



Dipl.-Ing. Robert Ablinger

Drehzahlsynchrones Unrundschleifen

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der technischen Wissenschaften

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

durchgeführt am

Institut für Fertigungstechnik der
Technischen Universität Graz

Betreuer

Univ.-Doz. Dipl.-Ing. Dr.techn. Alois Schmid

Zweitgutachter

Univ.-Prof. Dr. Franc Čuš

Graz, November 2014

EIDESSTÄTLICHE ERKLÄRUNG

AFFIDAVIT

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Dissertation identisch.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present doctoral dissertation.

Datum / Date

Unterschrift / Signature

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2010 bis 2013 während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Assistent am Institut für Fertigungstechnik der TU-Graz. Meinen ganz besonderen Dank möchte ich Herrn Univ.-Doz. Dipl.-Ing. Dr.techn. Alois Schmid für die Aufgabenstellung und die Betreuung dieser wissenschaftlichen Arbeit aussprechen. Zudem möchte ich mich beim emeritierten Institutsvorstand, Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Adolf Frank, bedanken, der das Forschungsprojekt stets unterstützt hat. Durch seine Firmenkontakte konnten die in dieser Arbeit gezeigten Schleifversuche durchgeführt werden. Des Weiteren bedanke ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dr. Franc Čuš für die Übernahme der Zweitbegutachtung.

Recht herzlich bedanke ich mich für das gute Arbeitsklima und die Unterstützung während meiner Arbeit bei allen Kollegen am Institut für Fertigungstechnik, besonders beim Institutsleiter, Herrn Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Heinrich Hochleitner, welcher meine Forschungsstätigkeit förderte und mir mit Rat und Tat stets zur Seite stand.

Mein besonderer Dank gilt auch den Mitarbeitern der Firma GST - Gesellschaft für Schleiftechnik GmbH, insbesondere Herrn Franz Hein und Herrn Günter Hacker, welche die durchgeführten Schleifversuche unterstützt sowie durch den Umbau und die Bereitstellung einer Versuchsmaschine ermöglicht haben.

Graz, im November 2014

Robert Ablinger

Kurzfassung

Abstract

Bei der Fachmesse für Werkzeugmaschinen in Hannover wurden 1981 erstmals CNC-Rundschleifmaschinen vorgestellt, die gleichzeitig zwei Achsen synchron verfahren konnten (EMO 1981). Seit dieser Zeit werden unrunde Werkstückgeometrien, wie etwa die Erhebungskurven einer Nockenwelle, auf CNC-Rundschleifmaschinen durch Pendelhubschleifen mit kreisrunden Schleifscheiben bearbeitet. Im Vergleich dazu ist das Unrundscheifen mit im Querschnitt unrunder Schleifscheiben und Drehzahlsynchronisation zwischen den Wirkpartnern zwar kein gänzlich neues Verfahren, jedoch wenig erprobt und großserientechnisch noch nicht etabliert. In dieser Arbeit werden, ausgehend von aufgestellten Rechenmodellen, die Merkmale dieses speziellen Unrundscheifverfahrens tiefergehend untersucht und daraus Anwendungsfälle abgeleitet. Zur Durchführung der theoretischen und praktischen Untersuchungen wird mit der Software MATLAB ein Rechenprogramm mit einer graphischen Benutzeroberfläche erstellt. Dieses wird mit Hilfe realer Bearbeitungsversuche verifiziert. Den Abschluss dieser Arbeit bilden die Dokumentation der durchgeführten Schleifversuche, die Zusammenfassung der Forschungsergebnisse und der Ausblick über die Weiterführung des Forschungsprojekts.

At the specialized fair for machine tools in Hannover (EMO) CNC-circular grinding machines that can work on two axis simultaneously were first introduced in 1981. Since then non circular work piece contours, such as the uneven shape of a cam shaft, are machined by CNC-circular grinding machines using circular profiled grinding discs in pendular movement. In comparison to that, non circular grinding by using non circular profiled grinding wheels and rotation speed synchronization between work piece and grinding wheel is not a completely new method, however it is less tested and not applied to series production until now. In this paper the characteristics of this specialized noncircular grinding method are thoroughly examined based on mathematical models. Then the practical applications are deduced. In order to facilitate the theoretical and practical analysis a computer program with a graphical user interface was designed with the help of the software MATLAB. In the final step of this paper, the conducted grinding experiments are documented, the research results are summarized and an outlook on the future continuation of the research project is provided.

Inhaltsverzeichnis

Häufig verwendete Abkürzungen und Formelzeichen	IX
1 Einführung.....	1
2 Aufgabenstellung.....	4
3 Stand der Technik.....	5
3.1 Schleifprozess.....	5
3.1.1 Spanbildung beim Schleifen	5
3.1.2 Zerspangrößen beim Außenrunds Schleifen.....	6
3.1.3 Schnittkräfte beim Schleifen	7
3.2 Abrichten.....	9
3.2.1 Abrichtwerkzeuge.....	9
3.2.2 Wirkrautiefe der Schleifscheibe beim Abrichten mit Abrichtrollen	11
3.2.3 Alternative, berührungslose Abrichtverfahren	12
3.3 Kühlung und Schmierung	13
3.4 Schleifverfahren	15
3.4.1 Unrunds Schleifen	15
3.4.2 Kegelschleifen.....	20
3.4.3 Schrägeinstechschleifen.....	22
3.4.4 Außenrund-Längsschleifen im Tiefschnitt (Schälschleifen).....	23
3.4.5 Spitzenlosschleifen.....	24
3.4.6 Stützs Schleifen.....	26
3.5 Schleifen mit unrunder oder exzentrisch runden Schleifscheiben	28
3.5.1 Schleifmaschine mit unrunder oder exzentrisch runden Schleifscheiben	29
3.5.2 Schleifmaschine mit Abrichtsupport.....	31
3.5.3 Bandschleifmaschine für unrunder Innenkonturen	32
3.5.4 Schleifen von Nocken mit konkaven Flanken	33
3.5.5 Schrägstellung der Schleifscheibe zur Erhöhung der Relativgeschwindigkeit..	34

3.5.6	Schleifversuche mit Drehzahlsynchronisation beim Abrichten und Schleifen...	35
3.5.7	Ausgleich der auf die Schleifspindel wirkenden Unwuchtkräfte.....	36
3.6	Grundlagen für Rechenmodelle für das Unrundscheifen.....	38
3.6.1	Umkreisradius eines Dreiecks	38
3.6.2	Kreisgleichung in Polarkoordinaten	39
3.6.3	Tangente einer Kurve	39
3.6.4	Tangentennäherungsverfahren	39
3.6.5	Splineinterpolation.....	40
3.6.6	Profilumrechnung für Tasterwerte	42
3.6.7	Berechnung der Achsbewegungen beim Pendelhubschleifen	44
3.6.8	Formabweichung durch veränderten Schleifscheibendurchmesser	44
3.6.9	Polygonschleifmaschine.....	45
3.6.10	Berechnung der Werkzeuggeometrie beim Wälzstoßen von Polygonnaben....	46
3.6.11	Geometrieübertragung beim drehzahlsynchronen Abrichten und Schleifen.....	47
3.6.12	Definition einer dreidimensionalen Kolbengeometrie	49
4	Rechenmodelle für das drehzahlsynchrone Unrundscheifen	51
4.1	Berechnung der Schleifscheibengeometrie	51
4.1.1	Geometrische Näherungslösung	53
4.1.2	Näherungslösung durch Nullstellensuche.....	56
4.1.3	Analytische Lösung für Gegenlaufschleifen mit Drehzahlverhältnis 1:1	57
4.1.4	Näherungslösung für drehsymmetrische Werkstückquerschnitte.....	58
4.2	Verfahrensbedingte Geometrieabweichung am gefertigten Werkstück.....	59
4.3	Relativgeschwindigkeit zwischen Schleifscheibe und Werkstück.....	59
4.4	Verteilung der Zerspanung am Schleifscheibenumfang.....	61
4.5	Spitzenlos-Unrundscheifen.....	63
4.6	Bewegungen beim Pendelhubabrichten	66
4.6.1	Kinematik in X-Richtung	66
4.6.2	Dreidimensionales Abrichten.....	67
4.7	Rechenprogramm für das drehzahlsynchrone Unrundscheifen.....	69

4.7.1	Programmstruktur.....	70
4.7.2	Quellcode.....	71
5	Grundlegende Untersuchungen zum drehzahlsynchronen Unrundscheifen	72
5.1	Entstehende Werkstückoberfläche beim Einstechschleifen	72
5.2	Relativgeschwindigkeit beim Gleichlaufschleifen	75
5.3	Gleichlaufschleifen von konkaven Werkstücken	77
5.4	Gegenlaufschleifen von konvexen Werkstücken	79
5.5	Unrundscheifen von Rohteilen mit kreisrundem Ausgangsquerschnitt.....	81
5.6	Innenschleifen mit unrunder Schleifscheiben.....	83
5.7	Beeinflussung der ungleichmäßigen Schleifscheibenabnutzung.....	87
6	Anwendungen für das drehzahlsynchrone Unrundscheifen	91
6.1	Dreidimensionales drehzahlsynchrones Unrundscheifen.....	91
6.1.1	Unrundscheifen von Kolben für Brennkraftmaschinen	93
6.1.2	Schleifen exakt kegelliger Unrundprofile	97
6.1.3	Herstellung exakter Unrundprofile beim Schrägeinstechschleifen	97
6.1.4	Schleifen von schraubenförmigen Geometrien	98
6.2	Schleifen von unrunder Nabenprofilen mit kleinen Krümmungsradien	99
6.3	Unrundscheifen von Nockenscheiben einer Nockenwelle	100
6.3.1	Maschinenkonzepte zum Schleifen von Nockenscheiben.....	101
6.3.2	Ausgleich der Unwuchtkräfte beim Nockenschleifen	103
6.3.3	Nockenschleifen mit einer dreidimensional geformten Schleifwalze	105
6.3.4	Nockenschleifen mit axialer Zustellbewegung (Schälschleifen)	109
7	Schleifversuche	114
7.1	Verwendung vorgeformter, formgebender Werkzeuge	115
7.1.1	Verwendung vorgeformter, formgebender Diamantabrichter	116
7.1.2	Verwendung einer vorgeformten, formgebenden CBN-Schleifscheibe	132
7.2	Verwendung eines nicht formgebenden Abrichtrades.....	138
7.2.1	Einfluss der Abricht- und Schleifparameter auf die Oberflächenrauheit	140
7.2.2	Abrichten und Einsatz einer dreidimensional geformten Schleifscheibe	142

8 Zusammenfassung und Ausblick	150
Literaturverzeichnis.....	154

Häufig verwendete Abkürzungen und Formelzeichen

$a(\zeta)$	Beschleunigung der X-Achse beim Pendelhubabrichten
$\dot{a}(\zeta)$	Ruck der X-Achse beim Pendelhubabrichten
A	Achsabstand zwischen Schleifscheibe und Werkstück
α	Zur Schleifscheibendrehung synchrone Verdrehung des Werkstücks
$b(z)$	Von der Z-Position abhängige Bewegung in X-Richtung
B	Drehachse des Abrichtwerkzeugs
C, C_1	Werkstückdrehachse
C_2	Schleifscheibendrehachse
D_s	Schleifscheibenaußendurchmesser
D_w	Werkstückaußendurchmesser
e	Exzentrizität
f_a	Vorschubbewegung des Abrichtrades
f_s	Vorschubbewegung der Schleifscheibe
f_w	Vorschubbewegung des Werkstücks
$h_a(\zeta)$	Polarer Abstand (Erhebungswert) der Bahn des Abrichtradmittelpunkts
i_D	Verhältnis zwischen Schleifscheiben- und Werkstückdurchmesser
i_v	Verhältnis zwischen Schleifscheiben- und Werkstückdrehung
IFT	Institut für Fertigungstechnik der Technischen Universität Graz
k_s	Schleifkornabstand in Umfangrichtung der Schleifscheibe
Konz.	Konzentration
KSS.	Kühlschmierstoff
L	Drehachse der Auflagerolle
n_a	Drehzahl des Abrichtwerkzeugs
n_r	Drehzahl der unrunder Auflagerollen beim Spitzenlosschleifen
n_s	Schleifscheibendrehzahl
n_w	Werkstückdrehzahl
$o(z)$	Von der Z-Position abhängige (radiale) Ovalität
P	Berührungspunkt zwischen dem Werkstück und der Schleifscheibe
φ	Polarer Winkel des Schleifscheibenquerschnitts
$q'(\varphi)$	Auf den Zerspanungsmittelwert bezogene Zerspanung am Schleifscheibenumfang
$r_s(\varphi)$	Polarer Abstand (Erhebungswert) des Schleifscheibenquerschnitts

$r_{s_0}(\varphi_i, t_i)$	.....Startwert für die Berechnung von $r_s(\varphi_i, t_i)$ beim Tangentennäherungsverfahren
r_{s_i}	.....Inkreisradius des Schleifscheibenquerschnitts
$r_w(t)$	.....Polarer Abstand (Erhebungswert) des Werkstückquerschnitts
r_{w_i}	.....Inkreisradius des Werkstückquerschnitts
Ra	.....Mittenrauwert
R_e	.....Kreisradius des Kreisexzenters
R_f	.....Formradius des Abrichtrades
R_s	.....Formradius der axial balligen Schleifscheibe
R_u	.....Außenradius des Abrichtrades
Rz	.....Gemittelte Rautiefe
$s(z)$	.....Skalierungswert für das Unrundprofil
S	.....Schleifscheibendrehachse
t	.....Polarer Winkel des Werkstückquerschnitts
t_g	.....Kurventangente
$u(\zeta)$	.....Erhebungswert der Unrundkurve
$u_s(\varphi)$	.....Umfangsbereich der Schleifscheibe
$u_w(t)$	.....Umfangsbereich des Werkstücks, der dem Umfangsbereich der Schleifscheibe zugeordnet ist
U_s	.....Schleifscheibenumfang
U_w	.....Werkstückumfang
$v(\zeta)$	.....Geschwindigkeit der X-Achse beim Pendelhubabrichten
$v_{rel}(t)$	.....Differenz zwischen Schleifscheiben- und Werkstückumfangsgeschwindigkeit am Berührungspunkt
$v'_{rel}(t)$	.....Auf die größte Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit bezogene Relativgeschwindigkeit
v_s	.....Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit
v_w	.....Werkstückumfangsgeschwindigkeit
W	.....Werkstückdrehachse
$x(z, \zeta)$	.....Bahn des Formradiusmittelpunkts des Abrichtwerkzeugs
X	.....X-Achse
z	.....Z-Koordinate
z_m	.....Z-Koordinate des Radiusmittelpunkts der axial balligen Werkstückform
Z	.....Z-Achse
ζ	.....Polarer Winkel der Unrundkurve

1 Einführung

Beim herkömmlichen Unrundscheifen, auch als Pendelhubscheifen bezeichnet, wird das unrunde Werkstückprofil mit einer runden Schleifscheibe bearbeitet¹. Der Schleifspindelstock, auf welchem sich die Schleifscheibe befindet, bewegt sich dabei quasi pendelnd entlang der X-Achse synchron zur C-Achse (Werkstückdrehachse Bild 1-1). Ein großer Nachteil dieses Verfahrens ist, dass in kurzen Zeitabständen große Massen beschleunigt und wieder abgebremst werden müssen. Der zu bewegende Schleifsupport inklusive Schleifspindel, Schleifscheibe und Antriebsmotor wiegt oft über eine Tonne. Daraus resultiert ein erhöhter Verschleiß bei den Antriebskomponenten, wie bspw. beim Kugelgewindetrieb der X-Achse. Dies beeinflusst die Lebensdauer und Wartungsintervalle der Schleifmaschine nachteilig. Zudem treten Maßungenauigkeiten durch die Regelung der Maschinenachsen auf, die sich jedoch durch eine entsprechende Steuerungssoftware zumindest teilweise kompensieren lassen. Der Schleifprozess hat durch die fortwährenden alternierenden Beschleunigungs- und Bremsphasen eine ineffiziente Energienutzung. Die Wärmebringung durch die Antriebskomponenten beeinflusst die Maschinenpräzision nachteilig. Darüber hinaus sind der Schleifleistung Grenzen gesetzt, da durch die Massenträgheit der bewegten Teile die maximal zulässigen Werte für Geschwindigkeit, Beschleunigung und Ruck nicht überschritten werden dürfen. Des Weiteren sind beim Pendelhubscheifen mehrere unrunde Schleifstellen in der Regel nur nacheinander, in sequentieller Abfolge, bearbeitbar.

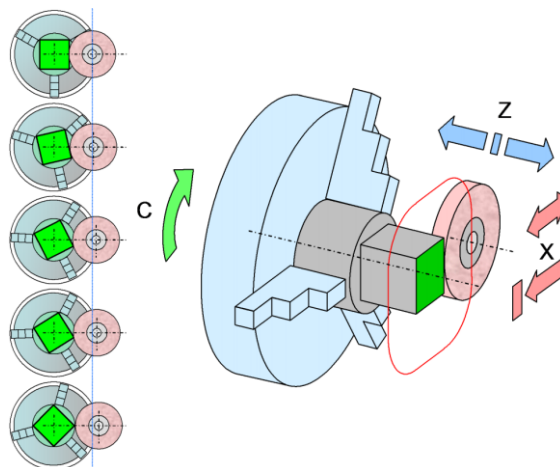


Bild 1-1: Pendelhubschleifen [ZUD06, S. 3 / 14]

¹ In diesem Zusammenhang wird in vorliegender Arbeit der Begriff „unrund“ gleichgesetzt mit „nicht kreisförmiges Querschnittsprofil“. Dementsprechend ist unter „rund“ ein zentrischer Kreisquerschnitt zu verstehen.

Im Gegensatz zum herkömmlichen Unrundschleifen wird beim drehzahlsynchronen Unrundschleifen die unrunde Werkstückgeometrie mit einer unrunnen Schleifscheibe bearbeitet. Werkstück und Werkzeug drehen sich synchron mit einem bestimmten Drehzahlverhältnis. Dabei wird die Unrundheit von der Schleifscheibe auf das Werkstück übertragen. Das Verhältnis zwischen Werkstück- und Werkzeugdrehung muss jedoch nicht zwingend 1:1 sein. Das Bild 1-2 zeigt die Bearbeitung unterschiedlicher Werkstücke bei unterschiedlichen Drehzahlverhältnissen.

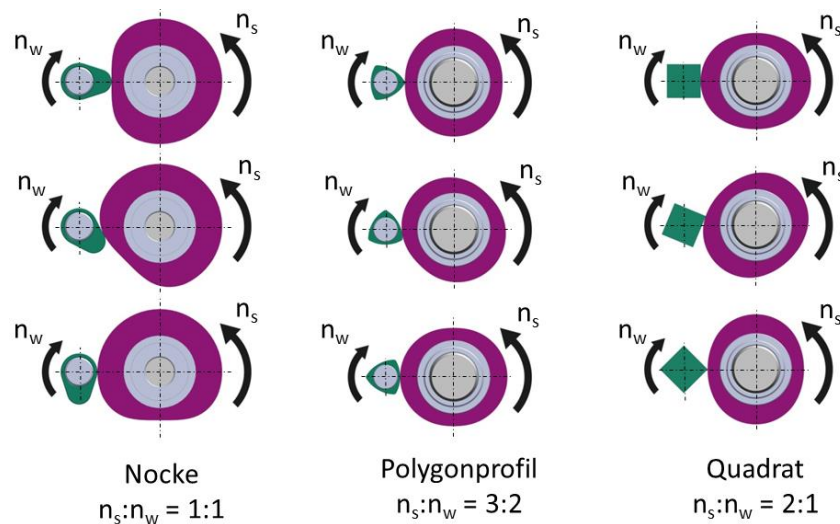


Bild 1-2: Bearbeitung unterschiedlicher Werkstücke bei unterschiedlichen Drehzahlverhältnissen [ABL12c / ABL12d, S. 194]

Da bei der Bearbeitung keine Pendelhubbewegung sondern nur eine Zustellbewegung notwendig ist, kann die Schleifmaschine kompakter und damit kostengünstiger ausgeführt werden. Ein zusätzlicher großer Vorteil dieses speziellen Unrundschleifverfahrens ist, dass mehrere runde und unrunde Geometrien mit einer einzigen Zustellbewegung feinbearbeitet werden können.

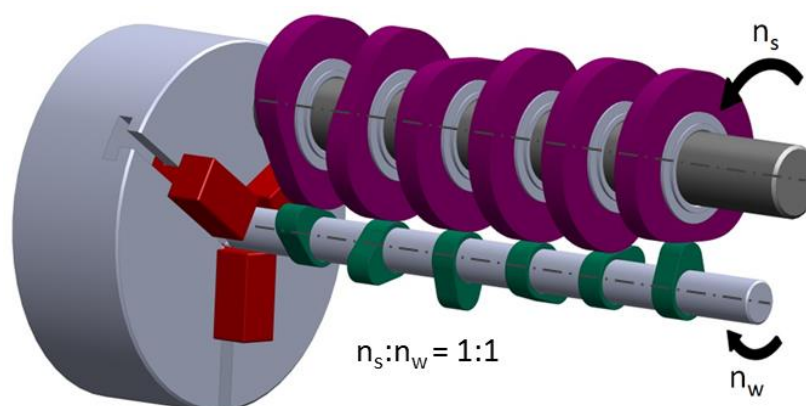


Bild 1-3: Drehzahlsynchrones Unrundschleifen mehrerer Querschnitte mit einer einzigen Zustellbewegung [ABL12c / ABL12d, S. 194]

Bild 1-3 zeigt, wie mit einem Schleifscheibensatz alle Nocken einer Nockenwelle gleichzeitig geschliffen werden. Darüber hinaus ist es möglich, auch die Lagerstellen simultan mitzuarbeiten, indem der eingesetzte Schleifscheibensatz mit runden Schleifscheiben entsprechend erweitert wird. Neben der kürzeren Bearbeitungsdauer ergibt sich bei dieser Schleifscheibenanordnung der positive Effekt, dass durch die drehversetzt angeordneten ungerunden Schleifscheiben der gesamte Schleifscheibensatz in Summe zumindest grob ausgewuchtet ist.

2 Aufgabenstellung

Seit über 30 Jahren werden unrunde Werkstückgeometrien, wie etwa die Erhebungskurven einer Nockenwelle, auf CNC-Rundschleifmaschinen durch Pendelhubschleifen bearbeitet. Im Vergleich dazu ist das drehzahlsynchrone Unrundschleifen zwar kein gänzlich neues Verfahren, jedoch wenig erprobt und großserientechnisch noch nicht etabliert. In der vorliegenden Arbeit sollen die Merkmale und die Einsatzmöglichkeiten und –grenzen dieses speziellen Unrundschleifverfahrens untersucht werden. Zunächst sind die kinematischen Abhängigkeiten zu analysieren und rechnerisch zu modellieren bzw. zu simulieren. Anhand praktischer Schleifversuche sind die für das drehzahlsynchrone Unrundschleifen zu entwickelnden Softwaretools zu verifizieren. Es sind Komponenten für die späteren Applikationen (vorzugsweise für automobiler Anwendungen) beispielhaft auszuwählen. Daraus soll sich ein neues Grobkonzept für eine entsprechende Unrundschleifmaschine ableiten.

3 Stand der Technik

3.1 Schleifprozess

Schleifen ist eines der komplexesten Fertigungsverfahren der Zerspanungstechnik. Es wird meist bei der Bearbeitung von Werkstücken mit engen Tolerierungen, hoher Oberflächen-güte oder hoher Härte (bspw. gehärtete Stähle oder Keramiken) eingesetzt. Die Materialabtragung erfolgt durch eine Vielzahl unterschiedlicher, statistisch wirkender Einzelschneiden. Dabei sind die im Eingriff befindlichen Schneiden geometrisch unbestimmt und haben meist einen negativen Spanwinkel. Obwohl die Materialabnahme pro Schneide gering ist, werden, durch die Kombination von hoher Schnittgeschwindigkeit und großer Schneidenzahl, Zerspanungsleistungen erzielt, welche oftmals mit den Fertigungsverfahren mit bestimmter Schneide vergleichbar sind [HEL04, S. 5]. Bspw. stellt das Innenrund-Schäl Schleifen bei der Endbearbeitung von gehärteten Futterteilen (wie Zahnräder, Kugellagerringe, Naben und ähnliche Teile) eine geeignete Alternative zum Hartdrehen dar. Während das Hartdrehen bei einigen Anwendungsfällen höhere Flexibilität und Wirtschaftlichkeit bietet, zeichnet sich das Schleifen durch eine hohe Prozesssicherheit bei hoher Bauteilqualität aus [WEI06].

Der Schleifprozess stellt besonders für jene Unternehmen eine besondere Herausforderung dar, die sich mit der Fertigung von Kleinserien und Prototypen beschäftigen. Da der Zerspanprozess beim Schleifen schwierig zu analysieren ist, müssen für neue Werkstücke stets aufs Neue die optimalen Einstellparameter gefunden werden. Des Weiteren ist es oftmals erforderlich, dass eine andere Schleifscheibe bzw. ein anderes Abrichtwerkzeug nicht nur gerüstet, sondern auch neu angeschafft werden muss [MAU03, S. 7]. Erst wenn die auf den Schleifprozess einwirkenden Einflüsse auf das zu bearbeitende Werkstück abgestimmt sind, werden gute Schleifergebnisse erzielt.

3.1.1 Spanbildung beim Schleifen

Das Schleifkorn dringt entlang einer sehr flachen Bahn in das Werkstück ein, wobei sich das Schleifkorn und das Werkstück elastisch verformen. Mit zunehmender Verformung geht die elastische Verformung des zu zerspanenden Werkstoffs in plastisches Fließen über. Der Werkstoff wird seitlich verdrängt und bildet Aufwürfe. Erst wenn eine ausreichende Korneindringtiefe h_{ce} (= Spanbildungstiefe T_μ) erreicht ist, tritt eine Zerspanung ein. Der tatsächliche Materialabtrag $h_{cu,eff}$ und die Spandicke h_{ch} sind dabei geringer als die Korneindringtiefe h_{ce} (Bild 3-1) [FRI10, S. 313 / HEL04, S. 22].

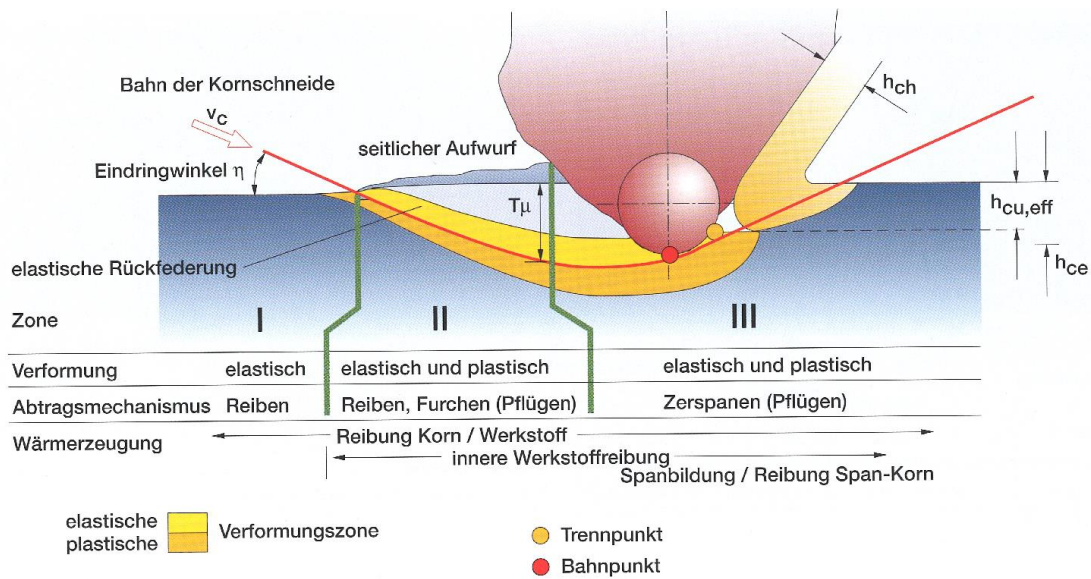


Bild 3-1: Spanbildung beim Schleifen [HEL04, S. 66]

3.1.2 Zerspangrößen beim Außenrundsleifen

Die Schnittbewegung wird im Wesentlichen von der **Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit** v_s bestimmt. Daher kann diese mit der Schnittgeschwindigkeit v_c gleichgesetzt werden [FRI10, S. 311]. Mit der nachfolgenden Beziehung wird die **Schnittgeschwindigkeit** in m/s berechnet:

$$v_c = v_s = \frac{D_s * \pi * n_s}{1000 * 60} \quad (3.1)$$

Hierbei ist D_s der Schleifscheibendurchmesser in mm und n_s die Schleifscheibendrehzahl in min^{-1} . Eine steigende Schnittgeschwindigkeit bewirkt bei gleichem Zeitspanvolumen eine Abnahme der Werkstückrauheit und der Spandicke, sowie in weiterer Folge kleinere Schnittkräfte. Beim Hochgeschwindigkeitsschleifen (HSG, High Speed Grinding) werden Schnittgeschwindigkeiten von 160 m/s und darüber erreicht. Bei diesen hohen Schnittgeschwindigkeiten nehmen zwar die Standzeiten und Abtragsraten zu, die Gefahr von berstenden Scheiben und der höhere Leistungs- und Kühlmittelbedarf erfordern jedoch neue Maschinenkonstruktionen [REI10, S. 204].

Das **Zeitspanvolumen** Q in mm^3/s ist das je Zeiteinheit zerspannte Werkstoffvolumen. Wird das Zeitspanvolumen auf die im Einsatz befindliche aktive Schleifscheibenbreite bezogen, ergibt sich das **bezogene Zeitspanvolumen** Q' in mm^2/s . Mit diesem Wert werden verschiedene Schleifscheiben und Schleifprozesse miteinander verglichen. Beim Außen-

rund-Einsteichschleifen lautet die Beziehung zur Berechnung des bezogenen Zeitspanvolumens:

$$Q' = \frac{v_f * D_w * \pi}{60} \quad (3.2)$$

Für das Außenrund-Längsschleifen lautet die entsprechende Beziehung:

$$Q' = \frac{a_e * n_w * D_w * \pi}{60} \quad (3.3)$$

Hierbei sind v_f der radiale Vorschub in mm/min, D_w der Werkstückdurchmesser in mm, a_e die radiale Zustellung pro Überlauf in mm und n_w die Werkstückdrehzahl in min^{-1} .

Bei der Anzahl der Werkzeugschneiden wird die **statische** und die **kinematische Schneidenzahl** unterschieden. Bei der statischen Ermittlung werden alle Schneiden der Schleifzone auf der Schleifscheibenoberfläche je mm^2 oder je mm Abtastlänge erfasst. Die dynamische Schneidenzahl hingegen erfasst nur die aktiv an der Zerspaltung beteiligten Schneiden (Bild 3-2). Diese hängt von den Schleifparametern (Schnittgeschwindigkeit, Werkstückumfangsgeschwindigkeit, Zustellung, statische Schneidenzahl) ab und ist schwierig zu ermitteln.

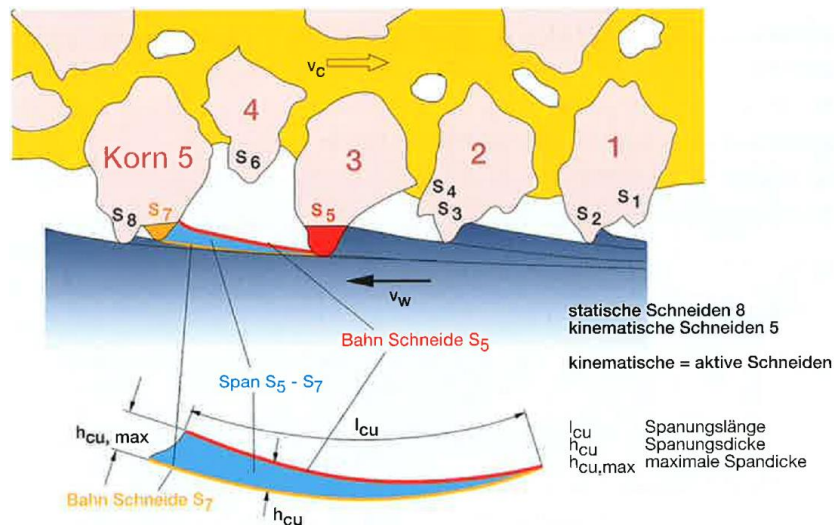


Bild 3-2: Statische und kinematische Schneidenzahl [HEL04, S. 81]

3.1.3 Schnittkräfte beim Schleifen

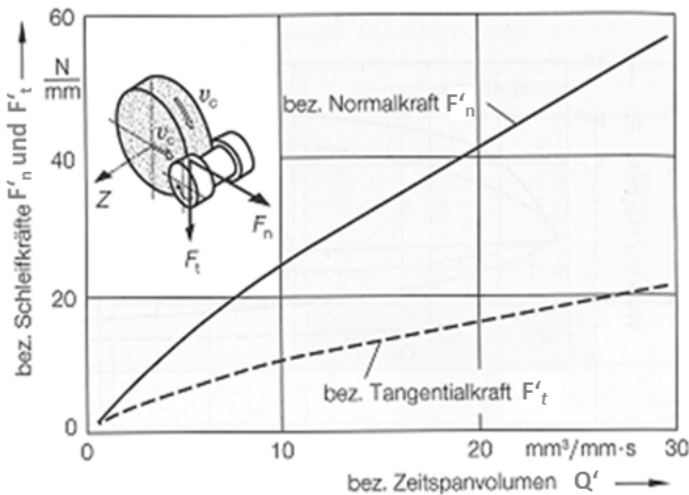
Die resultierende Schnittkraft, die sich als Summe aller Schnittkräfte der im Eingriff befindlichen Schneiden ergibt, wird in eine radiale und eine tangentielle Komponente aufgeteilt.

$$F'_n = \int_0^{l_g} k * A_{cu}(l) * N_{kin}(l) * dl \quad (3.4)$$

Die bezogene Normalkraft F'_n ist in Beziehung (3.4) mit den kinematischen Kenngrößen definiert [WER71 zitiert in KOE05, S. 195]. Hierbei sind l_g die Kontaktlänge, A_{cu} der örtliche Spannungsquerschnitt, N_{kin} die kinematische Schneidenzahl und k ist ein Proportionalitätsfaktor der vom Werkstoff abhängig ist.:

$$\mu = \frac{F'_n}{F'_t} \quad (3.5)$$

Das in Beziehung (3.5) gezeigte Verhältnis zwischen bezogener Normalkraft und bezogener Tangentialkraft ist das Schnittkraftverhältnis μ . Es charakterisiert das Reibungsverhältnis in der Kontaktzone zwischen Schleifkorn und Werkstück und ist ein Maß für die Schnittfähigkeit der Schleifscheibe [KOE05, S. 195]. Mit zunehmender Schmierwirkung stumpft das Korn rascher ab, da es vor dem Abnehmen eines Spanes gleitet. Dadurch werden die tangentialen Schleifkräfte und in weiterer Folge die benötigte Antriebsleistung verringert, die radialen Schleifkräfte jedoch erhöht [REI10, S. 198].



Verwendete Schleifscheibe: A60 K 8 V
 Bearbeiteter Werkstoff: C45E
 Schnittgeschwindigkeit v_c : 45 m/s
 Geschwindigkeitsverhältnis $\frac{v_s}{v_w}$: 60
 Kühlschmierstoff: Emulsion 2%

Bild 3-3: Auf die Schleifscheibenbreite bezogene Schnittkräfte in Abhängigkeit von Q' [FRI10, S. 326]

In Bild 3-3 sind die auf die aktive Schleifscheibenbreite bezogenen Schnittkräfte in Abhängigkeit vom bezogenen Zeitspanvolumen beim Außenrundscheifen dargestellt. Es ist erkennbar, dass die Normalkräfte F'_n in etwa um den Faktor zwei bis drei höher als die tangentialen Schnittkräfte F'_t sind.

3.2 Abrichten

Die Schleifscheibentopographie ist während des Schleifprozesses einer zeitlichen Änderung unterworfen. Dies führt zu geänderten Arbeitsergebnissen und kann eine Randzonenschädigung des Werkstücks verursachen. Darüber hinaus hängt das Zeitspanvolumen von der topographischen Gestalt des Schneidenraums ab, was wiederum die Bearbeitungskosten beeinflusst. Daher müssen Schleifscheiben vor oder während der Schleifoperation abgerichtet werden, damit neben der Profilform auch die durch die Wirkrautiefe bestimmte Mikrogeometrie erzeugt und erhalten wird. Unter dem Begriff Abrichten wird das Profilieren und Schärfen von Schleifkörpern verstanden. Während beim Profilieren die Makrogeometrie, wie Form, Rundheit und Zylindrizität erzeugt werden, wird beim Schärfen durch den Abtrag der Bindung der Kornüberstand erhöht und der Spanraum vergrößert. Durch das Schärfen wird die Schnittfähigkeit der Schleifscheibe verbessert. Im Gegensatz zu Korund- und Siliziumcarbid-Schleifscheiben, welche nach dem Profilieren mit Diamantwerkzeugen bereits ausreichend geschärft sind, ist bei hochharten Schneidstoffen wie Diamant¹ und CBN meist noch ein vom Profilieren getrennter Schärfvorgang notwendig. Dabei wird mit einem Schärstein aus Korund die Bindung abgetragen, um den optimalen Kornüberstand von etwa einem Drittel der Korngröße zu erreichen [DIL07, S. 174 / EIC97, S. 12]. Der Begriff „Konditionieren“ umfasst neben dem Profilieren und Schärfen (=Abrichten) noch den Bereich Reinigen, mit dem Ziel, Span-, Korn- und Bindungsreste aus dem Spanraum zu entfernen [HEL03a, S. 5].

3.2.1 Abrichtwerkzeuge

Beim Abrichten werden vorwiegend Diamantwerkzeuge eingesetzt. Die Einteilung erfolgt in stehende und bewegte Abrichtwerkzeuge. Zu den stehenden Werkzeugen zählen Einkorndiamant, Diamantfliese, Mehrkornabrichter² und MKD³-Abrichter, die jeweils unterschiedliche Wirkbreiten aufweisen (Bild 3-4). Mit diesen Diamantwerkzeugen wird nach einer radialen Zustellung mit einer axial gerichteten Vorschubbewegung abgerichtet.

¹ In der Großserienfertigung werden Diamant-Schleifscheiben i. Allg. nicht abgerichtet (ev. freigespült).

² Zu den Mehrkornabrichtern zählen auch Abrichter mit Abrichtplatten aus polykristallinem Diamant (PKD, hochverdichtetes gesintertes Diamantpulver).

³ MKD: Monokristalliner Diamant

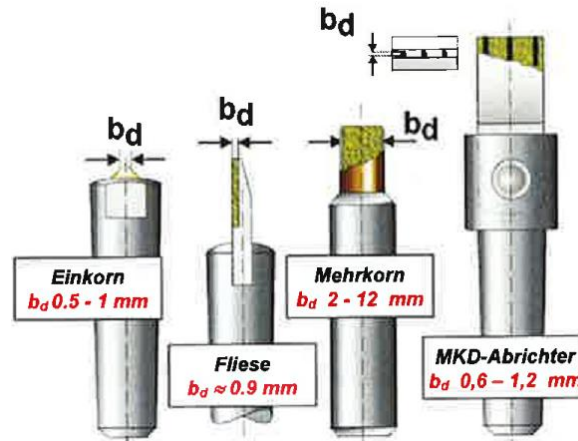


Bild 3-4: Stehende Abrichtwerkzeuge und deren Wirkbreite b_d [WIN09, S. 128]

Bei den Diamantrollen, welche zu den bewegten Abrichtwerkzeugen gehören, wird zwischen Profilabrichtrollen und Formabrichtrollen unterschieden. Bei Profilabrichtrollen entspricht die axiale Oberflächengeometrie dem zu schleifenden Werkstück. Im Gegensatz dazu haben Formabrichtrollen ein einfaches Randprofil, mit dem durch eine CNC-gesteuerte Bewegung das entsprechende Profil auf der Schleifscheibe abgerichtet wird [HEL03b, S. 7].

Bei der Herstellung von **Diamantabrichtrollen** gibt es drei unterschiedliche Verfahren [WIN09, S. 143]:

- Positivverfahren (galvanisch)
- Negativverfahren (galvanisch)
- Negativverfahren (gesintert)

Beim Positivverfahren wird der Grundkörper auf Fertigmaß abzüglich der Schichtstärke bearbeitet und anschließend galvanisch mit Diamanten belegt. Mit diesem Verfahren ist es möglich, Diamantrollen rasch und kostengünstig herzustellen. Ein Nachteil ist jedoch die relative Ungenauigkeit aufgrund der unterschiedlichen Korngrößen. Diese Ungenauigkeit steigt mit der Anzahl der Kornschichten. Aus diesem Grund werden die Werkzeuge meist nur einschichtig mit Diamanten belegt.

Im Gegensatz zum Positivverfahren wird für das galvanische Negativverfahren eine der Diamantrolle entsprechende Hohlform angefertigt und diese innen mit Diamanten belegt. Die Verteilung der Diamanten erfolgt handgesetzt oder statistisch gestreut. Die Diamanten werden durch eine galvanisch aufgebaute Nickelschicht gebunden. Anschließend wird in die Form eine Stahlbüchse mit niedrig schmelzender Metalllegierung (z.B. Wismut)

eingegossen. Nach dem Abkühlen wird die Stahlbüchse zwischen Spitzen gespannt und die Negativform außen abgeschliffen.

Gesinterte Diamantrollen werden ebenfalls im Negativverfahren in einer verlorenen Form hergestellt. Nach dem Abschleifen der Negativform muss das Profil in der Regel nachgeschliffen werden, da durch den Sinterprozess ein Wärmeverzug auftritt. Diese Diamantrollen zeichnen sich durch eine hohe Standzeit aus, besitzen jedoch eine geringere Genauigkeit als galvanisch im Negativverfahren hergestellte Abrichtrollen.

3.2.2 Wirkrautiefe der Schleifscheibe beim Abrichten mit Abrichtrollen

Die Wirkrautiefe R_{ts} der Schleifscheibe nach dem Abrichten ist neben dem Abrichtvorschub f_{rd} und der Anzahl der Ausrollumdrehungen auch vom Geschwindigkeitsverhältnis q_d zwischen Rollen- und Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit abhängig (Bild 3-5). Dabei bezieht sich die Wirkrautiefe auf das Ende des Abrichtvorgangs. Sie ändert sich während der instationären Phase am Beginn des nachfolgenden Schleifprozesses, bis ein von den Schleifbedingungen abhängiger, stationärer Wert erreicht wird. Die Zerspankräfte, die Temperaturen und die aufgenommenen Spindelleistungen beim Schleifen fallen umso geringer aus, je höher die Wirkrautiefe der Schleifscheibe ist [HEL03b, S. 13].

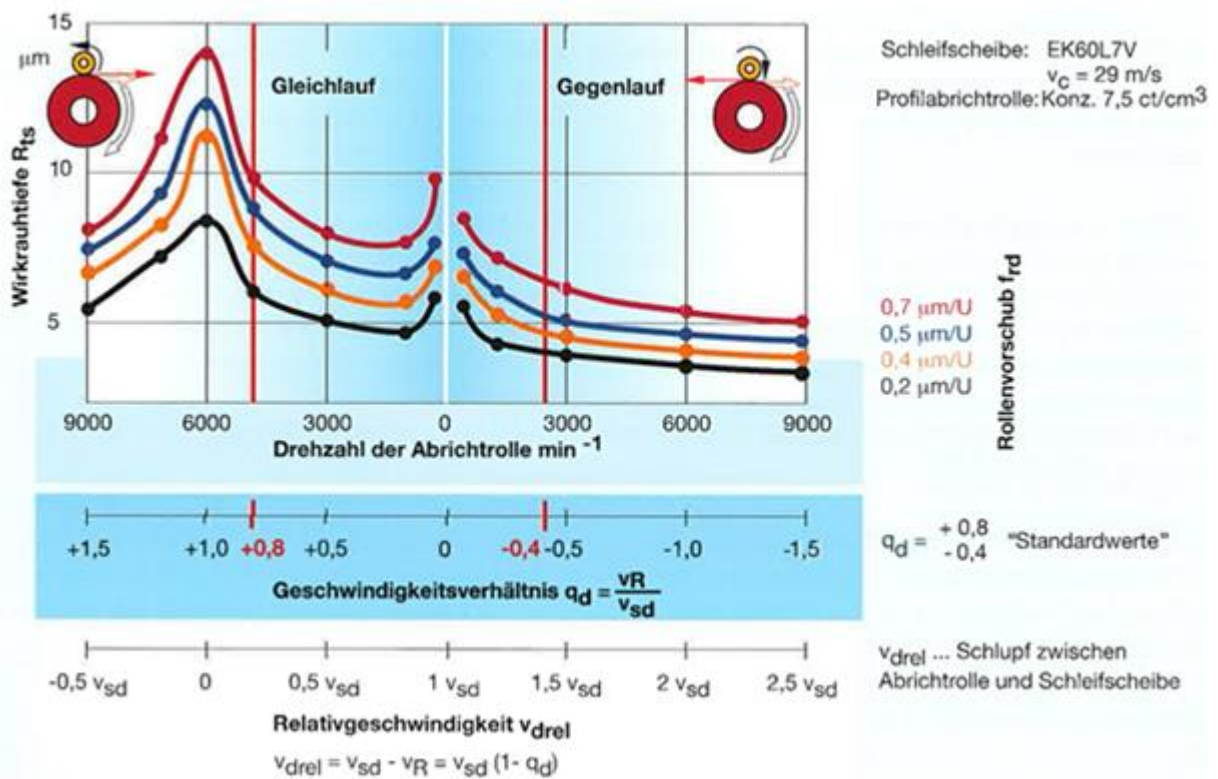


Bild 3-5: Einfluss der Abrichtparameter auf die Wirkrautiefe der Schleifscheibe [HEL03b, S. 24]

Die Eingriffsbahn des Diamantkorns ist beim Abrichten im Gleichlauf steiler als beim Gegenlaufabrichten (Bild 3-6). Beim Gleichlaufabrichten entsteht die größte Wirkrautiefe der Schleifscheibe beim Geschwindigkeitsverhältnis $q_d = +1$ (crushieren¹) und beim Abrichten im Gegenlauf beim Geschwindigkeitsverhältnis $q_d = 0$ (entspricht dem Abrichten mit stehendem Werkzeug). Da hierbei ein sehr hoher Rollenverschleiß entsteht, sind diese Werte zu vermeiden. Dadurch ergibt sich die größte praktisch nutzbare Wirkrautiefe im Gleichlauf bei $q_d = +0,8$ und im Gegenlauf bei $q_d = -0,4$ [HEL03b, S. 25].

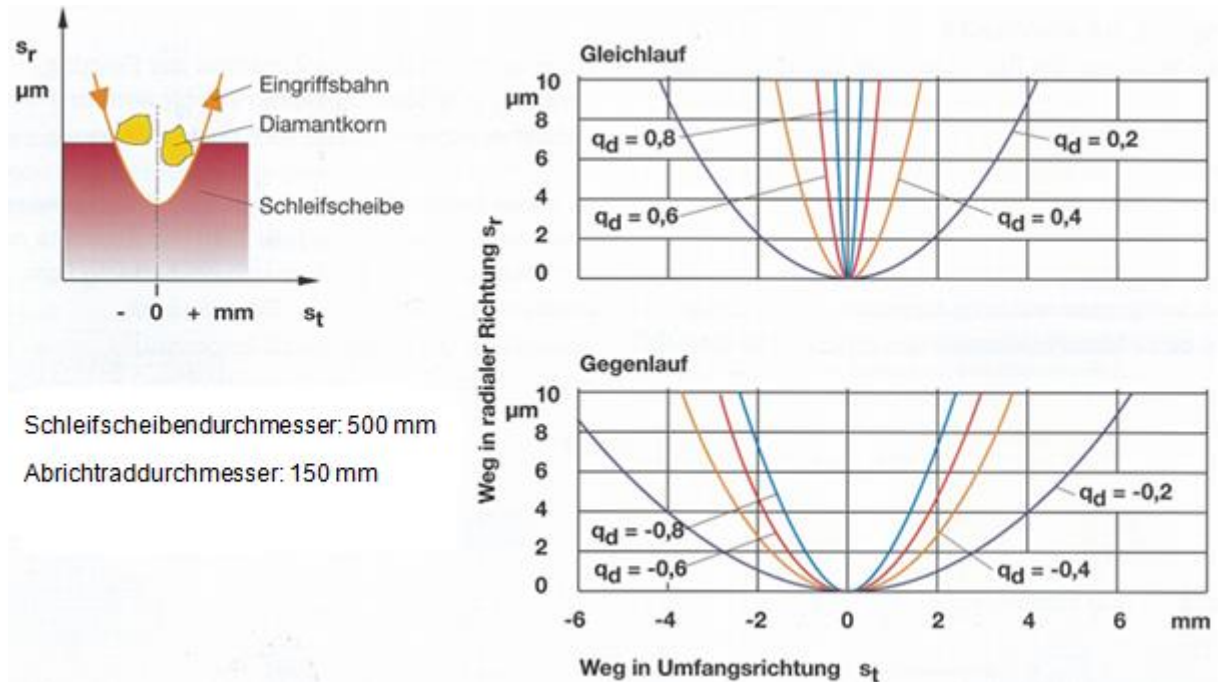


Bild 3-6: Wirkbahnen der Diamantschneide einer Diamantrolle beim Eingriff in die Schleifscheibenoberfläche bei Variation des Geschwindigkeitsverhältnisses q_d zwischen Rollen- und Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit [HEL03b, S. 26 nach STU97]

3.2.3 Alternative, berührungslose Abrichtverfahren

Neue Entwicklungen zeigen alternative, berührungslose Abrichtverfahren auf. Hierbei wird die Schleifscheibe mittels Laser oder durch Funkenerosion abgerichtet. Bei der Funkenerosion wird zwischen Senk- und Drahterosion unterschieden. Im Vergleich zur Funkenerosion, bei welcher die Schleifscheibe durch Zurücksetzen der elektrisch leitenden metallischen Bindung abgerichtet wird, ist beim Laser auch ein Abtrag des Abrasivstoffes möglich [WEG12, S. 41 - 46]. Das Verfahren des drahterosiven Abrichtens ist auch bei der

¹ Beim Crushieren wird das Schleifkorn aus der Bindung herausgebrochen. Dabei sind eine hohe Maschinensteifigkeit und ein hoher Spüldruck des Kühlschmierstoffes notwendig [WIN09, S. 151].

Herstellung von formgebundenen Abrichtwerkzeugen sowie Hartstoffpermanentschleifscheiben anwendbar [SPR13, S. 28 - 30]. Das berührungslose Abrichten bzw. Schleifscheibenkonditionieren wird bislang nur für kreisrunde Werkzeugprofile verwendet, zeigt jedoch auch ein Potential für die Anwendung bei unrunder Profilen.

3.3 Kühlung und Schmierung

Beim Schleifen werden ca. 90% der Wirkleistung in Wärme umgesetzt. Durch die Kornreibung bei der Spanbildung treten an der Kontaktzone mit dem Werkstück Temperaturen bis über 1000 °C auf. Um Schleifschäden infolge der Schleifwärme, wie Spannungen und Risse, zu vermeiden, muss diese abgeführt werden. Durch Überhitzung kann nicht nur die Bindung der Schleifscheibe, sondern auch das Werkstoffgefüge des Werkstücks geschädigt werden. Dies macht sich durch Brandflecken bemerkbar. Des Weiteren ist es möglich, dass durch die hohen Schleiftemperaturen eine Enthärtung bzw. durch die abschreckende Wirkung des eingesetzten Kühlmittels eine Neuhärtung an der Oberfläche entsteht. Mit Hilfe der Kühlschmierstoffe (KSS) werden eine Verringerung der Reibung, eine Reinigung der Spankammern und die Kühlung des Werkstücks erreicht. Das wirksamste Kühlschmiermittel ist Schleiföl, da es die Reibung sowie die dadurch entstehende Reibungswärme und die benötigte Antriebsleistung am stärksten verringert. Bei der Verwendung von Schleifölemulsionen¹ treten häufiger Schleifrisse auf, da die Randzone durch höhere Reibung wärmer und danach durch die höhere Kühlwirkung schneller abgekühlt wird. Neben Schleifölen und -emulsionen werden beim Schleifen auch synthetische Kühlschmierstoffe eingesetzt, welche in Wasser emulgiert oder aufgelöst werden [DIL07, S. 117 / REI10, S. 197f].

Im Vergleich zu den Bearbeitungsverfahren mit geometrisch bestimmter Schneide wird beim Schleifen durch den meist negativen Spanwinkel des Schneidkorns und die elastische sowie plastische Verformung des Werkstoffs vor der Spanabnahme mehr Energie in den Prozess eingebracht. Um eine Randzonenschädigung des Werkstücks zu vermeiden, wird daher beim Schleifen meist auf die aus ökonomischer und ökologischer Sicht sinnvolle Trockenbearbeitung verzichtet. Bei der Minimalmengenkühlschmierung (MMKS) erfolgt die Kühlschmierung durch ein Aerosol aus KSS und Luft mit Volumenströmen bis 50 ml/h [KLO97, S. 9-4 / 9-5]. Zur Realisierung der Trockenbearbeitung bzw. der Minimalmengenkühlschmierung muss durch entsprechende Maßnahmen die Wärmeentstehung verringert und die Kühl-

¹ Eine Emulsion ist ein Gemenge aus zwei nicht mischbaren Flüssigkeiten, bei dem die eine Flüssigkeit in Form kleiner Tröpfchen in der anderen verteilt ist. Bei einer Schleifölemulsion wird die gute Kühlwirkung von Wasser mit der guten Schmierwirkung von Öl kombiniert.

wirkung verbessert werden. In [TAW07 / TAW10b] wird gezeigt, wie durch gezielte Strukturierung der Schleifscheibe bei der Trockenbearbeitung die Schleifkräfte und in weiterer Folge die Wärmeeinbringung reduziert werden.

Andere Ansätze zur Verbesserung der Kühlwirkung sind das ultraschallunterstützte Schleifen sowie kryogene Kühlkonzepte. Bei letzteren wird ein Kühlmedium mit tiefen Temperaturen (bspw. flüssiger Stickstoff bei -196 °C) an die Wirkstelle des Zerspanungsprozesses gebracht und die Werkstückoberfläche auf Minustemperaturen abgekühlt. Beim ultraschallunterstützten Schleifen werden der Vorschubbewegung eine oder mehrere zusätzliche Schwingungen im Ultraschallbereich überlagert. Die positive Wirkung der Schwingungen auf das Prozessverhalten ergibt sich durch die sehr kurzzeitige Kontaktunterbrechung zwischen Werkstück und Werkzeug und die daraus resultierenden Veränderungen der KSS-Bedingungen und Spanungsgrößen [UHL10 / TAW10c].

Beim Außenrundsleifen bewirkt die relativ kleine Kontaktzone zwischen Werkstück und Werkzeug eine geringere Schleifwärmegenerierung und ermöglicht eine effiziente Kühlung. Im Gegensatz dazu ist beim Unrundsleifen, speziell bei der Bearbeitung von konkaven Radien, die Kontaktzone wesentlich größer. Zudem ist diese vielfach verdeckt und daher für die Kühlschmierung schwer zugänglich (Bild 3-7). Somit ergeben sich für das Unrundsleifen besondere Herausforderungen für die Zuführung des Kühlschmierstoffs.

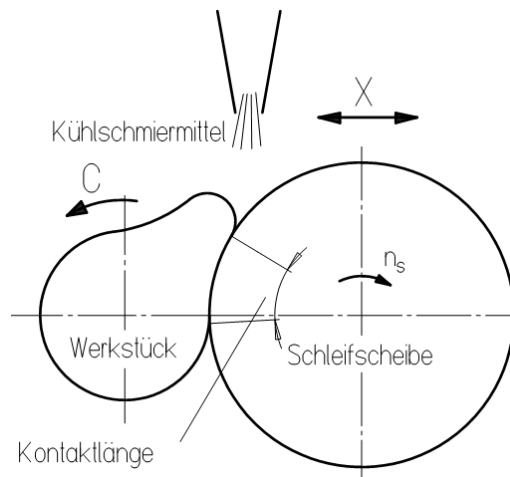


Bild 3-7: Pendelhubschleifen einer Nockenwelle mit konkaven Flanken

Die Kühlschmierung beim Schleifen von langen und verdeckten Kontaktzonen wird mit der Erfindung von Schrottner [SCH02a] deutlich verbessert. Die Erfindung zeigt eine Schleifscheibe, welche aus einem scheibenförmigen Grund- bzw. Trägerkörper mit seitlichen Abdeckplatten und einem umfangseitig angeordneten Schleifbelag besteht. Dabei weist die

Schleifscheibe eine Hohlraumkonstruktion mit radial und axial angeordneten Kammern und Bohrungen auf. Das Kühlschmiermedium, dessen Druck durch die Zentrifugalkraft der Schleifscheibendrehung erhöht wird, tritt am Umfang der Schleifscheibe durch die radial angeordneten Bohrungen aus und verteilt sich an der Kontaktzone zwischen Schleifbelag und Werkstück (Bild 3-8).

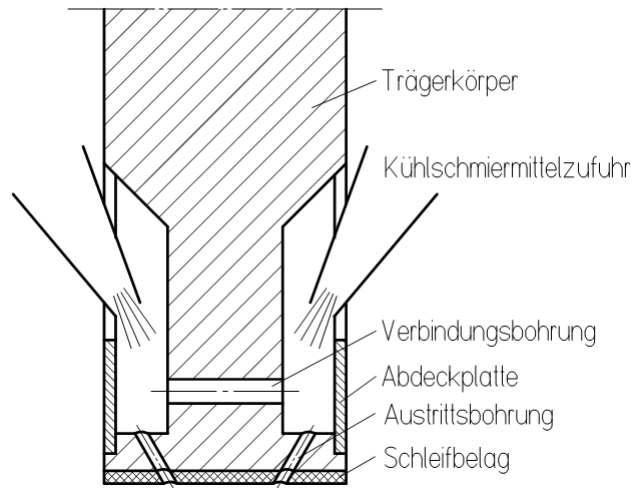


Bild 3-8: Schleifscheibe mit Innenkühlung [SCH02a]

Dabei sind der Druck, die Austrittsmenge und die Austrittsgeschwindigkeit des Kühlschmierstoffs durch die Anordnung, Form, Lage, Größe und Anzahl der Kammern und Bohrungen, sowie über die Schleifscheibendrehzahl steuerbar.

3.4 Schleifverfahren

Die Schleifverfahren sind nach DIN 8589-11 (Schleifen mit rotierendem Werkzeug [DIN8589a]) und DIN 8589-13 (Hubschleifen [DIN8589b]) genormt. Darüber hinaus gibt es noch zahlreiche weitere Schleif- bzw. Sonderschleifverfahren. Nachfolgend wird eine Auswahl dieser Verfahren kurz behandelt.

3.4.1 Unrundschleifen

Vor Einführung der CNC-Technologie wurden geschliffene unrunde Profile nach dem Kopierverfahren hergestellt. Das unrunde Werkstück entstand, indem durch mechanisches Abtasten der relative Abstand der Schleifscheibe zum Werkstück den Erfordernissen entsprechend kontinuierlich verändert wurde (Bild 3-9). Dabei mussten vorab für unterschiedliche Werkstückprofile jeweils entsprechende Schablonen oder sogenannte Meisternocken angefertigt werden [SCH86, S. 81].

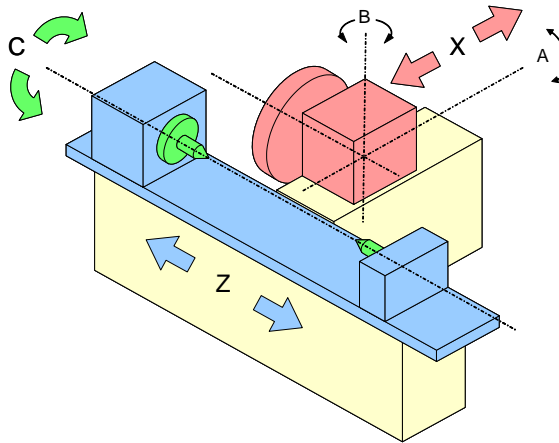


Bild 3-10: Koordinatenachsen beim Unrundschleifen [ZUD06, S. 2]

Für Rundschleifbearbeitungen genügt im einfachsten Fall die Positionierung von X- (Einstechschleifen) und Z-Achse (Längsschleifen). Bei der Bearbeitung von Werkstücken mit unrunder Querschnitten ist zusätzlich die C-Achse notwendig, welche Führungsachse für die X-Achse ist und diese synchron zu ihrer Drehlage steuert. Für das drehzahlsynchrone Unrundschleifen ist neben der Werkstückdrehachse C noch eine zweite steuerbare Drehachse, die Schleifscheibendrehachse¹, erforderlich. Durch ein Schwenken der Schleifscheibe um die B-Achse (meist nur als Hilfsachse ausgeführt) können Plan- und Längsflächen in einem Einstechvorgang bearbeitet werden. Die A-Achse (ebenfalls meist nur als Hilfsachse ausgeführt) ermöglicht eine Neigung der Schleifscheibe um die X-Achse und ist speziell bei Gewindeschleifmaschinen vorhanden. Gewinde sind auch bei achsparalleler Anordnung von Schleifscheibe und Werkstück und Synchronisation von C- und Z-Achse schleifbar. Dabei muss jedoch die Schleifscheibe entsprechend profiliert werden und es sind nicht alle Gewindeprofile exakt herstellbar [ABL04].

3.4.1.2 Vorbearbeitung von Werkstückrohteilen

Bei Rohteilquerschnitten, die vor dem Unrundschleifen nicht an die unrunde Fertigeometrie angepasst sind, wird die Bearbeitungszeit durch einen sog. „Ausräumzyklus“ beschleunigt.

¹ Bei herkömmlichen Rundschleifmaschinen ist die Schleifscheibendrehzahl entweder nicht oder unabhängig von den anderen Maschinenachsen regelbar. I. Allg. besteht keine Möglichkeit, die Schleifscheibendrehung mit der Werkstückdrehung zu synchronisieren. Jedoch ist beim drehzahlsynchronen Unrundschleifen die Synchronisation der beiden Drehachsen zwingend erforderlich.

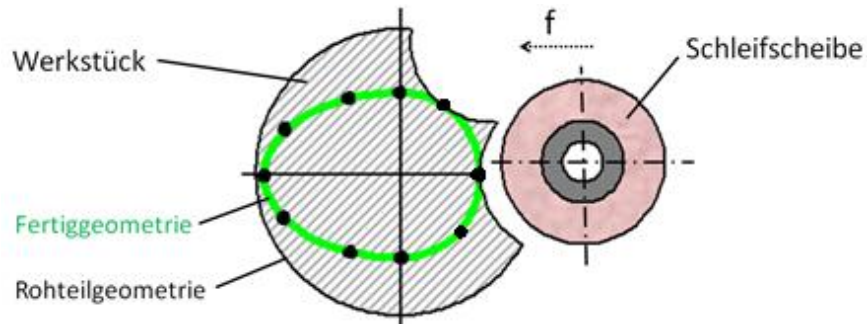


Bild 3-11: Ausräumzyklus beim Unrundschleifen [ZUD06, S. 35]

Dabei wird bei stillstehendem Werkstück an mehreren unterschiedlichen Stellen des Umfangs eingestochen und so der Großteil des Rohteilmaßes abgetragen (Bild 3-11). Nach der Vorbearbeitung erfolgt die Fertigbearbeitung des Werkstücks mit den beim Unrundschleifen üblichen Pendelhubbewegungen [ZUD06, S. 35].

Eine andere Variante ist das Tiefschleifen. Hier erfolgt zunächst ein radiales Einstechen bei stillstehendem Werkstück bis kurz vor Fertigmaß. Anschließend wird sehr langsam im Pendelhub eine 360°-Drehung des Werkstücks vollzogen. Da hier große Eingriffslängen vorliegen, muss auf eine besonders leistungsfähige Zufuhr des Kühlschmierstoffs geachtet werden.

3.4.1.3 Gleich- und Gegenlaufschleifen

Beim Gleichlaufschleifen sind die Werkstück- und Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit am Berührungspunkt gleichgerichtet, beim Gegenlaufschleifen entgegengesetzt gerichtet (Bild 3-12).

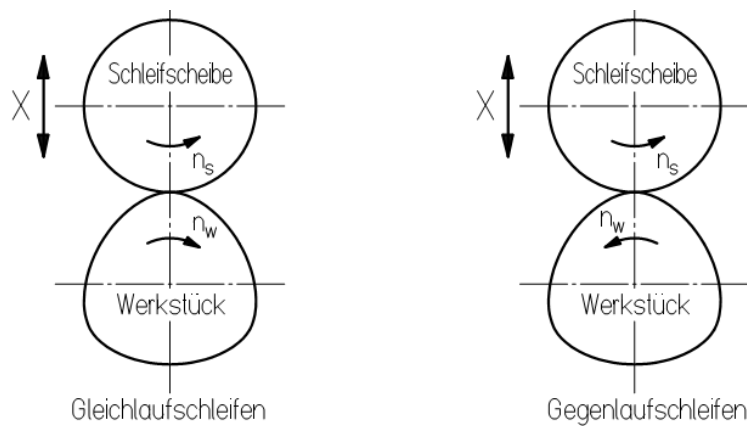


Bild 3-12: Gleich- und Gegenlaufschleifen

Jedoch:

Die Drehrichtungen von Werkstück und Schleifscheibe sind beim Gleichlaufschleifen entgegengesetzt und beim Gegenlaufschleifen gleich. Daher ist das Drehzahlverhältnis $i_v = n_s : n_w$ beim Gleichlaufschleifen negativ und beim Gegenlaufschleifen positiv¹. Beim herkömmlichen Rundschleifen sowie beim Pendelhubschleifen hat sich das Gegenlaufschleifen durchgesetzt. Hier ist bei ansonst gleichen Drehzahlbedingungen die Relativgeschwindigkeit zwischen Schleifscheibe und Werkstück größer.

3.4.1.4 Innenschleifen

Beim herkömmlichen (Pendelhub-) Innenschleifen (Bild 3-13) wird der größtmögliche Schleifscheibendurchmesser durch den kleinsten Krümmungsradius des Werkstückprofils bestimmt.

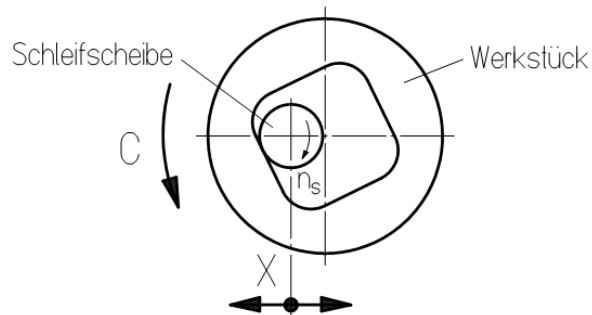


Bild 3-13: Herkömmliches Innenschleifen eines ungerundeten Profils

Durch die begrenzte bzw. eingeschränkte Schleifscheibengröße wird die Biegesteifigkeit des Schleifwerkzeugs sowie dessen Oberfläche und somit die mögliche Schleifleistung eingeschränkt. Daher bedingt das Innenschleifen von Profilen mit kleinen Krümmungsradien oftmals relativ lange Schleifzeiten.

3.4.1.5 Softwareentwicklungen zum Unrundschleifen am IFT

Nachdem sich die CNC-Technologie auch beim Schleifen etablierte wurden am Institut für Fertigungstechnik (IFT) der TU-Graz (in Zusammenarbeit mit den Fortuna-Werken in Stuttgart) wesentliche Grundlagen zum Thema „Unrundschleifen“ erarbeitet [SCH86].

Um die CNC-Unrundprogrammierung zu erleichtern bzw. überhaupt erst zu ermöglichen wurden anfangs von A. Schmid und später von R. Mayr Hilfsprogramme in Basic und Turbo-Pascal geschrieben. Diese Programme wurden später dahingehend verbessert, um auch entsprechend geschulten Maschinenbedienern die Erstellung eines CNC-Codes zu

¹ In weiterer Folge wird in vorliegender Arbeit anstelle des Vorzeichens im Text angegeben ob es sich um Gleich- oder Gegenlaufschleifen handelt.

ermöglichen. In den Publikationen wird diese erste Unrundsoftware als „Generalisierte Unrundsoftware“ bezeichnet [ZUD06, S. 10].

„KelPoly“ ist der Name einer am IFT von 1995 bis 2004 entwickelten und betreuten Software zum Unrundscheifen. Die wesentliche Verbesserung zu früheren Programmen war die Bereitstellung einer grafischen Benutzeroberfläche. Mit dieser Software war es nun möglich, mit den von der Fa. Kellenberger AG produzierten Rundscheifmaschinen optional auch unrunde Werkstücke zu schleifen [ZUD06, S. 13].

Die wesentlichen **Funktionen** von KelPoly sind:

- Definition der zu schleifenden Werkstückgeometrie
- Berechnung der Schleifscheibenbahn in Abhängigkeit zur Werkstückgeometrie
- Anzeige der Kinematik von X- und C-Achse
- Generierung des NC-Codes
- Schnittstelle zwischen PC und Maschinensteuerung

„Programmiersystem Unrund“ ist die Bezeichnung einer am IFT zwischen 2007 und 2010 entwickelten Software zum Unrundscheifen. Ein wesentlicher Unterschied zu vorherigen Programmentwicklungen war die Forderung, dass das Programm sowohl auf einem handelsüblichen PC mit Windows-Betriebssystem, als auch auf der Siemens-Steuerung Sinumerik 840 D (und nachfolgende Modelle) lauffähig ist.

Die wesentlichen **Erweiterungen** zu vorherigen Programmentwicklungen sind:

- Optimierung der Kinematik der Achsenbewegungen damit die Grenzwerte ausgenutzt, jedoch auch nicht unterschritten werden.
- Implementierung der dritten Ableitung des Weges nach der Zeit (Ruck).
- Bahnkorrekturen, um Maßabweichungen am gefertigten Werkstück (bspw. durch Schleppfehler) zu korrigieren.
- Interpolation der unrundern Werkstückquerschnitte und Bahnbewegungen der Schleifscheibe durch Splines.

3.4.2 Kegelschleifen

Bei kegeligen Profilen werden zwei Arten unterschieden: Zum einen das exakt kegelige Profil und zum anderen das quasi kegelige Profil. Ersteres ist bspw. ein Kreiskegel mit kreisrunden

Querschnitten der mit einer kegelig abgerichteten, oder mit einer um die B-Achse geschwenkten zylindrischen Schleifscheibe bearbeitet wird (Bild 3-14).

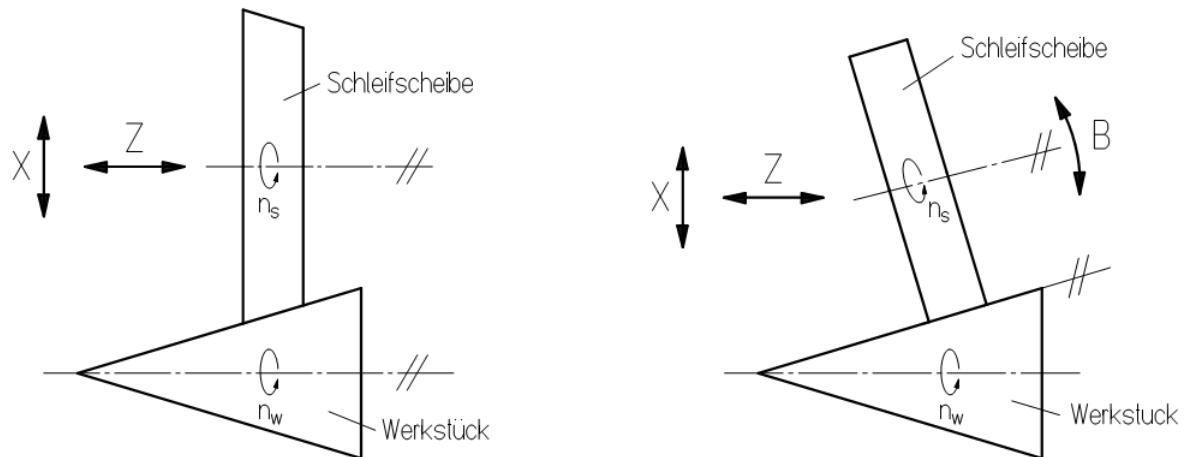


Bild 3-14: Kegelschleifen mit einer kegelig abgerichteten (links) und einer um die B-Achse geschwenkten zylindrischen Schleifscheibe (rechts)

Um einen exakten Kegel bzw. Kegelstumpf zu erhalten müssen sich alle Erzeugenden in einem gemeinsamen Punkt, der Kegelspitze, schneiden.

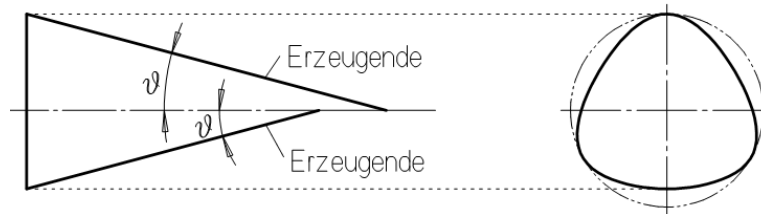


Bild 3-15: Quasi kegeliges Polygonprofil

Wird mit den zuvor gezeigten Bearbeitungsmethoden anstelle eines kreisrunden ein un rundes Profil, bspw. ein Polygonprofil, bearbeitet, so ist diese Forderung nicht erfüllt (Bild 3-15). Hier entsteht ein quasi kegeliges Profil [MAY90, S. 697f]. Damit sich alle Erzeugenden in der Kegelspitze S_k schneiden darf der Kegelwinkel am Umfang nicht konstant sein. Er muss sich in Abhängigkeit von der radialen Ausdehnung entsprechend ändern.

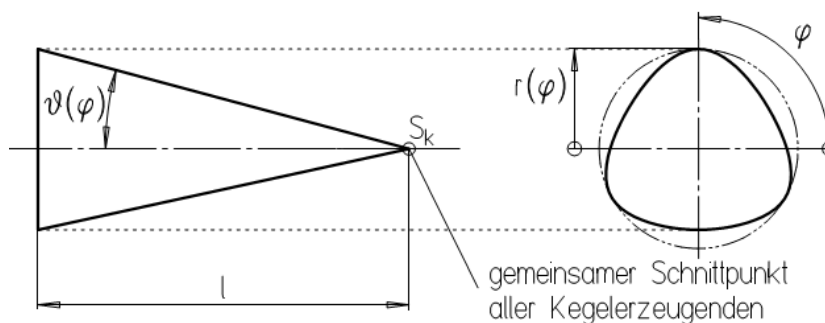


Bild 3-16: Exakter Polygonkegel

Hierbei hat der Kegelwinkel in den „Polygonecken“ den größten und in den Flachpunkten den kleinsten Wert. Analog zu Bild 3-16 ergibt sich der Kegelwinkel:

$$\vartheta(\varphi) = \arctan\left(\frac{r(\varphi)}{l}\right) \quad (3.6)$$

Konische Polygonprofile sind nicht genormt, werden jedoch für technische Anwendungen immer wieder eingesetzt. Ein bekanntes Beispiel ist das Werkzeugspannsystem „Coromat Capto“ von Fa. Sandvik (Bild 3-17) [RIE09, S. 9].



Bild 3-17: Sandvik Coromat Capto¹

In [MAY90] und [WED89] werden Verfahren zum Schleifen von kegeligen Polygonprofilen aufgezeigt.

3.4.3 Schrägeinstechschleifen

Wird beim Rundschleifen neben den kreisrunden Querschnitten auch die Planseite mitbearbeitet, verläuft die Schleifscheibendrehachse i. Allg. nicht parallel zur Werkstückdrehachse. Beim Planschleifen verschleißt die Schleifscheibe seitlich. Bei achsparalleler Anordnung von Werkstück und Werkzeug entsteht mit der Zeit ein schmaler instabiler Steg (Bild 3-18) [SCH86, S. 8].

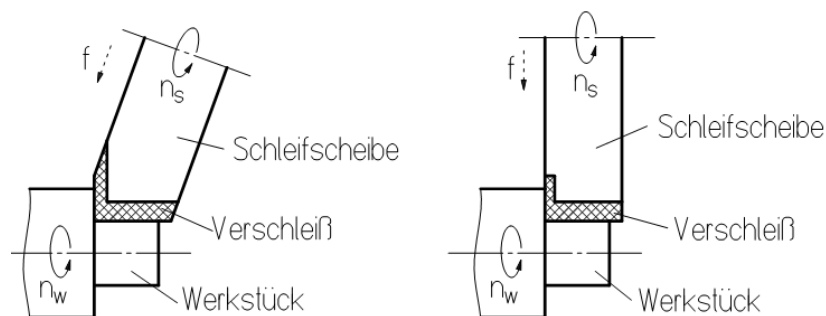


Bild 3-18: Schleifscheibenverschleiß beim Planschleifen mit schrägstehendem (links) und gerade stehendem Schleifsupport (rechts)

¹ Quelle: <http://www.directindustry.com/prod/sandvik-coromant/modular-tool-holders-14460-352087.html>

In Bild 3-19 werden die geometrischen Verhältnisse beim Schrägeinstechschleifen anhand einer kegelig abgerichteten Schleifscheibe, die gegenüber der Werkstückachse geschwenkt ist, gezeigt. Durch die kegelige Form ändert sich der Schleifscheibenaußendurchmesser in Achsrichtung. Im Normalschnitt auf die Werkstückdrehachse zeigt sich ein ellipsenförmiger Schleifscheibenquerschnitt. Im Gegensatz zum Rundschleifen ergeben sich beim Unrundschleifen am gefertigten Werkstück Geometrieabweichungen. Ursache hierfür ist der Umstand, dass die zur Bearbeitung notwendige Pendelhubbewegung vom Schleifscheibenquerschnitt abhängt. Jedoch ist dieser entlang der Werkstückdrehachse nicht konstant. Daher ist beim Schrägeinstechschleifen nur die Bearbeitung von relativ schmalen unrundern Werkstückquerschnitten sinnvoll. Andernfalls muss eine zur C- und Z-Position abhängige zusätzliche Scheiben- oder Tischozillation in X-Richtung erfolgen [SCH86, S. 41].

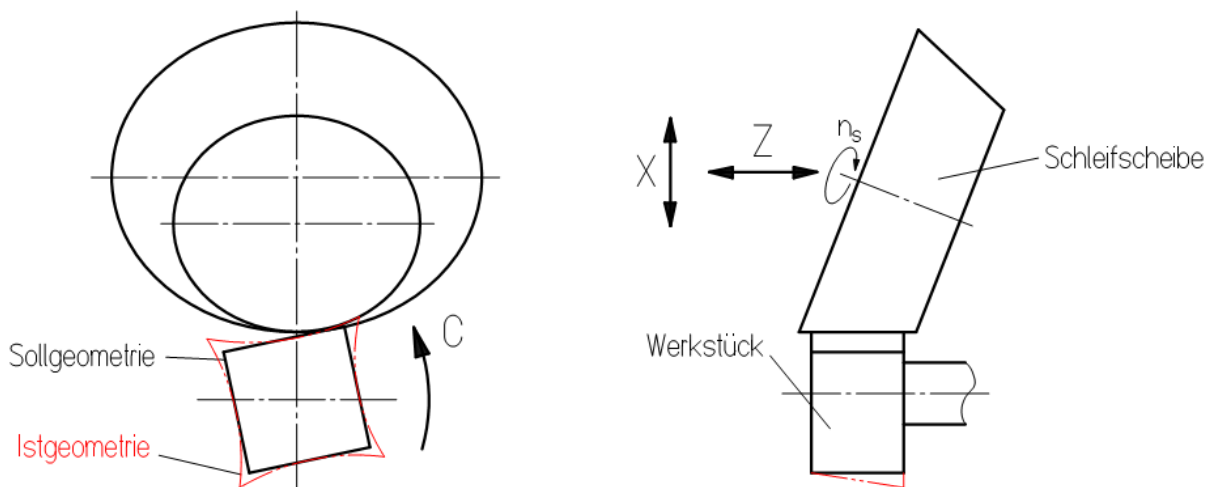


Bild 3-19: Geometrieabweichung eines Vierkants beim Schrägeinstechschleifen

Untersuchungen zur Formabweichung beim Unrundschleifen im Schrägeinstechverfahren sind in den Dissertationen von A. Schmid [SCH86] und A. Mautz [MAU03] durchgeführt.

3.4.4 Außenrund-Längsschleifen im Tiefschnitt (Schälschleifen)

Beim Außenrund-Längsschleifen im Tiefschliff (Schälschleifen) wird das Werkstück bei einer großen radialen Zustellung mit einem Überschliff in Längsrichtung auf das Fertigmaß bearbeitet. Hierbei erfolgt eine Trennung von Schrupp- und Schlichtzone auf zwei Bereiche der Schleifscheibe. Durch diese Trennung lassen sich die einzelnen Zonen den ihnen zugrundeliegenden Aufgaben anpassen [FIN03, S. 9 / 22].

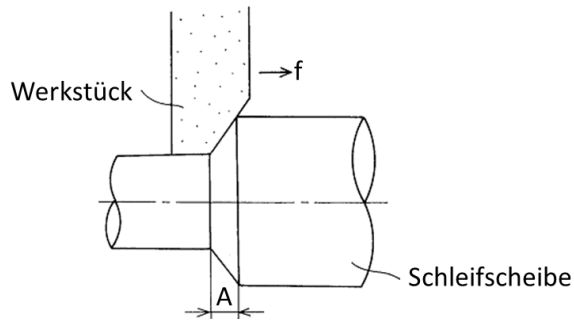


Bild 3-20: Längsschleifverfahren nach Toyoda [IMA93]

Bei Verwendung einer kegelförmigen Schleifscheibe wird die Kontaktzone beim Schruppen vergrößert und die Zerspanungsleistung gleichmäßiger verteilt. Der Materialabtrag erfolgt durch die kegelförmige Schruppzone der Schleifscheibe, während der zylindrische Teil als „Ausfeuerzone“ dient und die Oberflächenqualität und Maßhaltigkeit verbessert. In [FIN03] wird dieses Verfahrensprinzip auf das Innenrund-Längsschleifen von Futterteilen übertragen.

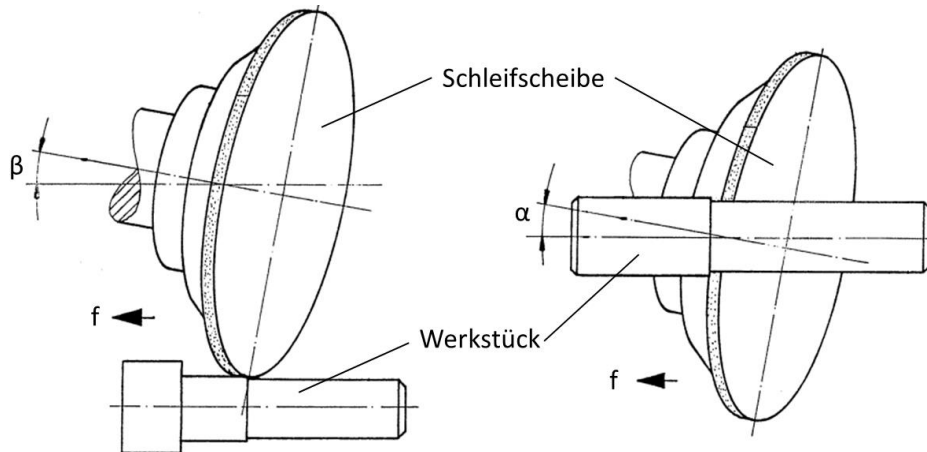


Bild 3-21: Quickpoint-Außenrundscheifen [JUN84]

Ein bekanntes Verfahren des Längsschältschleifens mit windschiefer Schleifscheibenanordnung ist das von der Fa. Junker [JUN84] entwickelte Quickpoint-Verfahren. Bei diesem Verfahren wird mit relativ hohen Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeiten, großen Schleifscheibendurchmessern und mit schmalen CBN- oder Diamantschleifscheiben gearbeitet. Charakteristisch für dieses Verfahren ist der (theoretische) Punktkontakt zwischen Schleifscheibe und Werkstück. U.a. findet dieses Verfahren bei der Herstellung von Wälzkörpern für Lager Anwendung [BUR11].

3.4.5 Spitzenlosschleifen

Beim Spitzenlosschleifen wird das Werkstück zwischen Auflage, Schleifscheibe und Regelscheibe geführt (Bild 3-22).

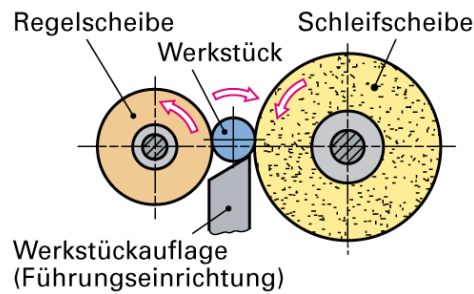


Bild 3-22: Spitzenlosschleifen [DIL07, S. 180]

Der Werkstückmittelpunkt liegt über der Drehachse der Schleifscheibe. Der Drehantrieb des Werkstücks erfolgt über die gummi- oder kunstharzgebundene Regelscheibe. Das Werkstück dreht sich in etwa mit der Umfangsgeschwindigkeit der Regelscheibe. Zylindrische Werkstücke ohne An- bzw. Absatz, bspw. Zylinderstifte, werden in einem axialen Durchlauf geschliffen. Dazu ist die Regelscheibe um $0,5 - 15^\circ$ geneigt, um einen axialen Vorschub des Werkstücks zu erreichen. Die Bearbeitung profilierter Werkstücke erfolgt durch Quer- bzw. Einstechschleifen [DIL07, S. 180 / REI10, S. 201]. Im Vergleich zum Schleifen zwischen Spitzen erfolgt beim Spitzenlosschleifen die Zustellung durchmesserbezogen und somit mit doppelter Genauigkeit. Zusätzlich wird das Werkstück gegen Durchbiegung abgestützt.

Das Spitzenlos-Durchgangsschleifen ist durch die hohe Präzision und die hohe Produktivität mit Durchlaufzeiten von wenigen Sekunden ein hoch effizientes und weit verbreitetes Bearbeitungsverfahren für die Außenbearbeitung kreisrunder, zylindrischer Werkstücke.

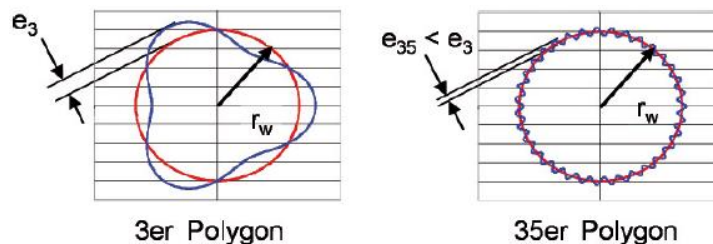


Bild 3-23: Beispielhafte, mögliche Werkstückprofile beim Spitzenlos-Durchgangsschleifen zylindrischer Werkstücke [ZEP08, S. 447]

Der Formbildungsprozess wird durch die Anordnung des Schleifspalts wesentlich beeinflusst. Durch die Anordnung von Regelscheibe, Werkstück, Schleifscheibe und Auflagelineal stellen sich charakteristische (Gleichdick-)Profilquerschnitte ein, die beispielhaft in Bild 3-23 dargestellt sind. Hierbei setzt oftmals das Erreichen eines stabilen Bearbeitungsprozesses mit

Einhaltung der geforderten Formtoleranzen den Einsatz entsprechender Simulations- und Berechnungstools voraus [KRA09, S. 115 / ZEP08, S. 446].

3.4.6 Stützscheifen

Beim Stützscheifen wird das Werkstück mit zwei einander gegenüberliegenden Schleifwerkzeugen bearbeitet (Bild 3-24).

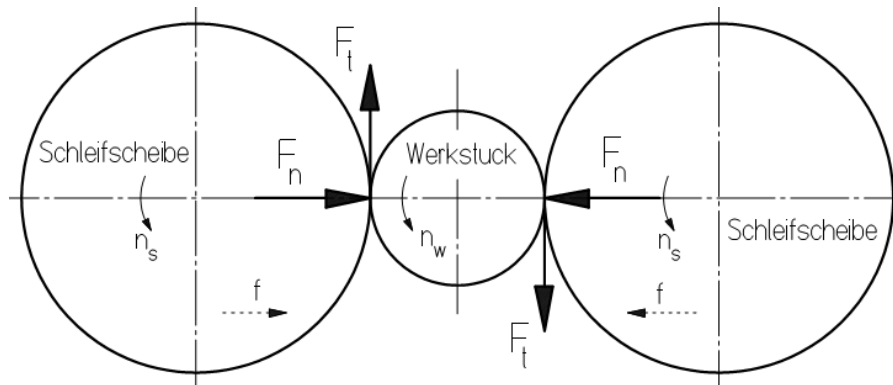


Bild 3-24: Ausgleich der Normalkräfte beim Stützscheifen mit zwei gegenüberliegenden Schleifwerkzeugen

Bei der Schleifbearbeitung ist für die Durchbiegung des Werkstücks in erster Linie die Normalkraftkomponente F_n der Schleifkraft verantwortlich. Diese ist meist um ein Vielfaches höher als die tangentialen Schnittkraftkomponente F_t . Beim Stützscheifen sind die beiden Normalkräfte F_n einander entgegengesetzt gerichtet und heben sich somit auf. Folglich sind bei geringeren Werkstückdeformationen höhere Schnittleistungen möglich [SCH08d / DIB09b]. Zusätzlich werden zur höheren möglichen schleifstellenbezogenen Abtragsleistung durch die gleichzeitig stattfindende Bearbeitung mit zwei Schleifwerkzeugen die Bearbeitungszeiten quasi halbiert. Jedoch ist bei langen, schlanken Werkstücken auch durch die tangentialen Schnittkraftkomponenten F_t eine Werkstückverformung möglich, welche eine Abstützung des Werkstücks bei der Bearbeitung erfordert.

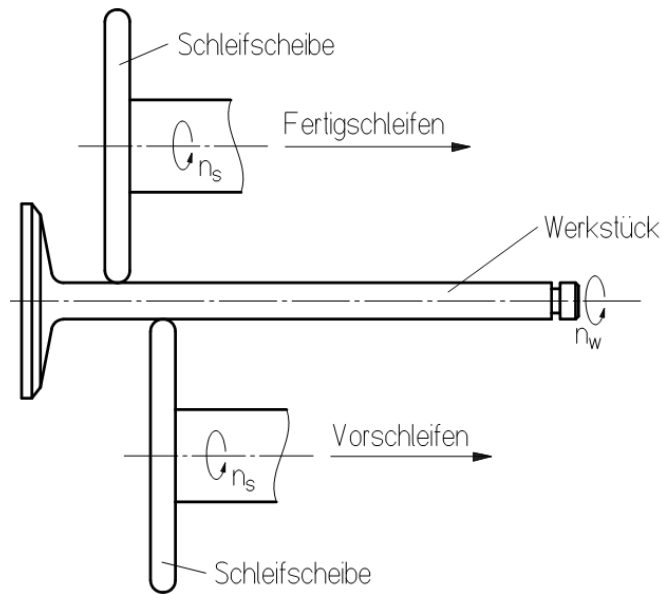


Bild 3-25: Stützsleifen durch gleichzeitiges Vor- und Fertigschleifen von relativ langen Werkstücken mit ausschließlich kreisrunden Querschnitten am Beispiel eines Motorventils [KOV96]

Während die Patentschrift [KOV96] ein Verfahren zum simultanen Vor- und Fertigschleifen von kreisrunden Querschnitten beschreibt (Bild 3-25), zeigt die Patentschrift [DIB09a] ein Verfahren zum Vorschleifen von unrunden, stabförmigen Werkstücken mit gegenüberliegenden Planflächen. Anschließend erfolgt das Fertigschleifen im Pendelhubverfahren (Bild 3-26).

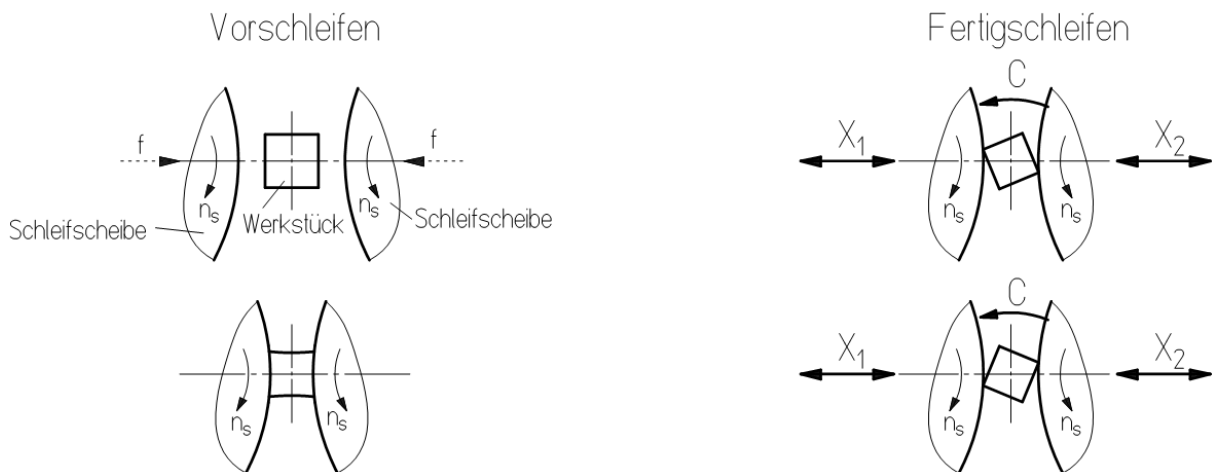


Bild 3-26: Verfahren zum Stützsleifen von unrunden, stabförmigen Werkstücken [DIB09a]

3.5 Schleifen mit unrundern oder exzentrisch runden Schleifscheiben

Vor Einführung der CNC-Technologie erforderte die Herstellung von unrundern Werkstückquerschnitten den Einsatz von mehr oder weniger komplizierten Steuervorrichtungen. Oft verursachte dies einen erheblichen Fertigungsaufwand. Mit der Erfindung von Orend [ORE72] wurde eine Möglichkeit aufgezeigt, wie Unrundgeometrien mit von der Kreisform abweichenden Werkzeugen einfach und kostengünstig herstellbar sind. Dabei ist nur eine Zustellbewegung und keine synchrone Vorschubbewegung notwendig. Der erforderliche Vorschub zur Erzeugung einer über den Umfang veränderlichen Geometrie wird in das unrunde Werkzeug verlegt, welches mit am Umfang radial und axial angeordneten Zähnen versehen ist.

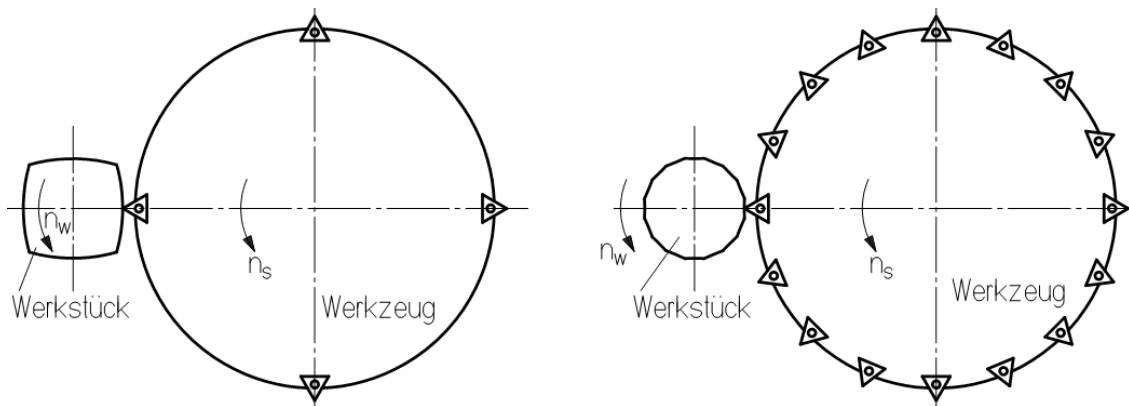


Bild 3-27: Einfluss der Werkzeugzähnezahl auf die Form der gefertigten Werkstückgeometrie bei Drehzahlverhältnis $i_v = n_s : n_w = 1 : 1$

Die Wirkpartner drehen sich mit einem festen ganzzahligen Drehzahlverhältnis synchron zueinander. Dadurch wird erreicht, dass die Zähne des Werkzeugumfangs immer an denselben Stellen des Werkstücks schneiden. Infolge dessen entsteht an der Werkstückoberfläche in Umfangsrichtung eine Welligkeit, die (bei gegebenem Drehzahlverhältnis und Werkzeugdurchmesser) von der Werkzeugzähnezahl abhängt. Bild 3-27 zeigt den prinzipiellen Einfluss der Zähnezahl auf das Profil der gefertigten Werkstückgeometrie bei einer drehzahlsynchronen Bearbeitung eines runden Querschnitts mit Drehzahlverhältnis 1:1. Die erreichbare Genauigkeit bei der Bearbeitung der Werkstückoberfläche ist somit auch von der Dichte abhängig, mit der die Schneiden am Umfang des Werkzeugs angeordnet sind. Zudem wird bei der Gleichlaufbearbeitung eine Relativgeschwindigkeit zwischen Werkzeugschneide und Werkstückoberfläche bei Drehzahlverhältnis 1:1 nur durch die radialen Ausdehnungsunterschiede zwischen Werkstück und Werkzeug erreicht. Das gezeigte Fertigungsverfahren eignet sich daher nur bedingt für das Drehfräsen, sehr wohl

jedoch für das Schleifen mit verhältnismäßig großen Werkzeugen (Schleifscheiben) und dichter Schneidenanordnung.

3.5.1 Schleifmaschine mit unrunder oder exzentrisch runden Schleifscheiben

Die Patentschrift [LEH78] mit der Bezeichnung „Schleifmaschine“ behandelt eine Erfindung zum Schleifen von unrunder oder exzentrisch runden Werkstücken mit unrunder oder exzentrisch runden Schleifscheiben. Werkstück, Abrichtwerkzeug und Schleifscheibe sind achsparallel angeordnet. Mit Hilfe eines Zahnriementriebes oder elektronisch synchronisierten Antriebsmotoren ist eine synchrone Drehung der einzelnen Spindeln gewährleistet. Zunächst wird das Werkstückprofil von einem Meisternocken auf die Schleifscheibe übertragen. In weiterer Folge wird es auf das zu bearbeitende Werkstück rückkopiert. Die Zustellbewegung zur Überwindung des radialen Werkstückaufmaßes erfolgt radial durch Verringerung des Abstandes zwischen der Schleifscheiben- und Werkstückdrehachse. Zum unrunder Abrichten der Schleifscheibe werden zwei unterschiedliche Methoden angeführt, die in den nachfolgenden Bildern dargestellt sind. Bild 3-28 zeigt ein angetriebenes Abrichtwerkzeug, welches das identische Nockenprofil wie das zu bearbeitende Werkstück besitzt. Vorteilhafterweise drehen sich Meisternocken und Werkstück dabei doppelt so schnell wie die Schleifscheibe. Dadurch ist gewährleistet, dass die Schleifscheibengeometrie, unabhängig von der zu bearbeitenden Werkstückgeometrie, ausgewuchtet ist.

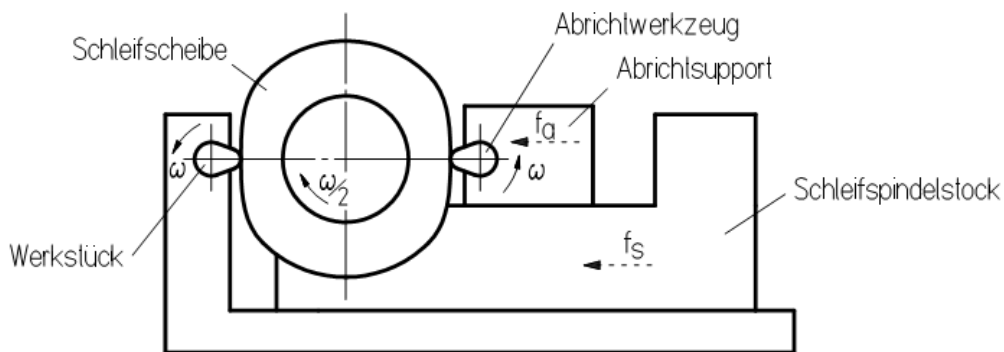


Bild 3-28: Unrunder Abrichten der Schleifscheibe mit einem unrunder Abrichtwerkzeug

In Bild 3-29 ist eine Möglichkeiten aufgezeigt, wie kreisrunde Abrichtrollen verwendbar sind. Dabei wird der Achsabstand zwischen Schleifspindel und Abrichtrolle im Takt der Schleifspindeldrehung durch einen werkstückgeometrieabhängigen Steuernocken verändert. Das Abrichtwerkzeug kann sowohl angetrieben, als auch frei drehend gelagert sein.

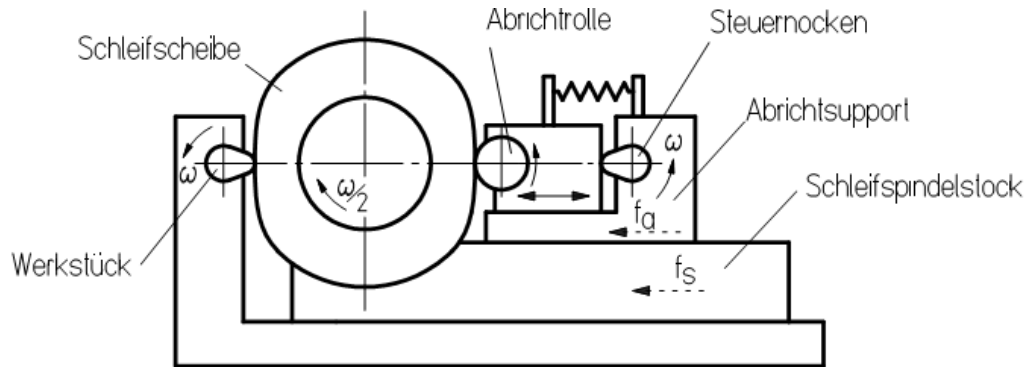


Bild 3-29: Unrundes Abrichten der Schleifscheibe mit einer kreisrunden Abrichtrolle

Zusätzlich wird in der Patentschrift gezeigt, wie mehrere unterschiedliche oder gleichartige, jedoch in der Drehlage zueinander winkelpersetzte unrunde Schleifscheiben auf einer gemeinsamen Schleifspindel angeordnet sind. Ein Anwendungsbeispiel zeigt Bild 3-30, wo die vollständige Unrundbearbeitung einer Nockenwelle in einer Werkstückaufspannung dargestellt ist. Das Abrichtwerkzeug hat die gleiche Außenform wie die zu schleifenden Werkstückoberflächen und ist an der Oberfläche mit Diamanten besetzt. Durch synchrone Drehungen wird die unrunde Form des Diamantabrichters zunächst auf die einzelnen Schleifscheiben, und in weiterer Folge von dort auf das zu bearbeitende Werkstück übertragen. Auf der Schleifscheibenspindel können zusätzlich auch kreisrunde Schleifscheiben angebracht sein, um im selben Arbeitsgang neben den Nockenprofilen auch die Lagerstellen der Nockenwelle zu schleifen. Durch die gleichzeitig stattfindende Bearbeitung von sämtlichen runden und unrunden Schleifstellen ist diese Schleifmaschine höchst produktiv. Ein Nachteil der gezeigten Maschine besteht darin, dass den Schleifscheiben ein achsparallel rotierendes Abrichtwerkzeug zugeordnet ist, dessen Außenform der Geometrie des Werkstücks entsprechen muss. Änderungen in der Werkstückgeometrie sind daher nur über geometrische Änderungen am Abrichtwerkzeug möglich.

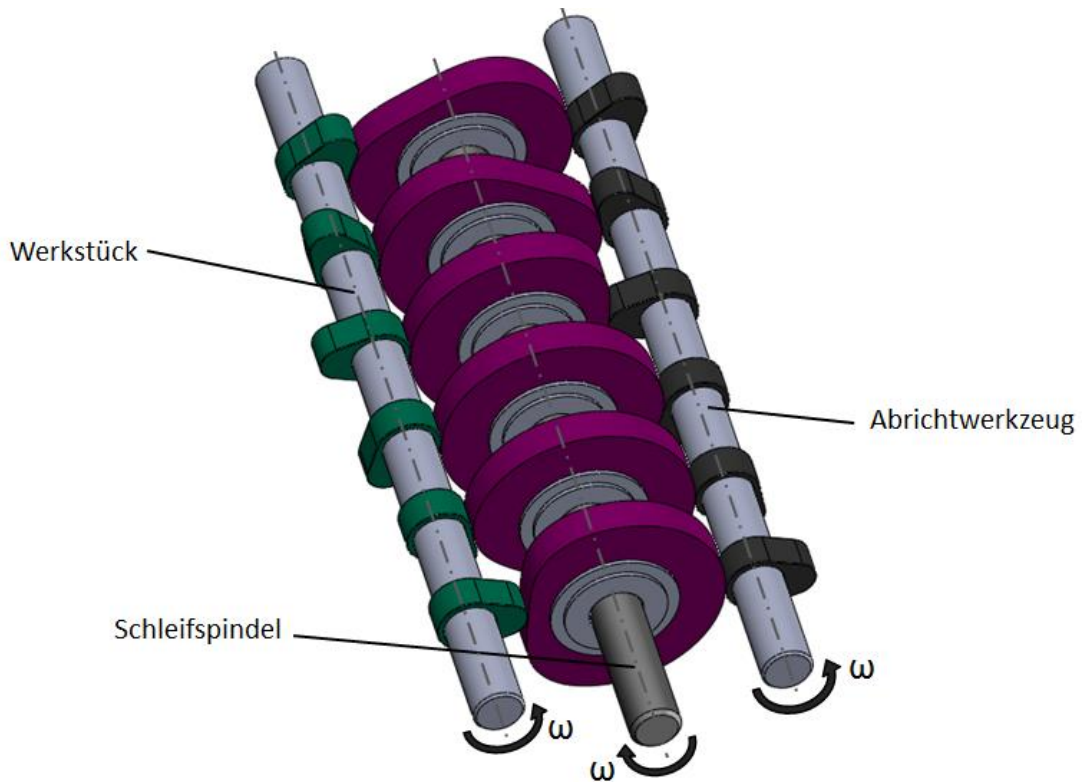


Bild 3-30: Simultanes un rundes Abrichten und Schleifen aller Unrundgeometrien beim Schleifen einer Nockenwelle

Aufgrund des hohen Herstelleraufwandes für die Meisternockenwelle und der notwendigen Synchronisation von drei Drehachsen, von denen zwei zusätzlich translatorisch bewegt werden, ist dieses Maschinenkonzept noch nicht industriell zum Einsatz gekommen [SCH02b, S. 126].

3.5.2 Schleifmaschine mit Abrichtsupport

Die Flexibilität einer Maschine zum drehzahlsynchronen Unrundschleifen wird deutlich erhöht, wenn diese mit einem Abrichtsupport ausgestattet ist. Auf dem Abrichtsupport befindet sich eine Abrichtspindel, welche ein Diamantrad antreibt (Bild 3-31). Mit dieser Schleifmaschine sind unterschiedliche Schleifscheibengeometrien abrichtbar und in weiterer Folge unterschiedliche Werkstückprofile herstellbar. Das Anfertigen von formgebundenen, un runden Abrichtwerkzeugen entfällt. Beim un runden Abrichten ist wie beim herkömmlichen Unrundschleifen eine Pendelhubbewegung notwendig. Diese Pendelbewegung ist jedoch auf die in größeren Zeitabständen erforderlichen Abrichtzyklen beschränkt. Anstelle eines eigenständigen Abrichtsupportes ist es alternativ möglich, eine Abrichtspindel am Werkstückschlitten in fester Lage relativ zum Werkstück zu positionieren. Allerdings sind infolge dieser

Anordnung die zu bewegenden Massen beim Abrichten um ein Vielfaches höher, da der gesamte Schleifspindelstock eine Pendelhubbewegung ausführen muss.

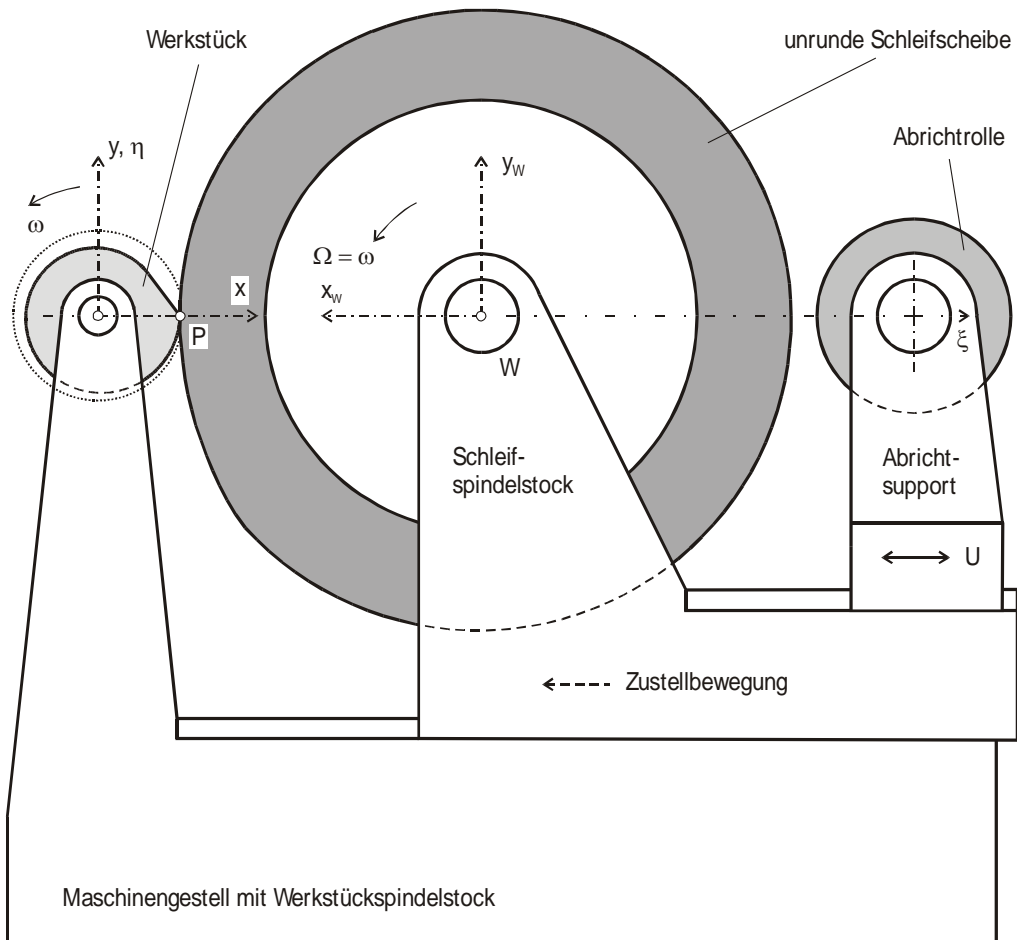


Bild 3-31: Prinzipdarstellung einer drehzahlsynchronen Unrundschleifmaschine mit Abrichtsupport [SCH02b, S. 128]

3.5.3 Bandschleifmaschine für unrunde Innenkonturen

Das in [SCH98] gezeigte Bandschleifen für unrunde Bohrungen stellt eine Weiterentwicklung des drehzahlsynchronen Unrundschleifens dar. Hierbei wird anstelle eines ungeraden Schleifwerkzeuges ein ungerades Andrückelement eingesetzt, welches synchron zum Werkstück rotiert. Die Schnittbewegung wird durch das umlaufende Schleifband aufgebracht (Bild 3-32).

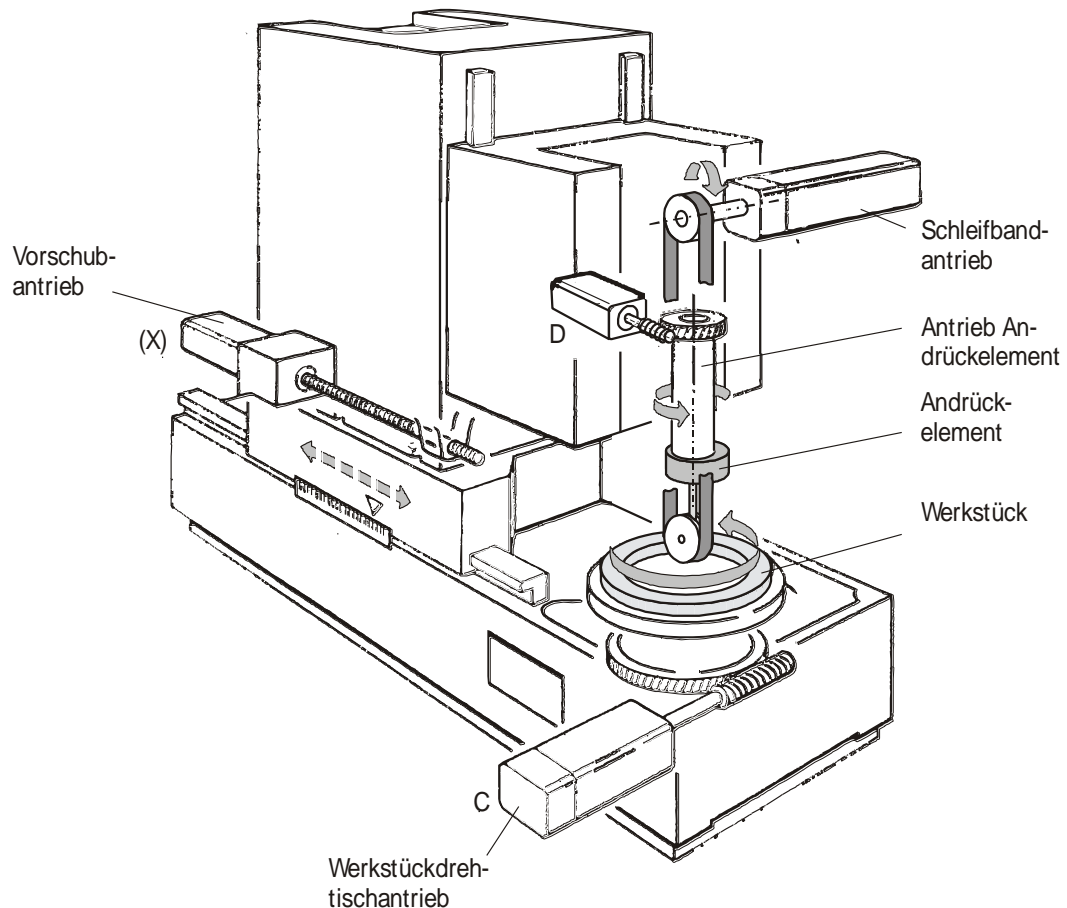


Bild 3-32: Bandschleifmaschine für unrunde Innenkonturen [SCH02b, S. 149]

Im Vergleich zu der beim herkömmlichen Innenschleifen (vgl. Abschnitt 3.4.1.4) verwendeten zylindrischen Schleifscheibe weist das unrunde Andrückelement einen größeren, biege-steiferen Querschnitt auf. Im Vergleich zum drehzahlsynchron Innenschleifen (vgl. Abschnitt 5.6) sind bei der synchronen Drehbewegung von Werkstück und Andrückelement nur geringe Drehzahlen erforderlich.

3.5.4 Schleifen von Nocken mit konkaven Flanken

Lange Zeit waren Leistungs- und Drehmomentsteigerungen die wichtigsten Ziele der Entwicklung von Verbrennungsmotoren, während heute verstärkt Kraftstoffverbrauch und Abgasemissionen berücksichtigt werden. Dies führt dazu, dass bei Nockenwellen neue Nockenprofile mit konkaven Flanken schleiftechnisch zu realisieren sind [MAU03, S. 4 / HIM96, S. 2].

Zum Schleifen von Nocken mit konkaven Flanken im An- und Ablaufbereich sind beim herkömmlichen Unrundschleifen nur Schleifscheiben mit einem entsprechend kleinen Außendurchmesser einsetzbar. Mit dem in der Offenlegungsschrift [SCH08a] gezeigten Schleif-

verfahren ist es möglich, Schleifscheiben mit größeren radialen Ausdehnungen zu verwenden.

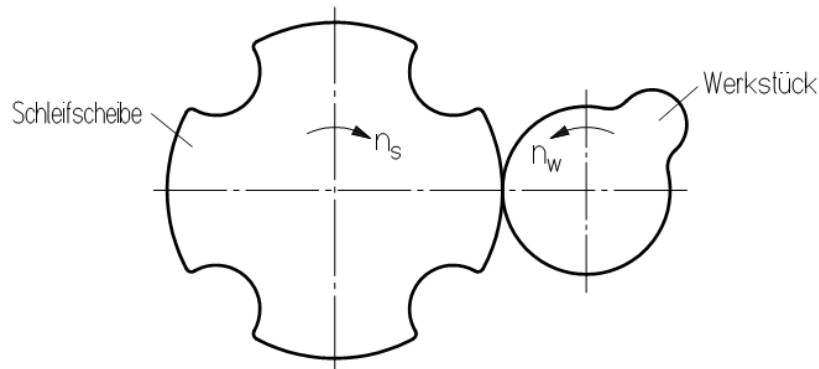


Bild 3-33: Drehzahlsynchrones Unrundscheifen von Nocken mit konkaven Flanken [SCH08a]

In Bild 3-33 ist die prinzipielle Anordnung von Werkstück und Schleifscheibe dargestellt. Die Bearbeitung erfolgt mit einer unrunden Schleifscheibe und einer Synchronisation zwischen der Werkstück- und Schleifscheibendrehung. Um die radiale Schleifscheibengröße zu erhöhen wird die Winkelgeschwindigkeit der Werkstückdrehung in Bezug zur Schleifscheibendrehung erhöht. Im skizzierten Beispiel ist das gewählte Drehzahlverhältnis $i_v = n_s : n_w = 1 : 4$.

3.5.5 Schrägstellung der Schleifscheibe zur Erhöhung der Relativgeschwindigkeit

In Bild 3-34 ist die Schleifscheibenachse gegenüber der Werkstückdrehachse um den Winkel ϑ geneigt. Die Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit v_s teilt sich dabei, in Bezug zum Werkstückkoordinatensystem, in eine axiale: $v_a = v_s \sin \vartheta$ und eine tangential Komponente: $v_t = v_s \cos \vartheta$. Durch die Schrägstellung zwischen Werkstück und Werkzeug erhöht sich die Relativgeschwindigkeit, da eine zusätzliche Geschwindigkeitskomponente in axialer Richtung erzielt wird [NN87]. Diese Geschwindigkeitskomponente gewinnt umso mehr an Bedeutung, je geringer die Differenz zwischen der tangentialen Werkstück- und Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit ist.

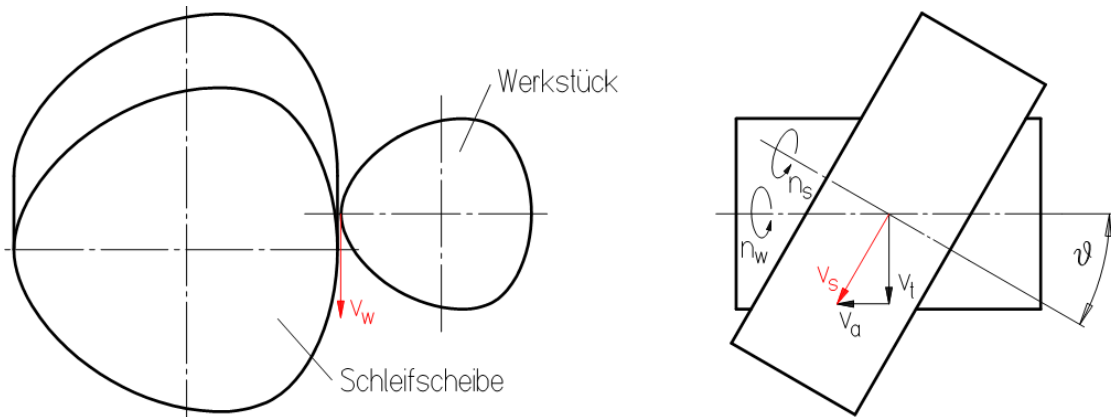


Bild 3-34: Erhöhung der Relativgeschwindigkeit am Berührungspunkt durch eine Schrägstellung der Schleifscheibe

3.5.6 Schleifversuche mit Drehzahlsynchronisation beim Abrichten und Schleifen

Eichhorn¹ [EIC97] hat zum Thema „Drehzahlsynchronisation beim Abrichten und Schleifen“ zahlreiche Abricht- und Schleifversuche durchgeführt. Die Idee, die Wirkpartner beim Abrichten kinematisch starr miteinander zu koppeln, entstand zunächst aus dem Wunsch, durch örtlich und zeitlich definierte Eingriffe das Abrichtergebnis für das Rundschleifen reproduzierbar zu machen und eine höhere Wirkrautiefe der Schleifscheibe zu erzeugen.

Die durchgeführten Schleifversuche und in [EIC97] vorgestellten Ergebnisse sind in drei Kategorien einteilbar. Am Beginn wurden bei einer starren kinematischen Kopplung Rundschleifversuche durchgeführt. Dabei erfolgte die Drehzahlsynchronisation rein mechanisch mit einem Zahnriementrieb, welcher in die Versuchsschleifmaschine integriert ist. Durch den Austausch der Riemenscheiben können mit einer Variation der Zähnezahlen unterschiedliche Drehzahlverhältnisse eingestellt werden. Die Versuche zeigen, dass bei der starren kinematischen Kopplung zwischen rotierender (kreisrunder) Diamantrolle und Schleifscheibe beim Abrichten höhere Wirkrautiefen an der Schleifscheibenoberfläche erzeugt werden. Allerdings wird durch einen höheren Radialverschleiß während der instationären Phase beim Schleifen ein reproduzierbares Arbeitsergebnis während eines bestimmten Schleifzeitraums verhindert. Zusätzlich zeigt sich, dass beim Außenrundschleifen mit starrer kinematischer Kopplung von Werkstück- und Schleifscheibendrehung die Oberflächenqualität durch eine größere Rautiefe gekennzeichnet ist. Diese größere Rautiefe entsteht durch die fehlende, die Wellenspitzen der Werkstückoberfläche wieder einbennende, Überdeckung der Schleifkörner.

¹ Siehe auch: [SPU93], [SPU96a], [SPU96b], [SPU96c], [SPU97a] und [SPU97b]

In den nachfolgenden Schleifversuchen wurden unrunde Werkstücke mit der zuvor verwendeten Versuchsanordnung geschliffen. Jedoch erfolgte das Abrichten der Schleifscheibe mit Diamantwerkzeugen, welche das gleiche unrunde Profil wie die zu fertigenden Werkstücke aufwiesen. Über die erreichte Genauigkeit und die Oberflächengüte der geschliffenen Werkstücke wurden keine Aussagen gemacht, da die Versuche lediglich zur ersten Verifizierung des Verfahrens dienten [EIC97, S. 161].

Zum Abschluss der Schleifversuche wurde ein komplexes Werkstück, bestehend aus konkaven und konvexen Geometrielementen, auf einer Zahnradhohmaschine gefertigt (Bild 3-35). Die dabei auftretende Relativgeschwindigkeit¹ zwischen den Wirkpartnern am Berührungspunkt wurde durch eine Schrägstellung des Schleifrings erhöht, war jedoch dennoch sehr gering und stellenweise null. Die Nulldurchgänge führten zu erhöhten Druckanstiegen, wodurch nur geringe Abtragleistungen möglich waren [EIC97, S. 179].

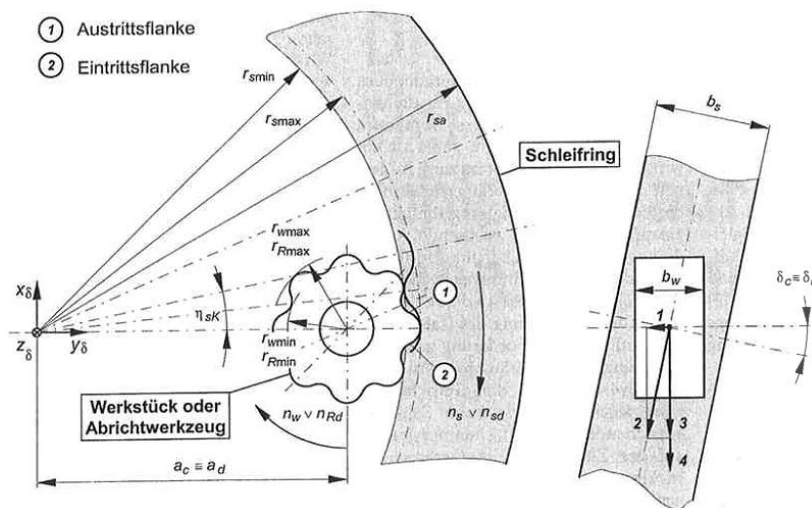


Bild 3-35: Drehzahlsynchrones unrunder Abrichten und Schleifen auf einer Zahnradhohmaschine [SPU97a, S. 270]

3.5.7 Ausgleich der auf die Schleifspindel wirkenden Unwuchtkräfte

Die Fliehkräfte, welche durch eine Schleifscheibenunwucht entstehen, nehmen mit der Schleifscheibendrehzahl quadratisch zu. Dadurch ist das Auswuchten der Schleifscheibe unumgänglich. Es wird zwischen statischer und dynamischer Unwucht unterschieden. Während bei einer statischen Unwucht der Schwerpunkt der Schleifscheibe nicht auf ihrer

¹ Während beim Zahnradhonen früher nur Schnittgeschwindigkeiten von 2 bis 3 m/s erreicht wurden, sind heutzutage Werte bis zu 15 m/s möglich [SCH10, S. 9-3].

Drehachse liegt entsteht eine dynamische Unwucht, wenn die Rotationsachse nicht mit einer Hauptträgheitsachse übereinstimmt.

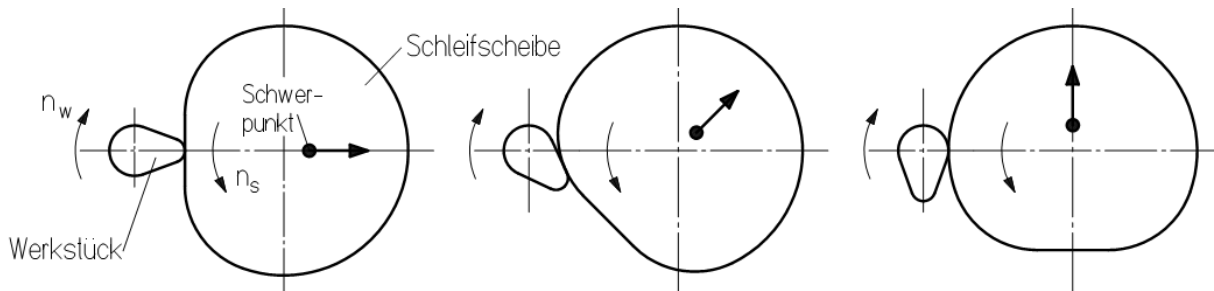


Bild 3-36: Schleifscheibengeometrie beim drehzahlsynchronen Nockenschleifen mit Drehzahlverhältnis $i_v = n_s : n_w = 1 : 1$

In Bild 3-36 ist das drehzahlsynchrone Unrundschleifen einer Nockenscheibe dargestellt. Das Werkstück und das Werkzeug drehen sich dabei mit gleicher Drehzahl. Die zwangsläufig entstehende geometriebedingte Schleifscheibenunwucht ist wesentlich größer als die bei herkömmlichen kreisrunden Schleifscheiben. Bei letzteren bildet sich die Unwucht lediglich durch ungleiche Korn- und Bindemittelverteilung oder durch eine ungleichmäßige Feuchtigkeitsaufnahme aus. Bei einem Ausgleich der Schleifscheibenunwucht durch die dynamische Auswuchteinrichtung auf der Maschine oder einer statischen Auswuchtung durch Verschieben von Ausgleichsgewichten im Schleifscheibenflansch reicht der mögliche Verstellbereich eventuell nicht aus.

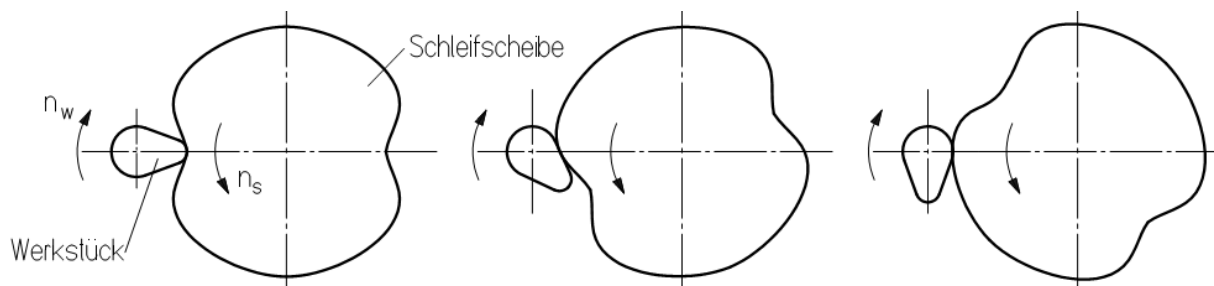


Bild 3-37: Ausgewuchtete Schleifscheibenform beim drehzahlsynchronen Unrundschleifen mit Drehzahlverhältnis $i_v = n_s : n_w = 1 : 2$

Eine Möglichkeit zur Vermeidung einer geometriebedingten Schleifscheibenunwucht ist, die Werkstückdrehzahl gegenüber der Schleifscheibendrehzahl zu verdoppeln [LEH78]. Bei diesem Drehzahlverhältnis ist unabhängig vom Werkstückquerschnitt, sowohl beim Gleichlauf als auch beim Gegenlaufschleifen, eine geometrisch ausgewuchtete Schleifscheibenform gewährleistet (Bild 3-37). Dieser Effekt bleibt erhalten, wenn das Drehzahlverhältnis durch eine Erhöhung der Werkstückdrehzahl weiter verkleinert wird. Jedoch bewirkt eine weitere Erhöhung der Werkstückdrehzahl den Nachteil, dass sich auf der Werkstückachse eine

vorhandene Unwucht wesentlich stärker auswirkt. Zudem ist die Relativgeschwindigkeit zwischen Werkstück und Schleifscheibe beim Gleichlaufschleifen geringer¹.

Es gibt jedoch auch Werkstückgeometrien, die selbst bei einer Vergrößerung des Drehzahlverhältnisses durch eine Verkleinerung der Werkstückdrehzahl einen ausgewuchteten Schleifscheibenquerschnitt ermöglichen. In Bild 3-38 ist die Bearbeitung eines Sechskants bei einem Drehzahlverhältnis $i_v = n_s : n_w = 3 : 1$ dargestellt. Die für diese Bearbeitung notwendige Schleifscheibe hat einen ovalen Querschnitt und ist somit geometrisch ausgewuchtet.

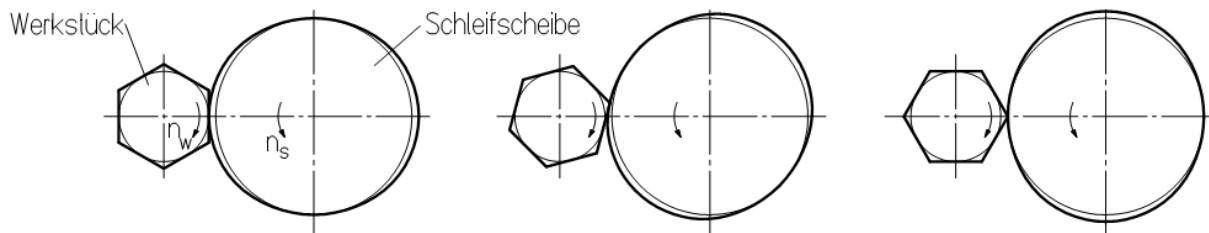


Bild 3-38: Bearbeitung eines Werkstücks mit Drehzahlverhältnis $i_v > 1$ ($n_s : n_w = 3 : 1$)

3.6 Grundlagen für Rechenmodelle für das Unrundschleifen

3.6.1 Umkreisradius eines Dreiecks

Mit den nachfolgenden Beziehungen wird der Kreisradius r mit den Mittelpunktskoordinaten $\{x_m, y_m\}$ eines Kreises berechnet, welcher durch die kartesischen Koordinaten der drei Kreispunkte $\{x_1, y_1\}$, $\{x_2, y_2\}$ und $\{x_3, y_3\}$ definiert ist:

$$r = \sqrt{(x_m - x_2)^2 + (y_m - y_2)^2} \quad (3.7)$$

$$x_m = \frac{(y_2 - y_3) * (x_1^2 + y_1^2) + (y_3 - y_1) * (x_2^2 + y_2^2) + (y_1 - y_2) * (x_3^2 + y_3^2)}{2 * (x_1 * y_2 + x_2 * y_3 + x_3 * y_1 - x_1 * y_3 - x_2 * y_1 - x_3 * y_2)} \quad (3.8)$$

$$y_m = \frac{(x_3 - x_2) * (x_1^2 + y_1^2) + (x_1 - x_3) * (x_2^2 + y_2^2) + (x_2 - x_1) * (x_3^2 + y_3^2)}{2 * (x_1 * y_2 + x_2 * y_3 + x_3 * y_1 - x_1 * y_3 - x_2 * y_1 - x_3 * y_2)} \quad (3.9)$$

¹ Theoretisch kann die Relativgeschwindigkeit bei einem kleineren Drehzahlverhältnis auch größer werden, wenn die Werkstückumfangsgeschwindigkeit größer als die Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit ist. Dieser Fall tritt jedoch i. Allg. nur beim Innenschleifen auf, wenn der Schleifscheibenquerschnitt kleiner als der zu bearbeitende Werkstückquerschnitt ist.

3.6.2 Kreisgleichung in Polarkoordinaten

Die nachfolgende Beziehung zeigt die Definition eines exzentrischen Kreises in Polarkoordinaten [BAR97, S. 258]:

$$R_e^2 = r(\varphi)^2 + e^2 - 2 * e * r(\varphi) * \cos(\varphi) \quad (3.10)$$

Hierbei sind φ und $r(\varphi)$ die Polarkoordinaten des Kreises, R_e ist der Kreisradius und e ist die Exzentrizität.

3.6.3 Tangente einer Kurve

Bild 3-39 zeigt die Tangente t_g einer Kurve $r(\varphi)$ im Punkt P. Der Tangentenwinkel $\beta(\varphi)$ der Kurventangente ist in Beziehung (3.11) definiert [BAR97, S. 405].

$$\tan(\beta(\varphi)) = \frac{\left(\frac{dr(\varphi)}{d\varphi}\right)}{r(\varphi)} \quad (3.11)$$

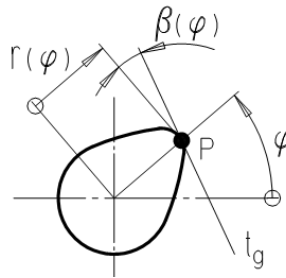


Bild 3-39: Tangente einer Kurve [BAR97, S. 406]

3.6.4 Tangentennäherungsverfahren

Beim Tangentennäherungsverfahren (Newtonverfahren) [BAR97, S. 116 / 117] wird die Funktion $f(x)$ der Beziehung $0 = f(x)$ am Startpunkt x_0 durch ihre Tangente ersetzt. Die Nullstelle der Tangente wird als verbesserte Näherung für die Nullstelle der Funktion in der darauffolgenden Iteration wieder als Startpunkt für die nächste Tangente verwendet. Die nachfolgende Beziehung zeigt die Iterationsvorschrift:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (3.12)$$

Die Iteration erfolgt, bis die Änderung in der Näherungslösung einen bestimmten Wert ε unterschritten hat:

$$|x_{n+1} - x_n| < \varepsilon \quad (3.13)$$

3.6.5 Splineinterpolation

Unter Interpolation wird im mathematischen Sinne die Berechnung von Zwischenwerten einer Funktion verstanden, welche nicht durch eine Gleichung, sondern durch Stützpunkte definiert ist. In der NC-Technik wird unter dem Begriff Interpolation zusätzlich noch die Erzeugung des Bewegungsprofils und die Lageregelung der einzelnen Maschinenachsen verstanden, damit die geforderte Bahnbewegung entsteht. Die Interpolation hat die Aufgabe, die Bewegungen und Positionswerte der einzelnen Maschinenachsen so zu berechnen, dass damit durch eine Überlagerung der Achsbewegungen die gewünschte Werkstückgeometrie hergestellt wird [WEC01, S. 335 / 341].

Bei Einführung der CNC-Technik in den Achtzigerjahren des vergangenen Jahrhunderts waren nur Linear- und Kreisinterpolation möglich. Mit modernen Steuerungen sind heute auch Splines programmierbar. Dadurch ist es möglich, eine Punktefolge, mit welcher der Werkstückumriss und in weiter Folge die Bahnbewegung des Werkzeugs definiert ist, durch eine glatte Kurve zu verbinden.

Für das Unrundschleifen sind die wesentlichen **Anforderungen** an einen Spline:

- Die Kurve soll zweimal stetig differenzierbar sein¹. Andernfalls weisen die Beschleunigungsprofile der Maschinenachsen Sprünge auf, wodurch die Antriebskomponenten stark belastet werden.
- Die Kurve soll durch die vorgegebenen Stützpunkte hindurchverlaufen, da diese Punkte als Bearbeitungsvorgabe von einer Berechnung oder Messung vorliegen.
- Die Kurve soll nicht schwingen, da andernfalls konkave, nicht schleifbare Geometrien entstehen oder sich am Werkstück unzulässige Geometrieabweichungen einstellen können.

Mit Ausnahme der Polynom-Interpolation [SIE01, S. 5-172] sind die in der Steuerung SIEMENS SINUMERIK 840 D implementierten Splines für das Unrundschleifen nur bedingt geeignet. Die interpolierten Kurven sind nicht krümmungsstetig (A-Spline [SIE01, S. 5-156]),

¹ Am Werkstück geforderte scharfe Ecken (bspw. bei einem Vieleck) müssen bei der Splineinterpolation gesondert behandelt werden (bspw. durch die Erweiterung der Stützpunktzahl um eine Eckenabrundung $< 1 \mu\text{m}$ zu erzeugen).

verlaufen nicht durch die vorgegebenen Stützpunkte (B-Spline [SIE01, S. 5-157]), oder neigen zum Schwingen (C-Spline [SIE01, S. 5-157]).

Nachfolgend ist die in [ENG11, S. 402f / 423] gezeigte Interpolation mit einem periodischen kubischen Polynom angeführt. Die Segmente $r_i(\varphi)$, welche je zwei aufeinander folgende Stützpunkte durch eine Kurve verbinden, sind wie folgt definiert:

$$r_i(\varphi) = a_i + b_i * (\varphi - \varphi_i) + c_i * (\varphi - \varphi_i)^2 + d_i * (\varphi - \varphi_i)^3 \quad \varphi \in [\varphi_i, \varphi_{i+1}] \quad (3.14)$$

Die drei Anschlussbedingungen für die zweimal stetig differenzierbare Kurve sind:

$$r_i(\varphi_{i+1}) = r_{i+1}(\varphi_{i+1}) \quad (3.15)$$

$$r'_i(\varphi_{i+1}) = r'_{i+1}(\varphi_{i+1}) \quad (3.16)$$

$$r''_i(\varphi_{i+1}) = r''_{i+1}(\varphi_{i+1}) \quad (3.17)$$

Hierbei sind:

- n Anzahl der Stützpunkte
- $\varphi_i, r_i(\varphi_i)$ Polarkoordinaten des Stützpunktes P_i
- r'_i erste Ableitung der Erhebungskurve $r_i(\varphi)$ nach dem Winkel φ
- r''_i zweite Ableitung der Erhebungskurve $r_i(\varphi)$ nach dem Winkel φ
- a_i, b_i, c_i, d_i Polynomkoeffizienten

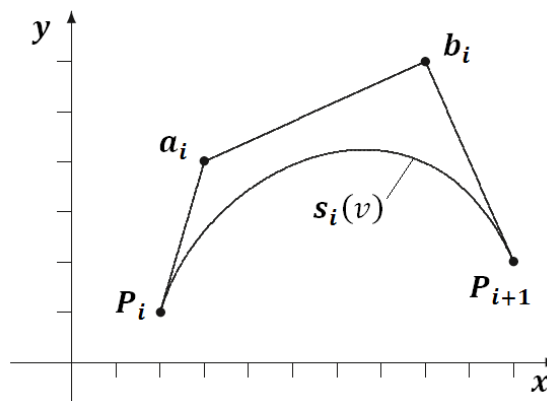


Bild 3-40: Bézier-Spline [ENG11, S. 516]

Das Schwingungsverhalten einer interpolierten Polynomkurve wird durch die Tangenten in den Stützpunkten beeinflusst. Ein Ansatz¹ zur Vorgabe der Stützpunkt tangente im Punkt P_i ist die Verwendung der Tangente des durch die drei Stützpunkte P_{i-1}, P_i und P_{i+1} definierten

¹ Dieser Ansatz wurde in der Software „Programmiersystem Unrund“ (s. Abschnitt 3.4.1.5) umgesetzt.

Kreises und die Verwendung eines kubischen Bézier-Splines [ENG11, S. 515], welcher wie folgt definiert ist:

$$s_i(v) = (1 - v)^3 * P_i + 3 * (1 - v)^2 * v * a_i + 3 * (1 - v) * v^2 * b_i + v^3 * P_{i+1} \quad (3.18)$$

Hierbei sind:

P_i, P_{i+1} Stützpunkte

a_i, b_i Punkte die durch Randbedingungen definiert sind, jedoch nicht auf der interpolierten Kurve liegen

v Parameter der Werte von 0 bis 1 annimmt

3.6.6 Profilumrechnung für Tasterwerte

Werkstückgeometrien, insbesondere Nockenprofile, werden oft nicht mit den tatsächlichen Werten in kartesischen oder polaren Koordinaten, sondern als Tasterwerte in Form einer Erhebungskurve angegeben. Gründe dafür sind, dass die Winkel- und Erhebungswerte als Messwerte aus einer Tastermessung vorliegen, oder die Nockenform bei einer Brennkraftmaschine durch Ventilstellungen (analog Flachtaster) definiert ist. Um die tatsächlichen Werkstückprofilpunkte zu erhalten, müssen die Tasterwerte entsprechend der verwendeten Tastergeometrie (Bild 3-41) umgerechnet werden.

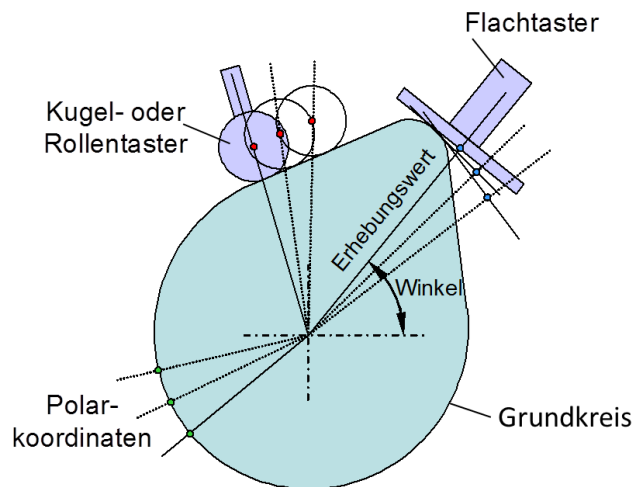


Bild 3-41: Tastergeometrien bei der Beschreibung eines Werkstückquerschnitts
[ZUD06, S. 120]

Die Beziehungen für die Tasterumrechnungen und deren Herleitungen finden sich in [SCH86] und [MAY93]. Nachfolgend sind die Beziehungen für die Tasterumrechnung bei einer Änderung von Rollentasterradius R_1 auf R_2 angeführt [ZUD06, S. 121]:

$$\beta = \arctan\left(\frac{1}{h_1} * \frac{dh_1}{d\varphi_1}\right) \quad (3.19)$$

$$h_2 = \sqrt{h_1^2 + (R_1 - R_2)^2 - 2 * h_1 * (R_1 - R_2) * \cos(\beta)} \quad (3.20)$$

$$\varphi_2 = \varphi_1 + \arcsin\left(\frac{R_1 - R_2}{h_2} * \sin(\beta)\right) \quad (3.21)$$

Die Umrechnung von Flachtasterwerten auf einen Rolltaster mit Tasterradius R_2 erfolgt mit den Beziehungen (3.22) und (3.23) [ZUD06, S. 121]:

$$h_2 = \sqrt{\left(\frac{dh_1}{d\varphi_1}\right)^2 + (h_1 + R_2)^2} \quad (3.22)$$

$$\varphi_2 = \varphi_1 + \arctan\left(\frac{1}{h_1 + R_2} * \frac{dh_1}{d\varphi_1}\right) \quad (3.23)$$

Dabei sind:

- φ_1, h_1 Winkel- und Erhebungswerte des Flachtasters bzw. des Mittelpunkts des Rollentasters mit Radius R_1
- φ_2, h_2 Winkel- und Erhebungswerte des Mittelpunkts des Rollentasters mit Radius R_2
- β Tangentenwinkel

Mit den gezeigten Beziehungen zur Profillumrechnung ist die Berechnung des Differentialquotienten $\frac{dh_1}{d\varphi_1}$ nur dann exakt, wenn die Erhebungskurve als mathematische Funktion in

Abhängigkeit des Winkels vorliegt: $h_1 = f(\varphi_1)$

Dies ist jedoch i. Allg. nicht der Fall. Bei einer numerischen Differentiation, bzw. einer Annäherung der Erhebungskurve durch Splines, ist die Berechnung der Kurventangenten und in weiterer Folge die Tasterumrechnung lediglich eine Näherung [ZUD06, S. 120].

In der Regel wird der kleinste Erhebungswert von allen Werten abgezogen. Damit beginnt die Erhebungskurve an der tiefsten Stelle mit null. In diesem Fall muss bei der Berechnung der Werkstückgeometrie noch der Radius eines angegebenen Grundkreises dazu addiert werden.

3.6.7 Berechnung der Achsbewegungen beim Pendelhubschleifen

Die Beziehungen für die zuvor in Abschnitt 3.6.6 gezeigte Rollentasterumrechnung sind auch für die Berechnung der Schleifscheibenmittelpunktsbahn beim Pendelhubschleifen einsetzbar, wenn für R_2 der Schleifscheibenradius eingesetzt wird. Falls die Werkstückgeometrie nicht in Tastererhebungswerten, sondern als tatsächliche Geometrie in Polarkoordinaten vorliegt, werden diese Werte für φ_1, h_1 eingesetzt und der Wert von R_1 ist null [ZUD06, S. 120].

3.6.8 Formabweichung durch veränderten Schleifscheibendurchmesser

Beim Pendelhubschleifen wird die Schleifscheibenmittelpunktsbahn in Abhängigkeit vom Schleifscheibendurchmesser und der unrundern Werkstückgeometrie berechnet. Ändert sich der Schleifscheibendurchmesser, etwa durch Abnutzung oder wurde er nicht richtig angenommen, dann stimmt die tatsächliche Bahnbewegung mit der notwendigen nicht überein. Hierdurch entsteht am gefertigten Werkstückprofil eine Geometrieabweichung. Das Werkstück ist entweder zu groß, zu klein oder eine Kombination von beiden. Bild 3-42 zeigt einen Vierkant, bei dessen Bearbeitung der tatsächliche Schleifscheibenradius kleiner ist als jener Durchmesser, mit dem die Bahnbewegung berechnet wurde. Infolge des kleineren Schleifscheibendurchmessers ist eine radiale Zustellung Δr in X-Richtung erforderlich, wodurch am gefertigten Werkstück eine Abweichung zwischen der Ist- und der Sollgeometrie entsteht. Um diese Abweichung deutlich darzustellen, wurde der Schleifscheiben-Istdurchmesser gegenüber dem Solldurchmesser stark verkleinert. Dabei wird die Bearbeitung so betrachtet, wie wenn sich die Schleifscheibe relativ um das stehende Werkstück bewegen würde.

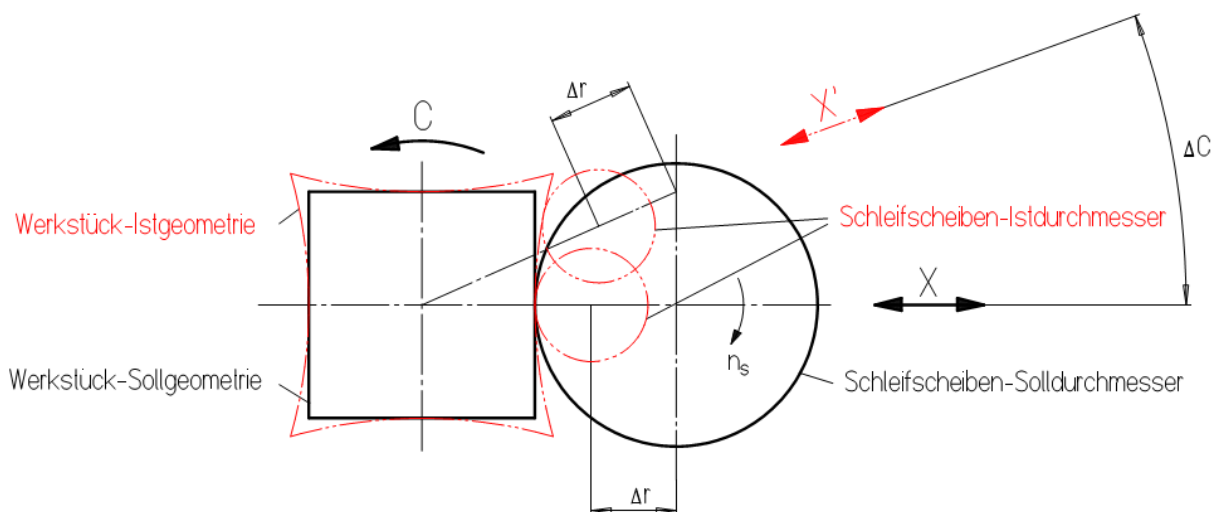


Bild 3-42: Durch einen veränderten Schleifscheibendurchmesser am Werkstückprofil entstehende Formabweichung

In der Literatur [SCH86], [MAY93], [PAT02] und [MAU03] wird diese Formabweichung für bestimmte Werkstückgeometrien, etwa Kreisexzenter oder Vielkant, untersucht. In [MAY93] werden Beziehungen und Zusammenhänge hergeleitet, mit denen die Formabweichung für beliebige Querschnitte berechenbar ist.

3.6.9 Polygonschleifmaschine

Die Funktionsweise einer konventionellen kinematischen Polygonschleifmaschine ist in Bild 3-43 dargestellt. Ein Exzenter mit kontinuierlich verstellbarer Exzentrizität drückt auf zwei um 90° versetzte Taster. Dadurch wird der horizontale Taster durch den Exzenter im Verhältnis 1:1 bewegt. Die Bewegung des vertikalen Tasters erfolgt im Verhältnis der Hebellänge. Aus der Kombination dieser beiden Tasterbewegungen bewegt sich der Mittelpunkt der Schleifscheibe auf einer ellipsenförmigen Bahn synchron zur Werkstückdrehung. Diese aufwändige Mechanik wird heute mit dem Einsatz der modernen CNC-Technik durch elektronische Getriebe ersetzt.

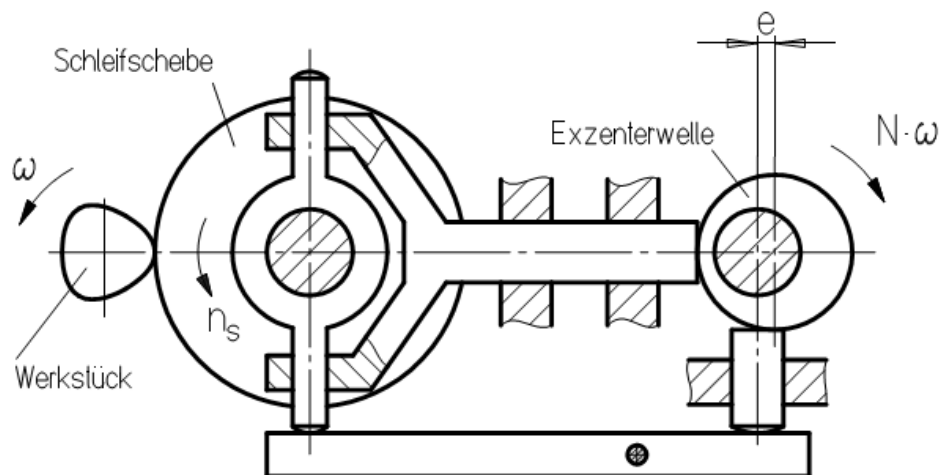


Bild 3-43: Schematische Mechanik der Polygonschleifmaschine

Durch die mechanische Kinematik der Polygonschleifmaschine ergeben sich die Beziehungen der Polygonprofile, welche nachfolgend in Polarkoordinaten angeführt sind [FRA98, S. 111]:

$$r(\alpha) = \sqrt{[R_m - e * \cos(N * \alpha)]^2 + [N * e * \sin(N * \alpha)]^2} \quad (3.24)$$

$$\varphi(\alpha) = \alpha + \arctan\left(\frac{N * e * \sin(N * \alpha)}{R_m - e * \cos(N * \alpha)}\right) \quad (3.25)$$

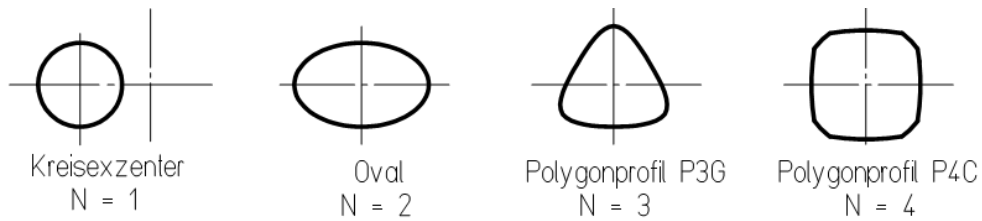


Bild 3-44: Polygonprofile bei unterschiedlichen Eckenzahlen N

Das Polygonprofil ist eine Parallelkurve zu einer im Unendlichen erzeugten Trochoide [FRA98, S. 111]. Dabei ist α ein Winkelparameter mit Werten von 0 bis $2 * \pi$, e ist die Exzentrizität und R_m ist der mittlere Radius des Polygonprofils. Abhängig von der ganzzahligen „Eckenzahl“ N entstehen unterschiedliche Profile, die in Bild 3-44 dargestellt sind. Bei $N = 1$ ergibt sich ein Kreisexzenter [FOR]. Jenes Profil, das bei $N = 2$ entsteht, ist eine Parallelkurve zu einer Ellipse [FRA98, S. 106] und somit oval, jedoch mathematisch keine exakte Ellipse [ZUD06, S. 19]. Das Profil mit $N = 3$ wird als „Polygonprofil P3G“ bezeichnet, ist nach DIN 32711 genormt und eignet sich als Welle-Nabe-Verbindung aufgrund seiner geringen Kerbwirkungszahl zur Übertragung großer Drehmomente. Das P3G-Profil („G“ in der Bezeichnung steht für Gleichdick) hat darüber hinaus die Eigenschaft, dass es selbstzentrierend ist. Bei $N = 4$ ergibt sich das nach DIN 32712 genormte „Polygonprofil P4C“. Dieses Profil („C“ in der Bezeichnung steht für cyklo, weil es rund überarbeitet wird) hat als Welle-Nabe-Verbindung den Vorteil, dass es bei einer Drehmomentübertragung unter Last axial verschiebbar ist.

3.6.10 Berechnung der Werkzeuggeometrie beim Wälzstoßen von Polygonnaben

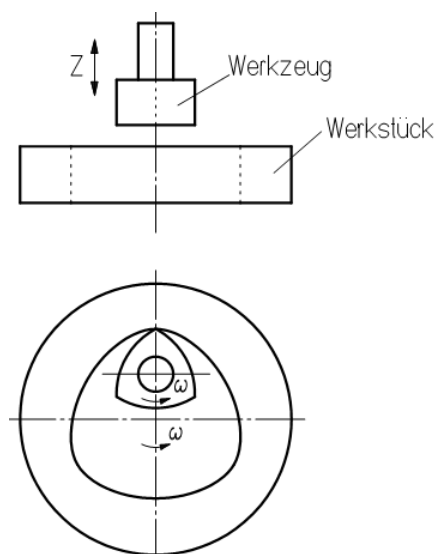


Bild 3-45: Wälzstoßen einer Polygonnabe

Beim Wälzstoßen einer Innengeometrie drehen sich das Stoßwerkzeug und das Werkstück mit gleicher Winkelgeschwindigkeit und gleichem Drehsinn (Bild 3-45). Beim Wälzstoßen einer Polygonnabe ist das Querschnittsprofil des Werkzeugs ein äquidistantes Polygonprofil mit gleicher Exzentrizität e , jedoch kleinerem mittleren Radius R_m [MUS55 zitiert in MAY93, S. 36]. Wird das Stoßwerkzeug durch eine Schleifscheibe mit gleichem Querschnittsprofil ersetzt, sind nach diesem Prinzip auch Innengeometrien schleifbar, wie später in Abschnitt 5.6 gezeigt wird.

3.6.11 Geometrieübertragung beim drehzahlsynchronen Abrichten und Schleifen

Die Beziehungen zwischen Werkstück und Werkzeug beim drehzahlsynchronen Unrundschleifen sind in Bild 3-46 dargestellt. Diese Beziehungen gelten auch für das Abrichten. Hierbei ist der unrunde Abrichter das Werkzeug und die Schleifscheibe das zu bearbeitende unrunde Werkstück.

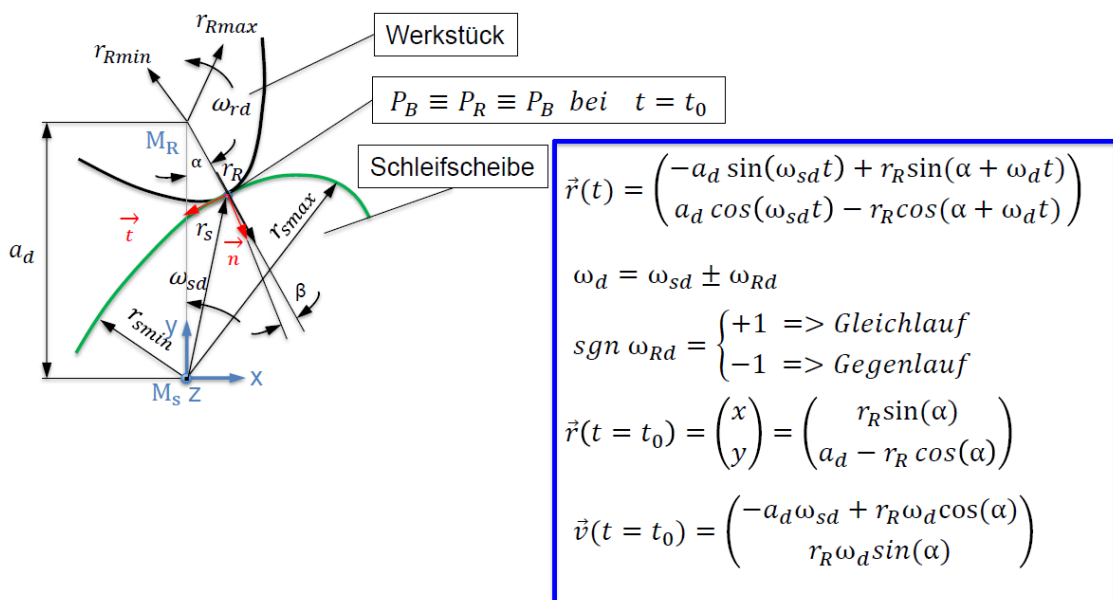


Bild 3-46: Beziehungen zwischen Werkstück und Schleifscheibe beim drehzahlsynchronen Unrundschleifen [HAA14, S. 13 nach EIC97]

Eichhorn [EIC97] hat die geometrischen Zusammenhänge bei der Übertragung der unrunder Geometrie von einem unrunder Abrichtwerkzeug auf eine unrunde Schleifscheibe untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass beim Gegenlaufabrichten mit gleicher Winkelgeschwindigkeit von Werkzeug- und Schleifscheibendrehung ein Sonderfall eintritt. Ein Punkt P des Abrichtwerkzeugs erzeugt am Schleifscheibenumriss einen Bogen, dessen Krümmungsradius gleich dem Achsabstand ist (Bild 3-47). Des Weiteren wurde festgestellt, dass bei

diesem Drehzahlverhältnis die Relativgeschwindigkeit zwischen den Wirkpartnern am Berührungspunkt unabhängig von der unrunder Querschnittsgeometrie ist. Bei der weiteren experimentellen Verifikation wurde deshalb die Konturierung mit diesem Drehzahlverhältnis untersucht [EIC97, S. 56 / 143].

Beim Gegenlaufschleifen mit gleicher Winkelgeschwindigkeit von Werkstück- und Schleifscheibendrehung ist die Relativgeschwindigkeit v_{rel} in m/s durch die Beziehung (3.26) definiert:

$$v_{rel} = \frac{2 * A * \pi * n}{1000 * 60} \quad (3.26)$$

Hierbei ist A der Achsabstand zwischen Schleifscheibe und Werkstück in mm und $n = n_s = n_w$ ist die synchrone Werkstück- bzw. Schleifscheibendrehzahl in min^{-1} .

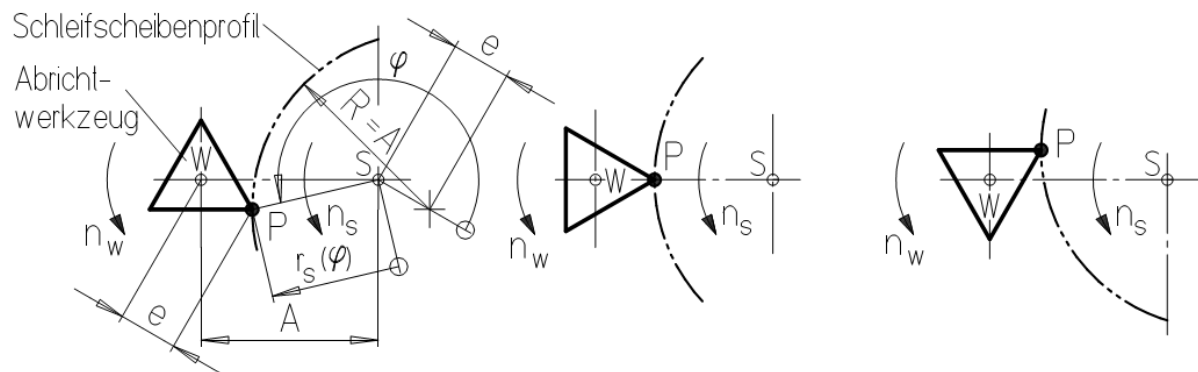


Bild 3-47: Gegenlaufabrachten mit gleicher Winkelgeschwindigkeit von Werkzeug- und Schleifscheibendrehung ($i_v = n_s : n_w = 1 : 1$)

Entsprechend Bild 3-47 ist der gezeigte Bereich des Schleifscheibenprofils durch die Beziehung eines exzentrischen Kreises definiert:

$$A^2 = r_s(\varphi)^2 + e^2 - 2 * r_s(\varphi) * e * \cos(\varphi) \quad (3.27)$$

Dabei sind:

- $\varphi, r_s(\varphi)$ Polarkoordinaten des Schleifscheibenprofils (Kreisexzenter)
- e Exzentrizität
- R Kreisradius (Abstand zwischen Werkstück und Schleifscheibenachse)

3.6.12 Definition einer dreidimensionalen Kolbengeometrie

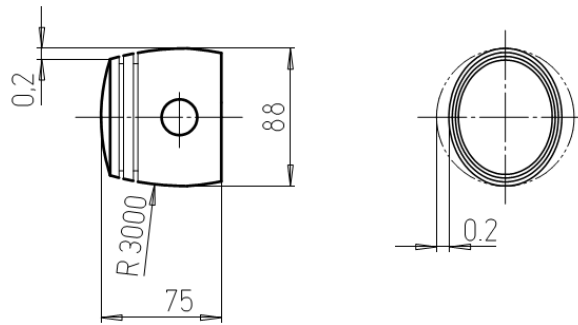


Bild 3-48: Schematisches Beispiel für eine Kolbengeometrie

Damit der Kolben einer Brennkraftmaschine infolge der unterschiedlichen thermischen Einwirkung und der auf ihn wirkenden mechanischen Belastung unter Betriebsbedingungen weitgehend rund und zylindrisch ist, muss er bei im Produktionsbereich herrschender Umgebungstemperatur unrund und nicht zylindrisch gefertigt werden. Bild 3-48 zeigt ein schematisches Beispiel für die im Querschnitt ovale und axial ballige Geometrie eines Automobilkolbens. In Bild 3-49 ist die Kolbengeometrie durch neun Parameter ($z_1, z_2, z_3, x_1, x_2, x_3, o_1, o_2, o_3$) definiert¹. Die axiale Balligkeit des Kolbens ist nicht konstant und bei den Winkellagen 0° und 90° durch die Kreisbögen R_1 und R_2 definiert.

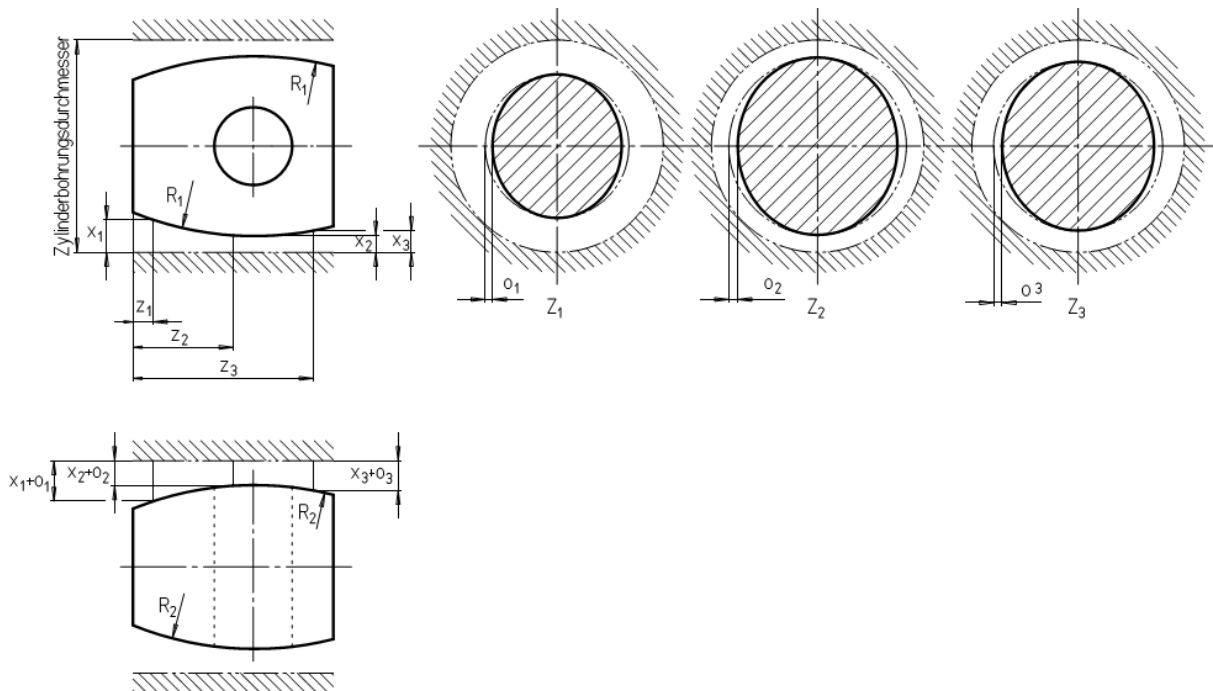


Bild 3-49: Definition der dreidimensionalen Kolbengeometrie in einer Konstruktionszeichnung (oben: Kolben in Winkellage 0° ; unten: 90°)

¹ Vgl. Konstruktionszeichnung des Automobilkolbens mit der Zeichnungsnummer: 7.08850G101

Die axial ballige Form ist durch die in Abschnitt 3.6.1 gezeigten Beziehungen definiert (Kreis durch drei gegebene Punkte). Die radiale Abweichung $u(t, z)$ des ovalen Werkstückquerschnitts von einem kreisrunden Querschnitt ist durch die Sinusfunktion¹ (3.28) definiert:

$$u(t, z) = o(z) * \frac{1}{2} * \sin(2 * t) \quad (3.28)$$

Hierbei ist $o(z)$ die von der Z-Position abhängige radiale Ovalität und der Parameter t nimmt Werte von 0 bis $2 * \pi$ an.

¹ Vgl. Konstruktionszeichnung des Automobilkolbens mit der Zeichnungsnummer: P5834F18

4 Rechenmodelle für das drehzahlsynchrone Unrundschleifen

4.1 Berechnung der Schleifscheibengeometrie

Üblicherweise wird ein Unrundprofil, z.B. ein Nockenprofil, als Punkttabelle in Polarkoordinaten angegeben. Jedoch gibt es eine Vielzahl an Geometrien, die durch wenige Parameter exakt definiert sind, wie etwa eine Ellipse durch die Angabe der beiden Halbachsen. Diese, durch eine mathematische Funktion gegebenen Umrisse, sind ebenfalls in eine Punkttabelle umrechenbar. Im Gegensatz zum Pendelhubschleifen, wo abhängig von der Werkstückgeometrie die Bahnbewegung der Schleifscheibe ermittelt wird, muss beim drehzahlsynchronen Unrundschleifen der entsprechende Schleifscheibenquerschnitt berechnet werden. Eine typische Ausgangssituation und das benötigte Ergebnis sind in Bild 4-1 dargestellt. Die Werkstückgeometrie ist als Punkttabelle gegeben und es wird jene Schleifscheibengeometrie ermittelt, die bei drehzahlsynchroner Bearbeitung die gewünschte Nockenform erzeugt.

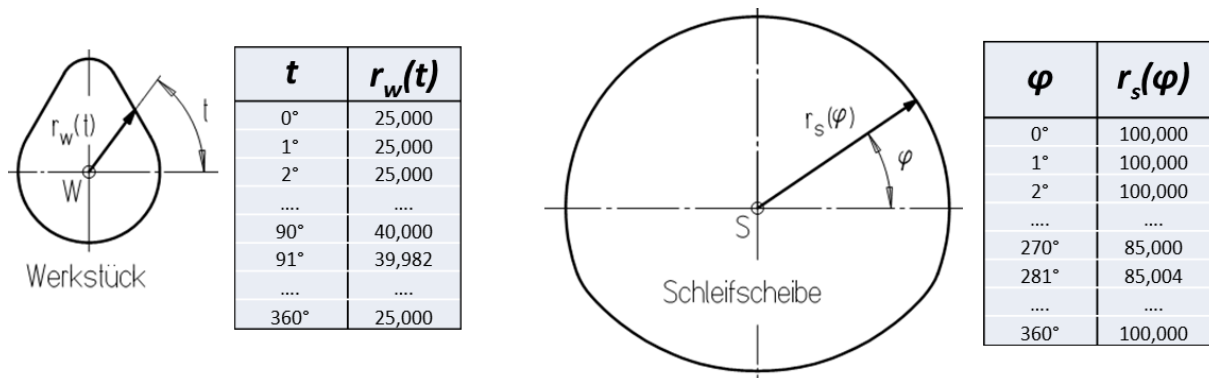


Bild 4-1: Gegebene Werkstückgeometrie und gesuchtes Schleifscheibenprofil beim drehzahlsynchronen Unrundschleifen einer beispielhaften Nockenform bei gleicher Drehgeschwindigkeit von Werkstück und Schleifscheibe

In Bild 4-2 ist der geometrische Zusammenhang am Berührungspunkt P zwischen dem Werkstück und der Schleifscheibe skizziert. Wenn sich das Werkstück um den Winkel α dreht, muss sich die Schleifscheibe um den Winkel $i_v \cdot \alpha$ drehen. Das Drehzahlverhältnis i_v ist das Verhältnis zwischen synchroner Schleifscheiben- und Werkstückdrehzahl:

$$i_v = n_s : n_w \quad (4.1)$$

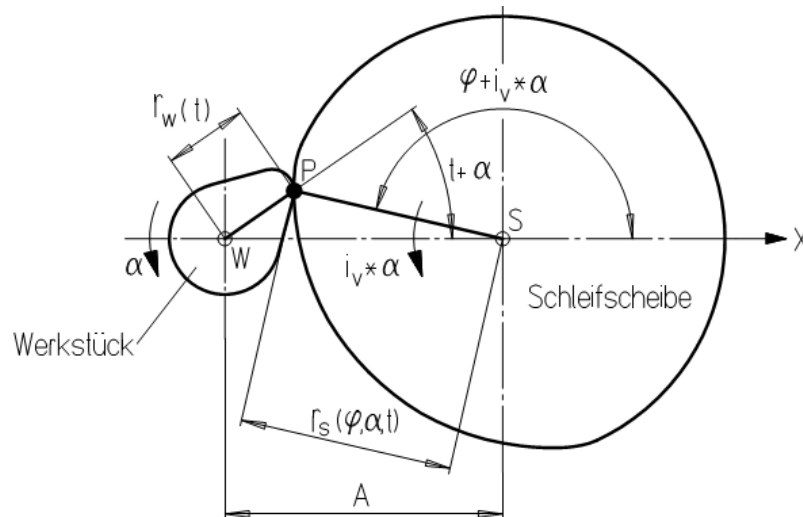


Bild 4-2: Geometrischer Zusammenhang am Berührungspunkt zwischen dem Werkstück und der Schleifscheibe

Die mathematischen Zusammenhänge zwischen Werkstück- und Schleifscheibengeometrie (vgl. Abschnitt 3.6.11) werden durch die Beziehungen (4.2), (4.3) und (4.4) beschrieben. Zur Erhöhung der Stützpunkteanzahl oder zur Entwicklung einer differenzierbaren Funktion wird eine durch Punkte definierte Erhebungskurve $r_w(t)$ durch eine Splinefunktion (s. Abschnitt 3.6.5) angenähert.

$$r_s(\varphi, \alpha, t)^2 = r_w(t)^2 + A^2 - 2 * r_w(t) * A * \cos(\alpha + t) \quad (4.2)$$

$$r_w(t)^2 = r_s(\varphi, \alpha, t)^2 + A^2 + 2 * r_s(\varphi, \alpha, t) * A * \cos(\varphi + i_v * \alpha) \quad (4.3)$$

$$\frac{r_s(\varphi, \alpha, t)}{\sin(\alpha + t)} = \frac{r_w(t)}{\sin(\varphi + i_v * \alpha)} \quad (4.4)$$

Die vom Parameter α unabhängigen Beziehungen (4.5) und (4.6) folgen aus den Beziehungen (4.2) und (4.3) und der Bedingung, dass ein Schleifscheibenerhebungswert $r_s(\varphi_i)$ am Werkstück keine Geometrieverletzung verursachen darf.

$$\frac{\partial r_s(\varphi, t)}{\partial t} = 0 \quad (4.5)$$

$$0 = r_s(\varphi, t)^2 + A^2 + 2 * r_s(\varphi, t) * A * \cos(\varphi + i_v * g(\varphi, t)) - r_w(t)^2 \quad (4.6)$$

Mit:

$$g(\varphi, t) = \cos^{-1} \left(\frac{r_w(t)^2 + A^2 - r_s(\varphi, t)^2}{2 * r_w(t) * A} \right) - t \quad (4.7)$$

Für die Variable r_s ist eine explizite, vom Parameter α unabhängige Lösung in der Form: $r_s(\varphi, t) = f(\varphi, t)$ nicht möglich. Daher ist die Ermittlung der benötigten Schleifscheibengeometrie beim drehzahlsynchronen Unrundschleifen i. Allg. nur mit einem iterativen Näherungsverfahren möglich.

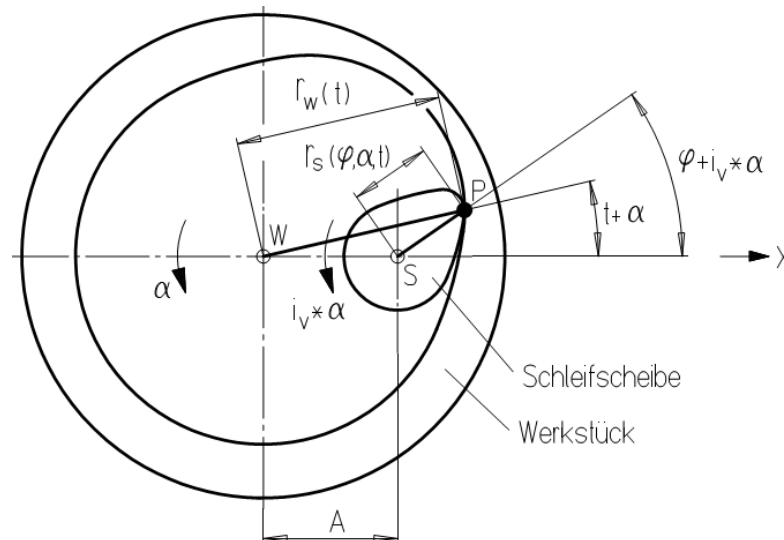


Bild 4-3: Geometrischer Zusammenhang am Berührungspunkt zwischen dem Werkstück und der Schleifscheibe beim Innenschleifen

Ein Vergleich von Bild 4-2 und Bild 4-3 zeigt, dass die Beziehungen (4.2), (4.3) und (4.4) auch für das Innenschleifen gelten. Bei gleichem Drehsinn von Werkstück und Schleifscheibe sind jedoch die Umfangsgeschwindigkeiten beim Innenschleifen gleich gerichtet (Gleichlaufschleifen) und beim Außenschleifen entgegengesetzt gerichtet (Gegenlaufschleifen).

4.1.1 Geometrische Näherungslösung

In Bild 4-4 ist dargestellt, wie die Schleifscheibengeometrie näherungsweise durch Iteration berechnet werden kann. Zunächst wird die Schleifscheibe durch die Strahlen s_i initiiert, welche ausgehend von der Schleifscheibendrehachse radial nach außen verlaufen und mit der Winkelschrittweite $\Delta\varphi$ in ihrer Drehlage angeordnet sind. Im Gegensatz dazu wird der Werkstückumriss durch einen Polygonzug mit den Geraden w_i angenähert. Dieser Polygonzug ist in seiner Feinheit von der gewählten Winkelschrittweite Δt abhängig. Wenn der Polygonzug um die Werkstückachse W und dazu drehzahlsynchron die Strahlen um die Schleifscheibenachse S gedreht werden, ist die gesuchte Schleifscheibengeometrie durch

die Schnittpunkte der Schleifscheibenstrahlen s_i mit den Geraden des Werkstückumrisses w_i berechenbar.

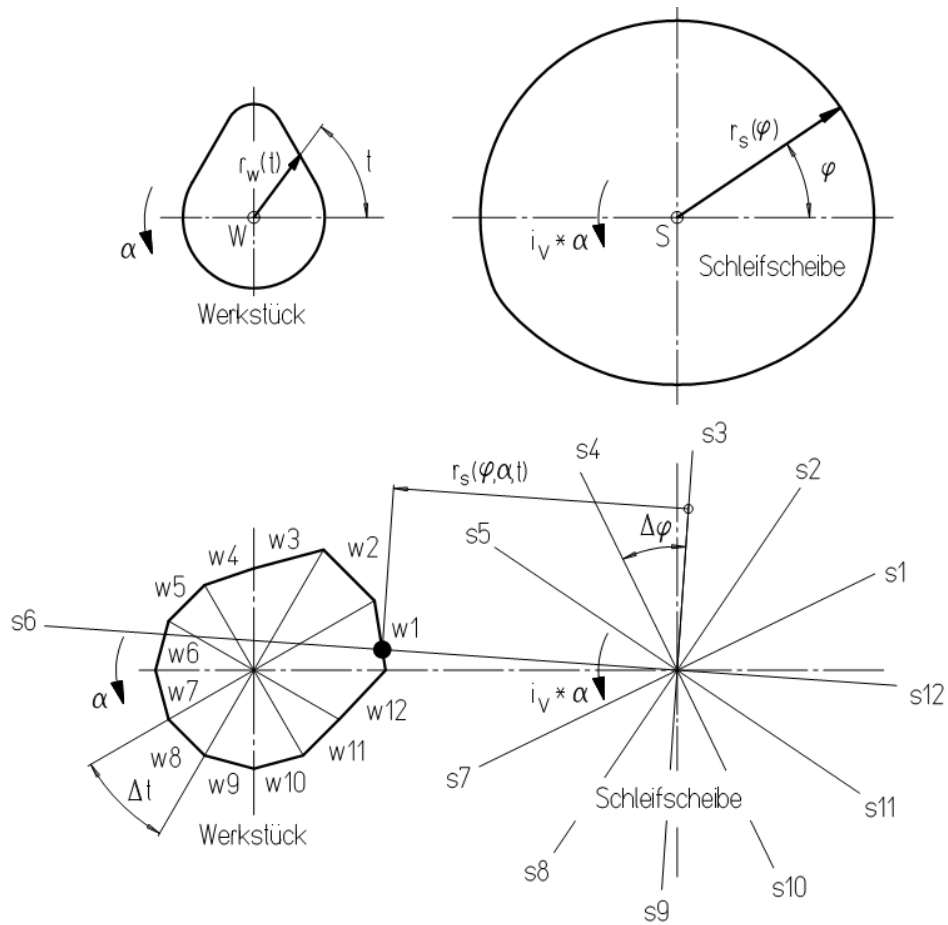


Bild 4-4: Geometrische Näherungslösung zur Berechnung der Schleifscheibengeometrie

Wenn jeder Schleifscheibenstrahl mit jeder Werkstückumrissgeraden geschnitten wird, und das bei jedem Drehwinkel α_i , ergibt sich für den zu berechnenden Schleifscheibenquerschnitt als Lösung eine dreidimensionale Matrix $r_s(\varphi, t, \alpha)$.

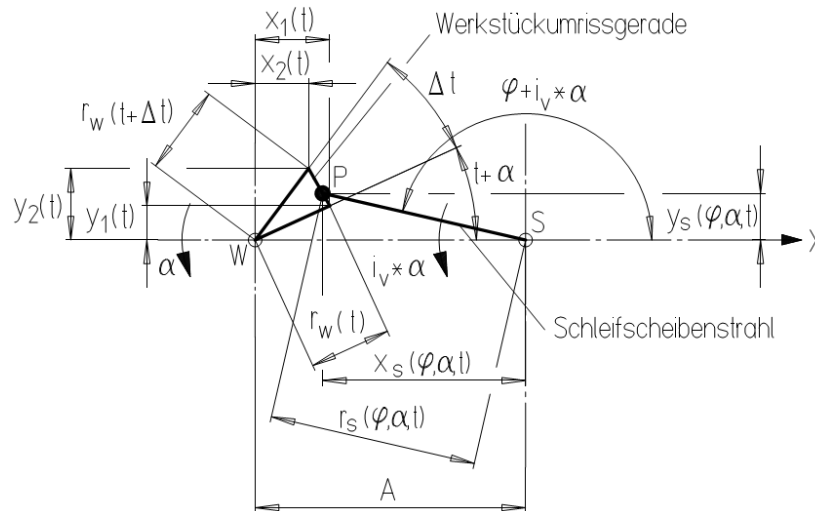


Bild 4-5: Schnittpunkt zwischen Werkstückumrissgerade und Schleifscheibenstrahl

Analog zu Bild 4-5 ist der Schnittpunkt P zwischen der Werkstückumrissgeraden und dem Schleifscheibenstrahl durch Beziehung (4.8) definiert:

$$r_s(\varphi, \alpha, t) = \sqrt{x_s(\varphi, \alpha, t)^2 + y_s(\varphi, \alpha, t)^2} \quad (4.8)$$

Mit:

$$x_s(\varphi, \alpha, t) = -\frac{(x_1(t) - A) * y_2(t) - (x_2(t) - A) * y_1(t)}{y_1(t) - y_2(t) + (x_2(t) - x_1(t)) * \tan(\varphi + i_v * \alpha)} \quad (4.9)$$

$$y_s(\varphi, \alpha, t) = \tan(\varphi + i_v * \alpha) * x_s(\varphi, \alpha, t) \quad (4.10)$$

$$x_1(t) = r_w(t) * \cos(t + \alpha) \quad (4.11)$$

$$y_1(t) = r_w(t) * \sin(t + \alpha) \quad (4.12)$$

$$x_2(t) = r_w(t + \Delta t) * \cos(t + \Delta t + \alpha) \quad (4.13)$$

$$y_2(t) = r_w(t + \Delta t) * \sin(t + \Delta t + \alpha) \quad (4.14)$$

Die Annäherung des Werkstückumrisses durch Geraden bewirkt bei konvexen Werkstückbereichen eine Verkleinerung und bei konkaven Werkstückbereichen eine Vergrößerung des für die Berechnung verwendeten Werkstückprofils. Damit der Schleifscheibenumriss $r_s(\varphi)$ an keiner Stelle des Werkstückumrisses eine Geometrieverletzung verursacht, ist der Erhebungswert $r_s(\varphi_i)$ beim Schleifscheibenwinkel φ_i durch die nachfolgende Beziehung definiert:

$$r_s(\varphi_i) = \min(r_s(\varphi_i, t, \alpha)) \quad (4.15)$$

Aus Bedingung (4.15) folgt, dass bei einem Werkstückprofil, welches nur mit einer Geometrieabweichung herstellbar ist (s. Abschnitt 5.4), das Schleifscheibenprofil so berechnet wird, dass die gefertigte Werkstückgeometrie größer gleich der Sollgeometrie ist.

Die **Genauigkeit** der Berechnung hängt von 3 Parametern ab:

- Winkelschrittweite $\Delta\varphi$, mit der die Schleifscheibenstrahlen angeordnet sind
- Winkelschrittweite Δt , mit welcher der Werkstückumriss angenähert wird
- Winkelschrittweite $\Delta\alpha$, mit der das Werkstück und die Schleifscheibe drehzahlsynchron verdreht werden

Trotz seiner Robustheit¹ eignet sich ein nach diesem Modell programmierter Rechenalgorithmus selbst nach einer Optimierung nur für Berechnungen mit geringen Anforderungen an die Rechengenauigkeit. Eine Verkleinerung der Schrittweite von einem der drei veränderlichen Parameter φ , t und α zur Verbesserung der Rechengenauigkeit, geht zur dritten Potenz in die zur Berechnung benötigten Zeit ein. Bspw. erfordert die Visualisierung des Schleifscheibenprofils zur Darstellung auf dem Bildschirm die Rechenzeit von unter einer Sekunde. Zur Berechnung des Schleifscheibenprofils für die reale Bearbeitung innerhalb der gewünschten zulässigen Abweichungen unter 1 μm nehmen jedoch die Rechenzeiten mehrere Stunden in Anspruch.

4.1.2 Näherungslösung durch Nullstellensuche

Da sich Beziehung (4.6) nicht analytisch nach dem Parameter $r_s(\varphi, t)$ lösen lässt, erfolgt die Berechnung des Schleifscheibenquerschnitts durch Nullstellensuche. Der gesuchte Parameter $r_s(\varphi_i, t_i)$ kann Werte zwischen $r_{s_{min}}(t_i) = A - r_w(t_i)$ und $r_{s_{max}}(t_i) = A + r_w(t_i)$ annehmen. Für die Nullstellensuche wird das Tangentennäherungsverfahren (s. Abschnitt 3.6.4) angewendet. Der Erhebungswert $r_s(\varphi_i)$ darf an keiner Stelle des Werkstücks eine Geometrieverletzung verursachen. Von den möglichen Lösungen ist daher jene mit dem kleinsten Wert zu verwenden. Für das Tangentennäherungsverfahren wird der in Beziehung (4.16) definierte Startwert $r_{s_0}(\varphi_i, t_i)$ verwendet:

$$r_{s_0}(\varphi_i, t_i) = r_{s_{min}}(t_i) = A - r_w(t_i) \quad (4.16)$$

Der Erhebungswert $r_s(\varphi_i)$ bei Schleifscheibenwinkel φ_i folgt aus Beziehung (4.17):

¹ Unter Robustheit wird in diesem Zusammenhang die Fähigkeit verstanden, dass auch bei ungünstigen Zahlenwerten noch zuverlässige Ergebnisse geliefert werden.

$$r_s(\varphi_i) = \min(r_s(\varphi_i, t)) \quad (4.17)$$

4.1.3 Analytische Lösung für Gegenlaufschleifen mit Drehzahlverhältnis 1:1

Beim Gegenlaufschleifen mit Drehzahlverhältnis $i_v = 1:1$ folgen aus den Beziehungen (4.2), (4.3), (4.4) und (4.5) die, nur vom Parameter t abhängigen, Beziehungen (4.18), (4.19) und (4.20).

$$\alpha(t) = \tan^{-1} \left(\left(\frac{dr_w(t)}{dt} \right) * \frac{1}{r_w(t)} \right) - t \quad (4.18)$$

$$r_s(t) = r_w(t)^2 + A^2 - 2 * r_w(t) * A * \cos(\alpha(t) + t) \quad (4.19)$$

$$\varphi(t) = t + \sin^{-1} \left(\frac{A * \sin(\alpha(t) + t)}{r_s(t)} \right) \quad (4.20)$$

Der geometrische Zusammenhang zwischen Werkstück- und Schleifscheibenprofil ist in Bild 4-6 dargestellt. Im Berührungspunkt P steht die gemeinsame Tangente t_g normal auf die Verbindungsgerade zwischen den Drehmittelpunkten W und S. Dies zeigt ein Vergleich von Beziehung (4.18) mit der Tangentendefinition in Abschnitt 3.6.3.

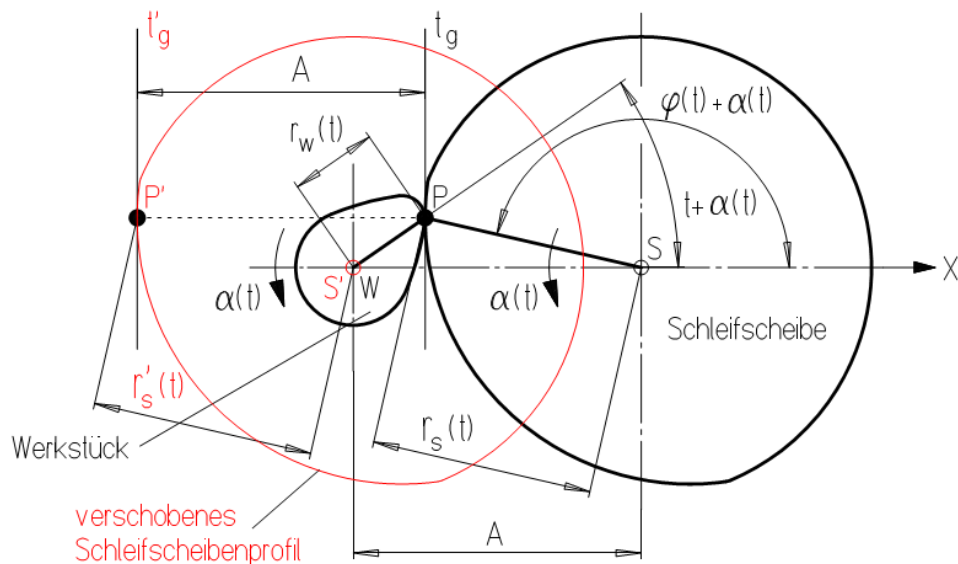


Bild 4-6: Geometrischer Zusammenhang zwischen Werkstück- und Schleifscheibenprofil beim Gegenlaufschleifen mit Drehzahlverhältnis 1:1

Das Schleifscheibenprofil ist somit ein äquidistant verkleinertes Werkstückprofil. Der äquidistante Profildistanz ist der Abstand A zwischen Werkstück- und Schleifscheibenachse.

Da die einzelnen Erhebungswerte des Werkstückprofils stets kleiner als der Wert A des Achsabstands sind erfolgt eine Profillumkehr. Die Hochpunkte des Werkstückprofils werden am äquidistanten Schleifscheibenprofil als Tiefpunkte abgebildet. Die Tiefpunkte des Werkstückprofils werden am äquidistanten Schleifscheibenprofil als Hochpunkte abgebildet.

4.1.4 Näherungslösung für drehsymmetrische Werkstückquerschnitte

Beim Schleifen von drehsymmetrischen Querschnitten kann die Werkstückgeometrie genutzt werden, um die zur Schleifscheibendrehung synchrone Werkstückdrehzahl zu verkleinern. Wenn das Verhältnis zwischen Schleifscheiben- und Werkstückdrehung möglichst groß sein soll folgt daraus, dass der für die Bearbeitung des Werkstücks benötigte Schleifscheibenquerschnitt exzentrisch ist. Bei drehsymmetrischen Werkstückquerschnitten, die im Verhältnis zur Querschnittsfläche nur eine geringe Abweichung von der Kreisform aufweisen (z.B. Automobilkolben), kann der Schleifscheibenquerschnitt oftmals mit ausreichender Genauigkeit durch einen Kreisexzenter angenähert werden.

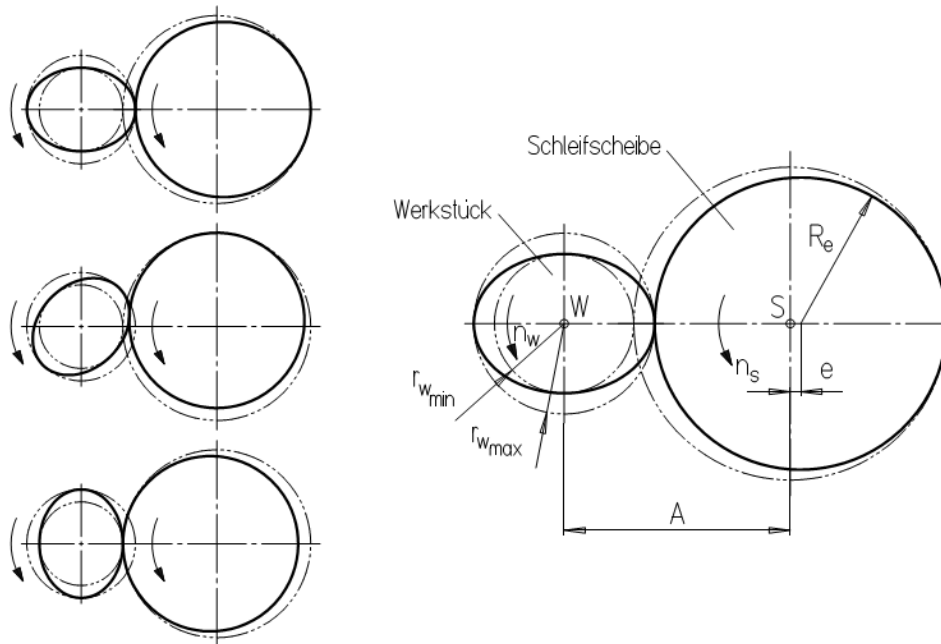


Bild 4-7: Unrundschleifen eines ovalen Querschnitts bei Drehzahlverhältnis $i_v = n_s : n_w = 2 : 1$

In Bild 4-7 ist die Bearbeitung eines ovalen Werkstücks bei einem Verhältnis zwischen Schleifscheiben- und Werkstückdrehung von 2:1 dargestellt. Analog dazu ergeben sich die Beziehungen zur Berechnung von Kreisradius R_e und Exzentrizität e der exzentrisch runden Schleifscheibe:

$$R_e = A - \frac{r_{wmax} + r_{wmin}}{2} \quad (4.21)$$

$$e = \frac{r_{wmax} - r_{wmin}}{2} \quad (4.22)$$

Die Polarkoordinaten $\{\varphi, r_s(\varphi)\}$ eines exzentrisch runden Schleifscheibenquerschnitts sind durch die Beziehung (4.23) definiert (vgl. Abschnitt 3.6.2):

$$r_s(\varphi) = e * \cos(\varphi) + \sqrt{e^2 * \cos(\varphi)^2 - e^2 + R_e^2} \quad (4.23)$$

4.2 Verfahrensbedingte Geometrieabweichung am gefertigten Werkstück

Mit den in Abschnitt 4.1.1 und 4.1.2 gezeigten Rechenmodellen kann vom berechneten Schleifscheibenquerschnitt auf die entstehende Werkstückgeometrie rückgerechnet werden. Die Differenz zwischen der Sollgeometrie und der rückgerechneten Geometrie ist die am Werkstück entstehende verfahrensbedingte Geometrieabweichung. Diese Abweichung entsteht beim Schleifen von konkaven Werkstückbereichen (s. Abschnitt 5.3) oder beim Gegenlaufschleifen (s. Abschnitt 5.4).

4.3 Relativgeschwindigkeit zwischen Schleifscheibe und Werkstück

In Bild 4-8 ist das Gegenlaufschleifen einer Nockenscheibe dargestellt. Die Relativgeschwindigkeit v_{rel} (vgl. Abschnitt 3.6.11) zwischen dem Werkstück und der Schleifscheibe am Berührungspunkt ist dabei der Betrag des Verbindungsvektors zwischen dem Vektor der Werkstückumfangsgeschwindigkeit v_w und dem Vektor der Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit v_s .

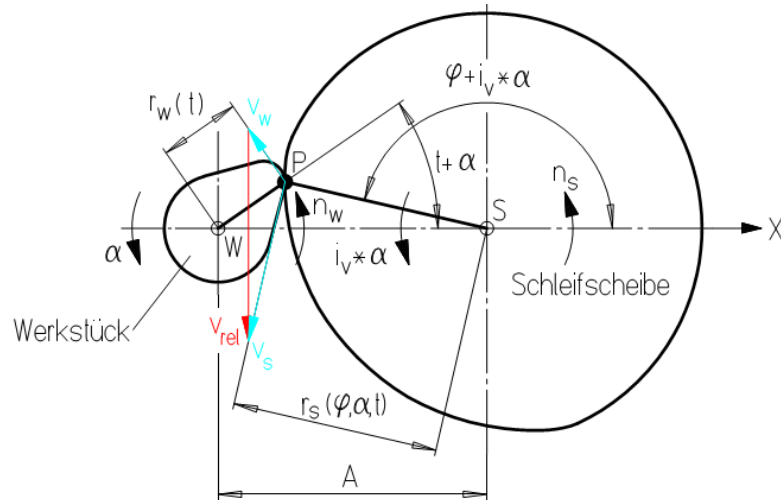


Bild 4-8: Relativgeschwindigkeit zwischen Werkstück und Schleifscheibe im Berührungspunkt P

Analog zu Bild 4-8 ergibt sich die Beziehung für die Relativgeschwindigkeit v_{rel} in m/s im Berührungspunkt:

$$v_{rel}(t) = \sqrt{v_x(t)^2 + v_y(t)^2} = \sqrt{(v_{sx}(t) - v_{wx}(t))^2 + (v_{sy}(t) - v_{wy}(t))^2} \quad (4.24)$$

Mit:

$$v_{wx}(t) = \frac{2 * r_w(t) * \pi * n_w * \sin(t + \alpha(\varphi(t), t))}{1000 * 60} \quad (4.25)$$

$$v_{wy}(t) = -\frac{2 * r_w(t) * \pi * n_w * \cos(t + \alpha(\varphi(t), t))}{1000 * 60} \quad (4.26)$$

$$v_{sx}(t) = \frac{2 * r_s(\varphi(t), \alpha(\varphi(t), t), t) * \pi * n_s * \sin(\varphi(t) + i_v * \alpha(\varphi(t), t))}{1000 * 60} \quad (4.27)$$

$$v_{sy}(t) = -\frac{2 * r_s(\varphi(t), \alpha(\varphi(t), t), t) * \pi * n_s * \cos(\varphi(t) + i_v * \alpha(\varphi(t), t))}{1000 * 60} \quad (4.28)$$

Die prozentuell auf die maximale Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit $\max(v_s(\varphi))$ bezogene Relativgeschwindigkeit v'_{rel} [%] ist durch die Beziehung (4.29) definiert:

$$v'_{rel}(t) = \frac{v_{rel}(t) * 1000 * 60}{2 * \max(r_s(\varphi)) * \pi * n_s} * 100 \quad (4.29)$$

In den obigen Beziehungen werden die Radien in mm und die Drehzahlen in min^{-1} eingesetzt.

4.4 Verteilung der Zerspanung am Schleifscheibenumfang

Beim herkömmlichen Pendelhubschleifen hat das lose Verhältnis zwischen Werkstück- und Schleifscheibendrehung technologisch vorteilhaft zur Folge, dass die einzelnen Schleifkörner des Schleifscheibenumfangs nicht immer an den selben Stellen des Werkstückumfangs zum Eingriff kommen. Dadurch entsteht beim konventionellen Unrundschleifen eine gleichmäßige Abnutzung des Werkzeugs am Umfang. Im Gegensatz dazu sind beim drehzahlsynchronen Unrundschleifen die einzelnen Bereiche des Schleifscheibenumfangs stets bestimmten Bereichen des Werkstückumfangs zugeordnet.

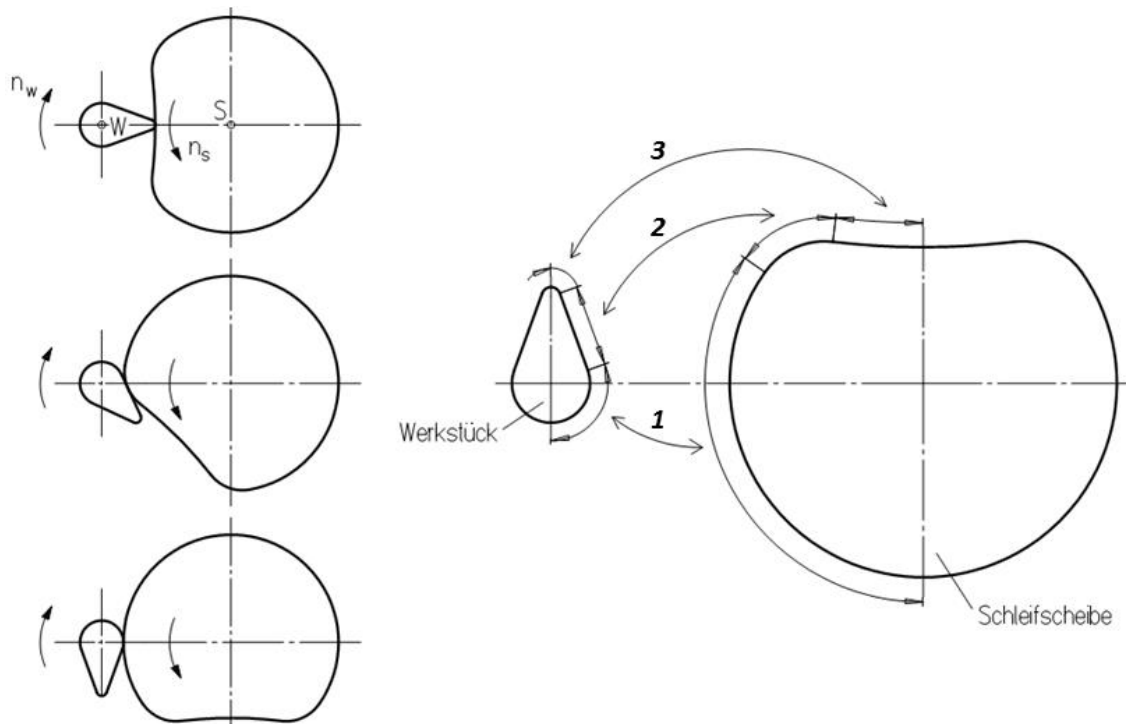


Bild 4-9: Zuordnung von Werkstück- und Schleifscheibenumfang beim Nockenschleifen im Gleichlauf mit Drehzahlverhältnis $i_v = n_s : n_w = 1 : 1$; die korrespondierenden Geometriebereiche des Halbprofils sind: **1** Grundkreis, **2** Flanke, **3** „Spitze“

In Bild 4-9 ist diese Zuordnung beispielhaft für das Gleichlaufschleifen einer Nockengeometrie dargestellt. Von den drei abgegrenzten Umfangszonen des beispielhaften Werkstückprofils hat die Nockenflanke den größten Längenteil. Jedoch wird dieser Bereich mit dem korrespondierenden kleinsten Umfangsbereich der unrunder Schleifscheibe bearbeitet. Bei dem der Nockenflanke zugeordneten Umfangsbereich der Schleifscheibe entsteht somit der

höchste Verschleiß und in weiterer Folge eine ungleichmäßige Abnützung der Schleifscheibe.

Für die Berechnung des entlang des Schleifscheibenumfangs veränderlichen Materialabtrags wird das reziproke Verhältnis zwischen der Schleifscheibenumfangslänge $\Delta u_s(\varphi_i)$ und den ihr zugeordneten Werkstückumfangslängen $\Delta u_w(t_i)$ herangezogen. Die Zuordnung erfolgt dann, wenn der Erhebungswert des Werkstücks $r_w(t_i)$ und der Erhebungswert der Schleifscheibe $r_s(\varphi_i t_i)$ sich bei der Drehbewegung berühren bzw. sich bis zu einem bestimmten Abstand ε (bspw. $\varepsilon = 1 \mu\text{m}$) annähern (Bild 4-10).

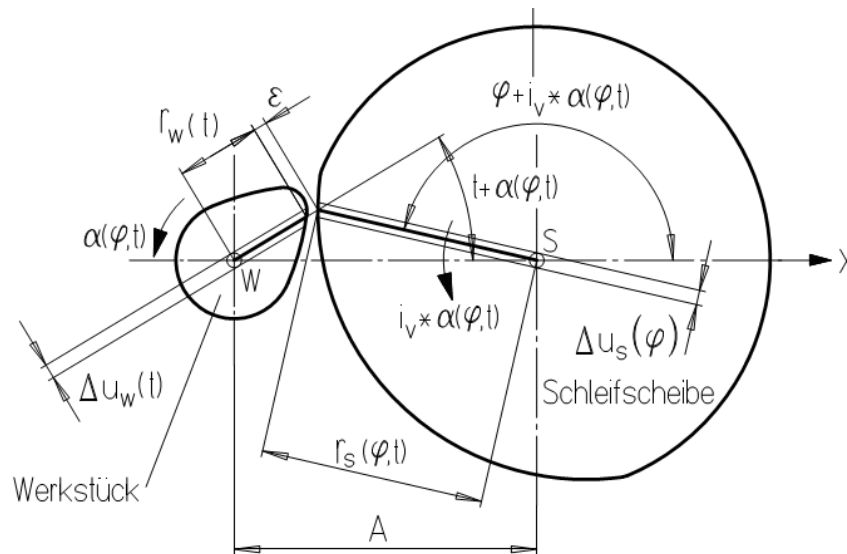


Bild 4-10: Zuordnung von Werkstück- und Schleifscheibenumfangsbereichen

Analog zu Bild 4-10 und Beziehung (4.6) in Abschnitt 4.1 gilt die Beziehung:

$$0 = r_s(\varphi, t)^2 + A^2 + 2 * r_s(\varphi, t) * A * \cos(\varphi + i_v * \alpha(\varphi, t)) - (r_w(t) + \varepsilon)^2 \quad (4.30)$$

Mit:

$$\alpha(\varphi, t) = \cos^{-1} \left(\frac{(r_w(t) + \varepsilon)^2 + A^2 - r_s(\varphi, t)^2}{2 * (r_w(t) + \varepsilon) * A} \right) - t \quad (4.31)$$

Für die Beurteilung der Ergebnisse ist es zweckmäßig, die berechneten Werte auf den Mittelwert (Verhältnis von Gesamtumfangslänge des Werkstücks U_w zu Gesamtumfangslänge der Schleifscheibe U_s) zu beziehen. Beziehung (4.32) zeigt die Definition der spezifischen Zerspannung $q'(\varphi)$:

$$q'(\varphi) = \frac{\sum \Delta u_w(t_i)}{\Delta u_s(\varphi)} * \frac{U_s}{U_w} \quad (4.32)$$

Eine spezifische Zerspanung von bspw. $q'(\varphi_i) = 2$ bedeutet, dass dieser Umfangsbereich der Schleifscheibe (im Vergleich zum Durchschnitt) die doppelte Zerspanungsleistung aufbringt und sich dementsprechend rascher abnützt.

4.5 Spitzenlos-Unrundschleifen

Beim Spitzenlos-Unrundschleifen kann das Werkstück entweder auf frei drehenden kreisrunden oder auf mit zum Werkstück synchron drehenden unrunder Rollen aufliegen. Wie beim herkömmlichen Spitzenlosrundschleifen verändert sich auch hier bei der Bearbeitung die Lage der Werkstückachse. Beim spitzenlosen Unrundschleifen ist jedoch eine absolut schlupffreie, zur Schleifscheibendrehung völlig synchrone Werkstückdrehung erforderlich. Daher muss das Werkstück mit einem direkten Drehantrieb versehen werden. Der Antrieb über die Auflagerollen (Frikionsantrieb) ist nicht ausreichend. Die Zustellbewegung kann unabhängig von der Drehbewegung der Schleifscheibe erfolgen. Je nach verwendeter Rollenvariante wird das Werkstück entweder zu Beginn oder am Ende der Bearbeitung radial beschleunigt. Diese radiale Beschleunigung ist von der Unrundheit des Werkstücks abhängig. Die Beschleunigungskräfte müssen ggf. durch besondere Einrichtungen, welche das Werkstück gegen die Auflagerollen drücken, aufgenommen werden.

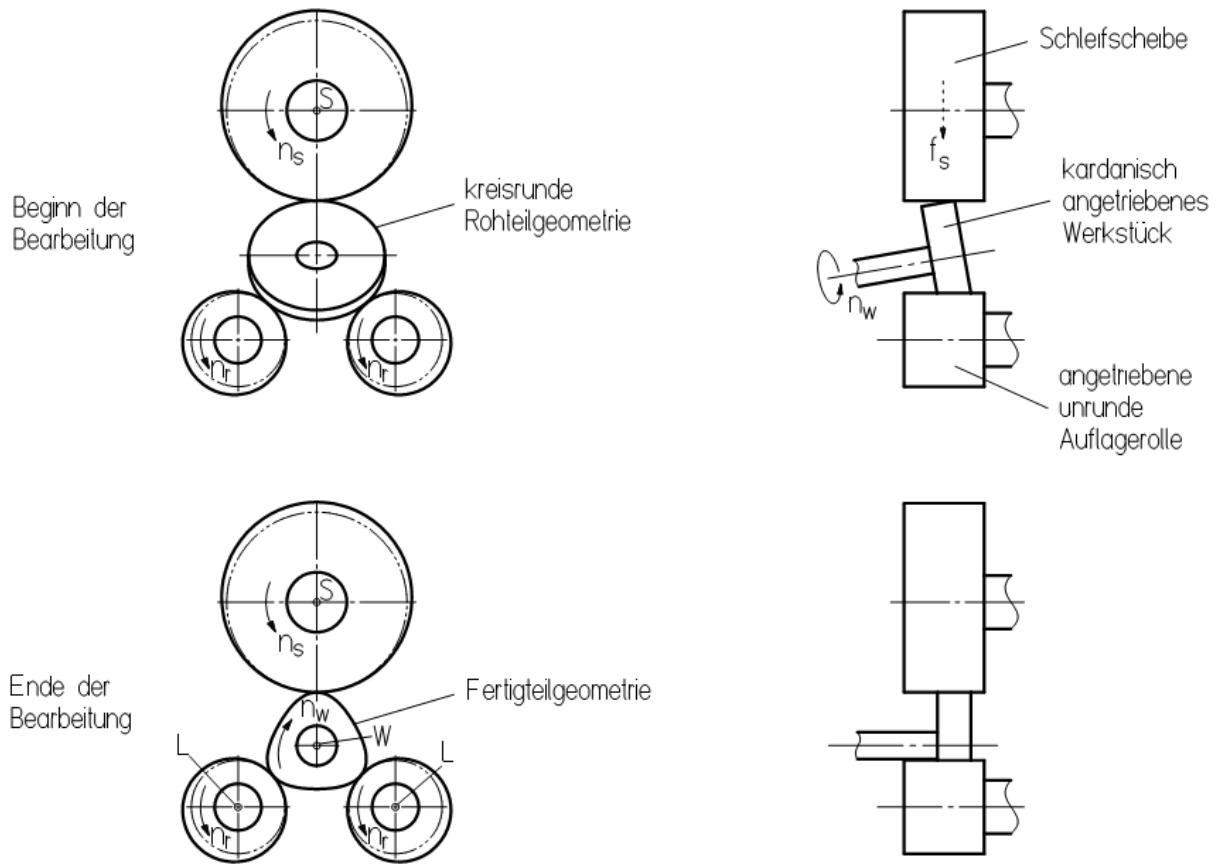


Bild 4-11: Drehzahlsynchrones Spitzenlos-Unrundscheifen eines Polygonprofils mit unrunder Auflagerrollen bei Drehzahlverhältnis $i_v = n_s : n_w = 3 : 1$ und $n_r = n_s$ zu Beginn und am Ende der Bearbeitung

In Bild 4-11 ist das Spitzenlosschleifen eines Polygonprofils bei Verwendung von unrunder Auflagerrollen zu Beginn und am Ende der Bearbeitung dargestellt. Der Querschnitt der Auflagerrollen ist entsprechend geformt, damit der Abstand zwischen der Schleifscheibenachse und der Drehachse des unrunder Werkstücks am Ende der Schleifbearbeitung konstant ist. Die Bestimmung des unrunder Schleifscheiben- bzw. Rollenquerschnitts kann daher mit den in Abschnitt 4.1 gezeigten Berechnungsmethoden erfolgen. Bei unrunder Werkstücken, die zugleich auch nicht zylindrisch sind, muss die Berechnung in axialer Richtung an mehreren Stellen durchgeführt werden. Dabei hängt die Anzahl der berechneten Schleifscheiben- bzw. Rollenquerschnitte von der axialen Form des Werkstücks und der gewünschten Genauigkeit ab.

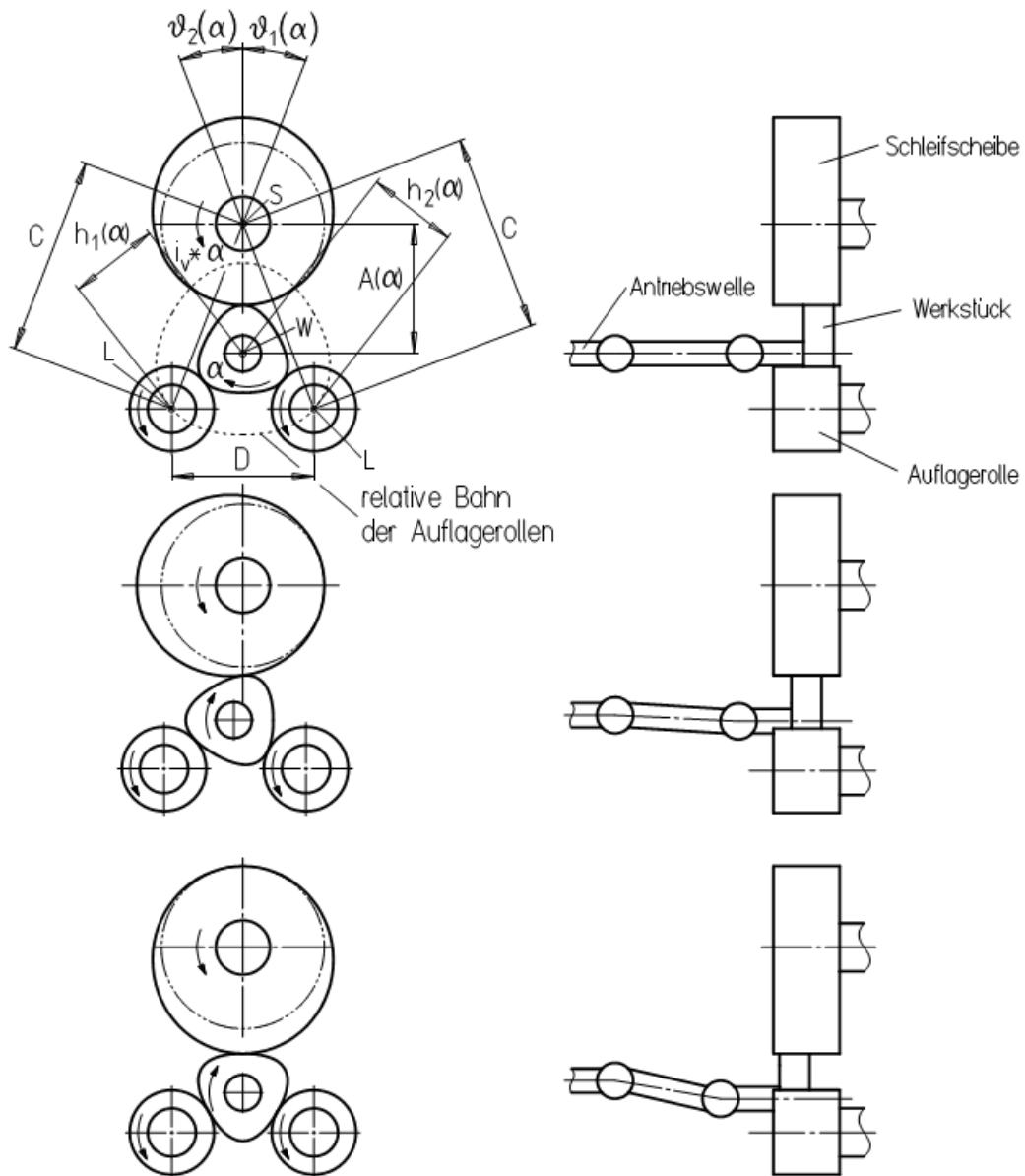


Bild 4-12: Drehzahlsynchrones Spitzenlos-Unrundschleifen eines Polygonprofils mit kreisrunden Auflagerrollen bei Drehzahlverhältnis $i_v = 3:1$ nach Beendigung der Zustellbewegung

Bei der Verwendung von kreisrunden, frei drehbar gelagerten Auflagerrollen ist der Achsabstand zwischen Schleifscheibe und Werkstück nach Beendigung der Zustellbewegung nicht konstant. Beispielhaft ist dies für das Spitzenlosschleifen eines Polygonprofils in Bild 4-12 dargestellt. Der Werkstückantrieb erfolgt über eine Kupplung bzw. Gelenkwelle, welche eine zur Schleifscheibendrehachse und zu den Stützrollendrehachsen parallele Lage der Werkstückachse ermöglicht. Bild 4-12 zeigt, dass der Abstand A zwischen Schleifscheiben- und Werkstückachse von der aktuellen Drehlage des unrundern Werkstücks abhängig ist: $A = A(\alpha)$. Daraus folgt, dass zur Berechnung des Schleifscheibenquerschnitts die in

Abschnitt 4.1.2 gezeigte Näherungslösung mit Nullstellensuche nicht angewendet werden kann. In die Berechnung des Drehwinkels α fließt der Achsabstand $A(\alpha)$ als Rechengröße ein. Der Achsabstand $A(\alpha)$ kann jedoch erst ermittelt werden, nachdem α berechnet wurde. Die in Abschnitt 4.1.1 gezeigte, relativ rechenzeitintensive Näherungslösung kann dennoch in modifizierter Form angewendet werden, da der Drehwinkel α als veränderlicher Parameter mit diskreten Werten vorgegeben wird. Analog zu Bild 4-12 ergeben sich die nachfolgenden Dreiecksbeziehungen:

$$h_1(\alpha)^2 = A(\alpha)^2 + C^2 - 2 * A(\alpha) * C * \cos(\vartheta_1(\alpha)) \quad (4.33)$$

$$h_2(\alpha)^2 = A(\alpha)^2 + C^2 - 2 * A(\alpha) * C * \cos(\vartheta_2(\alpha)) \quad (4.34)$$

$$D^2 = 2 * C^2 - 2 * C^2 * \cos(\vartheta_1(\alpha) + \vartheta_2(\alpha)) \quad (4.35)$$

Die Erhebungswerte $h_1(\alpha)$ und $h_2(\alpha)$ der relativen Bahnbewegung der Auflagerrollen (= äquidistante Kurve zum Werkstückquerschnitt) sind mit den in Abschnitt 3.6.6 gezeigten Beziehungen definiert.

4.6 Bewegungen beim Pendelhubabrichten

4.6.1 Kinematik in X-Richtung

Die in Abschnitt 3.6.6 gezeigte Tasterumrechnung wird nicht nur zur Umrechnung von Werkstückpunkten, sondern auch zur Berechnung der Bahnbewegung eines runden Diamantrades beim unrunder Abrichten einer Schleifscheibe herangezogen. Hier ist die Vorgehensweise analog zum Pendelhubschleifen. Beim Pendelhubabrachten wird jedoch nicht die Schleifscheibenmittelpunktsbahn, sondern die Mittelpunktsbahn des Abrichtrades berechnet. Jetzt ist die Schleifscheibe das „zu bearbeitende Werkstück“. Wie beim herkömmlichen Pendelhubschleifen dürfen auch beim Abrichten einer unrunder Schleifscheibe die kinematischen Grenzwerte für Geschwindigkeit, Beschleunigung und Ruck bei keiner Maschinenachse überschritten werden. Es wird vorausgesetzt, dass sich die Schleifscheibe mit einer konstanten Winkelgeschwindigkeit dreht und das Abrichtrad eine zu dieser Drehung synchrone Pendelhubbewegung in X-Richtung ausführt. Für die Berechnung wird die Schleifscheibe als ruhend betrachtet und angenommen, dass sich das Abrichtrad relativ um die ortsfeste Schleifscheibe bewegt (Bild 4-13).

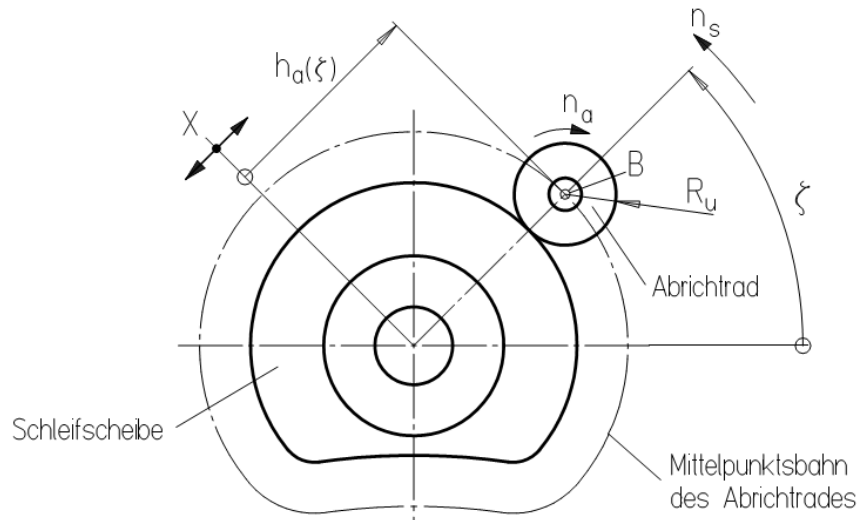


Bild 4-13: Beispielhafte relative Mittelpunktsbahn des kreisrunden Abrichtrades beim Pendelhubabrichten einer unrunder Schleifscheibe

Daraus folgen mit der Substitution für die Zeitdifferenz $dt = \frac{60}{2 * \pi * n_s} * d\zeta$ die Beziehungen für die kinematischen Größen Geschwindigkeit $v(\zeta)$ [m/s], Beschleunigung $a(\zeta)$ [m/s²] und Ruck $\dot{a}(\zeta)$ [m/s³] für die Achsenbewegung in X-Richtung beim Abrichten:

$$v(\zeta) = \frac{1}{1000} * \frac{dh_a}{dt} = \frac{2 * \pi * n_s}{60 * 1000} * \frac{dh_a}{d\zeta} \quad (4.36)$$

$$a(\zeta) = \frac{dv}{dt} = \frac{2 * \pi * n_s}{60} * \frac{dv}{d\zeta} \quad (4.37)$$

$$\dot{a}(\zeta) = \frac{da}{dt} = \frac{2 * \pi * n_s}{60} * \frac{da}{d\zeta} \quad (4.38)$$

Hierbei sind ζ [rad] und $h_a(\zeta)$ [mm] die Polarkoordinaten der Mittelpunktsbahn des Abrichtrades; n_s [min⁻¹] ist die Schleifscheibendrehzahl.

4.6.2 Dreidimensionales Abrichten

Die beim Abrichten einer dreidimensionalen Schleifscheibe erforderlichen Achsbewegungen werden von der Steuerung SIEMENS SINUMERIK 840 D aus drei Tabellen errechnet. Diese Tabellen sind:

- Polarkoordinaten einer Unrundkurve: $\{u(\zeta, z_0), \zeta\}$
- Skalierungstabelle: $\{s(z), z\}$
- Bewegungstabelle: $\{b(z), z\}$

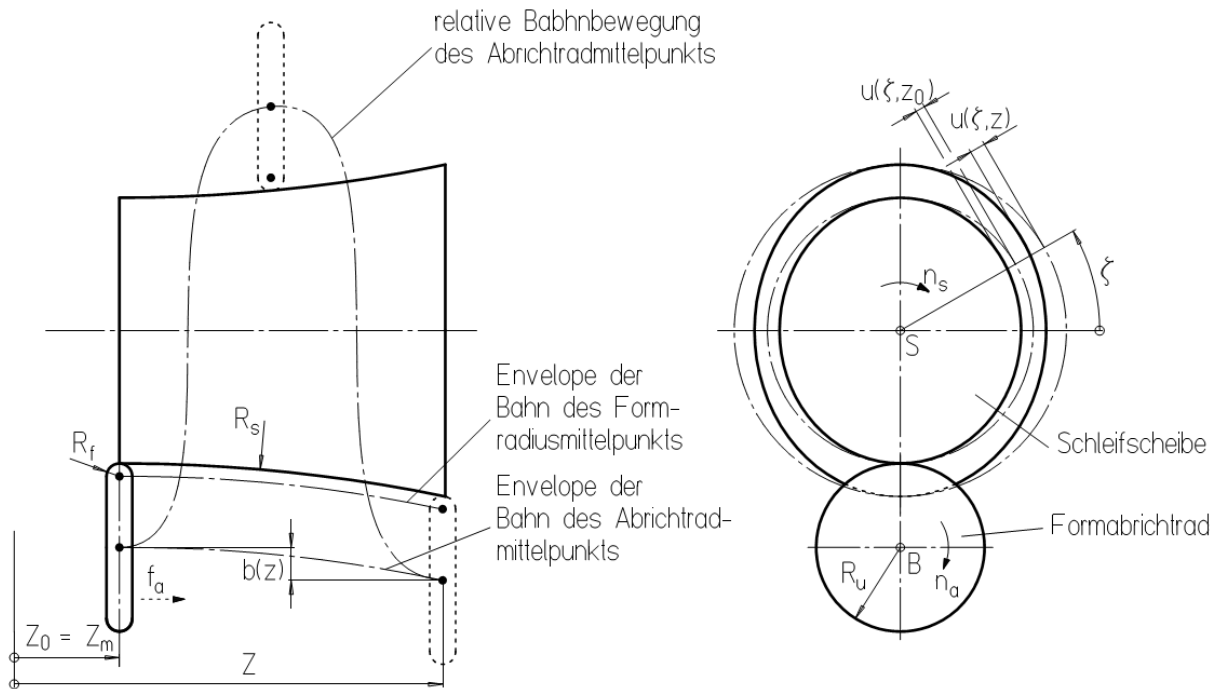


Bild 4-14: Bearbeitungssituation beim Abrichten einer im Querschnitt ovalen und axial ballig geformten Schleifscheibe mit einem rotationssymmetrischen Formabrichtrad

Die relative Bahnbewegung des Abrichtradmittelpunkts $x(\zeta, z)$ erfolgt entlang einer Schraubenlinie (Bild 4-14) und ist analog zu den von der Steuerung umgerechneten Tabellen durch Beziehung (4.39) definiert:

$$x(\zeta, z) = u(\zeta, z_0) * s(z) + b(z) \quad (4.39)$$

Die Polarkoordinaten der Unrundkurve $\{u(\zeta, z_0), \zeta\}$ sind vorgegeben. Die Skalierungstabelle $s(z)$ wird mit Beziehung (4.40) berechnet:

$$s(z) = \frac{u(\zeta_0, z)}{u(\zeta_0, z_0)} \quad (4.40)$$

Die Bewegungstabelle ist von der axialen Form der Schleifscheibe und vom Formradius R_f des Abrichtrades abhängig. Für die in Bild 4-14 gezeigte ballige Schleifscheibenform mit Radius R_s und der Radiusmittelpunktcoordinate z_m ist die Bewegungstabelle $b(z)$ in Beziehung (4.41) definiert:

$$b(z) = \sqrt{(R_s - R_f)^2 - (z - z_m)^2} \quad (4.41)$$

4.7 Rechenprogramm für das drehzahlsynchrone Unrundschleifen

Um die später in den Abschnitten 5 und 7 gezeigten Untersuchungen und Schleifversuche vorzubereiten wird im Rahmen vorliegender Arbeit mit der Software MATLAB ein Rechenprogramm mit einer graphischen Benutzeroberfläche erstellt. In diesem Programm sind die in dieser Arbeit erarbeiteten und für das Forschungsprojekt benötigten Rechenmodelle softwaremäßig umgesetzt. Zur Erhöhung der Rechengeschwindigkeit von rechenintensiven Algorithmen sind einige Funktionen in der Programmiersprache C programmiert und in MATLAB eingebunden. Dabei wird mit dem Befehl „mex“ die Datei mit dem C-Code kompiliert und eine DLL (Dynamic Link Library) erzeugt. Zur Laufzeit wird diese von einer MATLAB-Funktion aufgerufen.

Der Programmaufbau, der Funktionsumfang und die Benutzeroberfläche sind stetig erweitert worden. Die erste Programmversion diente ausschließlich zur Berechnung der unrunder Schleifscheibengeometrie (in Abhängigkeit von Werkstückquerschnitt, Drehzahlverhältnis und Achsabstand) sowie der Simulation des Bewegungsablaufs von Schleifscheibe und Werkstück bei der Bearbeitung (Bild 4-15).

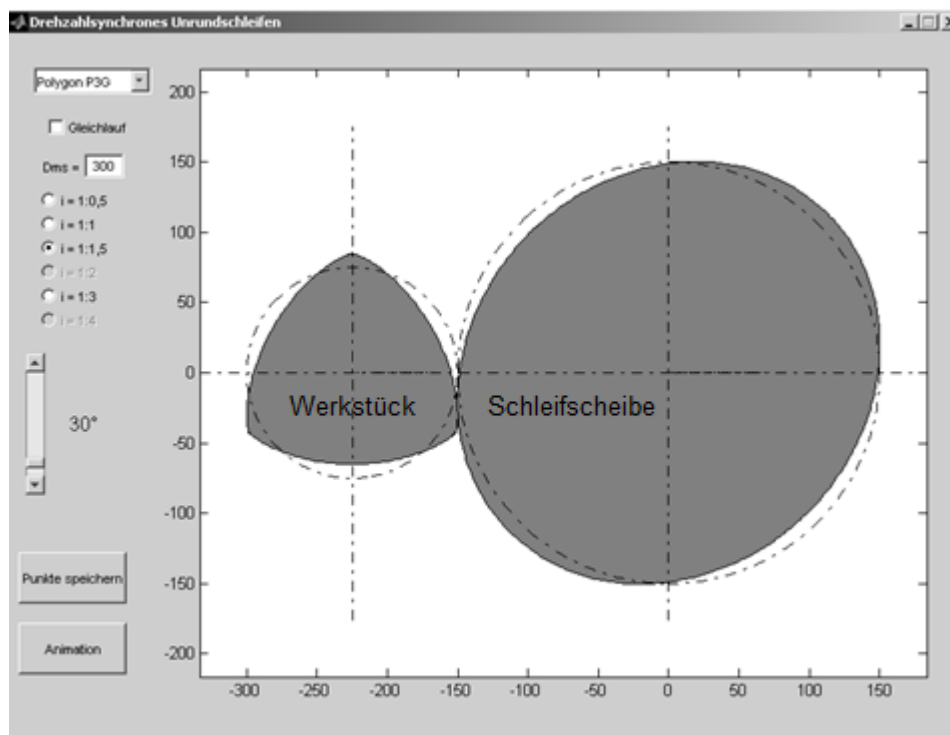


Bild 4-15: Rechenprogramm für das drehzahlsynchrone Unrundschleifen: Version 1

Im Laufe dieses Forschungsprojektes hat sich der Funktionsumfang immer mehr an die in früheren Zeiten am IFT entwickelten Programme zum Unrundschleifen, „KelPoly“ und „Pro-

grammiersystem Unrund“ (s. Abschnitt 3.4.1.5), angenähert. Wie bei letzteren ist die Benutzeroberfläche der aktuellen Version für den Einsatz in der Steuerung SIEMENS Sinumerik 840D ausgelegt. Das bedeutet, die Bedienung erfolgt über jeweils acht horizontale und vertikale Buttons und die Fenstergröße entspricht 800x600 Pixel.

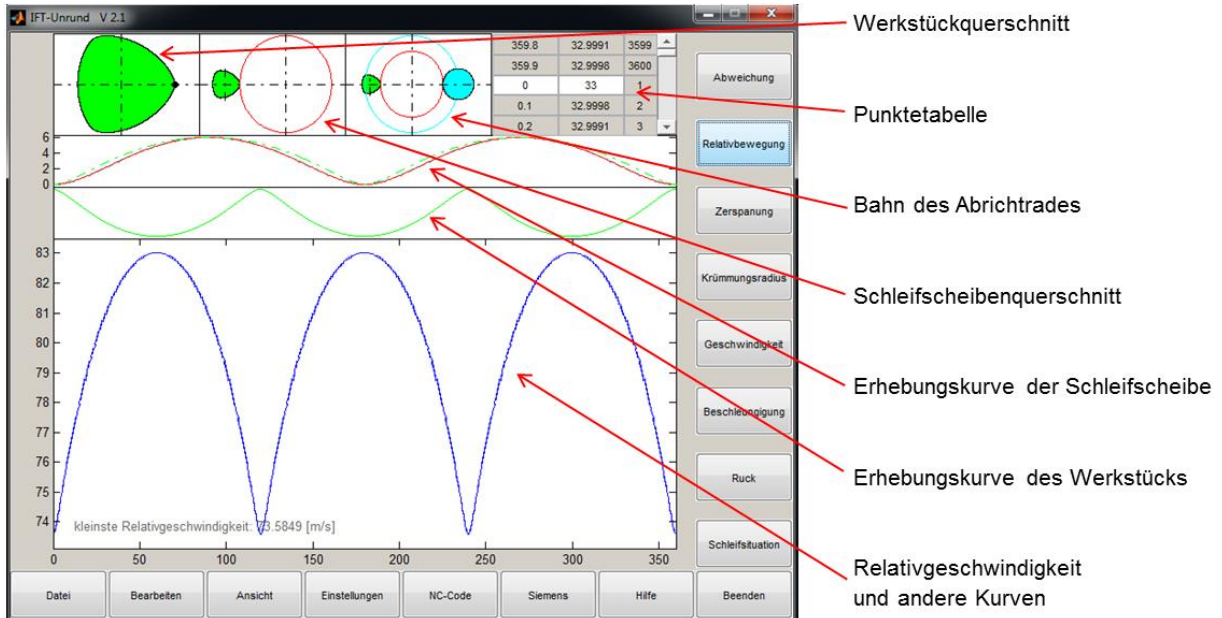


Bild 4-16: Benutzeroberfläche der aktuellen Programmversion

In Bild 4-16 ist die Hauptmaske der aktuellen Benutzeroberfläche dargestellt. Die oberen drei Fenster zeigen das Werkstück (grün), den Schleifscheibenumriss (rot) und das runde Abrichttrad mit der dazugehörigen Bahnbewegung (cyan). Neben diesen drei Fenstern befindet sich wahlweise die Punktetabelle des Werkstück- oder Schleifscheibenumrisses in kartesischen oder polaren Koordinaten. Die beiden mittleren Fenster zeigen die Schleifscheiben- und die Werkstück-erhebungskurve. Im unteren, größten Fenster können verschiedene Diagramme, wie etwa die entstehende Abweichung am gefertigten Werkstück oder die Kinematik (Geschwindigkeit, Beschleunigung und Ruck) der X-Achse beim Abrichten angezeigt werden. Neben den vielen Zusatzfunktionen sind in erster Linie folgende zwei **Hauptfunktionen** relevant:

- Berechnung des unrunder Schleifscheibenquerschnitts
- Vorausberechnung der voraussichtlich am Werkstück entstehenden Profilabweichung

4.7.1 Programmstruktur

Bild 4-17 gibt einen Überblick über die Programmstruktur und die wesentlichen Funktionen.

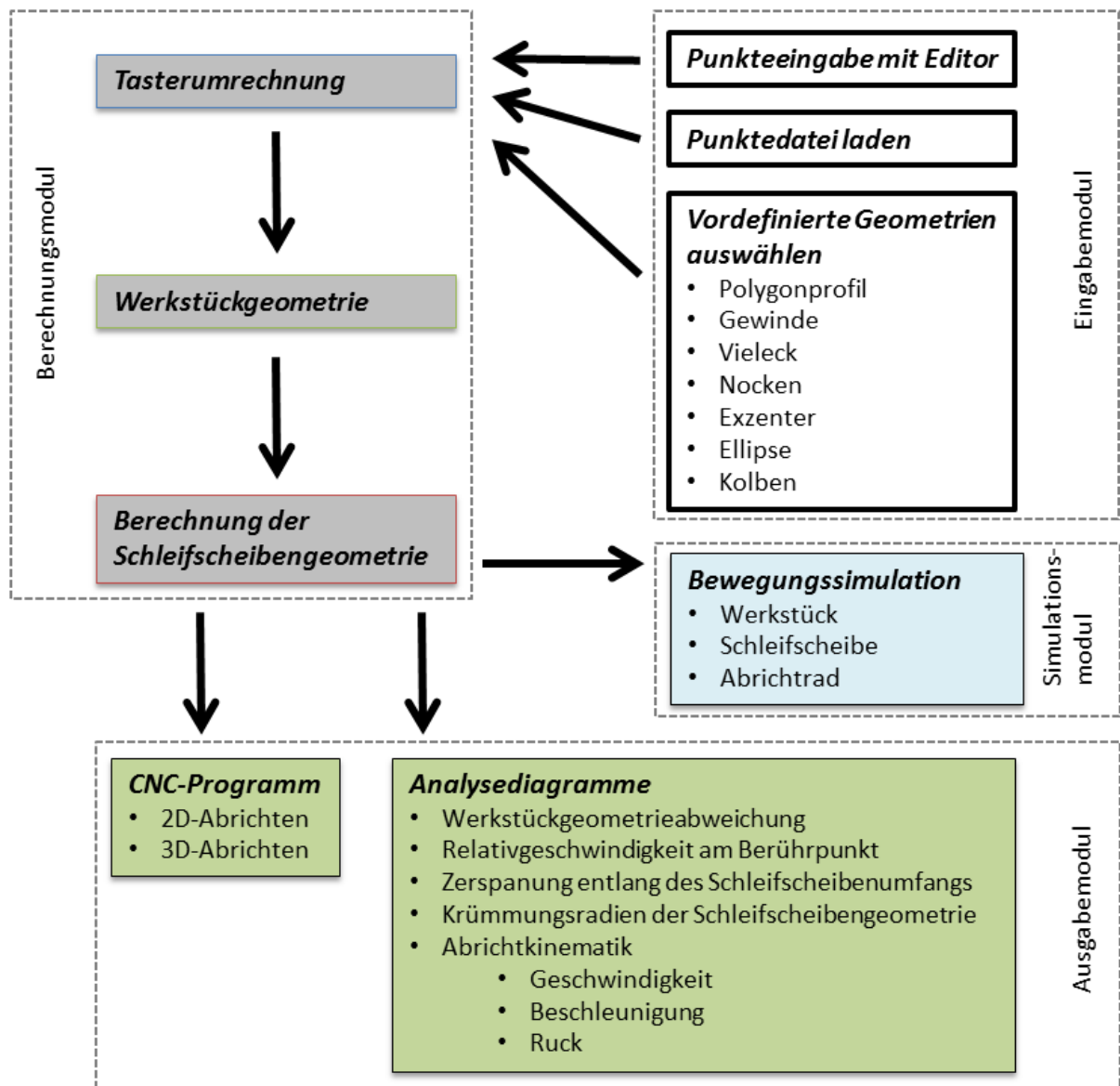


Bild 4-17: Programmstruktur

4.7.2 Quellcode

Der Quellcode besteht aus C- und MATLAB-Funktionen, die auf mehrere Dateien aufgeteilt sind. Das im Rahmen dieser Arbeit erstellte Programm für das drehzahlsynchrone Unrundschleifen dient ausschließlich Versuchszwecken. Es stellt eine Momentaufnahme mit den für das aktuelle Forschungsprojekt benötigten Funktionen dar. Bei Weiterführung der Forschung zum drehzahlsynchronen Unrundschleifen muss ggf. das Programm an neue oder geänderte Anforderungen angepasst und erweitert werden.

5 Grundlegende Untersuchungen zum drehzahlsynchronen Unrundschleifen

Bei den nachfolgenden Untersuchungen werden für die Berechnung von:

- Schleifscheibenquerschnitt,
- verfahrensbedingte Geometrieabweichung am gefertigten Werkstück,
- Relativgeschwindigkeit zwischen Werkstück und Schleifscheibe am Berührungspunkt,
- Verteilung der bezogenen Zerspanung am Schleifscheibenumfang,

die in Abschnitt 4 gezeigten Rechenmodelle angewendet.

5.1 Entstehende Werkstückoberfläche beim Einstechschleifen

Da beim drehzahlsynchronen Unrundschleifen die einzelnen Schleifkörner immer an den selben Stellen des Werkstückumfangs in Eingriff sind, nimmt die Schleifscheibenkörnung direkten Einfluss auf die Werkstückoberfläche.

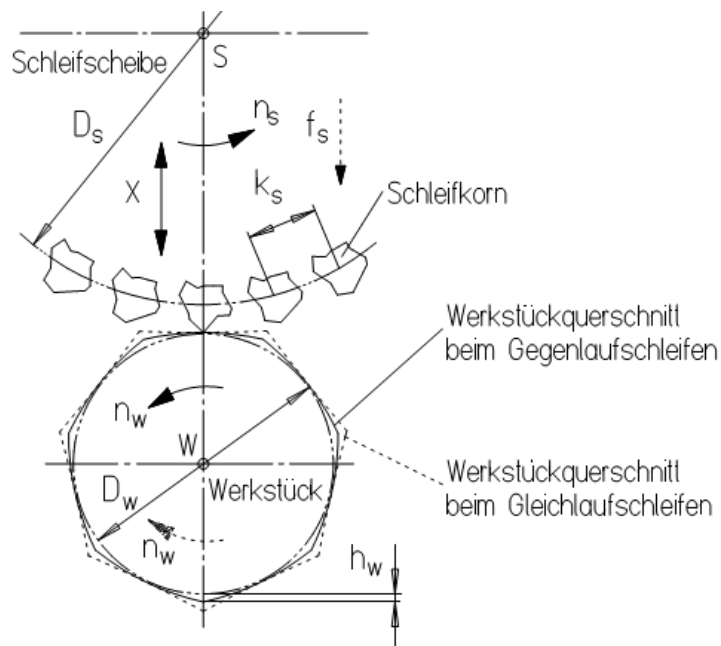


Bild 5-1: Durch den Schleifkornabstand in Umfangsrichtung entstehende Werkstückoberfläche¹ beim drehzahlsynchronen Einstechrundschleifen

Wenn ein Werkstück im Einstechverfahren (ohne Längsbewegung in Z-Richtung) bearbeitet wird, werden die an der Werkstückoberfläche in Umfangsrichtung entstehenden Wellen analog zu der in Abschnitt 4.1 gezeigten Vorgehensweise bei der Berechnung des

¹ Es wird angenommen, dass die bearbeitenden Schleifkörner in der gleichen Schnittebene liegen

Werkstückquerschnitts ermittelt. Dabei ist jedoch eine sehr feine Unterteilung des Schleifscheiben- und Werkstückumrisses notwendig, wodurch sich die für die Berechnung benötigte Zeit erheblich verlängert. In Bild 5-2 ist der Einfluss des Schleifkornabstands k_s auf die entstehende Werkstückoberfläche beim drehzahlsynchronen Einstechschleifen eines kreisrunden Werkstückquerschnittes dargestellt. Die bei der Berechnung verwendeten **Parameter** sind:

- Schleifkornabstand: $k_s = 1$ bzw. 2 mm
- Schleifscheibendurchmesser: $D_s = 500$ mm
- Werkstückdurchmesser: $D_w = 50$ mm
- Drehzahlverhältnis: $i_v = n_s : n_w = 1 : 1$

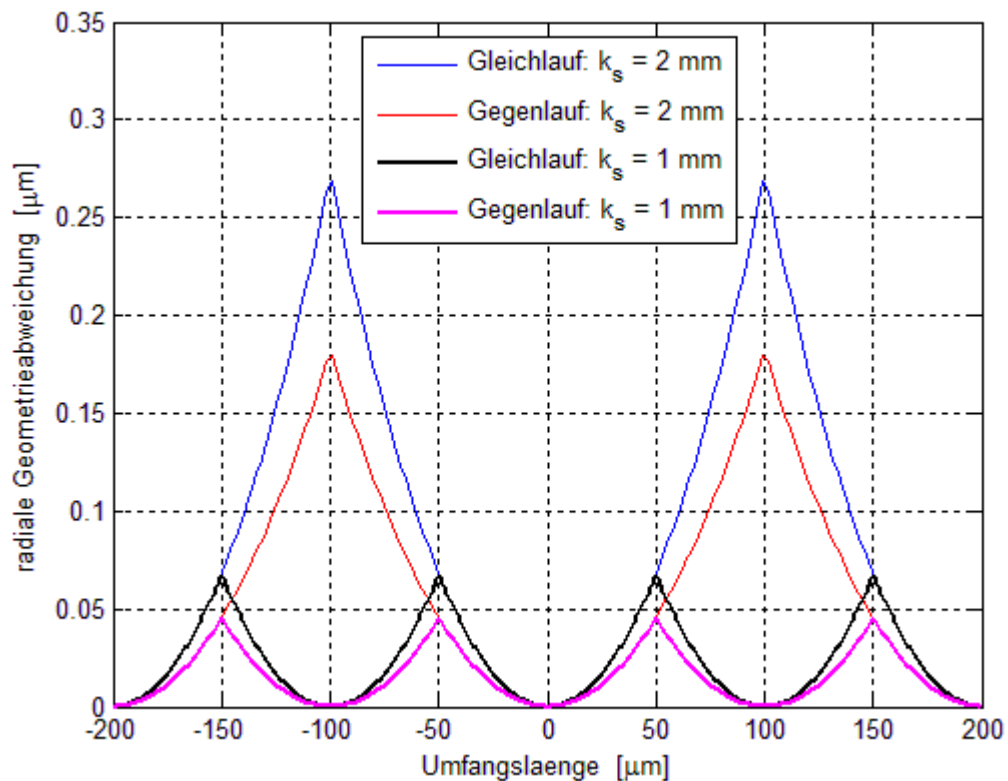


Bild 5-2: Durch den Schleifkornabstand am Werkstück entstehende radiale Geometrieabweichung am Kreisprofil bei drehzahlsynchronem Einstechschleifen mit: $D_s = 500$ mm, $D_w = 50$ mm und $i_v = 1 : 1$

Die Oberflächenkurven zeigen, dass beim Gleichlaufschleifen gegenüber Gegenlaufschleifen eine um ca. 50% größere Wellenhöhe an der Werkstückoberfläche entsteht. Die Halbierung des Kornabstands von 2 auf 1 mm führt zur überproportionalen Verkleinerung der Wellenhöhen auf der Werkstückoberfläche auf etwa ein Viertel. Durch den kleineren Kornabstand wird auch die Wellenlänge in Umfangsrichtung und in weiterer Folge das Zerspanungsvolumen

pro Schleifkorneingriff halbiert. Eine Verdoppelung des Schleifscheibendurchmessers oder die Erhöhung des Verhältnisses zwischen der Schleifscheiben- und der Werkstückdrehzahl auf 2:1 hat dieselben Effekte. Somit sind die **Oberflächenrauheiten** der geschliffenen Werkstücke und die **Schleifkornbelastungen** umso geringer:

- je kleiner der Schleifkornabstand k_s
- je größer das Drehzahlverhältnis $i_v = n_s : n_w$
- und je größer das Durchmesser Verhältnis $i_D = D_s : D_w$ ist

Aus dem zuvor gezeigten Diagramm ist ablesbar, dass die Geometrieabweichungen sowohl beim Gleich- als auch beim Gegenlaufschleifen positiv sind. Die gefertigte Werkstückgeometrie ist in jedem Fall größer gleich der Sollgeometrie. Das Diagramm zeigt jedoch nicht, ob die Wellenbögen am Werkstückumfang konvex oder konkav sind. Wie in Abschnitt 3.6.11 gezeigt, erzeugt ein Schleifscheibenpunkt beim Gegenlaufschleifen mit Drehzahlverhältnis 1:1 am Werkstückumriss einen konvexen Bogen. Der Radiuswert dieses Kreisbogens ist gleich dem Abstand zwischen der Werkstück- und Schleifscheibenachse. In Bild 5-3 ist im kartesischen Koordinatensystem ersichtlich, dass der Werkstückumriss beim Gleichlaufschleifen konkave Welligkeiten hervorruft.

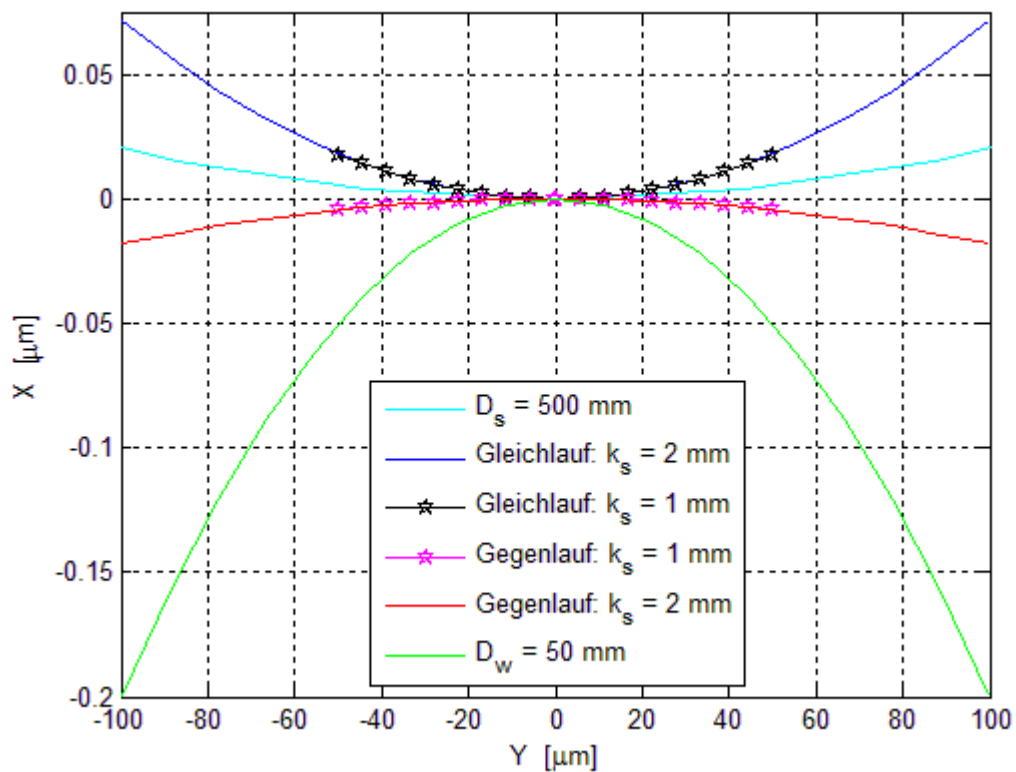


Bild 5-3: Krümmungsrichtung der Oberflächenwellen bei drehzahlsynchronem Einstechschleifen mit: $D_s = 500 \text{ mm}$, $D_w = 50 \text{ mm}$ und $i_v = 1:1$

Auch in axialer Richtung entsteht am Werkstück eine Abweichung von der theoretischen Sollgeometrie (Bild 5-4). Die beim Einstechschleifen durch die axiale Schleifscheibentopographie am Werkstück in axialer Richtung entstehende Oberflächenstruktur wird jedoch infolge der Schleifscheibendrehung durch die radial eingreifenden Schleifkörner teilweise eingeebnet.

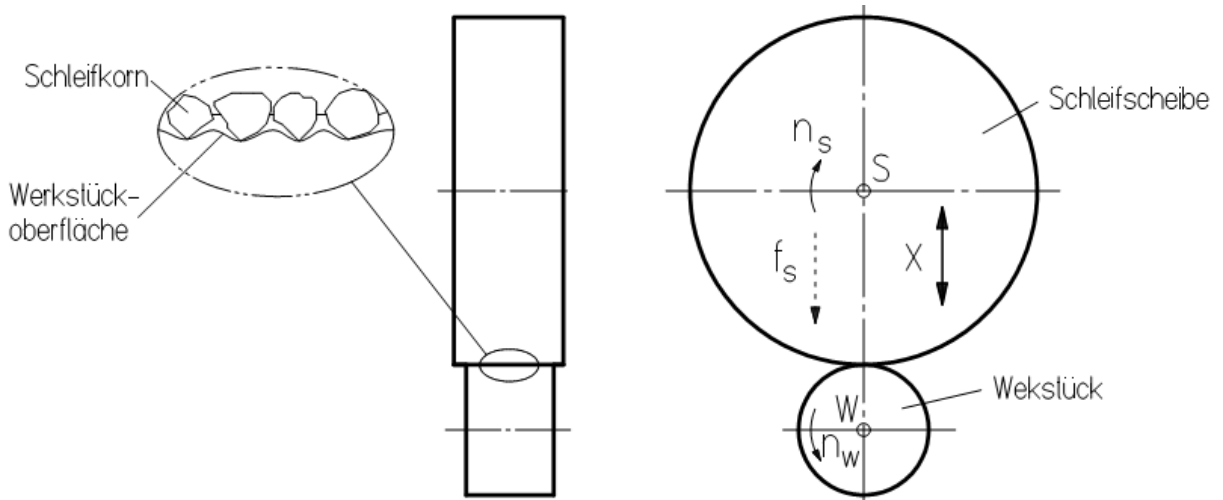


Bild 5-4: Am Werkstück durch die Schleifscheibentopographie in axialer Richtung entstehende Oberflächenstruktur

5.2 Relativgeschwindigkeit beim Gleichlaufschleifen

Beim drehzahlsynchronen Gleichlaufschleifen entsteht oftmals der Eindruck, dass die Relativgeschwindigkeit null wird und die Wirkpartner lediglich aneinander abrollen, da die Umfangsgeschwindigkeiten in dieselbe Richtung zeigen. Dies ist jedoch nur in speziellen Situationen der Fall, wie im Anschluss gezeigt wird. Um die Verhältnisse transparenter zu gestalten, wird nachfolgend die Bearbeitung eines kreisrunden Werkstückprofils mit einer kreisrunden Schleifscheibe untersucht.

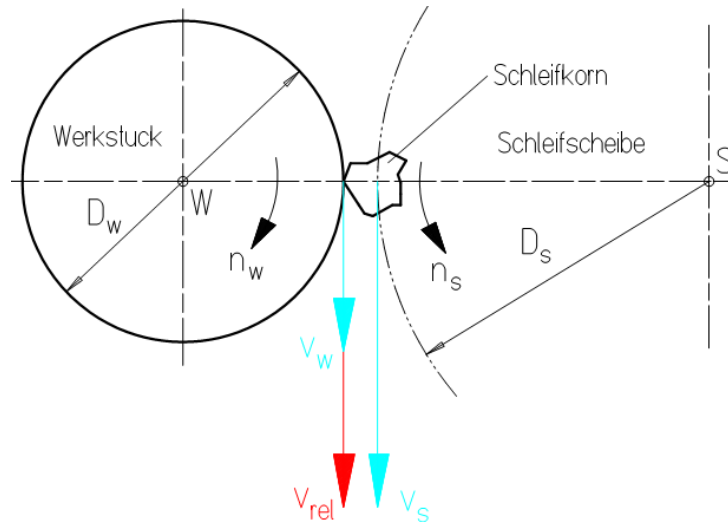


Bild 5-5: Relativgeschwindigkeit beim drehzahlsynchronen Gleichlaufschleifen eines kreisrunden Werkstücks mit einer kreisrunden Schleifscheibe

Entsprechend Bild 5-5 ergibt sich die Relativgeschwindigkeit aus folgender Beziehung:

$$v_{rel} = v_s - v_w = (D_s * n_s - D_w * n_w) * \frac{\pi}{1000 * 60} \quad (5.1)$$

Die Relativgeschwindigkeit ist somit nur dann null, wenn:

$$D_w * n_w = D_s * n_s \quad (5.2)$$

Werden in Beziehung (5.1) die Durchmesser und Drehzahlen durch das Durchmesser- und Drehzahlverhältnis $i_D = D_s : D_w$ und $i_v = n_s : n_w$ ersetzt, so wird die Relativgeschwindigkeit als Funktion von i_D, i_v und v_s ausgedrückt:

$$v_{rel} = v_s * \left(1 - \frac{1}{i_D * i_v}\right) \quad (5.3)$$

Bei einem Durchmesser Verhältnis zwischen Schleifscheibe und Werkstück von 10:1 (z.B. $D_s = 500 \text{ mm}$; $D_w = 50 \text{ mm}$) sowie gleichen Drehzahlen ergibt sich eine Differenzgeschwindigkeit, die 90% der Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit beträgt. Selbst wenn das Drehzahlverhältnis, zur Aufhebung einer geometriebedingten Schleifscheibenunwucht, verdoppelt wird, beträgt die Relativgeschwindigkeit noch 80% der Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit. Bei den für das Unrundsleifen üblichen Durchmesser- und Drehzahlverhältnissen ist die Relativgeschwindigkeit zwischen den Wirkpartnern am Berührungspunkt meist nur um bis zu 20% kleiner als die Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit. Aus technologischen Gründen werden Relativgeschwindigkeiten von mindestens 20 m/s angestrebt. Bei einer Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit $v_s = 50 \text{ m/s}$ ist bspw. der Betrag

einer um 20% kleineren Relativgeschwindigkeit 40 m/s und somit doppelt so hoch wie die gewünschte Mindestgeschwindigkeit.

5.3 Gleichlaufschleifen von konkaven Werkstücken

In Bild 5-6 ist ein Werkstück mit einem konkaven Radius von 25 mm dargestellt. Beim herkömmlichen Pendelhubschleifen mit einer im Querschnitt kreisrunden Schleifscheibe darf der Schleifscheibenaußendurchmesser bei der Bearbeitung des Werkstücks nicht größer als 50 mm sein.

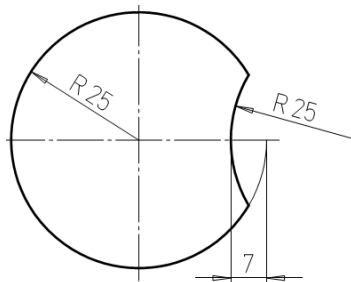


Bild 5-6: Beispielhaftes konkaves Werkstück

In Bild 5-7 wird gezeigt, wie dasselbe Werkstück im Gleichlauf mit einer unrunden Schleifscheibe bearbeitet wird. Das Verhältnis der Winkelgeschwindigkeiten von Schleifscheiben- und Werkstückdrehung ist 1:1 bzw. 1:2. Dabei haben die Schleifscheiben radiale Erhöhungen, die in den konkaven Bereich des Werkstücks eingreifen. Im Vergleich zum Pendelhubschleifen kann beim drehzahlsynchronen Unrundscheifen bei gleicher Werkstück- und Schleifscheibendrehzahl eine im radialen Außenmaß mehr als dreimal so große Schleifscheibe verwendet werden. Bei einem Drehzahlverhältnis von 1:2 kann das Schleifscheibenaußenmaß sogar mehr als sechsmal so groß sein. Dadurch können im Vergleich zum herkömmlichen Pendelhubschleifen die Schleifspindeln deutlich steifer ausgeführt werden.

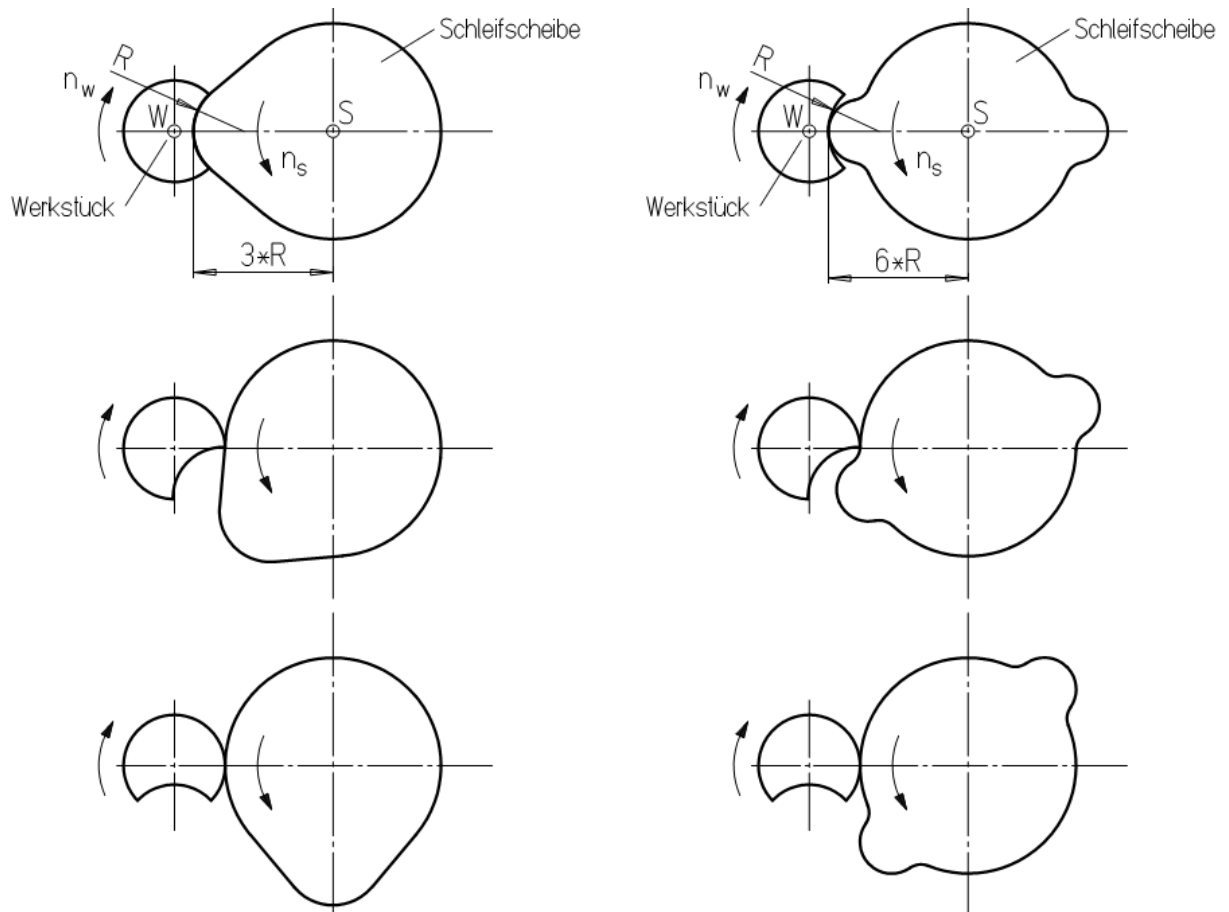


Bild 5-7: Drehzahlsynchrones Gleichlaufschleifen eines konkaven Werkstücks bei einem Drehzahlverhältnis $i_v = n_s : n_w = 1 : 1$ (links) und $1 : 2$ (rechts)

Mit zunehmender Verkleinerung des Drehzahlverhältnisses bilden sich beim drehzahlsynchronen Unrundscheifen an der unrunder Schleifscheibengeometrie konkave Bereiche aus, die entsprechend abgerichtet werden müssen. Zudem ist zu beachten, dass bei einer Verkleinerung des Drehzahlverhältnisses die Relativgeschwindigkeit am Berührungspunkt zwischen Schleifscheibe und Werkstück geringer wird. Aus diesem Grund muss, bei einer Verkleinerung des Verhältnisses zwischen Schleifscheiben- und Werkstückdrehung, zur Gewährleistung einer minimalen Relativgeschwindigkeit die Schleifscheibe radial entsprechend vergrößert werden.

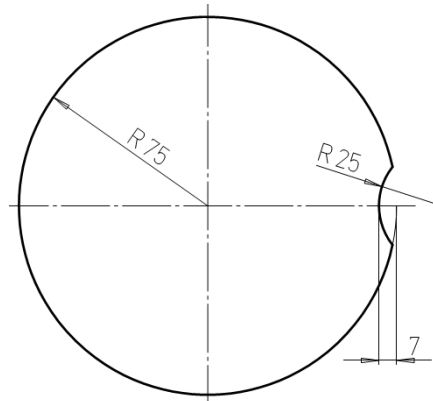


Bild 5-8: Konkaves Werkstück mit größerem Außendurchmesser

Die Grenzen der Bearbeitbarkeit konkaver Werkstücke werden durch das Verhältnis von Werkstückaußenmaß zu konkavem Radius erheblich beeinflusst, wie ein Beispiel zeigt: Das in Bild 5-8 skizzierte Werkstück ist ähnlich dem zuvor betrachteten Werkstück. Jedoch wurde der Außenradius des Werkstücks im Verhältnis zum konkaven Radius verdreifacht. Wie zuvor kann auch dieses Werkstück im Gleichlauf bei einem Drehzahlverhältnis von 1:1 mit einer unrunden Schleifscheibe bearbeitet werden, deren Außenmaß dreimal so groß ist wie der konkave Durchmesser des Werkstücks. Daraus ergeben sich vergleichbare radiale Ausdehnungen von Werkstück und Schleifscheibe. Allerdings ist hier bei gleichgerichteten Umfangsgeschwindigkeiten die Relativgeschwindigkeit zwischen Werkstück und Schleifscheibe im Berührungspunkt gleich null und somit eine Schleifbearbeitung technologisch nicht möglich.

5.4 Gegenlaufschleifen von konvexen Werkstücken

Zuvor wurde gezeigt, dass beim Gleichlaufschleifen von konkaven Werkstücken, im Vergleich zum herkömmlichen Pendelhubschleifen, wesentlich größere Schleifscheiben verwendet werden können. Im Gegensatz dazu sind beim Gegenlaufschleifen mit Drehzahlverhältnis 1:1 konkave Geometrien nicht schleifbar. Selbst bei konvexen Werkstückgeometrien liegen Einschränkungen vor. Das nachfolgende Bild 5-9 zeigt die Bearbeitung eines Polygon- und eines Dreieckprofils im Gegenlauf.

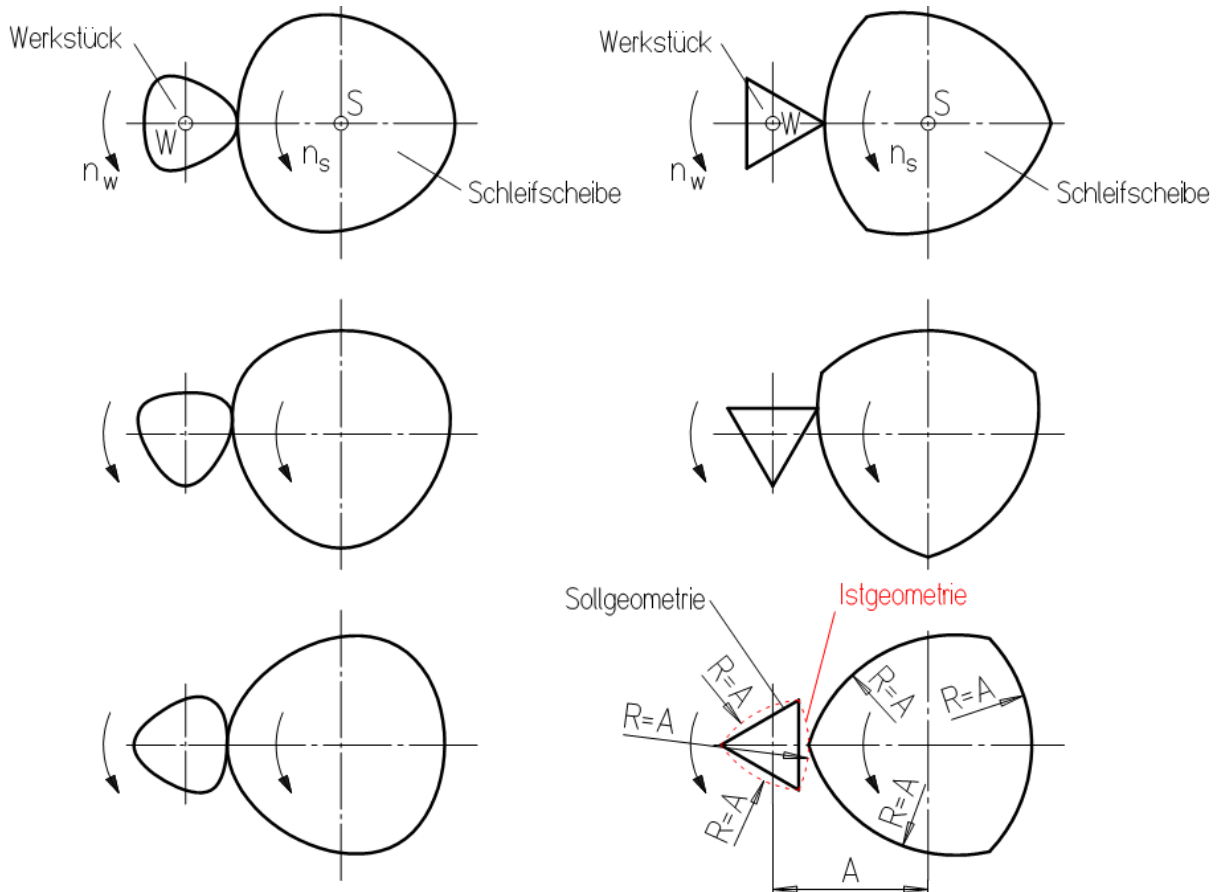


Bild 5-9: Gegenlaufschleifen eines Polygonprofils (links) und eines Dreieckprofils (rechts) mit Drehzahlverhältnis 1:1

Das beispielhafte Polygonprofil ist exakt herstellbar. Dagegen ist erkennbar, dass sich die Schleifscheibengeometrie beim Dreieckprofil auf den Werkstückspitzen mehr oder weniger abwälzt und die Planstellen des Werkstücks die Schleifscheibe nie berühren. In diesen Bereichen weicht das geschliffene Werkstück von der Sollgeometrie erheblich ab. Sowohl die Istgeometrie des Werkstücks als auch der Schleifscheibenumfang bestehen aus drei Kreisbögen mit einem Radius, der gleich dem Abstand A zwischen Schleifscheiben- und Werkstückdrehachse ist (s. Abschnitt 3.6.11). Das exakte Schleifen im Gegenlauf setzt voraus, dass die Krümmungsradien des Werkstückprofils stets konvex ausgeführt und nicht größer als der Achsabstand der Drehachsen sind. Daraus folgt, dass Nockenprofile von Kfz-Nockenwellen im Bereich der Flanken in der Regel durch Gegenlaufschleifen nicht exakt zu bearbeiten sind. Allerdings ist diese Feststellung an Werkstücken zu relativieren, die am Umfang mehrfach wiederholende Geometrien aufweisen. Hier besteht die Möglichkeit, das Drehzahlverhältnis zwischen Werkstück- und Schleifscheibendrehung zu verändern. Demnach gibt es beim Gegenlaufschleifen für das beispielhaft gewählte Dreieckprofil durchaus auch eine geometrisch exakte Bearbeitungsmöglichkeit. In Bild 5-10 ist dargestellt,

wie das Dreieckprofil bei Drehzahlverhältnis 3:2 und 3:1 bearbeitet wird. Während beim ersteren noch eine Geometrieabweichung am Werkstück vorhanden ist, ist mit dem Drehzahlverhältnis 3:1 das Dreieckprofil exakt zu erzeugen.

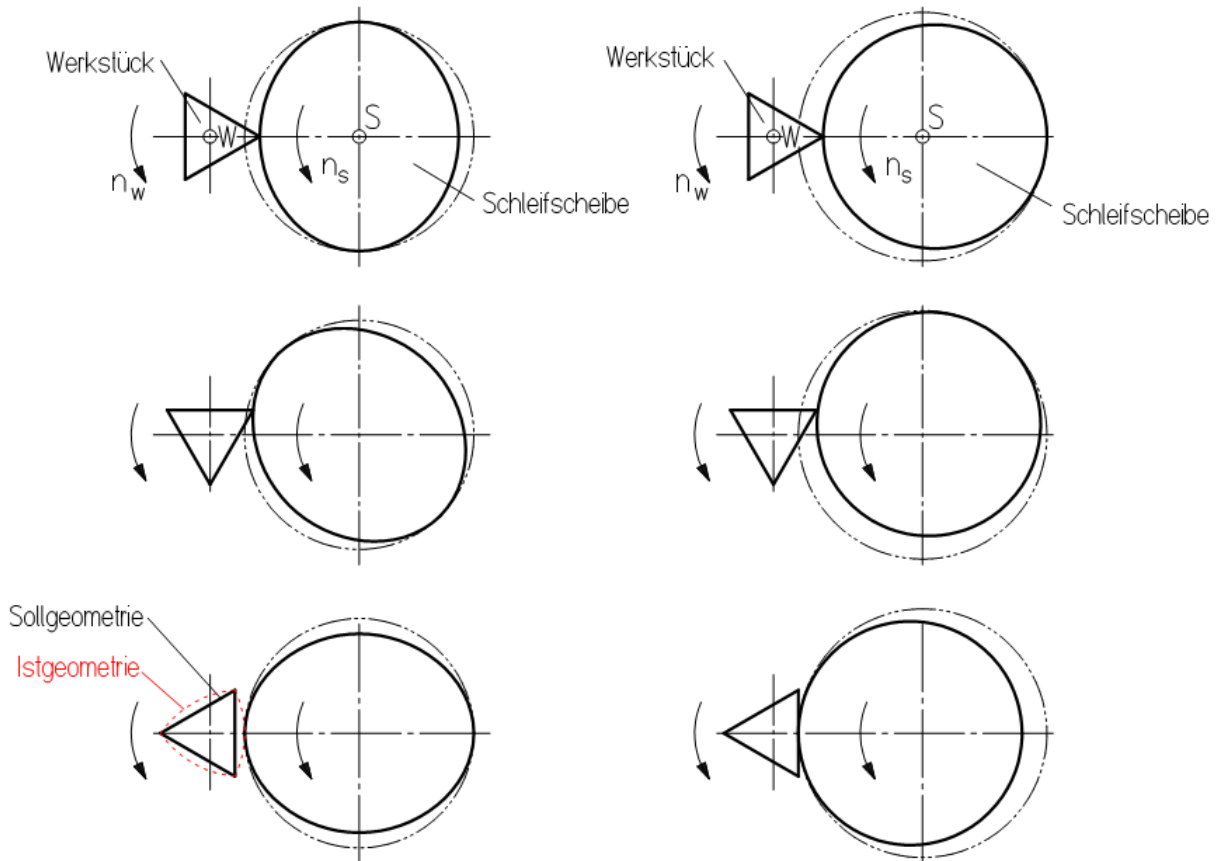


Bild 5-10: Gegenlaufscheifen eines Dreieckprofils mit Drehzahlverhältnis $i_v = n_s:n_w = 3:2$ (links) sowie $3:1$ (rechts)

Bei Veränderung des Drehzahlverhältnisses durch eine Erhöhung der Werkstückdrehzahl im Verhältnis zur Schleifscheibendrehzahl schränken sich die Bearbeitungsmöglichkeiten weiter ein. Die am Werkstück entstehenden Geometrieabweichungen werden im Vergleich zur Bearbeitung mit Drehzahlverhältnis 1:1 noch zusätzlich vergrößert.

5.5 Unrundscheifen von Rohteilen mit kreisrundem Ausgangsquerschnitt

In Bild 5-11 ist die Situation zu Beginn der Schleifbearbeitung eines ovalen Werkstücks bei Drehzahlverhältnis $i_v = n_s:n_w = 1:1$ dargestellt. Die ovale Schleifscheibe berührt den kreisrunden Rohteilquerschnitt zunächst nur punktwise.

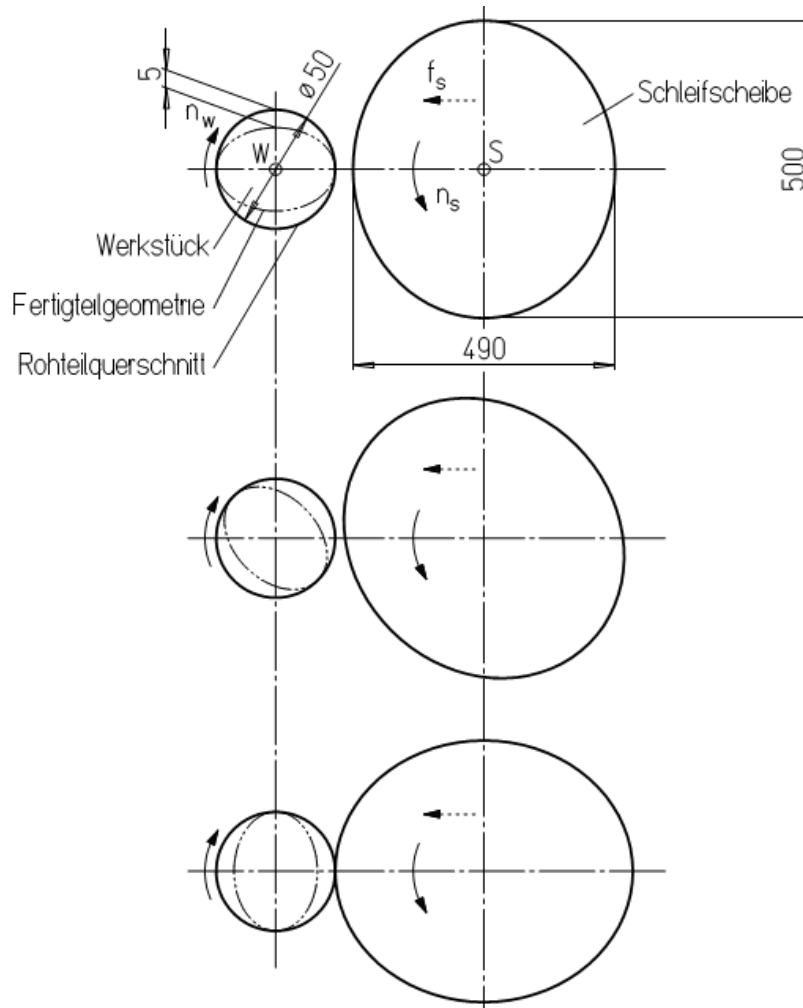


Bild 5-11: Beginn der Bearbeitung beim Schleifen eines ovalen Werkstücks mit kreisrundem Rohteilquerschnitt

Erst bei zunehmender radialer Zustellung kommen größere Bereiche des Schleifscheibenumfangs in Eingriff, was für dieses Beispiel in Bild 5-12 dargestellt ist. Das Diagramm zeigt, dass die abrasive Wirkung der Schleifscheibe bis zum Erreichen des vollen Zustellbetrags von 5 mm nur etwa zu 50% genutzt wird. Die anderen 50% der Bearbeitungszeit befinden sich große Umfangsbereiche der Schleifscheibe im Leerlauf, ohne Werkstückkontakt und somit ohne Anteil am Materialabtrag. Von diesem Gesichtspunkt aus betrachtet verdoppelt sich die Bearbeitungszeit, wenn der Rohteilquerschnitt nicht an die unrunde Fertiggeometrie angepasst, sondern kreisrund ist. Des Weiteren ist aus Bild 5-11 und Bild 5-12 ableitbar, dass die Schleifscheibenbereiche mit der größten radialen Ausdehnung auch eine wesentlich höhere Zerspanungsleistung aufbringen müssen als jene, die erst bei fortlaufender Zustellung in den Eingriff kommen. Dadurch erhöht sich die in Abschnitt 4.4 gezeigte ungleichmäßige Zerspanung am Schleifscheibenumfang noch zusätzlich.

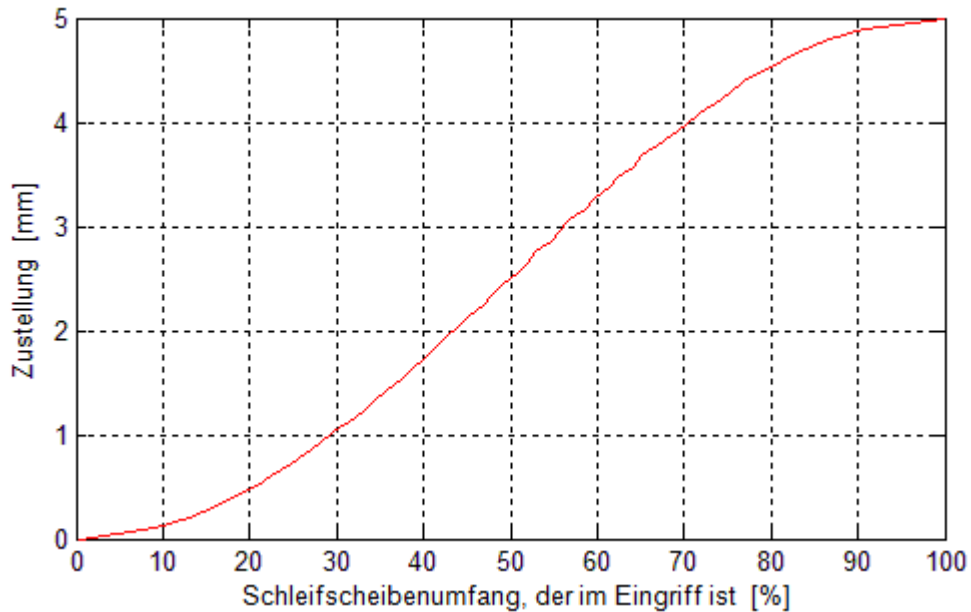


Bild 5-12: Prozentueller Anteil des im Eingriff befindlichen Schleifscheibenumfangs

Beim herkömmlichen Pendelhubschleifen tritt eine ähnliche Verlängerung der Bearbeitungszeit auf. Dort kann jedoch ein Großteil des Rohteilmaßes durch radiales Einstechen an mehreren Umfangstellen abgetragen werden (s. Abschnitt 3.4.1.2), wodurch sich die Bearbeitungszeit erheblich verkürzt. Ebenso wenig lässt sich ein drehzahlsynchrones Tiefschleifen realisieren.

5.6 Innenschleifen mit ununden Schleifscheiben

Wird beim Wälzstoßen (s. Abschnitt 3.6.10) das Stoßwerkzeug durch eine Schleifscheibe mit gleichem Querschnitt ersetzt, sind mit diesem kinematischen Prinzip auch Innengeometrien schleifbar. Bild 5-13 zeigt das Innenschleifen eines „Polygonprofil DIN 32711 – A P3G 30 g6“ sowohl mit einer kreisrunden, als auch mit einer ununden Schleifscheibe.

Beim herkömmlichen Innenschleifen ist der größtmögliche Außendurchmesser der kreisrunden Schleifscheibe (lt. Norm 10 mm) durch den kleinsten Krümmungskreis in der Polygonecke bestimmt. Im Gegensatz dazu ist der Werkzeugquerschnitt beim drehzahlsynchronen Innenschleifen bei Gleichlauf eine zum Werkstückquerschnitt äquidistante Kurve (s. Abschnitt 3.6.10). Somit darf der äquidistante Kurvenabstand nicht größer als der kleinste Werkstückkrümmungsradius sein. Da sich die unrunde Schleifscheibe und das Werkstück mit gleicher Winkelgeschwindigkeit im Gleichlauf drehen, ist die Relativgeschwindigkeit am Berührungspunkt der Wirkpartner nur von deren radialer Differenz und der synchronen Drehzahl abhängig.

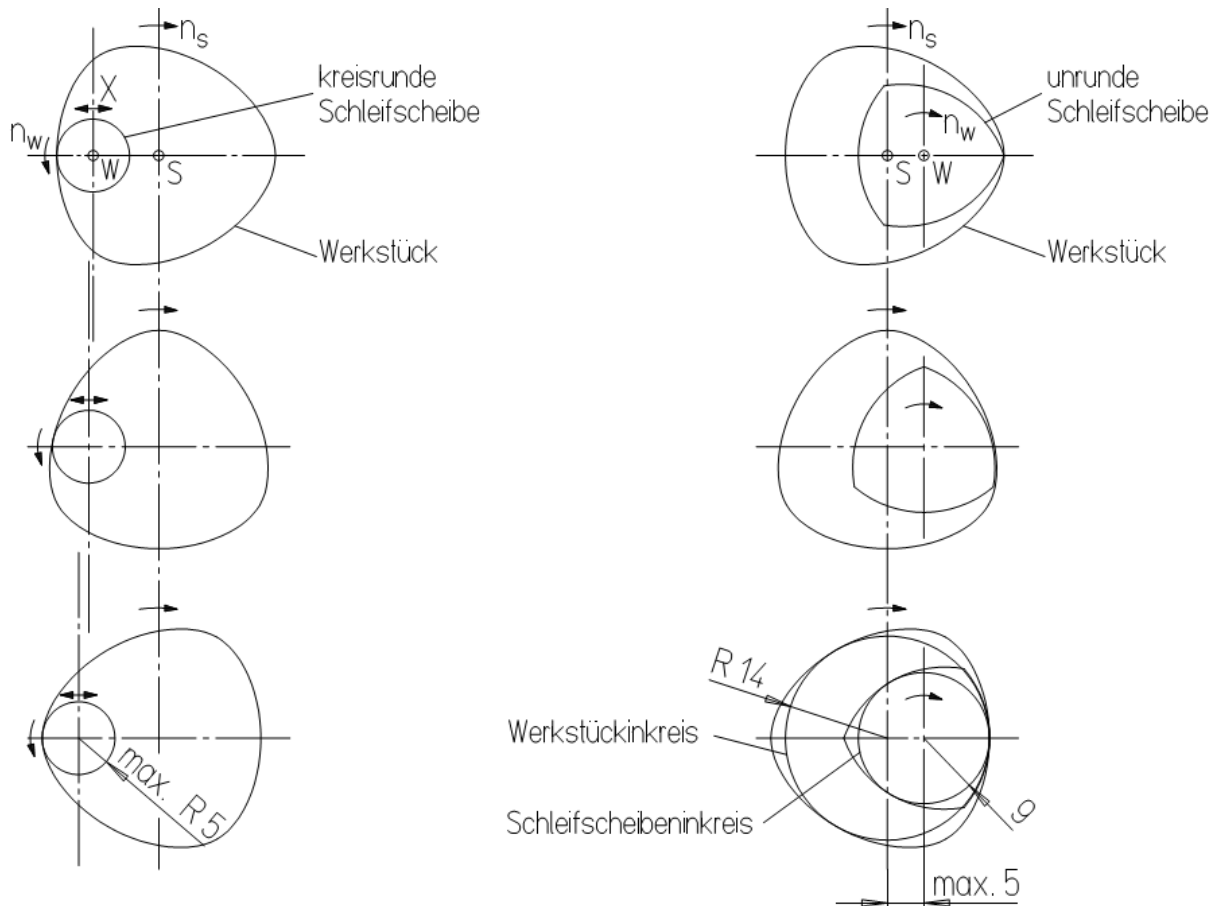


Bild 5-13: Herkömmliches (links) und drehzahlsynchrones (rechts) Innenschleifen eines Polygonprofils DIN 32711 – A P3G 30 g6

Ausgehend von einer gewünschten Mindestrelativgeschwindigkeit im Berührungspunkt von $v_{rel_{min}} = 20 \text{ m/s}$ ergibt sich mit dem Inkreisradius des Schleifwerkzeugs $r_{si} = 9 \text{ mm}$ und dem Inkreisradius des Polygonprofils $r_{wi} = 14 \text{ mm}$ die notwendige synchrone Mindestdrehzahl:

$$n_{s_{min}} = \frac{1000 * 60 * v_{rel_{min}}}{2 * \pi * (r_{wi} - r_{si})} = 38.000 \text{ min}^{-1}$$

Die beim herkömmlichen Innenschleifen im Verhältnis zur Schleifscheibendrehung geringe Werkstückdrehzahl kann vernachlässigt werden. Die zuvor für das drehzahlsynchrone Innenschleifen berechnete Mindestdrehzahl entspricht somit der gleichen Drehzahl, die für das herkömmliche Innenschleifen mit dem lt. Norm maximalen Schleifscheibendurchmesser von 10 mm erforderlich ist.

Im Gegensatz zum drehzahlsynchronen Außenschleifen ist beim Innenschleifen mit gleichen Drehzahlen die Umfangsgeschwindigkeit des Werkstücks höher als jene der Schleifscheibe. Das Werkstück hat hier im Vergleich zur Innenschleifscheibe die größere radiale Ausdeh-

nung. Wenn die sich am Umfang dreimal wiederholende Geometrie des Polygonprofils ausgenutzt wird, kann die Schleifscheibendrehzahl im Verhältnis zur Werkstückdrehzahl um bis zu 200% erhöht werden.

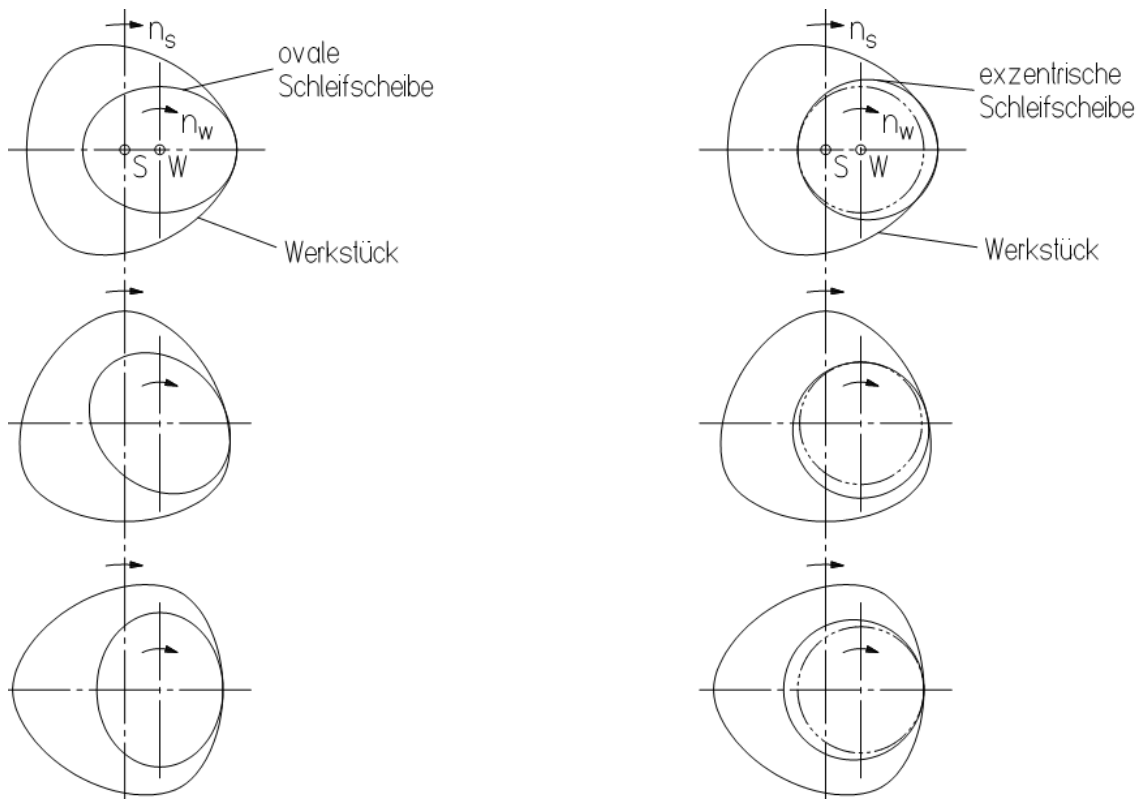


Bild 5-14: Drehzahlsynchrones Innenschleifen eines Polygonprofils im Gleichlauf bei unterschiedlichen Drehzahlverhältnissen zwischen Werkstück und Schleifscheibe (links: $i_v = 3:2$, rechts: $i_v = 3:1$)

Die aufgrund der Geometrie des Polygonprofils möglichen Drehzahlverhältnisse mit einer höheren synchronen Schleifscheibendrehzahl sind in Bild 5-14 dargestellt. Werden wieder dieselben beispielhaften Zahlenwerte wie bei Drehzahlverhältnis 1:1 verwendet, ist die Mindestdrehzahl der ovalen Schleifscheibe:

$$n_{smin} = \frac{1000 * 60 * v_{relmin}}{2 * \pi * \left(r_{wi} * \frac{2}{3} - r_{si} \right)} = 573.000 \text{ min}^{-1}$$

Dagegen ist die Mindestdrehzahl¹ der geometrisch nicht ausgewuchteten, exzentrischen Schleifscheibe:

$$n_{smin} = \left| \frac{1000 * 60 * v_{relmin}}{2 * \pi * \left(r_{wi} * \frac{1}{3} - r_{si} \right)} \right| = 44.000 \text{ min}^{-1}$$

¹ Um einen positiven Zahlenwert für die Mindestdrehzahl zu erhalten ($r_{wi} * \frac{1}{3} - r_{si} < 0$) wird in der nachfolgenden Berechnung der Betrag gebildet.

Eine Erhöhung der Schleifscheibendrehzahl im Verhältnis zur Werkstückdrehzahl hat die zur Erreichung einer bestimmten Relativgeschwindigkeit zwischen Werkzeug und Werkstück notwendige Schleifscheibendrehzahl nicht verkleinert, sondern erhöht.

Eine Erhöhung der Relativgeschwindigkeit beim Gleichlaufschleifen ist möglich, wenn das Verhältnis von Schleifscheiben- zu Werkstückdrehzahl verkleinert wird. In Bild 5-15 ist das Innenschleifen bei einem Drehzahlverhältnis von 1:2 dargestellt. Es ist jedoch erkennbar, dass die vorgegebene Geometrie nicht exakt gefertigt werden kann.

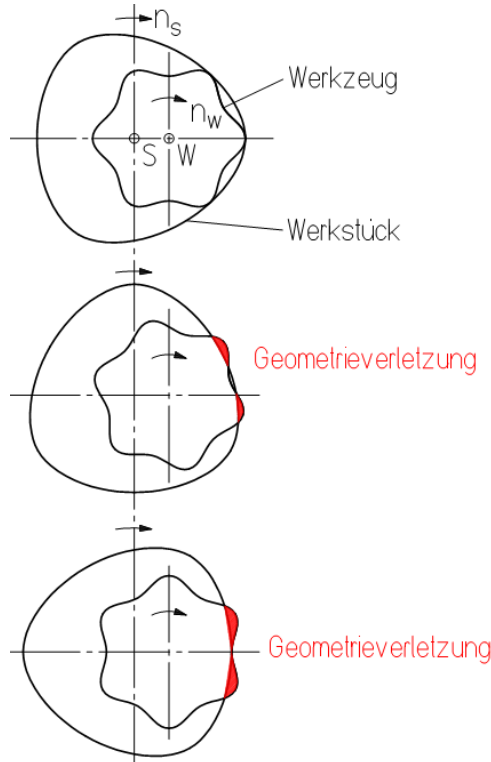


Bild 5-15: Drehzahlsynchrones Innenschleifen im Gleichlauf mit $i_v = 1:2$

Wesentlich höhere Relativgeschwindigkeiten, jedoch auch ähnliche Geometrieabweichungen, ergeben sich beim Gegenlaufschleifen. Wie zuvor beim Gleichlaufschleifen mit Verkleinerung des Drehzahlverhältnisses sind bei gegengesetzt gerichteten Umfangsgeschwindigkeiten nur Werkstücke fertigbar, die relativ kleine radiale Abweichungen von der Kreisform aufweisen. Die Bearbeitung des beispielhaft untersuchten Polygonprofils sowie die beim Gegenlaufschleifen mit Drehzahlverhältnis 1:1 entstehende Geometrieverletzung am gefertigten Werkstück ist in Bild 5-16 dargestellt.

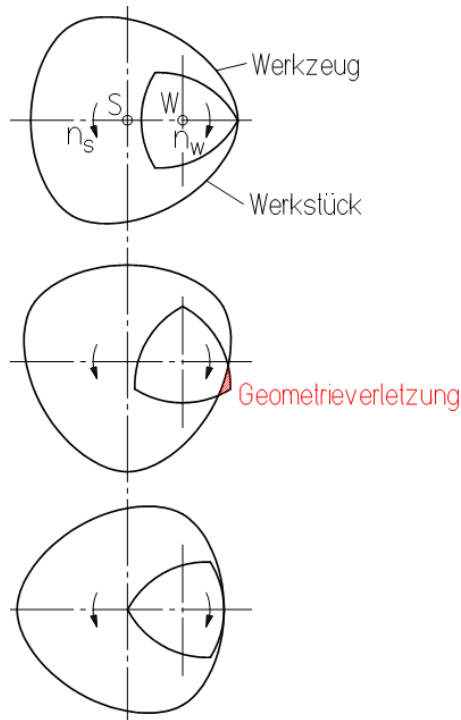


Bild 5-16: Drehzahlsynchrones Innenschleifen im Gegenlauf mit $i_v = 1:1$

Die Untersuchungen zum drehzahlsynchronen Innenschleifen eines Polygonprofils zeigen, dass gegenüber dem herkömmlichen Innenschleifen mit einer kreisrunden Schleifscheibe größere Schleifscheiben verwendet werden können. Zur Erreichung einer entsprechenden Schnittgeschwindigkeit sind vergleichbar hohe Schleifscheibendrehzahlen wie beim herkömmlichen Innenschleifen erforderlich. Beim drehzahlsynchronen Innenschleifen sind jedoch zusätzlich sehr hohe Werkstückdrehzahlen erforderlich.

5.7 Beeinflussung der ungleichmäßigen Schleifscheibenabnutzung

Bild 5-17 zeigt den Querschnitt einer beispielhaften Nockenscheibe mit geraden Flanken. Durch die Unrundheit des Werkstücks entsteht beim Schleifen mit einer unrunden Schleifscheibe, wie bereits in Abschnitt 4.4 dargestellt, eine ungleichmäßige Verteilung der Werkstückzerspanung am Schleifscheibenumfang. Die Schleifscheibenbereiche mit einer erhöhten Schleifscheibenabnutzung verursachen letztlich auch höhere Werkzeugkosten, da die Schleifscheibe in kürzeren Intervallen abgerichtet bzw. ausgetauscht werden muss.

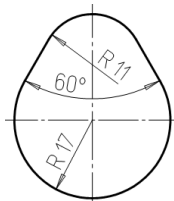


Bild 5-17: Nockenquerschnitt

In Bild 5-18 ist die Verteilung der (auf den Zerspanungsmittelwert) bezogenen Zerspanung (vgl. Abschnitt 4.4) am Schleifscheibenumfang beim Gleichlaufschleifen der zuvor gezeigten Nockenform mit Drehzahlverhältnis 1:1 dargestellt. Für die Berechnung wird ein Schleifscheibenaußenmaß von 500 mm verwendet. Es ist erkennbar, dass jene Schleifscheibenbereiche, welche die Flanken des Werkstücks bearbeiten, gemessen am Durchschnitt eine fünfmal höhere Zerspanungsleistung erbringen und sich dementsprechend rascher abnützen.

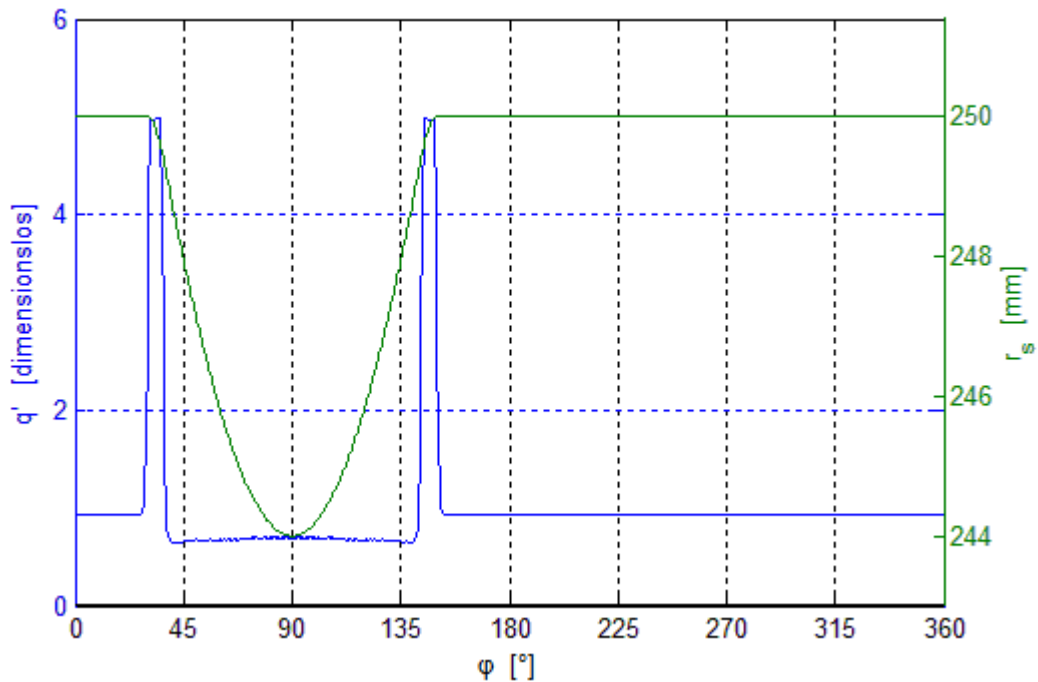


Bild 5-18: Bezogene Zerspanung am Schleifscheibenumfang bei der Nockenbearbeitung im Gleichlauf mit Drehzahlverhältnis 1:1 und Schleifscheibendurchmesser 500 mm

Im Nachfolgenden wird untersucht, wie die ungleiche Verteilung der Abtragsleistung verbessert werden kann. Ein Drehzahlverhältnis mit einer im Vergleich zur Werkstückdrehung höheren Schleifscheibendrehzahl ist durch die Nockengeometrie nicht möglich. Ebenso kann ohne Verletzung der Werkstückgeometrie, aufgrund der unendlich großen Krümmungsradien an den Werkstückflanken, nur im Gleichlauf geschliffen werden (s. Abschnitt 5.4). Als Grenzen werden ein durch die Schleifmaschine bedingter maximaler Schleifscheibendurchmesser von 600 mm und als nutzbarer Minimumwert 300 mm angenommen.

In Bild 5-19, Bild 5-20 und Bild 5-21 sind die Ergebnisse für die Schleifscheibendurchmesser 600 und 300 mm bei den Drehzahlverhältnissen $i_v = n_s : n_w = 1:1$, $1:2$ und $1:4$ dargestellt. Es

ist ersichtlich, dass sich die Höchstwerte der Zerspanung im fast selben Verhältnis wie die Schleifscheibendurchmesser verkleinern. Eine Verkleinerung des Verhältnisses zwischen Schleifscheiben- und Werkstückdrehung um die Hälfte bewirkt eine Verkleinerung des Zerspanungshöchstwertes um ca. ein Drittel.

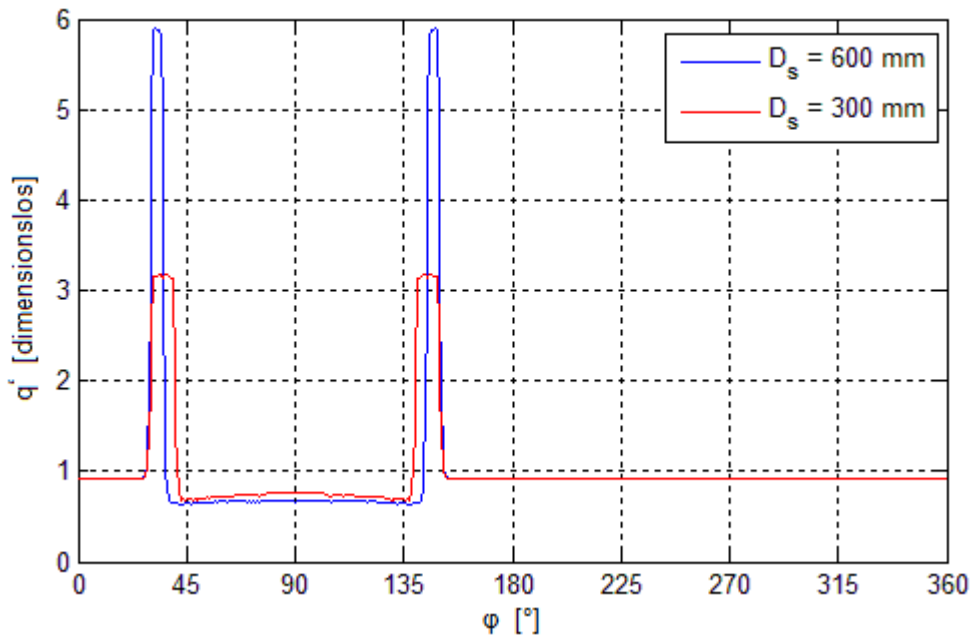


Bild 5-19: Bezogene Zerspanung am Schleifscheibenumfang beim Gleichlaufschleifen mit Drehzahlverhältnis 1:1

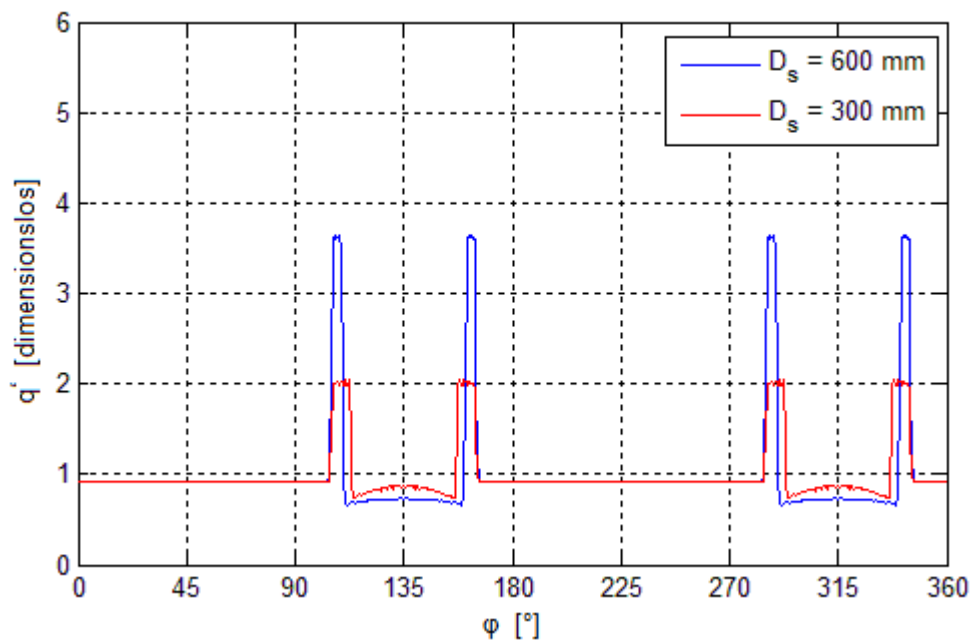


Bild 5-20: Bezogene Zerspanung am Schleifscheibenumfang beim Gleichlaufschleifen mit Drehzahlverhältnis 1:2

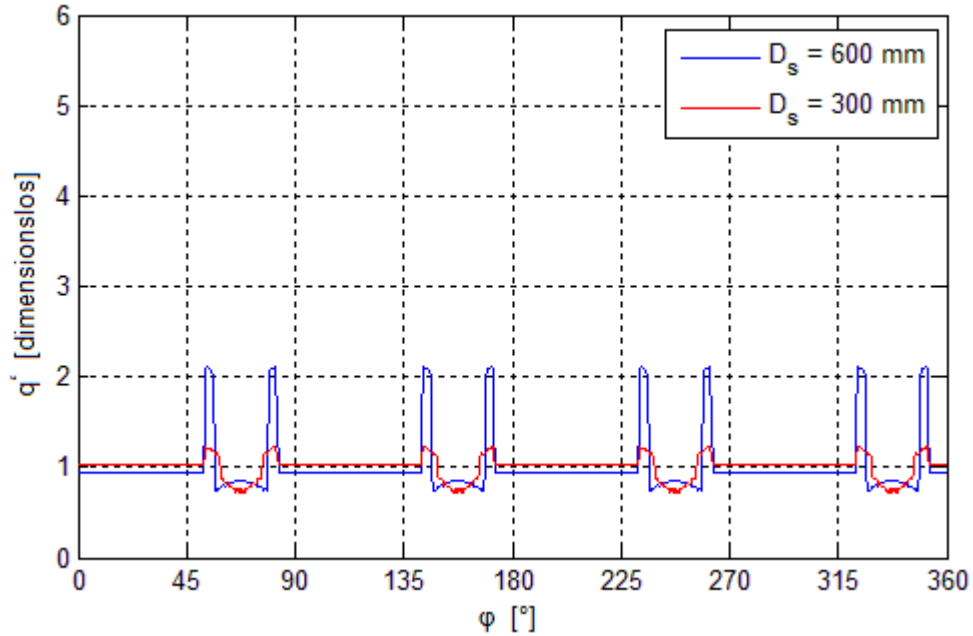


Bild 5-21: Bezogene Zerspanung am Schleifscheibenumfang beim Gleichlaufschleifen mit Drehzahlverhältnis 1:4

Um die verschleißbedingten Werkzeugkosten zu verringern, soll eine möglichst gleichmäßige Verteilung der Zerspanungsleistung am Schleifscheibenumfang angestrebt werden. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass eine Verkleinerung des Schleifscheibendurchmessers oder des Drehzahlverhältnisses die ungleichmäßige Verteilung der Zerspanung am Schleifscheibenumriss verbessert. Durch diese Änderungen werden jedoch die Relativgeschwindigkeiten zwischen Schleifscheibe und Werkstück am Berührungspunkt herabgesetzt. Um die Relativgeschwindigkeiten wieder zu steigern, müssen die Schleifscheiben- und die dazu synchrone Werkstückdrehzahl entsprechend erhöht werden.

Die Standzeiten der Schleifscheibe werden durch jene Stellen des Schleifscheibenumfangs bestimmt, welche am stärksten beansprucht werden. Im Vergleich zum herkömmlichen Pendelhubschleifen sind daher beim drehzahlsynchronen Unrundschleifen, infolge der ungleichmäßigen Schleifscheibenabnutzung, höhere Werkzeugkosten zu erwarten. Die Bearbeitungskosten beim Schleifen werden im Wesentlichen durch die Bearbeitungszeiten bestimmt. Die Werkzeugkosten haben i. Allg. nur einen eher untergeordneten Anteil an den Gesamtkosten der Schleifbearbeitung. Nur aufgrund von höheren Werkzeugkosten kann keine Aussage über die Kosteneffizienz des drehzahlsynchronen Unrundschleifens abgeleitet werden.

6 Anwendungen für das drehzahlsynchrone Unrundscheifen

Das drehzahlsynchrone Unrundscheifen verlagert die beim herkömmlichen Unrundscheifen notwendige Pendelhubbewegung des Schleifsupports vom individuellen Werkstückbearbeitungsprozess auf den in größeren Zeitabständen erforderlichen Abrichtprozess. Dadurch gewinnt der Gesamtprozess erheblich an Effizienz. Bei der Verwendung von CBN-Schleifkörpern bzw. einer mit Diamantsplittern belegten Schleifscheibe entfällt das Abrichten entweder komplett, oder es ist nur in großen Zeitabständen erforderlich. Neben der bereits in Abschnitt 5.3 gezeigten Bearbeitung von konkaven Werkstücken werden nachfolgend weitere potentielle Anwendungsfälle für das drehzahlsynchrone Unrundscheifen aufgezeigt.

6.1 Dreidimensionales drehzahlsynchrones Unrundscheifen

Das Schleifen von dreidimensionalen Werkstückoberflächen ist prinzipiell im Pendelhubschleifverfahren mit simultaner Bewegung von drei Achsen (C-, X- und Z-Achse) möglich. Dies bedingt jedoch verhältnismäßig lange Schleifzeiten und eine ballig geformte Schleifscheibe (Bild 6-1).

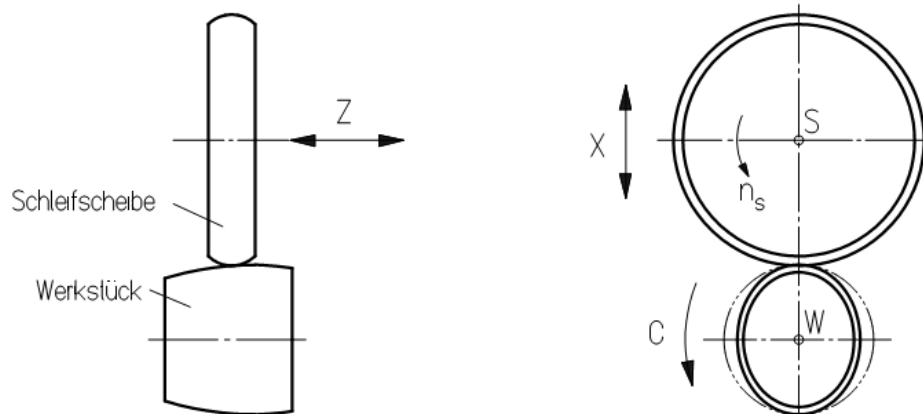


Bild 6-1: Pendelhubschleifen eines unrunden und nicht zylindrischen Werkstücks mit einer ballig geformten kreisrunden Schleifscheibe

Ein großer Vorteil beim drehzahlsynchronen Unrundscheifen ergibt sich daraus, dass entlang der Z-Achse eine Querschnittsänderung in die Schleifscheibe eingearbeitet werden kann. Im Vergleich zum herkömmlichen Unrundscheifen entfällt bei der Bearbeitung von unrunden und nicht zylindrischen Werkstücken mit einer dreidimensional geformten Schleifscheibe sowohl die radiale Pendelbewegung in X-Richtung, als auch die Längsbewegung in Z-Richtung. Einzig eine vergleichsweise langsam ablaufende radial gerichtete Einstechbewegung, mit welcher das Materialaufmaß abgetragen wird, ist erforderlich. Somit sind mit

diesem Schleifverfahren auch Werkstückgeometrien effizient herstellbar, welche durch Pendelhubschleifen nur mit einem erheblichen zeitlichen Mehraufwand und simultaner Bewegung von mindestens drei Maschinenhauptachsen bearbeitet werden können.

Das Abrichten einer dreidimensional geformten Schleifscheibe, sofern es überhaupt erforderlich ist, erfolgt aus Flexibilitätsgründen zweckmäßigerweise mit einem kreisrunden, umlaufenden Formabrichtrad durch Pendelhubabrachten (Bild 6-2). Kennzeichnend ist, dass die Drehachse des Abrichtrades in Abhängigkeit zur aktuellen Drehlage der Schleifscheibe radial verschoben wird. Zusätzlich erfolgt auch eine Verschiebung des Abrichtrades in axialer Richtung. Dadurch entspricht der Bewegungsablauf des Abrichtrades relativ zur Schleifscheibe einer unrunder und nicht zylindrischen Schraubenlinie. Der in radiale Richtung wirkende Bewegungsanteil ist wiederum die Summe von zwei Einzelbewegungen: dem vom herkömmlichen Pendelhubschleifen bekannten Pendelhub, jedoch ausgeführt vom Abrichtwerkzeug, und der bekannten Abrichtzustellbewegung als überlagerte Bewegung. Letztere ist im Regelfall eine diskontinuierliche, diskrete, sehr langsam bzw. in sehr kleinen Zustellschritten ablaufende Bewegung. Das Abrichtrad wird völlig unabhängig von den vorhin genannten Maschinenhauptachsen mit beliebig einstellbarer Drehzahl um seine eigene Drehachse angetrieben. Die eigene Drehachse des Abrichtrades ist eine nicht gesteuerte Hilfsachse.

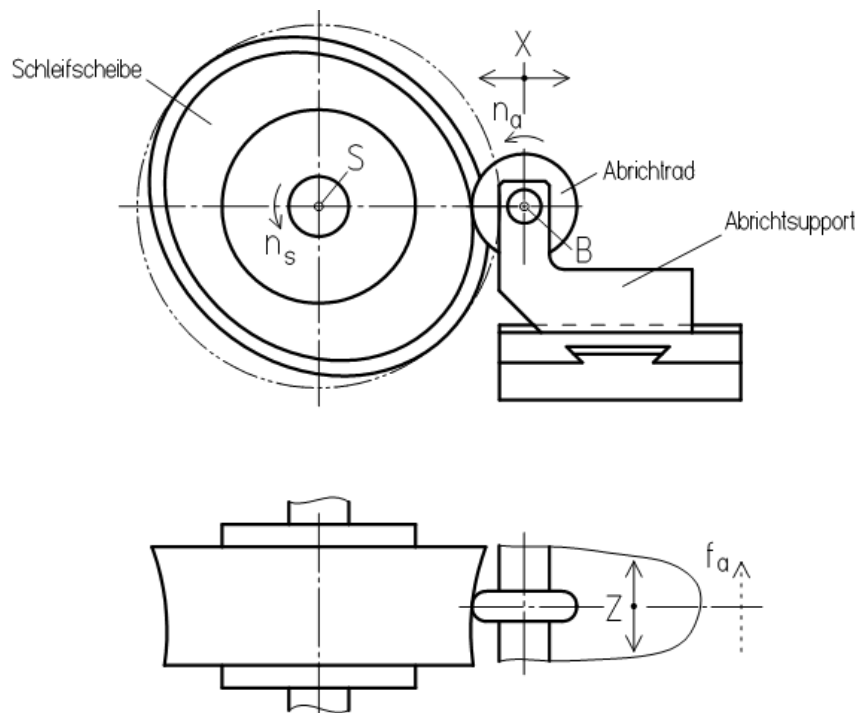


Bild 6-2: Unrundes und nicht zylindrisches Abrichten einer Schleifscheibe mit einem im Querschnitt kreisrunden Abrichtrad [ABL12a]

Eine andere Möglichkeit des unrunden und in Axialrichtung nicht zylindrischen Abrichtens zeigt Bild 6-3. Hier wird ein entsprechender unrunder, nicht zylindrischer Formkörper als Abrichtwerkzeug verwendet. Dieser Formkörper ist (wie vorhin das kreisrunde Abrichttrad) mit einer Hartstoffschicht (CBN oder Diamant) versehen, die eine höhere Härte als die Schleifscheibe aufweist. Hier ist die einzige Linearbewegung des Abrichtwerkzeugs die radial gerichtete Zustellbewegung zur Überwindung des Abrichtbetrags. Sie kann kontinuierlich ablaufen (continuous dressing). Hierbei steht die Schleifscheibendrehbewegung in einem rationalen Drehzahlverhältnis mit der Drehbewegung der Abrichtformrolle.

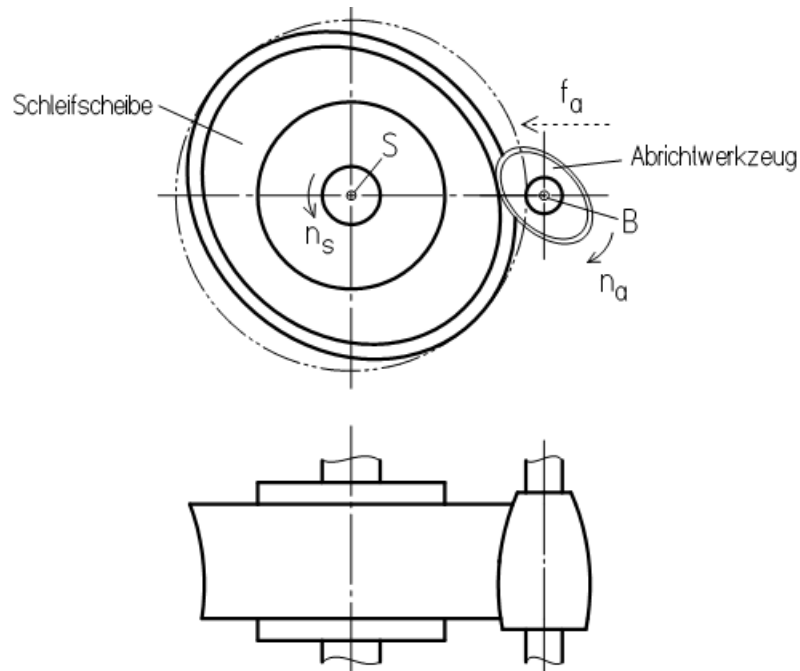


Bild 6-3: Unrundes und nicht zylindrisches Abrichten der Schleifscheibe mit einem der Werkstückform angepassten Abrichtwerkzeug [ABL12a]

Als nachteilig erweist sich jedoch, dass beim drehzahlsynchronen Schleifen im Einstechverfahren, durch die fehlende Längsbewegung in Z-Richtung, größere Rauheiten an der Werkstückoberfläche entstehen. Diese Oberflächenrauheiten sind allerdings durch die Schleif- bzw. Abrichtparameter beeinflussbar, wie später in Abschnitt 7.2.1 gezeigt wird.

6.1.1 Unrundschleifen von Kolben für Brennkraftmaschinen

Aktuelle Anforderungen an Kolben für Brennkraftmaschinen in Lastkraftwagen erfordern den Werkstoff Stahl. Nach heutigem Stand der Technik werden Stahlkolben nicht geschliffen, sondern lediglich außen unrund gedreht. Dies hat eine relativ raue Oberfläche und damit tribologische Nachteile zur Folge. Mit der Verfeinerung der Oberflächenrauheit verursacht ein Kolben im umgebenden Zylinder weniger Gleitreibung und Verschleiß. Eine längere Lebens-

dauer der Brennkraftmaschine, ein geringerer Kraftstoffverbrauch und in weiterer Folge eine Reduktion des CO₂-Ausstoßes werden zunächst unterstellt.

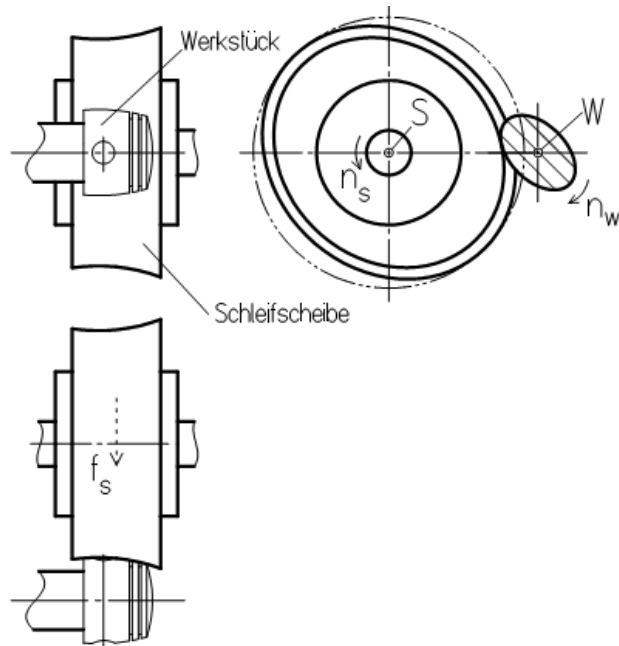


Bild 6-4: Drehzahlsynchrones Einstechschleifen eines unrunder und nicht zylindrischen Kolbens [ABL12a]

Das Schleifen von Stahlkolben ist schon heute prinzipiell im "schälenden" Pendelhubschleifverfahren mit simultaner Bewegung von drei Achsen (C-, X- und Z-Achse) möglich. Dies bedingt jedoch verhältnismäßig lange Schleifzeiten. Das Schleifen einer Kolbengeometrie mit einer dreidimensional geformten Schleifscheibe (Bild 6-4) stellt somit ein erhebliches Effizienzsteigerungspotential bei der Schleifbearbeitung dar.

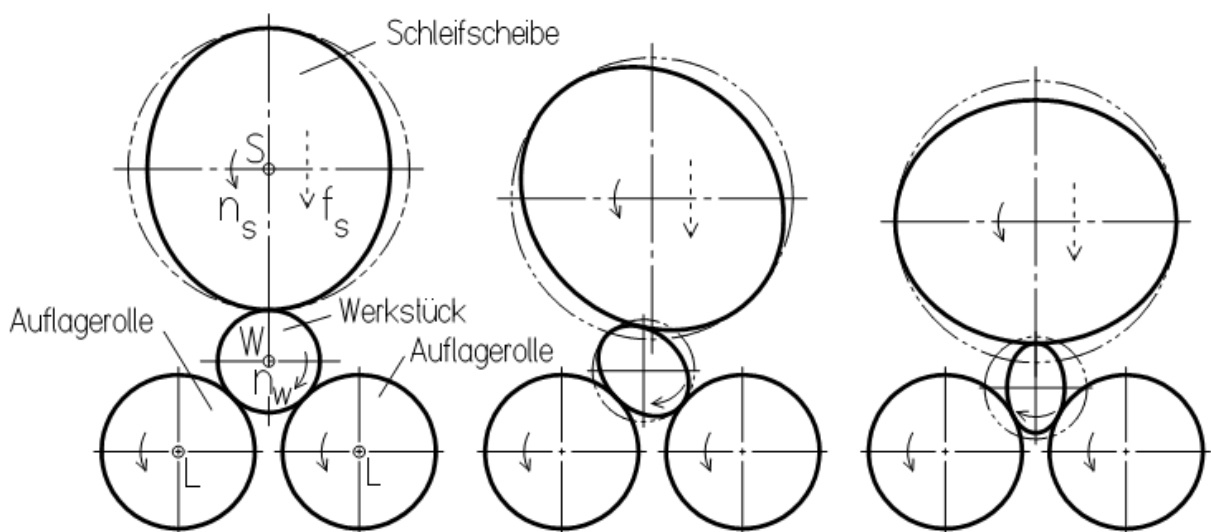


Bild 6-5: Spitzenlosschleifen eines unrunder Kolbenquerschnitts mit Verwendung von kreisrunden, frei drehbar gelagerten Auflagerrollen [ABL12a]

Eine andere Bearbeitungsmethode für unrunde und nicht zylindrische Werkstücke zeigt die Schutzrechtsanmeldung [ABL12a]. Das Werkstück ist bspw. ein Kolben einer Brennkraftmaschine, welche in Lastkraftwagen eingesetzt wird. Er ist radial nicht gespannt, sondern beweglich zwischen zwei Auflagerrollen und der Schleifscheibe geführt. Bild 6-5 zeigt die Zustellbewegung der Schleifscheibe zu unterschiedlichen Zeitpunkten des Schleifprozesses. Links ist die Anfangsstellung am Beginn des Schleifablaufs dargestellt. In der Mitte des Bildes ist eine Zwischenposition und schließlich rechts die Situation am Ende des Schleifvorgangs dargestellt. Wie beim herkömmlichen Spitzenlosschleifen von im Querschnitt kreisrunden Werkstücken ist auch hier die radiale Lage der Werkstückdrehachse im Bearbeitungsprozess nicht konstant, sondern sie verändert sich. Im Vergleich zum herkömmlichen Spitzenlosschleifen ist die Lageänderung der Drehachse nicht nur vom Aufmaß, sondern auch zusätzlich von der Unrundheit des Werkstücks abhängig.

Im Gegensatz zur Schleifscheibe haben die Auflagerrollen jeweils einen kreisrunden Querschnitt. Sie sind frei drehbar gelagert und werden nicht angetrieben. Zwischen dem Werkstück und dem Werkzeug, der Schleifscheibe, ist ein elektronisches Getriebe zur Sicherstellung der Synchronisation der Drehbewegungen geschaltet. Eine andere Rollenvariante zeigt Bild 6-6. Dort haben die Auflagerrollen einen an die Kolbengeometrie angepassten unrunder Querschnitt und drehen sich synchron zur Werkstück- und Schleifscheibendrehung. In diesem Fall werden die unrunder Auflagerrollen ebenfalls über ein elektronisches Getriebe mit der Werkstück- und Schleifscheibendrehzahl angetrieben.

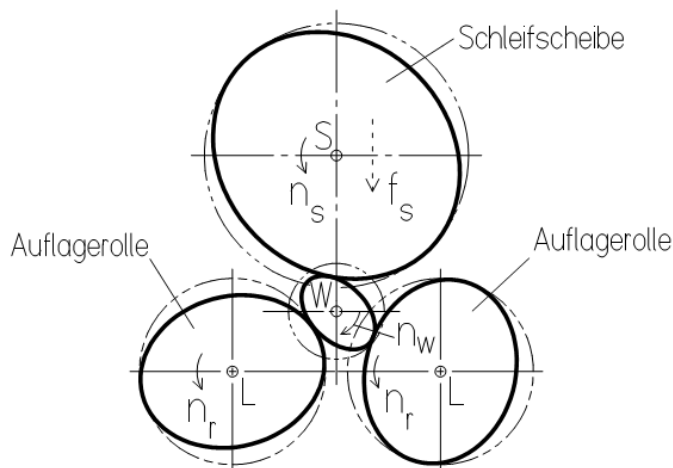


Bild 6-6: Spitzenlosschleifen eines Kolbenquerschnitts mit Verwendung von unrunder, synchron angetriebenen Auflagerrollen [ABL12a]

Der Vorteil dieser Variante besteht darin, dass sich zumindest beim Ausfeuern der Achsabstand zwischen dem Werkstück und der Schleifscheibe sowie zu den Auflagerrollen nicht ändert. Damit wird eine höhere Präzision im Schleifergebnis erwartet. Unabhängig von der angewendeten Querschnittsform sind die Auflagerrollen in axialer Richtung entweder zylindrisch ausgebildet oder der balligen Form des Werkstücks angepasst (Bild 6-7).

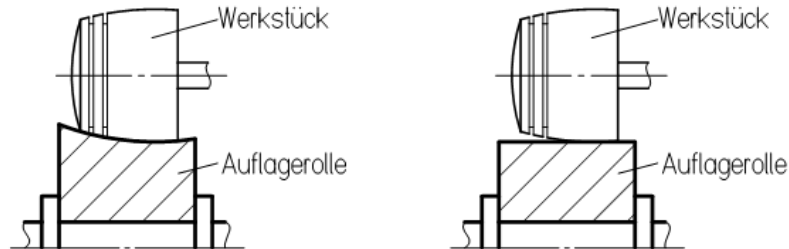


Bild 6-7: Formen der Auflagerrollen in axialer Richtung beim spitzenlosen Kolbenschleifen [ABL12a]

Als wesentliches Unterscheidungsmerkmal zum herkömmlichen Spitzenlosschleifen muss beim „Spitzenlos-Unrundschleifen“ eine schlupffreie Synchronisation zwischen der Werkstück- und Schleifscheibendrehung gewährleistet sein.

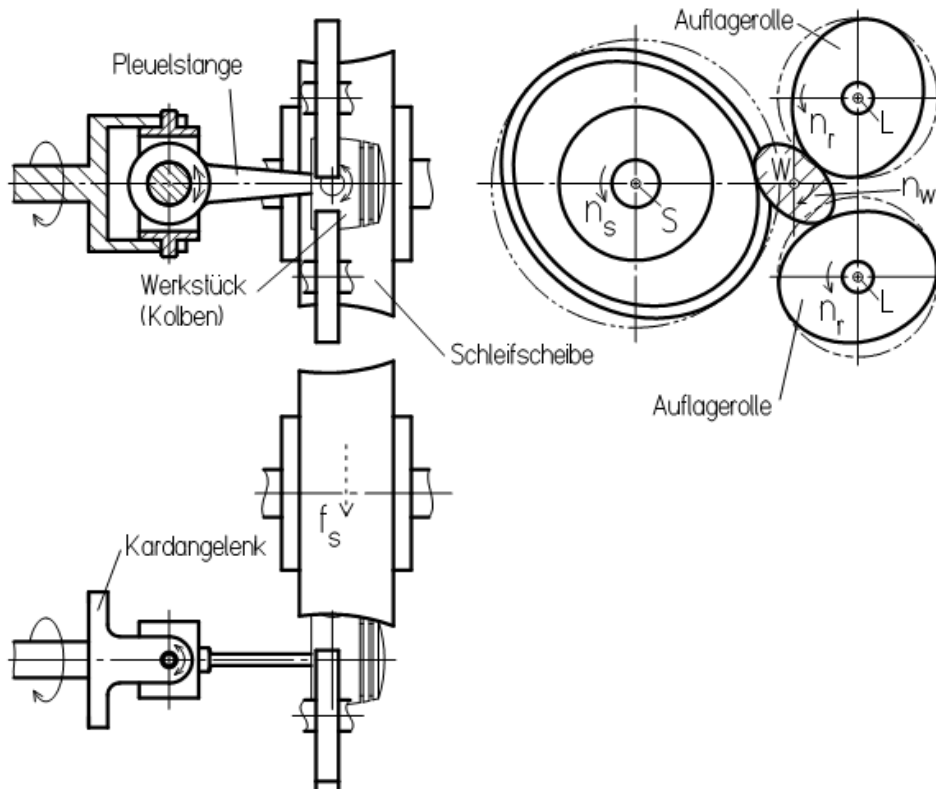


Bild 6-8: Übertragung der Drehbewegung beim spitzenlosen Kolbenschleifen [ABL12a]

Bild 6-8 zeigt eine Möglichkeit, wie die Werkstückdrehung beim Kolbenschleifen zweckmäßig herbeigeführt wird. Das Werkstück ist auf einer Pleuelstange montiert. Die Drehbewegung der nicht gezeichneten Werkstückspindel wird bspw. über ein Kardangelenk auf die Pleuelstange und in weiterer Folge auf das Werkstück übertragen. Damit entspricht die Aufnahme des Kolbens auf der Pleuelstange der späteren Montagesituation in der Brennkraftmaschine.

6.1.2 Schleifen exakt kegeliger Unrundprofile

Beim herkömmlichen Pendelhubschleifen sind kegelige Werkstücke herstellbar, indem die Schleifscheibenachse gegenüber der Werkstückachse geschwenkt, oder die Schleifscheibe kegelig abgerichtet wird. Allerdings sind mit diesen Bearbeitungsmethoden und simultaner Bewegung von C- und X-Achse nur quasi kegelige Unrundprofile herstellbar, da die Erzeugenden des gefertigten Kegels sich nicht in einem Punkt schneiden (vgl. Abschnitt 3.4.2).

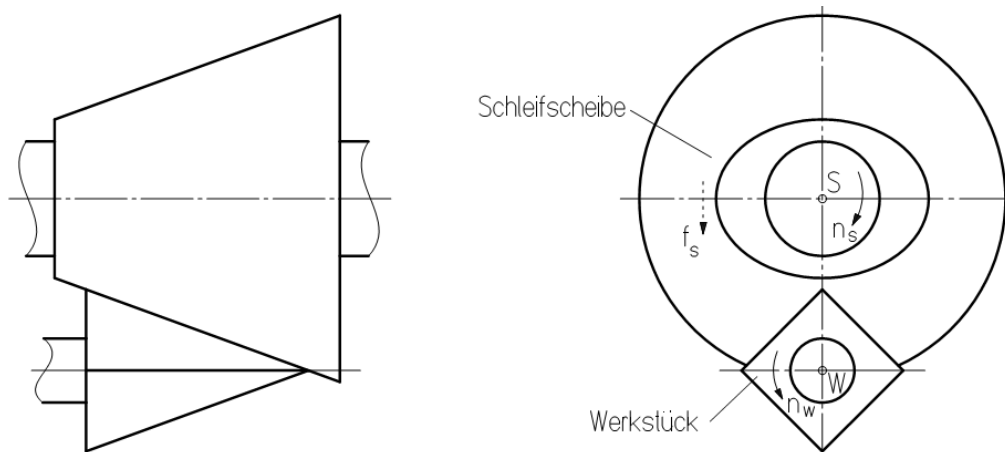


Bild 6-9: Drehzahlsynchrones Unrundschleifen einer (exakt kegeligen) Pyramide mit einer radial gerichteten linearen Vorschubbewegung mit Drehzahlverhältnis $i_v = n_s : n_w = 2 : 1$

Beim drehzahlsynchronen Unrundschleifen ist eine entsprechende Querschnittsänderung der Schleifscheibe in Längsrichtung umsetzbar. Dadurch ist es mit einer dreidimensional geformten Schleifscheibe möglich, exakt kegelige Unrundprofile herzustellen. In Bild 6-9 ist das drehzahlsynchrone Schleifen einer quadratischen Pyramide dargestellt, bei der sich die Erzeugenden in einem Punkt schneiden. Somit ist das Werkstück ein exakter Kegel.

6.1.3 Herstellung exakter Unrundprofile beim Schrägeinsteichschleifen

Das Schrägeinsteichschleifen ist ähnlich dem Kegelschleifen mit einer Schrägstellung der Schleifscheibenachse gegenüber der Werkstückdrehachse. Hierbei wird allerdings kein kegeliges Werkstück mit einer zylindrischen Schleifscheibe, sondern ein zylindrisches Werk-

stück mit einer kegeligen Schleifscheibe bearbeitet. Beim herkömmlichen Pendelhubschleifen mit simultaner Bewegung von C- und X-Achse sind zylindrische Werkstücke mit einem unrunder Querschnitt im Schrägeinstechverfahren nur mit einer Abweichung von der Sollgeometrie herstellbar (vgl. Abschnitt 3.4.3). Im Gegensatz dazu ist beim drehzahlsynchronen Schrägeinstechschleifen die exakte Fertigung des Werkstücks mit einer entsprechenden dreidimensional geformten Schleifscheibe möglich. Voraussetzung hierfür ist eine Schleifscheibe, deren Querschnittsprofil sich entlang ihrer Drehachse (entlang der Z-Achse) in inkrementellen Abständen, dem aktuellen Drehachsenabstand angepasst, verändert. Bild 6-10 zeigt die Bearbeitung eines Vierkants beim drehzahlsynchronen Schrägeinstechschleifen.

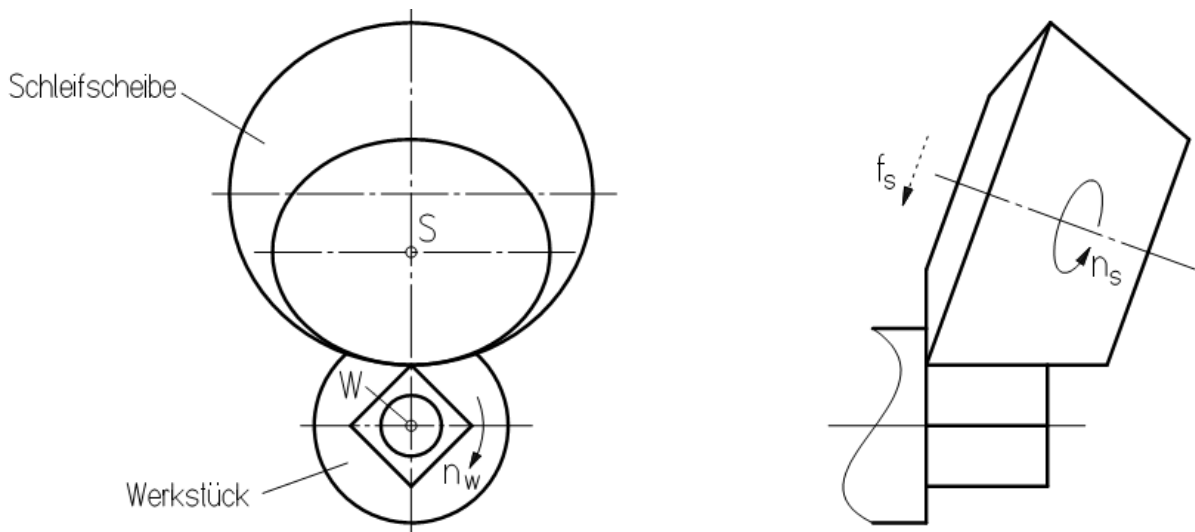


Bild 6-10: Drehzahlsynchrones Schrägeinstechschleifen mit Drehzahlverhältnis

$$i_v = n_s : n_w = 2 : 1$$

6.1.4 Schleifen von schraubenförmigen Geometrien

Schraubenförmige Geometrien, bspw. Gewindeprofile, lassen sich beim drehzahlsynchronen Unrundscheifen ohne Längsbewegung in Z-Richtung mit einer einzigen Zustellbewegung fertig schleifen. Durch den Entfall der Längsbewegung kann der Auslauf bzw. Schleiffreistich am Werkstück zwischen Schraubengeometrie und Planfläche sehr gering ausfallen. Anstelle des rechtwinklig zur Drehachse ausgeführten Vorschubs in X-Richtung ist mit der schraubenförmigen Schleifscheibe auch ein Schrägeinstechen ausführbar.

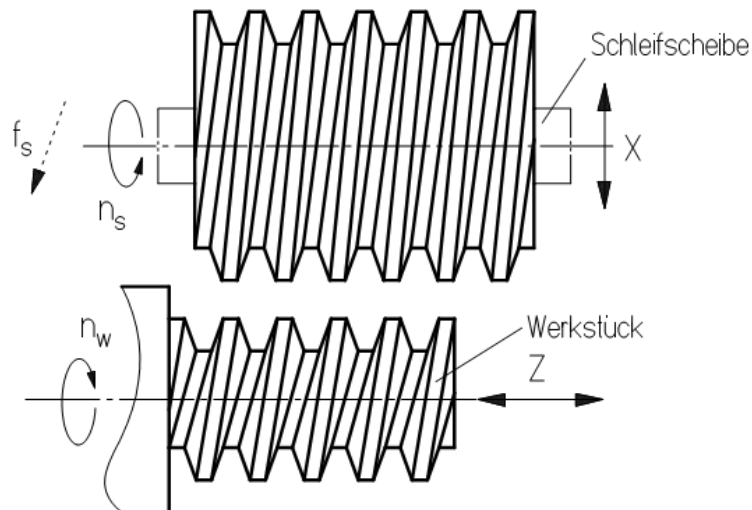


Bild 6-11: Drehzahlsynchrones Schleifen einer schraubenförmigen Werkstückgeometrie und Mitbearbeitung der Planfläche bei achsparalleler Anordnung der Drehachsen

Im Gegensatz zum herkömmlichen Schleifen von schraubenförmigen Geometrien ergibt sich dabei die Möglichkeit, auch bei achsparalleler Anordnung von Werkstück- und Schleifscheibenachse (durch simultane X-Z-Bewegung) eine Planfläche mitzubearbeiten (Bild 6-11).

6.2 Schleifen von unrunder Nabenprofilen mit kleinen Krümmungsradien

Beim drehzahlsynchronen Innenschleifen mit gleicher Drehrichtung und gleicher Winkelgeschwindigkeit von Schleifscheiben- und Werkstückdrehung ist das Schleifscheibenprofil ein zum Werkstückquerschnitt äquidistantes Profil. Daher bestimmt beim drehzahlsynchronen Innenschleifen der kleinste Krümmungsradius des Werkstücks den größten äquidistanten Profilabstand und in weiterer Folge die Mindestgröße der Schleifscheibe (vgl. Abschnitt 5.6).

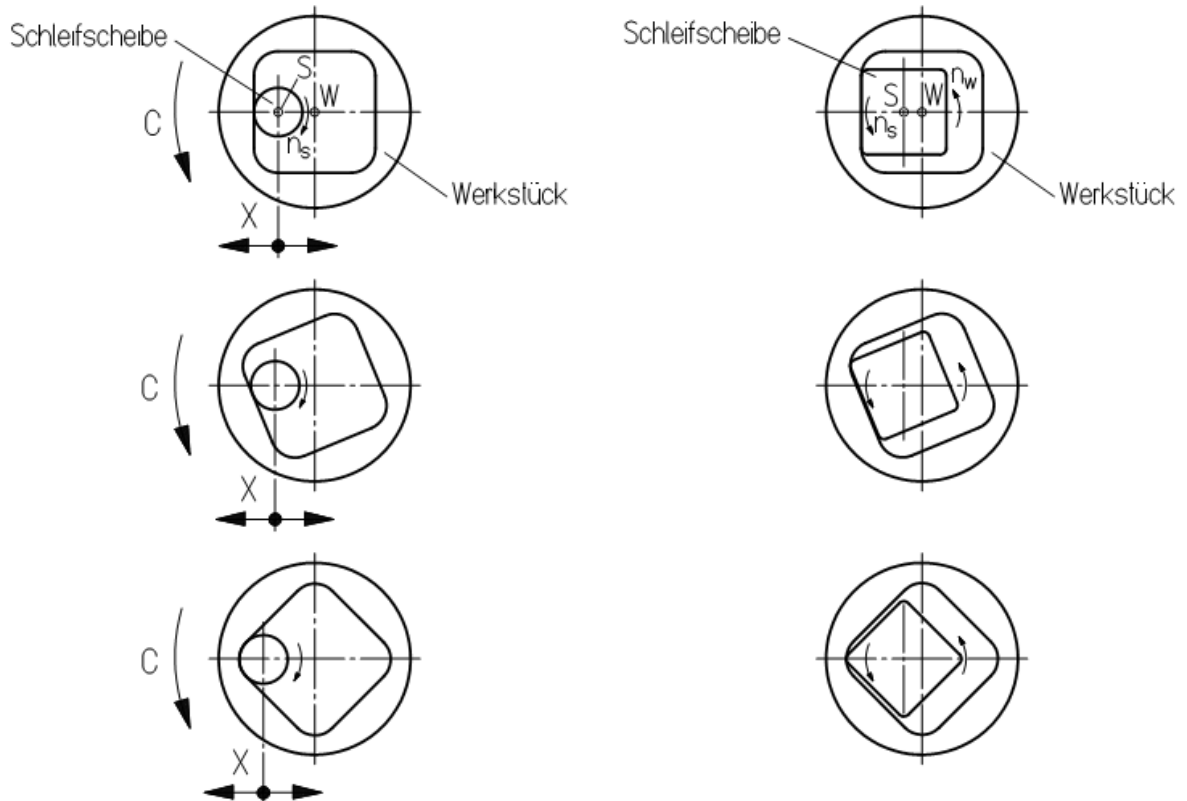


Bild 6-12: Herkömmliches und drehzahlsynchrones Innenschleifen eines Vierkantprofils mit abgerundeten Ecken

Bild 6-12 zeigt das Innenschleifen eines Vierkantprofils mit abgerundeten Ecken sowohl mit einer kreisrunden, als auch mit einer ungerunden Schleifscheibe. Der wesentlich größere Querschnitt der ungerunden Schleifscheibe im Vergleich zur kreisrunden erlaubt die deutlich biegesteifere Ausführung der Schleifscheibenwelle. Die infolge der Schleifkräfte entstehende Verformung am Schleifwerkzeug ist geringer. Somit sind im Vergleich zum herkömmlichen Innenschleifen von Werkstücken mit kleinen Krümmungsradien höhere Schleifleistungen möglich.

6.3 Unrundscheifen von Nockenscheiben einer Nockenwelle

Je größer und länger eine Nockenwelle ist, umso größer muss auch die sie bearbeitende Schleifmaschine ausgeführt werden. Mitunter werden die Maschinenkosten durch die Maschinengröße bestimmt, wodurch kleinere Einzelteile oftmals kostengünstiger bearbeitbar sind. Daher gilt es zu überlegen, ob die Bearbeitung der Nockenscheiben als Einzelteile im Vergleich zur bisher üblichen Bearbeitung der bereits zusammengebauten Nockenwelle nicht von Vorteil ist.

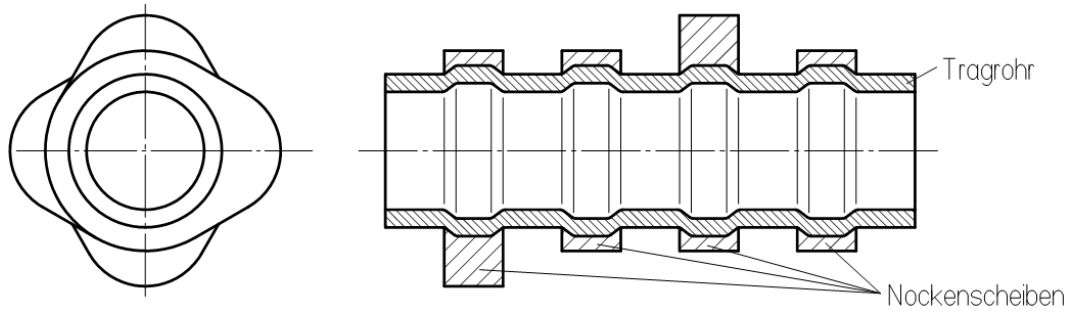


Bild 6-13: Durch Innenhochdruckfügen gebaute Nockenwelle

Gebaute Nockenwellen (Bild 6-13) für schwere Lkw-Motoren sind deutlich über einen Meter lang, wodurch relativ teure Schleifmaschinen notwendig sind und die Werkstücke beim Schleifen mit Lünetten abgestützt werden müssen. Bei gebauten Nockenwellen besteht ein Absenkungspotential der Stückkosten dahingehend, dass die einzelnen Nockenscheiben schon vor dem Fügen auf kleinen, kompakten Sonderschleifmaschinen außen unrund geschliffen werden.

6.3.1 Maschinenkonzepte zum Schleifen von Nockenscheiben

Eine Maschine zum drehzahlsynchronen Schleifen von Nockenscheiben hat im einfachsten Fall zwei Drehachsen, je eine für die synchrone Werkstück- und Schleifscheibendrehung. Hinzu kommt eine lineare Achse für die radiale Zustellbewegung in X-Richtung (Bild 6-14).

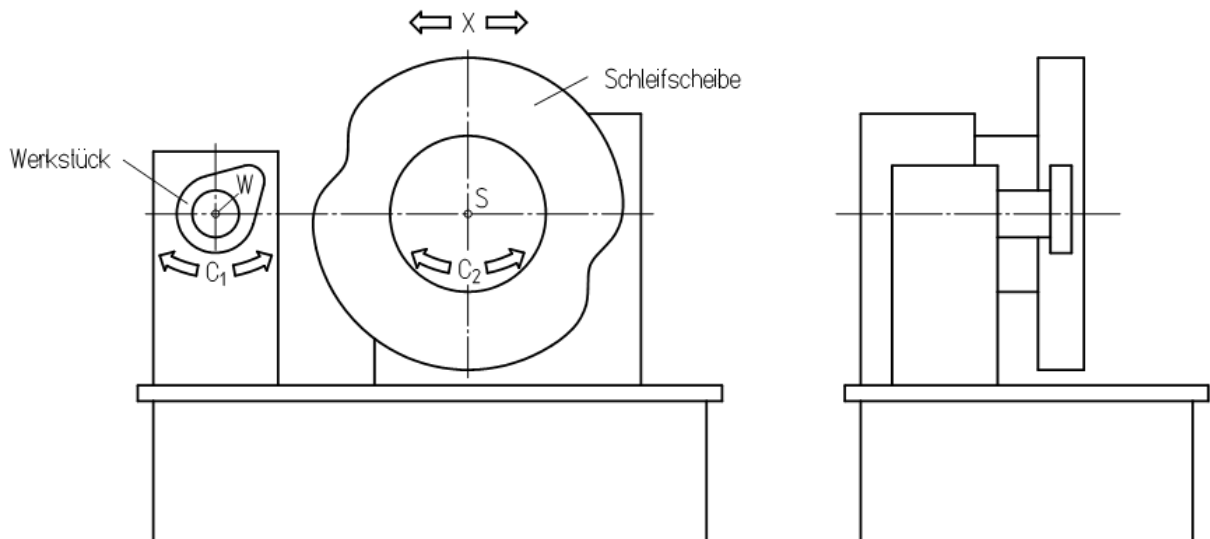


Bild 6-14: Unrundscheifmaschine zum Nockenschleifen mit zwei Drehachsen und einer Linearachse

Bei der Verwendung galvanisch gebundener CBN- oder Diamantschleifscheiben entfällt das Abrichten. Damit erübrigen sich an der Maschine alle zum Abrichten notwendigen Einrichtun-

gen und Werkzeuge. Mit dieser äußerst kompakten und kostengünstigen Unrundschleifmaschine ist nur das Schleifen im Einstechverfahren möglich, was eine höhere Oberflächenrauheit der geschliffenen Werkstücke verursacht. Durch die Erweiterung der zuvor gezeigten Maschine um eine lineare Achse in Z-Richtung wird durch eine Oszillation in Längsrichtung die Oberflächengüte der bearbeiteten Werkstücke verbessert (Bild 6-15). Konstruktiv kann die Z-Achse wahlweise am Schleif- oder Werkstückspindelstock ausgeführt sein.

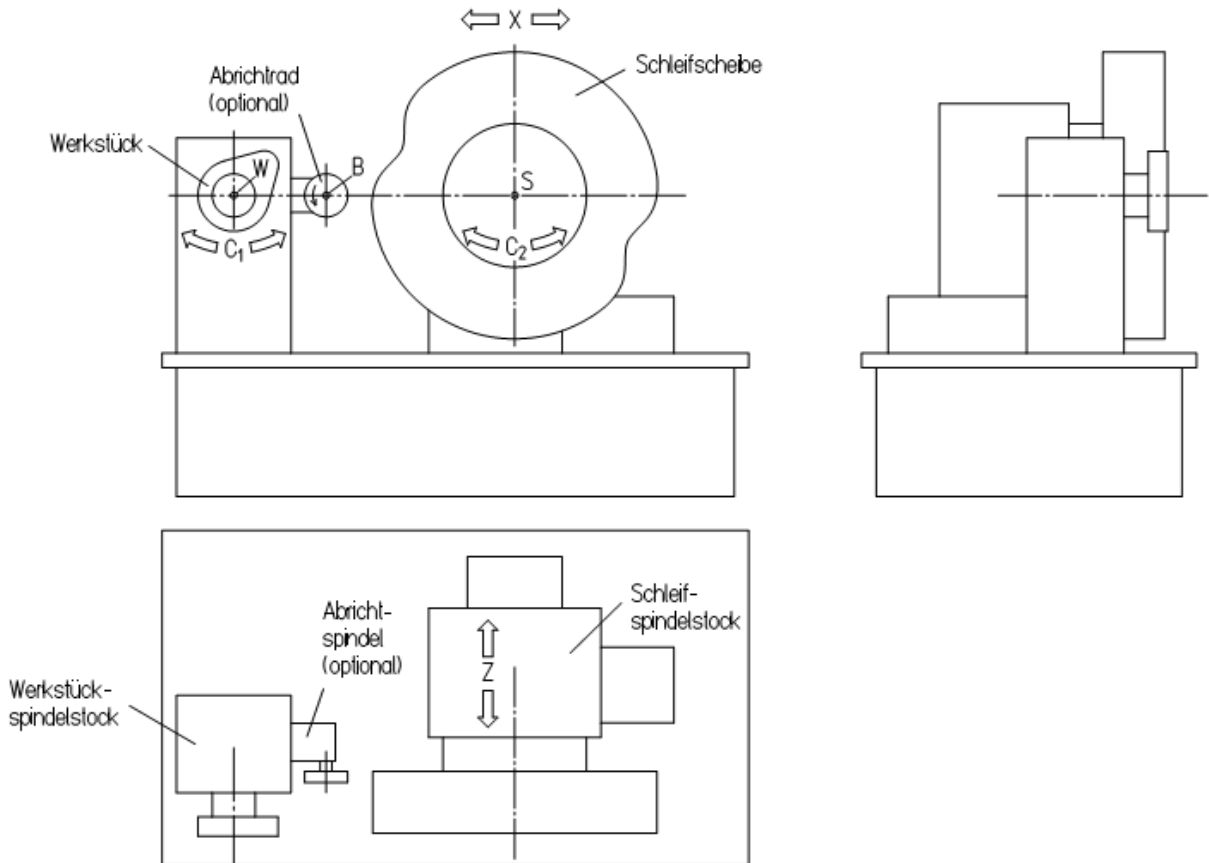


Bild 6-15: Unrundschleifmaschine zum Nockenschleifen mit zwei Drehachsen, zwei Linearachsen und einer optionalen Abrichtspindel

Bei der Verwendung einer Abrichtspindel mit einem im Querschnitt runden Diamantabrichtrad ist ein flexibles und kostengünstiges Abrichten einer beliebigen unrunder Schleifscheibengeometrie möglich. Die Anfertigung relativ teurer, vorgeformter, formgebundener Abrichtwerkzeuge ist nicht erforderlich. Die Drehachse des auf der Abrichtspindel montierten Abrichtrades ist dabei eine nicht gesteuerte Hilfsachse.

Zur Steigerung der Produktivität werden mehrere Nockenscheiben in axialer Richtung nebeneinander gespannt und gleichzeitig mit einer einzigen radial gerichteten Zustellbewegung geschliffen (Bild 6-16). Zwischen den Nockenscheiben ist ggf. eine Abstützung mit einer

Lünette vorzusehen. Im Vergleich zur Parallelbearbeitung aller Nocken einer Nockenwelle mit einem Schleifscheibensatz, wie in der Einführung in Bild 1-3 gezeigt, steigert sich die Produktivität erheblich. Bei gleicher Bearbeitungslänge wird eine höhere Anzahl an Nocken geschliffen.

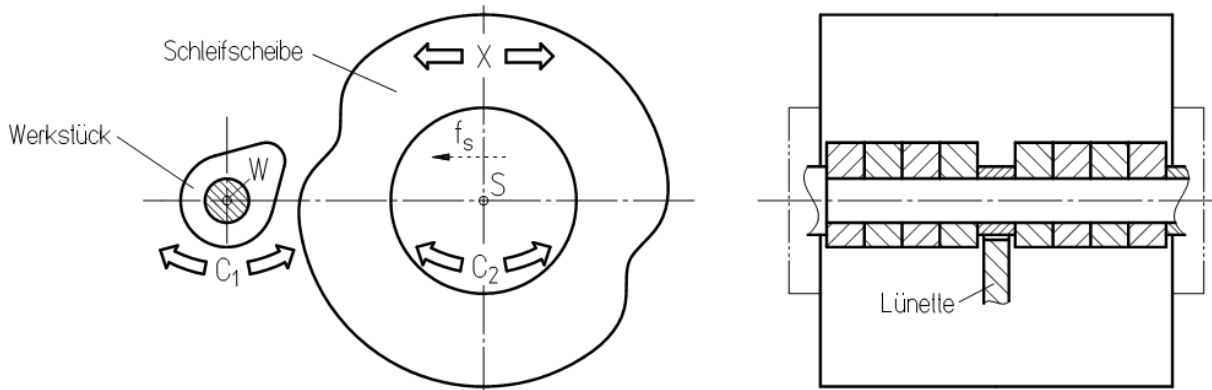


Bild 6-16: Gleichzeitige Bearbeitung mehrerer Nockenscheiben mit einer einzigen radial gerichteten Zustellbewegung

Prinzipiell ist diese Anordnung zur gleichzeitigen Bearbeitung mehrerer Nockenscheiben auch beim herkömmlichen Unrundscheifen möglich. Bei der Verwendung einer voluminösen Schleifscheibe wirkt sich jedoch die hohe Masse des gesamten Schleifspindelstocks bei der notwendigen Pendelhubbewegung nachteilig aus. Dadurch sind dort im Vergleich zum drehzahlsynchronen Unrundscheifen der Schleifleistung bzw. der Anzahl der gleichzeitig bearbeitbaren Werkstücke engere Grenzen gesetzt.

6.3.2 Ausgleich der Unwuchtkräfte beim Nockenschleifen

Beim drehzahlsynchronen Schleifen einer Nockenform mit gleicher Winkelgeschwindigkeit von Schleifscheiben- und Werkstückdrehung entsteht eine geometriebedingte Schleifscheibenunwucht. In Abschnitt 3.5.7 wurde gezeigt, wie eine Schleifscheibenunwucht durch an der Schleifmaschine angebrachte Auswuchteinrichtungen ausgeglichen werden kann. Diese Auswuchtverfahren sind eher für das Feinwuchten geeignet. Für stark unsymmetrische Schleifscheibenprofile sind hierzu andere Maßnahmen ergänzend bzw. vorbereitend erforderlich. Im nachfolgenden werden noch weitere Möglichkeiten zum Ausgleich der durch die Unwucht entstehenden Fliehkräfte angeführt.

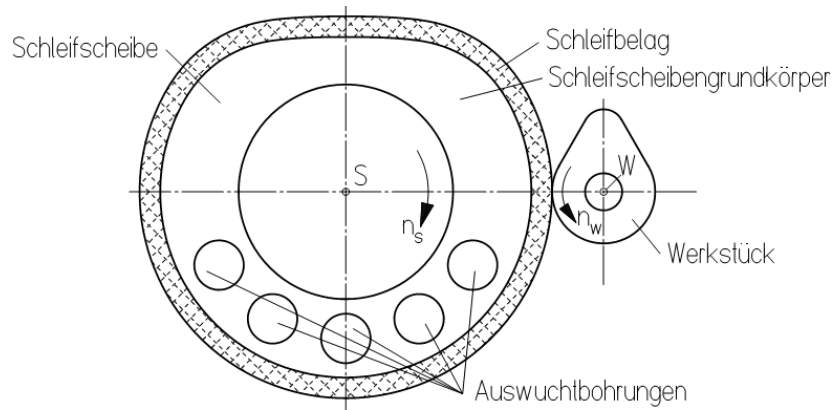


Bild 6-17: Ausgleich der Schleifscheibenunwucht durch Ausgleichsbohrungen

Bei Schleifscheiben, die nur am Umfang mit einer Schleifschicht (bspw. CBN) belegt sind, ist ein Vorauswuchten des Werkzeugs durch im Grundkörper angebrachte Bohrungen möglich (Bild 6-17). Bei der Verwendung von Korund- oder Siliziumkarbidschleifscheiben werden anstelle des Grundkörpers die Flansche, mit welchen die Schleifscheibe an der Arbeitsspindel gespannt wird, mit Ausgleichbohrungen versehen.

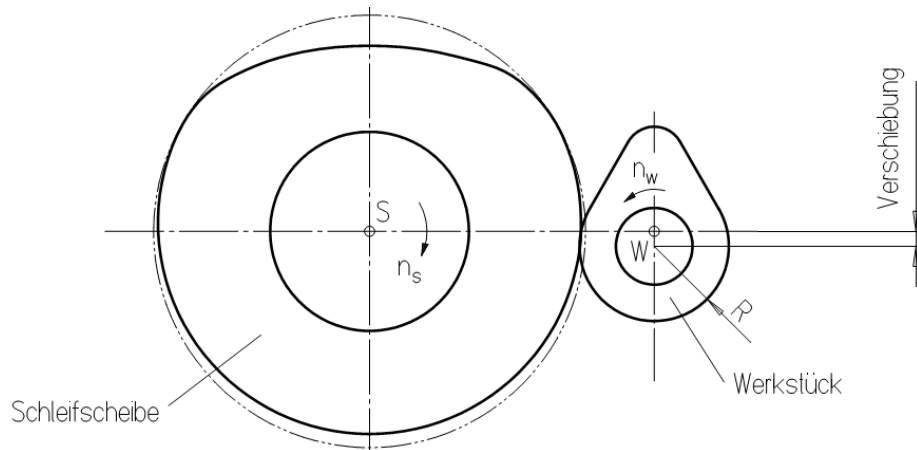


Bild 6-18: Ausgleich der Schleif- und Nockenscheibenunwucht durch eine exzentrische Werkstückspannung

Eine weitere Möglichkeit zum Ausgleich der Unwucht ist in Bild 6-18 dargestellt. Dabei wird die Nockenscheibe nicht zentrisch im Radiusmittelpunkt, sondern durch eine radiale Verschiebung exzentrisch aufgespannt. Dadurch verkleinert sich der Abstand zwischen dem Massenmittelpunkt und der Drehachse sowohl beim Werkstück als auch bei der Schleifscheibe. Die Folge ist, dass sich die Unwucht am Gesamtsystem reduziert. Für einen der Wirkpartner ist es sogar möglich, die Unwuchtkräfte gänzlich auszugleichen. Das Werkstück muss exzentrisch so gespannt werden, dass entweder beim Werkstück oder bei der Schleifscheibe die Schwerpunkts- und Drehachse deckungsgleich sind.

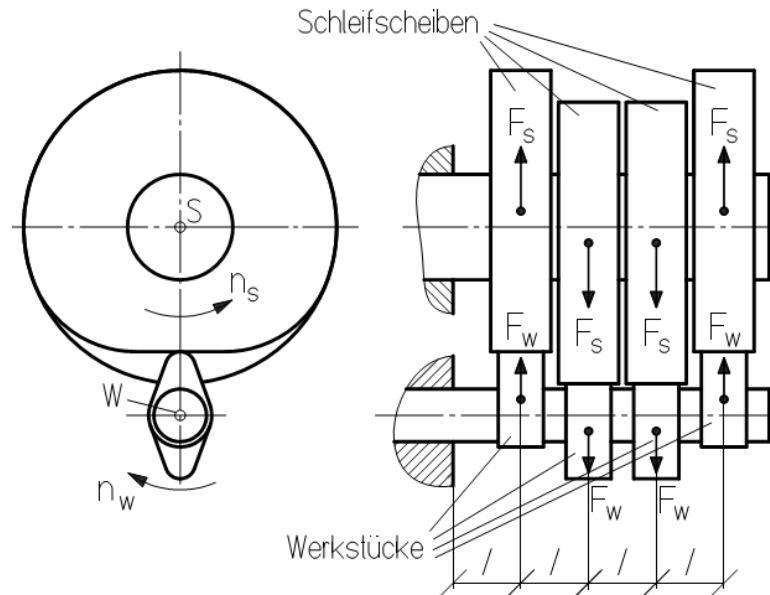


Bild 6-19: Ausgleich der Unwuchtkräfte durch gegenseitiges Verdrehen der Werkstücke in der Aufnahmevorrichtung

Für bspw. Nockenscheiben lässt sich die Unwucht durch gegenseitiges Verdrehen der Werkstücke in der Aufnahmevorrichtung ausgleichen. Die Schleifscheiben sind hierbei ebenfalls gegenseitig verdreht und somit in Summe ausgewuchtet (Bild 6-19).

6.3.3 Nockenschleifen mit einer dreidimensional geformten Schleifwalze

Die abrasive Wirkung der Schleifscheibe entfaltet ihre technologische Wirkung am besten, wenn die Relativgeschwindigkeit zwischen der Schleifscheibe und dem Werkstück möglichst groß ist. Neben den Winkelgeschwindigkeiten sind nur die radialen Ausdehnungsunterschiede zwischen der Schleifscheibe und dem Werkstück im gemeinsamen Berührungspunkt für die Relativgeschwindigkeit verantwortlich. Im Arbeitsraum einer Schleifmaschine ist jedoch die radiale Größe der Schleifscheibe begrenzt. Andererseits lassen sich auch die Winkelgeschwindigkeiten nicht beliebig steigern. Durch das unrunde Abtragen am Werkstück verändert sich dessen Massenverteilung und die aufgrund der Werkstück-Unsymmetrie ohnehin vorhandene Unwucht nimmt mit der Drehzahl quadratisch zu. Die Höhe der Unwucht begrenzt letztlich die maximale Werkstückdrehzahl, somit die höchste erzielbare Relativgeschwindigkeit und damit letztendlich technologisch die maximale Zerspanungsleistung. Die am Umfang der Schleifscheibe zur Verfügung stehende Bogenlänge, in der das Werkstückprofil abgebildet wird, ist begrenzt. Wird nun das Drehzahlverhältnis zwischen der Schleifscheibe und dem Werkstück verkleinert, reduzieren sich die zur Verfügung stehende Bogenlänge am Schleifscheibenumfang und die Relativgeschwindigkeit. Damit nehmen auch

die Bearbeitungszeiten entsprechend zu. Deshalb ist eine Übersetzung zwischen der Schleifscheiben- und der Werkstückdrehung größer als eins anzustreben.

In der Schutzrechtsanmeldung [ABL12b] wird die Verwendung einer dreidimensional geformten Schleifwalze vorgeschlagen, welche zumindest partiell schraubenlinienartige Vertiefungen am äußeren Umfang aufweist. Die Nockenscheibe, welche in der Ausgangsgeometrie ein radiales Bearbeitungsaufmaß hat, ist auf einem drehbar angetriebenen Dorn befestigt und wird während ihrer Drehbewegung entlang ihrer Drehachse simultan verschoben. Die Schleifwalze weist entlang ihrer Drehachse in axiale Richtung drei Teilbereiche auf, die im Bild 6-20 mit "Einlaufzone" (kegelig oder zylindrisch ausgeführt), "Bearbeitungszone" und "Ausfeuerzone" bezeichnet sind. Die sog. "Einlaufzone" ist wegen möglicher Toleranzschwankungen am Rohteil erforderlich. Hier wird am Werkstück ein ggf. vorhandenes übermäßiges Werkstückaufmaß abgetragen. In der daran anschließenden kegeligen "Bearbeitungszone" erfolgt der definierte Abtrag der Bearbeitungszugabe (bzw. des Werkstückaufmaßes). In der dritten Zone, der sog. "Ausfeuerzone", werden eventuell in der vorherigen Zone als Folge der Schleifkräfte aufgetretenen Abdrängungen des Dorns und Durchbiegungen des Werkstücks korrigiert. Zudem ist diese Zone für die Erreichung der geforderten Oberflächenqualität verantwortlich. Je nach Prozessführung kann es vorteilhaft sein, zur Erreichung kürzerer Bearbeitungszeiten diesen Bereich in einer kürzeren Zeit zu durchlaufen, wozu die Drehgeschwindigkeiten des Werkstücks und der Schleifwalze im Zusammenwirken mit der linearen Bewegung definiert angehoben werden können. Dagegen kann es zum Erreichen einer möglichst guten Maßhaltigkeit und Oberflächenqualität erforderlich sein, diesen Bereich langsamer zu durchfahren und somit die Geschwindigkeit aller drei CNC-Achsen zu reduzieren. Eine andere Möglichkeit der Variation der Schnittgeschwindigkeit ist, bei unveränderten Drehbewegungen die Steigung der Vertiefung zu variieren. Die Veränderung der Steigung der Vertiefung bedingt eine entsprechende Veränderung der Werkstückverschiebegeschwindigkeit.

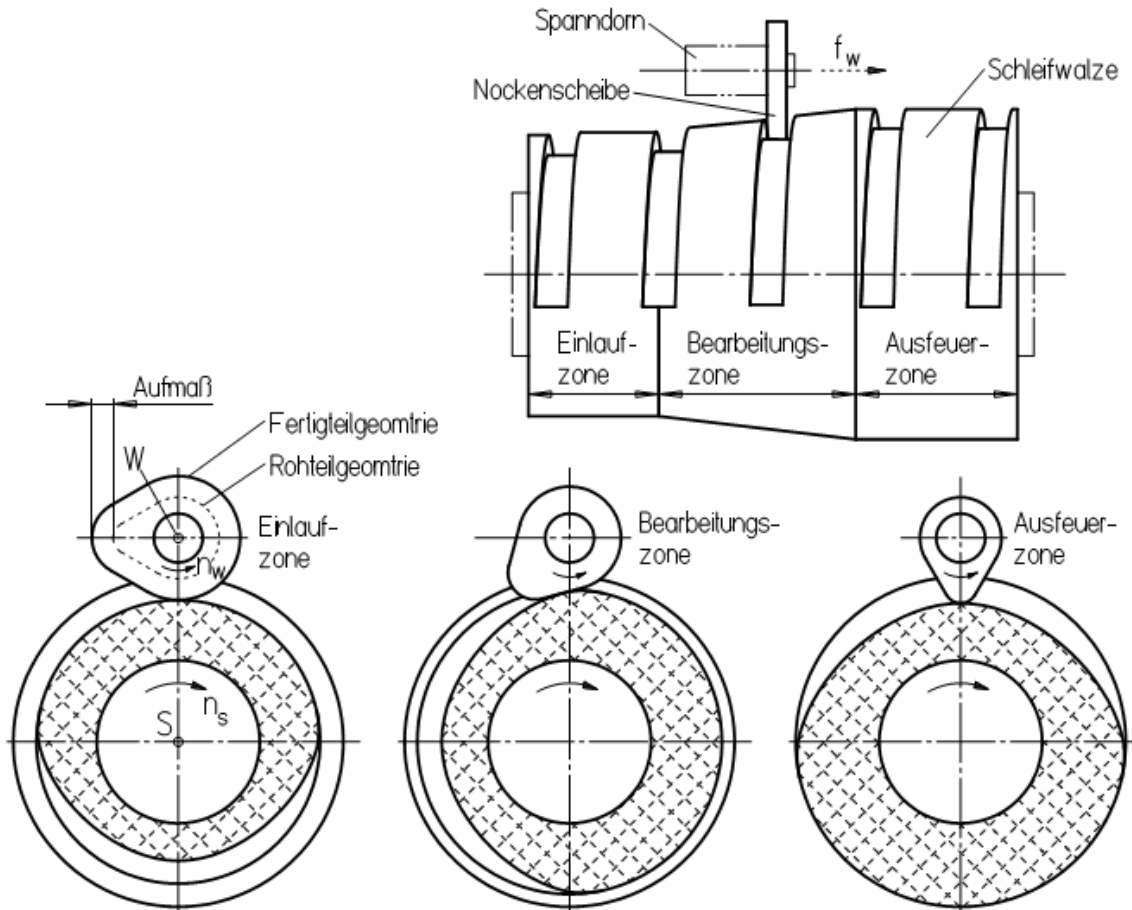


Bild 6-20: Nockenschleifen mit einer schraubenförmigen Schleifwalze bei Drehzahlverhältnis $i_v = n_s : n_w = 2 : 1$ [ABL12b]

Für das Schleifen von Nockenscheiben ist das Profil der Schleifwalze zumindest partiell unrund. Es ergibt sich aus der Geometrie des Werkstücks, dem gewählten Drehgeschwindigkeitsverhältnis zwischen der Werkstück- und der Schleifwalzendrehung sowie aus dem zu berücksichtigenden Schleifaufmaß. Zwischen der Werkstück- und der Schleifwalzendrehbewegung ist ein elektronisches Getriebe geschaltet, welches die Drehbewegungen der beiden Maschinenachsen in einem bestimmten rationalen Verhältnis zu einander synchronisiert. Hinzu kommt die dazu geregelte, überlagerte axiale Führung der Werkstückposition. Im interpolierenden CNC-Bahnbetrieb wird in Abhängigkeit der aktuellen Werkstück- bzw. Schleifwalzendrehlage das Werkstück gleichzeitig mit seiner Drehbewegung entlang seiner Drehachse relativ zur Schleifwalze verschoben. In Unterscheidung zu anderen Schleifverfahren vollführt das Werkstück relativ zur Schleifwalze (als Summe aller überlagerten Bewegungen) eine schraubenförmige Bewegung. Die Werkstückgeometrie wird nicht in einen maximal 360° umfassenden Bogen am Umfang der Schleifwalze abgebildet, sondern über einen erheblich größeren Winkelbereich entlang einer Schraubenfläche. Von erheblichem Vorteil

ist hier, dass mit einem deutlich größeren Drehzahlverhältnis als eins zwischen Schleifwalzen- und Werkstückdrehung gearbeitet wird. Die prinzipiellen kinematischen Zusammenhänge zu unterschiedlichen Zeitpunkten des Schleifprozesses sind in Bild 6-20 (unten) durch drei Seitenansichten dargestellt. In der ersten Ansicht ist die Anfangsstellung am Beginn des Schleifablaufs dargestellt. Die mittlere Ansicht zeigt eine Zwischenposition und die rechte Ansicht schließlich die Situation am Ende des Schleifvorgangs. Beim dargestellten Bearbeitungsbeispiel ist das Übersetzungsverhältnis zwischen der Schleifwalzen- und Werkstückdrehbewegung mit 2:1 gewählt. Während sich die Nockenscheibe einmal um die Achse dreht, dreht sich die Schleifscheibe zweimal um die Achse. Synchron zu den beiden Drehbewegungen um die Achsen erfolgt eine lineare Verschiebung des Aufnahmedorns mit dem Werkstück entlang bzw. in Richtung seiner Drehachse, sodass während der Bearbeitung stets drei CNC-Achsen in gegenseitiger Abhängigkeit stehen.

Ein weiteres Merkmal ist, dass der Schleifsupport relativ zum Werkstück keine radiale Zustellbewegung ausführt. Die Zustellbewegung für den Abtrag des Materialbearbeitungsmaßes ergibt sich aus der axialen Werkstückbewegung während des Schleifens in Verbindung mit der unrund und gleichzeitig kegelig abgerichteten Schleifwalze. Die Schleifwalze ist über ihre gesamte Breite (bzw. axiale Ausdehnung) nicht zylindrisch. Nachteilig beim Schleifen mit einer unrunder in axialer Richtung zylindrischen Schleifscheibe ist, dass sich aufgrund der Drehzahlsynchronisation Unregelmäßigkeiten an der Schleifscheibenoberfläche jeweils wieder an den gleichen Stellen im Werkstückprofil abbilden. Dieser Nachteil tritt hier nicht auf und letztendlich steht eine größere Werkzeugoberfläche für die Bearbeitung zur Verfügung.

Aufgrund der Unsymmetrie der Schleifwalze müssen geeignete Maßnahmen zur Beherrschung der Unwuchtkräfte getroffen werden. Dies kann bspw. durch das Anbringen entsprechender Gegenmassen oder durch Ausgleichsbohrungen an bzw. in den Aufnahmeflanschen der Schleifwalze erfolgen. Eine andere Möglichkeit ist die Einarbeitung einer zweiten gewindeähnlichen Vertiefung in die Schleifwalze. Die zwei Vertiefungen sind vergleichbar mit einem zweigängigen Gewinde, wobei der zweite „Gewindegang“ um 180° drehversetzt angeordnet ist. Dadurch wird nicht nur die Massenverteilung ausgeglichen. Ein besonderer Vorteil besteht darin, dass die Schleifwalze besser ausgenutzt wird. Ist bspw. die Schleifwalze durch Abrichten zu schärfen, kann zunächst durch eine gesteuerte 180°-Drehung der Schleifwalze um ihre Drehachse dieser Abrichtvorgang hinausgezögert werden. Es kann mit dem „zweiten Gewindegang“ weitergeschliffen werden, bis auch dieser abgerichtet werden muss. Die Schleifwalze als „Verbrauchsmaterial“ wird dadurch besser ausgenutzt. Beim

Abrichten wiederum können beide Vertiefungen hintereinander oder, bei der Verwendung entsprechender Werkzeuge, auch gleichzeitig abgerichtet werden.

Das gezeigte Unrundscheifen mit einer schraubenförmigen Schleifwalze ist nicht auf die Nockenbearbeitung beschränkt. Es bietet sich die Bearbeitung speziell jener Werkstücke an, bei der eine im Verhältnis zur Schleifscheibendrehzahl kleinere Werkstückdrehzahl erwünscht ist, diese jedoch bei der Verwendung einer zylindrischen Schleifscheibe aufgrund der Werkstückgeometrie nicht möglich ist.

6.3.4 Nockenschleifen mit axialer Zustellbewegung (Schälschleifen)

In Bild 6-21 ist die Bearbeitung einer Nockenscheibe dargestellt bei der das radiale Werkstückmaß durch eine Zustellbewegung in Längsrichtung abgetragen wird.

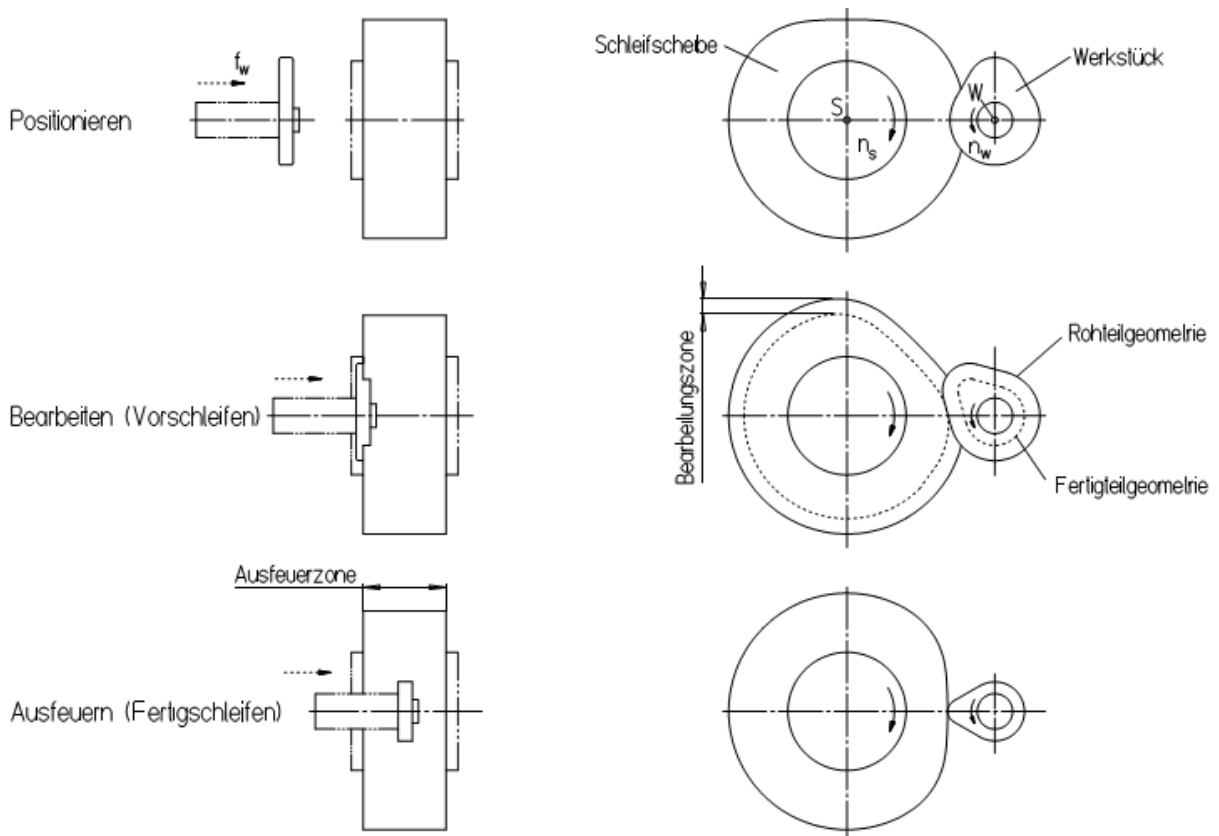


Bild 6-21: Nockenschleifen mit einer zylindrischen Schleifscheibe und axialer Vorschubbewegung

Der Abstand zwischen Werkstück- und Schleifscheibenachse bleibt konstant. Die abrasive Wirkung und der daraus resultierende Werkzeugverschleiß entstehen im Wesentlichen nur an der Planfläche des Schleifwerkzeugs. Dabei hat der zylindrische Schleifscheibenumfang die Funktion einer „Ausfeuerzone“. In ihr werden zuvor, infolge der Schleifkräfte eventuell

entstandene Maßabweichungen korrigiert, die aus Abdrängungen und Durchbiegungen resultieren. Ein besonderer Vorteil dieses Schleifverfahrens ist, dass ein verschleißbedingtes Abrichten der Schleifscheibe an der planen Stirnseite mit einer linearen Abrichtbewegung erfolgt. Somit sind auch stehende Abrichtwerkzeuge einsetzbar. Ein un rundes Abrichten des Schleifscheibenumfangs ist, wenn überhaupt, nur in großen Zeitabständen erforderlich.

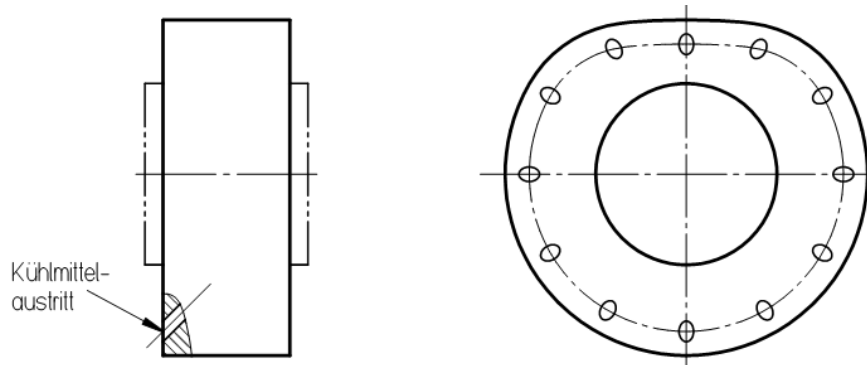


Bild 6-22: Unrunde Schleifscheibe mit Innenkühlung und planseitigem Kühlmittelaustritt

Zur Verbesserung der Kühlwirkung in der verdeckten Kontaktzone von Werkstück und Schleifscheibe wird vorgeschlagen, eine Schleifscheibe mit Innenkühlung zu verwenden. Jedoch muss gegenüber der in Abschnitt 3.3 gezeigten Schleifscheibe der Kühlmittelaustritt an der Planfläche des Werkzeugs erfolgen (Bild 6-22). Mit dem Einsatz einer kegeligen Schleifscheibe (vgl. Abschnitt 3.4.4) wird die Kontaktzone zwischen Schleifscheibe und Werkstück bei der Schruppbearbeitung vergrößert. Wenn mehrere Schleifscheiben mit unterschiedlicher Körnung in axialer Richtung nebeneinander angeordnet sind, ergibt sich zusätzlich zum Ausfeuern die Möglichkeit, die Werkstückoberflächenqualität zu beeinflussen. Es können auch Schleifscheiben mit unterschiedlichen Schleifmitteln eingesetzt werden, um bspw. eine Korundscheifscheibe und eine galvanisch gebundene CBN-Schleifscheibe mit besseren Verschleißigenschaften zu kombinieren.

In Bild 6-23 sind die auf die Werkstück- und Schleifscheibenspindel wirkenden axialen Schleifkräfte und die daraus resultierenden Biegemomente dargestellt.

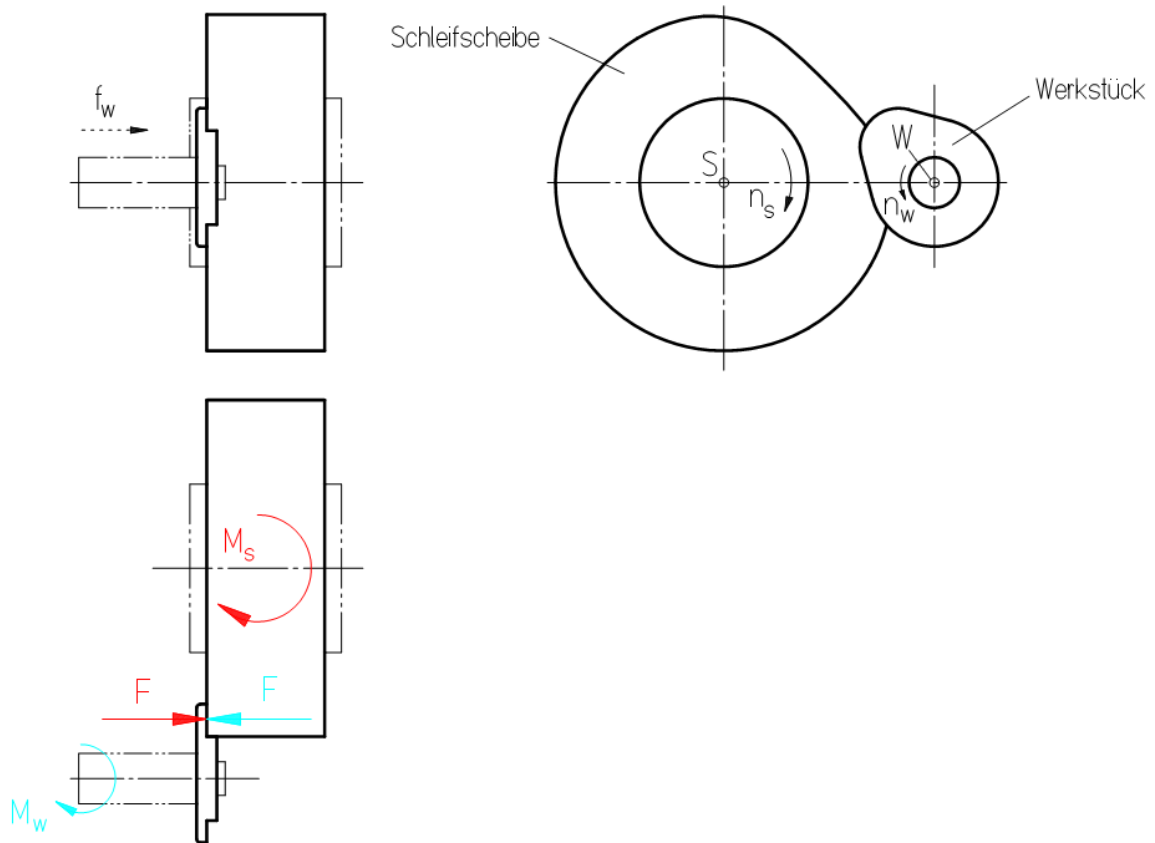


Bild 6-23: Auf die Schleifscheiben- und Werkstückspindel wirkenden axialen Schleifkräfte und die daraus resultierenden Biegemomente

Um diese auf die Spindeln wirkenden Biegemomente zu verringern, können ähnliche Maßnahmen wie beim radialen Stützsleifen (s. Abschnitt 3.4.6) getroffen werden. Bild 6-24 zeigt die Bearbeitung von zwei einander gegenüberliegenden Werkstücken mit zwei achsparallel angeordneten Schleifscheiben. Die Vorschubbewegung der Werkstücke ist entgegengesetzt gerichtet. Durch diese Anordnung werden die aufgrund der axialen Schleifkräfte auf die Schleifspindel wirkenden Biegemomente vollständig ausgeglichen, die auf die Werkstückspindel wirkenden Biegemomente reduziert. Zudem erhöht sich durch die gleichzeitige Bearbeitung von zwei Werkstücken mit zwei zeitgleich eingreifenden Schleifscheiben die Maschinenproduktivität.

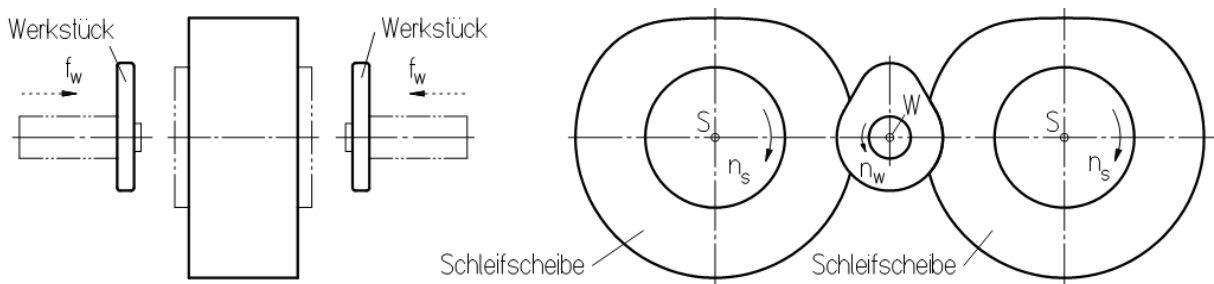


Bild 6-24: Axiales Stützsleifen von Nockenscheiben

Dieses Bearbeitungsprinzip ist auch auf das Fräsen übertragbar, wenn anstelle der Schleifscheibe ein Fräs Werkzeug verwendet wird. Ein entsprechendes Maschinenkonzept, bei dem mehrere Werkstücke sternförmig um die Werkzeugachse angeordnet sind und gleichzeitig bearbeitet werden, ist in Bild 6-25 dargestellt. Die Synchronisation der Drehbewegungen der Werkstücke kann durch ein entsprechendes elektronisches oder mechanisches Getriebe (bspw. ein Zahnriementrieb) erfolgen. Als Werkzeug wird ein mit Schneidplatten bestückter Fräser eingesetzt. Die Werkzeugschneiden am Kegel dienen zur Vorbearbeitung. Die am zylindrischen Teil des Grundkörpers angebrachten Schneiden führen die Fertigbearbeitung durch und verbessern, wie das Längspendeln beim Schleifen, die Werkstückoberfläche.

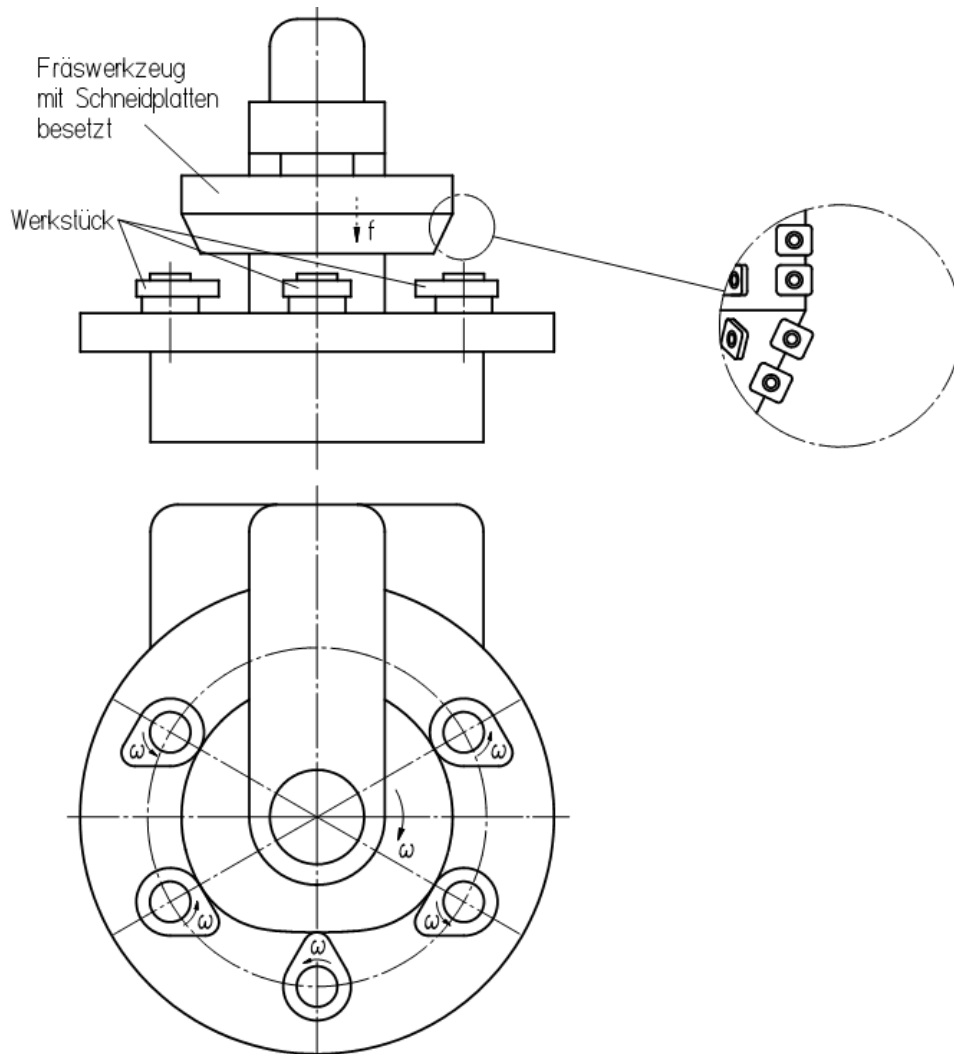


Bild 6-25: Maschinenkonzept zum Vorfräsen von Nockenscheiben

Durch die gleichzeitig stattfindende Parallelbearbeitung mehrerer Werkstücke ist diese Maschine hoch produktiv und kann zum effizienten Fräsen von Nockenscheiben (vor der Wärmebehandlung und dem Schleifen) eingesetzt werden. Auch der Nachteil bei der drehzahlsynchronen Unrundbearbeitung, dass sich die Schneiden am Werkzeugumfang ungleichmä-

ßig abnützen, hat nur geringe Auswirkungen. Umfangsbereiche des Werkzeugs, die infolge einer höheren Abtragsleistung einem stärkeren Verschleiß ausgesetzt sind, können dichter mit Schneidplatten belegt werden. Ansonsten besteht die Möglichkeit, sich rascher abnützende Schneidplatten häufiger auszutauschen.

7 Schleifversuche

Zur Durchführung der im Rahmen vorliegender Arbeit vorbereiteten sowie ausgewerteten Schleif- und Abrichtversuche wird eine konventionelle Rundschleifmaschine des Fabrikats FORTUNA, Typ FM 43 umgebaut und entsprechend den spezifischen Anforderungen modifiziert (Bild 7-1). Diese fast 30 Jahre alte Werkzeugmaschine¹ wurde von der Fa. GST generalüberholt und mit einer neuen Steuerung (SIEMENS Sinumerik 840 D) versehen. Zudem wurde sie mit einer steuerbaren Schleifscheibendrehachse (zweite C-Achse) ausgestattet.



Bild 7-1: Versuchsmaschine FORTUNA FM 43

Die wichtigsten **Maschinenparameter** der Versuchsmaschine sind:

- Spitzenhöhe: 200 mm
- Mindestabstand zwischen Werkstück- und Schleifscheibenachse: 200 mm
- maximaler Schleifscheibendurchmesser: 600 mm
- maximale Schleifscheibenbreite: 80 mm
- maximale Schleifscheibendrehzahl: 1750 min^{-1}
- maximal zulässige Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit: 45 m/s
- maximale Werkstückdrehzahl: 800 min^{-1}

¹ Diese Rundschleifmaschine war vom IFT über das FWF-Projekt P5999 angeschafft worden. Vor einigen Jahren wurde die Maschine an die Firma GST - Gesellschaft für Schleiftechnik, Sierndorf, übergeben.

- maximal zulässige Beschleunigung der X-Achse: ca. 1 m/s^2
- Kühlschmierstoff: Teilsynthetischer Kühlschmierstoff Castrol Hysol RD

Für das Messen der Werkstück- und Werkzeuggeometrie stehen im Rahmen vorliegender Arbeit folgende Messgeräte zur Verfügung:

- Oberflächenmessgerät: Taylor Hobson PRECISION, FORM TALYSURF SERIES 2
- Rundheitsmessgerät: Taylor Hobson PRECISION, TALYROND 265
- Portal-Messmaschine: ZEISS PRISMO

Die primäre Aufgabe vor der Schleifbearbeitung ist beim drehzahlsynchronen Unrundschleifen die Herstellung bzw. das Abrichten einer von der Kreisform abweichenden Schleifscheibe. Für die ersten Abricht- und Schleifversuche wird diese Aufgabe mit zwei unterschiedlichen Varianten von formgebundenen Werkzeugen gelöst. Zum einen sind dies unrunde, diamantbesetzte Abrichträder zum unrunder Bearbeiten der Schleifscheibe. Zum anderen wird ein unrunder Grundkörper als Schleifscheibe verwendet, der galvanisch mit einer Schicht bestehend aus CBN-Körnern belegt ist. In den späteren Versuchen wird eine andere Schleifscheibe verwendet, die durch Pendelhubabrichten mit Hilfe eines im Querschnitt kreisrunden Diamantrades abgerichtet ist. Mit diesem flexiblen Abrichtverfahren werden mit dem gleichen Diamantwerkzeug unterschiedliche Schleifscheibenquerschnitte profiliert. Jedoch sind der abrichtbaren Unrundheit durch die maximal zulässigen Werte der Maschinenkinematik Grenzen gesetzt. Die hydrodynamische Schmierung der Schleifscheibenspindel erfordert eine Mindestdrehzahl. Diese Mindestdrehzahl wiederum schränkt durch die maximal zulässige Beschleunigung der X-Achse die abrichtbare Unrundgeometrie ein. Daher sind mit der vorhandenen Versuchsmaschine nur solche Unrundprofile abrichtbar, die gegenüber dem Kreisprofil relativ kleine geometrische Abweichungen aufweisen.

7.1 Verwendung vorgeformter, formgebundener Werkzeuge

Der Versuchsaufbau bei der Verwendung vorgeformter, formgebundener Werkzeuge ist in Bild 7-2 schematisch dargestellt. Die Werkstücke sind auf einem Dorn aufgespannt, welcher zwischen Flansch und Spitze aufgenommen ist. Die Drehbewegung der C_1 -Achse wird vom Flansch des Werkstückspindelstocks über den Spanndorn auf das Werkstück übertragen. Bei Verwendung eines unrunder Abrichtwerkzeuges wird anstelle des Werkstücks der Diamantabrichter auf dem Dorn gespannt.

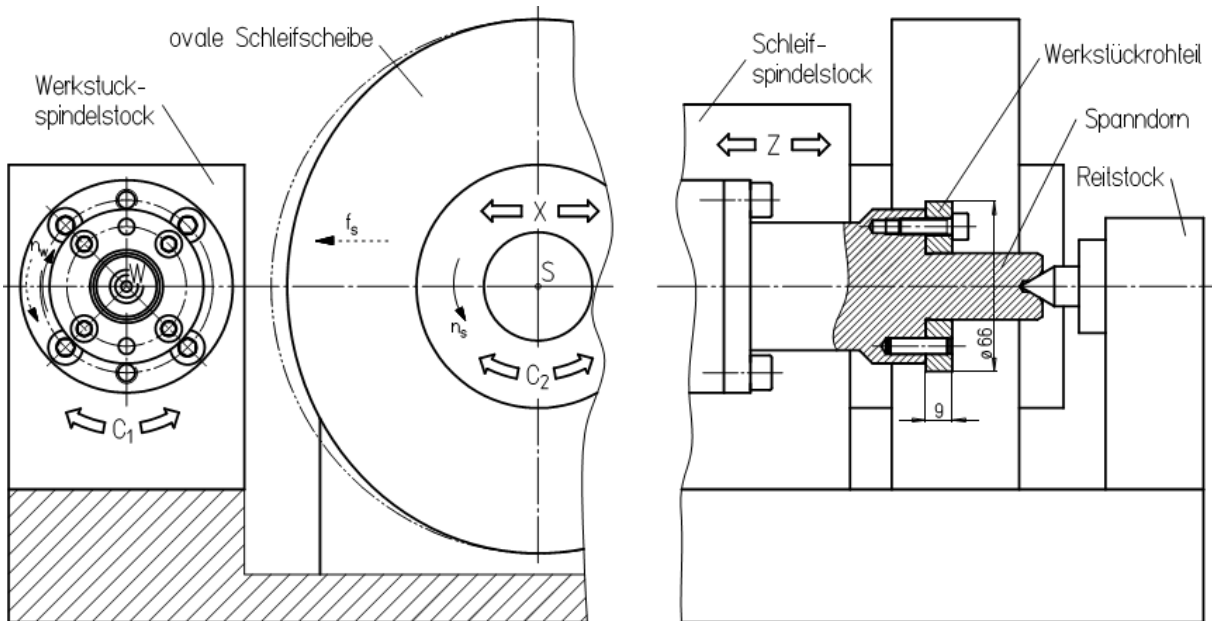


Bild 7-2: Versuchsaufbau bei der Verwendung vorgeformter, formgebundener Werkzeuge

7.1.1 Verwendung vorgeformter, formgebundener Diamantabrichter

Das Arbeitsprinzip bei der Verwendung formgebundener Abrichtwerkzeuge ist in Bild 7-3 dargestellt. Mit einem Diamantabrichter wird bei synchroner Drehung zwischen den Wirkpartnern die Unrundheit vom Abrichtwerkzeug auf die Schleifscheibe übertragen und anschließend wieder auf das Werkstück rückkopiert. Zweckmäßigerweise hat das Diamantwerkzeug dieselbe Geometrie wie das zu bearbeitende Werkstück. Es ist zwar möglich den Diamantabrichter radial größer oder kleiner herzustellen, allerdings muss hier, aufgrund des veränderten Achsabstandes, die entsprechende Querschnittfläche des Abrichtwerkzeugs berechnet werden. Durch die Verwendung der gleichen Zentrier- und Spannmöglichkeiten bei den Abrichtwerkzeugen und Werkstückrohrteilen kann auf demselben Spanndorn wahlweise das Abrichtwerkzeug oder das Werkstück aufgespannt werden.

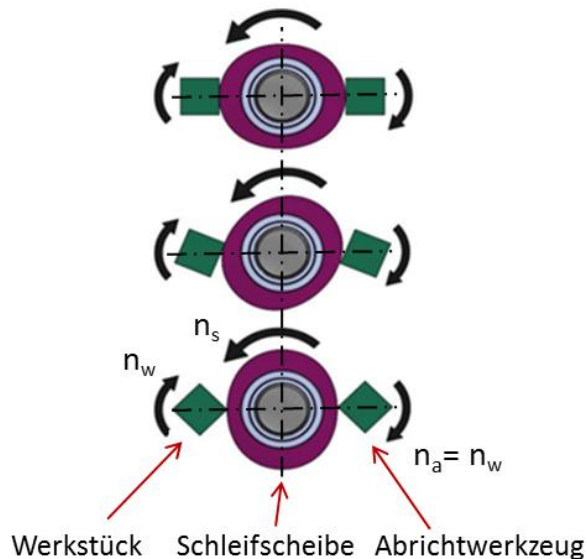


Bild 7-3: Übertragung der unrunder Geometrie beim Abrichten mit unrunderm Diamantabrichter bei Drehzahlverhältnis $i_v = n_s : n_w = 2 : 1$ [ABL12c / ABL12d, S. 194]

Die unrunder metallischen Grundkörper der Abrichtwerkzeuge werden in der institutseigenen Werkstätte durch herkömmliches Pendelhubschleifen hergestellt und anschließend beim Werkzeughersteller an der äußeren Mantelfläche mit einer Schicht Diamanten galvanisch belegt. Es werden zwei unterschiedliche Geometrien angewendet: ein Polygonprofil (P3G) und ein Achtkantprofil. Da die Werkstückspindeldrehzahl mit 800 min^{-1} begrenzt ist, werden die dreh-symmetrischen Werkstückgeometrien genutzt, um die Schleifscheibendrehzahl zu erhöhen. Die Drehzahlverhältnisse zwischen Diamantabrichter- und Schleifscheibendrehung bzw. zwischen Werkstück- und Schleifscheibendrehung werden so angepasst, dass bei gegebener Werkstückdrehzahl eine möglichst hohe drehzahlsynchrone Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit möglich ist. Der Schleifscheibenquerschnitt soll jedoch eine geometrisch ausgewuchtete Form besitzen. Der abgerichtete Schleifscheibenquerschnitt ist bei der Bearbeitung der beiden Werkstückprofile unterschiedlich, weist jedoch in beiden Fällen ein ovales Profil auf.

Spezifikation der eingesetzten **Diamantabrichter**:

- Werkstoff des Grundkörpers: 42CrMo4 (1.7225)
- Diamantschicht: einschichtig galvanisch im Positivverfahren belegt
- Beschichtung: ausgeführt von Fa. WENDT
- Bezeichnung: GE4-D126 GR80-50M/S
- Schichtstärke: 0,18 mm

Spezifikation der verwendeten **Schleifscheibe**:

- Hersteller: TYROLIT
- Bezeichnung: 9GB100M5VCSS 80M/S UPM2990
(Schleifmittel Spezialkorund (firmenspezifisch), Körnung 100, Bindung keramisch)
- Außendurchmesser: 500 mm
- Breite: 38 mm

7.1.1.1 Verwendung eines Diamantabrichters mit Polygonprofil

In Bild 7-4 ist das Abrichtwerkzeug für das unrunde Abrichten der Schleifscheibe skizziert. Beim Abrichten überträgt sich die Unrundgeometrie zunächst vom Abrichtwerkzeug auf die Schleifscheibe und letztlich beim Schleifen von der Schleifscheibe auf das Werkstück. Der Werkstoff des Werkstücks ist C45E (1.1191).

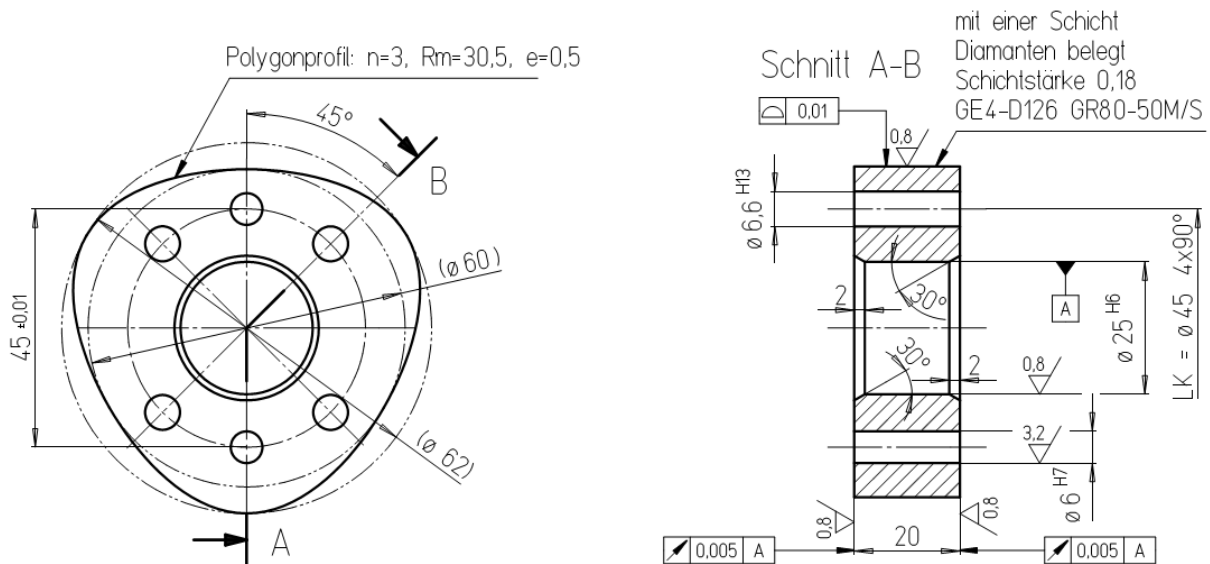


Bild 7-4: Diamantabrichter mit Polygonprofil

Bei dem gewählten Drehzahlverhältnis zwischen Werkstück- (bzw. Diamantabrichter-) und Schleifscheibendrehung von $i_v = n_s : n_w = 3 : 2$ ergibt sich ein ovaler Schleifscheibenquerschnitt. Gegenüber dem Drehzahlverhältnis von 1:1 (bei gleicher Werkstückdrehzahl) ist die Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit um 50% höher. Zusätzlich verbessert sich die Rauheit der geschliffenen Werkstückoberfläche, da an den einzelnen Umfangsbereichen des Werkstücks mehr Schleifkörner zum Eingriff kommen.

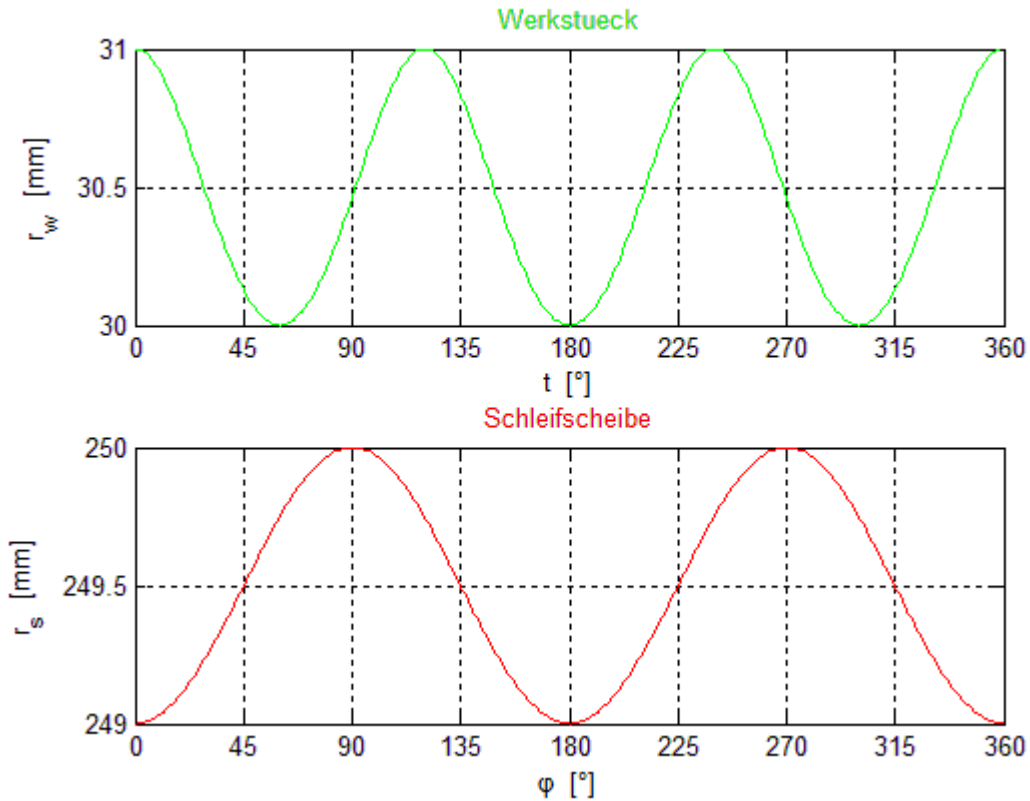


Bild 7-5: Berechnete Polarkoordinaten des Polygonprofils (oben) und des Schleifscheibenquerschnitts (unten) beim Gegenlaufschleifen mit Drehzahlverhältnis $i_v = n_s : n_w = 3 : 2$

In Bild 7-5 sind das berechnete unrunde Werkstück- und Schleifscheibenprofil in Polarkoordinaten dargestellt. Während die Erhebungskurve des Polygonprofils jeweils drei Hoch- und Tiefpunkte besitzt, sind es bei der ovalen Schleifscheibengeometrie im Verhältnis 3:2 nur zwei. Die radiale Differenz von 1 mm zwischen den Hoch- und Tiefpunkten sind jedoch bei beiden Kurven identisch.

Das nachfolgende Bild 7-6 zeigt die auf die größte Schleifscheibenumgangsgeschwindigkeit bezogene Relativgeschwindigkeit v'_{rel} (s. Abschnitt 4.3) der einzelnen Umrisspunkte des Polygonprofils bei Berührung mit der Schleifscheibe beim Abrichten und Schleifen.

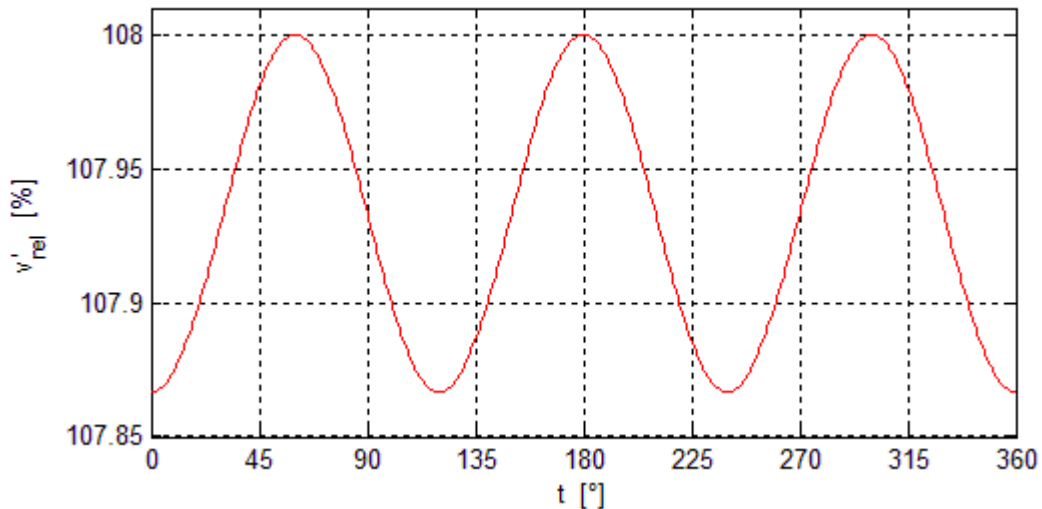


Bild 7-6: Berechnete bezogene Relativgeschwindigkeit der Umrisspunkte des Polygonprofils bei Berührung mit der Schleifscheibe beim Abrichten und Schleifen im Gegenlauf mit: $i_v = n_s : n_w = 3 : 2$

Die Relativgeschwindigkeit zwischen den Wirkpartnern schwankt nur geringfügig. Infolge der gegenrichteten Umfangsgeschwindigkeiten ist sie um 8% größer als die Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit.

Beim Schleifen drehen sich die Schleifscheibe und das Werkstück synchron zueinander. Deshalb kommen die einzelnen Körner des Schleifscheibenumfangs immer wieder an denselben Stellen des Werkstücks zum Eingriff. In Kombination mit der Unrundheit der Wirkpartner ergibt sich, dass die einzelnen Umfangsbereiche der Schleifscheibe unterschiedliche Längen des Werkstückumfangs bearbeiten müssen und somit die Zerspanungsleistung am Schleifscheibenumfang variiert. Um die daraus resultierende ungleichmäßige Abnutzung der Schleifscheibe abschätzen zu können, ist in Bild 7-7 die Verteilung der (auf den Zerspanungsmittelwert) bezogenen Zerspanung am Schleifscheibenumfang dargestellt. Aus der Kurve ist ersichtlich, dass der Wert der Zerspanung (vgl. Abschnitt 4.4) um den Mittelwert, welcher bei 1 liegt, um ca. 14% nach oben und unten schwingt.

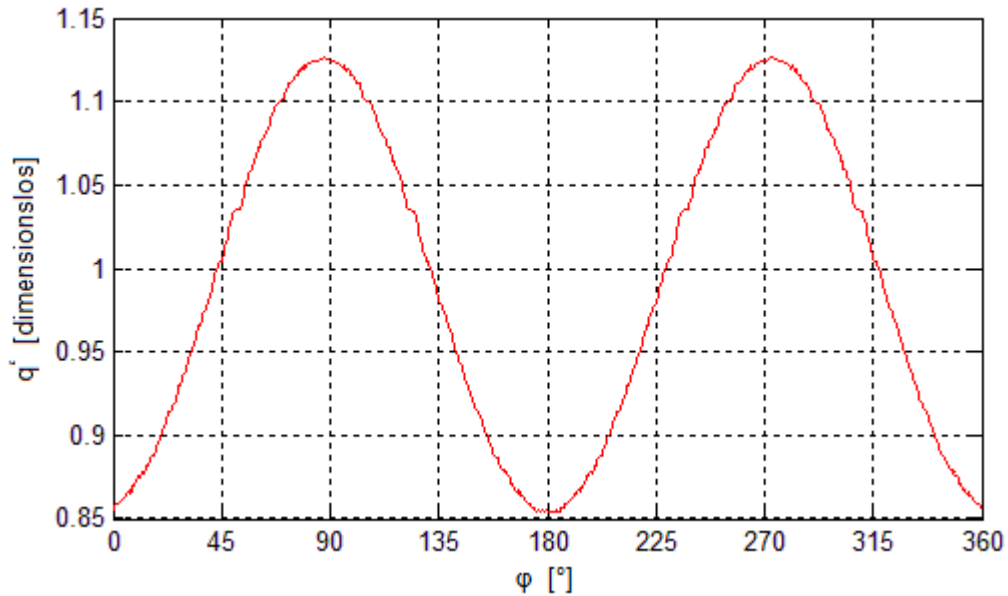


Bild 7-7: Berechnete Verteilung der bezogenen Zerspanung am Schleifscheibenumfang beim Gegenlaufschleifen eines Polygonprofils

Vor dem ersten Schleifversuch wird die Schleifscheibe mit dem Diamantwerkzeug im Einstechverfahren abgerichtet. Anschließend erfolgt das Schleifen des Werkstücks ebenfalls im Einstechverfahren. Folgende **Parameter** sind eingestellt:

- Drehzahlverhältnis: $i_v = n_s : n_w = 3 : 2$
- Richtung der Umfangsgeschwindigkeiten: Gegenlaufabrichten und -schleifen
- Drehzahl des Werkstücks bzw. Abrichtwerkzeugs: 734 min^{-1}
- Schleifscheibendrehzahl: 1101 min^{-1}
- radiale Vorschubgeschwindigkeit: $0,1 \text{ mm/min}$

Mit diesen Maschineneinstellwerten stellt sich beim ersten Schleifversuch eine unbefriedigend raue Oberfläche des Werkstücks ein:

- $Rz = 27 \mu\text{m}$
- $Ra = 5,4 \mu\text{m}$

Zur Verbesserung der Oberflächenrauheit wird bei den nachfolgenden Schleifversuchen der Maschinentisch in Längsrichtung (Z-Achse) oszillierend bewegt. Es stellen sich die folgenden Oberflächenrauheiten ein:

- $Rz = 9,0 \dots 9,6 \mu\text{m}$
- $Ra = 1,3 \dots 1,4 \mu\text{m}$

Schließlich ergibt sich am bearbeiteten Werkstück eine noch bessere Oberflächengüte, wenn sowohl beim Abrichten, als auch im Schleifprozess, eine axiale Oszillation in Längsrichtung erfolgt:

- $Rz = 4,6 \mu m$
- $Ra = 0,64 \mu m$

Da an der Stirnseite des zur Verfügung stehenden Abrichtwerkzeugs keine Diamantbeschichtung angebracht ist, wird zunächst der Schleifscheibenquerschnitt durch Einstechen abtragend bearbeitet. Erst am Schluss des Abrichtprozesses wird mit einer Zustellung, welche kleiner als die radiale Diamantschichtstärke ist, die Schleifscheibe durch Längsbewegung fertig abgerichtet.

Eine andere Vorgehensweise soll den Einfluss des Abrichtwerkzeugs auf das Schleifergebnis aufzeigen. Dafür wird die Schleifscheibe mit der an der Maschine vorhandenen Abrichtfliese kreisrund abgerichtet. Mit denselben Einstellparametern, wie zuvor, wird anschließend ein Werkstück drehzahlsynchron geschliffen. Die beim drehzahlsynchronen Rundschleifen erreichte Oberflächengüte des im Querschnitt kreisrunden Werkstücks ist:

- $Rz = 2,6 \mu m$
- $Ra = 0,34 \mu m$

Durch den Vergleich der letzten beiden Schleifversuche zeigt sich, dass die Oberflächentopographie des Abrichtwerkzeugs nahezu 50% der Oberflächenrauheit am geschliffenen Werkstück verursacht. Die Oberflächentopographie des Abrichtwerkzeugs ist jedoch durch die Diamantkorngröße und Kornverteilung steuerbar.

Die Maßgenauigkeit der geschliffenen Werkstückquerschnitte wird bei diesen ersten Schleifversuchen mit dem Polygonprofil nicht überprüft, da vorerst nur die Untersuchung bzw. Verbesserung der gefertigten Oberflächenqualität im Vordergrund steht.

7.1.1.2 Verwendung eines Diamantabrichters mit Achtkantprofil

Bei den nachfolgenden Schleifversuchen wird ein Abrichtwerkzeug eingesetzt, das im Querschnitt ein Achtkantprofil aufweist. Das Abrichtwerkzeug ist in Bild 7-8 dargestellt.

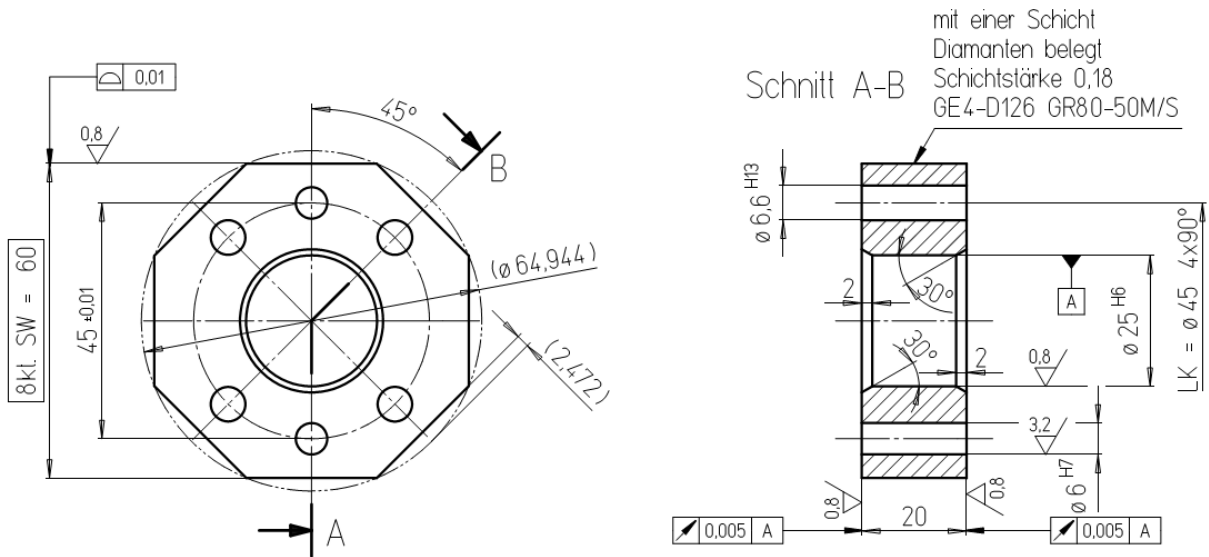


Bild 7-8: Diamantabrichter mit Achtkantprofil

Die Werkstücke aus 42CrMo4 (1.7225) haben nach der Schleifbearbeitung denselben Querschnitt, wie das zum Abrichten der Schleifscheibe verwendete Diamantwerkzeug.

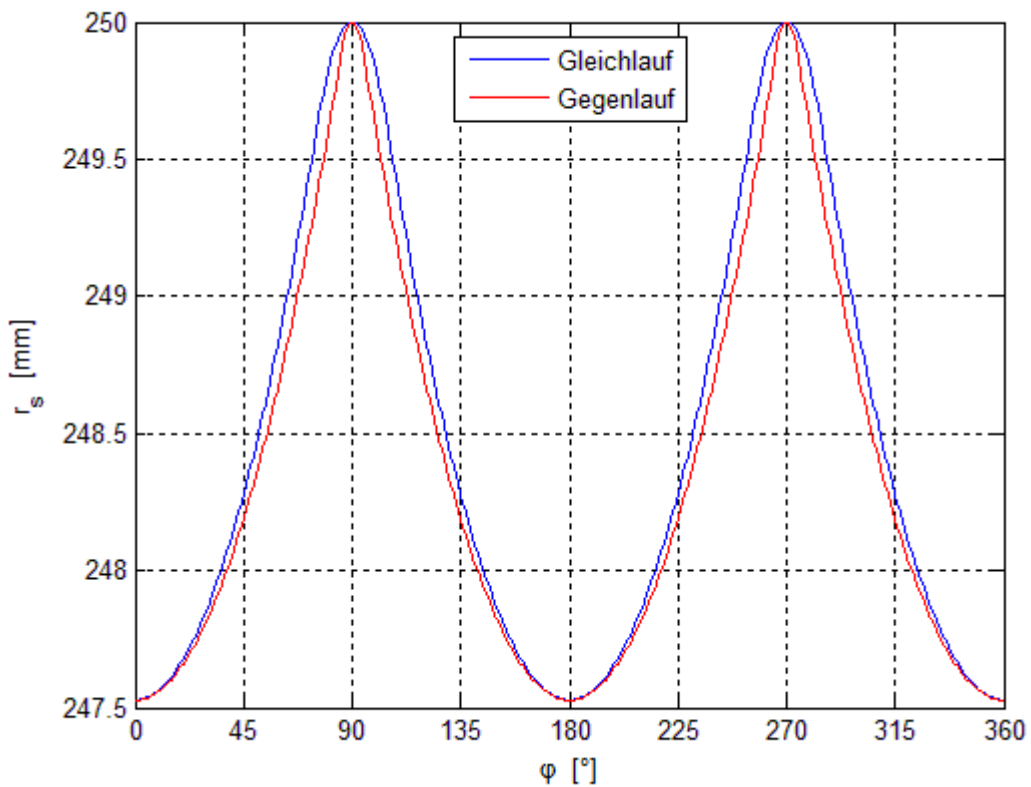


Bild 7-9: Berechnete Polarkoordinaten des Schleifscheibenquerschnitts beim Schleifen eines Achtkantprofils mit Drehzahlverhältnis $i_v = n_s : n_w = 4 : 1$

Um die Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit zu erhöhen, wird die Drehzahl der Schleifscheibe im Verhältnis zu den Wirkpartnern vervierfacht. Dadurch entsteht sowohl beim Gleich- als auch beim Gegenlaufabrichten ein ovaler Schleifscheibenquerschnitt. In Bild 7-9 sind die errechneten Polarkoordinaten der Schleifscheibenquerschnitte übereinandergelegt. Nach dem Gegenlaufabrichten ist der Querschnitt kleiner als beim Gleichlaufabrichten. Nur die tiefsten und die höchsten Punkte sind bei beiden Schleifscheibenerhebungskurven identisch.

Aufgrund der unterschiedlichen Richtungen der Werkstückumfangsgeschwindigkeit sind die nahezu linear verlaufenden bezogenen Relativgeschwindigkeiten beim Gleich- und Gegenlaufschleifen unterschiedlich, wie in Bild 7-10 dargestellt ist.

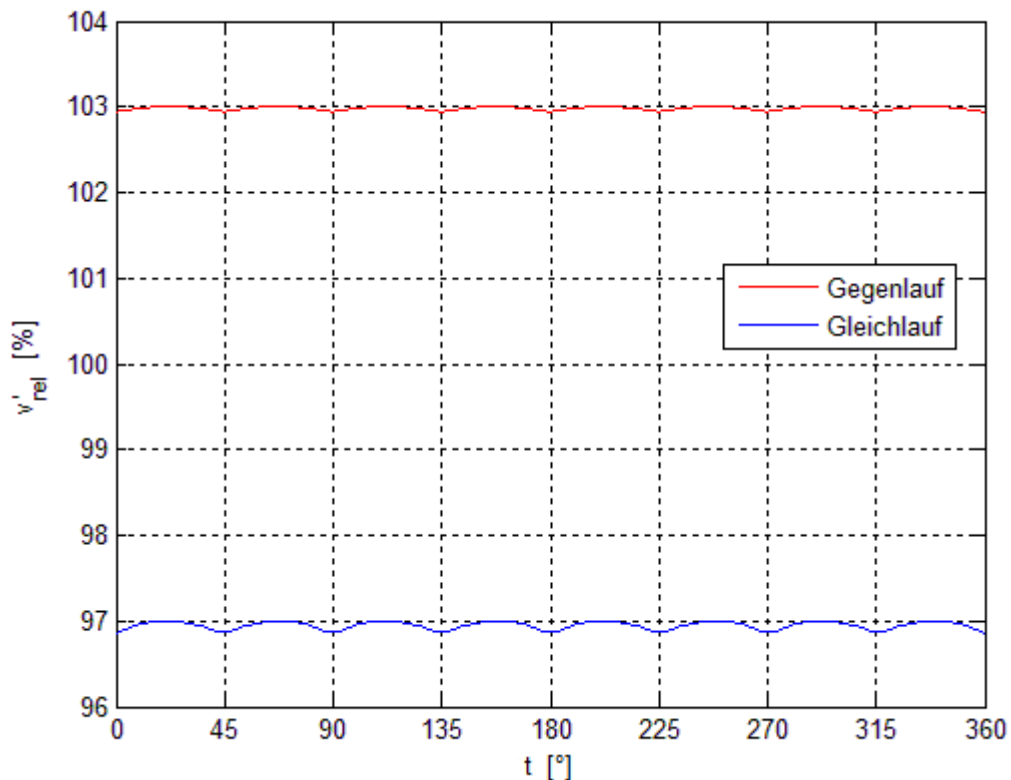


Bild 7-10: Berechnete bezogene Relativgeschwindigkeit zwischen Werkstück und Schleifscheibe beim Schleifen eines Achtkantprofils mit Drehzahlverhältnis $i_v = n_s : n_w = 4 : 1$

Durch die Unrundheit der Wirkpartner ist das zu zerspanende Werkstückvolumen ungleichmäßig auf die einzelnen Schleifscheibenbereiche verteilt (s. Abschnitt 4.4). In Bild 7-11 ist das Gleichlaufschleifen des Werkstücks bei unterschiedlichen Drehlagen simuliert. Dabei wird die Schleifscheibe von der Ausgangslage, drehzahlsynchron zum Werkstück, zunächst

um 72° gedreht. In diesem Bereich erfolgt kein Materialabtrag. Erst bei der Weiterdrehung auf 108° beginnt die Bearbeitung der Werkstückflächen. Die Bewegungssimulation zeigt, dass sich ca. 80% des Schleifscheibenumfangs nur an den Kanten des Werkstücks abwälzen. Die Planflächen des Werkstücks, welche 100% des Werkstückumfangs bilden, werden nur von ca. 20% des Schleifscheibenumfangs kontaktiert und somit bearbeitet.

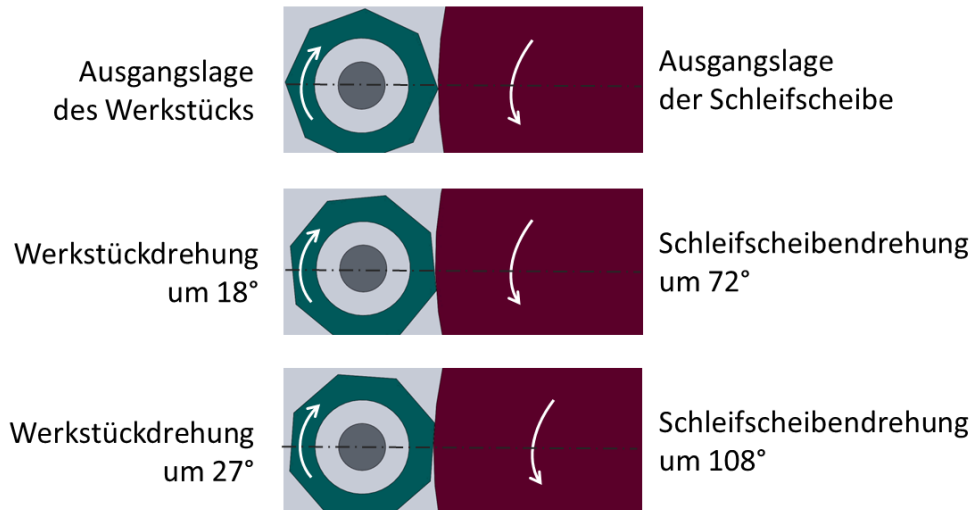


Bild 7-11: Simulation der synchronen Drehbewegungen beim Gleichaufschleifen eines Achtkantprofils mit Schlüsselform mit Schlüsselformbreite 60 mm mit Schleifscheibendurchmesser 500 mm und Drehzahlverhältnis $i_v = n_s : n_w = 4 : 1$

In Bild 7-12 ist die Verteilung der (auf den Zerspanungsmittelwert) bezogenen Zerspanung am Schleifscheibenumfang sowohl für Gleich- als auch für Gegenlaufschleifen dargestellt. Der Vergleich zeigt, dass die Zerspanungsleistung am Schleifscheibenumfang beim Gegenlaufschleifen deutlich ungleichmäßiger verteilt ist.

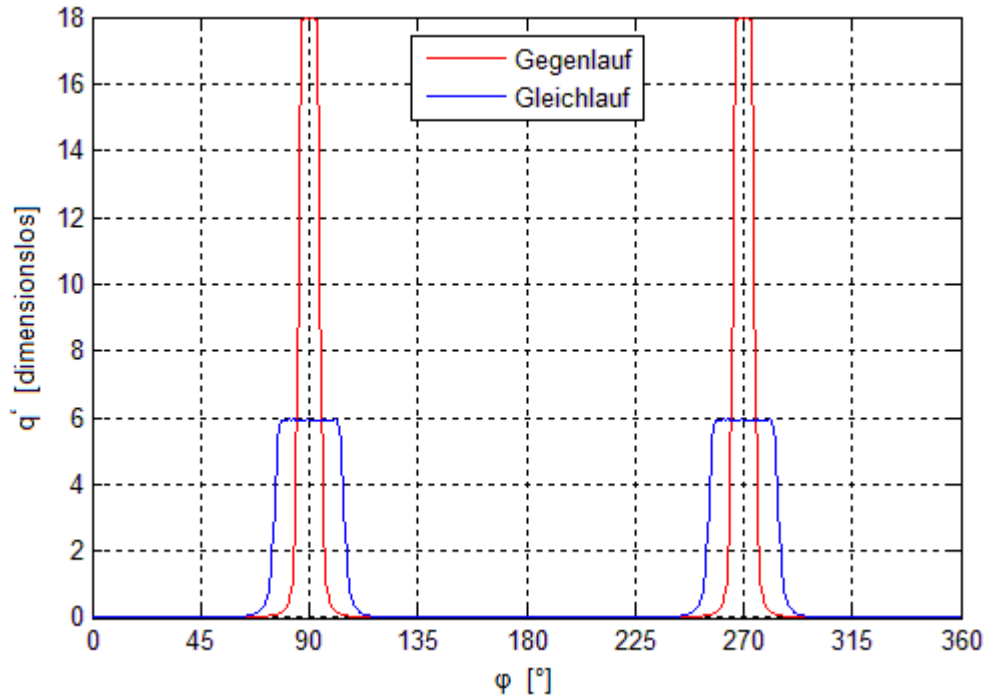


Bild 7-12: Berechnete Verteilung der bezogenen Zerspanung am Schleifscheibenumfang beim Schleifen eines Achtkantprofils mit Drehzahlverhältnis $i_v = n_s:n_w = 4:1$

Bei den versuchsweise verwendeten kreisrunden Rohteilen stellt sich ohne Vorbearbeitung ein weiterer Nachteil ein. Jene Schleifscheibenbereiche mit dem systembedingten höchsten Zerspanungsanteil müssen zunächst das größte radiale Werkstückaufmaß abarbeiten. Das unterschiedliche Aufmaß am Werkstückumfang eines anfänglich kreisrunden Rohteils, welches in Bild 7-13 dargestellt ist, verstärkt somit die ungleichmäßige Abnutzung der Schleifscheibe bei der Achtkantbearbeitung zusätzlich. In der Serienfertigung tritt dieser Nachteil in der Regel nicht auf, da der Rohteilquerschnitt ein zum fertig bearbeiteten Querschnitt äquidistantes Profil ist.

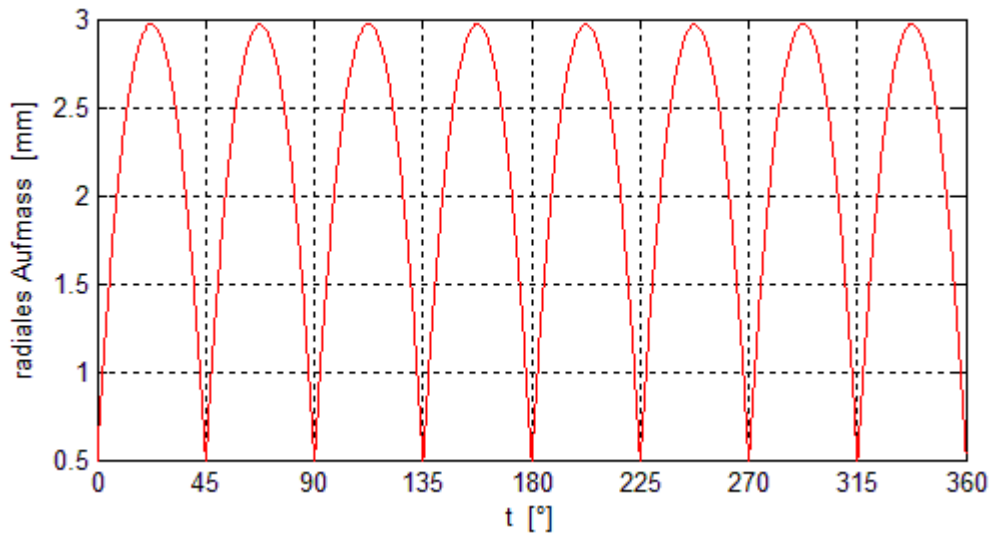


Bild 7-13: Berechnetes radiales Aufmaß des Achtkantprofils bei Verwendung eines im Querschnitt kreisrunden Rohteils

Deutlich ungünstiger ist die Situation beim Abrichten. Die Diamanten an den Kanten des Abrichtwerkzeugs formen beim Gleichlaufabrichten sogar ca. 80% des Schleifscheibenumfangs. Nur ca. 20% des Schleifscheibenumfangs werden von den eigentlichen Funktionsflächen des Abrichtrades bearbeitet. Beim Gegenlaufabrichten bzw. beim ersten Abrichten einer anfangs im Querschnitt kreisrunden Schleifscheibe ist in diesen Bereichen des Diamantschichtbelags der prozentuelle Anteil des Abrichtvolumens sogar noch höher.

Bei den ersten Abricht- und Schleifversuchen mit dem Achtkantprofil wird ein im Querschnitt anfänglich kreisrundes Rohteil im Gleichlauf abgerichtet und geschliffen. Die eingestellten

Parameter sind:

- Drehzahlverhältnis: $i_v = n_s : n_w = 4 : 1$
- Drehzahl des Werkstücks bzw. Abrichtwerkzeugs: 375 min^{-1}
- Schleifscheibendrehzahl: 1500 min^{-1}
- radiale Vorschubgeschwindigkeit: $0,1 \text{ mm/min}$

Wie zuvor beim Polygonprofil wird auch hier anfangs im Einstechverfahren und erst kurz vor Beendigung des Abrichtvorgangs mit einer Längsbewegung abgerichtet. Im letzten Schälzyklus ist die Zustellung kleiner als die auf dem Abrichttrad vorhandene Diamantschichtdicke. Im Unterschied zum Polygonabrichter wird an diesem Abrichtwerkzeug schon nach dem ersten Abrichtvorgang ein deutlicher Verschleiß des Diamantbelags festgestellt. Bild 7-14 zeigt diese Abnützungen, die vorwiegend im Bereich der Kanten auftreten und

diese verrunden. Die Abnützung des Abrichtwerkzeugs überträgt sich auf die Schleifscheibe und in weiterer Folge auf das Werkstück.

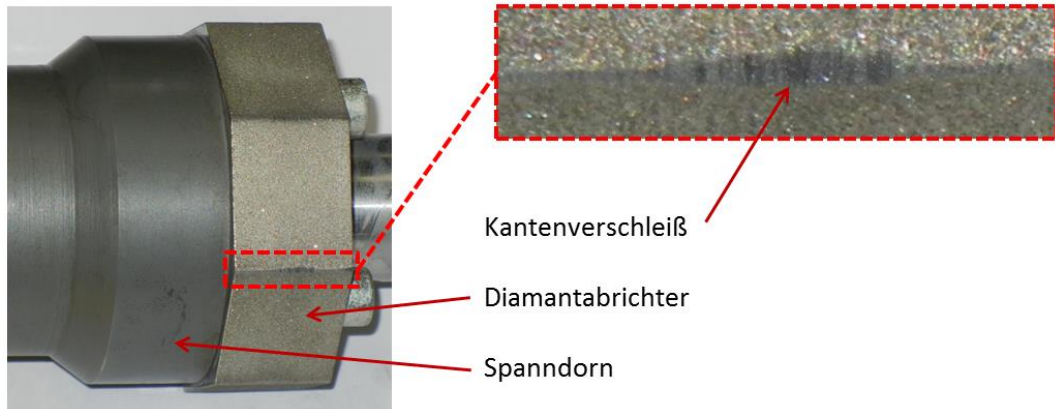


Bild 7-14: Verschleiß des Achtkantabrichters nach dem ersten Abrichtvorgang

Anfangs wird das Werkstück bis zu einem Aufmaß von 0,5 mm geschliffen. Die radiale Abnützung der Schleifscheibe in den Bereichen mit der höchsten Zerspanungsleistung beträgt 0,09 mm. Zudem setzt sich in diesen Bereichen die Schleifscheibe verhältnismäßig stark zu (Bild 7-15). Neben dem Zusetzen der Schleifscheibe tritt ein weiterer Nachteil auf: Die Geräuschentwicklung ist zum Teil deutlich intensiver.

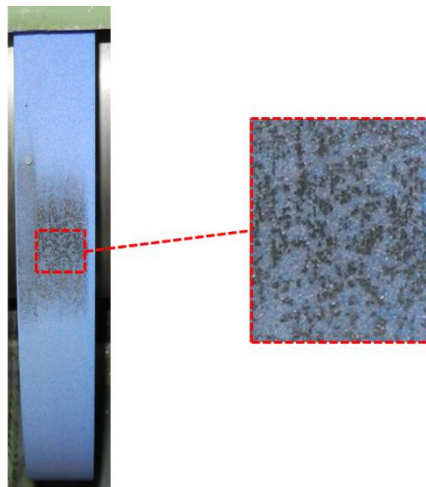


Bild 7-15: Lokales Zusetzen der Schleifscheibe beim Schleifen eines Achtkantprofils

Nach einem nochmaligen Abrichtvorgang und anschließendem Fertigschleifen mit Längsoszillation über die gesamte Schleifscheibenbreite wird die radiale Schleifscheibenabnützung von 0,013 mm festgestellt. Zudem wird die Ebenheit jeder Einzelfläche untersucht und an unterschiedlichen Stellen gemessen. Bild 7-16 zeigt einen Ausschnitt eines der Messprotokolle.

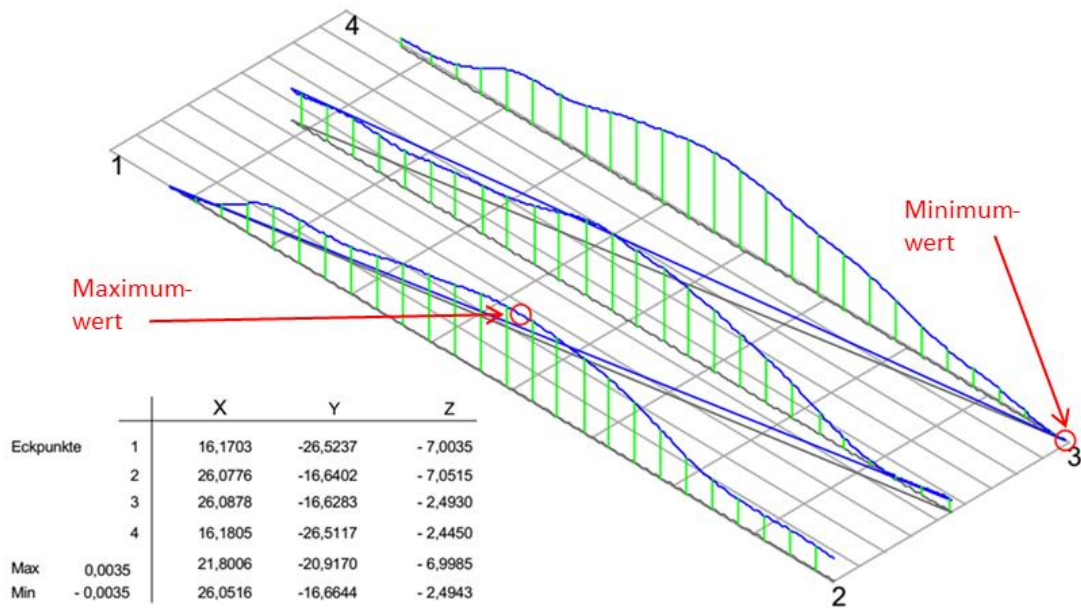


Bild 7-16: Messprotokoll über die Ebenheit einer geschliffenen Fläche eines im Gleichlauf bearbeiteten Achtkantprofils

In der Grafik ist die konvexe Balligkeit der Fläche zu erkennen, welche auch bei der Prüfung des Werkstücks mit einem Haarlineal deutlich sichtbar ist.

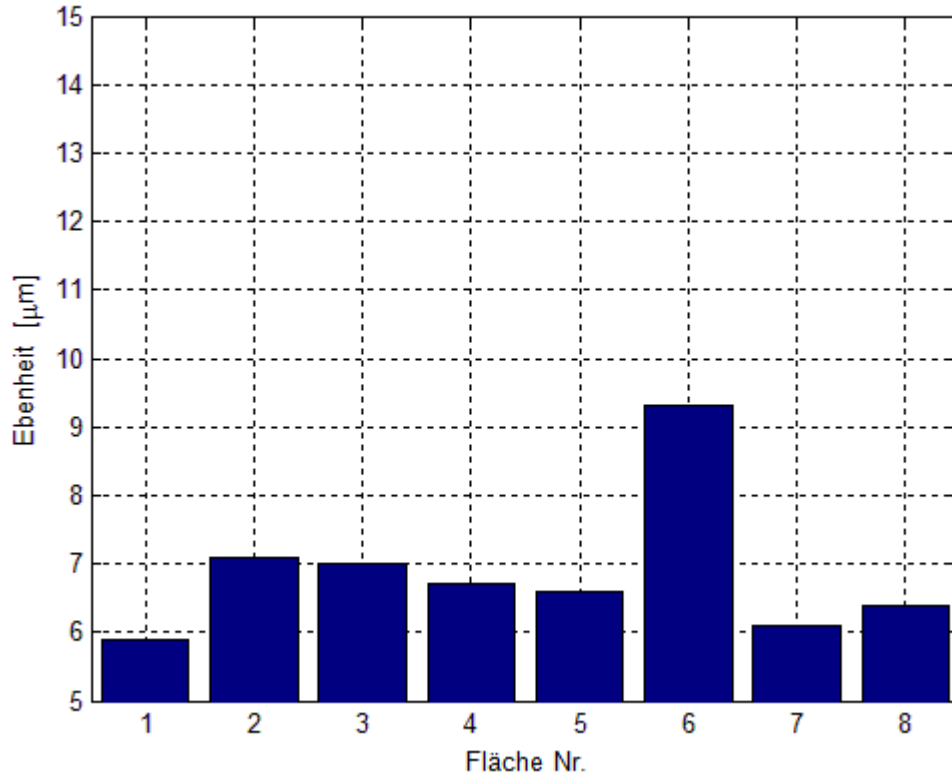


Bild 7-17: Maximale Ebenheitsabweichung der acht Flächen des bei Gleichlauf geschliffenen Achtkantprofils

Die Maximalwerte der Ebenheitsabweichungen aller acht Flächen des Achtkantprofils sind zusammenfassend in Bild 7-17 dargestellt.

Die Oberflächenrauheitsmessungen am Werkstück in axialer Richtung an unterschiedlichen Flächen ergeben die nachfolgenden Werte:

- $Rz = 5,6 \dots 6,5 \mu m$
- $Ra = 0,9 \dots 1,0 \mu m$

Die Überstände einzelner Schleifkornspitzen erzeugen an der Werkstückoberfläche in Umfangsrichtung angeordnete Riefen. In Umfangsrichtung¹ (parallel zu den Riefen) ist die Rauheit deutlich geringer, wie die nachfolgenden Werte zeigen:

- $Rz = 2,0 \mu m$
- $Ra = 0,28 \mu m$

Im anschließenden Schleifversuch wird das Drehzahlverhältnis von 4:1 eingestellt und im Gegenlauf abgerichtet bzw. geschliffen. Um den Schleifscheibenverschleiß zu verringern, werden zwei Maßnahmen getroffen. Einerseits wird das Werkstückrohteil vor dem Unrundschleifen manuell auf einem Schleifband vorbearbeitet. Zum anderen wird ca. die Hälfte der Schleifscheibenbreite erst bei der abschließenden Schlichtbearbeitung mit Längsbewegung eingesetzt. Nach dem dritten Abrichtvorgang hat sich die Abnützung des Diamantabrichters im Kantenbereich weiter vergrößert, was in Bild 7-18 dargestellt ist.

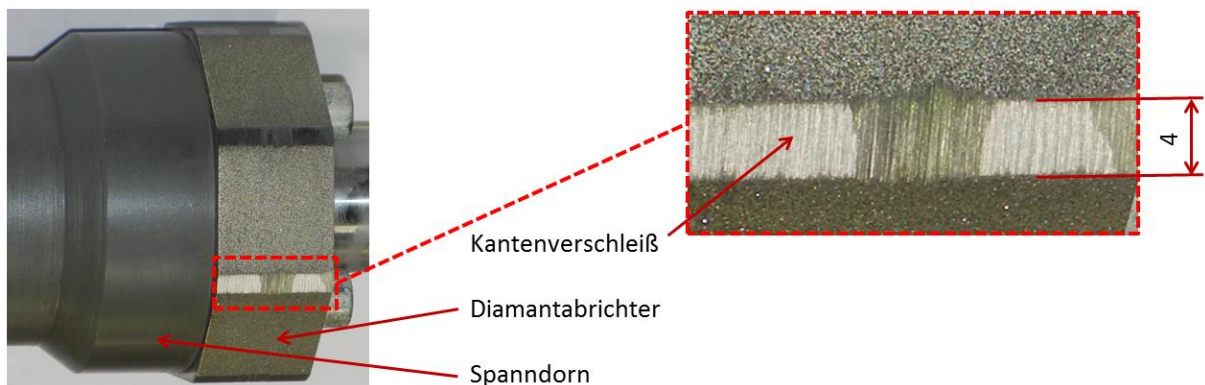


Bild 7-18: Abnützung der Kanten des Diamantabrichters nach dem dritten Abrichtvorgang

Die Oberflächenmessungen in axialer Richtung an unterschiedlichen Flächen des bearbeiteten Werkstücks ergeben:

¹ Bei allen anderen Messungen der Oberflächenrauheit wurde in axialer Richtung (quer zu den Riefen) gemessen.

- $Rz = 7,2 \dots 8,0 \mu m$
- $Ra = 1,1 \dots 1,2 \mu m$

Diese Messergebnisse stehen im Widerspruch zu den bisher gewonnen theoretischen Erkenntnissen und praktischen Versuchsergebnissen. Bisher ist die Rautiefe beim Gegenlaufschleifen geringer ausgefallen. Eine Erklärung für diese Diskrepanz ist, dass infolge der Schleifscheibenabnutzung beim Schruppen für das Schlichten eine reduzierte Schleifscheibenoberfläche zur Verfügung steht und somit im Eingriff ist.

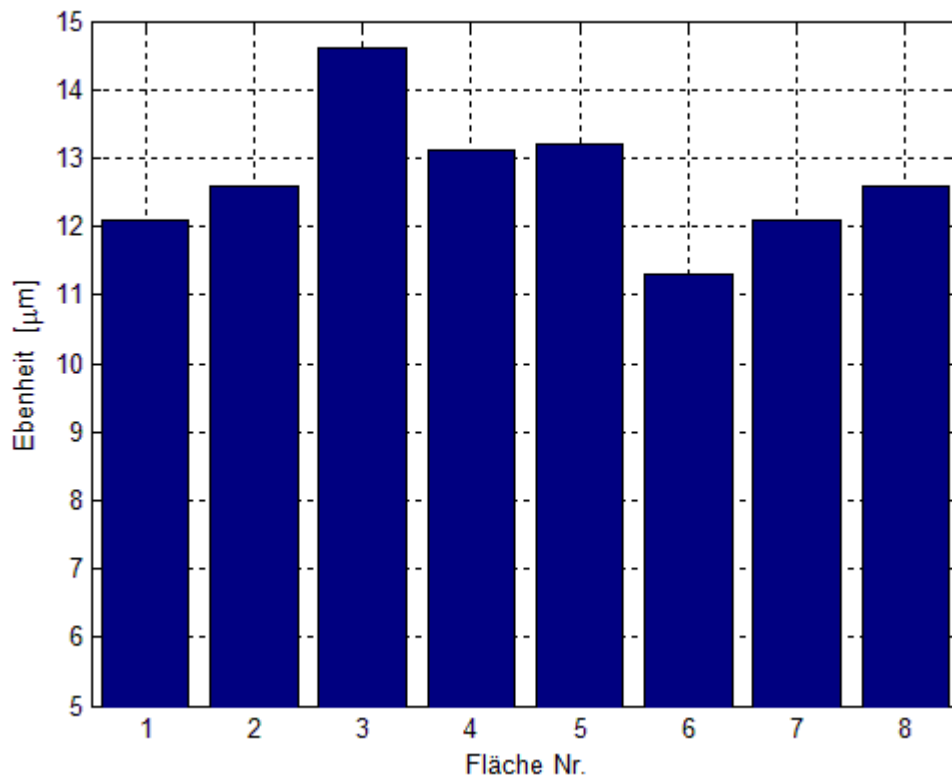


Bild 7-19: Ebeneheit der acht Flächen des bei Gegenlauf geschliffenen Achtkantprofils

Analog zur Abnutzung des Diamantabrichters hat das bei Gegenlauf geschliffene Werkstück anstelle der scharfen Kanten ca. 4 mm breite Anfasungen. Zusätzlich hat sich die konvexe Balligkeit und somit die Ebenheitsabweichung jeder einzelner Fläche im Vergleich zum vorangegangenen Gleichlaufschleifen erhöht. Dies ist durch einen erhöhten Schleifscheibenverschleiß infolge der noch ungleichmäßigeren Zerspanungsverteilung beim Gegenlaufschleifen erklärbar. Die Werte der gemessenen Ebenheiten der acht Profilflächen sind in Bild 7-19 dargestellt.

7.1.2 Verwendung einer vorgeformten, formgebundenen CBN-Schleifscheibe

Für die Schleifversuche mit einem vorgeformten, formgebundenen Schleifwerkzeug wird die CBN-Schleifscheibe nach Bild 7-20 verwendet. Der unrunde metallische Grundkörper wurde in der institutseigenen Werkstätte durch Pendelhubschleifen hergestellt und anschließend beim Werkzeughersteller an der äußeren Mantelfläche mit einer CBN-Schicht galvanisch belegt. Eine mit diesem Verfahren hergestellte Schleifscheibe ist nach der Beschichtung einsatzbereit, ohne abgerichtet werden zu müssen. Bis zu drei Schleifkornschichten können aufgetragen werden. Jedoch verringert sich mit der Schichtanzahl auch die Maßgenauigkeit der Werkzeugoberfläche.

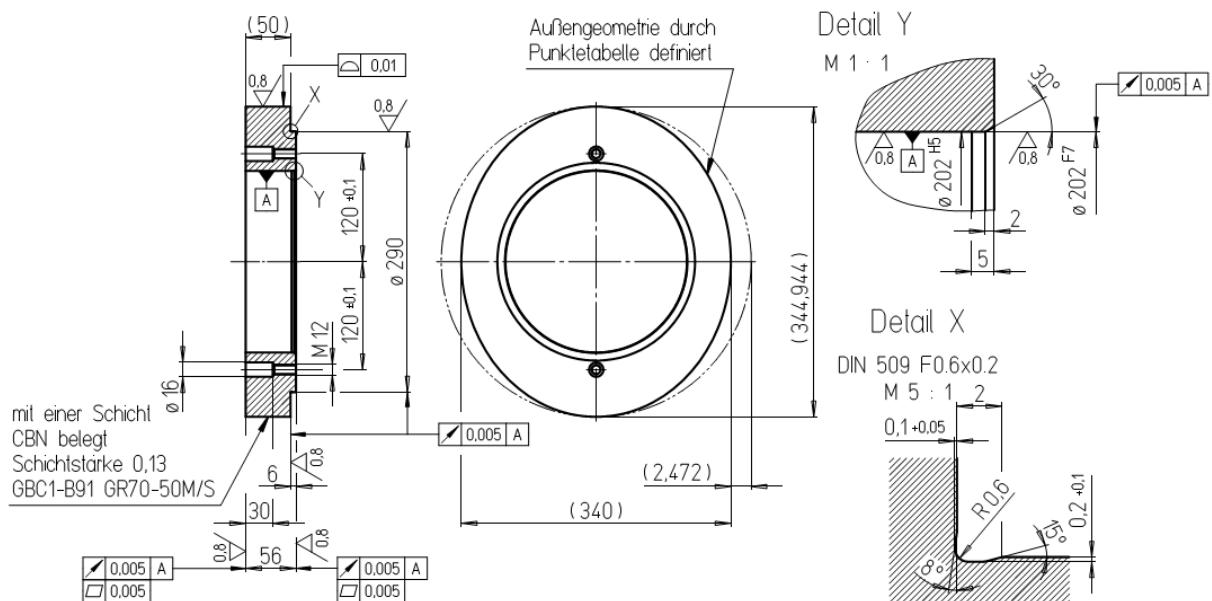


Bild 7-20: CBN-Schleifscheibe zum Schleifen eines Achtkantprofils mit SW 60 bei Drehzahlverhältnis $i_v = n_s : n_w = 4 : 1$

Da die Spitzenhöhe der für die Herstellung des Grundkörpers verwendeten (Un-) Rundschleifmaschine nur 175 mm beträgt, ist der maximale Durchmesser des Rohteils auf 350 mm begrenzt. Der Schleifscheibenquerschnitt ist derart ausgelegt, um ein Achtkantprofil mit einer Schlüsselweite von 60 mm im Gleichlauf herzustellen. Auch hier wird zwischen der Schleifscheiben- und Werkstückdrehung das Drehzahlverhältnis 4:1 gewählt. Damit wird die Schleifscheibendrehzahl gegenüber der Werkstückdrehzahl erhöht. Letztere ist durch den Werkstückspindelstockantrieb auf 800 min^{-1} begrenzt. Das Drehzahlverhältnis von 4:1 hat sich schon bei den vorherigen Schleifversuchen bewährt. Das Schleifscheibenquerschnittsprofil ist wieder oval und die Schleifscheibe in sich geometrisch ausgewuchtet.

Spezifikation der galvanisch belegten **CBN-Schleifscheibe**:

- Grundkörper: 42CrMo4 (1.7225)
- CBN-Schicht: einschichtig galvanisch im Positivverfahren belegt
- Beschichtung ausgeführt durch Fa. Wendt
- Bezeichnung der Beschichtung: GBC1-B91 GR70-50M/S
- Schichtstärke: 0,13 mm

Wird die Schleifscheibe für ein anderes Schlüsselweitenmaß angewendet, so weicht die Schleifscheibenform von der Sollgeometrie ab, wie Bild 7-21 zeigt.

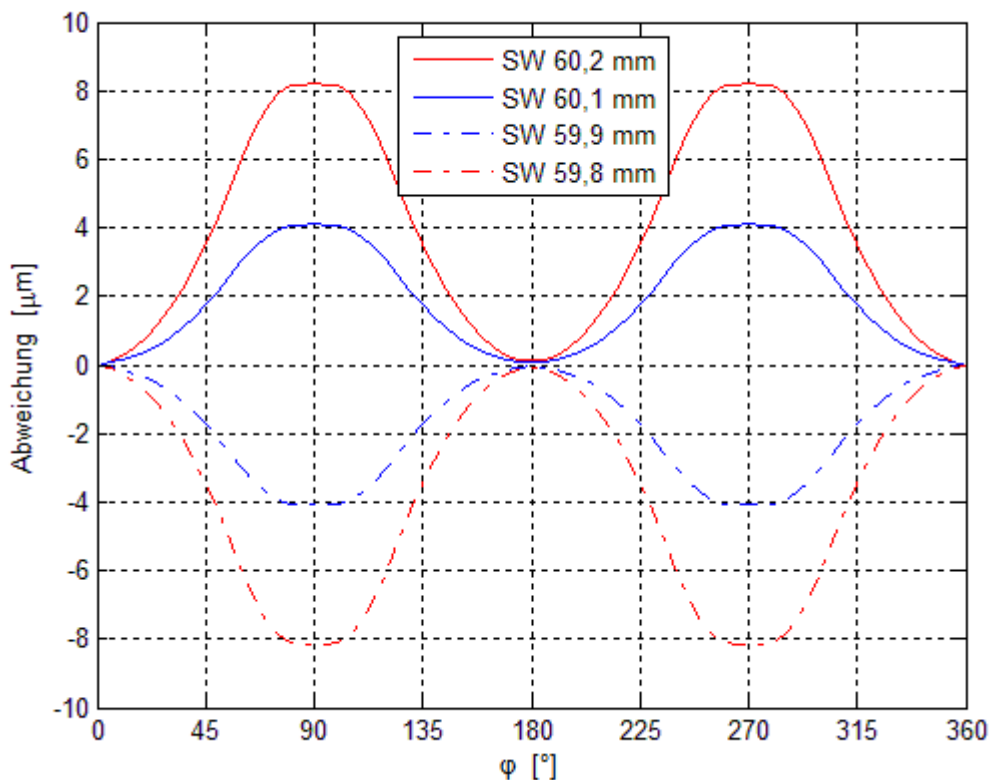


Bild 7-21: Berechnete Abweichung des Schleifscheibenprofils bei Anwendung für andere Schlüsselweiten

Eine durch Abnutzung entstandene Profilabweichung lässt sich bei einer galvanisch einschichtig belegten Schleifscheibe durch Abrichten nicht beheben. Daher wird für die Schruppbearbeitung nur ein bestimmter Bereich der Schleifscheibenbreite verwendet. Das Schlichten und Feinschlichten erfolgt mit der restlichen Schleifscheibenbreite, welche dadurch weniger beansprucht ist.

Bei den ersten Schleifversuchen mit der unrunder CBN-Schleifscheibe sind die gewählten Parameter:

- Drehzahlverhältnis: $i_v = n_s : n_w = 4 : 1$
- Schleifscheibendrehzahl: 1500 min⁻¹
- Werkstückdrehzahl: 375 min⁻¹
- Geschwindigkeitsrichtungen im Kontaktpunkt: Gleichlaufschleifen
- radiale Vorschubgeschwindigkeit: 0,1 mm/min

Im Unterschied zu den in Abschnitt 7.1.1 behandelten Schleifversuchen mit der kreisrunden Korundschleifscheibe wird hier eine um ca. 30% kleinere Schleifscheibe verwendet. Damit ergibt sich eine um denselben Prozentsatz kleinere Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit, während die Werkstückumfangsgeschwindigkeit gleich bleibt. Die Relativgeschwindigkeit am Berührungspunkt zwischen Werkstück und CBN-Schleifscheibe ist in Bild 7-22 dargestellt.

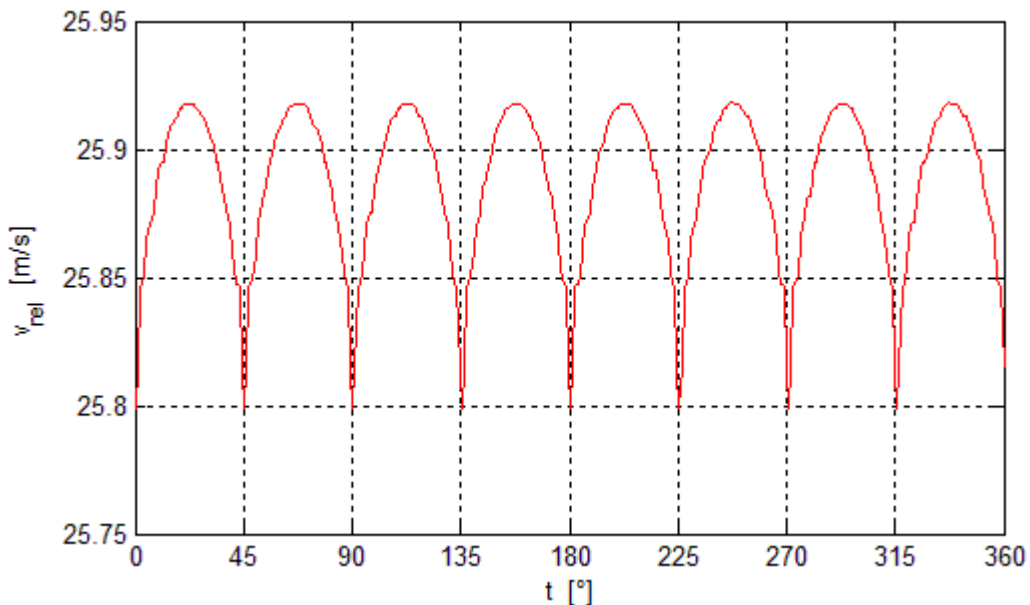


Bild 7-22: Berechnete Relativgeschwindigkeit zwischen Werkstück und CBN-Schleifscheibe am Berührungspunkt beim Gleichlaufschleifen mit Drehzahlverhältnis

$$i_v = n_s : n_w = 4 : 1$$

Nach der Bearbeitung ergibt die Rauheitsmessung der geschliffenen Oberflächen folgende Werte:

- $R_z = 5,5 \dots 13 \mu m$
- $R_a = 0,9 \dots 1,8 \mu m$

In Bild 7-23 sind zwei unterschiedliche Oberflächen abgebildet. Die Werkstückoberfläche, welche durch kurze Oszillationen in Z-Richtung erzeugt wurde, weist deutliche Facetten auf. Dabei ist jedoch die gemessene Rautiefe kleiner. Bei der Längsozillation über die gesamte Schleifscheibenbreite können dagegen an der Werkstückoberfläche nur die für das drehzahlsynchrone Unrundscheifen typischen, in Umfangrichtung verlaufenden Riefen festgestellt werden. Die kleinsten Rautiefenwerte sind bei kurzen Längsozillationen mit 1 mm Amplitude entstanden und die größten bei Längsbewegungen hinweg über die gesamte Schleifscheibenbreite.

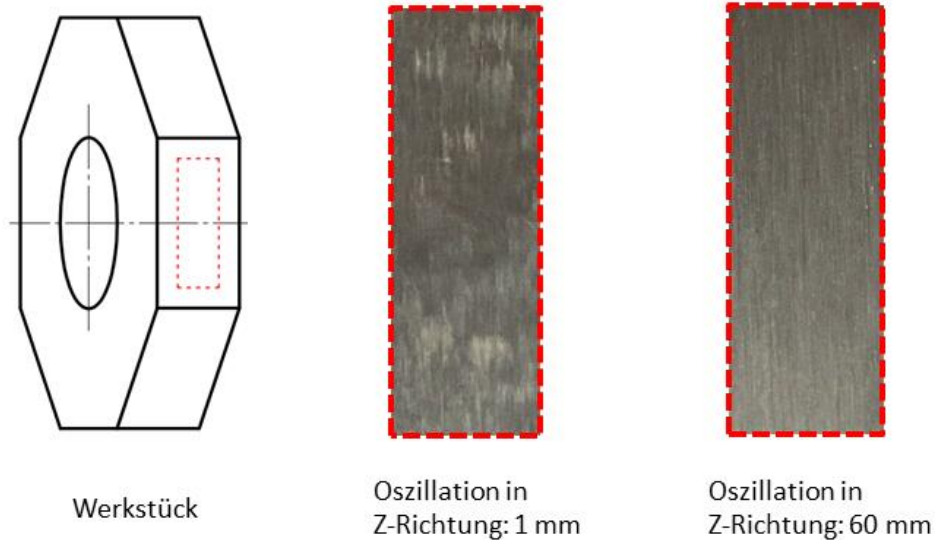


Bild 7-23: Werkstückoberflächen bei Längsozillation von 1 mm und Längsozillation über die gesamte Schleifscheibenbreite

Die Messung der Schlüsselweite (Sollmaß 60 mm) der geschliffenen Achtkantprofile ergibt Maßabweichungen bis über 0,02 mm (Bild 7-24).

Die Messung der Ebenheiten der Mantelflächen des Achtkantprofils zeigte eine durchschnittliche Abweichung von 0,01 mm (Bild 7-25).

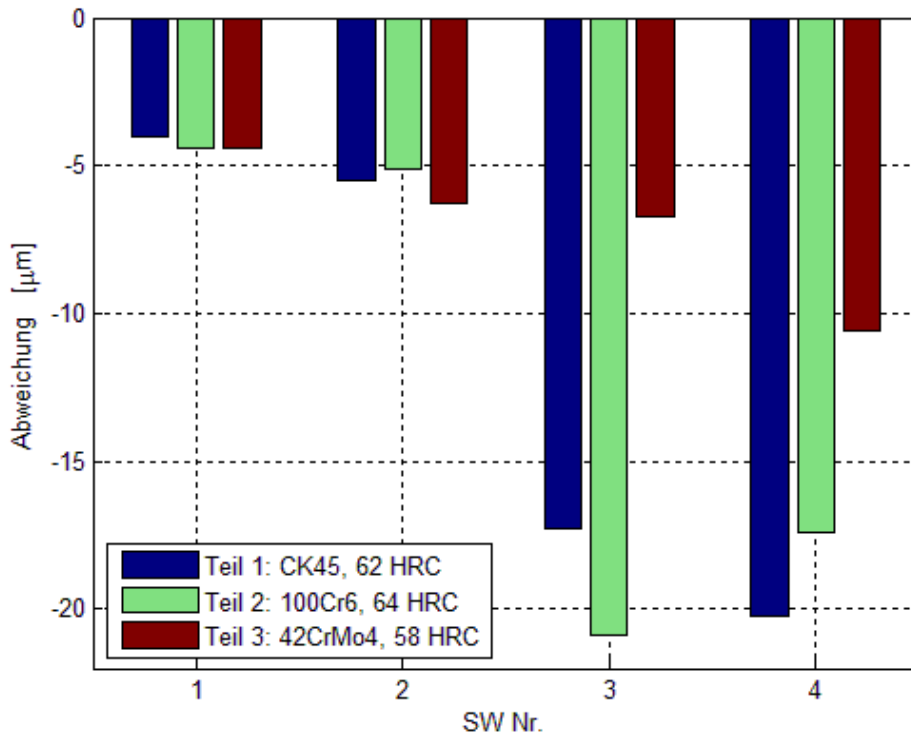


Bild 7-24: Maßabweichungen der mit CBN geschliffenen Achtkantprofile von Sollmaß SW 60 mm

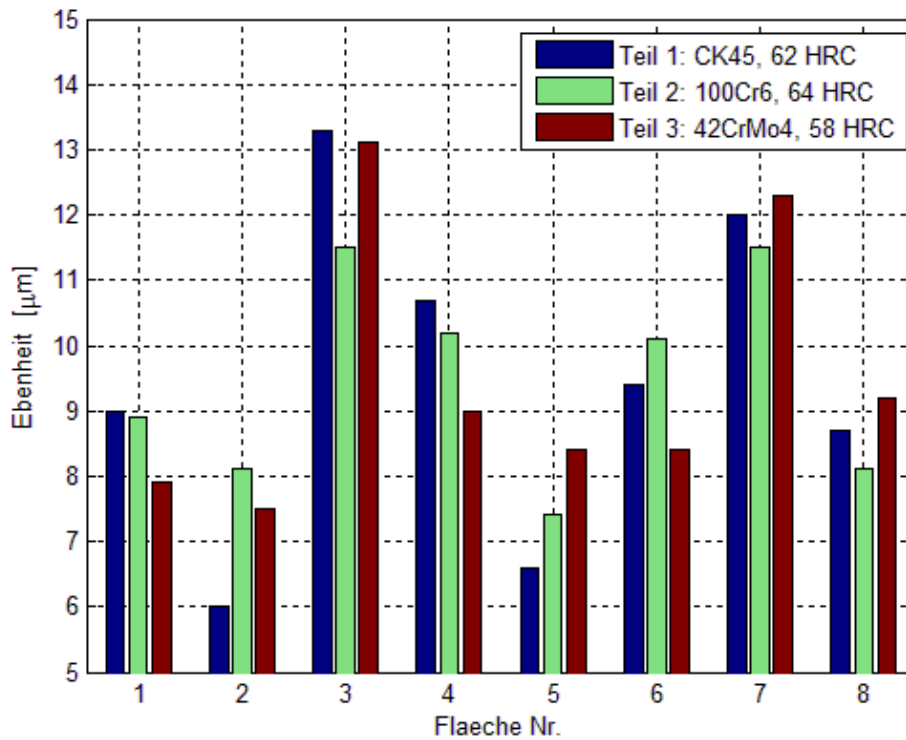


Bild 7-25: Ebenheit der Flächen der mit CBN geschliffenen Werkstücke

Mögliche **Ursachen** für die Maß- und Formabweichungen der mit der CBN-Schleifscheibe bearbeiteten Werkstücke sind:

- Abweichung des durch Pendelhubschleifen hergestellten unrunder Schleifscheiben- grundkörpers vom Sollquerschnitt
- Abweichung der Schleifschichtstärke (Korngröße, Poren)
- Rundlaufabweichung der aufgespannten und nicht abgerichteten Schleifscheibe
- Schleifscheibenabnützung
- Schleppfehler bei der Drehzahlsynchronisation
- Spitzenhöhenfehler beim Versuchsaufbau
- Ungenaues Zentrum für Reitstockspitze

Die genaue Analyse der Einflussfaktoren auf die Werkstückgenauigkeit bleibt weiter- führenden wissenschaftlichen Arbeiten vorbehalten.

Zum Abschluss dieser Versuchsreihe wird der Einfluss des Drehzahlverhältnisses auf die Werkstückoberfläche analysiert. Zu diesem Zweck werden drei Werkstücke mit unterschied- lichen Drehzahlverhältnissen bei Gleichlauf geschliffen. Nachfolgend sind die Parameter und die erzielten Oberflächenwerte angeführt:

Drehzahlverhältnis: 2:1

Werkstoff: 16MnCr5 (1.7131)

Schleifscheibendrehzahl: 1500 min⁻¹

Werkstückdrehzahl: 750 min⁻¹

→ $v_{rel} \approx 25 \text{ m/s}$

- $Rz = 11 \text{ }\mu\text{m}$
- $Ra = 1,6 \text{ }\mu\text{m}$

Drehzahlverhältnis: 3:2

Werkstoff: 100Cr6 (1.3505)

Schleifscheibendrehzahl: 1101 min⁻¹

Werkstückdrehzahl: 734 min⁻¹

→ $v_{rel} \approx 18 \text{ m/s}$

- $Rz = 12 \text{ }\mu\text{m}$
- $Ra = 1,9 \text{ }\mu\text{m}$

Drehzahlverhältnis: 1:1

Werkstoff: 16MnCr5 (1.7131)

Schleifscheibendrehzahl: 750 min^{-1}

Werkstückdrehzahl: 750 min^{-1}

→ $v_{rel} \approx 11 \text{ m/s}$

- $Rz = 17 \text{ }\mu\text{m}$
- $Ra = 2,1 \text{ }\mu\text{m}$

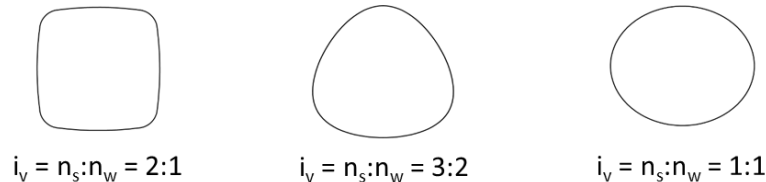


Bild 7-26: Entstehende Werkstückgeometrie beim Schleifen mit einer ovalen Schleifscheibe bei unterschiedlichen Drehzahlverhältnissen

Die Profilgeometrien der gefertigten Werkstücke, die sich aufgrund der unterschiedlichen Drehzahlverhältnisse mit ein- und derselben unrunder Schleifscheibe einstellen sind in Bild 7-26 dargestellt.

Aus den Werten der Oberflächenrauheiten ist zu erkennen, dass mit der Verkleinerung des Verhältnisses zwischen Schleifscheiben- und Werkstückdrehung die Rauheit zunimmt. Dies erklärt sich durch die geringere Anzahl an Schleifkörnern, welche an den einzelnen Umfangsbereichen zum Einsatz kommen (vgl. Abschnitt 5.1).

Wie beim Achtkantschleifen mit der Korundschleifscheibe wird auch bei den Schleifversuchen mit der CBN-Schleifscheibe ein Zusetzen der Schleifscheibenporen in den Bereichen mit dem höchsten Zerspanungsanteil und eine teils starke Geräuschentwicklung beim Schleifen festgestellt.

7.2 Verwendung eines nicht formgebundenen Abrichtrades

Der prinzipielle Versuchsaufbau bei der Verwendung eines nicht formgebundenen (kreisrunden) Abrichtrades, mit welchem unterschiedlichste Schleifscheibengeometrien flexibel abrichtbar sind, ist in Bild 7-27 schematisch dargestellt. Die Drehbewegung der C_1 -Achse wird vom Flansch des Werkstückspindelstocks über den Spanndorn auf das Werkstück übertragen. Die Abrichtspindel, welche ein kreisrundes Formabrichtrad antreibt, ist am Reitstock montiert.

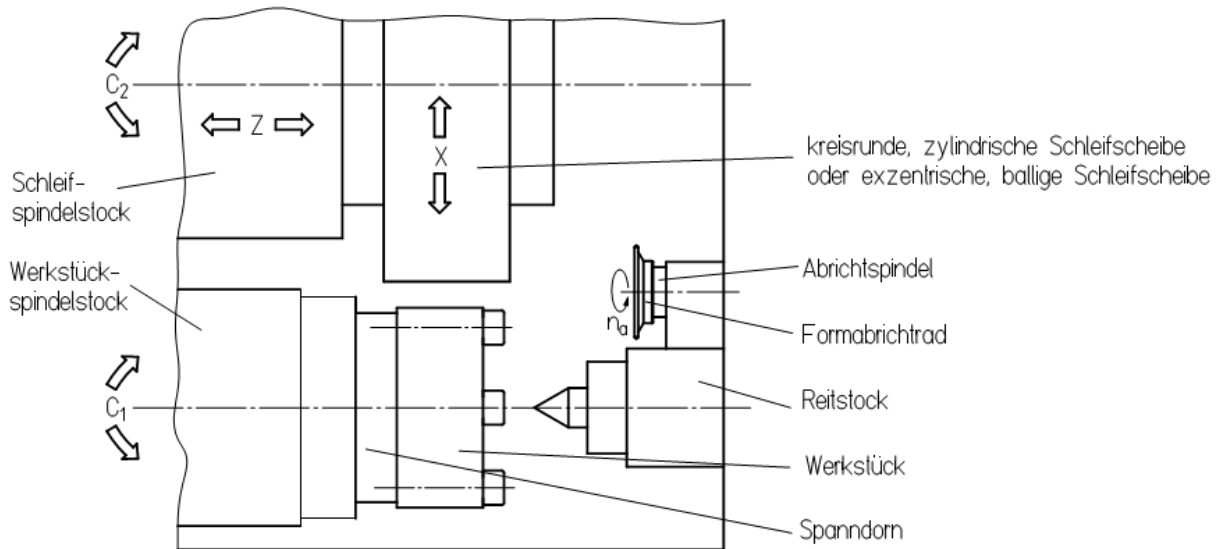


Bild 7-27: Versuchsaufbau bei der Verwendung eines Formabrichtrades

Das Formabrichtrad führt eine zur Schleifscheiben- und Werkstückdrehung unabhängige Drehbewegung aus. Es wurde von der Fa. WENDT hergestellt und ist in Bild 7-28 dargestellt.

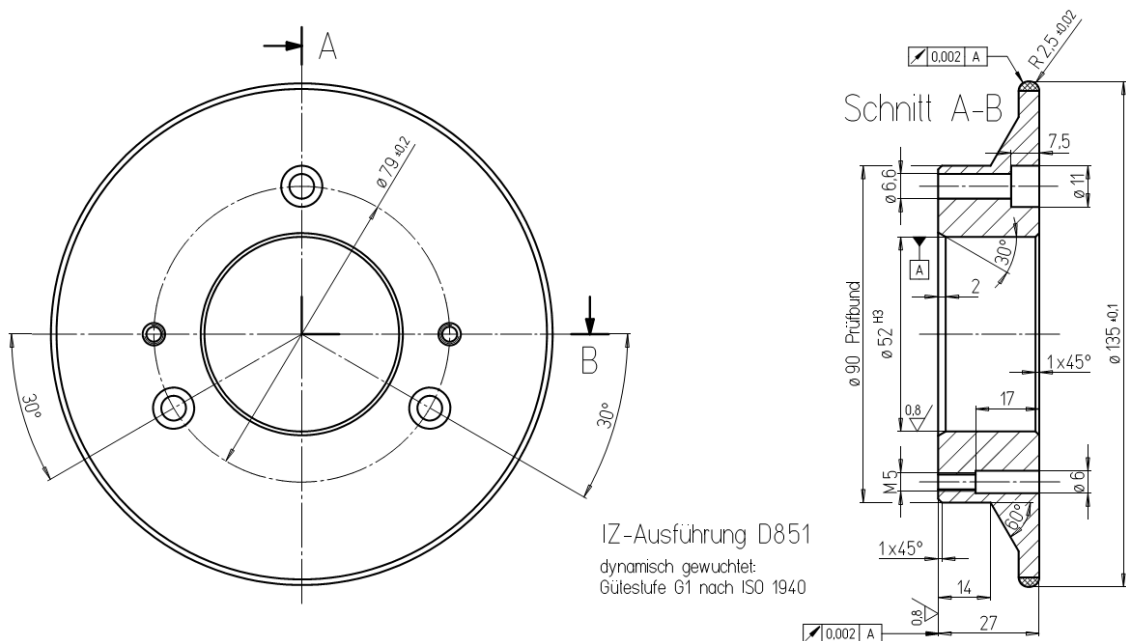


Bild 7-28: Formabrichtrad

Zur Überprüfung der Rundlaufgenauigkeit des Versuchsaufbaus wird die Schleifscheibe zunächst kreisrund und zylindrisch abgerichtet. Vorerst wird das Werkstück ohne Drehzahlssynchronisation rund geschliffen. Die Rundlaufabweichungen eines im Einstechverfahren rundgeschliffenen Werkstücks bei unterschiedlichen axialen Positionen sind in Bild 7-29 darge-

stellt. Für die Versuchsdurchführung erfolgt die Lagerung des Spanndorns sowohl einseitig im Flansch, als auch beidseitig mit Verwendung des Reitstockkörners. Es zeigt sich, dass die Rundlaufgenauigkeit der geschliffenen Werkstückquerschnitte bei einseitiger Lagerung besser ist. Bei den anschließend durchgeführten Schleifversuchen wird der Werkstückdorn daher fliegend im Flansch des Werkstückspindelstocks gespannt.

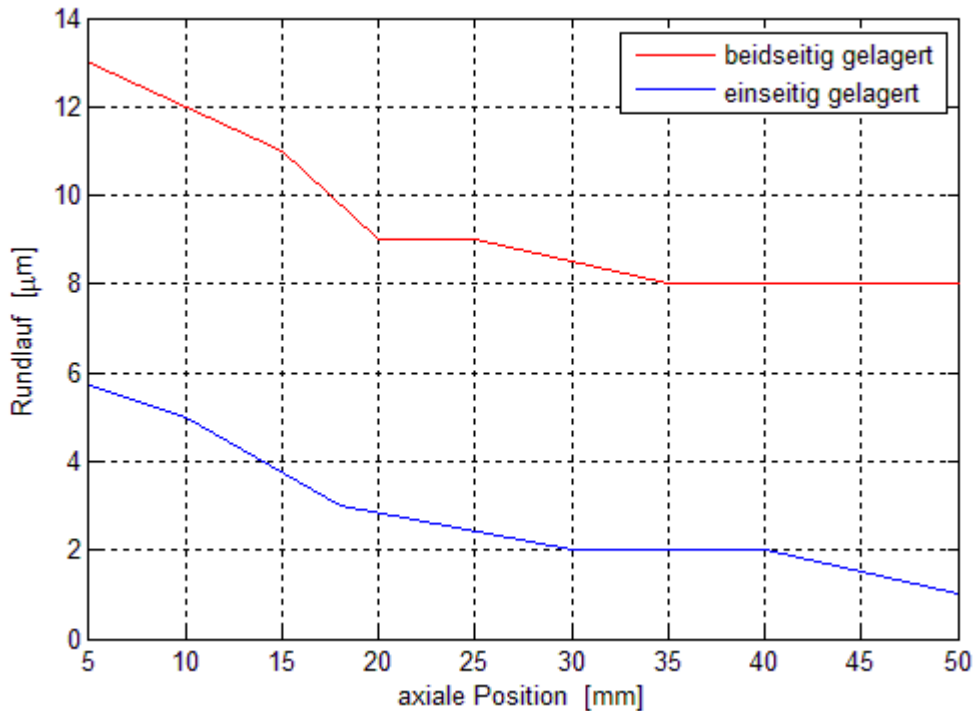


Bild 7-29: Rundlaufabweichung des bei $n_s = 1137 \text{ min}^{-1}$ und $n_w = 579 \text{ min}^{-1}$ asynchron geschliffenen Werkstücks an unterschiedlichen axialen Positionen bei ein- und beidseitiger Lagerung

7.2.1 Einfluss der Abricht- und Schleifparameter auf die Oberflächenrauheit

Bei den nachfolgenden Schleifversuchen werden die Einflüsse der Abricht- und Schleifparameter auf die Oberflächenqualität des gefertigten Werkstücks untersucht. Dabei wird die Schleifscheibe wie zuvor kreisrund und zylindrisch abgerichtet. Jedoch wird jetzt das Werkstück drehzahlsynchron im Einstechverfahren rund geschliffen. Die beiden hierzu verwendeten **Schleifscheiben** (Schleifmittel Edelkorund, Bindung keramisch) unterscheiden sich nur durch die Körnung (80 und 120):

- TYROLIT 590x70x203,2 CS55A80 1 JJ 3 VK1/50
- TYROLIT 590x70x203,2 CS55A120 1 JJ 3 VK1/50

Die **Ausgangsparameter** beim Schleifen und Abrichten sind:

- Vorschub in Z-Richtung beim Abrichten: 25 mm/min
- Drehzahl des Abrichtrades: 8000 min⁻¹
- Drehrichtung beim Abrichten: Gegenlaufabrichten
- Schleifscheibendrehzahl beim Abrichten: 600 min⁻¹
- Radialer Vorschub beim Schleifen: 0,1 mm/min
- Schleifscheibendrehzahl beim Schleifen: 1200 min⁻¹
- Schleifscheibendurchmesser: 590 mm
- Radiale Zustellung beim Schleifen: 0,1 und 0,9 mm
- Drehrichtung beim Schleifen: Gegenlaufschleifen
- Werkstückdrehzahl beim Schleifen: 600 min⁻¹
- Werkstückdurchmesser: 132 mm
- Werkstoff: C45E (1.1191)

Bei den durchgeführten Versuchen wird jeweils pro Versuchslauf nur ein Schleif- oder Abrichtparameter geändert. Nach den Einstechvorgängen beim Schleifen, mit radialen Zustellungen von $\Delta x = 0,1$ und $\Delta x = 0,9$ mm, wird der jeweils veränderte Parameter wieder zurückgesetzt und die Schleifscheibe neu abgerichtet. Die Parameteränderungen (jeweils Halbierung des Ausgangswertes) und die dabei erzielten Rautiefen am gefertigten Werkstück sind in Bild 7-30 angeführt.

Schleifscheibenkörnung 80							
Ausgangswerte		Parameteränderung					
		$f_a = 12,5$ mm/min		$n_a = 4000$ min ⁻¹		$n_w = 300$ min ⁻¹	
		$\Delta x = 0,1$ mm	$\Delta x = 0,9$ mm	$\Delta x = 0,1$ mm	$\Delta x = 0,9$ mm	$\Delta x = 0,1$ mm	$\Delta x = 0,9$ mm
Rz [μ m]	7,7	7,0	7,1	10	9,6	6,3	6,8
Ra [μ m]	1,1	0,96	1,0	1,4	1,5	0,93	0,96
Schleifscheibenkörnung 120							
Ausgangswerte		Parameteränderung					
		$f_a = 12,5$ mm/min		$n_a = 4000$ min ⁻¹		$n_w = 300$ min ⁻¹	
		$\Delta x = 0,1$ mm	$\Delta x = 0,9$ mm	$\Delta x = 0,1$ mm	$\Delta x = 0,9$ mm	$\Delta x = 0,1$ mm	$\Delta x = 0,9$ mm
Rz [μ m]	5,7	4,8	5,2	5,8	6,1	5,1	4,4
Ra [μ m]	0,75	0,66	0,7	0,82	0,89	0,75	0,69

Bild 7-30: Erzielte Rz- und Ra-Werte der im Einstechverfahren geschliffenen Werkstückoberfläche bei unterschiedlichen Abricht- und Schleifparametern

Die Ergebnisse zeigen, dass eine feinere Schleifscheibenkörnung die Oberflächenrauheit des geschliffenen Werkstücks deutlich verbessert. Beim Vergleich der unterschiedlichen Zerspanungsvolumen durch die unterschiedlichen radialen Werkstückabtragungen Δx von 0,1 und 0,9 mm ergeben sich bei den Oberflächenwerten teils nur geringe Veränderungen im

Schleifergebnis. Die Verkleinerung der Drehzahl des Formrades beim Abrichten der Schleifscheibe mit Körnung 120 hatte gleichfalls nur einen marginalen Einfluss. Anders ist die Situation beim Abrichten der Schleifscheibe mit Körnung 80. Hier wirkt sich die Drehzahländerung auf das erzielte Schleifergebnis deutlich aus. Bei unveränderter Schleifscheibendrehzahl bewirkt die Verkleinerung der Werkstückdrehzahl eine Erhöhung der bei einer Werkstückumdrehung eingreifenden Anzahl an Schleifkörnern. Diese Veränderung ist gleichzusetzen mit der Bearbeitung eines kleineren Werkstückquerschnitts oder der Verwendung einer größeren Schleifscheibe. Diese Veränderung übt einen mittleren Einfluss auf die gefertigte Werkstückoberfläche aus. Die Veränderung des axialen Abrichtvorschubs, welcher die axiale Überdeckung zwischen Schleif- und Abrichtkörner verändert, hat gleichfalls einen mittleren Einfluss. Diese axiale Überdeckung ist auch durch den axialen Formradius des Abrichtwerkzeugs beeinflussbar.

Beim Messen von drei Bereichen des mit Körnung 120 geschliffenen Werkstücks, die durch die Zustellung mit exakt 0,9 mm vorgegeben sind, werden Abweichungen bis zu 3 μm festgestellt. Diese verhältnismäßig kleinen Abweichungen können durch eine leichte Abnutzung der Schleifscheibe, oder durch eine Ungenauigkeit bei der Bearbeitung entstanden sein.

7.2.2 Abrichten und Einsatz einer dreidimensional geformten Schleifscheibe

Kolben für Brennkraftmaschinen haben ovale Querschnitte, die im Vergleich zu anderen Unrundprofilen (z.B. Polygonprofil, Achtkant etc.) nur geringfügig von der Kreisform abweichen. Mit den zuvor gezeigten Versuchseinrichtungen sind dreidimensionale Schleifscheiben abrichtbar, die sich für die Bearbeitung dreidimensionaler Kolbengeometrien eignen. Beim Kolbenschleifen bietet sich an, die drehsymmetrische Werkstückgeometrie zur Vergrößerung des Verhältnisses zwischen Schleifscheiben- und Werkstückdrehung zu nutzen. Dadurch kann, bei einer an der Versuchsmaschine maximal möglichen Werkstückdrehzahl von 800 min^{-1} , die zur Werkstückdrehung synchrone Schleifscheibendrehzahl verdoppelt werden. Zudem verbessert sich die Oberflächenrauigkeit der geschliffenen Werkstückoberfläche, da an lokalen Umfangsbereichen des Werkstücks die doppelte Anzahl von Schleifkörnern schneiden. Somit wird in weiterer Folge für das Kolbenschleifen das Verhältnis zwischen Schleifscheiben- und Werkstückdrehung von $i_v = 2:1$ angewendet. Aufgrund des Drehzahlverhältnisses ist das Schleifscheibenprofil zum Drehmittelpunkt exzentrisch und durch die geringe Abweichung des Kolbenquerschnitts von der Kreisform ist die Profilform der Schleifscheibe nahezu ein Kreis. Die Profilabweichung des durch einen Kreisexzenter angenäherten Schleifscheibenquerschnitts (s. Abschnitt 4.1.4) von der exakten Schleifschei-

ben-Sollgeometrie ist von mehreren Parametern abhängig. Nachfolgend sind diese Parameter mit den in diesem Forschungsprojekt zu untersuchenden **Wertebereichen** aufgelistet:

- Drehsinn: Gegenlaufschleifen
- Schleifscheibendurchmesser: $500 \text{ mm} \leq D_s \leq 600 \text{ mm}$
- Werkstückdurchmesser / radiale Ovalität (s. Abschnitt 3.6.12):
 - $D_w \sim 88 \text{ mm} / \leq 0,2 \text{ mm}$ (konstruktiver Vorgabewert des Pkw-Referenzkolbens)
 - $D_w \sim 132 \text{ mm} / \leq 0,35 \text{ mm}$ (konstruktiver Vorgabewert des Lkw-Referenzkolbens)

Die rechnerischen Untersuchungen mit den oben festgelegten Wertebereichen ergeben, dass bei einem Drehzahlverhältnis $i_v = n_s : n_w = 2 : 1$ die radiale Profilabweichung einer exzentrisch runden Schleifscheibe (s. Abschnitt 4.1.4) von dem theoretisch notwendigen ungerundeten Schleifscheibenprofil (s. Abschnitt 4.1.1 oder Abschnitt 4.1.2) stets kleiner als $1 \mu\text{m}$ ist.

Bei den abschließenden Schleifversuchen wird eine dreidimensionale Geometrie verwendet, welche ähnliche Abweichungen von der Zylinderform und vom Kreisquerschnitt wie der Kolben einer Brennkraftmaschine aufweist. Dabei wird zunächst die Schleifscheibe dreidimensional derart abgerichtet, dass das Werkstück mit einer einzigen, linear in X-Richtung verlaufenden Einstechbewegung fertig geschliffen wird. Die dreidimensional abgerichtete Geometrie ist in axialer Richtung an beiden Seiten sowohl mit Übergangszonen, als auch mit runden, zylindrischen Ansätzen erweitert, die beim Schleifen ebenso auf das Werkstück übertragen werden. In Bild 7-31 ist die Geometrie der Schleifscheibe und des Werkstücks am Ende der Schleifbearbeitung dargestellt. Hierbei ist zur Verdeutlichung die Unrundheit stark überhöht gezeichnet.

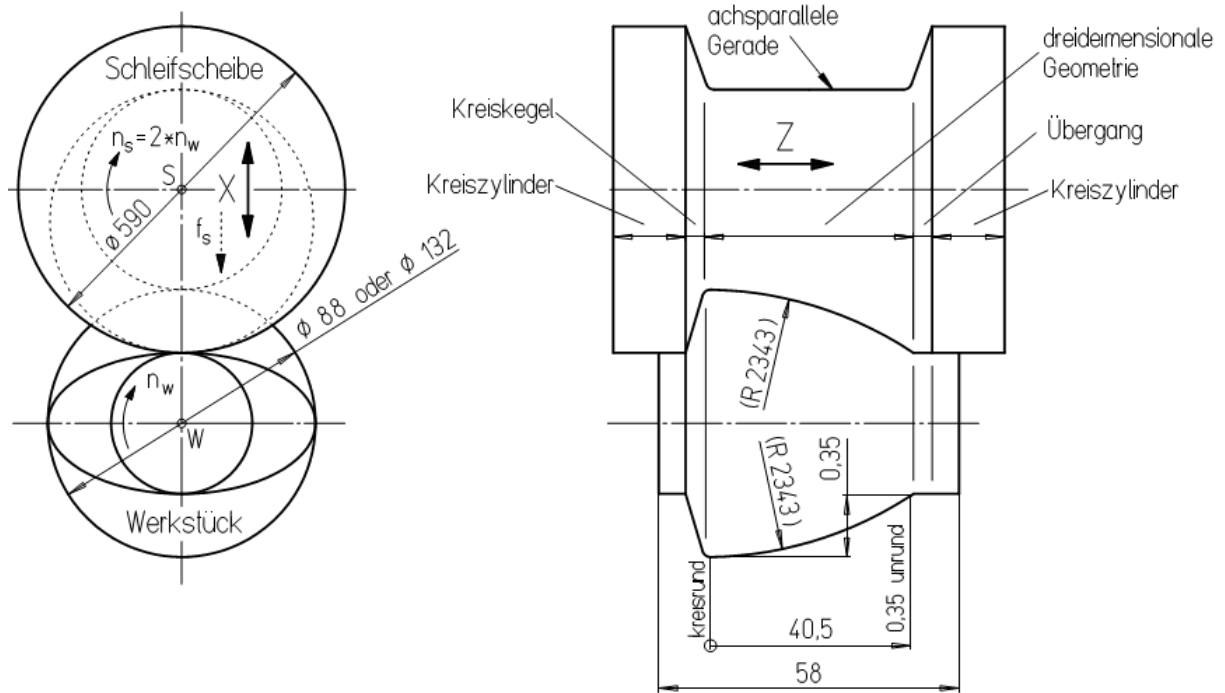


Bild 7-31: Dreidimensionale Geometrie der Schleifscheibe und des Werkstücks am Ende der Schleifbearbeitung

Die bei den Schleifversuchen verwendeten **Parameter** sind:

- Vorschub in Z-Richtung beim Abrichten: 25 mm/min
- Drehzahl des Abrichtrades: 8000 min^{-1}
- Schleifscheibendrehzahl beim Abrichten: 300 min^{-1}
- Drehrichtung beim Abrichten: Gegenlaufabrichten
- Schleifscheibenkörnung: 120
- Schleifscheibenbezeichnung: TYROLIT 590x70x203,2 CS55A120 1 JJ 3 VK1/50
- Schleifscheibendrehzahl beim Schleifen: 1200 min^{-1}
- radialer Vorschub beim Schleifen: 0,12 mm/min
- Werkstückdrehzahl beim Schleifen: 600 min^{-1}
- Drehrichtung beim Schleifen: Gegenlaufschleifen
- Schleifscheibendurchmesser¹: 590 mm
- Werkstückdurchmesser / Werkstoff:
 - Pkw-Kolben: 88 mm / 100Cr6 (1.3505)
 - Lkw-Kolben: 132 mm / S355J0 (1.0553)

¹ Eine Veränderung des Schleifscheibendurchmessers um weniger als 10 mm hat praktisch keine Auswirkung auf die Geometrie des gefertigten Werkstücks, sofern der Schleifscheibenverschleiß durch Reduzierung des Achsabstands zwischen Werkstück- und Schleifscheibenachse entsprechend korrigiert wird.

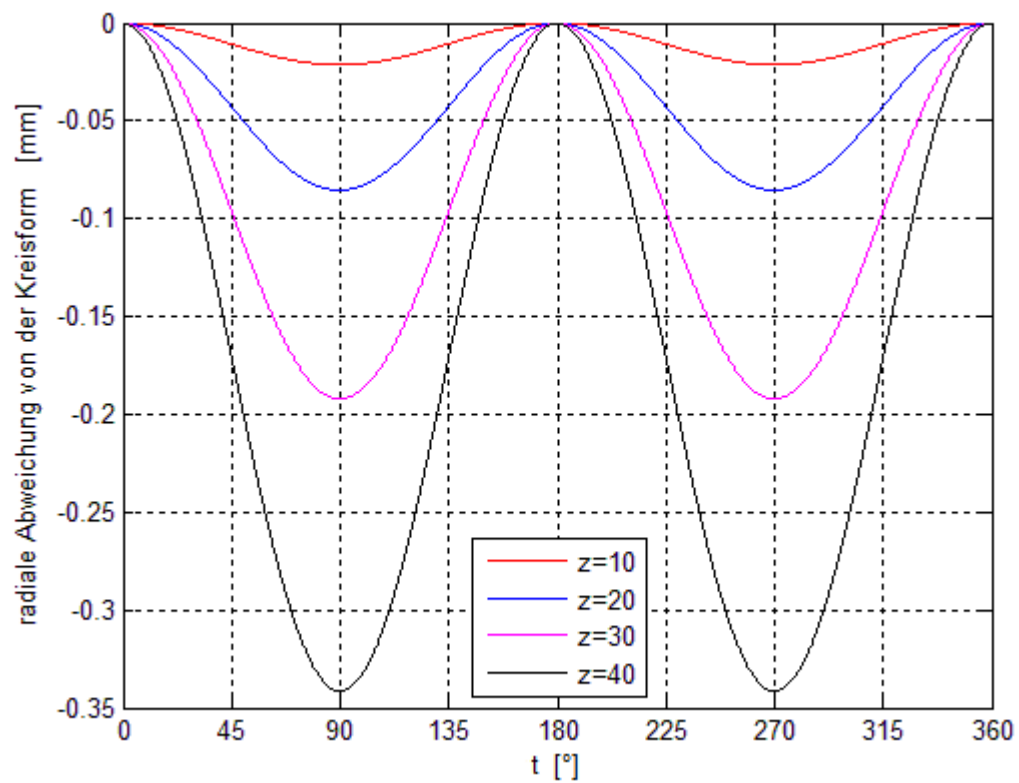


Bild 7-32: Berechnete Unrundheiten des Werkstücks in Abhängigkeit zur Z-Position

In Bild 7-32 sind die berechneten Unrundheiten der Werkstückquerschnitte bei unterschiedlichen Z-Positionen dargestellt, welche mit der in Abschnitt 3.6.12 gezeigten Sinusfunktion (3.28) berechnet wurden.

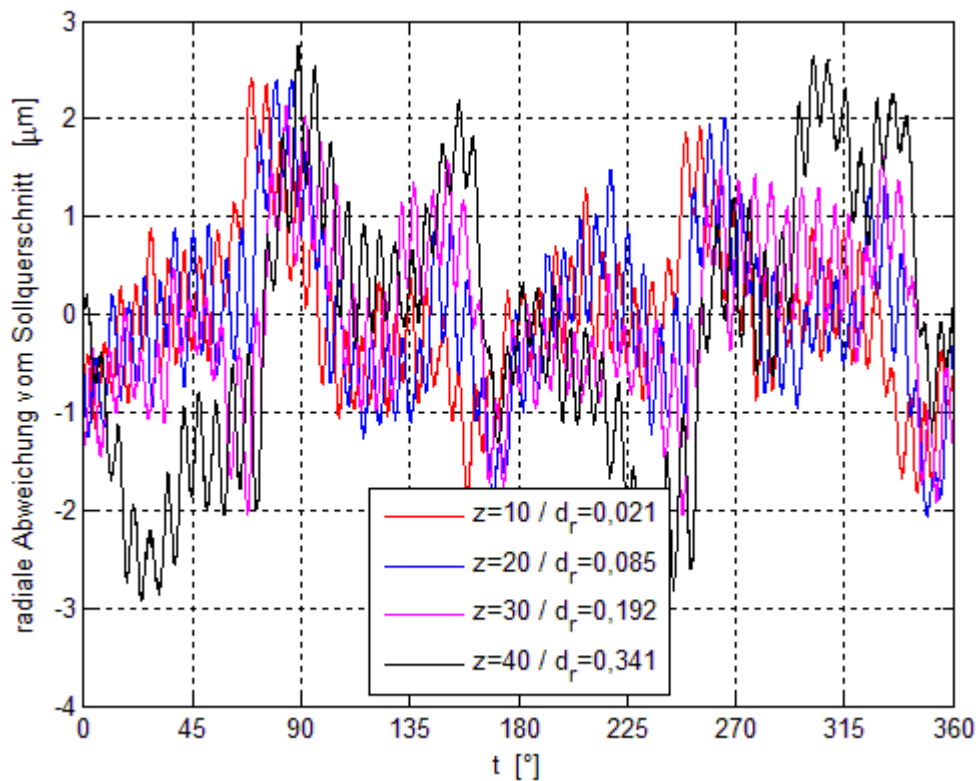


Bild 7-33: Gemessene Geometrieabweichungen der unrunder Querschnitte von den Sollquerschnitten an den unterschiedlichen Z-Positionen beim Werkstück mit Nenndurchmesser 88 mm (Bandbreite der Geometrieabweichung: 6 μm)

Beim Schleifen der Werkstücke mit Durchmesser 88 und 132 mm zeigen sich die in Bild 7-33 und Bild 7-34 dargestellten gemessenen Abweichungen der unrunder Werkstückquerschnitte von der Sollgeometrie bei den unterschiedlichen Z-Positionen. Die Messung der Konzentrität der einzelnen unrunder Querschnitte in Bezug zur Mittenachse der beidseitigen Kreiszyylinder ergibt Abweichungen bis zu 1 μm .

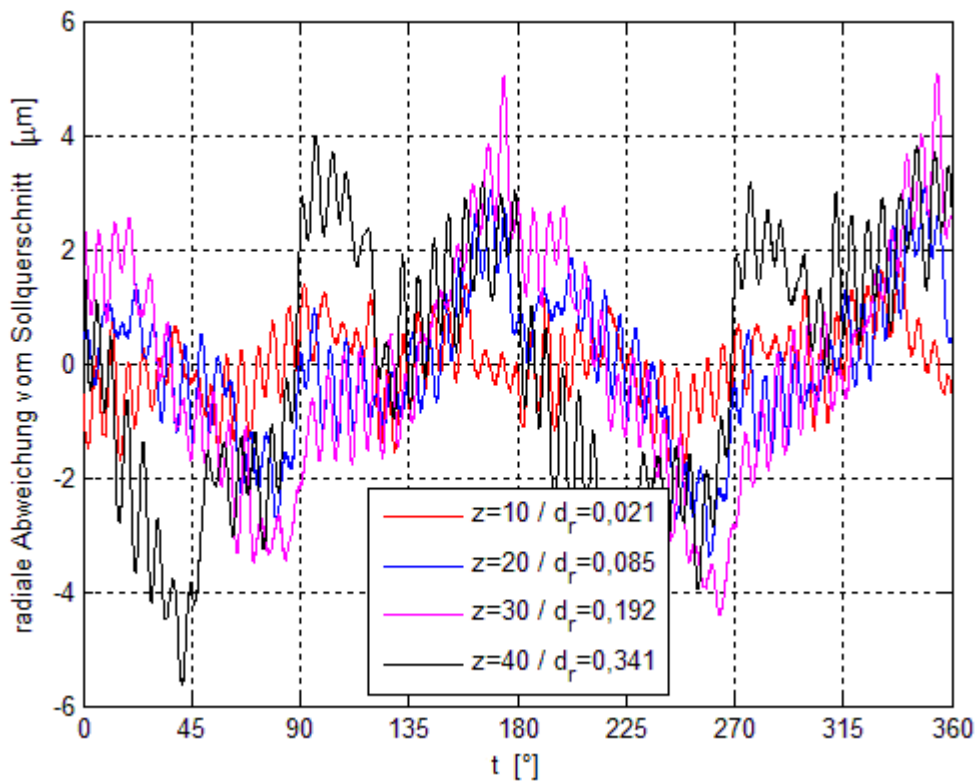


Bild 7-34: Gemessene Geometrieabweichungen der unrunder Querschnitte von den Sollquerschnitten an den unterschiedlichen Z-Positionen beim Werkstück mit Nenndurchmesser 132 mm (Bandbreite der Geometrieabweichung: 10 µm)

Wie beim drehzahlsynchronen Achtkantschleifen zeigt sich auch beim Schleifen der dreidimensional geformten Versuchswerkstücke ein starkes Zusetzen der Schleifscheibe (Bild 7-35). Zudem treten besonders beim Schleifen des größeren Werkstückdurchmessers starke Geräuscentwicklungen auf.

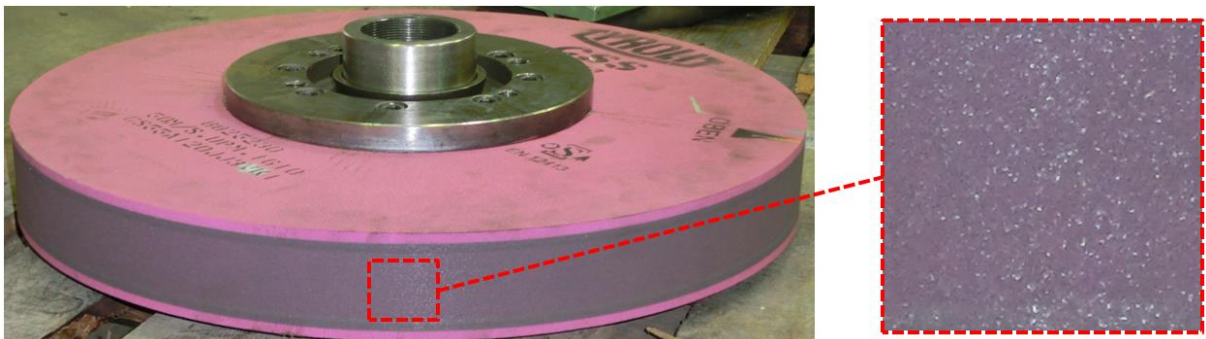


Bild 7-35: Zusetzen der Schleifscheibe beim Schleifen der gewählten dreidimensionalen Versuchsgeometrie für Automobilkolben

Die Anzahl der am Werkstückumfang eingreifenden Schleifkörner sind bei der Bearbeitung der unterschiedlich großen Werkstücke gleich. Der bearbeitete Werkstückumfang ist jedoch um das Nenndurchmesser Verhältnis $132:88 = 3:2$ unterschiedlich, wodurch am kleineren Werkstück auch eine kleinere Oberflächenrauigkeit zu erwarten ist. Dies bestätigen die durchgeführten Schleifversuche. Die gemessenen Oberflächenwerte der nicht zylindrisch und unrund gefertigten Werkstücke sind:

Werkstückdurchmesser 88 mm (Pkw-Kolbenprofil bzw. -form):

- $Rz = 6,2 \mu m$
- $Ra = 0,94 \mu m$

Werkstückdurchmesser 132 mm (Lkw-Kolbenprofil bzw. -form):

- $Rz = 6,5 \mu m$
- $Ra = 1,0 \mu m$

Der vorgegebene maximale Beschleunigungswert des Schleifsupports (X-Achse) von 1 m/s^2 wird bei den dreidimensionalen Abrichtprozessen auch mit der Schleifscheibendrehzahl von 600 min^{-1} deutlich unterschritten (Bild 7-36). Die Erhöhung der Schleifscheibendrehzahl von 300 min^{-1} auf 600 min^{-1} verursacht fallweise Fehlermeldungen, sodass der Abrichtvorgang von der Maschinensteuerung abgebrochen wird. Bei der Verkleinerung des axialen Abrichtvorschubs wird, infolge der länger andauernden Abrichtvorgänge, der Abrichtprozess wegen Überhitzung der Abrichtspindel steuerungsseitig gleichfalls abgebrochen. Aus diesen Gründen können bei der Versuchsdurchführung die Schleifscheibendrehzahl nicht erhöht und der axiale Vorschub beim Abrichten nicht verkleinert werden. Verbesserte Rautiefen auf der geschliffenen Werkstückoberfläche sind somit derzeit nicht erreichbar. Durch Änderungen bei den Abricht- und Schleifparametern besteht jedoch ein deutliches Verbesserungspotential, wie die Untersuchungen in Abschnitt 7.2.1 gezeigt haben.

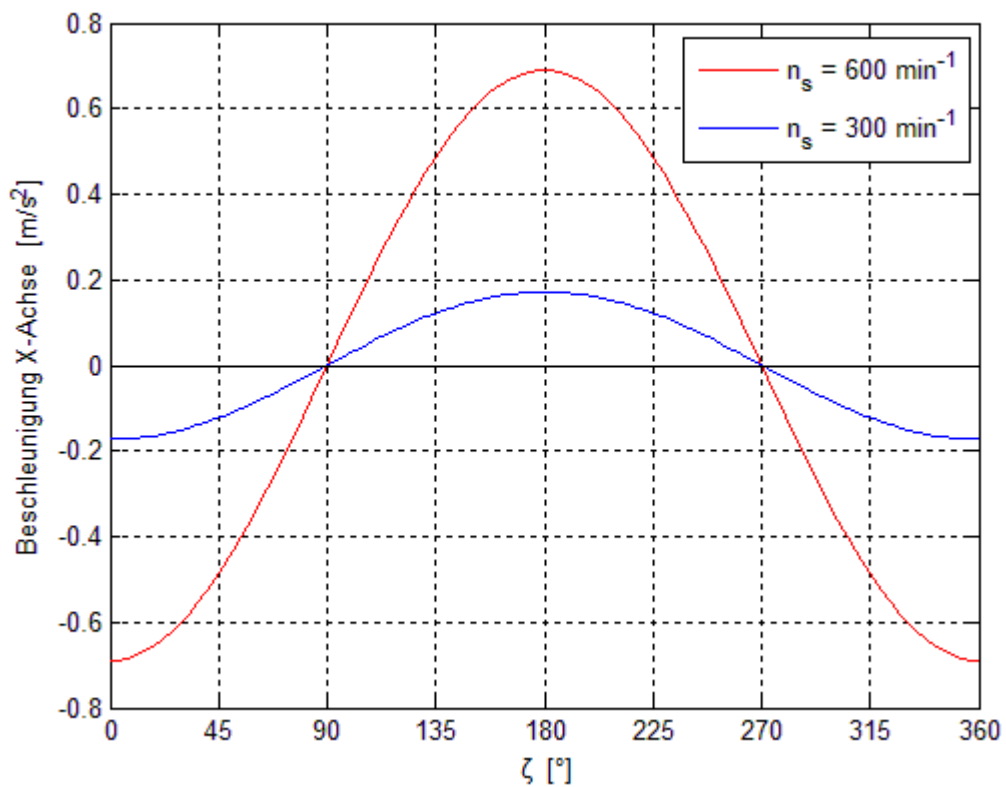


Bild 7-36: Berechnete Beschleunigung der X-Achse beim Abrichten der dreidimensionalen Schleifscheibengeometrie

Mit den durchgeführten Schleifversuchen ist die theoretische Machbarkeit des Schleifens unrunder und gleichzeitig nicht zylindrischer Werkstücke durch drehzahlsynchrones Unrundschleifen bewiesen. Zudem verifizieren die Schleifversuche die hierfür erstellten Softwaretools.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Nachfolgend sind die wesentlichen **Vorteile** des drehzahlsynchronen Unrundschleifens im Vergleich zum herkömmlichen Unrundschleifen kurz zusammengefasst:

- Es ist die gleichzeitige Bearbeitung mehrerer unrunder Querschnitte mit einer einzigen Zustellbewegung möglich.
- Bei der Bearbeitung ist nur eine technisch weniger anspruchsvolle Zustellbewegung und keine interpolierende Pendelhubbewegung notwendig. Dadurch wird die Energieeffizienz der Schleifmaschine erhöht und gleichzeitig die Beanspruchung der Antriebskomponenten verringert.
- Auf bestimmte Bearbeitungsaufgaben bzw. Werkstücke geometrisch angepasste und optimierte Schleifmaschinen sind in ihrem Aufbau im Vergleich zu herkömmlichen Unrundschleifmaschinen kostengünstiger, kompakter und stabiler.
- Bei der Bearbeitung konkaver Werkstücke oder beim Innenschleifen sind Schleifscheiben mit größeren radialen Ausdehnungen verwendbar. Die Schleifspindeln können dadurch steifer ausgeführt werden
- Die effiziente Bearbeitung dreidimensional geformter Werkstücke ist mit dreidimensional geformten Schleifscheiben mit einer einzigen radial gerichteten Zustellbewegung möglich. Eine Längsbewegung in Z-Richtung ist bei der Bearbeitung nicht erforderlich.
- Unrundprofile sind im Schrägeinstechverfahren ohne Profil- bzw. Formabweichung herstellbar.

Dem gegenüber stehen jedoch die folgenden **Nachteile**:

- Es ist eine robuste Synchronisation zwischen der Schleifscheiben- und Werkstückdrehung (2. C-Achse über elektronisches Getriebe gekoppelt) erforderlich.
- Das Abrichten der Schleifscheibe ist komplexer und aufwändiger.
- Das Verfahren ist nur für die Serienfertigung mit sehr großen Produktionsstückzahlen geeignet.
- Eine ungleichmäßige Verteilung des Zerspanungsvolumens am Umfang der Schleifscheibe verursacht einen ungleichmäßigen Verschleiß. Dieser ungleichmäßige Verschleiß führt in weiterer Folge zu höheren Werkzeugkosten, da die Schleifscheibe zur Gewährung einer gleichbleibenden Fertigungsqualität in kürzeren Intervallen ausgetauscht oder abgerichtet werden muss.

- Das Verfahren ist für Gegenlaufschleifen nur bedingt geeignet. Werkstückgeometrien mit verhältnismäßig großen oder konkaven Krümmungsradien, wie etwa die Nocken einer Nockenwelle, können beim Gegenlaufschleifen meist nur mit einer erheblichen Geometrieabweichung hergestellt werden.
- Beim Gleichlaufschleifen ergeben sich an den Berührungspunkten zwischen Werkstück und Werkzeug kleinere Relativgeschwindigkeiten.
- Eine vorhandene Unwucht des Werkstücks wirkt sich durch die hohen Drehzahlen der Werkstückspindel wesentlich stärker negativ aus und muss eventuell kompensiert werden.
- Eine eventuelle geometriebedingte Unwucht der Schleifscheibe muss ebenfalls kompensiert werden.
- Geometrieabweichungen der Schleifscheibe werden direkt auf das Werkstück übertragen.
- Beim Einstechschleifen mit dreidimensional geformten Schleifscheiben muss die daraus resultierende höhere Rauheit an der Werkstückoberfläche ev. durch die Verwendung einer feineren Schleifscheibenkörnung kompensiert werden. Dadurch verringert sich die Zerspanungsleistung.

Zur Verbesserung der Rauheitswerte einer drehzahlsynchron geschliffenen Werkstückoberfläche und zur Reduktion der Schleifkornbelastungen soll der Schleifkornabstand möglichst klein und der radiale Ausdehnungsunterschied zwischen den Wirkpartnern möglichst groß sein. Jedoch ist im Arbeitsraum einer Schleifmaschine die radiale Größe der Schleifscheibe begrenzt. Die abrasive Wirkung wird durch die Korn- und Porengröße stark beeinflusst. Darüber hinaus ist beim drehzahlsynchronen Unrundscheifen zu beachten, dass sich die synchronen Schleifscheiben- und Werkstückdrehungen nicht beliebig erhöhen lassen. Durch das unrunde Abtragen am Werkstück verändert sich dessen Massenverteilung. Die daraus resultierende zusätzliche Unwucht nimmt mit der Drehzahl quadratisch zu. Des Weiteren können unrunde Werkstückgeometrien mit einer unrunder Schleifscheibe beim technologisch vorteilhaften Gegenlaufschleifen oft nicht exakt hergestellt werden. Die in dieser Arbeit durchgeführten Versuche und Untersuchungen zeigen, dass das drehzahlsynchrone Unrundscheifen das herkömmliche Pendelhubschleifen aufgrund der oben beschriebenen Nachteile nicht vollständig verdrängen wird. Allerdings sind mit diesem Verfahren Werkstücke bearbeitbar, die sich auf herkömmlichen Pendelhubschleifmaschinen nicht, oder nur mit einem zeitlichen Mehraufwand schleifen lassen. Als Beispiel sei hier das Schleifen einer unrunder und nicht zylindrischen Kolbengeometrie genannt, bei welcher sich die Bearbeitungs kinematik erheblich vereinfacht. Darüber hinaus zeigt die vorliegende Arbeit innovative

Bearbeitungskonzepte auf, wie in Zukunft die Nockenscheiben einer Nockenwelle noch effizienter geschliffen werden können. Weitere Kostensenkungspotentiale erschließen sich, wenn mehrere unrunde Geometrien gleichzeitig bearbeitet, oder kostengünstige und kompakte Unrundscheifmaschinen eingesetzt werden.

Zur Vorbereitung der in dieser Arbeit dokumentierten Schleifversuche waren umfangreiche theoretische Untersuchungen über die geometrischen Zusammenhänge erforderlich, was die Erstellung entsprechender Programmierertools erforderte. Zudem sind alle Schleifversuche durch entsprechende Simulationen vorbereitet und teilweise schon im Vorfeld optimiert worden. Die durchgeführten Schleifversuche wurden auf einer von der Fa. GST – Gesellschaft für Schleiftechnik, Sierndorf neu adaptierten, jedoch schon 30 Jahre alten Rundschleifmaschine durchgeführt. Diese Schleifmaschine war ursprünglich für andere Anforderungen ausgelegt, wodurch sich bei praktischen Untersuchungen für das drehzahlsynchrone Unrundscheifen technische Grenzen ergeben. Dies ist bspw. die maximal mögliche Werkstückdrehzahl von 800 min^{-1} , welche auch die dazu synchrone Schleifscheibendrehzahl begrenzt. Zudem erfordert die hydrodynamische Schmierung der Schleifscheibenspindel eine Schleifscheibenmindestdrehzahl. Diese Mindestdrehzahl begrenzt wiederum den möglichen Pendelhub beim flexiblen Abrichten der Schleifscheibe mit einem im Querschnitt runden Abrichtrad. Hier darf die zulässige Beschleunigung von ca. 1 m/s^2 nicht überschritten werden. Deshalb sind im Rahmen der vorliegenden Arbeit Abrichtversuche nur mit Schleifscheiben möglich, die relativ geringe, von der Kreisform abweichende Unrundheiten aufweisen. Folglich sind die Anwendungsmöglichkeiten des Pendelhubabrichtens an der vorhandenen Versuchsschleifmaschine stark eingeschränkt.

Der Fortschritt in der Produktionstechnik wird nicht nur durch die kontinuierliche Verbesserung der Werkzeugmaschinen, sondern auch durch den Einsatz neuer, innovativer Fertigungsverfahren bestimmt. Zur Aufrechterhaltung der Wettbewerbsfähigkeit ist eine ständige Suche nach Rationalisierungspotentialen und Qualitätsverbesserungen unumgänglich. Das IFT der TU-Graz beschäftigt sich seit Jahrzehnten erfolgreich mit der Technologie des Schleifens und war maßgeblich an der Entwicklung des CNC-Unrundscheifens beteiligt. Das Unrundscheifen stellt noch immer einen Forschungsschwerpunkt und eine wesentliche Kernkompetenz des Institutes dar. Durch die neuen Einsatzmöglichkeiten des drehzahlsynchronen Unrundscheifens besteht reges Interesse aus der Industrie, das Potential dieser Technologie weiter zu erforschen. Um weiterführende Untersuchungen durchführen zu können und die Kompetenzen auf dem Gebiet des Unrundscheifens weiter auszubauen, ist

am IFT die Anschaffung einer neuen Versuchsschleifmaschine geplant. Das entsprechende Maschinenkonzept ist in Bild 8-1 skizziert.

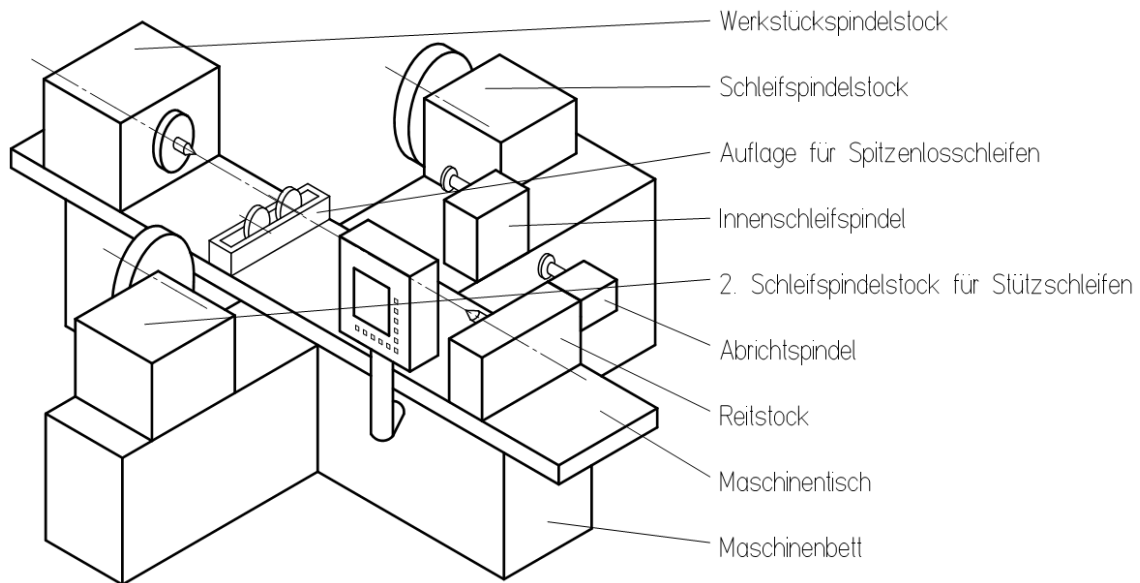


Bild 8-1: Maschinenkonzept für eine neue, universell einsetzbare Schleifmaschine

Mit dieser neuen Schleifmaschine wird, neben der Nutzung für herkömmliche Bearbeitungsaufgaben, der Grundstein für weiterführende Forschungsarbeiten geschaffen:

- Herkömmliches Unrundscheifen (Pendelhubschleifen)
 - o Außenschleifen
 - o Innenschleifen
- Forschungsteilgebiete
 - o Stützscheifen
 - o Drehzahlsynchrones Unrundscheifen
 - o Spitzenlos-Unrundscheifen
 - o Einsatz von Schleifscheiben mit Innenkühlung
 - o High Speed Grinding
 - o Minimalmengenschmierung / Trockenschleifen
 - o kryogenes Schleifen

Durch die zukünftigen Einsatzmöglichkeiten der geplanten Schleifmaschine sind die Untersuchungen zum drehzahlsynchronen Unrundscheifen am IFT noch lange nicht abgeschlossen. Die vorliegende Arbeit ist daher nur eine Momentaufnahme eines langfristig ausgerichteten Forschungsprogramms, dessen Potential für produktionstechnische Innovationen und innovative Applikationen noch lange nicht ausgeschöpft ist.

Literaturverzeichnis

- [ABL04] *Ablinger, R.*: CNC – Gewindeschleifen. Diplomarbeit, TU-Graz 2004.
- [ABL12a] *Ablinger, R. / Schmid, A.*: Verfahren zum Unrundscheifen eines Werkstücks, Schleifscheibe und Schleifmaschine. Offenlegungsschrift DE102012015754A1, Deutsches Patent- und Markenamt, München 2012.
- [ABL12b] *Ablinger, R. / Schmid, A.*: Verfahren zum Unrundscheifen eines Werkstücks, Schleifwalze und Schleifmaschine. Offenlegungsschrift DE102012015752A1, Deutsches Patent- und Markenamt, München 2012.
- [ABL12c] *Ablinger, R.*: rpm-synchronous noncircular grinding. Poster im Rahmen einer wissenschaftlichen Veranstaltung, MOTSP 2012, International Conference Management of Technology – Step to Sustainable Production, Zadar 2012.
- [ABL12d] *Ablinger, R. / Edler, J. / Mortsch, M.*: Reduction in costs using rpm-synchronous noncircular grinding. ISSN 1847-6880, MOTSP 2012, Croatian Association for PLM, Zadar 2012.
- [ANG09] *Angermann, A. u.a.*: Matlab-Simulink-Stateflow. 6. Auflage, Oldenbourg Verlag, München 2009.
- [BAR97] *Bartsch, H.*: Taschenbuch Mathematischer Formeln. 17. Auflage, Carl Hanser Verlag, Leipzig 1997.
- [BUR11] *Burkhardt, J.*: Schleifen von Tonnen-, Zylinder-, und Kegelrollen in einer Einspannung. Carl Hanser Verlag, München, WB 12/2011, S. 30 - 32.
- [DIB09a] *Dibner, B. / Schmitz, R.*: Verfahren zum Schleifen von unrunden stabförmigen Werkstücken. Patentschrift DE102009036799B3, Deutsches Patent- und Markenamt, München 2010.
- [DIB09b] *Dibner, B. / Schmitz, R.*: Verfahren und Schleifmaschine zum Schleifen von zylindrischen und gekrümmten Konturen. Offenlegungsschrift DE102009038817A1, Deutsches Patent- und Markenamt, München 2011.
- [DIL07] *Dillinger, J. u.a.*: Fachkunde Metall Mechanische Technologie. 55. Auflage, Verlag Europa-Lehrmittel, Haan-Gruiten 2007.
- [DIN32711] DIN 32711-1:2009-03 / Welle-Nabe-Verbindung – Polygonprofil P3G – Teil 1: Allgemeines und Geometrie. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin 2009.
- [DIN32712] DIN 32712-1:2009-03 / Welle-Nabe-Verbindung – Polygonprofil P4C – Teil 1: Allgemeines und Geometrie. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin 2009.

- [DIN8589a] DIN 8589-11 / Fertigungsverfahren Spanen – Teil 11: Schleifen mit rotierendem Werkzeug. Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin 2003.
- [DIN8589b] DIN 8589-13 / Fertigungsverfahren Spanen – Teil 13: Hubschleifen. Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin 2003.
- [ENG11] *Engeln-Müllges, G. / Niederdrenk, K. / Wodicka, R.*: Numerik-Algorithmen: Verfahren, Beispiele, Anwendungen. 9. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg 2011.
- [EIC97] *Eichhorn, H.*: Drehzahlsynchronisation der Wirkpartner beim Abrichten und Schleifen. Dissertation, TU-Berlin 1997.
- [FIN03] *Finke, M.*: Untersuchungen zur Auslegung und Optimierung des Innenrund-Längsschleifens von Futterteilen. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag Essen, 2003.
- [FOR] *N.N.*: Polygonschleifmaschinen Typ AFD..P. Druckschrift der Fortuna-Werke Maschinenfabrik AG, Stuttgart-Bad Cannstatt (ohne Jahreszahlangabe).
- [FRA98] *Frank, A. / Pflanzl, M.*: Die Norm-Polygonverbindungen P3G und P4C – Geometrische Grundlagen, Funktionsverhalten und Fertigung. VDI Bericht 1384, 1998, S. 105 - 120.
- [FRI10] *Fritz, H. / Schulze, G.*: Fertigungstechnik. 9. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg 2010.
- [HAA14] *Haas, F. / Ablinger, R. / Edler, J.*: Produktivitätsgewinn durch drehzahlsynchrones Unrundschleifen mit neuem Maschinenkonzept. Vortrag Schleiftagung, Stuttgart-Fellbach 2014.
- [HEL03a] *Helletsberger, H.*: Schleiftechnische Grundbegriffe / Grindology Paper C3. Tyrolit Schleifmittelwerke Swarovski K.G, Schwarz 2003.
- [HEL03b] *Helletsberger, H.*: Schleiftechnische Grundbegriffe / Grindology Paper C4. Tyrolit Schleifmittelwerke Swarovski K.G, Schwarz 2003.
- [HEL04] *Helletsberger, H.*: Schleiftechnische Grundbegriffe / Grindology Paper G7. Tyrolit Schleifmittelwerke Swarovski K.G, Schwarz 2004.
- [HEL05a] *Helletsberger, H.*: Schleiftechnische Grundbegriffe / Grindology Paper G3. Tyrolit Schleifmittelwerke Swarovski K.G, Schwarz 2005.
- [HEL05b] *Helletsberger, H.*: Schleiftechnische Grundbegriffe / Grindology Paper G1. Tyrolit Schleifmittelwerke Swarovski K.G, Schwarz 2005.

- [HIM96] *Himmelsbach, G.:* Verfahren und Vorrichtung zum Unrundscheifen von Nockenformen mit konkaven Flanken. Patentschrift DE19620813C2, Deutsches Patent- und Markenamt, München 1996.
- [IMA93] *Imai, T. / Mukai, R.:* Verfahren und Vorrichtung zum Schleifen eines Werkstückes. Europäisches Patent EP000000590640A1 1993.
- [JUN84] *Junker, E.:* Verfahren und Vorrichtung zum Hochgeschwindigkeits-Profilschleifen von rotationssymmetrischen Werkstücken. Offenlegungsschrift DE000003435313A1, Deutsches Patent- und Markenamt, München 1984
- [JUN94] *Junker, E.:* Verfahren und Maschine zum Schleifen von Nocken mit konkaven Flanken. Patentschrift DE4426452C1, Deutsches Patent- und Markenamt, München 1994.
- [KIE07] *Kief, H.B. / Roschiwal, H.A.:* NC/CNC Handbuch 2007/2008. Carl Hanser Verlag, München 2007.
- [KLO97] *Klocke, F. / Beck, T.:* Zufuhrsysteme für den anforderungsgerechten Kühlschmierstoffeinsatz. Schleiftechnik im Wettbewerb / Stand der Technik und Zukunftschancen des Fertigungsverfahrens, Schleiftechnisches Kolloquium Aachen, VDI Verlag, Düsseldorf 1997.
- [KOE05] *König, W. / Klocke, F.:* Fertigungsverfahren: Schleifen, Honen, Läppen. 4. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg 2005.
- [KOV96] *Kovach, J.A.:* Method and apparatus for simultaneously grinding a workpiece with first and second grinding wheels. Patentschrift US5484327, United States Patent 1996.
- [KRA09] *Krajnik, P. u.a.:* Advances in centerless grinding modelling and simulation. Advances in Production Engineering & Management 4 (2009) 3, S. 115 - 126.
- [LEH78] *Lehmann, D.:* Schleifmaschine, Patentschrift DE2810562C2, Deutsches Patent- und Markenamt, München 1978.
- [MAU03] *Mautz, A.:* Untersuchungen zum CNC-Unrundscheifen mit Schwerpunkt Formabweichung. Dissertation, TU-Graz 2003.
- [MAY90] *Mayr, R.:* Numerisch gesteuert kegelige Polygonprofile fertigen. Werkstatt und Betrieb 123 (9), Carl Hanser Verlag, München 1990.
- [MAY93] *Mayr, R.:* Formschlüssige Welle-Nabe-Verbindungen mit innenschleifbarer Kontur. Dissertation, TU-Graz 1993.
- [MUS55] *Musil, R.:* Das Wälzstoßen von Innen-Polygon-Profilen. Maschinenbau und Wärmewirtschaft 10 (1955) 1, S. 17 - 22.
- [NN87] *Verfahren und Anordnung zum Schleifen von Werkstücken mit Profilen. Offenlegungsschrift DE3725024A1, Deutsches Patent- und Markenamt, München 1987.*

- [ORE72] *Orend, F.*: Verfahren zur spangebenden Fertigung. Offenlegungsschrift DE000002250739A, Deutsches Patent- und Markenamt, München 1972.
- [PAT02] *Patzig, C.*: Maschinenintegrierte Post-Process Form-Messung beim CNC-Unrundschleifen. Dissertation, TU-Graz 2002.
- [REI10] *Reichard, A. / Ricker, W. / Weiss, P.*: Fertigungstechnik Band 1, 16. Auflage, Pforzheim 2010.
- [RIE09] *Riemenschneider, I.C.*: Untersuchung und Adaption von Fertigungsverfahren für die Bearbeitung unrunder Konturen am Beispiel der Polygonprofile nach DIN 32711 und DIN 32712. Dissertation, TU-Graz 2009.
- [SCH02a] *Schrottner, G.*: Schleifscheibe. Patentschrift AT413959B, Österreichisches Patentamt, Wien 2006.
- [SCH02b] *Schmid, A.*: Fertigungstechnologien für das Kreiskeil-Verbindungselement. VDI Verlag, Düsseldorf 2002.
- [SCH08a] *Schmitz, R.*: Vorrichtung zum Schleifen von Nocken einer Nockenwelle. Offenlegungsschrift DE102008061271A1, Deutsches Patent- und Markenamt, München 2008.
- [SCH08b] *Schmitz, R.*: Verfahren und Vorrichtung zum Schleifen von Nocken einer Nockenwelle. Offenlegungsschrift, DE102008026655A1, Deutsches Patent- und Markenamt, München 2008.
- [SCH08c] *Schmitz, R.*: Verfahren zum Schleifen wellenförmiger Werkstücke. Patentschrift DE102008010245B4, Deutsches Patent- und Markenamt, München 2009.
- [SCH08d] *Schmitz, R.*: Verfahren und Schleifmaschine zum Schleifen wellenförmiger Werkstücke. Offenlegungsschrift DE102008045842A1, Deutsches Patent- und Markenamt, München 2010.
- [SCH09] *Schweizer, W.*: Matlab kompakt. 4. Auflage, Oldenbourg Verlag, München 2009.
- [SCH10] *Schäferling, K.*: Neue Wege beim Verzahnungshonen. Moderne Schleiftechnologie und Feinstbearbeitung 2010, Vulkan Verlag, Villingen-Schwenningen 2010, S. 9-1 – 9-11.
- [SCH12] *Schmid, A.*: Moderne Produktionstechniken, Vorlesungsskriptum, TU-Graz 2012.
- [SCH86] *Schmid, A.*: Unrundschleifen auf prozeßrechnergesteuerten Rundschleifmaschinen. Dissertation, TU-Graz 1986.
- [SCH98] *Schmid, A.*: Vorrichtung zur Bearbeitung von unrunder Bohrungen. Patentschrift DE19806688C2, Deutsches Patent- und Markenamt, München 1999.
- [SIE01] *N.N.*: SIEMENS SINUMERIK 840D/840Di/810D Grundlagen Programmieranleitung. Ausgabe 09.01, Informationsschrift von Firma Siemens AG.

- [SPR13] *Springmann, J.*: Drahterosives Abrichten profiliert Schleifscheiben berührungslos. MM Maschinenmarkt 25 2013, S. 28 - 30.
- [SPU93] *Spur, G. / Eichhorn, H.*: Unrundscheifen durch starre kinematische Kopplung der Wirkpartner. Unrundscheifen, IDR 3/93, S. 179 – 187.
- [SPU96a] *Spur, G. / Eichhorn, H.*: Drehzahlsynchrones Abrichten - Einfluß der Einstellparameter auf das Abrichtergebnis. Verfahren, IDR 1/96, S. 48 – 58.
- [SPU96b] *Spur, G. / Eichhorn, H.*: A New Method of Contour Grinding. Progress of Cutting and Grinding, Vol. 3, Osaka, Japan, 1996, S. 468 – 473.
- [SPU96c] *Spur, G. / Eichhorn, H.*: Drehzahlsynchrones Abrichten - Einfluß der Schneidenraumstruktur auf das Schleifergebnis. Verfahren, IDR 2/96, S. 126 – 137.
- [SPU97a] *Spur, G. / Eichhorn, H.*: Drehzahlsynchronisiertes Unrundscheifen auf einer Zahnradhonmaschine. Carl Hanser Verlag München, ZWF 92 (1997) 6, S. 268 – 272.
- [SPU97b] *Spur, G. / Eichhorn, H.*: Drehzahlsynchrones Unrundscheifen. Verfahren, IDR 31 (1997) Nr.3, S. 242 – 254.
- [STE09] *Stein, U.*: Einstieg in das Programmieren mit MATLAB. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2. Auflage, München 2009.
- [STU97] *Stuff, D.*: Einsatzvorbereitung keramisch gebundener CBN-Schleifscheiben. Dissertation RWTH Aachen 1997.
- [TAW07] *Tawakoli, T. / Westkämper, E. / Rabiey, M.*: Dry grinding by special conditioning, International Journal of Advanced Manufacturing Technology 33, Springer London 2007, S. 419 – 424.
- [TAW10a] *Tawakoli, T.*: Dynamisches Verhalten von CBN-Schleifscheiben beim Hochleistungs-/Hochgeschwindigkeitsschleifen. Forum Schneidwerkzeug- und Schleiftechnik, 25. Jahrgang, ZKZ 19748, Nr. 2, S. 72 – 83.
- [TAW10b] *Tawakoli, T.*: Trockenbearbeitung beim Rundschleifen. Moderne Schleiftechnologie und Feinstbearbeitung 2010, Vulkan Verlag, Villingen-Schwenningen 2010, S. 4c-1 – 4c-13.
- [TAW10c] *Tawakoli, T.*: Integration der ultraschallunterstützten Zerspanung mit Blocksonotrode. Moderne Schleiftechnologie und Feinstbearbeitung 2010, Vulkan Verlag, Villingen-Schwenningen 2010, S. 4b-1 – 4b-14.
- [UHL10] *Uhlmann, E.*: Ressourceneffizientes Schleifen – Lösungen und Grenzen. Moderne Schleiftechnologie und Feinstbearbeitung 2010, Vulkan Verlag, Villingen-Schwenningen 2010, S. 2-1 – 2-15.
- [WEC01] *Weck, M.*: Werkzeugmaschinen. Automatisierung von Maschinen und Anlagen. 5. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg 2001.

- [WED89] *Wedeniwski, H. J.:* Verfahren zum Schleifen eines Polygon-Kegels auf einer numerisch gesteuerten Schleifmaschine. Offenlegungsschrift DE3909785A1, Deutsches Patent- und Markenamt, München 1989.
- [WEI06] *Weinert, K. / Finke, M. / Kötter, D.:* Wirtschaftliche Alternative zum Hartdrehen - Innenrundschäl Schleifen steigert Flexibilität beim Schleifen von Futterteilen. MM - Maschinenmarkt, 109 (2003) 48, S. 44 - 47.
- [WEG12] *Wegener, K. u.a.:* Alternative Konditionierverfahren für Hochleistungsschleifscheiben. Die Zukunft der Fertigungstechnik, Tagungsband Wiener Produktionstechnik Kongress 2012, S. 41 - 50.
- [WER71] *Werner, G.:* Kinematik und Mechanik des Schleifprozesses. Dissertation RWTH Aachen 1971.
- [WIN09] *N.N.:* Praktisches Schleifseminar. Version 2009, Wintherthur Technology Group.
- [ZEP08] *Zeppenfeld, C. u.a.:* Rundheitsfehler beim Spitzenlosschleifen. wt Werkstatttechnik online, Jahrgang 98 (2008) H. 6, S. 446 - 451.
- [ZOE92] *Zöllig, G.:* Verfahren und Maschine zum Schleifen von Nocken. Offenlegungsschrift, DE4239195A1, Deutsches Patent- und Markenamt, München 1992.
- [ZUD06] *Zuderstorfer, G.:* KelPoly – Software für das Unrunds Schleifen. Dissertation, TU-Graz 2006.