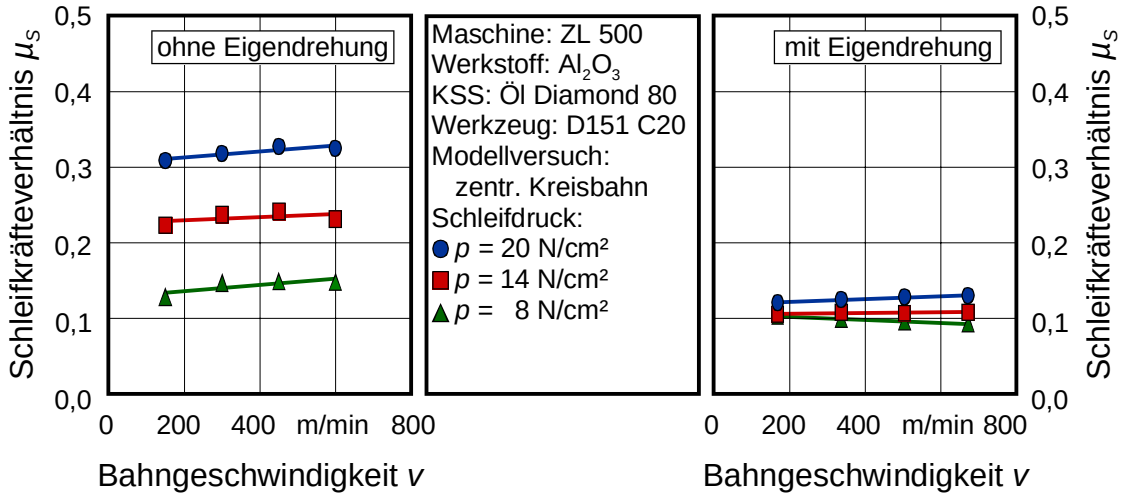


Bild 6.3: Schleifkräfteverhältnis für verschiedene Bahngeschwindigkeiten und Schleifdrücke

Ist die Möglichkeit zur Eigendrehung der Werkstücke gegeben, zeigt sich ein völlig anderes Ergebnis. Hier wirkt sich der Schleifdruck kaum auf das Schleifkräfteverhältnis aus. Die durch Schneidkörner eingebrachte Energie bewirkt eine schnelle Eigendrehung der Werkstücke und eine Minimierung der Schneidvorgänge. Insbesondere das vom Schleifdruck unabhängige Schleifkräfteverhältnis deutet darauf hin, dass sich zwischen Werkstück und Schleifscheibe ein hydrodynamischer Schmierfilm aufbaut, der die Übertragung von Schleiftangentialkräften behindert. In diesem Fall spricht man vom Gleitlager- oder Aquaplaning-Effekt. Das bedeutet, dass im realen Schleifprozess ohne Eigendrehung der Werkstücke insgesamt höhere Zeitspanungsvolumina zu erwarten sind.

Zu diesem Versuch muss angemerkt werden, dass eine Eigendrehung in der hier beobachteten Form nicht reale Schleifprozesse widerspiegelt. Die Werkstücke rotieren zwischen zwei Scheiben nicht mit konstanter Winkelgeschwindigkeit, sondern drehen sich ruckartig und stoßweise. Wie von FUNCK [Fun94] nachgewiesen wurde, wirken zu den Zeitpunkten des Werkstücküberlaufs über den Schleifscheibenrand hinaus besonders große Momente auf die Werkstücke. Während der Modellversuche stellte sich im Gegensatz dazu eine gleichmäßige Rotation mit großer Drehzahl in der gleichen Drehrichtung der Schleifscheibe ein.

6.3 Kornbelastungswinkel

Mit der mathematischen Beschreibung der Relativbewegungen lassen sich neben der makroskopischen Schleifscheibenbelastung auch die Eingriffsverhältnisse am einzelnen

Schneidkorn analysieren. Auch hier wird vorausgesetzt, dass alle Effekte konzentrisch zum Schleifscheibenzentrum auftreten, so dass alle Kornschneiden mit dem gleichen Abstand vom Schleifscheibenzentrum r_S in gleicher Weise belastet werden. Die tatsächliche Belastung eines Schneidkorns resultiert aus dem kornbezogenen Zerspanungsvolumen und den Zerspanungsbedingungen, die die wegbezogene Teilehöhenreduktion, die Richtung und die Relativgeschwindigkeit umfassen. Die Einflüsse von Eingriffstiefe und Relativgeschwindigkeit auf das Verschleißverhalten sind äußerst komplexer Natur, da die Werkstoffeigenschaften von Korn und Bindung sowie die thermischen Wirkungen nicht einzeln quantifizierbar sind. Die Richtungen, unter denen Schneidkörner von Werkstücken kontaktiert werden, lassen sich auf der Grundlage des kinematischen Prozessmodells ermitteln.

6.3.1 Definition des Kornbelastungswinkels

Werkstückpunkte mit verschiedenen Abständen e_H vom Halterzentrum legen unterschiedliche Bahnkurven zurück. **Bild 6.4** zeigt zwei Bahnkurven von Werkstückpunkten mit unterschiedlichen Ausgangspositionen. Beide Kurven überstreichen den Kornlagekreis, der den Abstand r_S des Korns vom Schleifscheibenzentrum kennzeichnet, zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Jeder Werkstückpunkt besitzt im Kontaktpunkt eine Bewegungsrichtung und eine Bahngeschwindigkeit. Da jede Bahnkurve mit beliebigen Geschwindigkeiten zurückgelegt werden kann, ändert sich die Länge der zugehörigen Kornbelastungsvektoren entsprechend. Ihre Richtung bleibt davon aber unberührt. Der Verlauf einer Bahnkurve kehrt sich nach jedem halben Teilzyklus spiegelbildlich um. Aus diesem Grund treten die Kornbelastungsvektoren immer paarweise symmetrisch zur Tangente an den Kornlagekreis auf.

Alle Werkstückpunkte, deren Abstand vom Halterzentrum die Bedingung

$$|a_H - r_S| \leq e_H \tag{6-1}$$

erfüllt, kontaktieren den Kornlagekreis mit dem Radius r_S. Der Betragsausdruck kennzeichnet das paarweise Auftreten aller Vektoren. Für $|a_H - r_S| = e_H$ schneidet die Bahnkurve eines Werkstückpunkts den Kornlagekreis tangential. Die Schnittzeitpunkte einer Bahnkurve mit dem Kornlagekreis werden durch Einsetzen von r_S in Gleichung (4-43) ermittelt. Für einen dieser Zeitpunkte wird der Kornbelastungsvektor bestimmt, der durch die momentane Bahngeschwindigkeit von P_W und durch den Winkel zwischen Bahnkurve und Kornlagekreis im Schnittpunkt definiert ist. Alle Kornbelastungsvektoren dreht man so um das Zentrum der Schleifscheiben, dass ihre Ursprünge im betrachteten Schneidkorn liegen. Das Ergebnis ist eine Schar von Vektoren, die alle Richtungen und Geschwindigkeiten des Kontakts zwischen Werkstücken und dem Schleifkorn repräsentieren. Unter der Einschränkung, dass eine Eigendrehung der Werkstücke in ihren Halteraussparungen ausgeschlossen ist, gleicht die Hüllkurve um die Spitzen aller Vektoren einem Schwalbenschwanzprofil.

Zur Beurteilung der kinematischen Belastung eines Schneidkorns wird der Kornbelastungswinkel κ als der größte auftretende Winkel zwischen zwei Kornbelastungsvektoren definiert.

Bei langgestreckten Bahnkurven entstehen kleine Kornbelastungswinkel im Bereich von wenigen Grad. Bei stark verschlungenen Kurven können Winkel von über 180° auftreten. Die Größe des Winkels hängt von den kinematischen Parametern, dem Kornlageradius und von der Halterbelegung ab.

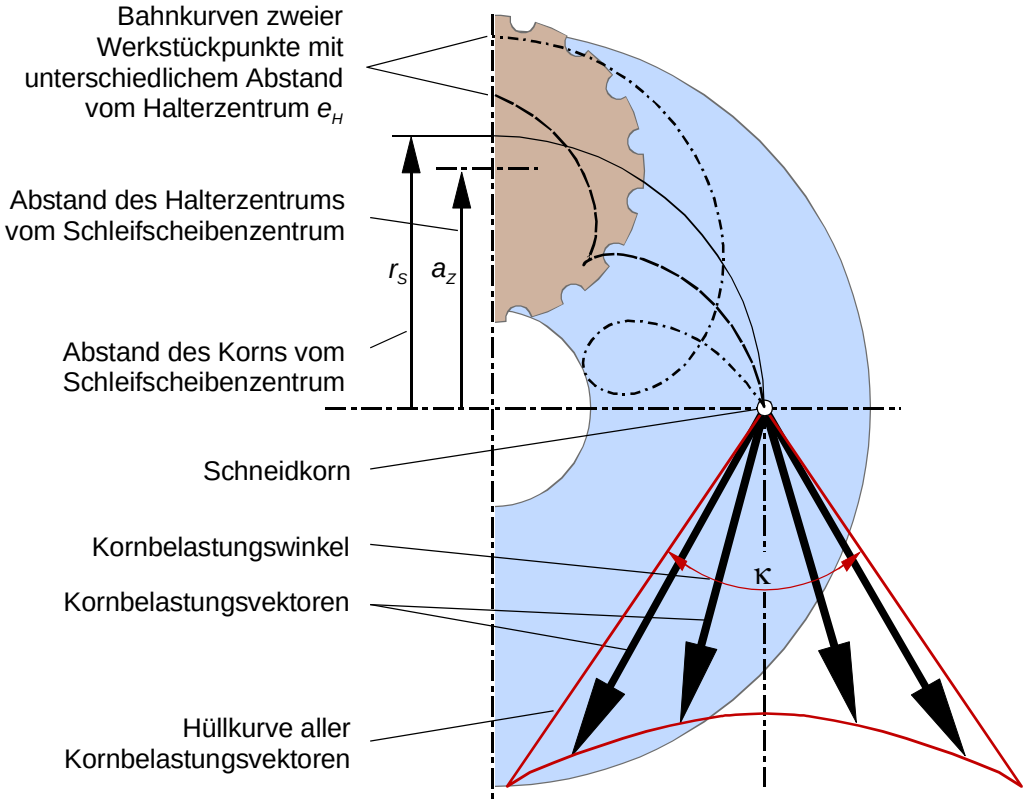


Bild 6.4: Kornbelastungsvektoren und Kornbelastungswinkel am Schneidkorn

6.3.2 Verlauf des Kornbelastungswinkels über dem Drehzahlverhältnis

Bild 6.5 zeigt im kartesischen Koordinatensystem einen Ausschnitt der unteren Schleifscheibe. Für vier Kornlageradien zwischen r_S = 150 und 325 mm sind die Hüllkurven aller Kornbelastungsvektoren und die Kornbelastungswinkel κ dargestellt. Für eine von den absoluten Drehzahlen unabhängige Darstellung wurden alle Geschwindigkeitsvektoren auf die Länge von 100 mm normiert. Der Abstand der Hüllkurve vom Korn entspricht der bezogenen Bahngeschwindigkeit v'. In der Legende sind die Bahnkurven eines Werkstückpunkts skizziert. Beim Drehzahlverhältnis N_L = -2,4 führen alle Werkstückpunkte exzentrische Kreisbahnen um das Schleifscheibenzentrum aus. An diesem Diagramm wird deutlich, dass die Bahnkurven aller Werkstückpunkte bei dieser kinematischen Einstellung mit der gleichen Geschwindigkeit zurückgelegt werden, da alle Geschwindigkeitsvektoren die gleiche Länge besitzen. Die Kornbelastungswinkel sind in der Mitte des Schleifbelags etwas höher als an den Rändern und liegen zwischen 40 und 66°.

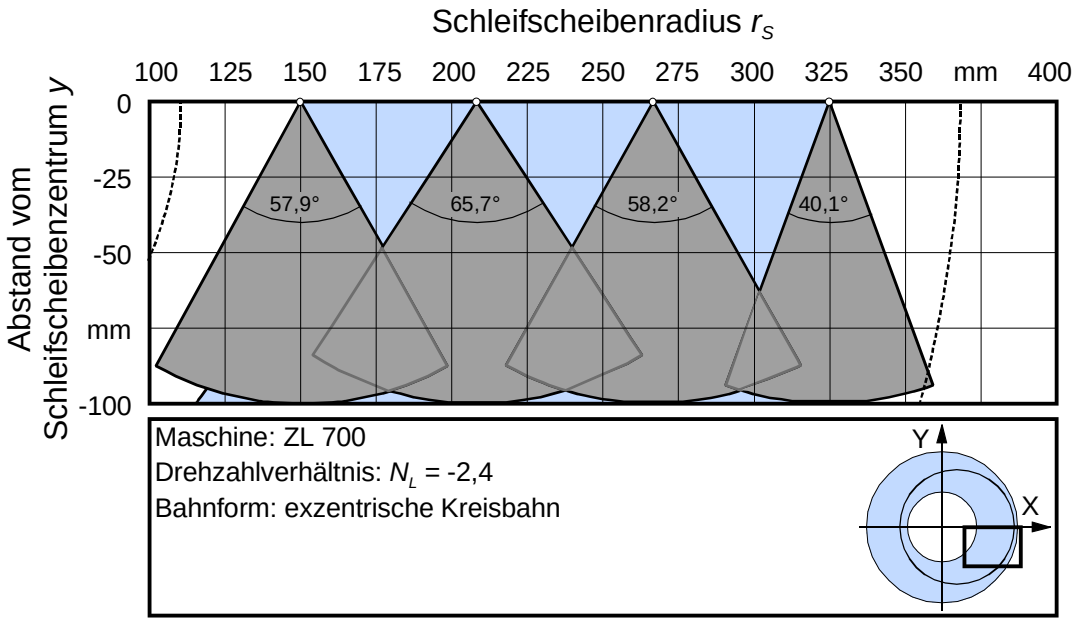


Bild 6.5: Kornbelastungswinkel beim Drehzahlverhältnis N_L = -2,4

In **Bild 6.6** sind für die Geometrie der Versuchsmaschine ZL 700 die Kornbelastungswinkel für vier Kornlageradien r_S eingezeichnet. Die grau hinterlegte Fläche kennzeichnet die bei einem Drehzahlverhältnis N_L auftretenden Kornbelastungswinkel κ. Die kleinsten Kornbelastungswinkel treten auf, wenn die Schneidkörner im Falle zentrischer Kreisbahnen ausschließlich tangential auf die Werkstücke treffen. Mit zunehmendem Betrag des Drehzahlverhältnisses steigen die Kornbelastungswinkel stark an. Der Anstieg ist bei positivem Vorzeichen wesentlich deutlicher ausgeprägt als im negativen Bereich. Hier liegen die Kornbelastungswinkel in Abhängigkeit vom Schleifscheibenradius auch weiter auseinander als im negativen Bereich von N_L. Maximal wird der Kornbelastungswinkel auf einem Schleifscheibenradius dann, wenn der Umkehrpunkt einer gewöhnlichen Epi- oder Hypozykloide in seiner Nähe liegt.

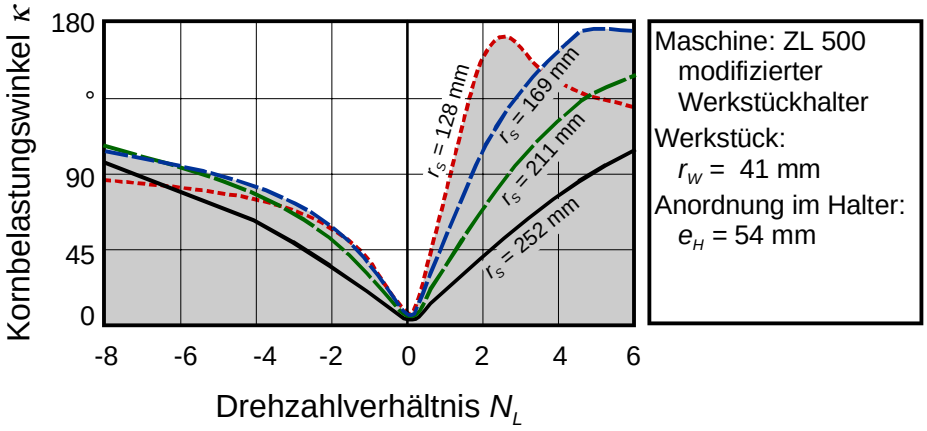


Bild 6.6: Kornbelastungswinkel in Abhängigkeit vom Drehzahlverhältnis

6.3.3 Einfluss des Kornbelastungswinkels auf den Schleifscheibenverschleiß

In **Bild 6.7** sind die Kornbelastungswinkel für das Drehzahlverhältnis N_L = 0,6 zu sehen, bei dem sich die Werkstücke auf gestreckten Epizykloiden um das Schleifscheibenzentrum bewegen. Die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen von Abdrücken der Schleifscheibenoberfläche zeigen die beiden Ränder des Schleifbelags bei Kornlageradien von r_S = 150 und 325 mm. Durch eine ausreichende Schleifzeit wurde sichergestellt, dass die Strukturen von der Bearbeitung stammen und nicht aus dem vorhergehenden Schärfprozess.

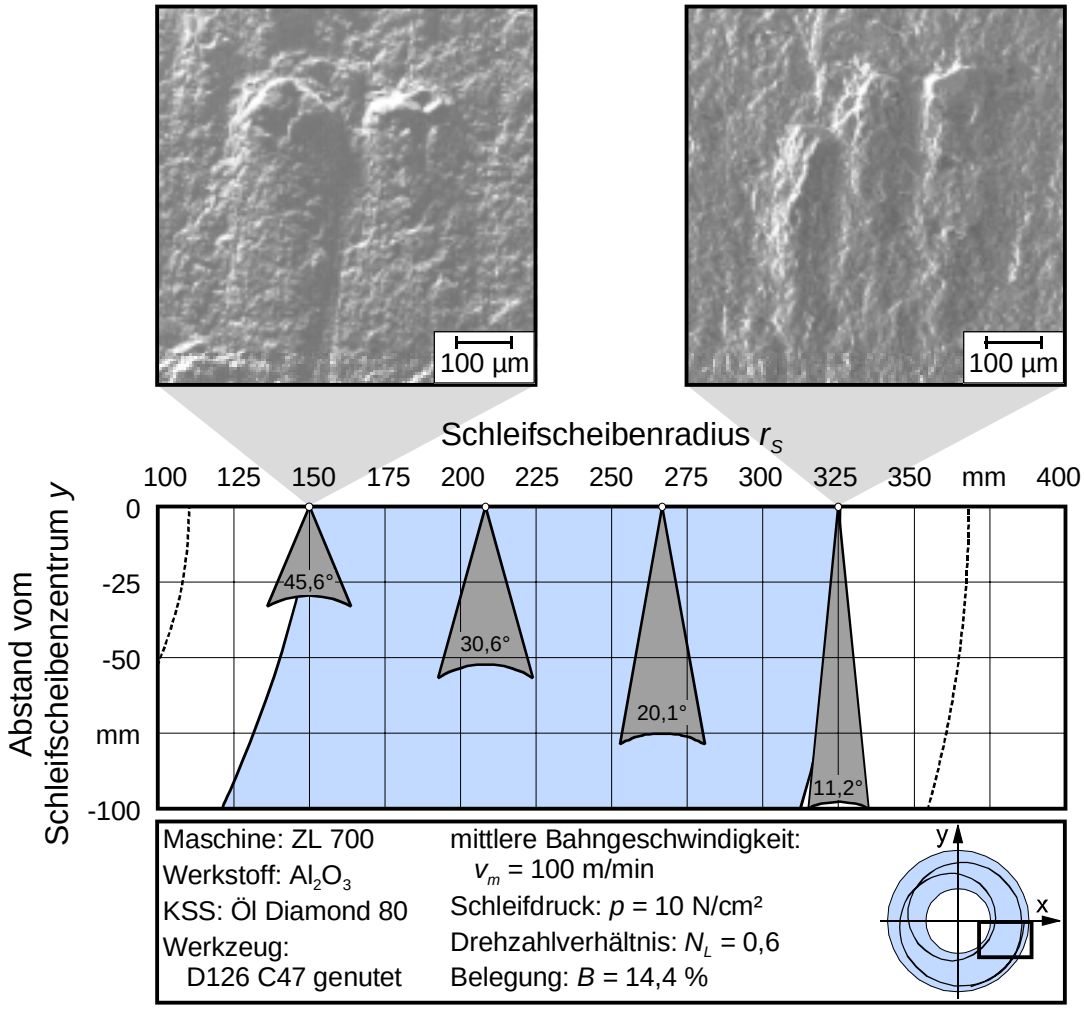


Bild 6.7: Kornbelastungswinkel beim Drehzahlverhältnis von N_L = 0,6

Bei diesen kinematischen Parametern ist die Relativgeschwindigkeit tangential zum Kornlagekreis am geringsten und steigt mit zunehmendem Winkel an. Die Relativgeschwindigkeiten am einzelnen Korn variieren nur wenig. Mit zunehmendem Abstand vom Zentrum der Schleifscheibe steigen die Relativgeschwindigkeiten zwischen Korn und Werkstück linear an. Gleichzeitig nimmt der Kornbelastungswinkel von 45,6° auf 11,2° ab. Diese schmalen Kornbelastungswinkel wirken sich auf den Bindungsverschleiß in der Nähe der Schneidkörner aus. Beide REM-Aufnahmen zeigen Bindungsrücken hinter den Körnern. Ihr maximaler Quer-

schnitt entspricht etwa der Projektionsfläche eines Schneidkorns in Richtung der Relativbewegung. Diese Bindungsrücken können eine Länge von bis zu einem Millimeter erreichen und stützen die Schneidkörner gegen die Belastung durch die Werkstücke ab.

Die stützende und verschleißmindernde Wirkung der Bindungsrücken belegt **Bild 6.8** am Beispiel zweier Versuchsprotokolle. Das linke Diagramm zeigt die Teilehöhenreduktion Δh_W, das rechte Diagramm die Antriebsmomente der unteren Schleifscheibe M_u als Funktion der Schleifzeit t_c. Nach der Bearbeitung von vierzig Chargen einer Versuchsreihe mit konstanten Parametern wurden zur 41. Charge die Drehrichtungen beider Schleifscheiben und des inneren Stiftkranzes umgekehrt, so dass die gleichen kinematischen Bedingungen bei umgekehrter Bewegungsrichtung vorlagen. Bei der vierzigsten Charge zeigte sich nach der Anlaufphase eine lineare Teilehöhenreduktion, bis nach etwa 220 s das gesamte Aufmaß von 500 µm abgeschliffen war. Im Gegensatz dazu zeigte sich nach dem Wechsel der Drehrichtungen zu Beginn der 41. Charge eine schnellere Reduktion der Teilehöhe, die jedoch nach wenigen Sekunden abflachte. Gleichzeitig sanken die Antriebsmomente M_u um etwa 10 % ab. Diese Verläufe deuten darauf hin, dass durch den Richtungswechsel die Bindungsrücken schnell zerstört und viele aktive Körner aus der Bindung gebrochen werden. Dieser Werkzeugverschleiß trägt auch zur gemessenen Teilehöhenreduktion in dieser Prozessphase bei. Anschließend geht das Zeitspanungsvolumen deutlich zurück.

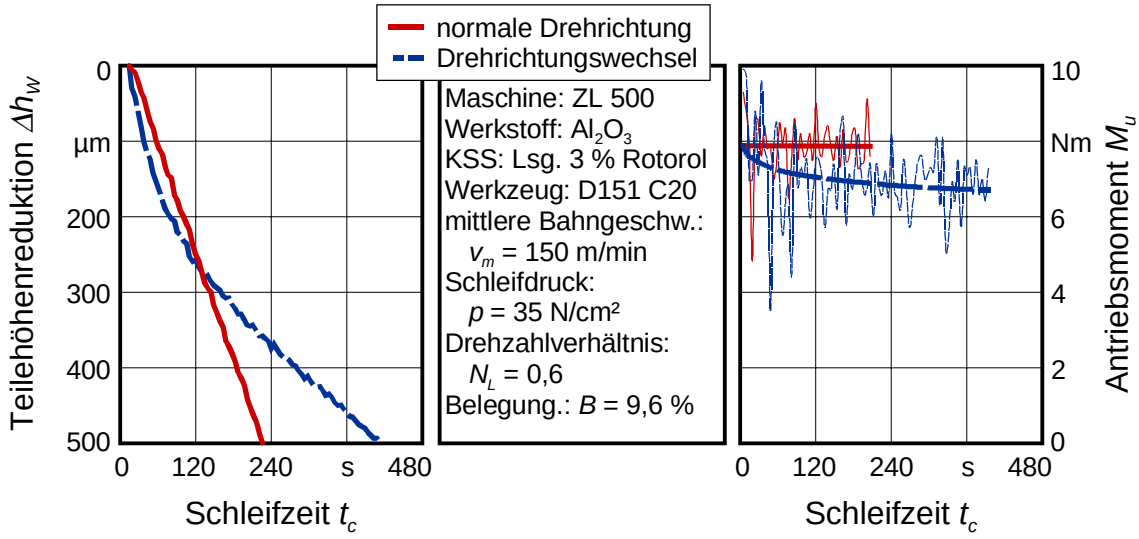


Bild 6.8: Einfluss der Drehrichtung auf den Prozessverlauf

Um die zeitliche Ausprägung des Kornverschleißes zu erfassen, wurden in einem Langzeit-Bearbeitungsversuch Abdrücke am Innen- und Außenrand des Schleifbelags untersucht. Die beiden großen Aufnahmen in **Bild 6.9** zeigen die Oberfläche der Schleifscheibe direkt nach dem Schärfen. Die durch die Schärfsteine erzeugten Riefen sind in unterschiedlicher Richtung in beiden Aufnahmen zu erkennen. Die sechs kleinen Aufnahmen in der unteren Bildreihe zeigen jeweils ein Korn aus der Übersichtsaufnahme stark vergrößert zu Beginn der Versuchsreihe sowie nach Schleifzeiten von t_c = 175 und 405 min.

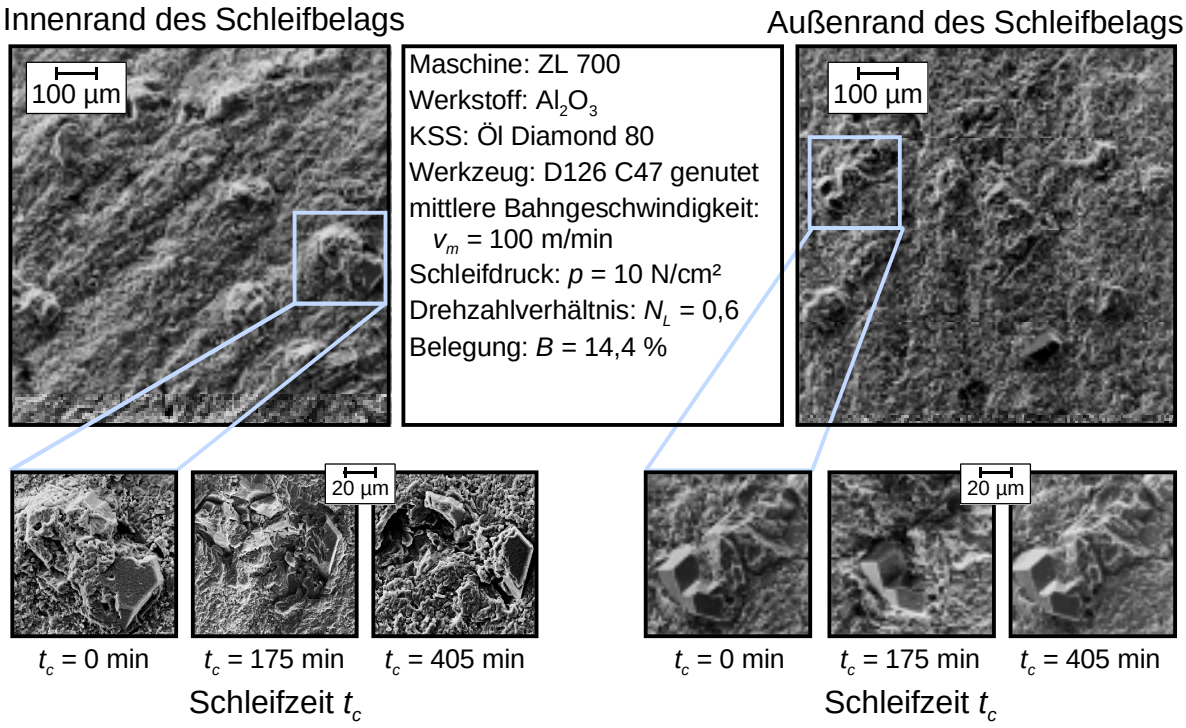


Bild 6.9: Kornverschleiß in Abhängigkeit von der Schleifzeit

Das Korn am Innenrand des Belags steht nach dem Schärfen deutlich über das Höhenniveau der Bindung hervor. Es ist noch teilweise mit Bindungswerkstoff umhüllt, zeigt aber schon klare Kantenumrisse. Nach einer Schleifzeit von t_c = 175 min ist ein großer Teil des Korns ausgebrochen. An seiner Stelle ist ein Ausbruchkrater im Bindungswerkstoff zu erkennen. Der verbliebene Teil des Schneidkorns zeigt nach einer Schleifzeit von 405 Minuten ein ebenes Flächenelement auf seiner Oberseite, was auf thermischen Verschleiß hindeuten könnte. Das Korn am Belagsaußenrand zeigt während der gesamten Bearbeitungsdauer keinerlei Verschleißerscheinungen an den freiliegenden Kanten. Obwohl es schon zu Beginn der Bearbeitung deutlich über das Bindungsniveau hinausragt, scheint es in der gesamten Schleifzeit nicht schneidend in Eingriff zu kommen. Diese Beobachtung entspricht auch der Simulation der Schleifscheibenbelastung in Kapitel 4, nach der die Belastung beim Drehzahlverhältnis von N_L = 0,6 in der Nähe des Innenrands wesentlich höher liegt als am Außenrand.

Diese Bilder verdeutlichen die bessere Ausnutzung der Schneidkörner beim Planschleifen mit Planetenkinematik gegenüber dem Läppen. Bei der konventionellen Läpptechnologie verlassen die einzelnen Körner schon nach kurzer Zeit die Kontaktzone und stehen damit für den weiteren Prozess nicht mehr zur Verfügung.

In **Bild 6.10** sind die Kornbelastungswinkel für das Drehzahlverhältnis N_L = 3,75 dargestellt, bei dem verschlungene Epizykloiden entstehen. Bei dieser Bahnform ändert sich die Bewegungsrichtung der Werkstücke gegenüber dem Schleifscheibenzentrum ständig. Wie in Bild 6.5 sind die Kornbelastungswinkel in der Belagsmitte am größten. Hier werden Kornschneiden in einem Winkelbereich von nahezu 200° von Werkstücken überstrichen. An der Form

der Hüllkurven der Belastungsvektoren ist zu erkennen, dass die einzelnen Körner von Werkstücken mit stark unterschiedlichen Geschwindigkeiten kontaktiert werden. Bei diesen stark verschlungenen Bahnkurven bilden sich keine Bindungsrücken aus. Vielmehr werden die Schneidkörner allseitig freigelegt, und eine bevorzugte Bewegungsrichtung lässt sich auf diesen Bildern nicht erkennen.

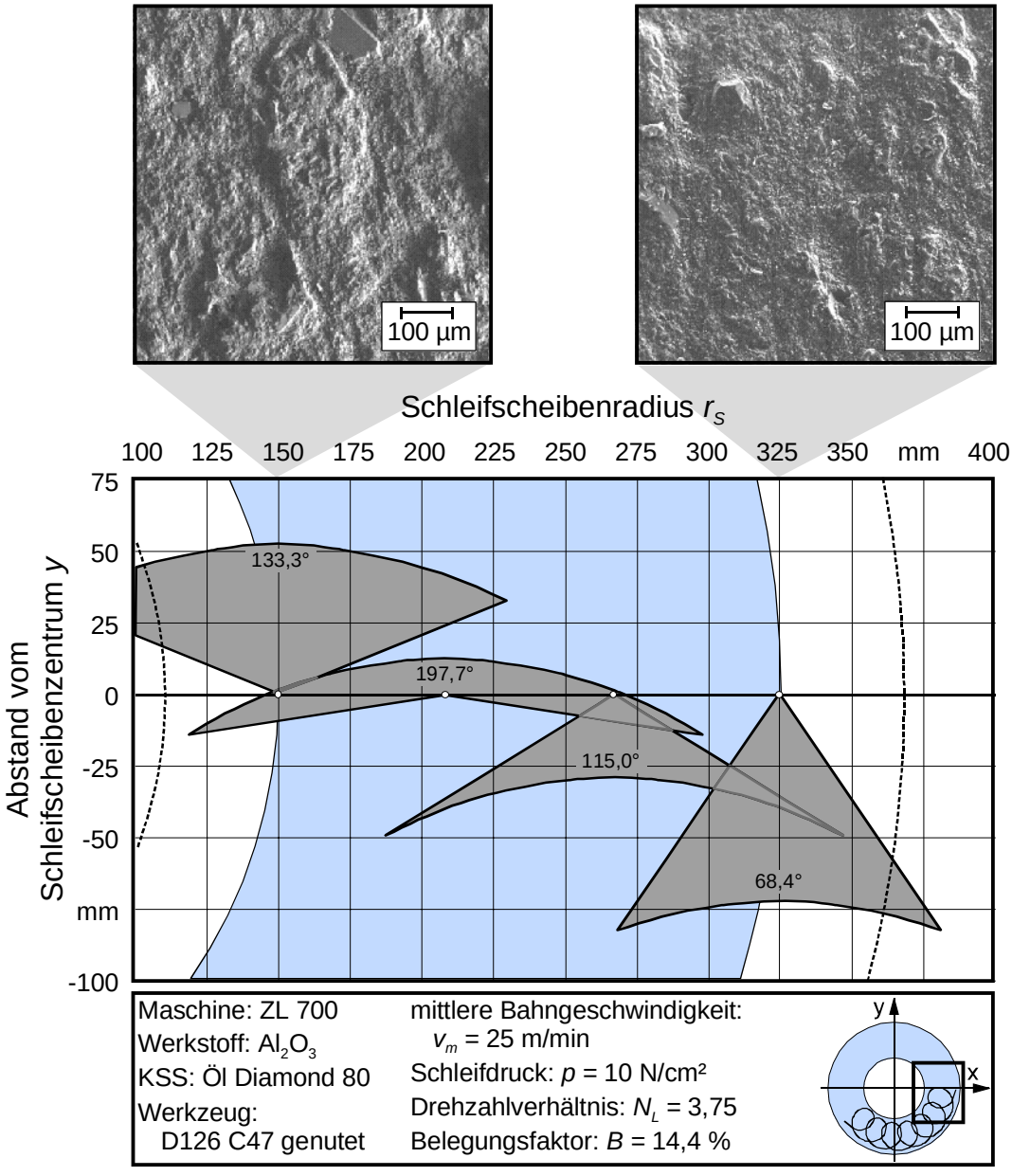


Bild 6.10: Kornbelastungswinkel beim Drehzahlverhältnis von N_L = 3,75

Durch diese großen Kornbelastungswinkel kommen die Werkstücke mit unterschiedlichen Einzelschneiden der Schneidkörner in Kontakt, so dass häufig gute Schnittbedingungen vorliegen. Allerdings ist mit einem hohen Schleifscheibenverschleißvolumen zu rechnen, da die

Körner aufgrund fehlender Bindungsrücken und durch die wechselnden Kraftangriffsrichtungen schnell aus ihrer Bindung gelockert werden und ausbrechen können.

6.4 Einfluss der Bewegungsform auf die Teilehöhenreduktion

Einen zweiten Modellversuchsstand bilden der in **Bild 6.11** dargestellte modifizierte Werkstückhalter und die zugehörigen Auflagegewichte. Auf dem stählernen Werkstückhalter ist zentrisch ein Rohr zur Aufnahme der Gewichte aufgeschraubt. Die Masse der Gewichte ist so bemessen, dass sich beim Schleifen von Benzinpumpendeckeln aus Al_2O_3 ein maximaler Schleifdruck von $p = 20$ N/cm² ergibt. Durch Einlegen von Axiallagern zwischen Werkstücken und Gewichtsauflage ist auch bei diesem Modellversuchsstand eine Eigendrehung der Werkstücke in ihren Halteraussparungen möglich. Zur Bestimmung des Zerspanungsvolumens wurden die Werkstücke jeweils vor und nach der Bearbeitung gewogen. Dieser modifizierte Werkstückhalter ermöglicht die Variation der Bahnbewegung bei konstanter Normalkraft und ohne Wechselwirkungen durch eine zweite Schleifscheibe.

Ziel der Versuchsplanung war es, ein möglichst breites Spektrum an Bahnformen abzudecken. Insgesamt wurden vierzehn verschiedene Drehzahlverhältnisse eingestellt, u. a. die besonderen Bewegungsformen der exzentrischen Kreisbahn, der gewöhnlichen Epizykloiden und der Kreisbahn um das Halterzentrum. Die Schleifzeiten wurden jeweils so festgelegt, dass sich ein konstanter Schleifweg von 50 m ergab. Jeder Versuch wurde zweimal durchgeführt.

Bild 6.11: Modifizierter Werkstückhalter zur Variation der Bahnbewegung bei konstantem Schleifdruck

Bild 6.12 zeigt die wegbezogenen Teilehöhenreduktionen $\Delta h'_W$, die bei der Bearbeitung von Benzinpumpendeckeln mit Hilfe des modifizierten Werkstückhalters bei unterschiedlichen Drehzahlverhältnissen N_L ermittelt wurden. Die quadratischen Markierungen bezeichnen Versuchsreihen ohne, die runden Markierungen solche mit Eigendrehung der Werkstücke. Beide Kurven zeigen auf unterschiedlichen Niveaus fast identische Verläufe. Die absoluten Minima beider Kurven liegen beim Drehzahlverhältnis $N_L = 0{,}1$. Tendenziell steigen die wegbezoge-

nen Teilehöhenreduktionen mit zunehmendem Betrag des Drehzahlverhältnisses unabhängig von dessen Vorzeichen an. Die Verläufe deuten auf einen ursächlichen Zusammenhang zwischen dem Drehzahlverhältnis und der wegbezogenen Teilehöhenreduktion hin.

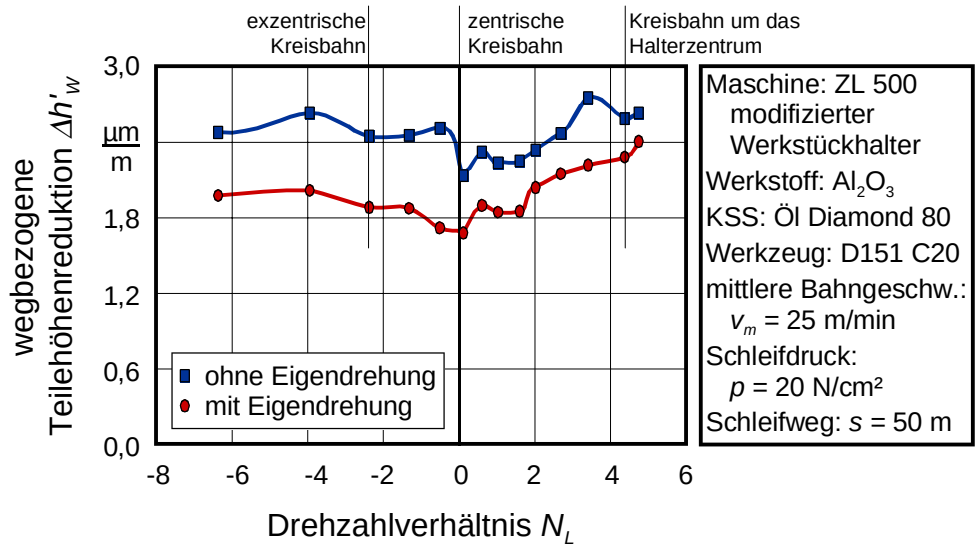


Bild 6.12: Wegbezogene Teilehöhenreduktion in Abhängigkeit vom Drehzahlverhältnis

Ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Bahnform und der Oberflächengüte war nicht feststellbar. Tendenziell zeigen Rauheitsmessungen auf den mit Eigendrehung bearbeiteten Teilen geringere Streuungen als bei Werkstücken, die ohne Eigendrehung geschliffen wurden. Eine deutliche Korrelation besteht zwischen den wegbezogenen Teilehöhenreduktionen und den Kornbelastungswinkeln. Sowohl das absolute Minimum in der Nähe des Nullpunkts als auch die unterschiedlich stark ansteigenden Flanken finden sich in Bild 6.6 wieder. Als Hauptursache für diese Verläufe sind daher die Kornbelastungswinkel anzusehen, die bei den einzelnen Bahnformen auftreten.

Bei zugelassener Eigendrehung der Werkstücke sinken die wegbezogenen Teilehöhenreduktionen um 10 bis 30 % ab. Dieser Effekt hängt mit dem zusätzlichen Freiheitsgrad der Werkstücke im Prozess zusammen: der Eingriff eines Schneidkorns in die Oberfläche verursacht am Werkstück ein Reaktionsmoment. Bei einem fest eingespannten Werkstück wird dieses Moment an den Werkstückhalter weitergegeben, und das Schneidkorn bewegt sich entlang der Bahnkurve relativ zur Werkstückoberfläche. Ist das Werkstück nicht in seiner Halteraussparung fixiert, so wird das Reaktionsmoment nicht vom Werkstückhalter aufgenommen und kann eine Drehbewegung des Werkstücks verursachen. Eine solche Drehung erfolgt in der Regel derart, dass die Kontaktlänge zwischen Schneidkorn und Werkstückoberfläche abnimmt. Das Werkstück versucht also, durch eine Drehung dem Korneingriff auszuweichen. Da im Normalfall viele Körner gleichzeitig im Eingriff sind und sich die kinematischen Bedingungen ständig ändern, erfolgen die Eigendrehungen der Werkstücke spontan und sind nicht vorhersagbar. Sie lassen sich auf bearbeiteten Oberflächen anhand von Schleifspuren mit Wendepunkten oder starken Änderungen der Biegeradien nachweisen.

7 EXPERIMENTELLE PROZESSANALYSE

7.1 Versuchsplanung

Die technologischen Untersuchungen zum Planschleifen mit Planetenkinematik dienen der Analyse von Prozessverlauf und Arbeitsergebnis hinsichtlich der Wirkung wichtiger Einflussparameter. **Bild 7.1** zeigt, welche Einstellparameter im Rahmen der Versuchsreihen variiert wurden. Weiterhin sind die Prozess- und Zielgrößen dargestellt, anhand derer die Charakterisierung des Prozessverlaufs und die Beurteilung der Werkstückqualität erfolgen.

Einstellparameter	Prozessgrößen	Zielgrößen
Werkstoff	Antriebsmomente M_o, M_i, M_u	Mittenrauwert R_a
Kühlschmierstoff	Zerspanleistung	Ebenheitsfehler f_E
Schleifscheibenspezifikation	- zeitbezogene Teilehöhenreduktion $\Delta\dot{h}_W$	Höhenstreuung S_{hw}
mittlere Bahngeschwind. v_m		Zerpanungsvolumen V_W
Schleifdruck p	- wegbezogene Teilehöhenreduktion $\Delta h'_W$	Schleifverhältnis G
Belegung B		
Drehzahlverhältnis N_L	- flächenbezogenes Zeitspanungsvolumen Q''_W	
Haltergeometrie		
Drehrichtung der Oberscheibe		

Bild 7.1: Einstellparameter sowie Prozess- und Zielgrößen der experimentellen Untersuchungen

Im industriellen Einsatz des Planschleifens mit Planetenkinematik ist die Durchführung mehrstufiger Prozesse üblich, bei denen durch Variation der Einstellparameter die drei Phasen Vor-, Schrupp- und Schlichtbearbeitung nacheinander ablaufen. Eine solche Prozessführung eignet sich nicht für eine systematische Prozessanalyse, da keine eindeutigen Zusammenhänge zwischen dem Arbeitsergebnis und den Einstellparametern bestehen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden daher ausschließlich einstufige Bearbeitungszyklen untersucht. Unter Ausschöpfung der technologischen Möglichkeiten der Versuchsmaschine wurden die Einstellparameter in möglichst breiten Bereichen variiert, um Optimierungspotenziale aufzudecken und technologische Grenzen der Leistungssteigerung aufzuzeigen. Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse sind als Basis für die Auslegung mehrstufiger Fertigungsprozesse anzusehen.

Die Untersuchung der Prozess- und Zielgrößen erfolgte für Aluminiumoxid und Siliciumnitrid. Aufgrund der unterschiedlichen Abtrenn- und Verschleißmechanismen mussten die Wertebereiche der Einstellparameter getrennt festgelegt werden. Die konstanten Einstellparameter zeigt der obere Teil von **Tabelle 7.1**. Die variablen Parameter sind für die Bearbeitung beider Werkstoffe getrennt aufgeführt. Die Standardeinstellungen sind durch Fettdruck hervorgehoben. Zusätzlich zu den unten aufgeführten Parameterstufen wurden für Al_2O_3 Versuchsreihen mit Betrieb der beiden Schleifscheiben im Gleichlauf und mit unterschiedlichen Haltergeometrien durchgeführt. Die veränderten Parameter sind in den Ergebnisdiagrammen explizit aufgeführt.

Tabelle 7.1: Einstellparameter der experimentellen Untersuchungen

Konstante und variable Versuchsparameter			
konstant	Teilehöhenreduktion Δh_W	µm	500 bei Al_2O_3; 100 bei Si_3N_4
konstant	Kühlschmierstoff - Volumenstrom - Temperatur	 l/min °C	 10 25
konstant	obere Schleifscheibe		Wellenmutter gelöst (pendelnde Lagerung) Drehzahl wie untere Schleifscheibe, aber entgegengesetzte Drehrichtung
konstant	Schleifscheibentemperatur	°C	25
konstant	Werkstückhalter		5 gleiche Halter in unterschiedlicher Winkellage
Bearbeitung von Al_2O_3			
variabel	Kühlschmierstoff		**Öl Diamond 80**; Lösung Rotorol 6000 (3 %)
variabel	Schleifscheibenspezifikation		D91 C50; **D126 C47 genutet**; D126 C47; D151 C20
variabel	mittlere Bahngeschw. v_m	m/min	75; **150**; 225; 300; 375; 450
variabel	Schleifdruck p	N/cm²	10; **20**; 30; 40
variabel	Drehzahlverhältnis N_L	-	-2,4; -1,3; -0,5; 0,1; **0,6**; 1,0
variabel	Belegung B	%	5,7; **9,6**; 15,3; 19,2
Bearbeitung von Si_3N_4			
variabel	Kühlschmierstoff		Öl Diamond 80; **Lösung Rotorol 6000 (3 %)**
variabel	Schleifscheibenspezifikation		D91 C50; **D126 C47 genutet**; D126 C47; D151 C20
variabel	mittlere Bahngeschw. v_m	m/min	**150**; 300; 450
variabel	Schleifdruck p	N/cm²	40; 60; **80**; 100
variabel	Drehzahlverhältnis N_L	-	-2,4; -1,3; -0,5; 0,1; **0,6**; 1,0
variabel	Belegung B	%	2,5; **5,1**; 7,6

Ziel der experimentellen Untersuchungen war nicht die Optimierung des Arbeitsergebnisses unter verschiedenen Randbedingungen. Vielmehr wurde der Versuchsplan darauf ausgerichtet, den Prozess in einem möglichst breiten Bereich technologischer und kinematischer Parameter zu analysieren. Aus diesem Grund wurden als Ordnungskriterien für die Ergebnisdarstellung nicht die Zielgrößen, sondern die Einstellparameter gewählt. In den Unterkapiteln wird für beide Versuchswerkstoffe der Einfluss der Einstellparameter auf die Prozess- und Zielgrößen beschrieben und diskutiert. Aufgrund der großen Anzahl von Einflussgrößen und möglicher Wechselwirkungen wurden ausschließlich vollfaktorielle Versuche durchgeführt.

Für jede Versuchsreihe wurden 40 Chargen Werkstücke mit den gleichen Einstellparametern bearbeitet. Die Auswertung der Prozessgrößen erfolgte bei Al_2O_3 als Mittelwert über die letzten zwölf Chargen jeder Versuchsreihe. In diesem Bereich verliefen die Prozesse weitgehend stationär. Die Qualitätskenngrößen wurden an drei beliebigen Werkstücken der vierzigsten Charge vermessen. Ein Vergleich von Einzelergebnissen war bei der Bearbeitung von Si_3N_4 aufgrund instationärer Prozessverläufe nur eingeschränkt möglich. Problematisch waren

stark schwankende Bearbeitungszeiten. Bei Schleifzeiten über 15 Minuten wurden die Versuchsreihen abgebrochen. Insbesondere bei sehr kurzen Schleifzeiten sind die dargestellten Werte mit Unsicherheiten behaftet: bei einigen Versuchsreihen war das Aufmaß schon abgetrennt, bevor maschinenseitig die volle Leistung hinsichtlich Normalkraft und Drehzahl erreicht war. Auch statistische Fehler des maschineninternen Höhenmesssystems nehmen bei sehr kurzen Schleifzeiten zu. In den Balkendiagrammen ist daher angegeben, über welche Chargenanzahl die dargestellten Werte gemittelt wurden. Die Rauheiten und Ebenheiten wurden an Werkstücken der 20. Charge einer Versuchsreihe ermittelt.

7.2 Einfluss des Kühlschmierstoffs

Der Auswahl eines geeigneten Kühlschmierstoffs kommt beim Planschleifen mit Planetenkinematik grundlegende Bedeutung zu. In dieser Versuchsreihe wurden ein synthetisches Öl und eine dreiprozentige Lösung zum Schleifen von Al_2O_3 und Si_3N_4 eingesetzt. Der Volumenstrom des Kühlschmierstoffs betrug hier wie bei allen folgenden Versuchsreihen 10 l/min.

Bearbeitung von Al_2O_3

Bild 7.2 zeigt die an den drei Antrieben der Maschine gemessenen Momente M_o, M_i und M_u sowie die flächenbezogenen Zeitspanungsvolumina Q''_W für die Bearbeitung von Al_2O_3 mit unterschiedlichen Kühlschmierstoffen. Die hellen Balken stehen für den Einsatz einer dreiprozentigen Lösung des Konzentrats Rotorol 6000 S, die dunklen Balken repräsentieren die Bearbeitung mit dem synthetischen Schleiföl Diamond 80.

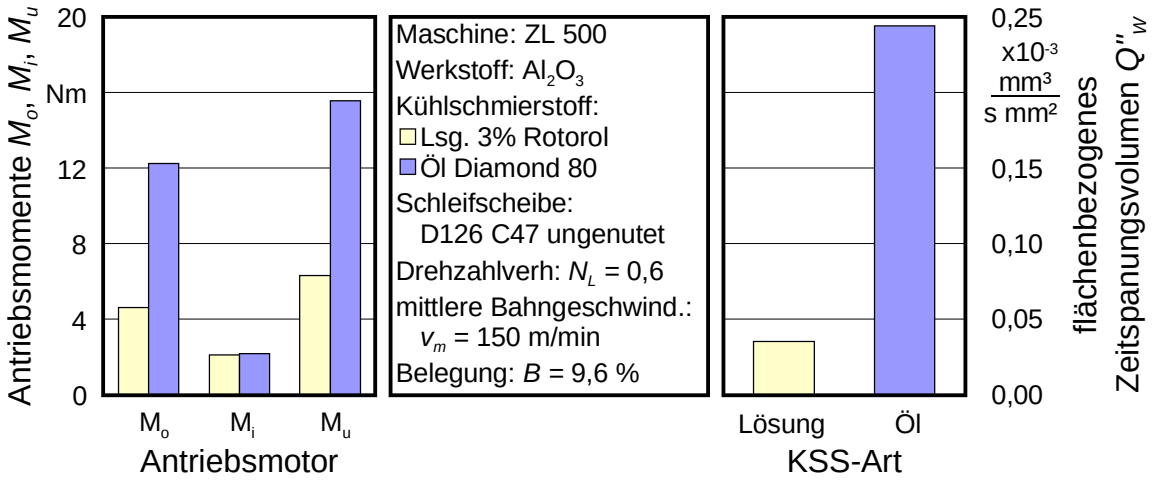


Bild 7.2: Antriebsmomente und flächenbezogenes Zeitspanungsvolumen beim Schleifen von Al_2O_3 mit unterschiedlichen Kühlschmierstoffen

Die Antriebsmomente beider Schleifscheiben liegen unter Verwendung von Öl mit 12 bis 15 Nm mehr als doppelt so hoch wie beim Schleifen mit Lösung. Die Momente am inneren Stiftkranz liegen mit etwas über 2,1 Nm wesentlich niedriger und werden durch die Art der

Kühlschmierung kaum beeinflusst. In beiden Fällen liegen die Messwerte in der Nähe des Leerlaufmoments des Stiftkranzantriebs. Wie das rechte Diagramm von Bild 7.2 zeigt, sind mit Öl im Gegensatz zur Lösung bis zu sechsmal höhere flächenbezogene Zeitspanungsvolumina erreichbar. Diese Beobachtung deckt sich mit Ergebnissen von HASSE [Has89]. Offensichtlich bleibt die Schärfe der Schleifscheibe bei der geringeren Reibung unter Einsatz von Öl länger erhalten. Möglicherweise ist das Öl eher in der Lage, die Zerspanungsprodukte aus der Kontaktzone zu transportieren und die Porenräumen der Schleifscheiben frei zu halten.

Unabhängig von der Art der Kühlschmierung liegen Antriebsmomente der oberen Schleifscheibe jeweils um 20 bis 40 % niedriger als die an der unteren. Dieser Effekt zeigt sich bei fast allen im folgenden Kapitel beschriebenen Experimenten. Bemerkenswert ist dieses Ergebnis, weil die mittlere Bahngeschwindigkeit der Werkstücke relativ zur unteren Schleifscheibe 150 m/min, bezogen auf die obere Schleifscheibe aber 190 m/min beträgt. Daher wäre an der oberen Schleifscheibe ein höheres Zeitspanungsvolumen mit entsprechend höheren Antriebsmomenten zu erwarten. Die Zerspanungsbedingungen beider Schleifscheiben unterscheiden sich dadurch, dass sich die von Werkstücken und Schleifscheiben abgetrennten Partikel und der Kühlschmierstoff auf der unteren Schleifscheibe sammeln. Eine zu geringe Kühlschmierstoffmenge kann zur Folge haben, dass die Reibung zwischen Werkstücken und der oberen Schleifscheibe zunimmt und die Kornschneiden durch thermischen Verschleiß abstumpfen. Als Folge findet zwischen Werkstücken und der oberen Schleifscheibe hauptsächlich Reibarbeit statt. Zusätzlich stellen die Zerspanungsprodukte auf der unteren Schleifscheibe abrasive Elemente dar, die den Zerspanungsprozess aktiv begünstigen oder ein Schärfen der Scheibenfläche bewirken können.

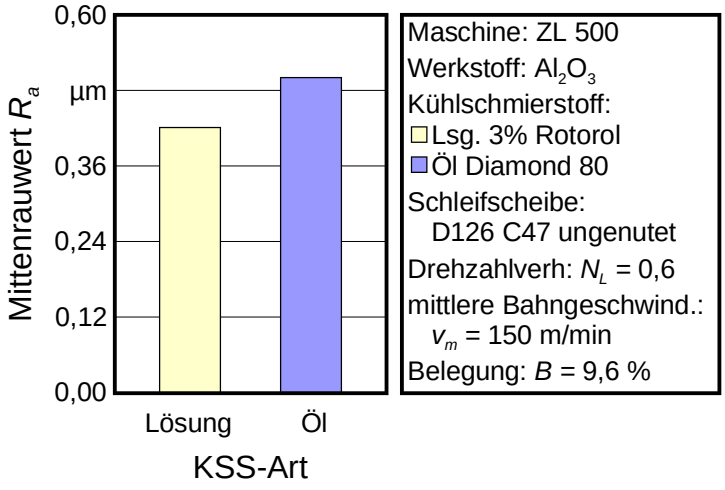


Bild 7.3: Arithmetischer Mittenrauwert von Al_2O_3 nach der Bearbeitung mit unterschiedlichen Kühlschmierstoffen

In **Bild 7.3** sind die arithmetischen Mittenrauwerte R_a dargestellt, die nach der Bearbeitung mit Öl und Lösung an den Al_2O_3-Proben gemessen wurden. In Korrelation zu den flächenbe-

zogenen Zeitspanungsvolumina übertreffen die unter Verwendung der Lösung erzeugten Oberflächengüten geringfügig diejenigen der mit Öl geschliffenen Proben.

Bearbeitung von Si_3N_4

In **Bild 7.4** sind die Antriebsmomente M_u und die flächenbezogenen Zeitspanungsvolumina Q''_W beim Schleifen von Si_3N_4 mit unterschiedlichen Kühlschmierstoffen und Schleifdrücken p dargestellt. Auch hier repräsentieren die hellen Balken die Bearbeitung mit Lösung, die dunklen Balken das Schleifen mit Öl.

Die Antriebsmomente steigen unabhängig vom verwendeten Kühlschmierstoff mit dem Schleifdruck nahezu linear an. Im Gegensatz zur Bearbeitung von Aluminiumoxid liegen die Werte unter Verwendung von Lösung um jeweils etwa 20 % höher als beim Schleifen mit Öl. Dieser Effekt ist auf die geringere Schmierwirkung der wässerigen Lösung und der daher höheren Reibung zwischen Kornschneiden und Werkstückoberflächen zurückzuführen.

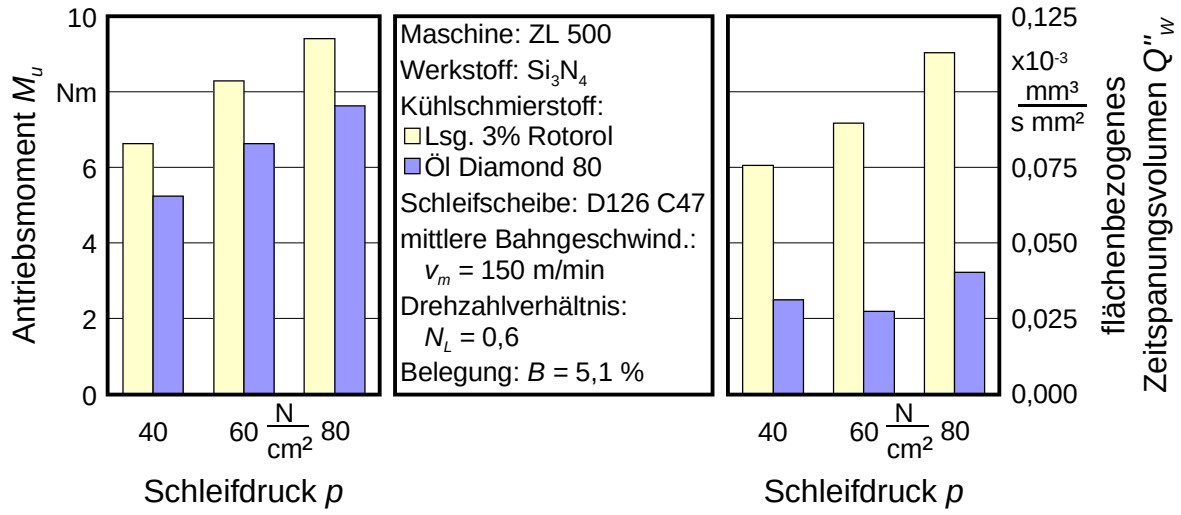


Bild 7.4: Antriebsmoment und flächenbezogenes Zeitspanungsvolumen beim Schleifen von Si_3N_4 mit unterschiedlichen Kühlschmierstoffen und Schleifdrücken

Die erreichbaren Zeitspanungsvolumina liegen bei Si_3N_4 im Vergleich zu Al_2O_3 um etwa zwei Größenordnungen niedriger. Beim Schleifen mit Lösung steigen die flächenbezogenen Zeitspanungsvolumina wie die Antriebsmomente mit dem Druck linear an. Bei Verwendung von synthetischem Öl ist diese Entwicklung nicht zu beobachten. Die erreichten Zeitspanungsvolumina sind für alle Einstellungen sehr niedrig und lassen keine direkte Abhängigkeit vom Schleifdruck erkennen.

Beim Schleifen von Si_3N_4 ist das Abflachen der Schneidkörner als vorherrschender Verschleißmechanismus anzusehen. Unter der Schmierwirkung des Öls gleiten die Körner auf dem Werkstückwerkstoff und erzeugen nur wenige Späne. Beim Schleifen mit Wasser steigt die Reibung zwischen den Wirkpartnern an, so dass auch Kornausbruch und somit eine

Selbstschärfung der Schleifbeläge stattfindet. Aufgrund der hohen Härte des Werkstoffs liegen die arithmetischen Mittenrauwerte wesentlich niedriger als bei Aluminiumoxid. Eine Abhängigkeit von den Stellgrößen wurde in dieser Versuchsreihe nicht nachgewiesen.

Fazit zum Einfluss des Kühlschmierstoffs

Aus den Bearbeitungsergebnissen können für die Auswahl des Kühlschmierstoffs keine allgemeingültigen Hinweise abgeleitet werden. Bei unterschiedlichen Versuchswerkstoffen zeigen die beiden getesteten Kühlschmierstoffe teilweise gegensätzliche Wirkungen bezüglich Prozessverlauf und Arbeitsergebnis, deren Ursachen im Rahmen dieser Arbeit nicht geklärt werden konnten. Erst im Zusammenwirken mit dem Werkstückwerkstoff und den Schleifscheiben kann die Leistungsfähigkeit eines Kühlschmierstoffs beurteilt werden. Infolge der dargestellten Ergebnisse wurde bei allen folgenden Untersuchungen am Werkstoff Al_2O_3 das synthetische Schleiföl Diamond 80 eingesetzt. Bei allen weiteren Schleifversuchen mit Si_3N_4 kam eine dreiprozentigen Lösung des Konzentrats Rotorol 6000 S zur Anwendung.

7.3 Einfluss der Schleifscheibenspezifikation

In einer zweiten Versuchsreihe wurde die Eignung von Schleifscheibenpaaren unterschiedlicher Spezifikation für die Bearbeitung beider Versuchswerkstoffe analysiert. Die kunstharzgebundenen Schleifbeläge unterscheiden sich hinsichtlich der mittleren Diamantkorngröße D und der Diamantkonzentration C. Es kamen vollflächige und radial genutete Beläge zum Einsatz. Bei allen Untersuchungen wiesen obere und untere Schleifscheibe die gleiche Spezifikation auf.

Bearbeitung von Al_2O_3

Bild 7.5 zeigt den Verlauf des flächenbezogenen Zeitspanungsvolumens Q''_W über der Anzahl der bearbeiteten Chargen bei der Bearbeitung von Al_2O_3 mit Schleifscheibenpaaren unterschiedlicher Spezifikation. Alle vier Kurven weisen in ihren Verläufen die gleichen charakteristischen Merkmale auf. Die flächenbezogenen Zeitspanungsvolumina nehmen während der ersten Chargen deutlich ab, pendeln sich aber nach 20 bis 30 Chargen in einem stationären Bereich ein. Die hohen Zeitspanungsvolumina zu Prozessbeginn sind auf das unmittelbar vorausgehende Schärfen der Schleifscheiben zurückzuführen, durch das neben scharfkantigen Kornschneiden auch ein großer Überstand der Schneidkörner über das Bindungsniveau hinaus erzeugt wird. Die exponierten Kornschneiden unterliegen großen mechanischen und thermischen Belastungen und dadurch einem starken Verschleiß. Der Schleifdruck verteilt sich im Laufe des Prozesses auf eine größere Zahl von Einzelschneiden, so dass die Einzelkornkräfte sinken. Damit gehen auch die Spanungstiefen und das Zeitspanungsvolumen zurück.

Im Bereich der letzten zwölf Chargen steigen die flächenbezogenen Zeitspanungsvolumina mit der Korngröße der verwendeten Schleifscheiben an. Mit der Spezifikation D151 C20 wer-

den trotz der geringen Konzentration die größten Zeitspanungsvolumina erreicht. Die geringe flächenspezifische Anzahl von Schneidkörnern ist auch der Grund dafür, dass das anfängliche Abstumpfen bei diesem Schleifscheibenpaar schneller abläuft als bei den Vergleichswerkzeugen und damit der Übergang in den stationären Betrieb früher beginnt. Bei den beiden Scheibenpaaren der Körnung D126 ermöglichen die genuteten Beläge höhere Zeitspanungsvolumina als die vollflächigen Scheiben.

Auch im stationären Bereich treten deutliche Schwankungen der Einzelmessungen um ihren jeweiligen Mittelwert auf. Insbesondere bei den mit der Spezifikation D91 C50 bearbeiteten Chargen zeigen sich die Messwerte oft in Vierergruppen, in deren Verlauf das flächenbezogene Zeitspanungsvolumen deutlich zurückgeht. Ursache hierfür ist die viermalige Bearbeitung der gleichen Werkstückchargen. Aufgrund der nichtprismatischen Geometrie der Benzinpumpendeckel vergrößert sich mit abnehmender Werkstückhöhe die Querschnittsfläche, wodurch der effektive Schleifdruck und das Zeitspanungsvolumen abnehmen.

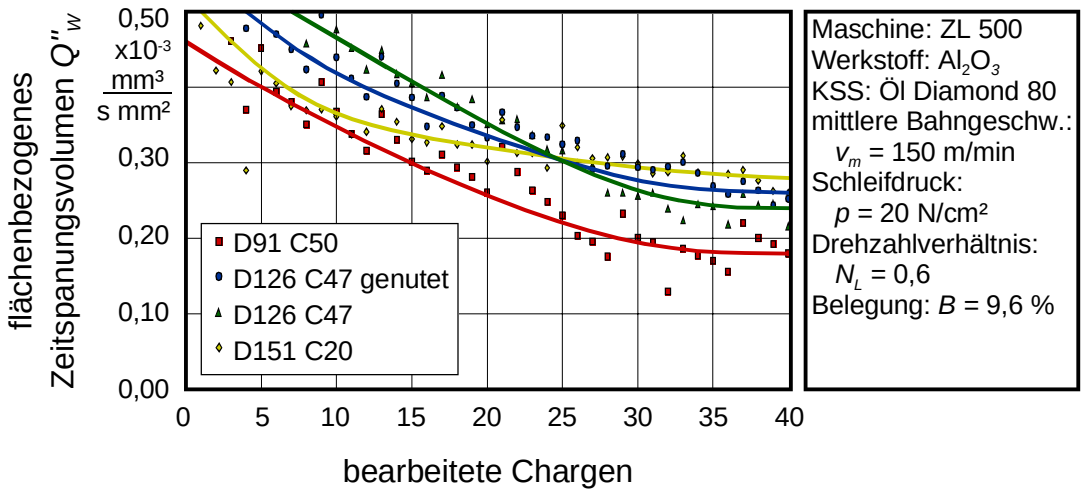


Bild 7.5: Flächenbezogenes Zeitspanungsvolumen über der Anzahl der bearbeiteten Chargen bei der Bearbeitung von Al_2O_3 mit unterschiedlichen Schleifscheibenspezifikationen

In **Bild 7.6** sind die arithmetischen Mittenrauwerte R_a und die Ebenheitsfehler f_E von Al_2O_3-Benzinpumpendeckeln nach der Bearbeitung mit unterschiedlichen Schleifscheibenpaaren dargestellt. Die im linken Diagramm dargestellten Rauheiten nehmen mit der Korngröße der verwendeten Schleifscheiben zu. Die Bearbeitung mit genuteten Schleifbelägen zeigt im Vergleich zum Schleifen mit vollflächigen Schleifscheiben keine erwähnenswerte Auswirkung. Anders sieht das Ergebnis bezüglich des Ebenheitsfehlers aus. Hier zeigt das genutete Scheibenpaar mit $f_E = 2{,}7$ µm um etwa 40 % schlechtere Werte als die vollflächigen Werkzeuge, die unabhängig von der Spezifikation nahezu gleiche Ebenheitswerte liefern. Bei den mit der Spezifikation D151 bearbeiteten Werkstücken reichte die Reflektion der Oberflächen für die Ebenheitsvermessung nicht aus.

Bild 7.7 zeigt den Profilverschleiß $\Delta h_{S\,unten}$ der vier unteren Schleifscheiben gegenüber dem Ausgangszustand. Hier zeigen die Spezifikationen signifikante Unterschiede. Während bei

den Schleifscheiben der Paare D91 C50 und D126 C47 genutet jeweils ein Verschleißmaximum etwa in der Mitte des Belags zu erkennen ist, zeigen die beiden anderen Spezifikationen grundsätzlich andere Profile. Hier sind jeweils am Außen- bzw. am Innenrand des Schleifbelags die größten Beanspruchungen zu verzeichnen. Aus kinematischer Sichtweise ist die Belastung der vier Schleifbeläge gleich. Trotzdem zeigen die dargestellten Verschleißprofile völlig unterschiedliche Formen. Dieses Ergebnis bestätigt die in Kapitel 4 aufgestellte Hypothese, dass aufgrund von Wechselwirkungen zwischen oberer und unterer Schleifscheibe die Vorhersage von Verschleißprofilen bei der Zweischeibenbearbeitung nicht möglich ist.

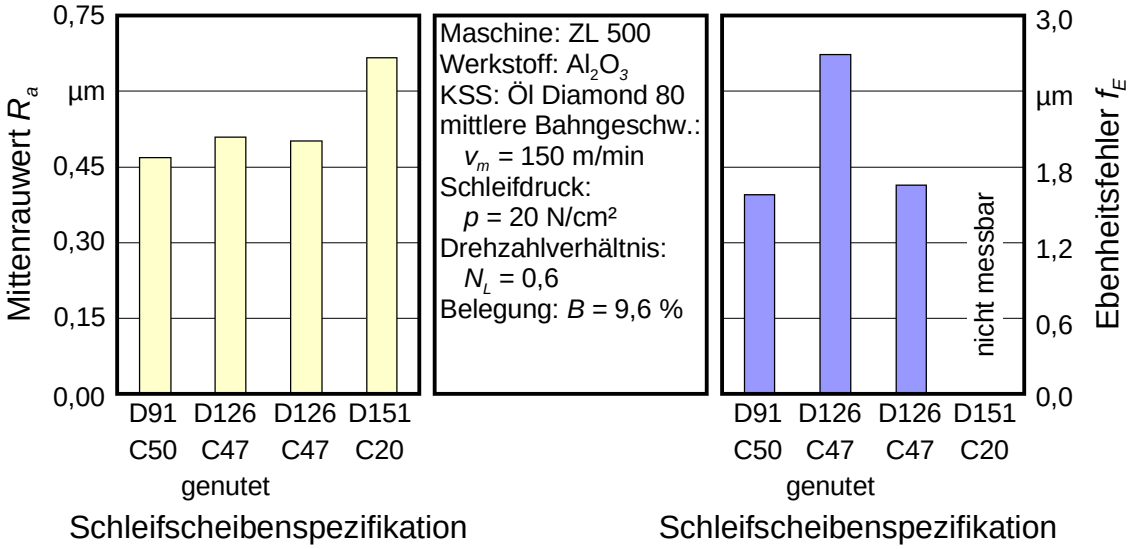


Bild 7.6: Arithmetischer Mittenrauwert und Ebenheitsfehler von Al_2O_3 nach der Bearbeitung mit unterschiedlichen Schleifscheibenpaaren

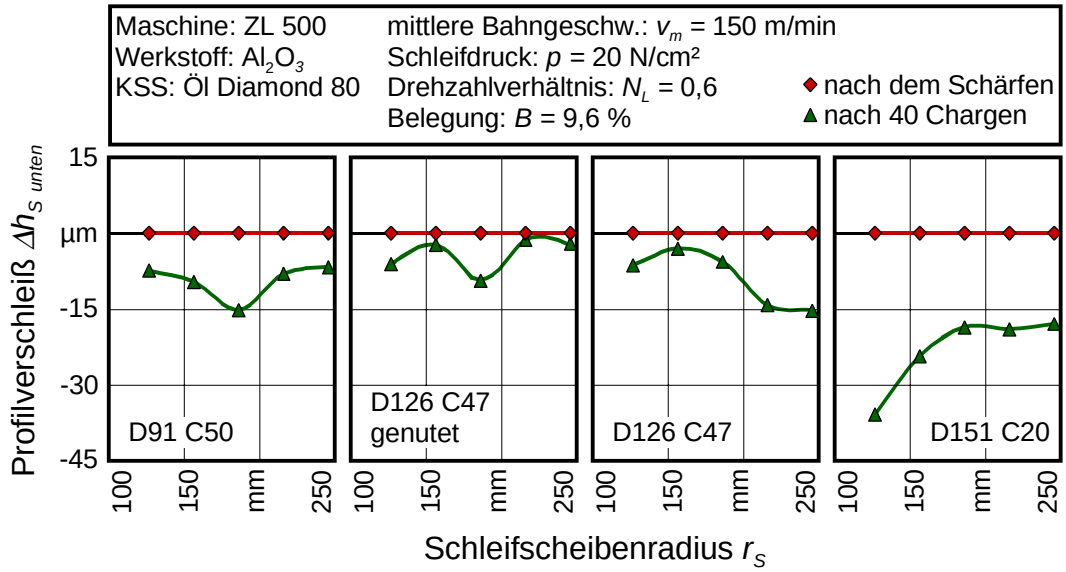


Bild 7.7: Profilverschleiß der vier unteren Schleifscheiben nach der Bearbeitung von 40 Chargen Benzinpumpendeckeln aus Al_2O_3

Das Balkendiagramm in **Bild 7.8** stellt die Schleifverhältnisse *G* für diese Versuchsreihe dar. Das Schleifscheibenpaar der Spezifikation D91 C50 weist ein Schleifverhältnis von *G* = 108 auf. Das ungenutete Paar der Spezifikation D126 C47 erreicht mit *G* = 112 einen geringfügig höheren Wert. Fast doppelt so ergiebig zeigt sich mit einem Wert von 222 das genutete Scheibenpaar der Korngröße D126. Der Scheibensatz mit der größten Körnung weist mit G = 41 das geringste Schleifverhältnis auf. Dieser niedrige Wert ist auf die geringe Kornkonzentration im Schleifbelag dieses Scheibensatzes zurückzuführen.

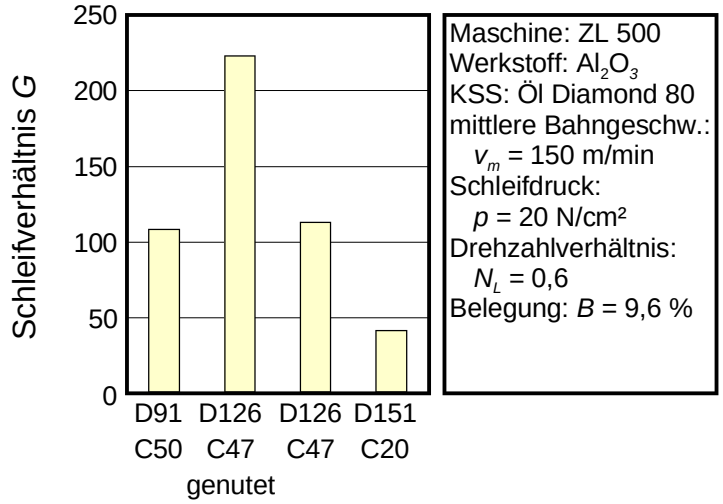


Bild 7.8: Schleifverhältnis nach der Bearbeitung von 40 Chargen Benzinpumpendeckeln aus Al_2O_3

Nach dem Schärfen der Schleifscheiben ist der Überstand der Körner über das Bindungsniveau besonders hoch. Daher entstehen zu Prozessbeginn überproportional hohe Verschleißvolumina. Im industriellen Einsatz des Verfahrens mit der Bearbeitung wesentlich größerer Stückzahlen sind daher bei allen untersuchten Schleifscheibenspezifikationen wesentlich günstigere Verschleißverhältnisse zu erwarten.

Bearbeitung von Si_3N_4

Das Balkendiagramm im linken Teil von **Bild 7.9** zeigt die Antriebsmomente M_u für die Bearbeitung von Si_3N_4 mit Schleifscheiben unterschiedlicher Spezifikation. Die erforderliche Antriebsleistung sinkt mit zunehmender Korngröße und abnehmender Kornkonzentration ab. Dieses Ergebnis ist auf die abnehmende Anzahl aktiver Schneiden in der Kontaktzone zurückzuführen.

Das Punktdiagramm im rechten Teil von Bild 7.9 zeigt die Schleifzeit t_c für die Abtrennung eines Aufmasses von 100 µm mit unterschiedlichen Schleifscheiben über dem Zerspanungsvolumen V_W. Wie beim Schleifen von Al_2O_3 gehen die Zeitspanungsvolumina im Verlauf der ersten Chargen deutlich zurück, was sich in einer Zunahme der Schleifzeit t_c zeigt. Im weiteren Verlauf der Bearbeitung steigen die Schleifzeiten aber nicht monoton an, sondern unterliegen starken Schwankungen. Auch die Werkstücke aus Si_3N_4 wurden mehrfach bearbeitet.

Bei einem Aufmaß von jeweils 100 µm pro Bearbeitungsgang wurden dieselben Chargen 10 bis 20 Mal geschliffen. Insbesondere nach dem Wechsel der Teilechargen zeigen sich unabhängig von der Spezifikation des Schleifscheibenpaares signifikante Verkürzungen der Schleifzeiten. Der Anstieg der Schleifzeit erfolgt jedoch nach jedem Chargenwechsel schneller, so dass sich für alle Versuchsreihen sägezahnförmig ansteigende Kurven ergeben.

Beim genuteten Schleifscheibenpaar D126 C47 geht die Schleifzeit im Verlauf der letzten Chargen deutlich zurück. Hier wurde die Werkstückcharge nicht gewechselt. Daher muss der Grund für die Beobachtung eine spontan eingetretene Selbstschärfung der Schleifbeläge sein. Da ein solcher Effekt bei keinem anderen Werkzeugpaar auftrat, liegt der Schluss nahe, dass eine Nutung der Beläge eine Selbstschärfung begünstigt. Diese Annahme wird zusätzlich durch die Tatsache gestützt, dass das genutete Scheibenpaar deutlich höhere Antriebsmomente als das ungenutete Paar gleicher Spezifikation zeigt.

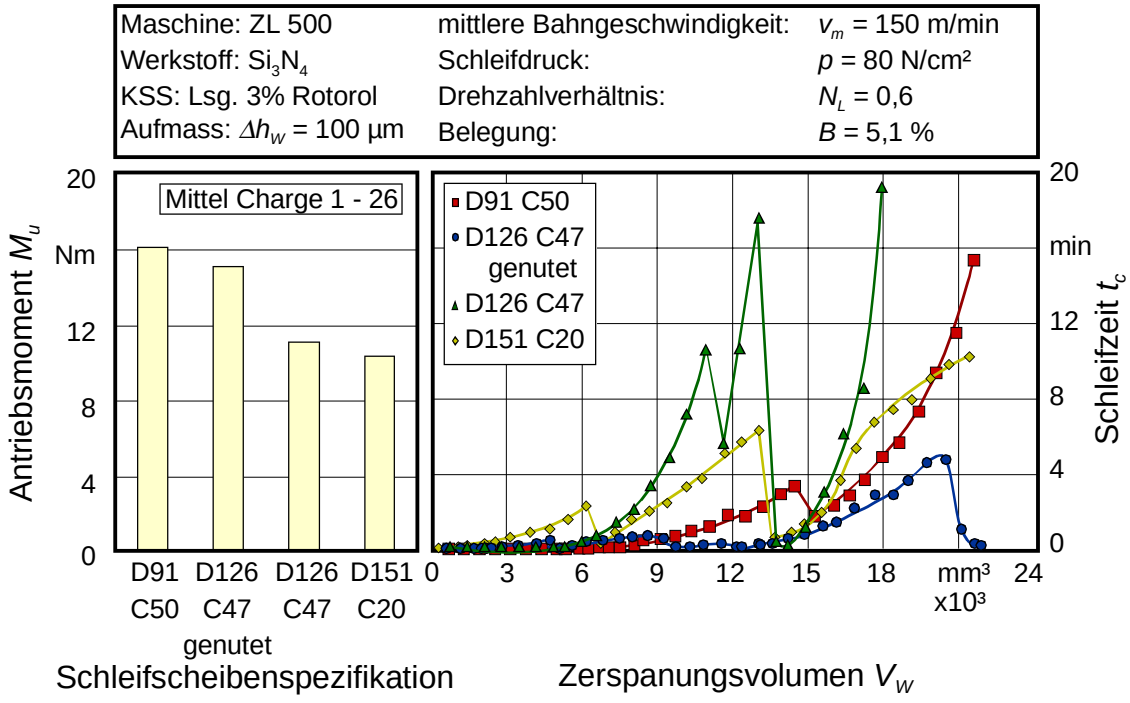


Bild 7.9: Antriebsmoment und Verlauf der Schleifzeit über der Anzahl der bearbeiteten Chargen bei der Bearbeitung von Si_3N_4 mit Schleifscheibenpaaren unterschiedlicher Spezifikation

In **Bild 7.10** sind die arithmetischen Mittenrauwerte R_a dargestellt, die an Werkstücken der jeweils 20. Charge gemessen wurden. Aufgrund der großen Härte des Werkstoffs liegen die Rauheiten insgesamt wesentlich niedriger als bei Aluminiumoxid. Die qualitative Abhängigkeit von der Korngröße der Schleifscheibenspezifikation ist jedoch identisch.

Bezüglich der Schleifverhältnisse machen sich die Werkstoffeigenschaften von Siliciumnitrid besonders bemerkbar: die Werte liegen insgesamt eine Größenordnung niedriger als bei Al_2O_3. So beträgt das G-Verhältnis mit dem genuteten Schleifscheibensatz der Spezifikation D126 C47, der sich wiederum als der ergiebigste zeigt, nur G = 12,5. Das Schleifscheibenpaar

D91 C50 erreicht einen *G*-Wert von 9, und bei den beiden anderen Spezifikationen liegen die Werte zwischen 4 und 5.

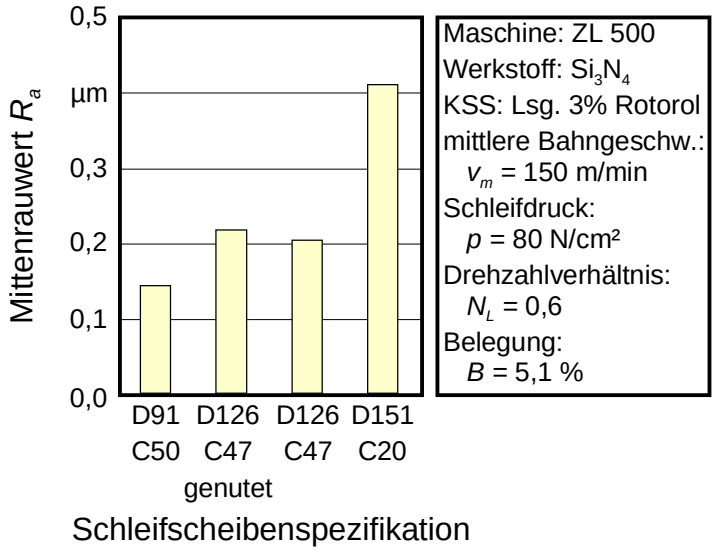


Bild 7.10: Arithmetischer Mittenrauwert von Si_3N_4 nach der Bearbeitung von zwanzig Chargen mit unterschiedlichen Schleifscheibenpaaren

Fazit zum Einfluss der Schleifscheibenspezifikation

Insgesamt zeigen die in dieser Versuchsreihe erarbeiteten Ergebnisse, dass der Auswahl der Schleifscheibenspezifikation hinsichtlich aller Prozess- und Qualitätskenngrößen eine maßgebliche Bedeutung zukommt. Während das Zeitspanungsvolumen und die Rauheit der erzeugten Oberflächen vorwiegend von der Kornspezifikation der Schleifbeläge abhängen, scheinen die Ebenheitsfehler und die Schleifverhältnisse durch die makroskopische Belagsgeometrie, also die Nuten, beeinflusst zu werden.

7.4 Einfluss der Bahngeschwindigkeit

In dieser Versuchsreihe wurden mittlere Bahngeschwindigkeiten im Bereich zwischen 75 und 450 m/min eingestellt. Beim gewählten Drehzahlverhältnis von $N_L = 0{,}6$ variiert die momentane Bahngeschwindigkeit eines Werkstückmittelpunkts in jedem Teilzyklus im Bereich zwischen 55 und 135 % der mittleren Bahngeschwindigkeit. Damit betragen die maximalen Relativgeschwindigkeiten zwischen Werkstücken und Schleifscheiben bei $v_m = 450$ m/min mehr als 600 m/min. Die für diese Relativgeschwindigkeit erforderlichen Drehzahlen betragen $n_i = 258\ \text{min}^{-1}$ am inneren Stiftkranz und $n_u = 423\ \text{min}^{-1}$ an der unteren Schleifscheibe.

Bearbeitung von Al_2O_3

Bild 7.11 zeigt den Prozessverlauf bei der Bearbeitung von Al_2O_3 mit unterschiedlichen mittleren Bahngeschwindigkeiten v_m. An der linken Koordinate des Diagramms ist in hellen Balken die zeitbezogene Teilehöhenreduktion $\Delta \dot{h}_W$ dargestellt. Die dunklen Balken beziehen sich auf die rechte Koordinate und repräsentieren die wegbezogene Teilehöhenreduktion $\Delta h'_W$.

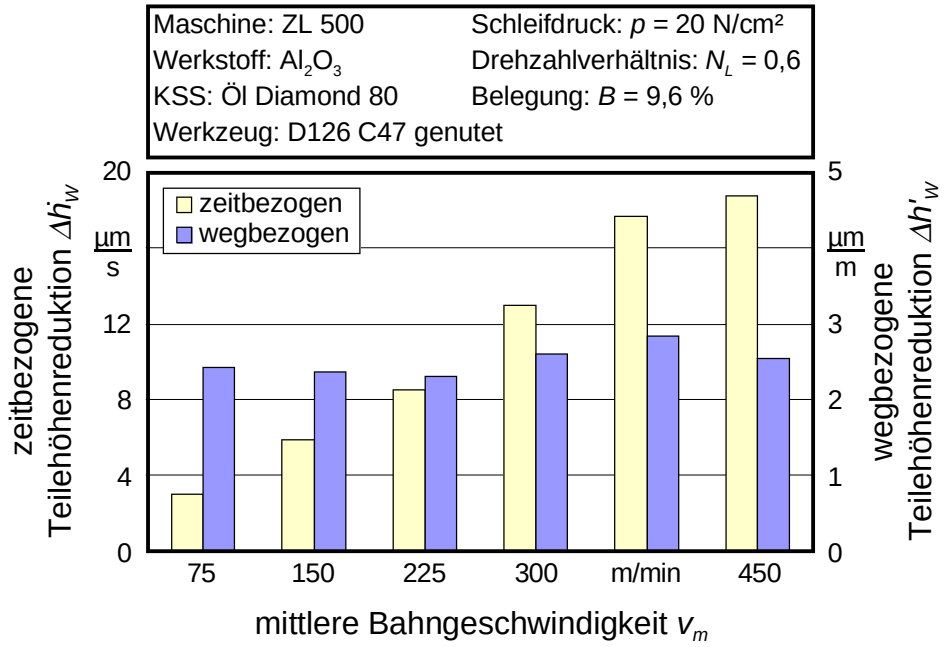


Bild 7.11: Zeit- und wegbezogene Teilehöhenreduktion bei der Bearbeitung von Al_2O_3 in Abhängigkeit von der mittleren Bahngeschwindigkeit

Die zeitbezogene Teilehöhenreduktion $\Delta \dot{h}_W$ steigt mit zunehmender mittlerer Bahngeschwindigkeit nahezu linear von 3,0 auf 18,7 µm/s an. Mit dieser maximalen Abtrenngeschwindigkeit wird das gesamte Aufmass von 500 µm in weniger als 30 Sekunden abgetrennt. Bei derartig kurzen Bearbeitungszeiten ist nicht der Schleifprozess, sondern das Be- und Entladen der Maschine das ausschlaggebende Intervall für den Arbeitstakt. Der lineare Verlauf zeigt, dass die Schleifzeit indirekt proportional von der mittleren Bahngeschwindigkeit abhängt. Die wegbezogenen Teilehöhenreduktionen $\Delta h'_W$ liegen im Bereich zwischen 2,3 und 2,8 µm/m und zeigen in ihrem Verlauf keine Tendenz, die auf eine funktionale Abhängigkeit von der mittleren Bahngeschwindigkeit hinweist. Daraus folgt, dass die Abtrenn- und Verschleißmechanismen an der einzelnen Kornschneide von der mittleren Bahngeschwindigkeit unabhängig sind. Ein Aufschwimmen der Werkstücke auf einem Kühlschmierstofffilm, der sogenannte Aquaplaning- oder Gleitlager-Effekt, tritt auch bei den höchsten Bahngeschwindigkeiten nicht auf. Dieses Ergebnis bestätigt eine wichtige Voraussetzung für die Simulation der Schleifscheibenbelastung in Kapitel 4. Das dort beschriebene Modell basiert auf der Annahme, dass die wegbezogene Teilehöhenreduktion von der Bahngeschwindigkeit unabhängig ist.

Im linken Diagramm von **Bild 7.12** sind die arithmetischen Mittenrauwerte R_a, im rechten Diagramm die Ebenheitsfehler f_E der Al_2O_3-Benzinpumpendeckel nach der Bearbeitung mit verschiedenen mittleren Bahngeschwindigkeiten aufgetragen.

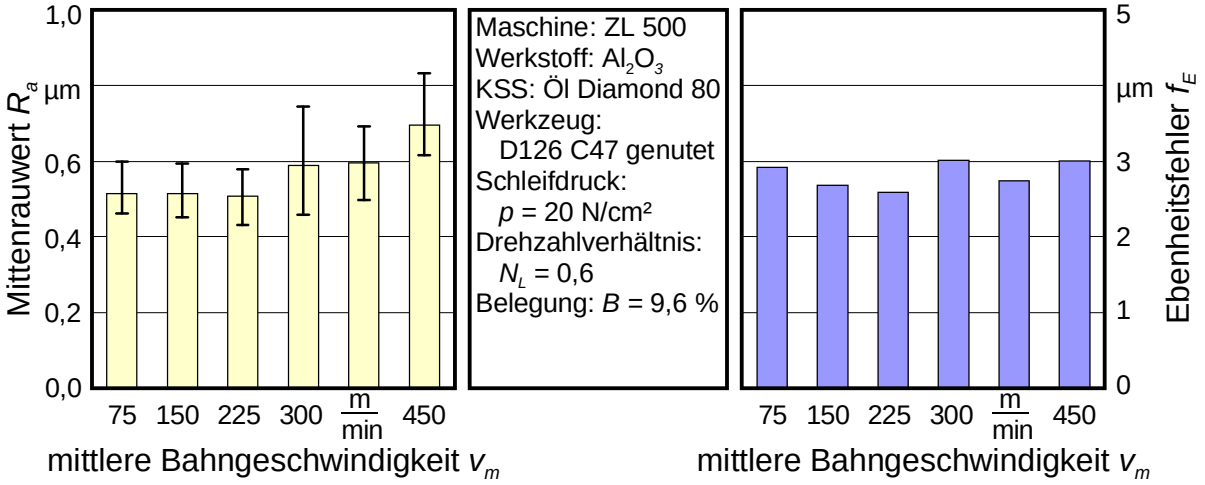


Bild 7.12: Arithmetischer Mittenrauwert und Ebenheitsfehler von Al_2O_3 in Abhängigkeit von der mittleren Bahngeschwindigkeit

Bei v_m = 75 m/min beträgt der Mittelwert der gemessenen Rauheiten 0,51 µm, die Werte der Einzelmessungen liegen zwischen 0,46 und 0,60 µm. Mit der mittleren Bahngeschwindigkeit nehmen die arithmetischen Mittenrauwerte zu. Bei v_m = 450 m/min liegt der Mittelwert mit 0,69 µm um über 35 % höher als bei der niedrigsten Geschwindigkeit. Gleichzeitig steigen auch die Schwankungen der Einzelmessungen. Als Grund ist der konstante Volumenstrom des Kühlschmierstoffs anzusehen, durch den mit zunehmender Geschwindigkeit pro Meter Schleifweg effektiv weniger Fluid zur Verfügung stand. Bei hohen Bahngeschwindigkeiten reichte dieser Volumenstrom nicht aus, um die Zerspanungsprodukte aus der Kontaktzone zu transportieren. Die Ebenheitsfehler liegen zwischen 2,6 und 3,0 µm und lassen im Gegensatz zu den Rauheitskennwerten keine Abhängigkeit von der Bearbeitungsgeschwindigkeit erkennen. Ein mit zunehmender Schleifscheibendrehzahl unruhiger werdender Lauf der Maschine kann demnach als Grund für die steigenden Rauheiten ausgeschlossen werden.

Bearbeitung von Si_3N_4

Als Prozessgrößen bei der Bearbeitung von Siliciumnitrid mit unterschiedlichen Bahngeschwindigkeiten zeigt **Bild 7.13** das Antriebsmoment M_u, das flächenbezogene Zeitspanungsvolumen Q''_W und die wegbezogene Teilehöhenreduktion $\Delta h'_W$. Die Balken bilden jeweils den Mittelwert über die Einzelmessungen aller vierzig bearbeiteten Chargen.

Bei einer Verdoppelung der mittleren Bahngeschwindigkeit von 150 auf 300 m/min steigt das durchschnittliche Antriebsmoment M_u um mehr als 35 % an. Gleichzeitig verdoppelt sich das flächenbezogene Zeitspanungsvolumen auf $0{,}29 \cdot 10^3$ mm³/(s·mm²), während sich bei der weg-

bezogenen Teilehöhenreduktion keinerlei Änderungen ergeben. Diese Beobachtung bestätigt die bei Al_2O_3 erarbeiteten Ergebnisse. Eine Erhöhung der mittleren Bahngeschwindigkeit auf 450 m/min führt jedoch nicht zu einer weiteren Steigerung des Zeitspanungsvolumens. Vielmehr fallen bei etwa gleichbleibendem Antriebsmoment sowohl das flächenbezogene Zeitspanungsvolumen als auch die wegbezogene Teilehöhenreduktion signifikant ab. Diese Entwicklung deutet darauf hin, dass sich die Zerspanungsbedingungen am einzelnen Schneidkorn hier drastisch verschlechtern. Dieser Effekt kann ein Aufschwimmen der Werkstücke auf einem Schmierfilm zur Ursache haben. Dadurch vermindert sich der wirksame Schleifdruck, und ein effektiver Kontakt zwischen Werkstücken und Schneidkörnern findet kaum noch statt. Eine zweite Ursache kann eine Unterversorgung der Kontaktzone mit Kühlschmierstoff sein, die einen starken thermischen Verschleiß der Schneidkörner und dadurch den Rückgang des Zeitspanungsvolumens bewirkt.

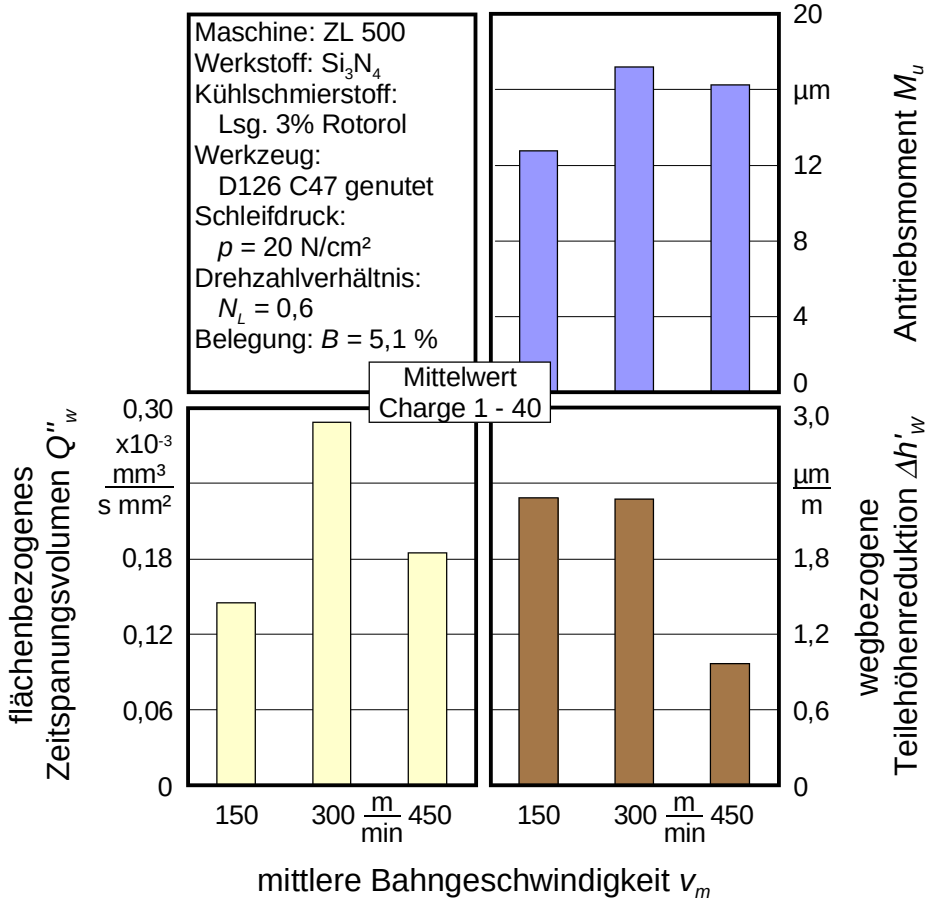


Bild 7.13: Antriebsmoment, flächenbezogenes Zeitspanungsvolumen und wegbezogene Teilehöhenreduktion bei der Bearbeitung von Si_3N_4 mit unterschiedlichen mittleren Bahngeschwindigkeiten

Fazit zur Variation der mittleren Bahngeschwindigkeit

Bei der Bearbeitung von Al_2O_3 zeigt sich, dass durch eine Erhöhung der mittleren Bahngeschwindigkeit bei geringfügigen Qualitätseinbussen das Zeitspanungsvolumen und damit die

Wirtschaftlichkeit des Planschleifprozesses signifikant gesteigert werden kann. Trotz der im Vergleich zu handelsüblichen Maschinen hohen Bahngeschwindigkeiten wurde keine technologische Prozessgrenze überschritten, die einen Höchstwert der zweckmäßigen Bearbeitungsgeschwindigkeiten kennzeichnet. Vor diesem Hintergrund erscheint die Untersuchung noch höherer Geschwindigkeiten sinnvoll. In industriellen Prozessketten folgt dem Schruppen meist eine Nachbearbeitungsphase, in der die durch höhere Geschwindigkeiten entstehenden geringfügigen Qualitätseinbußen ausgeglichen werden können. Am Beispiel von Si_3N_4 wird jedoch deutlich, dass diese Möglichkeit der Leistungssteigerung nicht auf beliebige Anwendungen übertragbar ist. Problematisch ist bei den hohen Geschwindigkeiten die Versorgung der Kontaktzone mit einer ausreichenden Kühlschmierstoffmenge für den Abtransport der Zerspanungsprodukte.

7.5 Einfluss des Schleifdrucks

Die folgende Versuchsreihe diente der Untersuchung der Auswirkungen des Schleifdrucks auf die Prozess- und Zielgrößen. Zu diesem Zweck wurden die Benzinpumpendeckel aus Al_2O_3 mit Flächenpressungen zwischen 10 und 40 N/cm² bearbeitet. Bei den Ventileinstellplättchen aus Si_3N_4 sind für einen Bearbeitungsprozess im Selbstschärfbereich der Schleifscheiben wesentlich höhere Drücke erforderlich. Daher erfolgte die Bearbeitung dieses Werkstoffs im Druckbereich zwischen 60 und 100 N/cm².

Bearbeitung von Al_2O_3

Bild 7.14 zeigt das Antriebsmoment M_u und das flächenbezogene Zeitspanungsvolumen Q''_W beim Schleifen von Al_2O_3 mit verschiedenen Schleifdrücken p. Beide Prozessgrößen nehmen mit steigendem Schleifdruck überproportional zu. Das Antriebsmoment steigt von 8,3 Nm bei

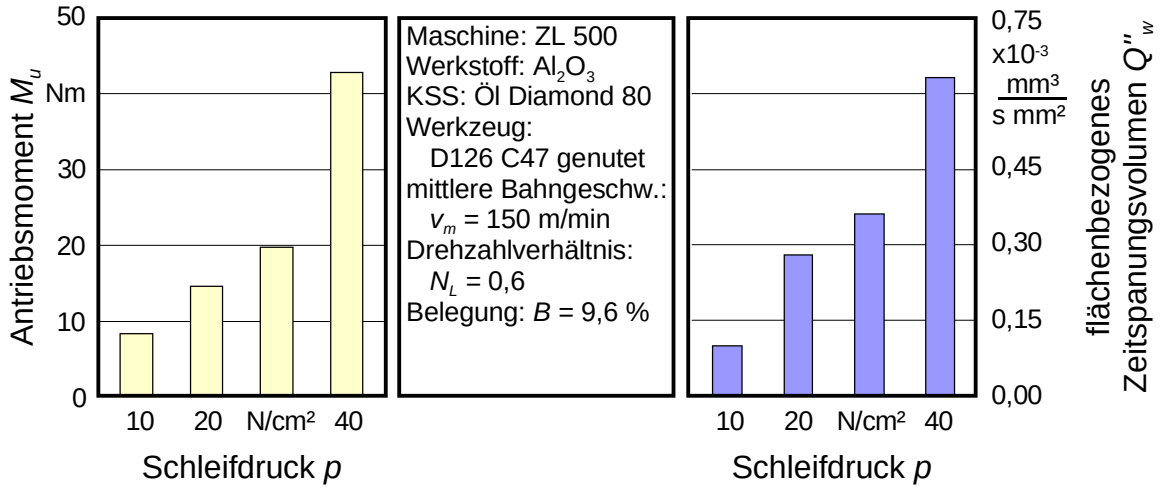


Bild 7.14: Antriebsmoment und flächenbezogenes Zeitspanungsvolumen bei der Bearbeitung von Al_2O_3 mit verschiedenen Schleifdrücken

p = 10 N/cm² auf 42,8 Nm bei 40 N/cm². Das entspricht einer Steigerung um den Faktor 5,2. Das Zeitspanungsvolumen nimmt im gleichen Bereich sogar um das 6,3-fache zu.

Dieser überproportionale Anstieg beruht auf mehreren Effekten. Die Schneiden der obersten Kornschicht dringen bei höheren Normalkräften tiefer in die Werkstückoberfläche ein. Durch die elastische Verformung der Schleifscheiben gelangen zusätzlich tiefer liegende Kornschneiden zum Eingriff, so dass die Zahl der aktiven Schneiden mit dem Schleifdruck ansteigt. Darüber hinaus werden die höheren Zeitspanungsvolumina durch verstärkte Verschleißvorgänge an den Schleifscheiben begünstigt, wo durch die höheren Kornbelastungen die Verschleiß- und Selbstschärfvorgänge beschleunigt ablaufen.

In **Bild 7.15** sind der arithmetische Mittenrauwert R_a und der Ebenheitsfehler f_E der Benzinpumpendeckel nach der Bearbeitung mit unterschiedlichen Schleifdrücken p eingezeichnet. Wie das linke Diagramm zeigt, sinken mit steigendem Druck die Mittelwerte der gemessenen Rauheiten R_a leicht ab. WEIGMANN [Wei97] beobachtete diesen Effekt bei der Honbearbeitung von Buchsen aus Al_2O_3 mit Honleisten der Körnung D126, also bei vergleichbaren Bearbeitungsbedingungen. Er begründete die Abnahme der Rautiefen mit einer Einebnung der Werkstückoberflächen durch einzelne plastische Deformationen. Auch das Abflachen von Diamantkornschneiden bei hohen Drücken kann ein Grund für die abnehmenden Rauheiten sein. Der Anstieg der Streubreiten ist auf die insgesamt größere Inhomogenität der Oberflächen aufgrund der plastisch verformten Bereiche zurückzuführen.

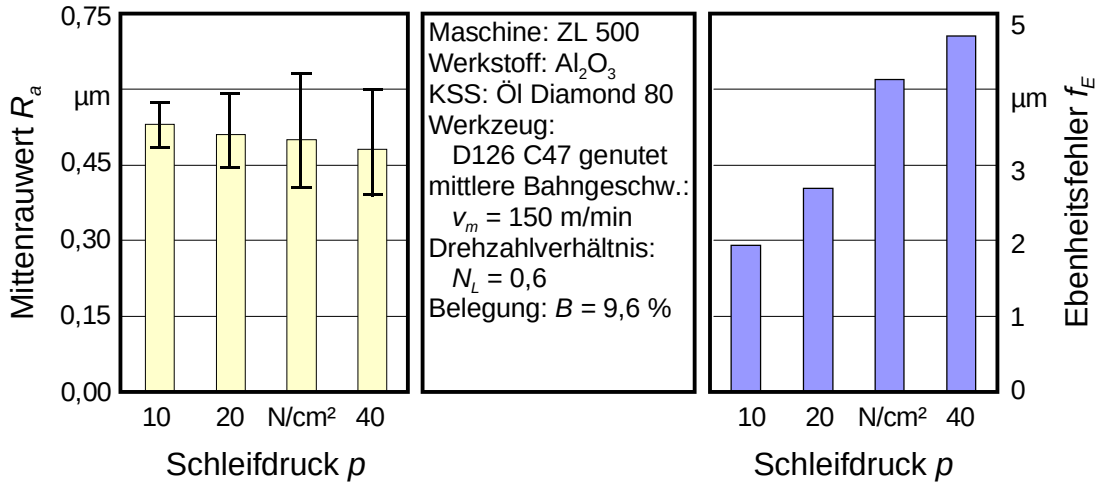


Bild 7.15: Arithmetischer Mittenrauwert und Ebenheitsfehler von Al_2O_3 nach der Bearbeitung mit verschiedenen Schleifdrücken

Im Gegensatz zur Oberflächenrauheit werden die erreichbaren Formgenauigkeiten mit steigendem Bearbeitungsdruck deutlich schlechter. So nimmt der durchschnittlich ermittelte Ebenheitsfehler von 1,9 µm bei 10 N/cm² auf 4,7 µm beim höchsten Schleifdruck zu. Diese Abnahme der Formgenauigkeit hängt mit der zunehmenden elastischen Verformung der Schleifscheiben zusammen. Bei steigendem Schleifdruck werden die Werkstücke tiefer in den

Schleifbelag eingedrückt. Dadurch werden die Werkstückränder besonders belastet, so dass zunehmend ballige Formen entstehen.

Bearbeitung von Si_3N_4

Das nächste **Bild 7.16** zeigt den Verlauf der Schleifzeit t_c beim Schleifen von Si_3N_4 mit unterschiedlichen Schleifdrücken p. Bei der kleinsten dargestellten Flächenpressung von p = 60 N/cm² nahmen die Bearbeitungszeiten über dem gesamten Verlauf stetig zu. Aus diesem Grund wurde die Versuchsreihe nach der 34. Charge abgebrochen. Die beiden anderen Versuchsreihen zeigen neben den durch Chargenwechsel bedingten Schwankungen der Schleifzeiten auch Bereiche, in denen die Werte für t_c aufgrund spontaner Selbstschärfung der Schleifscheiben zurückgehen. Die Wellenbewegung bei den Schleifzeiten, die durch die spontane Selbstschärfung der Schleifscheiben entsteht, ist bei p = 100 N/cm² wesentlich stärker ausgeprägt als bei 80 N/cm². Möglicherweise werden Körner und Bindung der Schleifscheibe bei dieser hohen Belastung stark geschädigt.

Ausgelöst werden kann eine Selbstschärfung durch einzelne Partikel von Werkstücken oder Schleifscheiben, durch die der abgestumpfte Schleifbelag in der Kontaktzone aufgerissen wird. Auch durch den Kühlschmierstoff ist das Einbringen solcher Partikel in die Kontaktzone möglich. Das spontane Eintreten der Selbstschärfung stellt eine Instabilität im Prozessverlauf dar, die ein starkes Ansteigen der Bearbeitungskräfte und Zeitspanungsvolumina verursacht. In Extremfällen kann es dadurch zum Abschalten der Maschine wegen zu hoher Antriebsleistungen oder sogar zur Zerstörung von Werkstücken, Werkstückhaltern oder Stiftkränzen kommen.

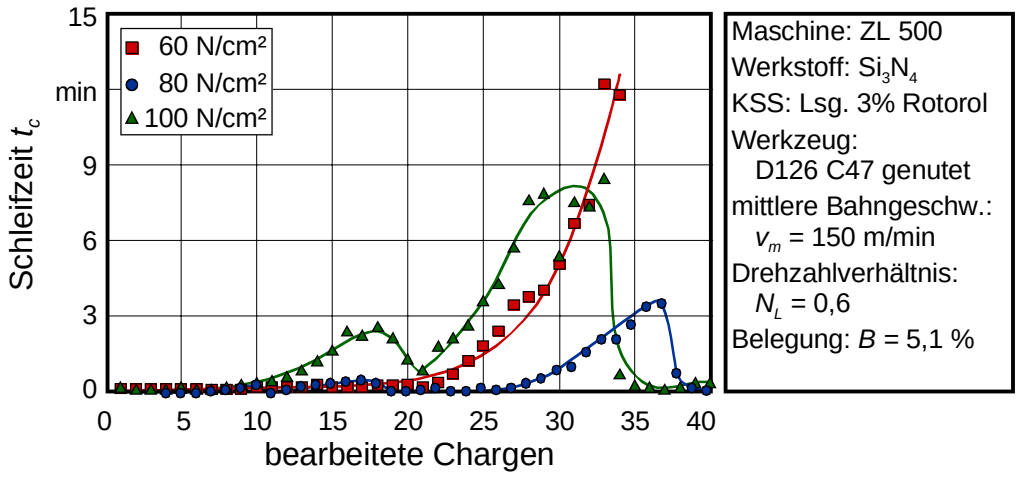


Bild 7.16: Schleifzeit bei der Bearbeitung von Si_3N_4 in Abhängigkeit von der Anzahl der bearbeiteten Chargen

Die beiden Balkendiagramme in **Bild 7.17** zeigen die durchschnittlichen Antriebsmomente M_u und die flächenbezogenen Zeitspanungsvolumina Q''_W bei der Bearbeitung von Si_3N_4 mit unterschiedlichen Drücken. Im Gegensatz zur Bearbeitung von Al_2O_3 nehmen die Antriebsmo-

mente mit steigendem Schleifdruck nur geringfügig zu. Eine Erhöhung der Flächenpressung von 60 auf 100 N/cm² führt hier nur zu einer Steigerung der Antriebsleistung um etwa 17 % auf durchschnittlich 15,7 Nm. Trotz der höheren Antriebsleistung steigt das flächenbezogene Zeitspanungsvolumen im gleichen Zeitraum nicht an, sondern geht deutlich zurück. Diese Beobachtung deutet darauf hin, dass die verwendete Diamantkörnung bei diesen hohen Drücken und dem Werkstückwerkstoff zur Ausbildung von Anflächungen durch Reibungsverschleiß neigt. Die Reibarbeit zwischen den Wirkpartnern nimmt mit dem Druck zu, ein effektives Zerspanen findet nicht mehr statt.

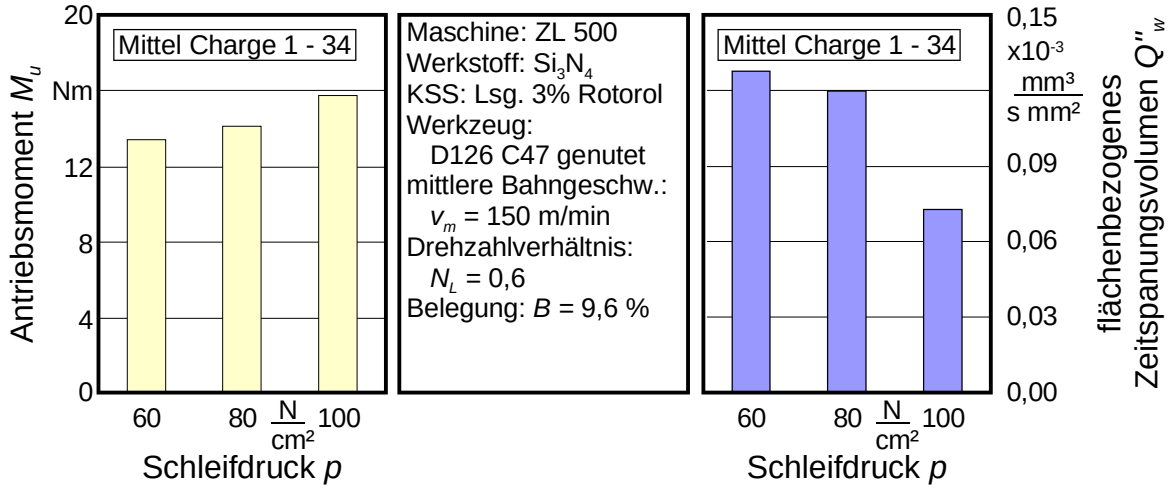


Bild 7.17: Antriebsmoment und flächenbezogenes Zeitspanungsvolumen bei der Bearbeitung von Si_3N_4 mit unterschiedlichen Schleifdrücken

In **Bild 7.18** sind für die unterschiedlichen Schleifdrücke p die Streuungen der Werkstückhöhen h_{Wi} um den Mittelwert einer Charge $\overline{h_W}$ dargestellt. Die Höhenstreuung S_{hW} ergibt sich jeweils aus der Differenz zwischen der größten und der kleinsten Höhe. Mit zunehmendem Schleifdruck steigt die Höhenstreuung von S_{hW} = 32 µm auf 56 µm deutlich an. Besonders bei den Schleifdrücken 40 und 80 N/cm² fällt auf, dass oft zwei Werkstücke nahezu identische Höhen aufweisen, die einzelnen Zweiergruppen jedoch relativ weit auseinander liegen. Dieses Ergebnis ist auf die Anordnung von jeweils zwei Werkstücken in fünf Haltern zurückzuführen. Trotz der Höhenvorsortierung vor Beginn der Bearbeitung treten unterschiedliche Teilehöhenreduktionen auf, die die pendelnd gelagerte Oberscheibe nicht ausgleichen kann.

Im industriellen Einsatz werden die Werkstückchargen in der Regel so lange mit niedrigerem Druck vorbearbeitet, bis die Ausgangsteilehöhen angeglichen und Unebenheiten der Werkstückoberflächen abgetrennt sind. Erst dann wird die volle Arbeitslast aufgebracht, und durch eine schonende Nachbearbeitung werden die Ergebnisse noch einmal verbessert. Die hier dargestellten Ergebnisse verdeutlichen den Zusammenhang zwischen Druck und Qualität, repräsentieren aber nicht industriell herstellbare Höhenstreuungen.

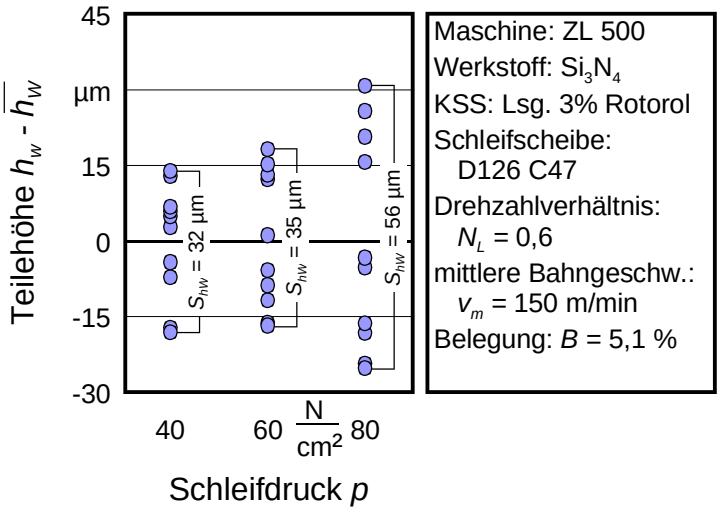


Bild 7.18: Höhenstreuung von Si_3N_4-Ventileinstellplättchen in Abhängigkeit vom Schleifdruck

Fazit zur Schleifdruckvariation

Der Schleifdruck stellt beim Planschleifen mit Planetenkinematik eine wichtige Einstellgröße sowohl für den Prozessverlauf als auch für die Werkstückqualität dar. Bei der Bearbeitung von Al_2O_3 können die Zeitspanungsvolumina durch eine Erhöhung des Schleifdrucks bei nahezu gleichbleibender Oberflächengüte überproportional gesteigert werden, wodurch sich allerdings die Ebenheiten der Werkstücke verschlechtern.

Bei der Bearbeitung von Si_3N_4 stellt der Schleifdruck den ausschlaggebenden Parameter für das Verschleißverhalten der Schleifbeläge dar. Bei niedrigen Drücken findet keine Selbstschärfung der Beläge statt, und der Prozess kommt recht schnell zum Stillstand. Zu hohe Drücke haben einen thermischen Kornverschleiß zur Folge, der wiederum zu hohen Schleifzeiten führt. Selbstschärfungseffekte treten spontan auf und beeinflussen den Prozessverlauf unvorhersehbar. Um diesen Werkstoff industriell mit zufriedenstellendem Ergebnis bearbeiten zu können, ist eine Druckregelung in Abhängigkeit von der Antriebsleistung oder vom Zeitspanungsvolumen erforderlich. Der scharfe Anfangszustand der Schleifscheiben kann mit niedrigen Drücken länger beibehalten und dadurch besser ausgenutzt werden. Im weiteren Verlauf der Bearbeitung sind für begrenzte Zeiträume hohe Drücke für eine Selbstschärfung der Schleifscheiben erforderlich [Ben00].

7.6 Einfluss der Belegung

Die folgende Versuchsreihe verdeutlicht den Einfluss der Chargenmenge auf den Prozessverlauf und das Arbeitsergebnis. Diese als Belegung oder als Belegungsfaktor bezeichnete Größe kennzeichnet die prozentuale Bedeckung der Schleifbeläge durch die Flächen aller Werkstücke. Mit der Werkstückanzahl wurde maschinenseitig die Normalkraft erhöht, so dass sich ein konstanter Schleifdruck ergab. Bei prismatischen Werkstücken ist der Belegungsfaktor be-

züglich beider Schleifscheiben gleich groß. Die Oberfläche eines Werkstücks bestimmt das Inkrement, um das die Belegung variiert werden kann. Bei Werkstückhaltern mit Aussparungen auf mehreren Teilkreisen ergeben sich Einschränkungen, wenn zwar die Anzahl der Werkstücke, nicht aber deren Anteile auf den einzelnen Teilkreisen variiert werden soll. Hier wurde die Werkstückanzahl stets so verändert, dass der qualitative Verlauf der Gestaltfunktion davon nicht beeinflusst wurde.

Bearbeitung von Al_2O_3

Die Benzinpumpendeckel aus Al_2O_3 wurden in den Chargenmengen z_W = 9, 15, 24 und 30 bearbeitet. Aus diesen Stückzahlen ergeben sich Belegungen der Schleifscheibenoberflächen von B = 5,7, 9,6, 15,3 und 19,2 %. **Bild 7.19** zeigt im linken Balkendiagramm das Antriebsmoment M_u als Funktion der Belegung B. Das Moment M_u steigt mit dem Belegungsfaktor nahezu linear an. Dieser Verlauf spiegelt die zunehmende Kontaktfläche zwischen Werkstücken und Schleifscheiben wider. Bei konstanter Flächenpressung zwischen Werkstücken und Schleifbelägen und gleichbleibender Einzelkornnormalkraft erhöht sich die Anzahl der aktiven Schneiden. Bezieht man die Werte für M_u auf die Kontaktfläche, ergibt sich ein annähernd konstanter Verlauf über dem Belegungsfaktor.

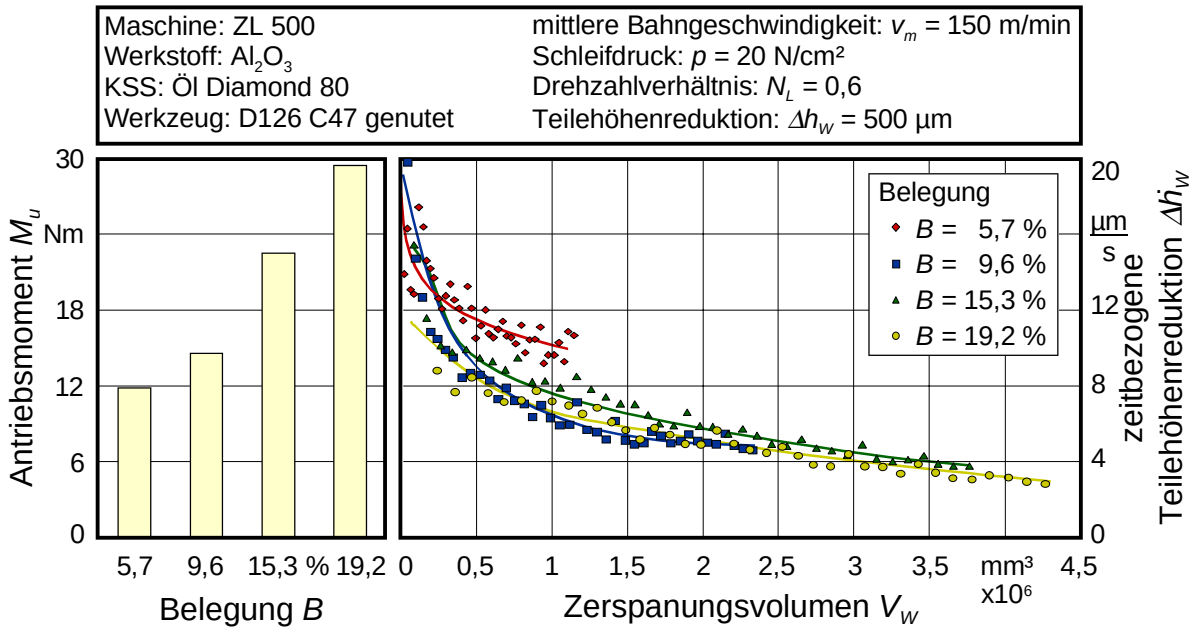


Bild 7.19: Antriebsmoment und zeitbezogene Teilehöhenreduktion bei der Bearbeitung von Al_2O_3 mit unterschiedlichen Belegungen

Im rechten Diagramm von Bild 7.19 ist die zeitbezogene Teilehöhenreduktion $\Delta \dot{h}_W$ als Funktion des Zerspanungsvolumens V_W für die untersuchten Belegungen dargestellt. Die Darstellung über der Anzahl der bearbeiteten Chargen ist an dieser Stelle nicht sinnvoll, da die Belastung der Schleifscheibe von der Chargenmenge abhängt. Bei der hier gewählten Darstel-

lung wird davon ausgegangen, dass das Zerspanungsvolumen den Verschleißzustand der Schleifscheiben repräsentiert.

Zu Beginn der Versuchsreihen gehen die zeitbezogenen Teilehöhenreduktionen durch das Abstumpfen der Schleifscheiben nach dem Schärfen deutlich zurück. Die Verläufe der vier Versuchsreihen überdecken sich stark. Das beweist zum einen, dass die zeitbezogene Teilehöhenreduktion nicht von der Chargenmenge, sondern vom Zerspanungsvolumen abhängt. Zum anderen wird deutlich, dass das Zerspanungsvolumen eine geeignete Größe zur Charakterisierung des Verschleißzustands eines Schleifscheibenpaares ist. Die bei B = 9,6 % gemessenen Werte gehen nach dem anfänglichen Abstumpfen der Schleifscheibe in einen stationären Bereich über. Bei größeren Chargen ist ein solcher stationärer Bereich nicht zu erkennen. Hier sinken die zeitbezogenen Teilehöhenreduktionen über der gesamten Versuchsreihe leicht ab. Möglicherweise reicht bei den hohen Belegungen die Kühlschmierstoffmenge nicht aus, um alle abgetrennten Partikel aus dem Arbeitsraum zu transportieren, so dass ein Schleifschlamm auf der Belagsfläche zurückbleibt, der den weiteren Prozess behindert. Bei der geringsten Chargenmenge mit B = 5,7 % deutet sich nach der vierzigsten Charge der Übergang in einen stationären Bereich gerade erst an. Hier ist die Anfangsschärfe der Schleifscheiben noch nicht ganz abgearbeitet.

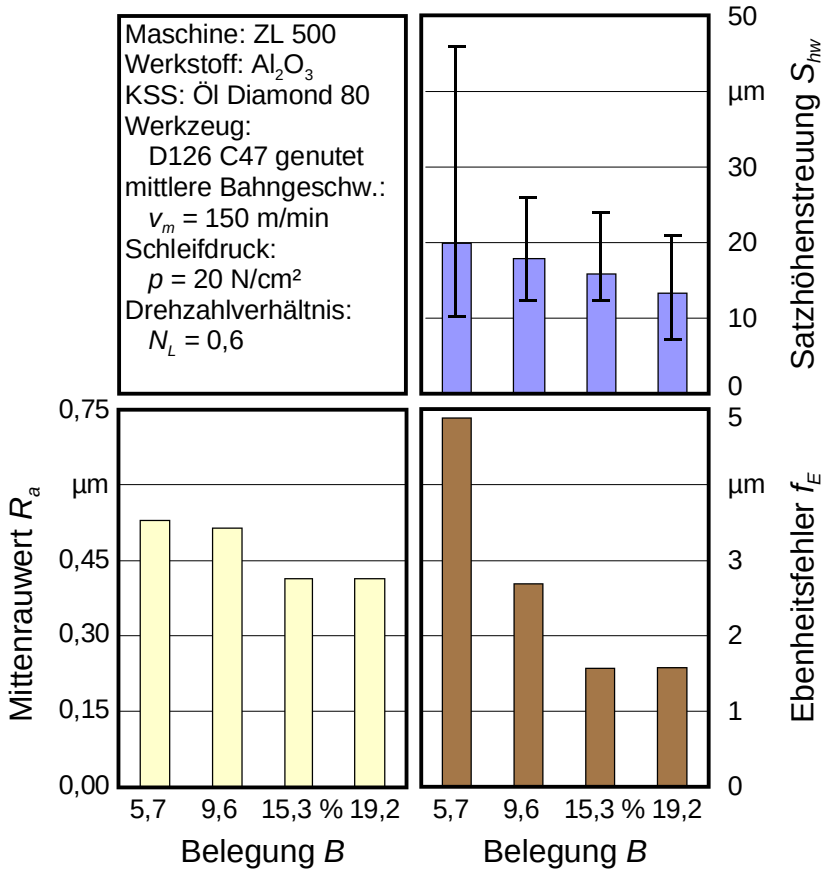


Bild 7.20: Arithmetischer Mittenrauwert, Höhenstreuung und Ebenheitsfehler von Benzinpumpendeckeln aus Al_2O_3 nach der Bearbeitung von 40 Chargen mit unterschiedlichen Belegungen

In **Bild 7.20** sind die arithmetischen Mittenrauwerte R_a, die Höhenstreuungen S_{hW} und die Ebenheitsfehler f_E der Benzinpumpendeckel aus Al_2O_3 nach der Bearbeitung von vierzig Chargen mit unterschiedlichen Belegungen dargestellt. Bezüglich aller drei Kriterien nimmt die Qualität mit der Chargenmenge zu. Insbesondere bei der Bewertung der Rauheiten sind die Zustände der Schleifscheibenoberfläche nach unterschiedlichen Zerspanungsvolumina zu berücksichtigen. So ist der Rückgang der Rauheiten auf die mit der Chargenmenge steigende Gesamtbelastung des Schleifbelags zurückzuführen. Der Scheibenverschleiß erklärt aber nicht die deutliche Verbesserung von Höhenstreuungen und Ebenheitsabweichungen der Werkstücke. Ursache für diese Beobachtungen ist eher, dass sich die pendelnd gelagerte obere Schleifscheibe mit zunehmender Belegung auf entsprechend mehr Werkstücken abstützt, weniger zu Pendelbewegungen neigt und insgesamt ruhiger läuft.

Bearbeitung von Si_3N_4

Die unterschiedlichen Belegungen wurden bei Si_3N_4 mit $z_W = 5$, 10 und 15 Werkstücken in jeweils fünf Haltern realisiert. Daraus ergeben sich Belegungsfaktoren von 2,5, 5,1 und 7,6 % der Schleifscheibenfläche. Der Schleifdruck von $p = 80$ N/cm² erfordert bei der Standardanzahl von 10 Werkstücken eine Normalkraft von circa 6000 N.

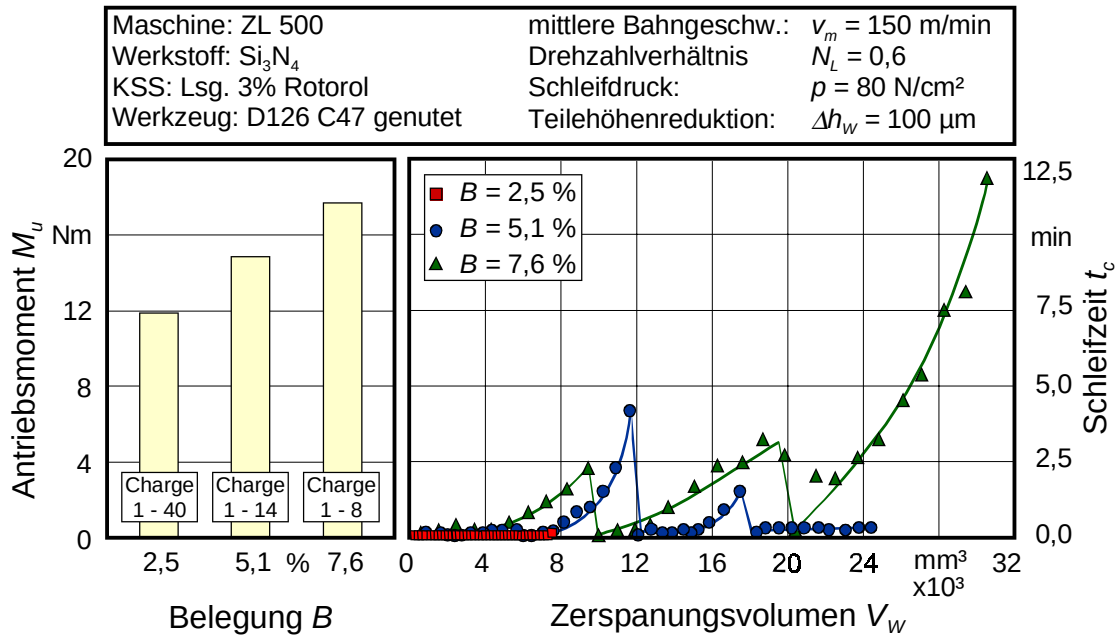


Bild 7.21: Antriebsmoment und Schleifzeit bei der Bearbeitung von Si_3N_4 mit verschiedenen Belegungen

Im Balkendiagramm links in **Bild 7.21** ist für die Bearbeitung von Si_3N_4 mit unterschiedlichen Belegungen B das durchschnittliche Antriebsmoment M_u der unteren Schleifscheibe dargestellt. Zum Vergleich ähnlicher Verschleißzustände der Schleifbeläge wurden die Mittelwerte über unterschiedliche Chargenzahlen mit etwa gleichen Zerspanungsvolumina gebildet.

Obwohl sich die Kontaktfläche zwischen Werkstücken und Schleifbelägen von $B = 2{,}5$ % auf 7,6 % verdreifacht, steigen die Antriebsmomente nur um etwa 50 % auf $M_u = 17{,}7$ Nm.

Das Punktdiagramm im rechten Teil von Bild 7.21 zeigt die Schleifzeiten t_c als Funktion des Zerspanungsvolumens V_W. Bei der kleinsten Belegung mit nur fünf Werkstücken erfolgt die Bearbeitung in durchweg weniger als 17 Sekunden. Eine deutliche Zunahme der Schleifzeit mit der Chargenzahl ist hier nicht zu verzeichnen. In den 40 Chargen werden insgesamt etwas über $V_W = 7700$ mm³ Werkstoff zerspant. Die Versuchsreihe mit $B = 5{,}1$ zeigt den typischen Sägezahnverlauf mit ansteigenden Schleifzeiten bis zu jedem Chargenwechsel. Nach 14 Chargen wurden hier $V_W = 7566$ mm³ Werkstoff zerspant. Die Versuchsreihe mit 15 Werkstücken zeigt mit der Anzahl der Chargen stark ansteigende Schleifzeiten und wurde deshalb nach der 30. Charge abgebrochen. Schon nach 8 Chargen war hier das Werkstückvolumen von 7212 mm³ zerspant.

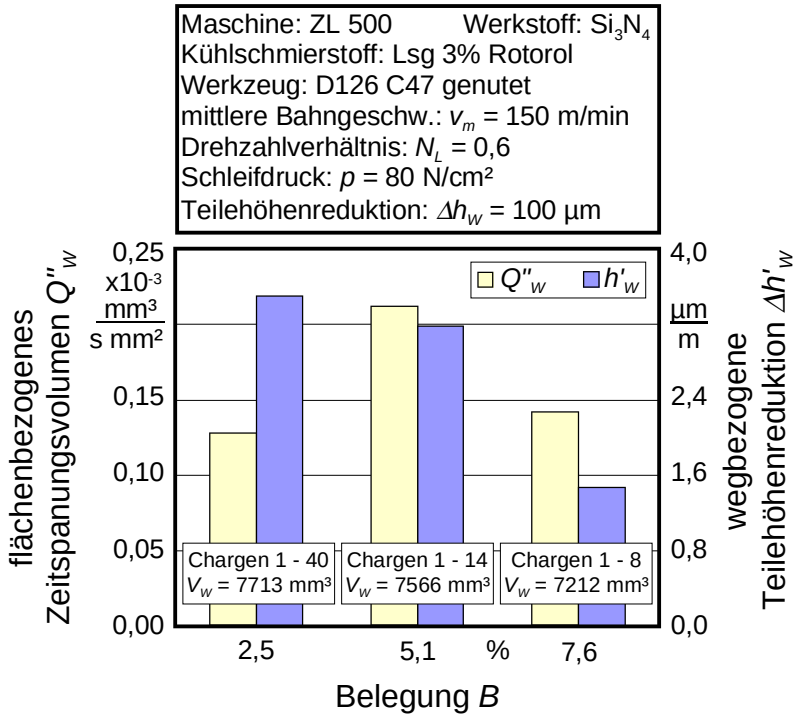


Bild 7.22: Flächenbezogenes Zeitspanungsvolumen und wegbezogene Teilehöhenreduktion bei der Bearbeitung von Si_3N_4 mit unterschiedlichen Belegungen

In **Bild 7.22** sind das flächenbezogene Zeitspanungsvolumen Q''_W und die wegbezogene Teilehöhenreduktion $\Delta h'_W$ für die Bearbeitung von Si_3N_4 mit unterschiedlichen Belegungen B dargestellt. Auch hier wurden die Mittelwerte über Chargenzahlen mit ähnlichen Zerspanungsvolumina V_W gebildet. Beim Übergang von $B = 2{,}5$ nach 5,1 steigt das flächenbezogene Zeitspanungsvolumen von 0,12 auf 0,21 mm³/(s·mm²) an. Die wegbezogene Teilehöhenreduktion bleibt mit etwas über 3 µm/m nahezu konstant. Trotz der doppelten Werkstückanzahl liegen demnach unveränderte Zerspanbedingungen an der einzelnen Kornschneide vor. Bei einer weiteren Erhöhung der Belegung auf $B = 7{,}6$ zeigt sich jedoch ein deutlicher Rückgang

beider Größen. Möglicherweise reicht der Volumenstrom des Kühlschmierstoffs zum Abtransport der Zerspanungsprodukte aus dem Arbeitsraum nicht mehr aus.

Fazit zur Variation der Belegung

Im Rahmen der Bearbeitung von Al_2O_3 bringen hohe Belegungen keine Nachteile bezüglich des Prozessverlaufs mit sich. Nicht die Anzahl der gleichzeitig bearbeiteten Werkstücke ist ausschlaggebend für das Verschleißverhalten der Schleifbeläge, sondern das Zerspanungsvolumen. So steigen mit zunehmender Chargenmenge zwar die Schleifzeiten an, gleichzeitig nehmen aber die Zeitspanungsvolumina zu. Aus ökonomischen Überlegungen sind hohe Belegungen auch deshalb anzustreben, weil dadurch die Anzahl der Be- und Entladevorgänge sinkt und der Hauptzeitanteil an der Maschinennutzungszeit erhöht werden kann. Hinsichtlich aller qualitativen Kriterien bringen hohe Belegungsfaktoren Vorteile mit sich.

Die an Si_3N_4 erarbeiteten Ergebnisse zeigen, dass hohe Belegungen bei diesem Werkstoff zu einem vorzeitigen Schleifscheibenverschleiß mit einem deutlichen Anstieg der Schleifzeit und einem erheblichen Rückgang des Zeitspanungsvolumens führen. Im Vergleich zur Bearbeitung von Al_2O_3 können hier nur sehr kleine Chargen bearbeitet werden. Die Werkstückzahl ist durch den für die Selbstschärfung erforderlichen Schleifdruck limitiert.

Aufgrund der pendelnd gelagerten oberen Schleifscheibe ist die Bearbeitung von Chargen mit wenigen kleinen Werkstücken durch Planschleifen mit Planetenkinematik nicht zu empfehlen. Hier treten sehr große Höhenstreuungen und Formabweichungen auf. Wichtig ist bei hohen Belegungen unabhängig vom Werkstückwerkstoff eine ausreichende Spülung des Arbeitsraums mit Kühlschmierstoff zum Abtransport der Späne.

7.7 Einfluss des Drehzahlverhältnisses

Das Ziel dieser Versuchsreihe war es, den Einfluss der Bewegungsform beim Planschleifen mit Planetenkinematik sowohl auf den Prozessverlauf als auch auf das Arbeitsergebnis nachzuweisen. Insbesondere sollte die Simulation der Schleifscheibenbelastung aus Kapitel 4 verifiziert werden. Zu diesem Zweck wurde bei gleicher mittlerer Bahngeschwindigkeit zwischen Werkstücken und unterer Schleifscheibe das Drehzahlverhältnis N_L variiert. Eine Zusammenstellung der kinematischen Parameter zeigt **Tabelle 7.2**. Die Drehzahlen der unteren Schleifscheibe n_u und des inneren Stiftkranzes n_i wurden so festgelegt, dass die mittlere Bahngeschwindigkeit $v_{m\,unten}$ bei jeder Versuchsreihe 150 m/min betrug. Die obere Schleifscheibe wurde stets mit der Drehzahl $n_o = -n_u$ angetrieben. Dadurch ergeben sich zwischen den Werkstücken und der oberen Schleifscheibe jeweils andere Bahngeschwindigkeiten.

Die Auswahl der sechs Drehzahlverhältnisse erfolgte anhand der Variation der Bahngeschwindigkeiten um ihren Mittelwert. Bei $N_L = -2{,}4$ bewegen sich alle Werkstückpunkte mit konstanter Geschwindigkeit auf exzentrischen Kreisbahnen um das Schleifscheibenzentrum der unteren Schleifscheibe. Bei den anderen Drehzahlverhältnissen entstehen verschlungene

Epizykloiden mit entsprechenden Variationen der Bahngeschwindigkeit (vgl. Bild 4.6). Bei N_L = -1,3 variiert die Bahngeschwindigkeit der Werkstückmittelpunkte etwa ±10 % um ihren Mittelwert. Mit zunehmendem Wert von N_L steigt diese Variation um jeweils etwa ±10 % an, bis sie bei N_L = 1,0 etwa ±60 % beträgt (vgl. Bild 4.9).

Tabelle 7.2: Kinematische Parameter bei der Variation des Drehzahlverhältnisses

Drehzahlverhältnis N_L		-2,4	-1,3	-0,5	0,1	0,6	1,0
Drehzahl der unteren Schleifscheibe n_u	min^{-1}	81	96	112	127	141	154
Drehzahl des inneren Stiftkranzes n_i	min^{-1}	-197	-127	-57	15	86	159
Drehzahl der oberen Schleifscheibe n_u	min^{-1}	-81	-96	-112	-127	-141	-154
mittlere Bahngeschwindigkeit $v_{m\,unten}$	m/min	150					
mittlere Bahngeschwindigkeit $v_{m\,oben}$	m/min	66	89	123	150	192	226

Bearbeitung von Al_2O_3

Bild 7.23 zeigt die Antriebsmomente beider Schleifscheiben M_o und M_u bei der Bearbeitung von Al_2O_3 mit unterschiedlichen Drehzahlverhältnissen N_L. Zwei Ergebnisse werden anhand dieses Balkendiagramms deutlich: Zum einen verändern sich die Antriebsmomente bei konstanter mittlerer Bahngeschwindigkeit $v_{m\,unten}$ deutlich mit dem Drehzahlverhältnis. So wurden bei N_L = -2,4 Durchschnittswerte von M_u = 12,7 Nm gemessen. Der größte Wert lag um etwa 33 % höher und trat mit 16,9 Nm beim Drehzahlverhältnis von N_L = -0,5 auf.

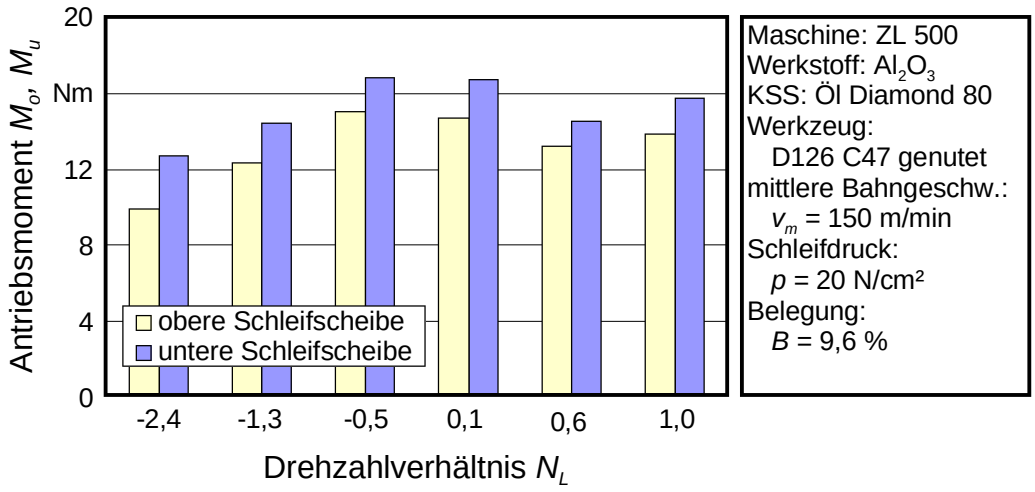


Bild 7.23: Antriebsmoment bei der Bearbeitung von Al_2O_3 mit unterschiedlichen Drehzahlverhältnissen

Zum Anderen liegt der Wert für M_o bei jeder Parameterkombination um 10 bis 20 % niedriger als der für M_u. Dieses Verhalten zeigte sich bei allen Schleifversuchen an diesem Werkstoff. Wie **Tabelle 7.2** zu entnehmen ist, steigen die mittleren Bahngeschwindigkeiten zwischen Werkstücken und oberer Schleifscheibe mit zunehmendem Drehzahlverhältnis von 66 auf

226 m/min an. Daher wäre ein steigendes Moment an der oberen Schleifscheibe, einhergehend mit höheren Zeitspanungsvolumina an der Werkstückoberseite zu erwarten. Die Messergebnisse bestätigen, dass der oberen Schleifscheibe ein wesentlich geringerer Anteil an der Zerspanarbeit zukommt als der unteren Scheibe, und dass die bezüglich der unteren Schleifscheibe gewählten kinematischen Parameter bestimmend für den Prozessverlauf sind.

Das Balkendiagramm links in **Bild 7.24** zeigt das flächenbezogene Zeitspanungsvolumen Q''_W für die Bearbeitung von Al_2O_3 mit verschiedenen Drehzahlverhältnissen N_L. Die Balken besitzen qualitativ einen ähnlichen Verlauf, unterscheiden sich aber quantitativ deutlicher voneinander als die oben gezeigten Antriebsmomente. Von $0{,}11 \cdot 10^{-3}$ mm³/(s·mm²) bei N_L = -2,4 steigen die flächenbezogenen Zeitspanungsvolumina bis auf $0{,}37 \cdot 10^{-3}$ mm³/(s·mm²) beim Drehzahlverhältnis von 0,1, was einer Steigerung um den Faktor 3,4 entspricht. Hohe Zeitspanungsvolumina treten zusammen mit hohen Antriebsmomenten auf und umgekehrt. Die einzige Ausnahme von dieser Beobachtung stellt der für N_L = 0,1 gemessene Wert dar, bei dem zwar höchste flächenbezogene Zeitspanungsvolumen, aber nur das zweithöchste Antriebsmoment M_u gemessen wurde.

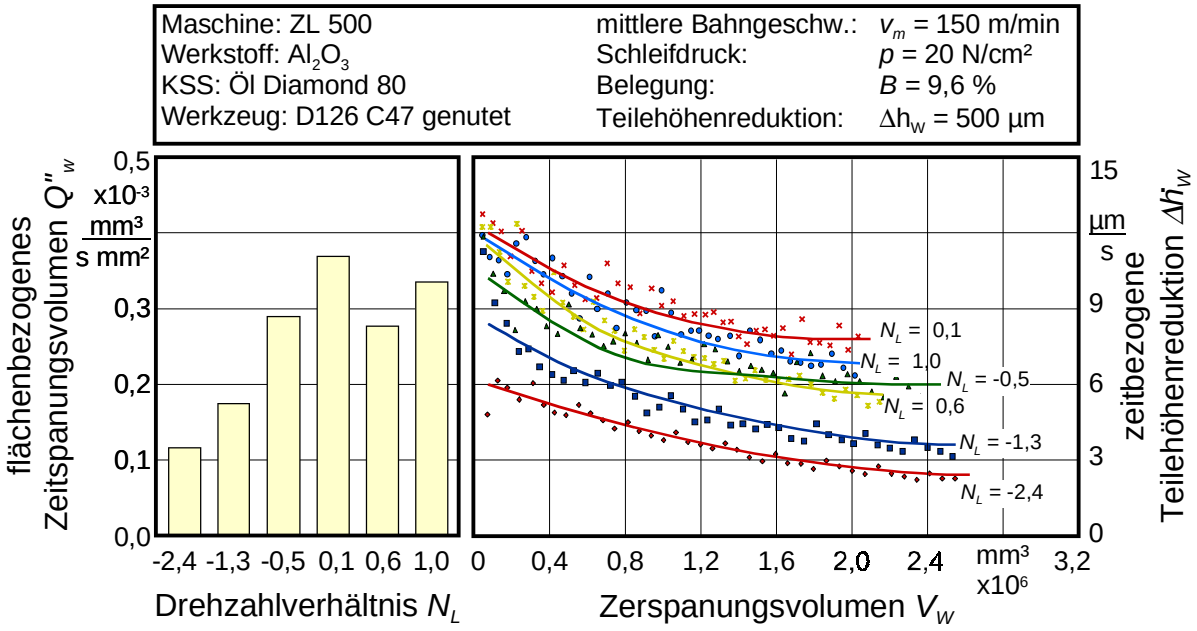


Bild 7.24: Flächenbezogenes Zeitspanungsvolumen und zeitbezogene Teilehöhenreduktion bei der Bearbeitung von Al_2O_3 mit unterschiedlichen Drehzahlverhältnissen

Das Punktdiagramm rechts in Bild 7.24 zeigt die zeitbezogene Teilehöhenreduktion $\Delta h'_W$ als Funktion des Zerspanungsvolumens V_W für verschiedene Drehzahlverhältnisse N_L. Wie schon zuvor zeigt sich während der Bearbeitung der ersten Chargen ein deutlicher Rückgang der Abtrenngeschwindigkeit, der auf den nachlassenden Effekt des Schärfens vor Prozessbeginn zurückzuführen ist. In Abhängigkeit vom Drehzahlverhältnis unterscheiden sich die zeitbezogenen Teilehöhenreduktionen deutlich. Die Differenzen zwischen den Versuchsreihen bleiben über dem Zerspanungsvolumen nahezu konstant. Die konstanten Abstände zwischen den ein-

zelnen Kurven belegen, dass das Drehzahlverhältnis einen direkten, kinematisch begründeten Einfluss auf den Prozessverlauf und insbesondere die zeitbezogene Teilehöhenreduktion besitzt. Wären diese Versuchsergebnisse durch unterschiedliche Verschleißmechanismen der Schleifbeläge charakterisiert, so würden die sechs Messpunktreihen bei ähnlichen Werten beginnen und dann unterschiedlich stark abfallen.

In **Bild 7.25** sind Ergebnisse einer Simulationsrechnung nach dem in Kapitel 4 beschriebenen Algorithmus dargestellt: für die geometrischen und kinematischen Bedingungen dieser Versuchsreihe wurden das normierte Antriebsmoment $M_{u\ normiert}$ und das normierte Zeitspanungsvolumen $Q_{w\ normiert}$ ermittelt. Beide Größen steigen mit dem Drehzahlverhältnis an, bis sie bei $N_L = 0{,}1$ ihre Maximalwerte erreichen. Nach einem lokalen Minimum bei $N_L = 0{,}6$ erfolgt bei $N_L = 1{,}0$ wieder eine Zunahme der Werte. In ihrem qualitativen Verlauf stimmen die simulierten Werte beider Prozessgrößen mit den Messergebnissen überein. Nach der Simulationsrechnung wirkt sich das Drehzahlverhältnis deutlicher auf das Zeitspanungsvolumen aus als auf die Antriebsmomente. Auch diese Aussage wird durch die zuvor beschriebenen Messergebnisse bestätigt. Demnach ist es möglich, den Einfluss der durch das Drehzahlverhältnis charakterisierten Bewegungsform auf den Prozessverlauf qualitativ vorherzubestimmen. Auf diese Weise lässt sich das Zeitspanungsvolumen durch eine geeignete Wahl der kinematischen Prozessparameter ohne experimentellen Aufwand maximieren.

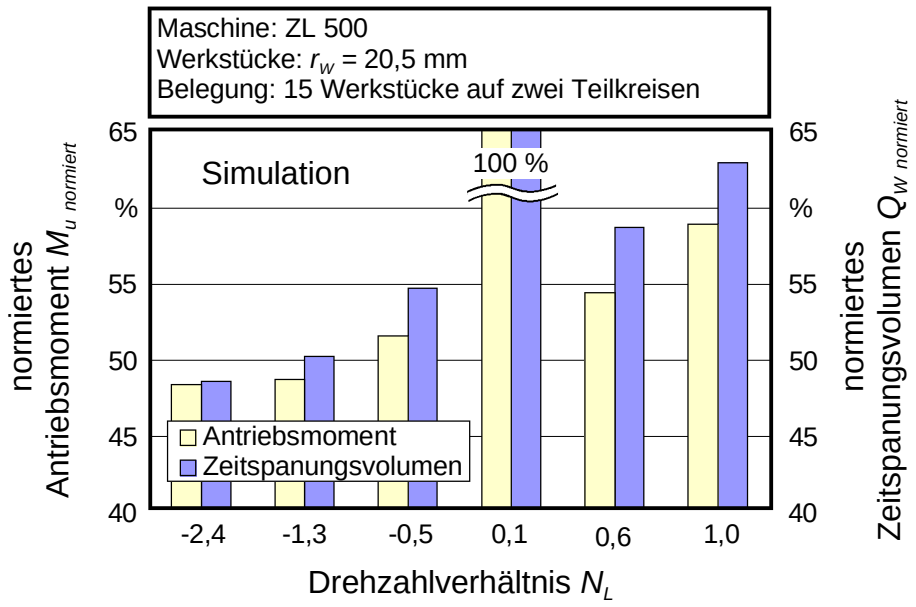


Bild 7.25: Simulation des normierten Antriebsmoments und des normierten Zeitspanungsvolumens für diese Versuchsreihe

Das Modell zur Simulation der Schleifscheibenbelastung weist beim Drehzahlverhältnis $N_L = 0$ eine Unendlichkeitsstelle ohne Vorzeichenwechsel auf. Wie die experimentellen Ergebnisse bestätigen, handelt es sich dabei nicht um einen rein mathematischen Effekt, der durch die Definitionslücke der Bahngeschwindigkeiten an diesem Punkt entsteht. Vielmehr erreichen die summarischen Belastungen der Schleifscheiben in diesem Bereich tatsächlich

maximale Werte und haben so maximale Zeitspanungsvolumina zur Folge. Natürlich lässt sich die Unendlichkeitsstelle der Simulationsfunktion nicht experimentell nachweisen, da das Zeitspanungsvolumen nicht beliebig steigerbar ist. Daher sind mit dem Modell der Schleifscheibenbelastung nur qualitative Aussagen über reale Prozesse möglich. Weitere Ursachen für Abweichungen zwischen Simulation und Messung ergeben sich durch Wechselwirkungen beider Schleifscheiben, durch die Eigendrehung der Werkstücke und aufgrund der dem Modell zugrundeliegenden Einschränkungen wie z. B. der idealen Geometrien der Wirkpartner.

In **Bild 7.26** sind die arithmetischen Mittenrauwerte R_a und Ebenheitsfehler f_E der Benzinpumpendeckel aus Al_2O_3 nach der Bearbeitung von jeweils vierzig Chargen mit unterschiedlichen Drehzahlverhältnissen N_L eingetragen. Beide Qualitätsmerkmale zeigen in Abhängigkeit vom Drehzahlverhältnis qualitativ den gleichen Verlauf wie Antriebsmomente und Zeitspanungsvolumina. Auffallend ist der besonders schlechte Durchschnittswert von f_E = 9,4 µm für den Ebenheitsfehler bei einem Drehzahlverhältnis von N_L = 0,1. Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass im untersuchten Parameterbereich mit niedrigen Zeitspanungsvolumina besonders gute Arbeitsergebnisse erzielt werden, während hohe Zeitspanungsvolumina immer auch eine Verminderung der Werkstückqualität mit sich bringen.

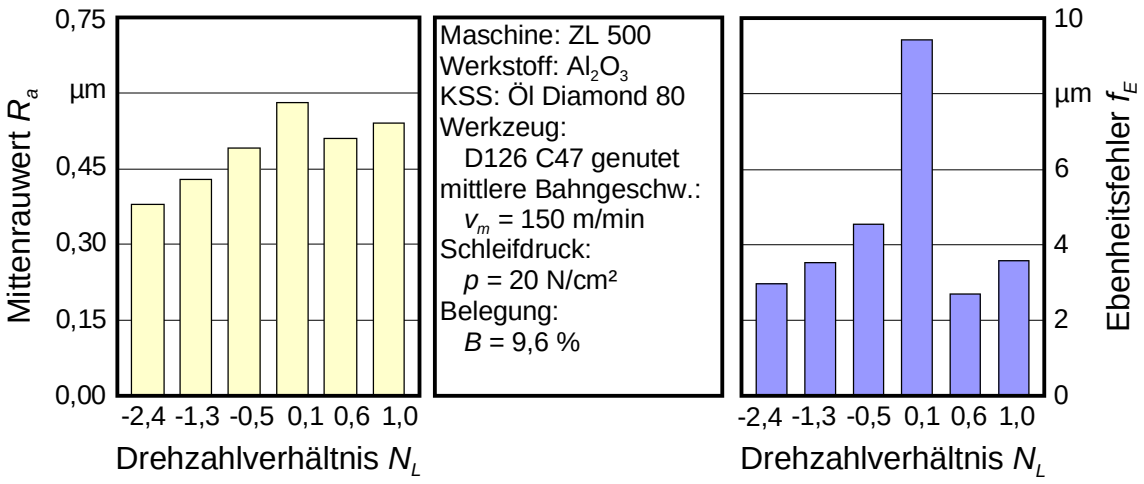


Bild 7.26: Arithmetischer Mittenrauwert und Ebenheitsfehler der Benzinpumpendeckel aus Al_2O_3 nach der Bearbeitung mit unterschiedlichen Drehzahlverhältnissen

Bearbeitung von Si_3N_4

Bei der Bearbeitung von Siliciumnitrid zeigten sich für die Schleifzeit als Funktion der Chargenanzahl wie zuvor sägezahnartige Verläufe. Die Zunahme der Schleifzeiten hing stark von den kinematischen Parametern ab. So wurde die Versuchsreihe mit N_L = -2,4 aufgrund zu langer Schleifzeiten nach der 18. Charge abgebrochen. Mit zunehmendem Wert für das Drehzahlverhältnis wurden tendenziell mehr Chargen geschliffen. Mit N_L = 0,6 und 1,0 wurden jeweils 40 Chargen bearbeitet. Offensichtlich besitzen die kinematischen Parameter einen Einfluss auf das Verschleißverhalten der Schleifscheibenbeläge.

Die Balkendiagramme in **Bild 7.27** stellen die Antriebsmomente M_u und die flächenbezogenen Zeitspanungsvolumina Q''_W beim Schleifen von Si_3N_4 mit unterschiedlichen Drehzahlverhältnissen N_L dar. Die Mittelwerte wurden über alle jeweils bearbeiteten Chargen gebildet. Prinzipiell zeigen sich qualitativ ähnliche Verläufe wie beim Schleifen von Aluminiumoxid. Beim absoluten Maximum beim Drehzahlverhältnis $N_L = 0{,}1$ treten die höchsten Antriebsmomente mit $M_u = 12{,}3$ Nm und die größten flächenbezogenen Zeitspanungsvolumina mit $0{,}082 \cdot 10^{-3}$ mm³/(s·mm²) auf. Wie bei Al_2O_3 beeinflusst das Drehzahlverhältnis das Zeitspanungsvolumen wesentlich deutlicher als das Antriebsmoment.

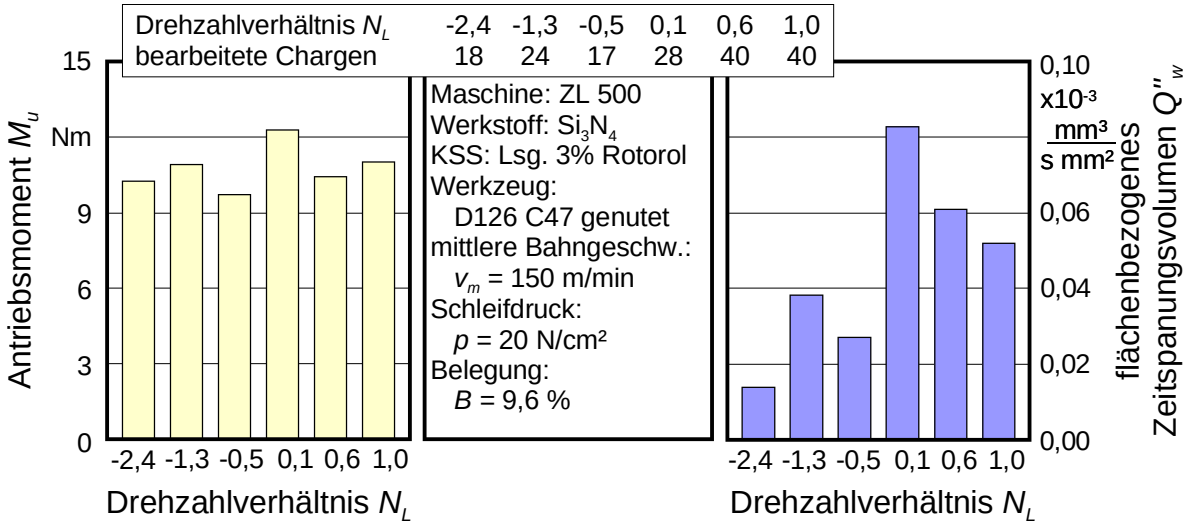


Bild 7.27: Antriebsmoment und flächenbezogenes Zeitspanungsvolumen bei der Bearbeitung von Si_3N_4 mit unterschiedlichen Drehzahlverhältnissen

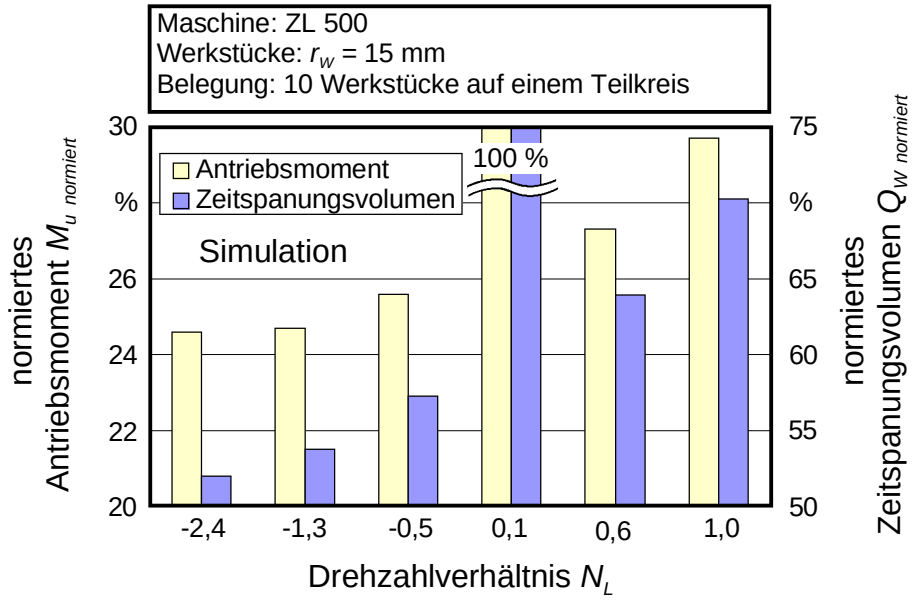


Bild 7.28: Simulation des normierten Antriebsmoments und des normierten Zeitspanungsvolumens für diese Versuchsreihe

Diesen Effekt zeigen auch die in **Bild 7.28** dargestellten Ergebnisse der Simulationsrechnung, mit der das normierte Antriebsmoment $M_{u\ normiert}$ und das normierte Zeitspanungsvolumen $Q_{w\ normiert}$ berechnet wurden. Die Übereinstimmung der simulierten Werte mit den Messergebnissen ist bei diesem Werkstoff geringer als bei Al_2O_3. Insbesondere bei N_L = 0,5 und 1,0 ergeben sich Unterschiede. Diese sind auf den instabilen Schärfezustand der Schleifscheiben und die starken Schwankungen der Prozessgrößen beim Schleifen von Si_3N_4 zurückzuführen. Durch die unterschiedlichen Verschleiß- und Schärfezustände in einzelnen Bereichen der Schleifscheiben ist eine der Voraussetzungen zur Modellierung der Schleifscheibenbelastung bereits nach wenigen bearbeiteten Chargen nicht mehr erfüllt.

Fazit zur Variation des Drehzahlverhältnisses

Im Rahmen der Variation des Drehzahlverhältnisses bestätigt sich, dass die kinematischen Prozessparameter ein großes Potenzial zur Prozessbeeinflussung besitzen. Sowohl der Prozessverlauf als auch das Arbeitsergebnis werden durch die Drehzahlen von innerem Stiftkranz und der unteren Schleifscheibe deutlich beeinflusst. Die Begründung für diesen Zusammenhang liegt nicht in einer von der Bahnbewegung abhängigen Verschleißausprägung der Werkzeuge, sondern in einer unterschiedlichen summarischen Belastung der Schleifscheiben. Bei allen Versuchen zeigen sich gute Oberflächenrauheiten und geringe Ebenheitsfehler zusammen mit geringen Zeitspanungsvolumina und niedrigen Antriebsmomenten. Hohe Zeitspanungsvolumina haben dementsprechend immer schlechte Arbeitsergebnisse zur Folge.

Für den praktischen Einsatz des Planschleifens mit Planetenkinematik leitet sich aus dieser Versuchsreihe die Erkenntnis ab, dass die Druckvariation allein die Möglichkeiten von Vor-, Haupt- und Nachbearbeitung nur zu einem Teil ausschöpft. Durch die Kombination von verschiedenen Arbeitsdrücken und verschiedener Drehzahlverhältnisse in den Prozessphasen kann die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens signifikant gesteigert werden. Insbesondere bei der Bearbeitung von Al_2O_3 zeigen sich gute Übereinstimmungen der experimentellen Ergebnisse mit den Simulationsberechnungen. Bei der Bearbeitung von Si_3N_4 kommt es zu Abweichungen, die auf den inhomogenen Kornverschleiß der Schleifbeläge zurückzuführen sind. Zur Ermittlung der Drehzahlverhältnisse, die ein besonders hohes Zeitspanungsvolumen oder ein besonders gutes Arbeitsergebnis erwarten lassen, ist der in Kapitel 4 dieser Arbeit beschriebene Algorithmus zur Simulation der Schleifscheibenbelastung gut geeignet. Mit zunehmender Bearbeitungsdauer nimmt die Genauigkeit der Modellvoraussagen durch den Verschleiß der Schleifscheiben insgesamt ab.

7.8 Einfluss der Geometrie der Werkstückhalter

In der folgenden Versuchsreihe wurde am Werkstoff Al_2O_3 der Einfluss der Werkstückhaltergeometrie auf die Prozess- und Zielgrößen untersucht. In Kapitel 4 wurde deutlich, dass die Belastung der Schleifscheiben neben den kinematischen auch durch die geometrischen Parameter beeinflusst wird. In diesem Sinn stellt die Geometrie der Werkstückhalter eine Stellgrö-

ße der Schleifscheibenbelastung dar. Bei allen bisher beschriebenen Untersuchungen mit der Belegung von B = 9,6 % wurden jeweils 15 Werkstücke in fünf Haltern bearbeitet. Dafür kamen Werkstückhalter mit vier Aussparungen auf dem Teilkreisradius 54 mm und zwei Aussparungen auf einem kleineren Teilkreis mit einem Radius von 23 mm zum Einsatz. Jeweils ein Drittel der Werkstücke wurde auf dem inneren und zwei Drittel auf dem äußeren Teilkreis platziert. Für diese Versuchsreihe standen zusätzlich Halter mit sechs Aussparungen auf einem Teilkreis mit dem Radius von 54 mm zur Verfügung. Im Gegensatz zur Variation der Belegung (Kapitel 7.6) wurde bei dieser Versuchsreihe die Anordnung der Werkstücke und damit der Verlauf der Gestaltfunktion bei konstanter Anzahl z_W verändert.

Bild 7.29 zeigt die Antriebsmomente M_u und die flächenbezogenen Zeitspanungsvolumina Q''_W bei der Bearbeitung von Al_2O_3 mit den beiden Werkstückhaltergeometrien. Die hellen Balken repräsentieren Messergebnisse, die dunklen stehen für berechnete Werte. Die gemessenen Antriebsmomente liegen bei der Belegung auf nur einem Teilkreis um etwa 10 % höher als im Standardhalter mit zwei Teilkreisen. Die Simulationsrechnung bildet diesen Unterschied qualitativ nach. Die flächenbezogenen Zeitspanungsvolumina liegen bei der Anordnung aller Werkstücke auf einem Teilkreis um etwa 12 % niedriger als bei einer Belegung auf zwei Teilkreisen. Auch dieses Ergebnis wird von der Simulation der Schleifscheibenbelastung qualitativ richtig wiedergegeben. Bei den beobachteten technologischen Effekten handelt es sich demnach um systematische Änderungen der Schleifscheibenbelastung. Durch Anordnung der Werkstücke auf zwei Teilkreisen entsteht summarisch eine höhere Schleifscheibenbelastung, durch die höhere Zeitspanungsvolumina erreicht werden.

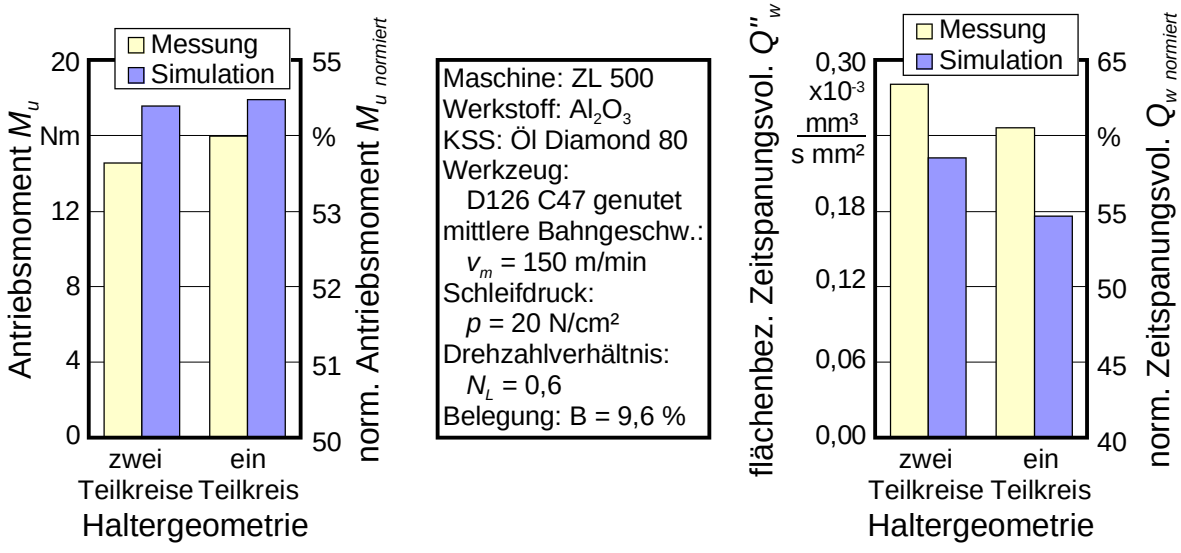


Bild 7.29: Antriebsmoment und flächenbezogenes Zeitspanungsvolumen bei der Bearbeitung von Al_2O_3 in verschiedenen Werkstückhaltern

In **Bild 7.30** sind die arithmetischen Mittenrauwerte R_a und die Ebenheitsfehler f_E nach der Bearbeitung von jeweils 40 Chargen mit Werkstückhaltern unterschiedlicher Geometrie dargestellt. Hinsichtlich beider Qualitätskriterien zeigt die Belegung der Werkstückhalter auf

zwei Teilkreisen Vorteile: der durchschnittliche arithmetische Mittenrauwert liegt mit R_a = 0,51 µm um 12 %, der Ebenheitsfehler mit f_E = 2,7 µm sogar um 37 % niedriger als bei Anordnung der Werkstücke auf zwei Teilkreisen.

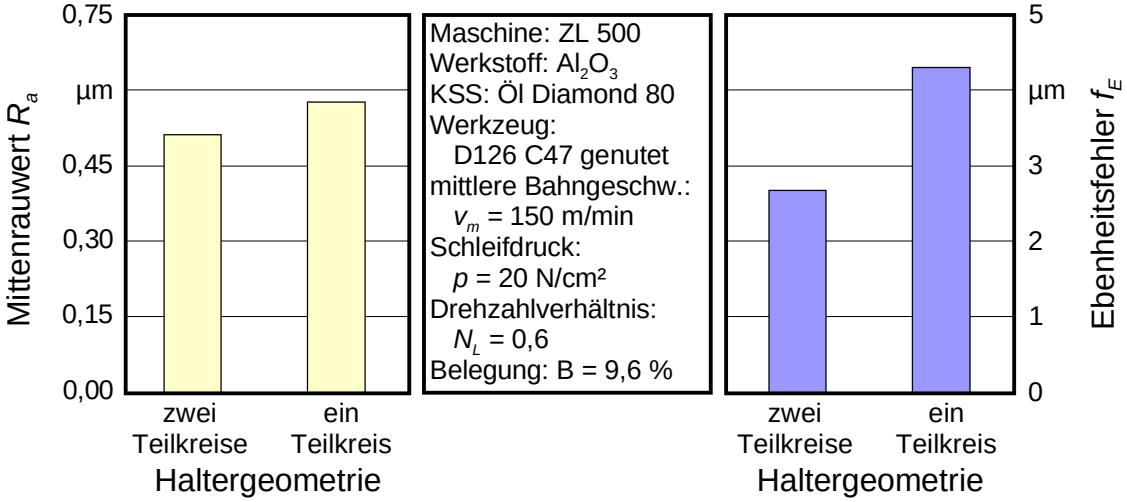


Bild 7.30: Arithmetischer Mittenrauwert und Ebenheitsfehler nach der Bearbeitung von Al_2O_3 in verschiedenen Werkstückhaltern

Die Haltergeometrie wirkt sich auch auf den Verschleiß der Schleifscheiben aus. Die Vermessung der unteren Schleifscheibe nach beiden Versuchsreihen ergab qualitativ vergleichbare Verschleißprofile mit einem Beanspruchungsmaximum in der Mitte des Schleifbelags. Die abgetrennte Profilhöhe lag jedoch bei Anordnung aller Werkstücke auf nur einem Teilkreis fast dreimal höher als bei der Standardanordnung auf zwei Teilkreisen. Entsprechend ergibt sich für das Schleifverhältnis G der Wert 282, während es unter Anordnung aller Werkstücke auf einem Teilkreis nur G = 99 beträgt. Das erhöhte Antriebsmoment, das bei Anordnung der Werkstücke auf einem Teilkreis trotz niedrigerer Zeitspanungsvolumina zu beobachten ist, resultiert demnach aus dem erhöhten Verschleiß an den Schleifscheiben.

Fazit zur Variation der Haltergeometrie

Die Anordnung der Werkstücke im Halter stellt einen wichtigen Parameter dar, der zur wirtschaftlichen und qualitativen Optimierung des Planschleifens mit Planetenkinematik berücksichtigt werden muss. Im Gegensatz zu den bisherigen Ergebnissen zeigt sich hier eine Anomalie: bei der Variation der Halterbelegung wurden in dem Versuch mit den höheren Zeitspanungsvolumina die besseren Arbeitsergebnisse bezüglich Mittenrauwert und Ebenheitsfehler erzielt. Die Art der Halterbelegung stellt damit den einzigen Prozessparameter dar, mit dem der Prozessverlauf und die Qualität der erzeugten Funktionsflächen gleichzeitig positiv beeinflusst werden.

Unter diesem Gesichtpunkt findet die Auslegung der Haltergeometrie im industriellen Alltag bisher keine ausreichende Beachtung. Die experimentelle Optimierung erfordert aufgrund der

unendlichen Vielfalt von Möglichkeiten einen kaum vertretbarem Aufwand. Das in dieser Arbeit vorgestellte Modell zur Simulation der Schleifscheibenbelastung ermöglicht simulatorisch die Auswahl von geeigneten Haltergeometrien.

7.9 Einfluss der Drehrichtung der oberen Schleifscheibe

Bisher wurde die obere Schleifscheibe stets mit gleicher Drehzahl, aber in entgegengesetzter Drehrichtung zur unteren Schleifscheibe angetrieben. Auf diese Weise sollen durch entgegengesetzte Angriffsrichtungen der tangentialen Schleifkraft an der Werkstückober- und Unterseite die resultierenden Schleifkräfte minimiert werden. Im Rahmen dieser Versuchsreihe wird die Bearbeitung unter Gleichlauf beider Schleifscheiben am Werkstoff Al_2O_3 untersucht.

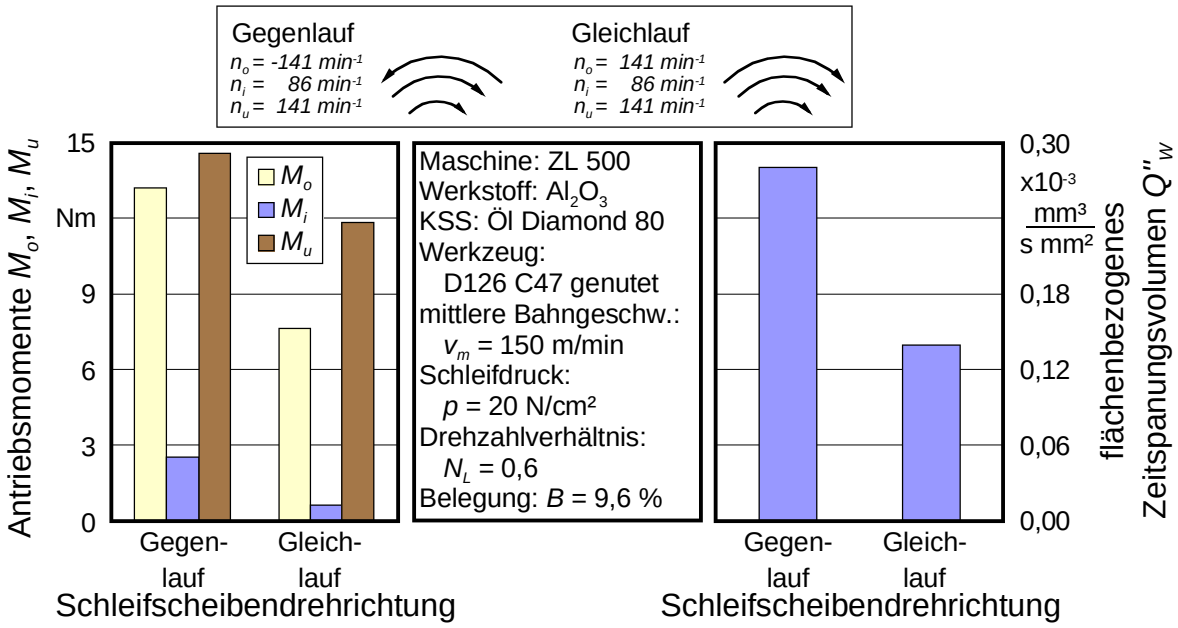


Bild 7.31: Antriebsmoment und flächenbezogenes Zeitspanungsvolumen bei der Bearbeitung von Al_2O_3 im Gegen- und im Gleichlauf der beiden Schleifscheiben

Bild 7.31 zeigt im linken Diagramm die Antriebsleistungen M_o, M_i und M_u für die Betriebsarten Gleich- und Gegenlauf beider Schleifscheiben. Im rechten Diagramm sind die flächenbezogenen Zeitspanungsvolumina Q''_W dargestellt. Das Antriebsmoment M_o beträgt im Gleichlauf nur 7,7 Nm gegenüber 13,2 Nm im Gegenlauf. Grund hierfür ist die mittlere Bahngeschwindigkeit zwischen Werkstücken und oberer Schleifscheibe, die im Gleichlauf mit 150 m/min niedriger liegt als im Gegenlauf mit $v_{m\,oben}$ = 190 m/min. Die Werkstückhalter werden im Gleichlauf von beiden Schleifscheiben mitgeschleppt, wodurch das Antriebsmoment M_i mit 0,6 Nm auf einen Wert unterhalb des Leerlaufmoments des inneren Stiftkranzes sinkt. Das Moment M_u geht im Gleichlauf im Gegensatz zum Gegenlauf um fast 20 % zurück. Trotz gleichbleibender Makrokinematik ändern sich demnach die Schleifverhältnisse zwischen Werkstücken und unterer Schleifscheibe. Dafür sprechen auch die niedrigen flächenbezogenen Zeitspanungsvolumina, die mit $0{,}14 \cdot 10^{-3}$ mm³/(s·mm²) nur etwa halb so hoch liegen

wie im Gegenlauf. Der Grund für dieses Ergebnis liegt im veränderten Angriff der Tangentialkräfte am Werkstück, wodurch ein verändertes Eigendrehverhalten zu erwarten ist.

In **Bild 7.32** sind die arithmetischen Mittenrauwerte R_a von Werkstückunter- und oberseiten sowie die Ebenheitsfehler f_E nach der Bearbeitung von Al_2O_3 im Gegen- und Gleichlauf dargestellt. Die Oberflächenrauheit zeigt keine Abhängigkeit von der Drehrichtung der oberen Schleifscheibe, obwohl Antriebsmomente und Zeitspanungsvolumina sich deutlich unterscheiden. Auch zwischen den Rauheitskennwerten an Unter- und Oberseiten der Werkstücke bestehen keine deutlichen Unterschiede. Im Gegensatz dazu zeigen sich bei der Bearbeitung im Gleichlauf geringfügig schlechtere Ebenheiten als beim Schleifen im Gegenlauf.

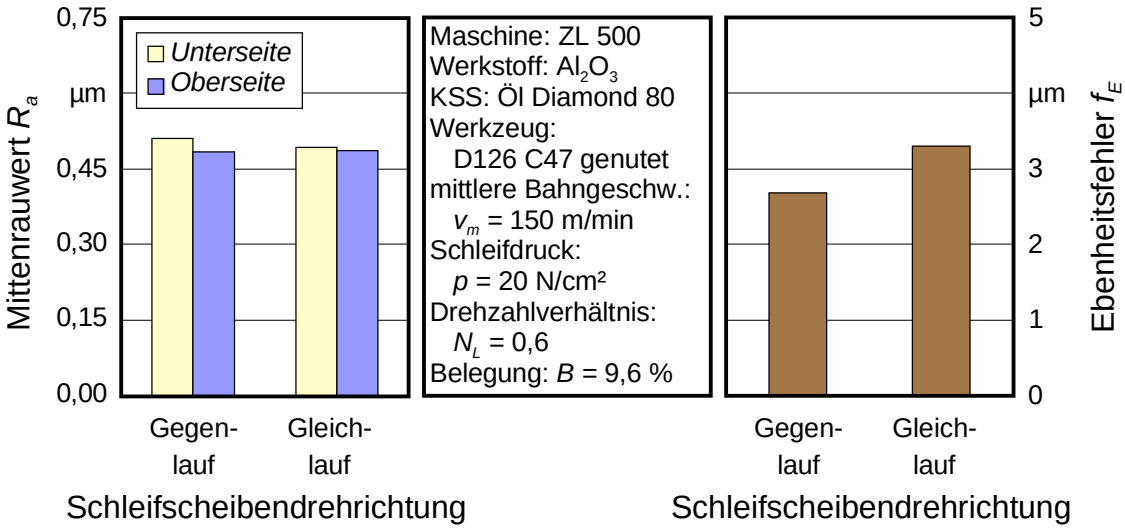


Bild 7.32: Arithmetischer Mittenrauwert und Ebenheitsfehler nach der Bearbeitung im Gegen- und im Gleichlauf beider Schleifscheiben

Fazit zur Untersuchung der Drehrichtung der oberen Schleifscheibe

Insgesamt erweist sich ein Betrieb beider Schleifscheiben im Gegenlauf als vorteilhaft. Sowohl bezüglich der Zeitspanungsvolumina als auch hinsichtlich der Qualitätskriterien wurden hier die besseren Ergebnisse erzielt.

7.10 Zusammenfassung der experimentellen Ergebnisse

Bei nahezu allen in diesem Kapitel beschriebenen Untersuchungen traten hochwertige Werkstückqualitäten im Zusammenhang mit niedrigen Zeitspanungsvolumina auf. Hohe zeitbezogene Teilehöhenreduktionen gehen fast immer mit verminderten Qualitäten einher. Um durch Planschleifen mit Planetenkinematik in kurzer Zeit optimale Ergebnisse zu erreichen sind daher mehrstufige Prozesse mit Schrupp- und Schlichtphasen erforderlich, um Zeitspanungsvolumen und Arbeitsergebnis nacheinander zu optimieren.

Ein grundlegender Einfluss auf das Zerspanen durch Planschleifen mit Planetenkinematik kommt der Auswahl von geeigneten Werkzeugen und Kühlschmierstoffen für jeden Bearbeitungsfall zu. Die Bearbeitungseigenschaften von Kühlschmierstoffen und Schleifscheiben können sich in Abhängigkeit vom Werkstückwerkstoff signifikant unterscheiden. Durch eine Erhöhung der mittleren Bahngeschwindigkeit lässt sich das Zeitspanungsvolumen in weiten Bereichen steigern. Die physikalischen Zerspanungsbedingungen am einzelnen Schneidkorn ändern sich dadurch in der Regel nicht. Der Schleifdruck ist ein wesentlicher Parameter zur Steuerung der Selbstschärfung der Schleifscheiben. Hohe Drücke haben in der Regel eine Verschlechterung des Arbeitsergebnisses zur Folge. Die Bearbeitung größtmöglicher Teilechargen ist aus ökonomischer Sicht vorteilhaft, da die Anzahl der Be- und Entladevorgänge abnimmt und so der Hauptzeitanteil an der gesamten Maschinenzeit steigt. Zu große Belegungen können den Prozess behindern, wenn die Zerspanungsprodukte nicht aus der Wirkzone abtransportiert werden. Mit steigender Chargenmenge sind im Allgemeinen bessere Qualitäten erreichbar. Das Drehzahlverhältnis stellt einen Bearbeitungsparameter dar, durch den die summarische Belastung der Schleifscheiben und damit das Zeitspanungsvolumen und die Antriebsmomente direkt beeinflusst werden. Mit Hilfe des Modells der Schleifscheibenbelastung sind qualitative Vorhersagen möglich, bei welchen Drehzahlen und bei welchen Anordnungen der Werkstücke im Halter maximale Zeitspanungsvolumina zu erwarten sind.

Zur Prozessauslegung gibt **Tabelle 7.3** einen Überblick über die Auswirkungen der untersuchten Parameter. Der Aufstellung in Form einer Matrix kann entnommen werden, wie sich eine Erhöhung des Werts der jeweiligen Einstellgröße auf die Prozess- und Zielgrößen auswirkt.

Tabelle 7.3: Qualitative Auswirkungen der Erhöhung eines Einstellwerts auf Prozess- und Zielgrößen

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

!! deutlicher Einfluss, nicht linear quantifizierbar

			Prozessgrößen		Zielgrößen			
			Antriebsmoment	flächenbezogenes Zeitspanungsvolumen	arithmetischer Mittenrauwert	Ebenheitsfehler	Höhenstreuung	Schleifverhältnis
			M_u	Q''_W	R_a	f_E	S_{hW}	G
Einstellparameter	Kühlschmierstoff	*KSS*	!!	!!	!			
	mittlere Diamantkorngröße	D	+	+	+	o		!!
	mittlere Bahngeschwindigk.	v_m	++	++	+	o		
	Schleifdruck	p	++	++	-	++	++	
	Belegung	B	++	o	-	--	-	
	Drehzahlverhältnis	N_L	!!	!!	!!	!!		

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen wurde bestätigt, dass das Planschleifen mit Planetenkinematik in seiner heutigen Form erhebliche Optimierungspotenziale aufweist. Ohne Modifikationen der Maschinen lassen sich durch Ausschöpfung der kinematischen Möglichkeiten deutliche Steigerungen der Leistungsfähigkeit erreichen.

8 VERFAHRENSVERGLEICH

8.1 Allgemeines

Das Planparallelläppen ist seit einigen Jahrzehnten Gegenstand vielfältiger Forschungsarbeiten. Aufgrund immanenter Vorteile wie der Isotropie der erzeugten Oberflächen, der minimalen Beanspruchung der Werkstücke während der Bearbeitung und der Bearbeitbarkeit eines sehr großen Werkstückspektrums hinsichtlich Geometrie und Werkstoff wird dieses Verfahren auch zukünftig Bestandteil industrieller Prozessketten bleiben. Das Planschleifen mit Planetenkinematik entwickelte sich aus dem Läppen zwischen zwei Scheiben und steht damit in starker Konkurrenz zu diesem Verfahren. Zielrichtung aktueller Forschungsarbeiten zum Schleifen ist neben der allgemeinen Leistungssteigerung die Zerspanbarkeit von neueren Werkstoffen wie Keramiken, Hartmetallen, Nichteisenlegierungen oder faserverstärkten Werkstoffen. Im Bereich der Werkzeugtechnik wurde die Entwicklung von CBN- und Diamantschleifscheiben in den letzen Jahren stark vorangetrieben.

Aufgrund der kinematischen Übereinstimmung beider Verfahren überschneiden sich die potenziellen Anwendungsfelder in weiten Bereichen. Viele Unternehmen ersetzen Läppvorgänge schrittweise durch Planschleifen mit Planetenkinematik. In diesem Kapitel werden die technologischen und wirtschaftlichen Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen dem Läppen und dem Planschleifen mit Planetenkinematik analysiert. Damit ist eine Wissensbasis gegeben, auf deren Grundlage in der industriellen Praxis Entscheidungen für das richtige Verfahren getroffen werden können.

Notwendiges Kriterium für die Auswahl eines Fertigungsverfahrens ist immer die qualitative Erfüllung der geometrischen und physikalischen Anforderungen an die bearbeitete Funktionsfläche. Erst wenn die Funktionsfähigkeit eines Werkstücks in vollem Umfang gewährleistet ist, spielen wirtschaftliche Kriterien für die Verfahrensauswahl eine Rolle. Aus diesen Gründen bildet in diesem Kapitel ein technologischer Verfahrensvergleich die Grundlage für eine spätere Abschätzung der Fertigungskosten.

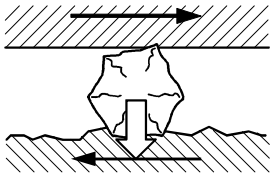
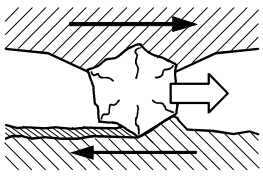
8.2 Technologischer Verfahrensvergleich

8.2.1 Allgemeines

Geometrische Anforderungen an Ebenheit und Planparallelität zweier Funktionsflächen lassen sich mit dem Konzept von Zweischeibenschleif- oder Läppmaschinen mit pendelnd gelagerter oberer Scheibe hervorragend erfüllen. Die unterschiedlichen Werkzeuge bei der Läpp- und Schleifbearbeitung haben charakteristische Prozessbedingungen und Abtrennmechanismen zur Folge. Die jeweiligen Besonderheiten beeinflussen das Zerspanungsverhalten und müssen bei der Prozessführung berücksichtigt werden. Auch für die konstruktive Auslegung der Be-

arbeitungsmaschinen sowie der Einsatz von Zusatzaggregaten zur Vor- und Aufbereitung von Fertigungshilfsstoffen ist die Art des Fertigungsverfahrens von Bedeutung. **Tabelle 8.1** stellt charakteristische Eigenschaften beider Verfahren gegenüber.

Tabelle 8.1: Verfahrensvergleich Läppen - Planschleifen mit Planetenkinematik [nach Hol94]

	Läppen	**Schleifen**
		
Wirkpaar		
Schneidkorn	loses Korn in Fluid verteilt, formübertragendes Gegenstück	festes Korn in Bindungsmatrix
Wirkprinzip	kraftgebunden	bahngebunden
Wirkbewegung	Abrollbewegung, Eindrücken von Kornkanten und -spitzen	Ritzbewegung der Körner
Hauptwirkrichtung	orthogonal zur Oberfläche	parallel zur Oberfläche
Spanerzeugung	durch Überschreiten der Druckfestigkeit	durch Überschreiten der Scherfestigkeit
Temperaturen	niedrig	höher
Oberflächenausbildung		
mikroskopisch	Kratertopographie	Ritzspuren mit Materialaufwerfungen
makroskopisch	keine gerichteten Bearbeitungsspuren, homogen rauh und matt	bogenförmige Schleifriefen ohne bevorzugte Richtung, seidenmatt bis glänzend
sonstige Eigenschaften		
Schmutzentstehung	hoch	gering
Kombination Werkstoff-Schneidstoff	flexibel	weniger flexibel, genaue Abstimmung erforderlich
Lärmemission	gering	hoch
automatisierte Be- und Entladung	aufgrund der Schmutzentstehung schwierig	einfacher

8.2.2 Maschinenaufbau

Die meisten Hersteller von Zweischeibenschleif- und Läppmaschinen bieten Baugrößen mit Scheibendurchmessern zwischen 300 und 2000 mm an. Einscheibenläppmaschinen werden in Ausnahmefällen auch mit größeren Scheibendurchmessern angeboten. Die Maschinenbezeichnung beinhaltet neben der Bauart zumeist den maximalen äußeren Durchmesser der einsetzbaren Läpp- oder Schleifscheiben. Den Kundenwünschen entsprechend erfolgt die Aus-

rüstung einer Basismaschine zum Läppen oder Planschleifen mit Planetenkinematik. Schleifmaschinen werden üblicherweise mit steiferen Gestellen und mit größeren Antriebsleistungen ausgestattet. Neben den häufig verwendeten C-förmigen Maschinengestellen kommen auch Zweischeibenmaschinen in Portalbauweise zum Einsatz, bei denen die obere Scheibe höhenverstellbar, aber nicht ausschwenkbar ist.

Antriebsleistung

Der Antrieb abrollender Körner erfordert weniger Energie als der ritzender Körner [Abr91]. Darüber hinaus sind beim Schleifen wesentlich höhere Scheibendrehzahlen realisierbar als bei Läppverfahren, bei denen die Schneidkörner bei zu hohen Drehzahlen ungenutzt aus dem Arbeitsraum geschleudert werden können. Aus diesen Gründen statten die Hersteller Zweischeibenmaschinen zur Schleifbearbeitung mit größeren Antriebsleistungen aus als solche zum Läppen, wie **Bild 8.1** am Beispiel der Maschinenfamilie DLM der A. W. Stähli AG, Pieterlen, Schweiz, zeigt [Stäa]. Als Funktion der Scheibenfläche sind die Leistungen für den unteren Scheibenantrieb für die Schleif- und die Läppbearbeitung dargestellt. Weiterhin sind die für die Scheibenkühlung vorgesehenen Leistungen eingetragen, die unabhängig vom Fertigungsverfahren ausgelegt werden.

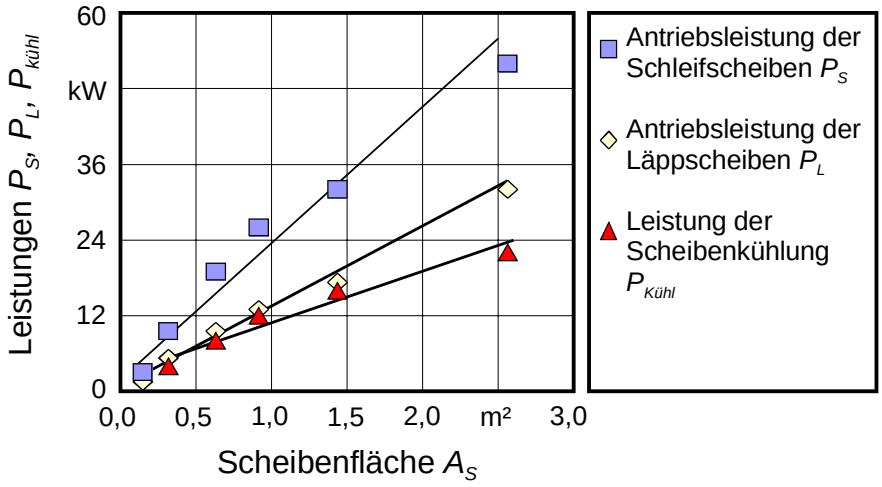


Bild 8.1: Vergleich der Antriebs- und Kühlleistung von Schleif- und Läppmaschinen

Mit geringen Abweichungen lassen sich die Verläufe aller drei Kurven linear annähern. Die Steigungen der Näherungsgeraden entsprechen den auf die Schleifscheibenfläche bezogenen Leistungen. Für diese flächenbezogene Antriebsleistung ergibt sich beim Schleifen der Wert 21,8 kW/m^2. Die spezifische Antriebsleistung von Läppmaschinen beträgt mit 12,7 kW/m² weniger als 60 % davon. Die Auslegung der Aggregate zur Kühlung der Schleifscheibenflansche hängt bei dieser Maschinenfamilie nicht vom Bearbeitungsverfahren ab. Die flächenbezogene Kühlleistung beträgt etwas weniger als 10 kW/m². Es ist zu beachten, dass diese Kühlleistung auf beide Scheiben aufgeteilt wird, während die Antriebsleistung pro Scheibe zur Verfügung steht.

Zusatzaggregate

Vor Prozessbeginn und während der gesamten Bearbeitung ist eine Aufbereitung der Läppsuspension erforderlich. Der Kornwerkstoff und das Trägerfluid werden in einem Mengenverhältnis zwischen 1:2 und 1:8 vermischt und dem Prozess durch konstantes Tropfen oder periodisch zugeführt. Aufgrund der abrasiven Wirkung der Körner und der Neigung zur Bildung von Agglomeraten müssen Anlagen zur Läppmittelaufbereitung häufig gereinigt und gewartet werden. Ein Teil des Läppgemisches wird durch die Relativbewegungen von der Wirkfläche des Läppwerkzeugs abgestreift und nimmt nicht an der Bearbeitung teil. Durch geeignete Filteranlagen können die unverschlissenen Körner, die noch eine bestimmte Mindestgröße aufweisen, aus der verbrauchten Suspension herausgefiltert und dem Prozess erneut zugeführt werden. Infolge der Bearbeitung mit frei beweglichen Läppkörnern unterliegen die Wirkpartner starker Verschmutzung. Eine Übertragung von abrasiven Kornpartikeln in nachfolgende Polierprozesse kann die Funktionsflächen ganzer Werkstückchargen unbrauchbar machen. Daher werden die Werkstücke nach dem Läppen meist mit Hilfe von Ultraschall-Reinigungsanlagen gesäubert. Die erforderliche Kapazität dieser Reinigungsanlagen hängt stark vom zu bearbeitenden Werkstückspektrum und den Stückzahlen ab.

Beim Planschleifen mit Planetenkinematik kommt wie bei anderen Schleifverfahren auch ein Kühlschmierstoff zum Einsatz. Dieser durchströmt den Arbeitsraum, nimmt dabei einen Teil der Zerspanungswärme auf und führt die abgetrennten Partikel von Werkstücken und Schleifscheiben mit sich. Bei ausreichendem Massenunterschied zwischen Werkstückwerkstoff und Kühlschmierstoff werden Zentrifugen zur Reinigung eingesetzt.

Automatisierte Be- und Entladung

Für die automatisierte Be- und Entladung von Läpp- und Schleifprozessen existieren unterschiedliche Konzepte. Während der Bearbeitung einer Charge erfolgt zumeist die Beladung weiterer Werkstückhalter mit den nächsten Teilen. Nach dem Ende der Bearbeitung und dem Abbremsen der Scheiben und Stiftkränze hebt die obere Scheibe ab. Der äußere Stiftkranz senkt sich ganz oder teilweise ab (**Bild 8.2**), und ein oder mehrere Beladetische fahren dicht an die Scheibe heran. Über diese Tische werden die Werkstückhalter aus der Maschine entnommen und die Halter mit der nächsten Teilecharge in die Maschine eingeführt.

Bei einer Halbautomatisierung erfolgt die Bestückung der Halter von Hand, ihre Bewegung in den Arbeitsraum und wieder heraus dagegen automatisiert. Dieses Konzept findet bevorzugt beim Läppen Anwendung, da während der vergleichsweise langen Läppdauer ausreichend Zeit zur Belegung weiterer Werkstückhalter zur Verfügung steht. Aufgrund der starken Verschmutzung ist ein Transport der Werkstücke im Werkstückhalter zu nachfolgenden Läpp- oder Polierschritten ohne Zwischenreinigung nicht zu empfehlen.

Aufgrund der hohen Zeitspanungsvolumina beim Planschleifen mit Planetenkinematik ist hier teilweise nicht die Schleifzeit, sondern die für die Halterbestückung erforderliche Nebenzeit

maßgeblich für den Arbeitstakt. Hier kann sich der Einsatz einer vollautomatisierten Be- und Entladevorrichtung rentieren, die auch die Bestückung der Werkstückhalter mit Hilfe von Stangenmagazinen übernimmt. Bei einer Verkettung mehrerer Maschinen gleicher Baugröße ist der Werkstücktransport im Halter möglich, da die Gefahr des Verkratzens der Oberflächen gering ist. In diesem Fall wirken sich Kühlschmierstoffrückstände konservierend auf die Oberflächen aus und erleichtern den Transport.

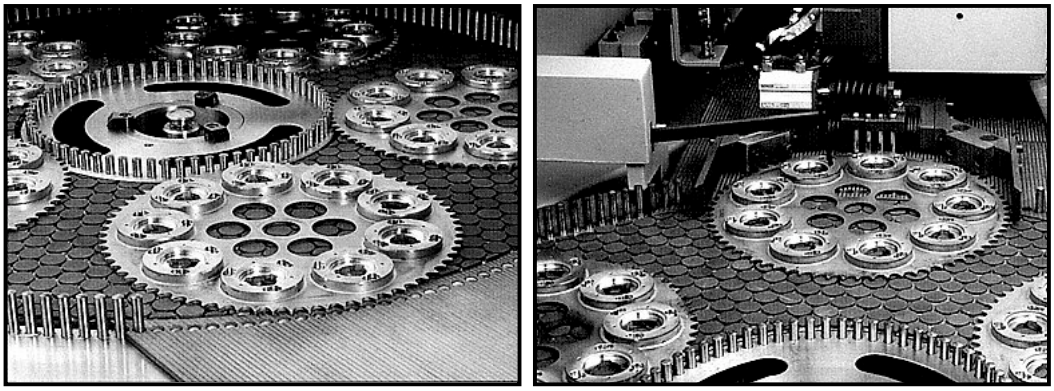


Bild 8.2: Absenken des Stiftkranzes und Einschieben der bestückten Halter [Wol96]

8.2.3 Werkzeugtechnik

Die Werkstoffabtrennung wird beim Planparallelläppen durch die Läppsuspension und die Läppscheiben bewirkt. Das Werkzeug entsteht im Bearbeitungsprozess durch das Zusammenwirken dieser beiden Komponenten [Eng97]. Da die Läppscheibe Teil des Werkzeugs ist und die Oberflächenentstehung am Werkstück direkt beeinflusst, kommt der Auswahl des Läppscheibenwerkstoffes eine ähnliche Bedeutung zu wie der des abrasiven Korns und des Läppfluids. Die Verwendung einer geeigneten Kombination ist Voraussetzung für die Fertigung hochwertiger Funktionsflächen. Neben metallischen Werkzeugen aus Gusseisen, Stahl oder Kupfer kommen auch multimetallische Läppscheiben zur Anwendung, in denen spiral- oder segmentförmige Elemente aus Kupfer oder Stahl mit dem gusseisernen Grundkörper kombiniert werden. Durch die Verbindung von harten und weichen Wirkflächen laufen verschiedenartige Abtrennmechanismen parallel ab.

Tabelle 8.2 zeigt die Schneidstoffe, die beim Läppen und beim Planschleifen mit Planetenkinematik zum Einsatz kommen, mit den entsprechenden Werkstückwerkstoffen.

Der Grundkörper beim Planschleifen mit Planetenkinematik beeinflusst den Prozess indirekt über seine Steifigkeit und seine Wärmeleitfähigkeit. Die Schleifbeläge bestehen aus einer der in Tabelle 8.2 genannten Schneidstoffarten in Bindungen aus Kunstharz, Keramik oder Bronze. Beläge mit Korund- oder Siliciumkarbidkörnungen werden zumeist als Vollbeläge ausgeführt. Scheiben aus den teureren Kornwerkstoffen CBN und Diamant können aus Pellets bestehen, die auf einen Grundkörper aus Aluminium oder Gusseisen aufgeklebt werden. Auf

diese Weise sind Scheiben beliebiger Größe belegbar. Bis zu einem Arbeitsdurchmesser von 700 mm sind auch Schleifscheiben mit einteiligem Belag erhältlich. Zum Transport von Spänen und Kühlschmierstoff können diese Beläge in unterschiedlicher Weise genutet werden. Für die beiden letzten Kornwerkstoffe kommen zumeist Kunstharzbindungen zum Einsatz.

Tabelle 8.2: Zuordnung von Kornwerkstoffen zu Werkstückwerkstoffen [nach Kön96]

← Härte steigt ← / ← Preis steigt ←	Schneidstoff		Werkstückwerkstoff
	Läppen	**Schleifen**	
	Aluminiumoxid (Korund)		ungehärteter Stahl, Gusseisen, Leicht- und Buntmetalle
	Siliciumkarbid		vergütete und legierte Stähle, Grauguss, Glas, Porzellan
	Borkarbid	CBN	Hartmetall, Keramik
	Diamant		

Konditionieren der Werkzeuge

Um gleichbleibende Genauigkeiten zu gewährleisten, müssen entstandene Verschleißprofile in bestimmten zeitlichen Abständen durch Abrichten ausgeglichen werden. Dieses erfolgt beim Läppen durch die Bearbeitung der Läppscheiben mit Abrichtringen, durch Überdrehen der Scheiben mit Hilfe eines implementierten Abdreharms oder durch das Einläppen beider Scheiben auf versetzten Achsen gegeneinander. Dabei handelt es sich um einen zeitlich und technologisch aufwändigen Prozess.

Im Vergleich zum Abrichten von Läppscheiben ist das Profilieren von Diamantschleifscheiben aufgrund der Härte des Werkstoffs wesentlich schwieriger. Mögliche Abrichtverfahren sind das sehr zeitaufwändige Läppen der Schleifscheiben auf einer entsprechend größeren Einscheibenläppmaschine oder der Einsatz von Abrichtsteinen, die aber einem immensen Verschleiß unterliegen. Scheiben mit weicheren Kornsorten oder besonders spröden Bindungswerkstoffen können abgedreht werden. Bei genuteten oder pelletierten Oberflächen bereitet das Profilieren durch den unterbrochenen Schnitt Probleme. Im Gegensatz zu Läppscheiben müssen Schleifscheiben nach der Profilierung evtl. geschärft und gereinigt werden. Ziel der Prozessauslegung muss es daher sein, eine gleichmäßige Belastung des Schleifbelags zu gewährleisten, um die durch das Abrichten erzeugten Profile für eine möglichst lange Bearbeitungszeit zu erhalten. Die Materialkosten der verwendeten Diamantbeläge liegen in der Regel so hoch, dass mehrmaliges Abrichten größerer Profilabweichungen die Wirtschaftlichkeit des Prozesses gefährden kann.

8.2.4 Bearbeitungsprozess

Zeitbezogene Teilehöhenreduktion

Die unterschiedlichen zeitbezogenen Teilehöhenreduktionen beim Läppen und beim Planschleifen mit Planetenkinematik hängen von den unterschiedlichen Wirkmechanismen und den möglichen Prozessgeschwindigkeiten ab. Die Relativgeschwindigkeiten beim Läppen sind begrenzt, da bei großen Drehzahlen Körner unbenutzt von der Läppscheibe geschleudert werden. Der Einsatz von Maschinen mit großen Scheibendurchmessern ermöglicht auch bei geringen Drehzahlen hohe Relativgeschwindigkeiten. In der Praxis wird mit mittleren Bahngeschwindigkeiten im Bereich zwischen 20 und 250 m/min geläppt.

Beim Planschleifen mit Planetenkinematik wird die Bahngeschwindigkeit zumeist durch die maximalen Drehzahlen einer Maschine begrenzt, so dass der Einsatzbereich zwischen 90 und 1000 m/min liegt. Bei Verwendung von vollen Schleifbelägen mit hohen Geschwindigkeiten kann es allerdings zu einem Aufschwimmen der Werkstücke auf Kühlschmierstofffilmen, dem sogenannten Aquaplaning- oder Gleitlager-Effekt zwischen Werkstücken und Schleifscheiben kommen, wodurch sich die zeitbezogenen Teilehöhenreduktionen verringern.

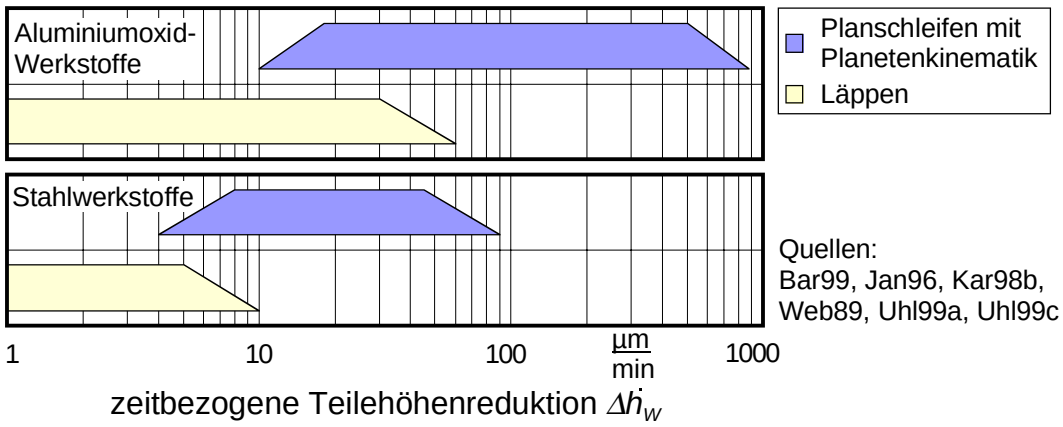


Bild 8.3: Mögliche zeitbezogene Teilehöhenreduktionen beim Planschleifen mit Planetenkinematik und beim Planparallelläppen

Bild 8.3 zeigt die zeitbezogenen Teilehöhenreduktionen, die von unterschiedlichen Autoren für die Bearbeitung von Aluminiumoxidkeramik und Stahlwerkstoffen genannt werden. Für beide Werkstoffgruppen liegen die erreichbaren Werte für das Planschleifen mit Planetenkinematik bis zu zehnmal höher als beim Läppen. Das sprödharte Aluminiumoxid erlaubt höhere Zeitspanungsvolumina als duktile Stahlwerkstoffe. Bei einigen hochharten Werkstoffen bereitet das Seitenschleifen bis heute große Schwierigkeiten, da aufgrund des flächenhaften Eingriffs die erforderlichen minimalen Spanungstiefen nicht erreicht werden. Das Läppen dieser Werkstoffe ist dagegen als Stand der Technik zu betrachten und ermöglicht zufriedenstellende Zeitspanungsvolumina.

Qualität

Zum Vergleich der erreichbaren Qualitäten beim Planschleifen mit Planetenkinematik und beim Planparallelläppen zeigt **Bild 8.4** die Bereiche des arithmetischen Mittenrauwerts R_a und des Ebenheitsfehlers f_E. In diesen Vergleich sind Angaben mehrerer Autoren zur Bearbeitung unterschiedlicher Werkstoffe eingeflossen.

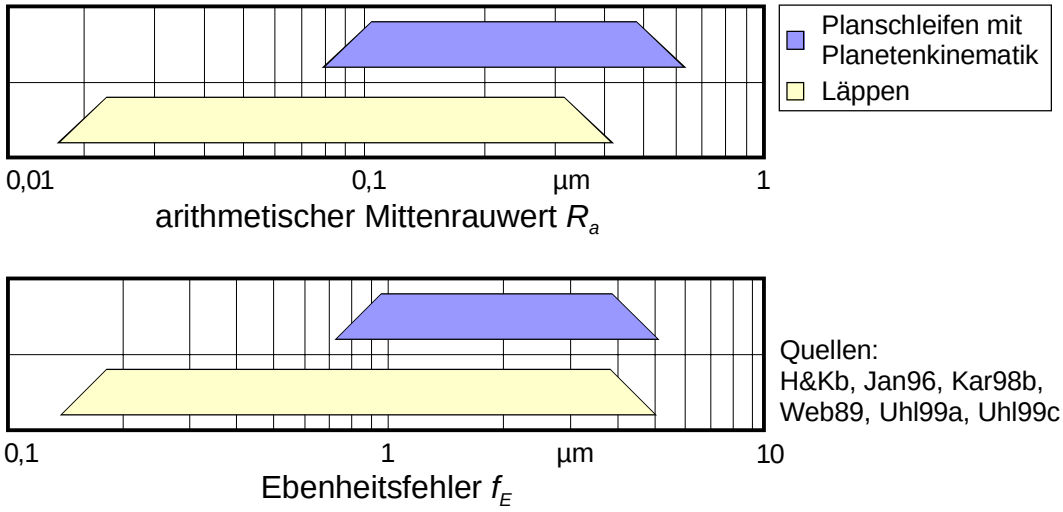


Bild 8.4: Durch Planschleifen mit Planetenkinematik und Planparallelläppen erreichbare arithmetische Mittenrauwerte und Ebenheitsfehler

Hinsichtlich beider Kriterien überschneiden sich die mit beiden Verfahren herstellbaren Qualitäten in weiten Bereichen. Auch bezüglich der Qualitätskriterien hängt das Arbeitsergebnis signifikant von den Eigenschaften des bearbeiteten Werkstoffs ab. Je härter der Werkstoff ist, um so niedriger ist die durchschnittliche Korneindringtiefe und die resultierende Rautiefe. Auch für gute Formgenauigkeiten ist eine hohe Werkstoffhärte vorteilhaft.

In den Bearbeitungsbeispielen zeigt sich das Läppen sowohl bezüglich der erreichbaren Rauheiten als auch hinsichtlich der Ebenheitsfehler dem Planschleifen mit Planetenkinematik überlegen. Als Grund hierfür sind nicht in erster Linie technologische Verfahrensunterschiede anzusehen. Vielmehr wird das Läppen traditionell für die Herstellung von Funktionsflächen in qualitativ hochwertigen Produkten wie Endmaßen oder Schiebelehren eingesetzt. Aufgrund des gleichmäßigeren optischen Erscheinungsbilds der geläppten gegenüber geschliffenen Flächen wird bei solchen Anwendungen am Läppen festgehalten, obwohl isotrope Oberflächeneigenschaften für die Anwendung des Werkstücks nicht erforderlich sind.

Oberflächentopografie

Um die Auswirkungen der spezifischen Abtrennmechanismen auf die Werkstückqualität zu untersuchen, wurden Biegebruchstäbchen aus Aluminiumoxid unter vergleichbaren Bedingungen geschliffen und geläppt. Die Schleifbearbeitung erfolgte auf der Versuchsmaschine

Duomat ZL 500 mit zwei vollflächig belegten, ungenuteten Schleifscheiben der Spezifikation D151 C20. Für die Läppbearbeitung stand eine Zweischeibenläppmaschine vom Typ Al 001 L der Peter Wolters Werkzeugmaschinen GmbH, Rendsburg, mit vergleichbarem Scheibendurchmesser von 450 mm zur Verfügung. Die Werkstücke wurden zwischen Graugussläppscheiben mit einer Läppsuspension aus Borkarbid der Körnung F280 und Wasser bearbeitet. Bei beiden Verfahren wurden vergleichbare Drehzahlverhältnisse, Bahngeschwindigkeiten und Bearbeitungsdrücke eingestellt.

Bild 8.5 zeigt Oberflächen der geläppten und geschliffenen Proben, anhand derer die unterschiedlichen Abtrennmechanismen und die Oberflächenausbildung deutlich werden. Die beiden Bilder links zeigen eine geläppte Probe. Beim Abrollen der Läppkörner drücken sich immer wieder Kornspitzen und -schneiden in die Werkstückoberfläche ein und induzieren bei spröden Werkstoffe Risse, die sich zu Risssystemen überlagern und zum Ausbruch von Partikeln führen. Duktile Werkstoffe weichen den eindrückenden Kornspitzen durch plastische Verformung aus. Die Randzone unterliegt dabei einer Verfestigung und Versprödung, die zum Ablösen von Partikeln führt. Die hier dargestellte Al_2O_3-Oberfläche zeichnet sich mikroskopisch durch eine kraterförmig zerklüftete Struktur ohne gerichtete Bearbeitungsspuren aus. In der stark vergrößerten Aufnahme sind einige Kratzer von geringer Länge zu erkennen, die auf ein kurzzeitiges Festsetzen der Körner in der Läppscheibe schließen lassen. Makroskopisch weist die Oberfläche isotrope optische und mechanische Eigenschaften auf.

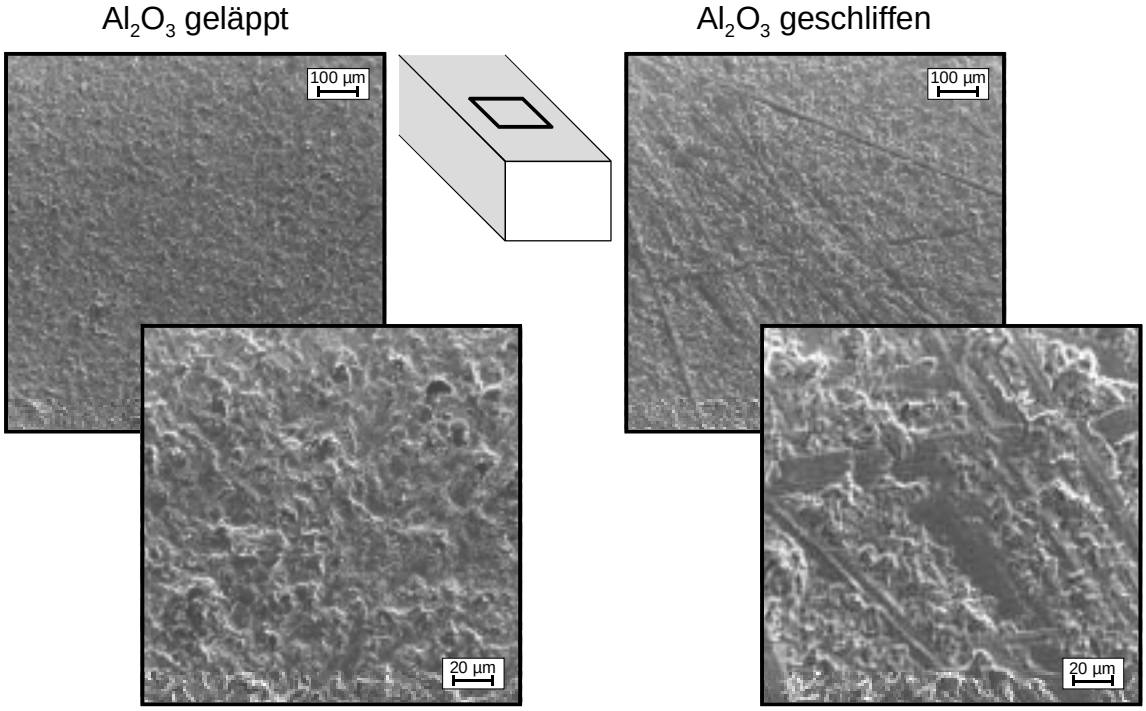


Bild 8.5: Oberflächen geläppter und geschliffener Al_2O_3-Biegestäbchen

Beim Planschleifen mit Planetenkinematik, im Bild rechts dargestellt, werden die Körner in ihrer Bindung auf bogenförmigen Bahnen parallel zur Werkstückoberfläche geführt. Entlang

dieser Bahnen entstehen Schleifspuren, die sich aufgrund der makroskopischen Relativbewegungen in allen Richtungen und unterschiedlichen Tiefen überlagern. Die beiden Aufnahmen auf der rechten Seite von Bild 8.5 verdeutlichen diese Aussage. Am stark vergrößertem Bild ist die zerklüftete, von Kratzern unterbrochene Oberfläche deutlich zu sehen. Entlang der Kratzer zeigen die untersuchten Biegestäbchen aus Al_2O_3 plastische Verformungen, die sich in Schollen auf dem Grund der Schleifspuren oder durch seitliche Aufwerfungen ausprägen. Isotrope Oberflächen können mit dieser Fertigungstechnologie nicht gefertigt werden.

Kantenverrundung

Bild 8.6 zeigt rasterelektronenmikroskopische Fotografien von Kanten der Biegebruchstäbchen. Die Fotografien auf der linken Seite wurden an einer geläppten, die Bilder der rechten Seite an einer geschliffenen Probe aufgenommen. Die beiden oberen Bilder zeigen im Maßstab 1:50 einen jeweils 2 mm langen Ausschnitt der Werkstückkante. Deutlich erkennbar sind in beiden Bildern die waagerecht verlaufenden Kanten. Oberhalb dieser Kanten sind die unterschiedlich bearbeiteten Flächen, unterhalb die unbearbeiteten Stirnflächen beider Proben zu sehen. Die Kanten selbst erscheinen unabhängig vom Bearbeitungsverfahren als Kette von Mulden und Vertiefungen, die sich zum Teil überlagern. Die Längen der einzelnen Mulden betragen zwischen 30 und 100 µm.

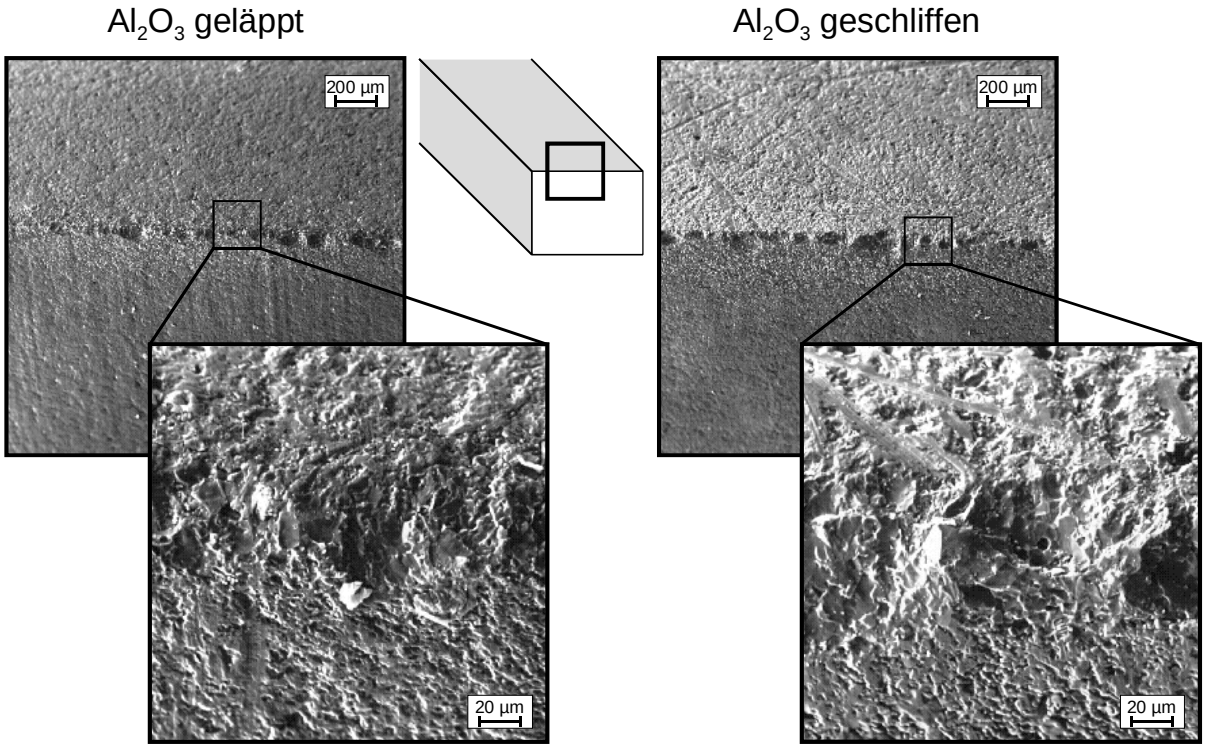


Bild 8.6: Kanten geläppter und geschliffener Al_2O_3-Biegestäbchen

Die beiden unteren Aufnahmen zeigen im Vergrößerungsverhältnis 1:500 zwei dieser Mulden. Beide Proben zeigen Kantenfehler der gleichen Gestalt und in der gleichen geometri-

schen Größenordnung. Diese Beobachtung deutet darauf hin, dass die Mulden durch ausgebrochene Werkstoffkörner oder Korngruppen entstanden sind. Diese Annahme wird auch durch die Topographie der Bruchflächen gestützt, die kaum Ebenen oder Plateaus aufweisen, sondern stark zerrüttete Hohlkugeln darstellen und daher auf interkristalline Trennvorgänge zurückgeführt werden können. An der geschliffenen Probe zeigen sich die Kantenausbrüche vorzugsweise an den Enden von Schleifspuren.

Im Allgemeinen sind für die Kantenstabilität neben der Gefügestruktur eines Werkstoffs die Spanungsdicke am Einzelkorn und die Schnittrichtung von entscheidender Bedeutung [War00]. Die beiden Bilder verdeutlichen, dass nicht die Art des Fertigungsverfahrens, sondern die Werkstoffeigenschaften der verwendeten Aluminiumoxidkeramik für die Kantengenauigkeit ausschlaggebend sind. Weder das Planschleifen mit Planetenkinematik noch das Läppen zeigen unter diesem Gesichtspunkt Vor- oder Nachteile.

8.3 Ökonomischer Verfahrensvergleich

8.3.1 Allgemeines

Auf der Grundlage der zuvor dargelegten technologischen Besonderheiten beider Feinbearbeitungsverfahren erfolgt in den folgenden Abschnitten ein ökonomischer Vergleich. Für beide Verfahren wurden gleiche Randbedingungen angenommen. Auf diese Weise ist gewährleistet, dass sich Änderungen der zugrundeliegenden Zahlenwerte zwar auf die absolute Höhe der errechneten Größen, nicht aber auf deren Verhältnisse zueinander auswirken.

8.3.2 Belegung und Ausnutzung der Maschinen

Für eine optimale wirtschaftliche Prozessauslegung wird versucht, möglichst viele Werkstücke gleichzeitig in einer Maschine zu platzieren. In Abhängigkeit vom Belastungszustand der Schleifscheiben steigt die Bearbeitungszeit pro Charge durch einen hohen Belegungsfaktor in der Regel an. Dadurch sinkt aber der Anteil der zum Be- und Entladen erforderlichen Nebenzeit, und der Anteil der Hauptzeit an der gesamten Maschinennutzungszeit nimmt zu.

Der Radius des äußeren Stiftkranzes ist durch die Baugröße der Maschine vorgegeben. Die Abmessungen des inneren Stiftkranzes können vom Konstrukteur in weiten Bereichen eingestellt werden. Durch diese Wahl wird auch der Radius der Werkstückhalter festgelegt und die maximale Breite des Schleifbelags bestimmt. Bei der Auslegung ergibt sich das Flächenschlußproblem, bei welchem Radius des inneren Stiftkranzes eine maximale Ausnutzung der Werkzeugfläche möglich wird. Auf breiten Schleifbelägen können wenige große Werkstückhalter platziert werden. Je schmaler die Schleifbeläge werden, um so mehr Werkstückhalter mit entsprechend geringerem Durchmesser passen zwischen die beiden Stiftkränze.

Diese Fragestellung stellt ein Maximierungsproblem dar, das von der absoluten Größe einer Maschine unabhängig ist.

Als Maß für die nutzbare Fläche wird der Flächeninhalt aller Werkstückhalter als zu maximierende Größe betrachtet. Zur Verallgemeinerung wird angenommen, dass die Schleifscheibe bis direkt an beide Stiftkränze heranreicht und damit ebenfalls durch die Radien r_i und r_a begrenzt wird. Der Radius eines Werkstückhalters r_H ist durch die beiden Stiftkränze festgelegt und ergibt sich aus der Gleichung

$$r_H = \frac{r_a - r_i}{2}. \tag{8-1}$$

Für die Anzahl der Halter z_H, die zwischen zwei konzentrischen Stiftkränzen mit den Radien r_a und r_i eingelegt werden können, gilt die Beziehung

$$z_H \le \frac{\pi}{\arcsin\left(\frac{r_a - r_i}{r_a + r_i}\right)},\ z_H \in N\ . \tag{8-2}$$

Die Halteranzahl z_H muss Element der Gruppe der natürlichen Zahlen sein. Diese Bedingung ist erfüllt, wenn man den Term auf die nächst kleinere natürliche Zahl abrundet. Durch Umformung dieser Gleichung nach r_i erhält man den Ausdruck

$$r_i \ge r_a \frac{1 - \sin\left(\frac{\pi}{z_H}\right)}{1 + \sin\left(\frac{\pi}{z_H}\right)}, \tag{8-3}$$

mit dem man bei einem festgelegten Radius des äußeren Stiftkranzes r_a für beliebige Halterzahlen z_H den optimalen Innenradius r_i bestimmen kann. Die Summe der Halterflächen wird dann nach der Gleichung

$$A_{Hges} = z_H \pi r_H^2 \tag{8-4}$$

ermittelt. Entsprechend berechnet sich die Fläche des Schleifbelags nach dem Ausdruck

$$A_S = \pi\left(r_a^2 - r_i^2\right). \tag{8-5}$$

Die Funktionen zu den Gleichungen (8-2), (5-2) und (8-5) sind in **Bild 8.7** über dem Radius des inneren Stiftkranzes r_i aufgetragen. Der Radius r_i wird dabei zwischen seinen theoretischen Extremwerten Null und dem Radius des äußeren Stiftkranzes r_a variiert. Die Anzahl der einlegbaren Werkstückhalter ist durch die senkrechten Balken gekennzeichnet.

Besitzt der innere Stiftkranz den Radius $r_i = 0$ mm, so bildet die Schleifscheibe einen Vollkreis mit dem Radius r_a. In diesem Fall lassen sich maximal zwei Halter in den äußeren Zahnkranz einlegen, und diese bedecken 50 % der Schleifscheibenfläche. Mit zunehmendem

Radius r_i nimmt die Ringbreite des Schleifbelags zwischen den Stiftkränzen ab, und die Anzahl der einlegbaren Werkstückhalter z_H steigt. Sobald ein zusätzlicher Halter zwischen die Stiftkränze passt, nimmt die Halterfläche ein lokales Maximum ein, sinkt aber mit weiter steigendem Radius r_i entsprechend Gleichung (8-1) wieder ab. Aus diesem Grund bildet die Halterfläche $A_{H\,ges}$ als Funktion des Radius r_i eine Sägezahnkurve. Da z_H auf den Bereich der natürlichen Zahlen beschränkt ist, verläuft die zugehörige Kurve treppenförmig. Strebt der Radius des inneren Stiftkranzes gegen r_a, so geht der Flächeninhalt der Schleifscheibe gegen Null. Die Anzahl der Werkstückhalter wird hier unendlich groß. Da die Radien der Halter aber sehr klein sind, geht die Summe der Halterflächen ebenfalls gegen den Wert Null.

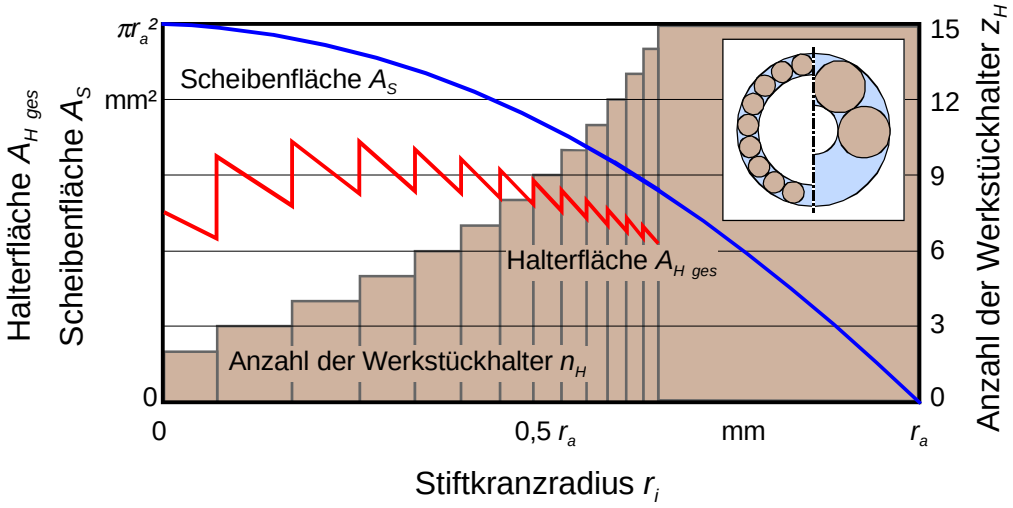


Bild 8.7: Ausnutzung des Schleifbelags

Sowohl mit vier als auch mit fünf Haltern ist eine maximale Ausnutzung von knapp 70 % der Schleifscheibengrundfläche möglich. Bei kleineren oder größeren Halterzahlen sinkt der Grad der Flächenausnutzung. Handelsübliche Maschinen sind zumeist mit 5 Haltern ausgestattet und weisen Radienverhältnisse r_i/r_a im Bereich von 0,27 bis 0,30 auf.

Im praktischen Einsatz des Planschleifens mit Planetenkinematik ist die Frage nach einer optimalen Auslegung der Schleifscheibenbelagsfläche mit weiteren Fragestellungen verknüpft. Neben den Radien der Stiftkränze spielt die Geometrie der Werkstücke eine wichtige Rolle für die geometrische Auslegung der Maschine. Wafer oder Gleitringdichtungen können so groß sein, dass nur jeweils ein Werkstück in einen Halter gelegt werden kann. In diesem Fall kann sich eine Maschine mit schmalem Belagring und einer größeren Halteranzahl als vorteilhaft erweisen. Mit abnehmender Schleifscheibenbreite sinken weiterhin die Kosten für das Belagsmaterial, während mit zunehmender Halteranzahl die erforderliche Zeit für deren Transport in den Arbeitsraum hinein und wieder heraus ansteigt.

8.3.3 Kostenrechnung

Grundlagen

Zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit beider Verfahren bietet sich die Bestimmung der Fertigungskosten pro Werkstück, also der Stückkosten an. Als Grundlage dieser Berechnung ist die Kenntnis des Maschinenstundensatzes K_{MH} erforderlich, der sich aus der Summe sämtlicher jährlich anfallender Einzelkosten bezogen auf die jährliche Nutzungszeit T_N einer Fertigungseinrichtung ergibt. Nach der VDI-Richtlinie 3258 errechnet sich dieser Kennwert nach der Gleichung

$$K_{MH} = \frac{K_A + K_Z + K_R + K_E + K_I}{T_N} \ . \tag{8-6}$$

Die beiden ersten Summanden im Zähler des Bruches stellen die Kapitalkosten dar. Die kalkulatorische Abschreibung K_A ergibt sich aus dem Wiederbeschaffungswert einer Investition bezogen auf die Nutzungsdauer. Der Wiederbeschaffungswert beinhaltet auch Kosten für Zubehör, Aufstellung und Inbetriebnahme und kann mit einem Korrekturfaktor für die Entwicklung des Marktpreises durch Inflation versehen werden. Die kalkulatorischen Zinsen K_Z berücksichtigen die Zinsen für das angelegte Kapital. Hierbei dient eine durchschnittlich angenommene Kapitalbindung als Grundlage, d. h. jede Rechnungsperiode trägt einen gleich hohen Anteil. Als Summe aller kalkulatorischen Zinsen über die gesamte Rechnungsdauer wird die Hälfte der Investitionssumme gesetzt.

Die Raumkosten K_R umfassen die Kosten für die beanspruchten Grund- und Nebenflächen, zusätzlich die Kosten für Licht, Heizung, Lüftung, Versicherung, Bewachung und Reinigung. Die Energiekosten K_E umfassen den durchschnittlichen Verbrauch von Strom, Gas, Wasser und anderer Energiearten. Hier wird mit 50 % des auf dem Typenschild angegebenen Werts gerechnet, da die Höchstleistungen im regulären Betrieb nur kurzzeitig in Anspruch genommen werden. Neben Reparaturen beinhalten die Kosten für Instandhaltung K_I auch Wartungsarbeiten wie Schmieren, Reinigen, Korrosionsschutz, Nachstellen von Verschleißteilen und Kontrolle der Maschine auf Genauigkeit, Lagerspiel und Dichtigkeit. Zusätzlich fallen Werkzeug- und Hilfsstoffkosten an, die laut VDI-Richtlinie 3258 als jährliche Durchschnittswerte in den Maschinenstundensatz eingerechnet werden können. Der unter Berücksichtigung dieser Kosten berechnete Maschinenstundensatz wird im folgenden mit dem Formelzeichen K_{MHW} gekennzeichnet. Die gesamte Maschinenzeit umfasst die für den Maschinenstundensatz maßgebliche Nutzungszeit T_N, die Instandhaltungs- und die Ruhezeit. Die Nutzungszeit T_N setzt sich aus Lastlaufzeit, Leerlaufzeit und Hilfszeit zusammen.

Kostenrecherche

Aufgrund des ähnlichen Aufbaus von Zweischeibenschleif- und Läppmaschinen unterscheiden sich die Investitionskosten hier nur geringfügig. Erst durch die Anschaffung einer Aufbe-

reitungsanlage für das Läppmittel und einer Ultraschallreinigungsanlage bzw. einer Kühlschmierstoffzentrifuge für das Planschleifen mit Planetenkinematik ergeben sich signifikante Unterschiede. **Tabelle 8.3** zeigt die diesem Rechenbeispiel zugrundeliegenden Anschaffungskosten und die resultierenden Kapital- und Investitionskosten in Euro. In diesem Beispiel wird mit einem Restwert von 8 % nach einer Nutzungsdauer von 10 Jahren gerechnet. Die Kosten für die Instandhaltung werden über der gesamten Nutzungszeit mit 30 % des Neuwerts angesetzt. Die Raumkosten werden für beide Anlagen gleich mit K_R = 3000 €/a veranschlagt.

Tabelle 8.3: Kapital- und Instandhaltungs- und Raumkosten für Maschinen und Zusatzaggregate

	Läppen	Schleifen
Maschine Scheibendurchmesser 700 mm	210.000,-	210.000,-
Läppmittelaufbereitung	35.000,-	-
Ultraschall-Reinigungsanlage	50.000,-	-
KSS-Reinigung	-	35.000,-
	295.000,-	245.000,-
kalkulatorische Abschreibung K_A	27.140,-	22.540,-
kalkulatorische Zinsen K_Z	13.570,-	11.270,-
Instandhaltungskosten K_I	8.142,-	6.762,-
Raumkosten K_R	3000,-	3000,-

Tabelle 8.4: Veranschlagter Energiebedarf und Energiekosten

	Läppen	Schleifen
Maschine Scheibendurchmesser 700 mm	13,6 kW	17,9 kW
Läppmittelaufbereitung	5,0 kW	-
Ultraschall-Reinigungsanlage	5,0 kW	-
KSS-Reinigung	-	8,0 kW
durchschnittlich 50 % Last	11,80 kW	12,95 kW
Energiekosten K_E	3.032,-	3.232,-

Den veranschlagten Energiebedarf und die jährlichen Energiekosten beider Anlagen zeigt **Tabelle 8.4**. Der Preis pro Kilowattstunde wird mit 0,12 € angesetzt. Als jährliche Nutzungszeit werden 260 Nutzungstage a 8 Stunden, also T_N = 2080 h angenommen. Damit unterscheiden sich die jährlichen Energiekosten K_E beider Verfahren nur geringfügig.

Maschinenstundensatz und Stückkosten

Aus diesen Zahlenwerten ergeben sich die Maschinenstundensätze. Diese beinhalten ausschließlich die Kosten für die Bereitstellung und den Betrieb der jeweiligen Fertigungseinrichtung. Bis hierher sind die Kosten von Art, Stückzahl und Werkstoff der zu fertigenden Werkstücke unabhängig.

Bei gleichen Raumkosten und fast gleichen Energiekosten ergibt sich für das Läppen ein Maschinenstundensatz von 26,38 €/h, für das Planschleifen mit Planetenkinematik von 22,50 €/h. Die Bereitstellung einer Läppanlage ist also etwas teurer als die einer vergleichbaren Maschine zum Planschleifen. Diese Differenz entsteht hauptsächlich durch die höheren Anschaffungskosten, die nach dem gewählten Ansatz auch zusätzlich höhere Instandhaltungskosten verursachen.

Auf Grundlage dieser Maschinenstundensätze werden nun die Kosten ermittelt, die sich für die Fertigung eines konkreten Werkstücks ergeben. Als Beispielwerkstück wird eine Vollscheibe aus Aluminiumoxid mit dem Durchmesser von 40 mm und einer Höhe von 6 mm angenommen. Bei der gegebenen Maschinengeometrie wird eine Chargenmenge von 50 Teilen angesetzt. Das abzutrennende Aufmaß beträgt 0,4 mm.

Bei der Läppbearbeitung mit Borkarbid der Korngröße F600 wird ein Verschleißverhältnis Werkstückwerkstoff zu Läppscheibenwerkstoff von 20:1 angenommen. Unter dieser Voraussetzung können mit einem Paar Läppscheiben während seiner Lebensdauer ca. 1,5 Millionen Werkstücke bearbeitet werden. Bei einem Volumenstrom der Läppsuspension von 40 ml/min und einem volumetrischen Mischungsverhältnis Korn zu Flüssigkeit von 1:4 werden während dieser Lebenszeit circa 5.000 l Läppöl und 3.000 kg Borkarbid verbraucht. Für die Bearbeitung wird eine zeitbezogene Teilehöhenreduktion von 22 µm/min angesetzt. Damit ergibt sich eine Bearbeitungszeit von 20 min pro Charge einschließlich Be- und Entladung der Maschine. Bei einer Jahresarbeitszeit von 2080 Stunden können auf diese Weise 312.000 Werkstücke im Jahr gefertigt werden. Die Werkzeugkosten betragen pro Jahr etwa 30.700 €.

Für den gleichen Bearbeitungsvorgang durch Planschleifen mit Planetenkinematik wird mit einer Bearbeitungszeit von 4 Minuten pro Charge gerechnet. Ein Paar Diamantschleifscheiben mit jeweils 3 mm Belagshöhe hat eine Standzeit von etwa 600.000 Werkstücken. Bei einem Anschaffungspreis von 17.500 € pro Scheibenpaar und einem geschätzten Jahresverbrauch von 600 l Schleiföl und einer entsprechenden Menge an Konditionierwerkzeugen ergeben sich jährliche Werkzeugkosten von etwa 55.000 €.

Tabelle 8.5 zeigt die Maschinenstundensätze K_{MHW}, die sich unter Berücksichtigung der Werkzeugkosten ergeben. Mit 49,30 €/h ist das Planschleifen mit Planetenkinematik hier etwa 20 % teurer als das Läppen mit 41,17 €/h. Dieser Effekt begründet sich mit den kürzeren Standzeiten der Schleifwerkzeuge gegenüber Läppscheiben.

Die Stückkosten K_F berechnen sich nach der Gleichung

$$K_F = \left(K_{MHW} + \frac{K_{Lohn} + K_X}{T_N} \right) \cdot T_E \quad . \tag{8-7}$$

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 €/h mit K_{Lohn} = 62.400 €/a angesetzt. Aufgrund der langen Bearbeitungszeit beim Läppen kann ein Arbeiter mehrere Maschinen gleichzeitig bestücken. Deshalb wird hier nur der halbe Stundenlohn pro Maschine angesetzt. Durch Multiplikation der pro Stunde entstehenden Kosten mit der Maschinenzeit pro Werkstück T_E ergeben sich die Stückkosten K_F. Diese liegen beim Läppen mit 0,37 € fast viermal so hoch wie beim Planschleifen mit Planetenkinematik, bei dem die Stückkosten nur 0,11 € betragen.

Tabelle 8.5: Abschätzung der Werkzeugkosten und der Stückkosten

	Läppen	Schleifen
Werkstückanzahl pro Werkzeug	1.500.000	600.000
Bearbeitungszeit pro Ladung	1.200 s	240 s
Chargenmenge	50	50
Chargen pro Stunde	3	15
Teile pro Stunde	150	750
Teile pro Jahr	312.000	1.560.000
Maschinenstundensatz K_{MH}	26,38	22,50
Werkzeugkosten pro Jahr	30.700,00	55.000,00
Werkzeugkosten pro Stück	0,10	0,04
Maschinenstundensatz mit Werkzeugkosten K_{MWH}	41,17	49,30
Stückkosten K_F	0,37	0,11

8.3.4 Einsparpotenziale

Auf der Grundlage der vorgestellten Berechnung der Fertigungskosten, die mit dem konventionellen Läppen und dem Planschleifen mit Planetenkinematik erreichbar sind, werden nun die Einsparpotenziale beider Verfahren untersucht. In Form einer Sensibilitätsanalyse zeigt **Bild 8.8** verschiedene Möglichkeiten, die Stückkosten K_F zu beeinflussen.

Ein deutlicher Einfluss auf die Fertigungskosten kommt der Chargenmenge, also der Anzahl gleichzeitig bearbeiteter Werkstücke, zu. Aufgrund der geometrischen Verhältnisse ist eine beliebige Steigerung aber nicht möglich. Hier ist schon bei der Auswahl einer Maschine darauf zu achten, dass der Durchmesser der Werkzeuge und damit die maximal mögliche Chargenmenge den Stückzahlen der zu fertigenden Werkstücke angepasst ist.

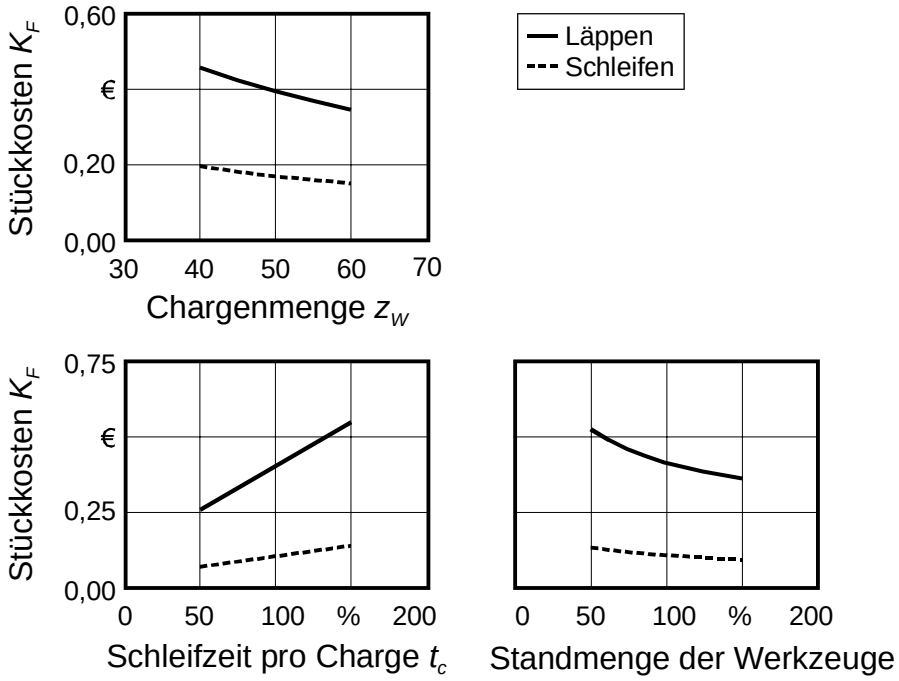


Bild 8.8: Einflussmöglichkeiten auf die Stückkosten

Eine technologische Möglichkeit zur Verringerung der Stückkosten stellt die Senkung der erforderlichen Bearbeitungszeiten dar. Um diese Potenziale voll auszuschöpfen, sind im Einzelfall experimentelle Untersuchungen erforderlich. Von besonderem Interesse ist dabei die Unterteilung des Prozesses in eine Schrupp- und eine Schlichtphase. Durch die Maximierung von Bahngeschwindigkeiten und Bearbeitungsdrücken sowie die Auswahl geeigneter Bewegungsformen lassen sich die Leistungen insbesondere in der Schruppbearbeitung zumeist deutlich steigern. Wichtig ist dabei, dass die geforderten Qualitätskriterien im Rahmen der Schlichtphase erreichbar sind. Zum Erzielen optimaler Ergebnisse muss hier der Einfluss der kinematischen Parameter auf das Arbeitsergebnis Berücksichtigung finden. Eine Einschränkung der Prozessstrategie auf das Durchfahren verschiedener Auflastzyklen vernachlässigt hier große Potenziale.

Eine weitere Möglichkeit zur Kostensenkung bietet die Vergrößerung der Standmengen der Werkzeuge. Zu diesem Zweck muss die Belastung gleichmäßig über die zur Verfügung stehende Werkzeugfläche verteilt und die Ausbildung von Verschleißprofilen an Läpp- und Schleifscheiben verhindert werden. Zu diesem Zweck ist insbesondere eine geeignete Anordnung der Werkstücke im Halter von Bedeutung. Die konventionelle kreisförmige Anordnung bringt hier meist keine optimalen Ergebnisse. Auch Wechsel der Drehrichtung sind in Bezug auf den Schleifscheibenverschleiß nicht von Vorteil.

Die Kosten für das Entfernen verschleißbedingter Profile entstehen bei Läppscheiben hauptsächlich aus der erforderlichen Konditionierzeit, während der die Maschine nicht produktiv arbeiten kann. Beim Schleifen kommen dazu noch die Kosten für das verlorene Werkzeugvolumen. Die Ausbildung von Verschleißprofilen kann bei beiden Verfahren durch eine ge-

zielte Beeinflussung der Bearbeitungskinematik und durch die Anordnung der Werkstücke im Halter minimiert werden. Der Einsatz verschleißärmerer Werkzeuge bzw. Körnungen ist für den Anwender schwierig und meist nur in Zusammenarbeit mit einem Werkzeughersteller realisierbar.

Weitere Einsparpotentiale bietet eine automatisierte Be- und Entladung der Maschine. Aufgrund der kurzen Bearbeitungszeiten beim Planschleifen mit Planetenkinematik kann der Anteil der für den Werkstückwechsel erforderlichen Nebenzeit auf diese Weise signifikant reduziert werden. Voraussetzung für die Wirtschaftlichkeit der erforderlichen Investition ist eine ausreichende Stückzahl der zu bearbeitenden Werkstücke.

8.4 Empfehlungen für die Verfahrensauswahl

Hinsichtlich der Werkstückqualität ist das Planschleifen mit Planetenkinematik hervorragend geeignet zur Herstellung von Oberflächen mit geringen Rautiefen und guten Gleiteigenschaften. Durch Läppen sind isotrope Flächeneigenschaften erzeugbar, die in bestimmten Anwendungsgebieten wie z. B. der Bearbeitung von Wafern oder optischen Werkstücken notwendige Anforderungen darstellen.

Der ökonomische Verfahrensvergleich zeigt, dass in der Bearbeitung von Aluminiumoxidkeramiken bei gleichen Randbedingungen das Planschleifen mit Planetenkinematik dem Planläppen deutlich überlegen ist. Trotz der höheren Investitionskosten, die bei der Anschaffung von Diamantschleifscheiben mit großen Durchmessern entstehen, liegen die Fertigungskosten pro Stück beim Schleifen wesentlich niedriger als beim Läppen.

Bei einigen hochharten Werkstoffen bereitet die Seitenschleifbearbeitung bis heute Probleme, da die zur Werkstoffabtrennung erforderlichen Mindestspanungstiefen nicht erreicht werden. Ein Läppen dieser Werkstoffe ist aufgrund der spezifischen Trennmechanismen zumeist ohne besonderen Aufwand möglich. Es ist damit zu rechnen, dass diese Problematik durch die Entwicklung geeigneter Schleifscheibenspezifikationen in den nächsten Jahren gelöst wird.

9 ZUSAMMENFASSUNG

Das charakteristische Verfahrensmerkmal des Planschleifens mit Planetenkinematik besteht in der Form der Relativbewegung zwischen Werkstücken und Schleifscheiben auf zykloidalen Bahnkurven. Die radiale Bewegung der Werkstücke bezüglich der Schleifscheibe ist Voraussetzung für die guten Arbeitsergebnisse und Ursache für die ungleichmäßige Werkzeugbelastung. Diese beeinflusst den Verschleiß der Schleifscheiben und das Zeitspanungsvolumen und damit indirekt die Werkstückqualität. Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit bestand in der Erforschung des Zusammenhangs zwischen der Bearbeitungskinematik beim Planschleifen mit Planetenkinematik und ihren Auswirkungen auf den Prozessverlauf und das Arbeitsergebnis.

Analyse der Planetenkinematik

Grundlage für die Untersuchung dieses Zusammenhangs war eine praxistaugliche mathematische Beschreibung der Relativbewegungen. Diese wurde durch die Einschränkung auf Maschinen mit feststehendem äußeren Stiftkranz möglich. Bei diesen Maschinen charakterisiert das Drehzahlverhältnis von innerem Stiftkranz und der betrachteten Schleifscheibe eindeutig alle Bewegungsformen und stellt einen direkten Zusammenhang zwischen den maschinenseitigen Einstellparametern und der Bahnbewegung her. Die Zuordnung experimentell beobachteter Wirkungen zu kinematischen Ursachen wurde dadurch wesentlich erleichtert.

Bei der Bearbeitung zwischen zwei Schleifscheiben tritt der größte Schleifdruck dort auf, wo der Schleifspalt zwischen den beiden Schleifscheiben am niedrigsten ist. An der gleichen Stelle ist der größte Werkzeugverschleiß zu erwarten. Auf diese Weise ist in Form einer Selbstkorrektur gewährleistet, dass die Höhe des Arbeitsspalts zwischen beiden Schleifscheiben stets konstant ist. Die obere Schleifscheibe senkt sich gleichmäßig ab, so dass alle Werkstücke der gleichen zeitbezogenen Teilehöhenreduktion unterliegen. Da die Bahngeschwindigkeiten der Werkstücke im Verlauf der Bahnbewegung variieren, resultieren daraus unterschiedliche wegbezogene Teilehöhenreduktionen. Je langsamer sich ein Werkstückpunkt im Vergleich zur mittleren Bahngeschwindigkeit bewegt, um so höher ist seine wegbezogene Teilehöhenreduktion. Entscheidend für die Belastung der Schleifscheiben ist, auf welchem Schleifweg ein bestimmtes Werkstückvolumen zerspant wird und welche Belagsfläche für diese Zerspanungsarbeit zur Verfügung steht. Aufgrund von Wechselwirkungen zwischen Werkstücken und beiden Schleifscheiben ist die Vorhersage von makroskopischen Verschleißprofilen nicht möglich.

Auf der Basis dieser Überlegungen wurde ein Modell zur Simulation der Schleifscheibenbelastung beim Planschleifen mit Planetenkinematik aufgestellt. In Abhängigkeit von den kinematischen und geometrischen Prozessparametern ergeben sich charakteristische Belastungsfunktionen über dem Radius der Schleifscheiben. Der Verlauf der Belastungsfunktion gibt Hinweise auf die zu erwartenden Verschleißausprägungen der Schleifbeläge. Die Fläche un-

terhalb der Belastungsfunktionen repräsentiert die summarische Schleifscheibenbelastung, die auf das resultierende Zeitspanungsvolumen und die Antriebsmomente schließen lässt.

Das Modell zur Belastungssimulation stellt ein Werkzeug dar, mit dem der unendliche Parameterraum der Planetenkinematik ohne experimentellen Aufwand analysiert werden kann. Für beliebige Maschinen- und Werkstückgeometrien können kinematische Parameter ermittelt werden, die eine gleichmäßige Schleifscheibenbelastungen oder hohe Zeitspanungsvolumina gewährleisten. Weitere Anwendungsfälle der Belastungssimulation liegen in den Bereichen Maschinenkonstruktion und Werkzeugauslegung. Die Konstruktion der Schleifscheibenflansche oder die Anordnung der Zuführbohrungen für den Kühlschmierstoff können belastungsgerecht erfolgen. Auch die Auslegung der Werkzeugbeläge kann den unterschiedlichen Belastungen angepasst werden.

Experimentelle Untersuchungen

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen wurden die keramischen Werkstoffe Aluminiumoxid und Siliciumnitrid bearbeitet. Es wurden die Art des Kühlschmierstoffs, die Spezifikation der Schleifscheibe, die mittlere Bahngeschwindigkeit, der Schleifdruck, die Belegung und das Drehzahlverhältnis variiert.

Der anwendungsbezogenen Auswahl von Kühlschmierstoff und Werkzeugspezifikation kam beim Planschleifen mit Planetenkinematik eine entscheidende Bedeutung zu. Bei ungeeigneten Kombinationen der Wirkpartner konnte der Prozess durch Abstumpfen der Schleifbeläge in kurzer Zeit zum Erliegen kommen. Mit zunehmender Diamantkorngröße der Schleifscheibenspezifikation stiegen das Zeitspanungsvolumen und die Rauheit der bearbeiteten Flächen an. Eine Erhöhung der mittleren Bahngeschwindigkeit steigerte das Zeitspanungsvolumen beim Schleifen von Aluminiumoxid nahezu proportional. Dabei ergaben sich nur geringfügige Qualitätseinbußen. Da keine technologische Verfahrensgrenze erreicht wurde, erscheint zukünftig die Untersuchung höherer Bahngeschwindigkeiten sinnvoll. Mit zunehmendem Schleifdruck stieg das Zeitspanungsvolumen überproportional an. Um eine Selbstschärfung der Schleifbeläge zu initiieren, war ein minimaler Schleifdruck erforderlich, dessen Höhe stark vom Werkstoff und der Schleifscheibenspezifikation abhing. Die Ebenheiten der Funktionsflächen nahmen mit steigendem Druck aber deutlich ab. Die Größe der Werkstückchargen hatte bei Aluminiumoxid keinen Einfluss auf das Verschleißverhalten der Schleifbeläge. Mit zunehmender Chargenmenge stieg zwar die absolute Bearbeitungszeit an, das Zeitspanungsvolumen nahm aber ebenfalls zu. Gleichzeitig sank die Häufigkeit der Ladevorgänge, so dass die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens insgesamt zunahm. Bei der Bearbeitung von Siliciumnitrid traten häufige Wechsel von starker Abstumpfung und spontan einsetzender Selbstschärfung der Schleifbeläge auf, so dass hier keine stationären Bearbeitungsbedingungen erreicht wurden.

Das Drehzahlverhältnis und die Anordnung der Werkstücke im Halter stellen wichtige Parameter der Verfahrenskinematik mit deutlichen Auswirkungen auf den Prozessverlauf dar. Das

Drehzahlverhältnis beeinflusst das Zeitspanungsvolumen und die Antriebsmomente beim Planschleifen mit Planetenkinematik signifikant. Die experimentellen Ergebnisse bestätigten die diesbezüglich mit dem Schleifscheibenbelastungsmodell berechneten Vorhersagen in vollem Umfang. Auch die Simulation der Auswirkungen der Werkstückanordnung im Halter auf das Zeitspanungsvolumen und die Antriebsmomente wurde durch die Experimente durchweg bestätigt. Die Beeinflussung des Arbeitsergebnisses durch die Kinematik ist indirekter Natur: Die besten Qualitäten wurden bei nahezu allen Experimenten im Zusammenhang mit niedrigen Zeitspanungsvolumina erreicht. Jede Steigerung des Zeitspanungsvolumens hat damit eine Verschlechterung des Arbeitsergebnisses zur Folge. Aus diesem Grund ist im industriellen Einsatz die mehrstufige Prozessauslegung unverzichtbar, bei der auf einen Schruppprozess mit großem Zeitspanungsvolumen eine Schlichtphase zur Optimierung der Qualität folgt.

Ausblick

Das Planschleifen mit Planetenkinematik wird sich in den nächsten Jahren zusätzliche Anwendungsfelder erobern. Voraussetzung dafür sind jedoch weiterführende Entwicklungen in den Bereichen Maschinenkonstruktion, Steuerungstechnik, Werkzeugtechnologie und Prozessführungsstrategie.

Bei Zweischeibenschleifmaschinen ist ein klarer Trend hin zu größeren Schleifscheibendurchmessern sowie zu höheren Drehzahlen und Schleifdrücken festzustellen. Konstruktive Probleme stellen bisher die Vermeidung von thermischem und mechanischem Verzug und die gleichmäßige Einleitung der Schleifkraft in den gesamten Schleifbelag dar. Auch die Zuführung eines ausreichenden Kühlschmierstoff-Volumenstroms zwischen die großen Schleifscheibenflächen gestaltet sich schwierig. Hohe Schleifscheibendrehzahlen machen Vorrichtungen zum Zentrieren und Auswuchten im aufgespannten Zustand erforderlich. Die heute übliche Steuerung des Schleifdrucks wird zukünftig durch flexible Regelmechanismen ersetzt werden, die eine stationäre Prozessführung und gezielte Selbstschärfung der Schleifbeläge ermöglichen. Bezüglich der Werkzeugtechnologie bestehen mehrere Fragestellungen. Dazu zählt die Anpassung der Schleifbelagsspezifikationen an die unterschiedlichen Belastungen über dem Schleifscheibenradius. Auch das Konditionieren der Werkzeuge im aufgespannten Zustand stellt ein bisher wenig untersuchtes Themenfeld dar. Schließlich sind für neue Anwendungsfälle angepasste Werkzeugspezifikationen zu entwickeln, die einen stationären Betrieb im Selbstschärfbereich ermöglichen.

10 LITERATUR

Buchbeiträge und Zeitschriftenartikel

Aba96 Abay, C.:
Mehrstufige Prozeßoptimierung bei der Hartbearbeitung von Keramik.
Maschinenmarkt 102 (1996) 11, S. 32-37.

Abr91 Abrahamson, G. R.; Duwell, E. J.; McDonald, W. J.:
Wear and Lubrication as Observed on a Lap Table with Loose and Bonded Abrasive Grit.
Journal of Tribology (1991) 113, S. 249-254.

Ale94 Alexander, H.:
Feinschleifen contra Läppen.
Maschinen Anlagen Verfahren mav 7/8 (1994), S. 34.

Ard98 Ardelt, Th.; Eichgrün, K.; Friemuth, Th.; Gäbler, J.; Gerent, O.; Holl, S.-E.; Kreis, R.; Lierse, T.; Schippers, C.; Zapp, M.:
Rauheitsmessung an keramischen Oberflächen.
Werkstattstechnik wt 88 (1998) 5, S. 239-243.

Ard99 Ardelt, Th.:
On the Effect of Path Curves on Process and Wheel Wear in Grinding on Lapping Machines.
Proceedings „3rd International Machining and Grinding Conference“,
4.-7. Oktober 1999, Cincinatti, Ohio, USA, S. 307-321.

AWF32 N. N.:
Feinstbearbeitung. Polieren, Läppen, Honen, Preßpolieren, Polierdrehen.
Ausschuß für wirtschaftliche Fertigung beim Reichskuratorium für Wirtschaftlichkeit. RKW-Veröffentlichungen 74. Berlin: Beuth, 1932, S. 48-49.

Bar99 Barylski, A.; Feld, M.; Engel, H.; Ardelt, Th.:
Verfahrensvergleich Läppen-Schleifen.
Werkstattstechnik wt 89 (1999) 5, S. 228-230.

Ben00 Benguerel, R.:
Feinschleifen technischer Keramik mit Diamant-Cluster-Scheiben.
Tagungsband zum „5. Int. Feinstbearbeitungskolloquium der ETH Zürich“ am 11./12. Mai 2000, S. 107-125.

Ber68 Ber, A.; Gueva, I.:
On the Wear of the Plane Lapping Plate.
Annals of the CIRP XVI (1968), S. 409-413.

Blu80 Blum, G.:
Läppen.
In: 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) 2, S. 117-119.

Bou82 Bouzakis, K.; Mitsi, S.:
Hochgenaues Läppen.
VDI-Z 128 (1982) 23/24, S. 943-948.

Brü96 Brücher, Th.:
Kühlschmierung beim Schleifen.
Dissertation TU Berlin, 1996.

Bux37 Buxbaum, B.:
Das Schleifen und Polieren der Metalle.
Werkstattbücher Heft 5, 3. Auflage. Berlin: Springer, 1937.

Cha99 Chang, F. Y.; Lai, K. C.; Lin, H. Y.; Wu, T. C.:
Grinding Tool Design for Fine Grinding.
Proceedings of the 1st International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology (EUSPEN).
Bremen: 31.5.-4.6.1999, Vol. 1, S. 388-391.

Cla82 Clar, R.:
Zweischeiben-Läppen und Feinschleifen.
Feinwerktechnik und Meßtechnik 90 (1982) 5, S. 242-244.

Den96 Dennis, P.; v. Mackensen, V.:
Diamant- und CBN-Feinschleifen auf Maschinen mit Läppkinematik.
In: Bearbeitung neuer Werkstoffe. VDI-Berichte 1276, S. 435-448.
Düsseldorf: VDI, 1996.

Eng97 Engel, H.:
Läppen von einkristallinem Silicium.
Dissertation TU Berlin, 1997.

Erb89 Erbel, H.-D.:
Grundlagen zur Reinigung technischer Oberflächen.
Seminar Feinschleifen, Läppen und Polieren.
Schorndorf: Hahn & Kolb, Januar 1989.

Erm77 Ermakova, I. N.; Savelova, A. A.:
Calculating the Operation Conditions of Flat Lapping Machines with Planetary Motion.
Machines & Tooling 48 (1977) 4, S. 11-14.

Fel91 Feld, M.; Barylski, A.:
Flache Läppscheiben automatisch mit Schleifmittel armieren.
Werkstatt und Betrieb 124 (1991) 3, S. 194-196.

Fin50 Finkelnburg, H. H.:
Läppen.
Werkstatt und Betrieb 83 (1950) 1, S. 1-8.

Fin53 Finkelnburg, H. H.:
Einführung in die Feinbearbeitung.
Stuttgart: Deutscher Fachzeitschriften- und Fachbuchverlag GmbH, 1953.

Fis64 Fischer, E.:
Zur Art der zyklischen Bewegung und zum eigentlichen Prozeß zwischen Werkstück und Werkzeug bei verschiedenen Präzisionsläppmethoden.
Wiss. Z. TU Dresden 13 (1964) 5, S. 1379-1389.

Fis65a Fischer, E.:
Zur Vorausbestimmung des Abschliffes und der Abnutzung beim Präzisionsläppen.
Wiss. Z. TU Dresden 14 (1965) 1, S. 177-181.

Fis65b Fischer, E.:
Optimale Überdeckungsverhältnisse an zwangsgeführt umlaufenden Plan-Läppmaschinen.
Wiss. Z. TU Dresden 14 (1965) 3, S. 719-731.

Fis65c Fischer, E.:
Qualitätskennziffern des Läppens an zwangsgeführt umlaufenden Planläppmaschinen.
Wiss. Z. TU Dresden 14 (1965) 6, S. 1443-1450.

Fis66 Fischer, E.:
Kinematische Optimierung von Zwangslauf-Planläppmaschinen.
Werkstatt und Betrieb 99 (1966) 10, S. 723-730.

Fis70 Fischer, E.:
Zum Einfluß der Läppkinematik auf das Arbeitsergebnis.
Feinwerktechnik 74 (1970) 7, S. 298-301.

Fun93 Funck, A.:
Planschleifen auf Läppmaschinen.
Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb ZwF 88 (1993) 10, S. 454-456.

Fun94 Funck, A.:
Planschleifen mit Läppkinematik.
Dissertation TU Berlin, 1994; zugleich Reihe Produktionstechnik Berlin Band 154. München: Hanser, 1994.

Gel77 Gellert, W. (Hrsg.):
Kleine Enzyklopädie Mathematik.
Thun und Frankfurt: Verlag Harry Deutsch 1977.

Grö54 Grösel, H.:
Läppen.
Stuttgart: Deutscher Fachzeitschriften und Fachbuch-Verlag GmbH, 1954.

Has89 Hasse, G.-J.:
Reinigung des Kühlschmiermittels.
Seminar Feinschleifen, Läppen und Polieren.
Schorndorf: Hahn & Kolb, Januar 1989.

Hes96 Hesse, W.; Longerich, W.; Egger, R.:
Emissionsarmes Feinstschleifen zur Substitution des Läppens.
Seminar "Neue Möglichkeiten umweltgerechter Fertigung", Hannover, 1996.

Heu92 Heuer, W.:
Außenrundschleifen mit kleinen keramisch gebundenen CBN-Schleifscheiben.
Fortschritt-Berichte VDI Reihe 2 Nr. 270. Düsseldorf: VDI, 1992.

Hof97 Hoffmeister, H.-W.; Gäbler, J.:
Feinschleifen von Keramik mit Folienwerkzeugen.
Industrie Diamanten Rundschau IDR 31 (1997) 3, S. 228-233.

Hol94 Holz, B. F.:
Oberflächenqualität und Randzonenbeeinflussung beim Planschleifen einkristalliner Siliciumscheiben.
Dissertation TU Berlin, 1994; zugleich Reihe Produktionstechnik Berlin Band 143. München: Hanser, 1994.

Jah96 Jahanmir, S.:
Mechanismen des Materialabtrags beim Schleifen von Hochleistungskeramik.
VDI-Berichte 1276 (1996), S.159-173.

Jan96 Janssen, J. M.:
Neue Maschinenkonzepte für die Hart- und Präzisionstechnik.
Tagungsband zum 8. Int. Braunschweiger Feinbearbeitungskolloquium, 24.-26. April 1996.

Kar98a Karpuschewski, B.; Egger, R.; Mackensen, V. v.; Longerich, W.; Dennis, P.:
Innovative Feinschleifprozesse ersetzen das Läppen.
Maschinenmarkt, 104 (1998) 18, S. 44-49.

Kar98b Karpuschewski, B.; Egger, R.; Mackensen, V. v.; Longerich, W.; Dennis, P.:
Feinschleifen übertrifft das Läppen beim Fertigen von Keramik-Dichtscheiben.
Maschinenmarkt, Würzburg 104 (1998) 21, S. 34-39.

Kas69 Kassen, G.:
Beschreibung der elementaren Kinematik des Schleifvorganges.
Dissertation RWTH Aachen, 1969.

Kie43 Kienast, A.:
Die Begriffe Läppen, Ziehschleifen und Feinziehschleifen.
VDI-Z 87 (1943) 19/20, S.296-297.

Klo97 Klocke, F.; Hegener, G.; Muckli, J.:
Innovative Schleifwerkzeuge sichern Wettbewerbsvorteile.
VDI-Z 139 (1997) 7/8, S. 60-64.

Kom94 Komanduri, R., Ramamohan, T. R.:
On the Mechanisms of Material Removal in Fine Grinding and Polishing of Advanced Ceramics and Glasses.
Advancement of Intelligent Production; Eiji Usui (Editor); 1994 Elsevier Science; The Japan Society for Precision Engineering.

Kön96 König, W.; Klocke, F.:
Fertigungsverfahren Bd. 2: Schleifen, Honen, Läppen.
Düsseldorf: VDI, 1996, 3. Auflage.

Lät50 Lätzig, W.:
Läppen. Grundlagen und praktische Anwendung.
München: Hanser, 1950.

Leu00 Leute, A.:
Werkstoffe für die Industrie von morgen.
Ingenieur Werkstoffe 8 (1999) 4, S. 8-11.

Lic54 Lichtenberger, H.:
Die Spanmengenleistung beim Läppen ebener metallischer Werkstücke.
Dissertation TH Hannover 1954.

Loo89 Look, W.:
Eigenschaften und Anwendung von Schleifmitteln.
Seminar Feinschleifen, Läppen und Polieren.
Schorndorf: Hahn & Kolb, Januar 1989.

Luc91 Luczak, H.:
Arbeitswissenschaft. Konzepte, Arbeitspersonen, Arbeitsformen, Arbeitsumgebung.
Berlin: Papyrus-Druck, 1991.

Mac97 Mackensen, V. v.; Longerich, W.; Dennis, P.; Preising, D.:
Feinschleifen mit Diamant und CBN.
Industrie Diamanten Rundschau IDR 31 (1997) 1, S. 12-16.

Mar89 Martin, K.:
Der Abtragsvorgang beim Schleifen.
Seminar Feinschleifen, Läppen und Polieren.
Schorndorf: Hahn & Kolb, Januar 1989.

Möh87 Möhlen, H.:
Verschleißverhalten von Diamantschleifscheiben bei der Bearbeitung hochfester Keramikwerkstoffe.
Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren; 54. Auflage, S. 276-287.
Essen: Vulkan, 1987.

Mül89 Müller, W.; Gassmann, W.; Weber, E.:
Der Prozeß am Beispiel der Läppmaschine ZL 700 CNC.
Seminar Feinschleifen, Läppen und Polieren.
Schorndorf: Hahn & Kolb, Januar 1989.

Pah97 Pahl, G.; Beitz, W.:
Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung.
Berlin: Springer, 1997.

Pau91 Paulmann, R.:
Schleifen, Honen, Läppen: Grundlagen zu einem Verfahrensvergleich.
Dissertation TU Braunschweig. Düsseldorf: VDI 1991.

Pek58 Peklenik, J.:
Untersuchung über das Verschleißkriterium beim Schleifen.
Industrie-Anzeiger 80 (1958) 27, S. 397-402.

Plu83 Pluta, Z.; Kacalak, W.:
Mikroskopische Untersuchung von Diamantkorn-Spanspuren auf Aluminiumoxid-Keramik.
Industrie Diamanten Rundschau IDR 17 (1983) 3, S. 124-130.

Reh00 Rehfeldt, T.:
Läppen, Feinschleifen, Flachhonen.
Wirtschaftlicher Einsatz neuer Bearbeitungstechnologien.
Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren; 59. Auflage.
Essen: Vulkan, 2000.

Rot95 Roth, P.:
Abtrennmechanismen beim Schleifen von Aluminiumoxidkeramik.
Düsseldorf: VDI, 1995.

Sab91 Sabotka, I.:
Läppen technischer Keramik.
Dissertation TU Berlin, 1991; zugleich Reihe Produktionstechnik Berlin Band 90, München: Hanser, 1991.

Sal87 Salje, E.; Möhlen, H.:
Prozeßoptimierung beim Schleifen keramischer Werkstoffe.
Industrie Diamanten Rundschau IDR 21 (1987) 4, S. 243-247.

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; zugleich Reihe Produktionstechnik Berlin Band 71.
München: Hanser, 1988.

Sno74 Snoeys, R.; Peters, J.:
The Significance of Chip Thickness in Grinding.
Annals of the CIRP, Vol 23/2 (1974), S. 227-237.

Spu72 Spur, G.:
Optimierung des Fertigungssystems Werkzeugmaschine.
Fortschritte der Fertigung auf Werkzeugmaschinen Bd. 3.
München: Hanser, 1972.

Spu86 Spur, G.; Simpfendörfer, D.:
Numerische Vorherbestimmung des Werkzeugverschleißes beim Planläppen.
VDI-Z 128 (1986) 3, S. 76-82.

Spu87a Spur, G.; Sabotka, I.; Tio, T.-H.; Wunsch, U. E.:
Überblick über trennende Fertigungsverfahren zur Hartbearbeitung von Keramiken. Teil 1: Schleifen, Honen.
Werkstoffe und Konstruktion, 1 (1987) 3, 169-173.

Spu87b Spur, G.; Sabotka, I.; Tio, T.-H.; Wunsch, U. E.:
Überblick über trennende Fertigungsverfahren zur Hartbearbeitung von Keramiken. Teil 2: Läppen, Funkenerosion, Ultraschall-Schwingläppen.
Werkstoffe und Konstruktion, 1 (1987) 4, 263-267.

Spu87c Spur, G.; Simpfendörfer, D.; Trilk, H.:
Rechnergestützte Werkzeugverschleißmessung beim Planläppen.
Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb ZwF 82 (1987) 1, S. 30-34.

Spu89 Spur, G.; Linke, K.; Sabotka, I.; Tio, T.-H.; Uhlmann, E.:
Keramikbearbeitung. Schleifen, Honen, Läppen, Abtragen.
München: Hanser, 1989.

Spu93 Spur, G.; Uhlmann, E.; Brücher, Th.:
Werkstoffspezifische Schleiftechnologie – Schlüssel für erhöhte Prozeßfähigkeit in der Keramikbearbeitung.
In: Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren; 57. Ausgabe. Hrsg.: E. Salje. Essen: Vulkan-Verlag, 1993.

Spu94 Spur, G.; Brücher, Th.:
Kühlschmierstoffe beim Schleifen von Siliciumnitrid-Keramik.
Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb ZwF 89 (1994) 6, S. 335-337.

Spu95a Spur, G.; Eichhorn, H.:
Untersuchungen zum Verschleiß von Läppscheiben beim Planparallelläppen.
In: Vortragsband Seminar Poznan-Berlin „Dokladna Obrabotka Elementov Maszyn“, Poznan, 1995.

Spu95b Spur, G.; Eichhorn, H.:
Grundlegende Untersuchungen zur Produktivitätssteigerung des Fertigungsverfahrens Planparallelläppen durch Konditionieren der Läppscheiben.
Arbeitsbericht zum DFG-Projekt Sp84/137-2, 1995.

Spu95c Spur, G.; Funck, A.; Engel, H.:
Problems of Flatness in Plane Surface Grinding.
Transactions of NAMRI/SME 13 (1995), S. 97-102.

Spu95d Spur, G.; Weigmann, U.-P.:
Honen oxidkeramischer Werkstoffe.
Industrie Diamanten Rundschau IDR 29 (1995) 4, S. 228-234.

Spu96 Spur, G.:
Die Genauigkeit von Maschinen: Eine Konstruktionslehre.
München, Wien: Hanser, 1996.

Spu97 Spur, G.; Eichhorn, H.:
Kinematisches Simulationsmodell des Läppscheibenverschleißes.
Industrie Diamanten Rundschau IDR 31 (1997) 2, S. 169-178.

Sta55 Staudinger, H.:
Das Schleifen und Polieren der Metalle.
Werkstattbücher Heft 5, 5. Auflage.
Berlin: Springer, 1955.

Stä97a Stähli, A. W.; Tröhler, S.:
Potentiale zur wirtschaftlichen Bearbeitung in der Prozeßkette Läppen-Flachhonen.
Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren; 58. Auflage, S. 529-538.
Essen: Vulkan, 1997.

Stä97b Stähli, A. W.:
Flachhonen wird sich lohnen.
Schweizer Präzisions-Fertigungstechnik, Aug. 1997, S. 41-44.

Stä98 Stähli, A. W.:
Feinstbearbeitung. Trends der Flachhon- und Läpp-Technik.
Feinstbearbeitung technischer Oberflächen, 4. Internationales IWF-Kolloquium 1998, ETH Zürich, S. 47-62.

Stä99 Stähli, A. W.:
Das Flachhonen mit Diamant- oder CBN-Arbeitsscheiben.
Industrie Diamanten Rundschau IDR 33 (1999) 4, S. 314-318.

Sto76 Storm, R.:
Wahrscheinlichkeitsrechnung, mathematische Statistik und statistische Qualitätskontrolle.
Leipzig: Fachbuchverlag, 1976.

Sto89 Storr, M.:
Kühlschmierstoffe für das Feinschleifen.
Seminar Feinschleifen, Läppen und Polieren.
Schorndorf: Hahn & Kolb, Januar 1989.

Swa73 Swan, O.:
Diamantläppen-Kunst oder Technik.
Industrie Diamanten Rundschau IDR 7 (1973) 4, S. 179-184.

Tön92 Tönshoff, H. K.; Roth, P.:
Gefügeeinfluß auf die Bearbeitbarkeit von Aluminiumoxidkeramik.
Werkstattstechnik 82 (1992) 12, S. 65-66.

Tön98a Tönshoff, H. K.; Egger, R.; Longerich, W.; Preising, D.:
Superfinishing Ceramics. Fine Grinding can Replace Lapping for a Superior Finish.
Manufacturing Engineering 2 (1998), S. 52-59.

Tön98b Tönshoff, H. K.; Egger, R.; Mackensen, V.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.:
Tiefschleifen hochfester keramischer Werkstoffe.
Dissertation TU Berlin, 1993; zugleich Reihe Produktionstechnik Berlin Band 129. München: Hanser, 1993.

Uhl98 Uhlmann, E.; Ardelt, Th.; Daus, N.:
Kinematische Analyse von Zweischeibenmaschinen.
Werkstattstechnik 88 (1998) 6, S. 273-276 .

Uhl99a Uhlmann, E.; Ardelt, Th.:
Influence of Kinematics on the Face Grinding Process on Lapping Machines.
Annals of the CIRP 48/1, (1999), S. 281-284.

Uhl99b Uhlmann, E.; Ardelt, Th.; Stingl, P.; Rußner, C.; Magg, Th.; Reiser, A.:
Planschleifen mit Läppkinematik.
Industrie Diamanten Rundschau IDR 33 (1999) 1, S. 79-83.

Uhl00 Uhlmann, E.; Ardelt, Th.:
Kinematik und Prozeßverhalten beim Planschleifen mit Läppkinematik.
In: Feinstbearbeitung technischer Oberflächen. Tagungsband zum „5. Int. IWF-Kolloquium“ der ETH Zürich am 11./12. Mai 2000, S. 93-105.

Vin1493 Vinci, Leonardo da:
Tratado De Estatica y Mechanica en Italiano.
Handschrift von 1493.
In: Codices Madrid. Band I: Faksimileausgabe der Handschrift, S. 163 (Rückseite) bis 164; Band IV: Transkription und Übersetzung, S. 456.
Frankfurt: Fischer, 1974.

War94 Warnecke, G.; Hollstein, T.; König, W.; Spur, G.; Tönshoff, H. K. (Hrsg.):
Schleifen von Hochleistungskeramik.
Köln: TÜV Rheinland, 1994.

Web89 Weber, E.:
Einsatzgebiete des Läppens und Feinschleifens.
Seminar Feinschleifen, Läppen und Polieren.
Schorndorf: Hahn & Kolb, Januar 1989.

Wei97 Weigmann, U.-P.:
Honen keramischer Werkstoffe.
Dissertation TU Berlin, 1997.

Wer71 Werner, G.:
Kinematik und Mechanik des Schleifprozesses.
Dissertation RWTH Aachen, 1971.

Wol98 Wolters, P.; Mackensen, V. v.; Longerich, P.; Dennis, P.; Preising, D.:
Feinschleifen ebener Flächen auf Maschinen mit Läppkinematik.
Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren; 58. Auflage.
Essen: Vulkan, 1998, S. 215-226.

Wöt96 Wötting, G.; Leimer, G.; Gugel, E.:
Werkstoffentwicklung und konstruktive Anwendung von
Siliciumnitrid-Hochleistungskeramik.
In: Bearbeitung neuer Werkstoffe. VDI Berichte Nr. 1276.
Düsseldorf: VDI, 1996, S. 89-103.

Firmenschriften

B&K N. N.:
Duomat ZL 700 CNC. Bedienungs- und Programmieranleitung.
Bohner & Köhle GmbH & Co., Esslingen.

CT N. N.:
Die Werkstoffe. Werkstofftabelle.
CeramTec AG, Lauf.

H&Ka N. N.:
Neuheit: Läpp- und Feinschleifmaschine ZL 700 CNC.
Hahn & Kolb GmbH & Co., Stuttgart.

H&Kb N. N.:
Duomat 700. Feinschleifen, Läppen und Polieren.
Hahn & Kolb GmbH & Co., Stuttgart.

OHa N. N.:
Anwendungstechnik. Schleifkonzentrat Rotorol 6000 S.
Oel-Held GmbH, Stuttgart.

OHb N. N.:
Anwendungstechnik. Superfinishoil Diamond.
Oel-Held GmbH, Stuttgart.

OHc N. N.:
EG-Sicherheitsdatenblatt Schleifkonzentrat Rotorol 6000 S.
Oel-Held GmbH, Stuttgart.

OHd N. N.:
EG-Sicherheitsdatenblatt Superfinishoil Diamond 80.
Oel-Held GmbH, Stuttgart.

Stäa Stähli, A. W.:
Flathoning. Das Doppelscheiben-Maschinenprogramm für Spitzenleistungen in der Flachhon- und Läpp-Technik.
A.W. Stähli AG, Pieterlen, Schweiz.

Stäb Stähli, A. W.:
Läppen und Flachhonen mit Zweischeiben-Maschinen.
A.W. Stähli AG, Pieterlen, Schweiz.

TS N. N.:
Turbo-Reinigungsanlage VD 72.7837a. Betriebs- und Wartungsanleitung.
Turbo-Separator AG, Lichentsteig, Schweiz.

Wol N. N.:
Automation-das intelligente Fertigungssystem.
Peter Wolters Werkzeugmaschinen GmbH, Rendsburg.

Zitierte Normen und Richtlinien

DIN 4762 DIN 4762: Oberflächenrauheit. Begriffe. Oberfläche 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.

DIN 51110 Prüfung von keramischen Hochleistungswerkstoffen:
4-Punkt Biegeversuch bei Raumtemperatur.
Berlin: Beuth, 1990.

ISO3002 Part 5 Basic Quantities in Cutting and Grinding. Part 5: Basic Terminology for Grinding Processes using Grinding Wheels.
Genf: International Organisation for Standartization, 1989.

VDI 3258 Kostenrechnung mit Maschinenstundensätzen.
Begriffe, Bezeichnungen, Zusammenhänge.
Düsseldorf: VDI, 1962.

VDI 3396 Kühlschmierflüssigkeiten. Grundlagen und Anwendungen insbesondere beim Schleifen.
Düsseldorf: VDI, 1983.

Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin

Wissensbasierte Diagnose technischer Systeme mit konnektionistischen Modellen
Hartwig Weber. 201 Seiten, 46 Bilder, 7 Tabellen. 1996. Kartoniert.

Untersuchung der Einsatzmöglichkeiten industrieller Qualitätstechniken im Dienstleistungsbereich
Alexander Gogoll. 173 Seiten, 71 Bilder. 1996. Kartoniert.

Perforierschneiden mit Nd:YAG-Festkörper hoher Impulsenergien
Jürgen Betz. 167 Seiten, 97 Bilder, 5 Tabellen. 1996. Kartoniert.

Analyse der Werkstückhaltekräfte am Dreibackenfutter im Rahmen einer Maschinen- und Prozeßüberwachung
Rolf Thiel. 130 Seiten, 69 Bilder. 1996. Kartoniert.

Gestaltung von Entscheidungsstrukturen zur Optimierung von Produktentwicklungsprozessen
Florian Golm. 173 Seiten, 83 Bilder. 1996. Kartoniert.

Fehlersensitive Produktgestaltung in integrierten Systemarchitekturen
Michael Stephan. 164 Seiten, 58 Bilder. 1996. Kartoniert.

Wirtschaftliche Einführung der rechnerintegrierten Produktion in kleinen Unternehmen mit komplexer Produktionsstruktur
Wolfgang Bilger. 174 Seiten, 42 Bilder, 1 Tabelle. 1996. Kartoniert.

Beitrag zur Organisation von Demontagesystemen
Claudia Hentschel. 160 Seiten, 54 Bilder, 16 Tabellen. 1996. Kartoniert.

Entwicklung eines Modells für eine rechnerunterstützte Qualitätswissensbasis
Jörg-Peter Brauer. 150 Seiten, 40 Bilder, 2 Tabellen. 1996. Kartoniert.

Kühlschmierung beim Schleifen keramischer Werkstoffe
Thomas Brücher. 330 Seiten, 124 Bilder, 17 Tabellen. 1996. Kartoniert.

Einführen und Umsetzen von Total Quality Management
Christian Malorny. 310 Seiten, 68 Bilder. 1996. Kartoniert.

Qualitätsmanagement für die Einführung bestandsarmer Produktionskonzepte
Torsten Walter. 143 Seiten, 37 Bilder, 13 Tabellen. 1996. Kartoniert.

Virtuelle Tonmodellierung zur skizzierenden Formgestaltung im Industriedesign
Jörg Lüddemann. 166 Seiten, 76 Bilder. 1996. Kartoniert.

Konzept zur Steigerung der Effektivität von Produktionsanlagen
Mehdi Al-Radhi, 165 Seiten, 45 Bilder. 1996. Kartoniert.

Produktionsstrukturierung auf der Basis strategischer Eigenfertigungskomponenten
Olaf Sauer, 144 Seiten, 62 Bilder. 1996. Kartoniert.

Auswahl und Konditionierung von Werkzeugen für das Außenrund-Profilschleifen technischer Keramiken
Ingo Liebe, 170 Seiten, 79 Bilder, 16 Tabellen. 1996. Kartoniert.

Automatisiertes Nähen von Zuschnitten ungleicher Kontur
Thomas Gottschalk, 140 Seiten, 70 Bilder. 1996. Kartoniert.

Featureintegrierte Fertigungsplanung
Armin Ulbrich, 209 Seiten, 93 Bilder. 1996. Kartoniert.

Aufgabenbezogene Anordnung und Programmierung von Laserscannern für die 2D-Geometrieinspektion
Heinrich Schuler, 148 Seiten, 81 Bilder. 1996. Kartoniert.

Arbeitsgestaltung zur Fehlervermeidung bei der SMD-Elektronikmontage
Stephan Krüger, 173 Seiten, 51 Bilder, 22 Tabellen. 1996. Kartoniert.

Modell der zyklischen Prozeßrestrukturierung als Teil des Total Quality Managements
Timo Füermann, 176 Seiten, 79 Bilder, 10 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Analyse der Rentabilität von Qualitätstechniken
Philipp Theden, 158 Seiten, 50 Bilder, 10 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Thermisch beschichtete CFK-Wellen im Maschinenbau
Andreas Kranz, 148 Seiten, 76 Bilder, 12 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Integrativer Produktentwicklungsarbeitsplatz mit Multimedia- und Breitbandkommunikationstechnik
Thomas Kiesewetter, 169 Seiten, 60 Bilder. 1997. Kartoniert.

Verbesserung der Planung von Produktionsprozessen im Werkzeugbau durch Qualitätsplanung mittels Quality Function Deployment (QFD)
Manfred Zoschke, 140 Seiten, 14 Bilder, 7 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Flexibel anpaßbare Softwaresysteme zur rechnerunterstützten Fertigungssteuerung
Harald Krause, 148 Seiten, 89 Bilder, 27 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Anpassung des Qualitätswesens bei Total Quality Management
Frank Krämer, 262 Seiten, 75 Bilder, 40 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Integration von Qualitäts- und Umweltmanagementsystemen und ihre betriebliche Umsetzung
Detlef Butterbrodt, 240 Seiten, 60 Bilder, 12 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Die Entwicklung des deutschen Werkzeugmaschinenbaus in der Zeit von 1930 bis 1960
René Haak, 225 Seiten, 30 Bilder, 9 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Fertigungsintegrierte Instandhaltung
Ralf Jagodejkin, 195 Seiten, 55 Bilder, 21 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Analyse der Prozeßkette Pulverspritzgießen
Peter Merz, 165 Seiten, 78 Bilder. 1997. Kartoniert.

Bearbeitung von metallischen Gasturbinenwerkstoffen durch Tiefschleifen und Drahterodieren
Achim Meier, 220 Seiten, 80 Bilder. 1997. Kartoniert.

Drehzahlsynchronisation der Wirkpartner beim Abrichten und Schleifen
Holger Eichhorn, 200 Seiten, 86 Bilder, 13 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Läppen von einkristallinem Silicium
Hendrik Engel, 200 Seiten, 85 Bilder, 13 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Verschleißverhalten von polykristallinem Diamant bei instationärer Beanspruchung
Uwe Lachmund, 210 Seiten, 100 Bilder, 15 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Feature-basierte Meßplanung für Koordinatenmeßmaschinen
Michael Ciesla, 162 Seiten, 79 Bilder. 1997. Kartoniert.

Informationssystem für heterogen verteilte Qualitätsinformationen
Volker Kleinhans, 150 Seiten, 67 Bilder. 1997. Kartoniert.

Untersuchung und Interpretation der beim Schleifen der Nickelbasislegierung IN 738 LC induzierten Gefügeänderungen in der Randzone
Pengxi Li, 147 Seiten, 135 Bilder, 19 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Thermische Stabilisierung von Werkzeugmaschinen-Spindelkästen durch Carbonfaserverbundkunststoffe
Matthias Liebetrau, 200 Seiten, 122 Bilder. 1997. Kartoniert.

Kooperationsentwicklung mit Zulieferern in der Automobilindustrie Indonesien
Ida-Bagus Kesawa Narayana, 214 Seiten, 95 Bilder, 11 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Flexible On-line-Prozeßoptimierung mit integrierten adaptiven Modellen
Martin Bauer, 160 Seiten, 55 Bilder. 1997. Kartoniert.

Einsatz eines Mobilrobotersystems in der Endmontage des Schiffsstahlkörperbaus
Henning Müller, 170 Seiten, 62 Bilder. 1997. Kartoniert.

Prozeßmodell für die Kraftübertragung durch neue Wirkflächen zur Entwicklung geometrietoleranter Demontagewerkzeuge
Martin Wagner, 170 Seiten, 100 Bilder, 12 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Honen keramischer Werkstoffe
Uwe-Peter Weigmann, 250 Seiten, 103 Bilder, 15 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Modellierung und Vermessung linearer Gelenkbewegungen bei Industrierobotern
Michael Grethlein, 154 Seiten, 56 Bilder, 5 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Globalisierungspotentiale im Maschinenbau
Jens Nackmayr, 174 Seiten, 68 Bilder, 5 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Entwicklung und praktische Erprobung eines Kennzahlensystems für das Total Quality Management
Olaf Wolter, 190 Seiten, 52 Bilder. 1997. Kartoniert.

Prozeßorientierte Techniken zur systematischen Verbesserung des betrieblichen Umweltschutzes
Ulrich Tammler, 185 Seiten, 72 Bilder, 25 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Eine Methode zur automatischen Strukturinterpretation in digitalisierten technischen Zeichnungen
Nailja Luth, 150 Seiten, 76 Bilder, 10 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Ganzheitliches Modell zur Umsetzung von Total Quality Management
Philipp Radtke, 180 Seiten, 50 Bilder. 1997. Kartoniert.

Ein methodischer Ansatz zum Strukturvergleich technischer Objekte
Matthias Müller, 245 Seiten, 54 Bilder, 11 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Prozeßparameter beim Scherschneiden von Karosserieblechteilen
Andreas Pöllmann, 154 Seiten, 80 Bilder, 11 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Biologisch basierte Verfahren zur Objekterkennung und Texturanalyse
Javier Ruiz-del-Solar, 145 Seiten, 98 Bilder, 8 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Methodisches Konstruieren als Mittel zur systematischen Gestaltung von Dienstleistungen
Wolfgang Schwarz, 130 Seiten, 80 Bilder. 1997. Kartoniert.

Techniken zur Entwicklung von Führungsqualität im Total Quality Management
Claudia Kostka, 200 Seiten, 30 Bilder. 1998. Kartoniert.

Metamodellierung als Instrument der Verknüpfung von Unternehmensmodellen
Wolfgang Müller, 170 Seiten, 61 Bilder. 1998. Kartoniert.

Entwicklung und Realisierung einer Methode für die flexible Auswertung von Profillinien
Lorenz Voit, 145 Seiten, 75 Bilder, 20 Tabellen. 1998. Kartoniert.

Gewichts- und Lärmminderung von Laufrädern für Schienenfahrzeuge durch Einsatz von Faserverbundwerkstoffen
Frank Warmuth, 130 Seiten, 110 Bilder. 1998. Kartoniert.

Prozeß-Benchmarking - Methode zum branchenunabhängigen Vergleich von Prozessen
Gunnar Siebert, 130 Seiten, 45 Bilder, 21 Tabellen. 1998. Kartoniert.

Modellierungsvorgehen zur Planung von Geschäftsprozessen
Martin Schwermer, 160 Seiten, 54 Bilder, 6 Tabellen. 1998. Kartoniert.

Bewertung und Verkürzung von Anlaufprozessen für Betriebsmittel
Ronald Fritsche, 135 Seiten, 71 Bilder. 1998. Kartoniert.

Analyse des Drehens duktiler Werkstoffe mit der Finite-Elemente-Methode
Steffen Gerloff, 272 Seiten, 116 Bilder, 7 Tabellen. 1998. Kartoniert.

Prozeßorientierte Auswahl von PPS-Systemen
Georg Neubauer, 146 Seiten, 85 Bilder. 1998. Kartoniert.

Featurebasiertes Gestalten von Produkten mit Freiformgeometrien
Christiane Stiel, 153 Seiten, 50 Bilder, 1 Tabelle. 1998. Kartoniert.

Entwicklung und Verifizierung eines Prozeßmodells für das Einzelpunktlöten in der Elektronikfertigung
Jörg Niemeier, 120 Seiten, 75 Bilder. 1998. Kartoniert.

Beschleunigte Evolutionsstrategie zur Optimierung von Fertigungsprozessen
Jürgen H. Bremer, 125 Seiten, 38 Bilder, 23 Tabellen. 1998. Kartoniert.

Konfigurierbares, multimediales Fernbetreuungssystem für rechnergesteuerte Fertigungseinrichtungen
Zaharya Menevidis, 155 Seiten, 51 Bilder, 9 Tabellen. 1998. Kartoniert.

Funkenerosive Bearbeitung von polykristallinem Diamant
Steffen Appel, 150 Seiten, 62 Bilder, 10 Tabellen. 1998. Kartoniert.

Analyse und Simulation des Laserstrahlschneidens von Faserverbundkunststoffen
Stefan Liebelt, 180 Seiten, 70 Bilder, 12 Tabellen. 1998. Kartoniert.

Flexible Spannbacken für die Drehbearbeitung
Udo Bahrke, 168 Seiten, 120 Bilder. 1998. Kartoniert.

Controlling des Fabrikbetriebes auf der Basis des Total Quality Managements (TQM)
Dirk Wilmes, 195 Seiten, 51 Bilder. 1998. Kartoniert.

Ein Modell zur Reduzierung der Variantenvielfalt in Produktionsunternehmen
Sven-Norman Gembrys, 120 Seiten, 48 Bilder. 1998. Kartoniert.

Konzept eines Modells zur Produktentwicklung
Hanno Weber, 160 Seiten, 85 Bilder. 1998. Kartoniert.

Entwicklung einer handlungsorientierten Interaktionsmethode zur Benutzung produktionstechnischer Datenbanken
Regine Gernert, 168 Seiten, 40 Bilder, 15 Tabellen. 1998. Kartoniert.

Modell zur Gestaltung und Auswahl von CAQ-Lösungen
Thomas Konert, 172 Seiten, 68 Bilder, 5 Tabellen. 1998. Kartoniert.

Globales Produktdatenmanagement zur Verbesserung der Produktentwicklung
Matthias Doblies, 139 Seiten, 49 Bilder, 21 Tabellen. 1998. Kartoniert.

Designintegrierte Produktplanung und Produktkonzeption
Timm Kehler, 158 Seiten, 78 Bilder. 1998. Kartoniert.

Verkürzung der Produktentwicklungszeit durch Parallelverarbeitung
Haygazun Hayka, 175 Seiten, 46 Bilder, 13 Tabellen. 1998. Kartoniert.

Analyse der Schnitt- und Kerbgeometrie sowie des Strahls beim Abrasivwasserstrahlschneiden
Bernhard Axmann, 199 Seiten, 100 Bilder, 20 Tabellen. 1998. Kartoniert.

Anwendung neuronaler Netze zur Werkzeugverschleißerkennung beim Fräsen
Edgar Fries, 200 Seiten, 106 Bilder, 14 Tabellen. 1999. Kartoniert.

Konzept zur lebenszyklusorientierten Verbesserung der Effektivität von Produktionseinrichtungen
Ulf Perlewitz, 162 Seiten, 75 Bilder, 6 Tabellen. 1999. Kartoniert.

Methoden zur Verbesserung der Fehlererkennung an Antriebsstrecken
Jörg Krüger, 170 Seiten, 101 Bilder, 21 Tabellen. 1999. Kartoniert.

Beitrag zur Entwicklung eines modularen TQM-Modells für das Krankenhauswesen
Bettina Hahne, 180 Seiten, 50 Bilder, 5 Tabellen. 1999. Kartoniert.

Steuerungsintegriertes Prozeßüberwachungssystem für Drehmaschinen
Ireneus Suwalski, 167 Seiten, 106 Bilder, 13 Tabellen. 1999. Kartoniert.

Montagesystemplanung und -steuerung für die variantenreiche Serienmontage
Kuo-Wen Chang, 148 Seiten, 59 Bilder. 1999. Kartoniert

Werkstückspannsysteme aus faserverstärkten Kunststoffen für die Hochgeschwindigkeitsdrehbearbeitung
Uwe Mette, 227 Seiten, 106 Bilder, 27 Tabellen. 2000. Kartoniert.

Bildanalysesystem zur robusten Erkennung von Kennzeichen an Fahrzeugen
Lutz Lohmann, 184 Seiten, 81 Bilder, 18 Tabellen. 2000. Kartoniert.

Planung und marktorientierter Betrieb von Demontagefabriken
Holger Perlewitz, 180 Seiten, 72 Bilder, 53 Tabellen. 2000. Kartoniert.

Simulation von Produktentwicklungsprozessen
Hans-Christoph Raupach, 150 Seiten, 60 Bilder, 4 Tabellen. 2000. Kartoniert.

Induktive Wegsensoren zur Überwachung und Regelung des Blecheinzugs beim Tiefziehen
Ute Forstmann, 110 Seiten, 59 Bilder, 2 Tabellen. 2000. Kartoniert.

Konstruktive Berechnungsmodelle auf Basis Neuronaler Netze
Alexander Carl, 135 Seiten, 53 Bilder, 2 Tabellen. 2000. Kartoniert.

Konzeption eines webbasierten Beratungs-Unterstützungs-Systems am Fallbeispiel einer PDM-Systemauswahl
Toralf Kahlert, 140 Seiten, 50 Bilder, 4 Tabellen. 2000. Kartoniert.

Ein Ansatz zum Konstruieren mit Lösungsräumen
Petrik Ziebeil, 155 Seiten, 44 Bilder, 6 Tabellen. 2000. Kartoniert.

Rapid Styling Validation - Berechnung und Simulation in der Konzeptphase der Produktentwicklung
Yasmina Bock, 150 Seiten, 57 Bilder, 5 Tabellen. 2000. Kartoniert.

Einfluss der Relativbewegung auf den Prozess und das Arbeitsergebnis beim Planschleifen mit Planetenkinematik
Thomas Ardelt, 200 Seiten, 102 Bilder, 19 Tabellen. 2001. Kartoniert.

ISBN 3-8167-59609-3