

# HANSER



## **Leseprobe**

zu

## **„Schleif- und Abrichttechnik“**

von Tjark Lierse

Print-ISBN: 978-3-446-46190-1

E-Book-ISBN: 978-3-446-46418-6

Weitere Informationen und Bestellungen unter  
<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-46190-1>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

# Vorwort

*„Erfolg ist eine Reise, kein Ziel“*  
(Sprichwort)

Kaum ein anderes Fertigungsverfahren hat so viele Facetten, wie das Schleifen. Der Prozess ist immer wieder für eine Überraschung gut. Und so gilt für viele aus dieser Branche: *„einmal Schleifer, immer Schleifer“*.

Der Wandel der Zeit stellt aber auch an das Fertigungsverfahren Schleifen grundlegende Fragen: Wo werden Schleifprozesse in einigen Jahren stehen? Wird das Schleifen durch neue Fertigungstechnologien abgelöst? Oder werden sich nur die Anwendungsfelder verschieben? Wird es ein Fertigungsverfahren für Nischenanwendungen? Fragen, die mit dem vorliegenden Buch nicht beantwortet werden. Es soll vielmehr dazu beitragen, der Leserin und dem Leser den Prozess Schleifen verständlich zu machen und helfen, bestehende und zukünftige Schleifprozesse zu verbessern.

Nach der Promotion auf dem Gebiet der Keramikbearbeitung am *Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW)* der Leibniz Universität Hannover bei Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. mult. Dr. h.c. Hans Kurt Tönshoff, zwölf Jahren in einem mittelständischen Unternehmen aus der Schleif- und Abrichtbranche und einigen Jahren als Professor für Fertigungstechnik und Fertigungsorganisation an der Hochschule Hannover, ist nun dieses Buch in einer ersten Auflage entstanden.

Natürlich gibt es bereits eine Reihe Lehrbücher aus dem Bereich der Fertigungstechnik, in denen auch das Fertigungsverfahren Schleifen behandelt wird. Und es

gibt auch einige (wenige) deutschsprachige Fachbücher zu diesem Thema. Das vorliegende Buch wendet sich jedoch an Studierende und Praktiker gleichermaßen und versucht, sowohl die Grundlagen als auch anwendungsspezifisches „Schleiferwissen“ zusammenzuführen und systematisch darzustellen. Meine Vorlesungen in verschiedenen Masterstudiengängen zum Thema *Hochleistungsfertigung*, die auch einen Schwerpunkt zum Thema Schleifen abbilden, zeigen, dass für Studierende gerade auch die Darstellung der Grundlagenzusammenhänge wichtig ist, um einen Zugang zu diesem komplexen Thema zu finden. Die vielen Gespräche mit Praktikern aus der Schleifbranche im Vorfeld dieser Buchveröffentlichung haben dazu geführt, auf spezielle Themenkomplexe etwas ausführlicher einzugehen, um wichtige Zusammenhänge des Schleif-, und insbesondere des Abrichtprozesses neu aufzuarbeiten und herauszustellen. Ich würde mich freuen, wenn der interessierte Leser – der „Anfänger“, der „Fortgeschrittene“ und auch der „Experte“ – Anregungen, Hinweise und Erkenntnisse für seine „Schleifaufgaben“ in diesem Buch finden wird.

Sollten sich kleinere oder auch größere Fehler eingeschlichen haben, so danke ich vorab für eine Information an den Verlag oder direkt an mich.

Mein großer Dank gilt den vielen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen der Firma DR. KAISER DIAMANTWERKZEUGE, die mich in zahlreichen Gesprächen hilfreich unterstützt und somit einen großen Anteil an der Entstehung dieses Buch haben. Namentlich möchte ich an dieser Stelle stellvertretend für viele Dr.-Ing. Dirk Hessel, Ing. Christoph Müller und Thomas Maelecke danken. Weiterhin gilt mein Dank meinem ehemaligen wissenschaftlichen Mitarbeiter Dr.-Ing. Timo Rouven Kaul und Herrn Dipl.-Chem. Manfred Niebuhr (ehemals KREBS & RIEDEL) für die Durchsicht des Manuskriptes und die vielen hilfreichen Hinweise.

Ganz besonders danken möchte ich meinem ehemaligen Berliner „Schleiferkollegen“ aus der Institutszeit Dipl.-Ing. Sven-Erik Holl (EFFGEN/LAPPORT). Mit seiner großen Schleiferfahrung hat er viele praxisnahe und hilfreiche Anregungen beige-steuert und durch seine sehr wertvollen redaktionellen und inhaltlichen Hinweise das Buch „rundgeschliffen“.

Dem Carl Hanser Verlag danke ich für das Verlegen und den Druck dieses Buches.

Ohne das Verständnis meiner Familie für meinen häufigen Rückzug an den Schreibtisch, auch die arbeitsame zwischenzeitliche Auszeit auf einer ruhigen Nordseeinsel, wäre das Buch nicht entstanden: Danke Andrea, Meerit und Niclas.

Hannover/Celle, im Februar 2020

*Tjark Lierse*

# Inhalt

<b>Vorwort</b> .....	<b>V</b>
<b>1 Grundlagen des Schleifprozesses</b> .....	<b>1</b>
1.1 Einordnung des Schleifprozesses .....	2
1.2 Wirkprinzip des Schleifens.....	5
1.3 Kenngrößen des Schleifprozesses .....	7
1.4 Systemgrößen des Schleifprozesses.....	12
1.4.1 Schleifscheiben.....	12
1.4.2 Schleifmaschine.....	14
1.4.3 Werkstückaufnahme .....	14
1.4.4 Kühlschmierstoff, -reinigung, -zuführung .....	16
1.4.5 Abrichtsystem.....	18
1.5 Direkte Stellgrößen des Schleifprozesses .....	20
1.5.1 Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit.....	21
1.5.2 Werkstückgeschwindigkeit.....	23
1.5.3 Schnittgeschwindigkeit.....	25
1.5.4 Zustellung (Schnitttiefe) .....	25
1.5.5 Vorschub – Vorschubgeschwindigkeit .....	27
1.6 Abgeleitete Stellgrößen des Schleifprozesses .....	30
1.6.1 Spanungsquerschnitt.....	30
1.6.2 Zeitspanvolumen.....	32
1.6.3 Äquivalenter Schleifscheibendurchmesser.....	37
1.6.4 Kontaktlänge und Kontaktfläche.....	38
1.6.5 Spannungsdicke.....	40
1.6.6 Schleifgeschwindigkeitsverhältnis .....	43
1.6.7 Wichtige Formeln zur Steuerung des Schleifprozesses.....	49
1.7 Prozessgrößen des Schleifprozesses .....	49
1.7.1 Schleifkräfte .....	49
1.7.2 Schleifleistung .....	53
1.7.3 Schleifenergie .....	54
1.7.4 Schleiftemperatur.....	56
1.7.5 Schwingungen .....	58

1.8	Arbeitsergebnis eines Schleifprozesses .....	60
1.8.1	Geometrische Genauigkeit .....	60
1.8.2	Oberflächengüte .....	61
1.8.3	Randzonenbeeinflussung .....	63
1.8.4	Werkzeugverschleiß .....	68
<b>2</b>	<b>Schleifwerkzeuge .....</b>	<b>77</b>
2.1	Aufbau von Schleifwerkzeugen .....	79
2.1.1	Schleifmittel .....	80
2.1.1.1	Korund .....	84
2.1.1.2	Schmelzkorund .....	85
2.1.1.3	Sinterkorund .....	87
2.1.1.4	Siliciumcarbid .....	87
2.1.1.5	Kubisches Bornitrid (CBN) .....	88
2.1.1.6	Diamant .....	89
2.1.2	Schleifscheibenbindungen .....	90
2.1.2.1	Keramische Bindungen .....	91
2.1.2.2	Kunstharzbindungen .....	93
2.1.2.3	Metallsinterbindungen .....	94
2.1.2.4	Hybridbindungen .....	95
2.1.2.5	Gummibindungen .....	95
2.1.2.6	Galvanische Bindungen .....	95
2.1.2.7	Lötbindungen .....	99
2.1.3	Härte und Gefüge von Schleifbelägen .....	100
2.2	Kennzeichnung von Schleifwerkzeugen .....	104
2.2.1	Klassifizierung der Schleifkörnungen .....	104
2.2.2	Formen von Schleifwerkzeugen .....	106
2.2.3	Bezeichnung von Schleifscheiben .....	107
2.3	Schleifscheibenaufnahmen .....	110
2.4	Prüfung von Schleifwerkzeugen .....	111
2.5	Schleifscheibenanwendung .....	113
2.5.1	Aufspannen und Betreiben eines Schleifkörpers .....	113
2.5.2	Auswuchten von Schleifscheiben .....	114
2.5.3	Einsatz unterschiedlicher Schleifwerkzeuge .....	118
2.5.4	Prozessführung beim Schleifen .....	119

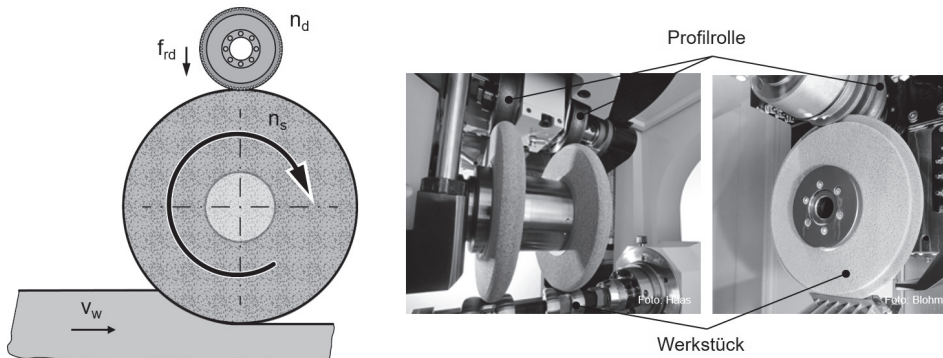
<b>3</b>	<b>Schleifverfahren.....</b>	<b>123</b>
3.1	Planschleifen .....	124
3.1.1	Längs-Umfangs-Planschleifen (Flach- und Profilschleifen).....	126
3.1.2	Längs-Seiten-Planschleifen (Stirnschleifen).....	131
3.1.3	Quer-Seiten-Planschleifen (Einstechschleifen).....	133
3.1.4	Seitenschleifen mit Planetenkinematik .....	133
3.2	Außenrundscheifen.....	134
3.2.1	Längs-Außenrundscheifen.....	135
3.2.2	Quer-Außenrundscheifen (Einstech- bzw. Profilschleifen) .....	139
3.2.3	Schräg-Außenprofilschleifen (Schräg-Einsteichschleifen).....	141
3.2.4	Seiten-Außenrundscheifen .....	142
3.2.5	Spitzenlosschleifen (Centerless-Schleifen).....	142
3.3	Innenrundscheifen .....	145
3.3.1	Längs-Innenrundscheifen.....	146
3.3.2	Quer-Innenrundscheifen (Einstech- bzw. Profilschleifen).....	151
3.4	Schraubschleifen (Gewindeschleifen).....	151
3.4.1	Längs-Schraubschleifen .....	152
3.4.2	Quer-Schraubschleifen .....	153
3.5	Koordinatenschleifen .....	154
3.6	Werkzeugschleifen .....	155
3.7	Verzahnungsschleifen .....	157
3.7.1	Grundlagen der Verzahnung.....	157
3.7.2	Prozesskette zur Herstellung von Stirnradverzahnungen .....	166
3.7.3	Profilschleifen von Zahnrädern .....	170
3.7.3.1	Diskontinuierliches Profilschleifen .....	170
3.7.3.2	Kontinuierliches Profilschleifen .....	172
3.7.4	Wälzschleifen von Zahnrädern.....	173
3.7.4.1	Diskontinuierliches Teilwälzschleifen.....	173
3.7.4.2	Kontinuierliches Wälzschleifen .....	174
3.8	Trennschleifen .....	179
<b>4</b>	<b>Grundlagen des Abrichtprozesses .....</b>	<b>181</b>
4.1	Einordnung des Abrichtprozesses.....	181
4.2	Wirkprinzipien des Abrichtens.....	185
4.2.1	Mechanische Abrichtverfahren .....	186
4.2.1.1	Abrichten mit ungebundenen Schneiden .....	186

4.2.1.2	Abrichten mit gebundenen Schneiden .....	187
4.2.1.2.1	Formstabile Abrichtwerkzeuge .....	188
4.2.1.2.2	Verschleißende Abrichtwerkzeuge .....	190
4.2.1.2.3	Schärfen und Reinigen mit gebundenem Korn .....	191
4.2.2	Thermische Abrichtverfahren .....	192
4.2.2.1	Abrichten mit Laser .....	192
4.2.2.2	Funkenerosives Abrichten .....	193
4.2.3	Elektrochemische Abrichtverfahren .....	194
4.2.4	Hybride Abrichtverfahren .....	195
4.2.4.1	Ultraschallunterstütztes Abrichten .....	195
4.2.4.2	Kontakterosives Abrichten .....	195
<b>5</b>	<b>Abrichten mit Diamantwerkzeugen .....</b>	<b>197</b>
5.1	Einordnung des Abrichtens mit Diamantwerkzeugen .....	197
5.2	Kenngrößen des Abrichtprozesses .....	200
5.3	Systemgrößen beim Abrichten .....	201
5.3.1	Diamantarten und Qualitäten .....	201
5.3.2	Diamantierung .....	202
5.3.3	Diamantanschliff .....	204
5.3.4	Abrichtspindelsysteme und Abrichterhalter .....	206
5.4	Direkte Stellgrößen beim Abrichten .....	208
5.4.1	Abrichtumfangsgeschwindigkeit .....	208
5.4.2	Axialer Abrichtvorschub .....	209
5.4.3	Abrichtzustellung .....	210
Abrichtzustellung an Schrägen und Profilen .....	215	
5.4.4	Radialer Abrichtvorschub .....	216
5.5	Abgeleitete Stellgrößen des Abrichtprozesses .....	219
5.5.1	Abrichtüberdeckungsgrad (stehende Abrichter, Formrollen) .....	219
5.5.1.1	Gerade Abrichter .....	220
5.5.1.2	Profilabrichter (Radenabrichter) .....	221
5.5.1.3	Kombinations-Abrichtwerkzeuge und Schrägen .....	227
5.5.1.4	Einfluss der Abrichtzustellung auf den Abrichtüberdeckungsgrad .....	229
5.5.1.5	Einfluss der Maschine auf den Abrichtüberdeckungsgrad .....	230
5.5.2	Abrichtgeschwindigkeitsverhältnis .....	232
5.5.2.1	Abrichtgeschwindigkeitsdifferenz .....	238
5.5.2.2	Formrollen .....	241
5.5.2.3	Profilrollen .....	242

5.6	Wichtige Formeln zur Steuerung des Abrichtprozesses .....	245
5.7	Prozessgrößen beim Abrichten .....	247
5.7.1	Abrichtkräfte .....	247
5.7.2	Leistungen beim Abrichten .....	250
5.7.3	Abrichtzeit .....	251
5.8	Randzoneneigenschaften durch Abrichten.....	252
5.9	Herstellung von Abrichtwerkzeugen .....	254
5.9.1	Positivverfahren .....	255
5.9.2	Negativverfahren.....	258
5.9.2.1	Gesinterte Abrichter.....	258
5.9.2.2	Galvanisch negative Abrichter .....	259
5.9.2.3	Doppelumkehrverfahren .....	261
5.10	Abrichtverfahren mit Diamantwerkzeugen.....	262
5.10.1	Stehende Abrichtwerkzeuge .....	262
5.10.1.1	Naturdiamantabrichter .....	262
5.10.1.2	CVD-Diamant und MKD-Abrichter .....	266
5.10.1.3	Verschleiß von stehenden Abrichtern .....	268
5.10.2	Formrollen .....	270
5.10.2.1	Profilabrichten.....	273
5.10.2.2	Abrichten von konventionellen Schleifscheiben .....	277
5.10.2.3	Abrichten von hochharten Schleifscheiben.....	280
5.10.2.4	Instandsetzung von Formrollen .....	283
5.10.3	Profilrollen.....	284
5.10.3.1	Abrichten von Wälzschleifschnecken.....	290
5.10.3.2	Instandsetzung von Profilrollen.....	296
5.10.4	Berechnungsbeispiele .....	298
5.10.4.1	Außenrund-Abrichten mit stehendem Abrichter.....	298
5.10.4.2	Außenrund-Abrichten mit Radien-Formrolle .....	300
5.10.4.3	Außenrund-CBN-Abrichten mit Formrolle.....	302
5.10.4.4	Innenrund-CBN-Abrichten mit Formrolle .....	304
5.10.4.5	Außenrund-Einstechabrichten mit Profilrolle .....	305
5.10.4.6	Abrichtgeschwindigkeit (Formrolle und Profilrolle).....	308
5.10.4.7	Abrichten von Wälzschleifschnecken.....	310
<b>6</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>313</b>
<b>7</b>	<b>Index.....</b>	<b>323</b>



schinen müssen eine entsprechende Kompensation des sich kontinuierlich ändernden Schleifscheibendurchmessers über die CNC-Steuerung ermöglichen. Zum Einsatz kommen bei der Bearbeitung langspanender und zäher Werkstoffe (z.B. Ti, oder Ni-Basis-Legierungen) häufig offenporige, konventionelle Schleifscheiben (z.B. EK-weiß).



**Bild 3.7** Kontinuierliches Abrichten (CD-Abrichten) während der Schleifbearbeitung (continuous dressing)

Beim Schleifen mittels CD-Abrichttechnik wird das Gesamtaufmaß häufig in zwei bis drei Einzelschritte unterteilt, sodass das Verfahren dem Tiefschleifen zugeordnet werden kann. Das Schlichtaufmaß beträgt i.d.R. ca. 0,05mm. Die Tischvorschubgeschwindigkeiten  $v_{fa} = v_w$  liegen im Bereich von wenigen 100 mm/min. Die Schleifscheibe wird während des Schleifprozesses mittels einer Diamantprofilrolle kontinuierlich mit einem Abrichtbetrag von  $f_{rd} = 0,3$  bis  $0,8 \mu\text{m}/U_{\text{Schleifscheibe}}$  zumeist im Gleichlauf abgerichtet. Für den Schlichtprozess kann auch Gegenlaufabrichten verwendet werden.

### 3.1.2 Längs-Seiten-Planschleifen (Stirnschleifen)

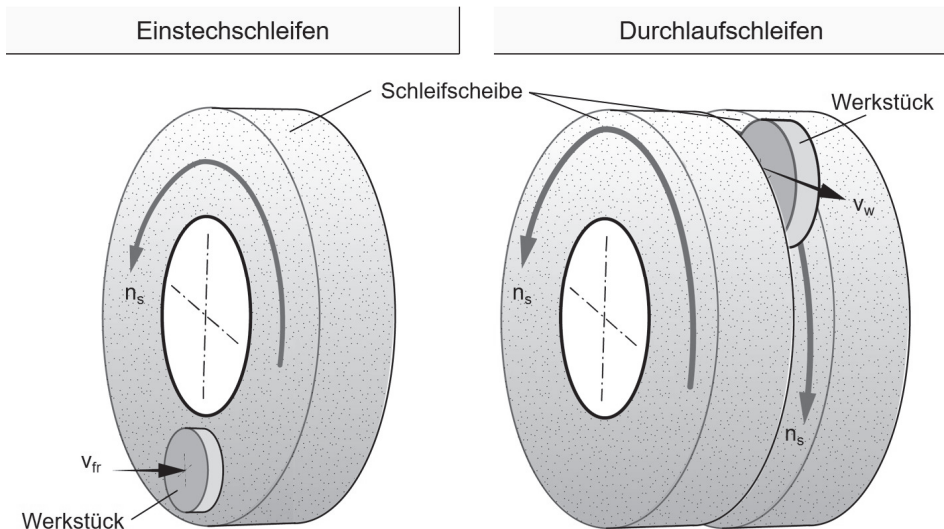
Das Längs-Seiten-Planschleifen erzeugt mit der Stirnseite der Schleifscheibe einen Abtrag an einem Werkstück und wird im allgemeinen Sprachgebrauch auch **Stirnschleifen** oder **Seitenschleifen** genannt. Da die Schleifscheibe in eigen Fällen topfförmig ausgeführt ist, wird auch vom **Topfschleifen** gesprochen. Das Werkstück bewegt sich bei diesem Verfahren senkrecht zur Schleifscheibendrehachse an der Seitenfläche der Schleifscheibe vorbei, womit Flächen, die größer als das Schleif-

werkzeug sind, bearbeitet werden können Bild 3.1. Die parallel oder leicht zueinander geneigten (Tiltung) Schleifscheiben können je nach Maschinentyp horizontal oder vertikal angeordnet sein, die Werkstücke werden geradlinig nacheinander oder rotierend zugeführt.<sup>140</sup>

Beim **Doppelseiten-Planschleifen** werden die Werkstücke zwischen zwei Schleifscheiben hindurchbewegt, um somit z.B. planparallele Flächen schnell und effektiv zu bearbeiten.

Die Eingriffskinematik des Seitenschleifens führt zu großen Kontaktflächen, sehr kleinen Spannungsdicken, und durch die damit verbundenen hohen Reibanteile wird viel Wärme erzeugt. Außerdem gelangt nur wenig Kühlschmierstoff an die Wirkzone. Das Verfahren ähnelt dem Stirnfräsen, wobei die Schleifscheiben i.d.R. deutlich größer sind als die Werkstücke. Durch die Kinematik ergeben sich bogenförmige Vorschubmarkierungen auf der Oberfläche.

Typische Werkstücke für das Seiten-Planschleifen sind Führungsschienen, Pleulaugen, Kolbenringe, Lagerringe, Sicherungsringe, Wälzkörper u.v.m..



**Bild 3.8** Quer-Seiten-Planschleifverfahren

<sup>140</sup> Oppelt 2014, S. 608ff

### 3.1.3 Quer-Seiten-Planschleifen (Einstechschleifen)

Durch die Zustellung des Werkstücks parallel zur Schleifscheibenachse können bei diesem Verfahren i.d.R. nur kleinere Werkstücke bearbeitet werden (s. Bild 3.8). Es ist damit ein reines Einstechschleifverfahren und wird auch als Tauschschleifen bezeichnet. Das Verfahren ist im Bereich der Wendeschneidplattenfertigung etabliert. Wie beim vorgenannten Verfahren liegen auch hier ungünstige Kontaktbedingungen vor – die gesamte zu bearbeitende Werkstückfläche ist im Kontakt mit der Schleifscheibe, sodass die Kontaktfläche der Werkstückfläche entspricht. Die verfahrensbedingt kleinen Spannungsdicken führen im Prozess schnell zu thermischen Problemen.

Eine typische Anwendung für das Quer-Seiten-Planschleifen ist die Wendeschneidplattenbearbeitung.

### 3.1.4 Seitenschleifen mit Planetenkinematik

Für die Bearbeitung von Werkstücken mit gegenüberliegenden, ebenen Funktionsflächen wie z.B. Dichtscheiben, Lagerringe oder Wafer eignet sich das Doppelseitenplanschleifen mit Planetenkinematik. Dabei werden mehrere Werkstücke in sogenannten Läuferscheiben gehalten und auf zykliden Bahnen zwischen zwei Schleifscheiben geführt. Die Läuferscheiben werden zwischen einem inneren und einem äußeren Stift oder Zahnkranz geführt, von denen meistens der innere angetrieben ist. Durch die Werkstückführung werden Oberflächenstrukturen mit ungeordneten, sich überkreuzenden Schleifriefen erzeugt.

Die Schnittgeschwindigkeiten sind mit wenigen Metern je Sekunde recht niedrig. Trotzdem lassen sich mit dem Verfahren recht hohe Zeitspanvolumina von bis zu  $1500 \text{ mm}^3/\text{min}$  (Abtragsraten von bis zu  $0,8 \text{ mm}/\text{min}$  an Keramik) erzielen. Je nach Schleifwerkzeug können Rauheiten von  $Ra = 0,03$  bis  $1 \text{ }\mu\text{m}$  bei sehr hoher Ebenheit erreicht werden.<sup>141</sup>

---

<sup>141</sup> Runkel 2008

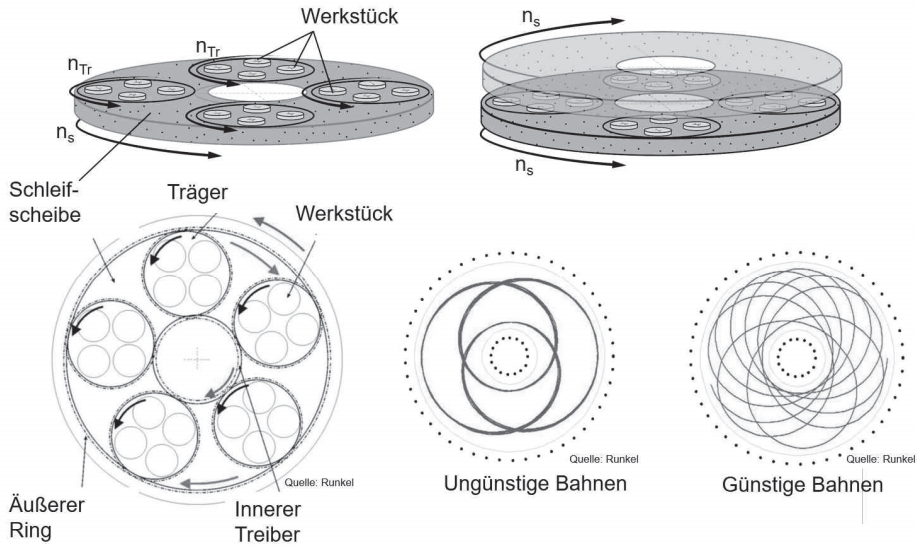


Bild 3.9 Doppelseitenplanschleifen mit Planetenkinematik

## 3.2 Außenrundscheifen

Rotationssymmetrische aber auch unsymmetrische, exzentrische, unrunde oder gewindeförmige Außenflächen lassen sich über das Außenrundscheifen bearbeitet. Dabei werden, wie beim Planschleifen, Verfahren mit und ohne Quervorschub parallel zur Schleifscheibenachse eingesetzt. Prinzipiell lassen sich die beiden Verfahren auf einer Maschine realisieren. In Anwendungen mit kombinierter Schulterbearbeitung (Bearbeitung eines Außendurchmessers und einer Planfläche am Werkstück) kann die Schleifscheibe geschwenkt werden, sodass sie schräg in das Werkstück eintaucht. **Universal-Schleifmaschinen** sind häufig durch schwenkbare Schleifspindeln oder mehrere unabhängige Schleifzonen auch für Innenbearbeitungen nutzbar.

Bild 3.10 zeigt die wichtigsten Schleifverfahren zur Außenrundbearbeitung mit ihren Normbezeichnungen nach DIN 8589 - Teil 11. Im praktischen Sprachgebrauch sind hierfür Begriffe wie Außendurchmesser- bzw. Außenrund-Längsschleifen, Einstechschleifen und Schräg-Einstechschleifen gebräuchlich. Weiterhin wird in

Form- und Profilschleifen unterschieden. Beim Formschleifen wird die Werkstückgeometrie durch eine Bahnsteuerung, beim Profilschleifen durch die werkstückgebundene Geometrie der Schleifscheibe erzeugt.

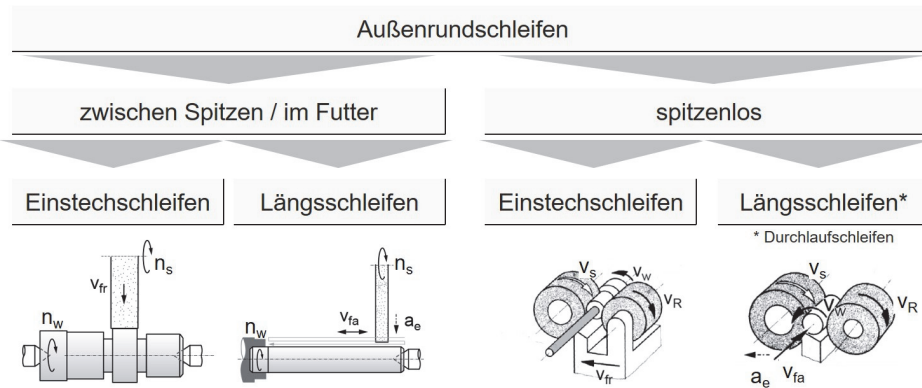


Bild 3.10 Außenrundschleifverfahren

### 3.2.1 Längs-Außenrundscheifen

Wird das Längsschleifen zur Erzeugung eines Profils genutzt, ist auch der Begriff **Formschleifen** gebräuchlich. Grundsätzlich ist beim Längsschleifen der zu bearbeitende Bereich breiter als die Schleifscheibe, und der Vorschub ist durch eine axiale Längsbewegung gekennzeichnet. Während der Bearbeitung rotiert das Werkstück mit einer Drehzahl  $n_w$ , und über den Werkstückdurchmesser  $d_w$  berechnet sich die Werkstückgeschwindigkeit  $v_w$ .<sup>142,143,144</sup>

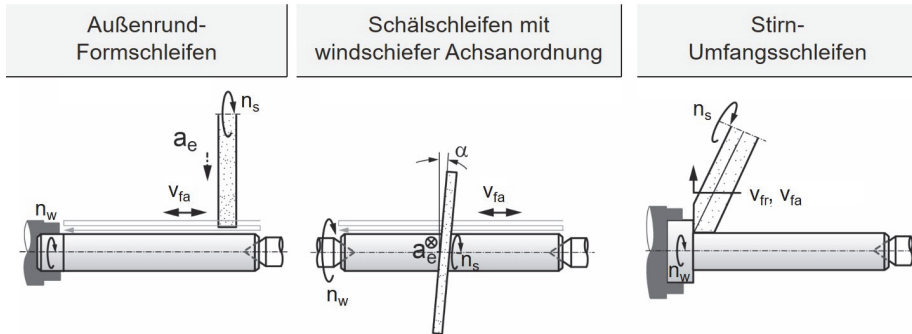
Die Bandbreite der verfügbaren Maschinenausführungen ist groß und orientiert sich in der Maschinenbezeichnung i.d.R. am größtmöglichen Bearbeitungsdurchmesser (doppelte Spitzenhöhe der Maschine) und der Einspannlänge. Maschinen für kleinere Bauteile können die Werkstücke einseitig z.B. in einer Spannzange oder einem Präzisionsfutter spannen und ggf. zusätzlich das Werkstück mit einer

<sup>142</sup> Lierse 2015

<sup>143</sup> Klocke 2018, S. 191ff

<sup>144</sup> Fiebelkorn 2014, S. 620ff

Zentrierspitze in einem Reitstock abstützen. Bei sehr langen oder schlanken Werkstücken verhindern zusätzlich Lünetten Verformungen durch das Eigengewicht oder die Bearbeitungskräfte.



**Bild 3.11** Längs-Außen-Rundschleifverfahren

Beim Formschleifen wird der axialen Hauptvorschubbewegung  $f_a$  bzw.  $v_{fa}$  eine zusätzliche radiale Zustellbewegung  $a_e$  (NC-gesteuert) überlagert, um Konturen zu erzeugen. Dabei wird zumeist das gesamte Aufmaß in einem Überschleiff (Schälschliff) zerspart. Wegen der hohen Schleifscheibenbelastung kommen bei der Stahlbearbeitung überwiegend CBN-Schleifscheiben zum Einsatz. Schmale Schleifscheiben erlauben die flexible Bearbeitung unterschiedlicher Werkstückkonturen.

Das „klassische“ **Längs-Außenrundschleifen** wird i.d.R. zur Bearbeitung wellenförmiger Bauteile, Kegel oder feiner Konturen verwendet. Die Schleifscheibe wird mit mehreren Zustellbeträgen  $a_e$  mit einer axialen Vorschubgeschwindigkeit  $v_{fa}$  an dem Werkstück vorbeigeführt, bis das Aufmaß abgetragen ist. Die Zustellung  $a_e$  erfolgt dabei je nach Spannsituation einseitig oder beidseitig, womit sich an der Schleifscheibe einseitig oder beidseitig ein Verschleiß ergibt (s. Bild 3.12).

Der axiale Vorschub  $f_a$  wird entsprechend eines geeigneten Schleifüberdeckungsgrades  $U_s$  gewählt (s. Kap. 1.6.5), um die entsprechende Oberflächenqualität zu erzielen. Üblicherweise werden die Prozesse mehrstufig betrieben. Durch mehrere Leerhübe (Ausfunken) lässt sich die Formgenauigkeit und Oberflächengüte verbessern. Wegen der hohen Spanngenauigkeit werden die Werkstücke i. d. R. zwischen Spitzen gespannt. Typische Stellgrößen beim Längsschleifen mit konventionellen Schleifscheiben sind in Bild 3.13 zu finden. Typische Abrichtwerkzeuge für konventionelle und CBN-Längs-Schleifprozesse sind Diamant-Formrollen.

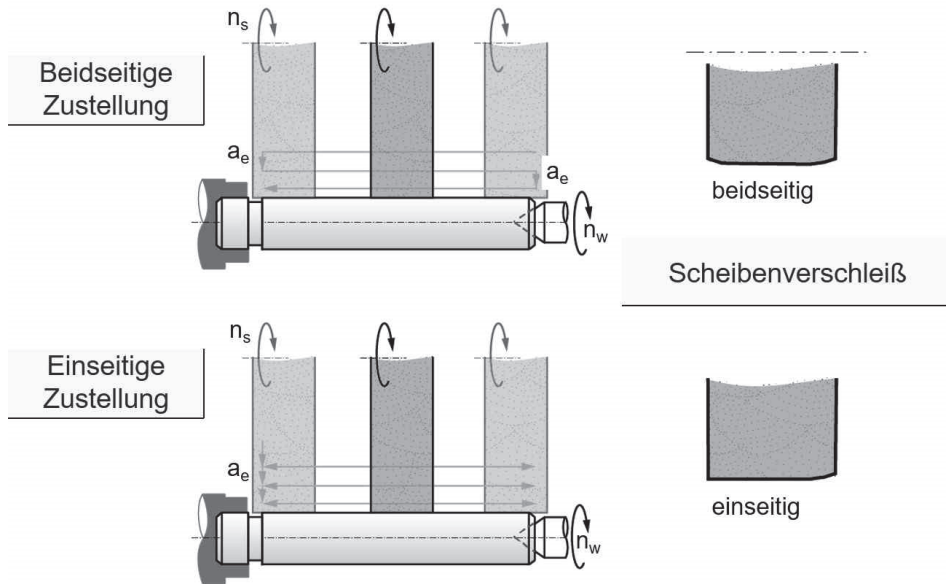
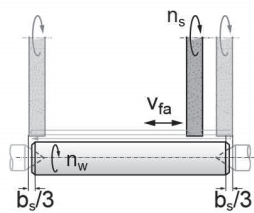


Bild 3.12 Schleifscheibenverschleiß durch ein- oder beidseitige Zustellung

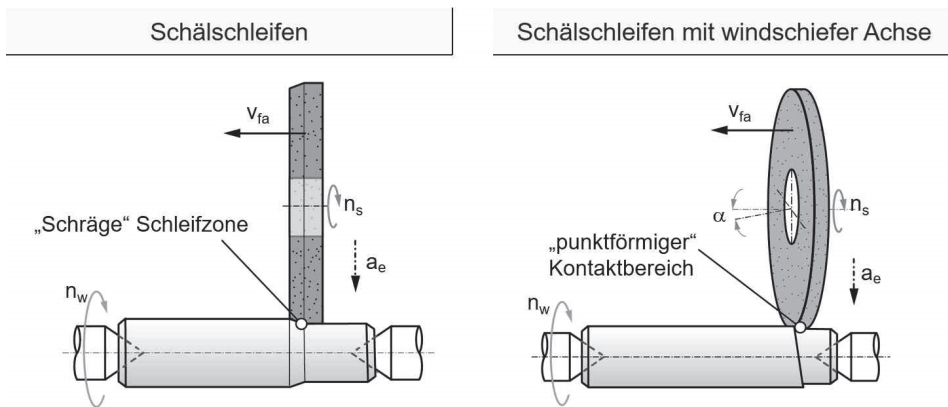


Schleifscheibe: konventionell  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SG}/\text{SiC}$   
 Radiale Zustellung  $a_e$ : 0,003 ... 0,015 mm/WSt-Umd.  
 Schleifverhältnis G: ca. 60-120  
 Aufmaß ( $\varnothing$ -bez.) ca.  $z = 0,6$  mm  
 Überlauf Schleifscheibe: ca.  $1/3 \cdot b_s$  links und rechts (sofern möglich)  
 Vorschubgeschwindigkeit  $v_{fa}$ : ca. 1000 mm/min ( $v_{fa} = n_w \cdot b_s / U_s$ )  
 ca.  $0,7 \cdot b_s / U_{Wst}$  (Schruppen) bis  
 $0,2 \cdot b_s / U_{Wst}$  (Schlichten)

Prozessführung: Schruppen – Schlichten – Feinschlichten – Ausfunken  
 Bez. Zeitspanvolumen  $Q'_w$ :  
 Schruppen:  $Q'_w = 3 \dots 7 \text{ mm}^3/\text{mms}$  bis  $z = 0,03$  mm;  
 $a_e = 0,005\text{-}0,01$  mm;  $U_s = 3 - 4$ ;  $q_s = 60$   
 Schlichten:  $Q'_w = 1 \dots 1,5 \text{ mm}^3/\text{mms}$  bis  $z = 0,01$  mm  
 $a_e = 0,003\text{-}0,006$  mm;  $U_s = 4 - 6$ ;  $q_s = 90$   
 Feinschlichten:  $Q'_w = 0,2 \dots 1 \text{ mm}^3/\text{mms}$  bis  $z = 0$  mm  
 $a_e = 0,001\text{-}0,003$  mm;  $U_s = 6 - 7$ ;  $q_s = 110$   
 Werkstückdrehzahl  $n_w$ : 100 ... 200 U/min (oder höher bei thermischer Schädigung)  
 Ausfunken: 3-5 WSt.-Umdr.

Bild 3.13 Typische Stellgrößen beim Längsschleifen mit konventionellen Schleifscheiben

Eine Verfahrensvariante ist das **Außenrund-Schälschleifen**, bei dem das gesamte Bearbeitungsaufmaß in einem Überschleif abgenommen wird. Die Längsvorschubgeschwindigkeit und die Werkstückgeschwindigkeit sind kleiner als beim „klassischen“ Außendurchmesser-Längsschleifen. Die Zustellung erfolgt außerhalb des Werkstückeingriffs und liegt bei der Stahlbearbeitung bei  $a_e < 0,5$  mm, wobei der Materialabtrag in der schrägen Zone der Umfangsfläche der Schleifscheibe erfolgt. Der zylindrische Teil der Schleifscheibe übernimmt nur noch eine Werkstückglättung. Wegen der hohen Schleifscheibenbelastung werden bei diesem Verfahren häufig CBN-Schleifscheiben eingesetzt. Durch den Einsatz geringer Schleifscheibenbreiten ergibt sich für das CNC-gesteuerte Formschleifen eine hohe Flexibilität im Hinblick auf die erzeugbaren Werkstückkonturen. Damit ist das Formschleifen gerade für Kleinserien interessant, obwohl die Bearbeitungszeiten gegenüber einer Profilschleifbearbeitung deutlich größer sind.<sup>145,146</sup>



**Bild 3.14** Schälenschleifverfahren

Eine Sonderform stellt das **Schälenschleifen mit windschiefer Achsanordnung** dar. Bei dieser auch als „**Quickpoint**“-Verfahren<sup>147</sup> bekannten Variante steht die Schleifscheibe unter einem kleinen Winkel ( $\alpha \sim 0,5^\circ$ ) um die A-Achse geneigt, wodurch sich eine reduzierte Kontaktfläche zwischen Schleifscheibe und Werkstück ergibt (s. **Bild 3.14**). Infolge der „Punktberührung“ kommt es zu einer sehr

<sup>145</sup> Meister 2011, S. 442ff

<sup>146</sup> Hegener 1998

<sup>147</sup> *Quickpoint*-Schleifen ist eine Firmenbezeichnung der Fa. Junker



hohen Scheibenbelastung<sup>148</sup>, sodass dieses Verfahren mit keramisch oder metallisch gebundenen CBN- und Diamantschleifscheiben geringer Breite ( $b_s \sim 4$  mm) arbeitet. Über die CNC-Steuerung der Maschine können Konturen mit nur einer Schleifscheibe bearbeitet werden. Für die Stahlbearbeitung verfügen die Maschinen über Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeiten bis  $v_s = 140$  m/s. Aufgrund der geringen Bearbeitungskräfte lassen sich schlanke Bauteile ohne Lünetten in einem Durchgang komplett schleifen. Die Schleifscheiben werden häufig auf Selbstschärfung ausgelegt, sodass kein Abrichten notwendig ist.<sup>149</sup>

Zur Bearbeitung eines Außendurchmessers und einer Planfläche (Schulter) wird das **Form-Schrägeinsteichschleifen** oder auch Stirn-Umfangsschleifen eingesetzt. Dabei wird der Durchmesser fertig bearbeitet, bevor die Schleifscheibe die Planfläche herstellt.

### 3.2.2 Quer-Außenrundscheifen (Einstech- bzw. Profilschleifen)

Das auch als **Außenrund-Einsteichschleifen** bezeichnete Quer-Außenrundscheifen (Bild 3.15, links) ist weit verbreitet, z.B. in der Serienfertigung von Lagersitzen, Wellenabsätzen, Nuten oder Düsenadeln. Die Zerspanung erfolgt durch eine radiale Zustellung der Schleifscheibe in der Abfolge: Schruppen, Schlichten, Feinschlichten, Ausfunken.<sup>150</sup>

Die Bandbreite dieses Bearbeitungsverfahrens ist groß. Neben konventionellen Schleifscheiben werden auch abrichtbare und nicht abrichtbare CBN-Schleifscheiben eingesetzt. Bild 3.16 stellt typische Stellgrößen für das Einstechschleifen von Stahlbauteilen zusammen. Sofern keine Planflächen mitbearbeitet werden müssen, kann ein reines Einstechschleifen erfolgen. Für die kombinierte Bearbeitung von Plan- und Außenrundflächen eignet sich das Schräg-Einsteichschleifen.

Durch die Vielzahl der verfügbaren Maschinen, Schleifscheiben und Anwendungen lassen sich allgemeingültige Angaben zur Prozessführung nicht sinnvoll angeben. Der Durchmesserbereich liegt üblicherweise um  $d_s = 500$  mm (Kurbelwellenschleifen z.B. bis 750 mm) mit Schnittgeschwindigkeiten im konventionellen Bereich bis ca.  $v_s = 80$  m/s und im hochharten Bereich bis ca.  $v_s = 160$  m/s. Bild 3.16 zeigt am Beispiel der Bearbeitung von gehärtetem Stahl typische Stellgrößen beim geraden Einstechschleifen.

---

<sup>148</sup> Klocke 2018, S. 201

<sup>149</sup> z.B. Fiebelkorn 2016, S. 633

<sup>150</sup> Lierse 2015

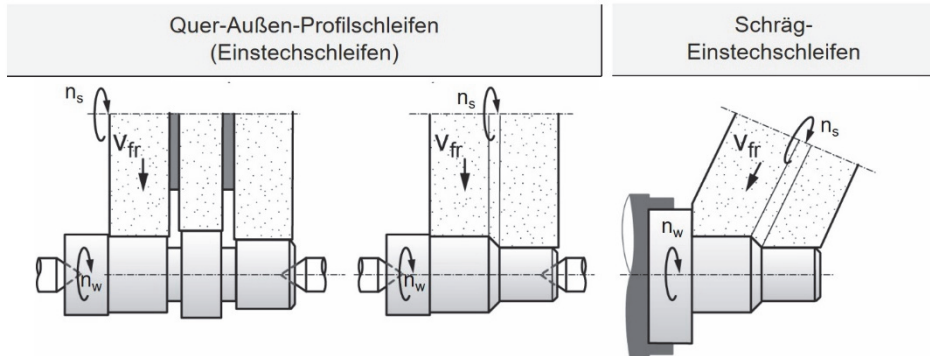
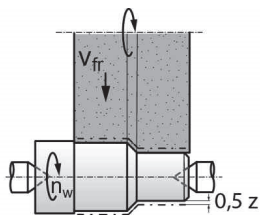


Bild 3.15 Einstechschleifen und Schräg-Einstechschleifen



Prozessführung:

Bez. Zeitspannvolumen  $Q'_w$ :

Ausfunken:

Schleifscheibe:

Vorschubgeschwindigkeit  $v_{fr}$ :

bzw. radialer Vorschub  $f_r$ :

Schleifgeschw.-verhältnis  $q_s$ :

konventionell  $Al_2O_3/SG/SiC$

0,35 ... 0,5 mm/min

(konventionelle Maschinen)

0,45 ... 0,7 mm/min

(stabile Masch., CBN-Schl.)

0,003 ... 0,01 mm/WSt-Umd.

60...90

Schuppen – Schichten – Feinschichten – Ausfunken

**1,5 (Schichten) ... 8 (Leistungsschleifen) mm<sup>3</sup>/mms**

**Zielwert ca. 3,5 mm<sup>3</sup>/mms**

bei stabilen WSt:

Schuppen: 1 ... 5 mm<sup>3</sup>/mms

Schichten: 0,5 ... 1,5 mm<sup>3</sup>/mms

Feinschichten: 0,1 ... 0,3 mm<sup>3</sup>/mms

bei schlanken WSt:

Schuppen: 0,5 ... 3 mm<sup>3</sup>/mms

Schichten: 0,3 ... 0,7 mm<sup>3</sup>/mms

Feinschichten: 0,05 ... 0,2 mm<sup>3</sup>/mms

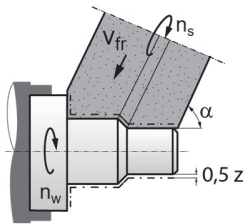
3 (stabiles WSt) ... 10 (schlankes WSt) WSt.-Umdr.

bzw. ~ 1 sec.

Bild 3.16 Typische Stellgrößen bei der Bearbeitung von Stahlbauteilen mittels Einstechschleifen

### 3.2.3 Schräg-Außenprofilschleifen (Schräg-Einsteichschleifen)

Eine Variante des Einsteichschleifens ist das in Bild 3.15, rechts dargestellte Außenrund-Umfangs-Schrägschleifen (**Schräg-Einsteichschleifen**). Mit einer um die B-Achse angestellten Schleifscheibenachse werden gleichzeitig die Umfangsfläche und eine Planschulter bearbeitet. Bei der Bearbeitung von Schrägen ist zu beachten, dass der radiale Vorschub  $f_r$  nicht in vollem Maße ankommt. Die Zustellung erfolgt über eine Kombination aus axialer und radialer Vorschubbewegung, wobei die häufig um  $20^\circ$  bis  $30^\circ$  schräg gestellte Schleifscheibe durch Interpolation der X und Z-Achse zugestellt wird. Durch profilierte Schleifscheiben lassen sich im Schrägeinsteichschleifverfahren auch Konturen erzeugen. Sofern das Verfahren im Bereich der Serienfertigung zum Einsatz kommt, haben sich Diamant-Profilrollen zum Abrichten bewährt.



Schleifscheibe:	konventionell $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SG}$
Schleifsch.umfangsgeschw. $v_s$ :	40 ... 50 m/s
Vorschubgeschwindigkeit $v_{fr}$ :	0,35 ... 0,5 mm/min
bzw. radialer Vorschub $f_r$ :	0,003 ... 0,015 mm/WSt-Umd.
Schleifverhältnis:	ca. 60-90
WSt-Drehzahl $n_w$ :	150 ... 250 U/min
Aufmaße	$z = 0,3 \text{ mm im } \varnothing; 0,05 \text{ mm Stirn}$
Einsteichwinkel:	ca. $60^\circ$
Schleifzeit:	ca. 1 ... 2 min (je nach Stellgrößen)
Anzahl WSt. zw. Abrichtzyklen:	ca. 5 ... 10

Prozessführung:	Schruppen – Schlichten – Feinschlichten – Ausfunken
Bez. Zeitspanvolumen $Q'_w$ :	Schruppen: $Q'_w = 3 \dots 5 \text{ mm}^3/\text{mm/s}$ bis $z = 0,05 \text{ mm}$ ; $q_s = 60$ Schlichten: $Q'_w = 1 \dots 3 \text{ mm}^3/\text{mm/s}$ bis $z = 0,01 \text{ mm}$ ; $q_s = 80$ Feinschlichten: $Q'_w = 0,1 \dots 1 \text{ mm}^3/\text{mm/s}$ bis $z = 0 \text{ mm}$ ; $q_s = 90$
Ausfunken:	3-5 WSt.-Umdr.

**Bild 3.17** Typische Stellgrößen beim Schräg-Einsteichschleifen

Typische Stellgrößen des Schräg-Einsteichschleifprozesses mit konventionellen Schleifscheiben sind in Bild 3.17 zusammengestellt. Grundsätzlich ist bei diesem Prozess zu beachten, wie die Zustellbewegungen durch die Maschineninterpolation der Achsen am Werkstück „ankommen“. Gleiches gilt auch für den Abrichtprozess.

# Index

## A

- Abrichten 9, 12, 18, 181, 183
  - Ausgangsgrößen 200
  - Direkte Stellgrößen 208
  - drückendes 274
  - elektrochemisch 194
  - funkenerosiv 156, 193
  - kontaktersiv 195
  - Kraft-aus-Spindel 275
  - Kraft-in-Spindel 275
  - Laser 192
  - Leistungen 250
  - mechanisch 186
  - Prozessgrößen 200
  - Stellgrößen 200
  - Systemgrößen 200, 201
  - ultraschallunterstützt 195
  - Wälzschleifschnecken 290
  - ziehendes 274
- Abrichterhalter 18, 206
- Abrichterposition 20
- Abrichtgeschwindigkeit
  - Formrolle 239
  - Profilrolle 238
- Abrichtgeschwindigkeitsdifferenz 234, 238, 251, 308
- Abrichtgeschwindigkeitsverhältnis 232, 242, 252, 287, 289
- Abrichtkräfte 247
- Abrichtprozess 182
- Abrichtrad 265
- Abrichtscheibensatz 291, 293
- Abrichtspindel 19, 20, 117, 236, 250, 251
  - für Formrolle 198, 207
  - für Profilrolle 207
- Abrichtspindelsystem 206
- Abrichtstation 206
- Abrichtsystem 18
- Abrichtüberdeckungsgrad 219, 230, 236, 253
  - an Schrägen und Profilen 227
  - gerade Abrichter 220
  - Radienabrichter 221
- Abrichtumfangsgeschwindigkeit 208
- Abrichtvorschub
  - axialer 209
  - radialer 216, 236
- Abrichtwerkzeug
  - aufbrauchbarer Belag 188, 190, 281
  - Diamant 197
  - Diamantanschliff 204
  - formstabil 187, 188
  - generierend 188
  - Herstellung 254
  - Kantenverstärkung 204, 256, 286
  - nachschleifen 204, 257
  - stehend, gerade 223, 229
  - stehend, Radienabrichter 209, 221, 223, 225
  - Verschleißendes 188, 190, 281

Wiederbelegung 97, 257  
 Abrichtzahnrad 292  
 Abrichtzeit 251  
 Abrichtzustellung 73, 197, 210,  
 213, 216  
 an Schrägen und Profilen 215  
 effektive 215  
 Richtwerte 215  
 Schleifscheibenkörnung 213  
 Abrichtzyklus 73, 277  
 AE-Sensor 19  
 Aluminiumoxid 78  
 Arbeitsergebnis 60  
 Geometrische Genauigkeit 60  
 Oberflächengüte 61  
 Rauheit 61  
 Arbeitshöchstgeschwindigkeit 112  
 Auflagelineal 142  
 Aufnahmevlansch 111  
 Aufspannen, Schleifkörper 113  
 Ausfeuern 26, 61, 63, 67  
 Ausgangsgrößen 8, 49  
 Außenprofilschleifen  
 Schräg- 141  
 Außenrundscheifen 134  
 Einstech- 139  
 Längs- 135  
 Längs-Seiten- 142  
 Quer- 139  
 Schäl- 138  
 Seiten- 142  
 Auswuchten, Schleifscheibe 114

## B

Bandschleifen 3  
 Barkhausenrauschen 66  
 Bearbeitungsaufmaß 2, 25, 29, 49,  
 127, 130, 136, 138, 168, 171  
 Bezeichnung, Schleifscheiben 107

Bindung 80  
 Bindungserosion 69  
 Bohrlochmethode 65  
 Bruchgeschwindigkeit 112  
 Bruchzähigkeit, Schleifmittel 82

## C

CBN (kubisches Bornitrid) 78, 81,  
 88  
 CD-Abrichten 130, 289  
 Centerless-Schleifen siehe  
 Spitzenlosschleifen  
 Chemisch Nickel 98  
 Crushieren 96, 234, 247, 248, 250,  
 252  
 CVD-Diamant 78, 89, 201, 266, 284  
 CVD-Diamant-Formplatten 272  
 CVD-Diamantierung 205

## D

Diamant  
 Natur- 78, 201  
 synthetisch 78, 203  
 Diamantanschliff 287  
 Diamantierung 202, 270  
 Diamantqualität 83, 201, 269  
 Diametral Pitch 161  
 Dichte, Schleifbelag 112  
 Doppelkegelwerkzeug 291  
 Drall 27, 211  
 Drehflügelabrichter 283, 305  
 Dreieckskorund 84, 87

## E

ECD-Abrichten 194  
 ECDD-Abrichten 195  
 Edelkorund

rosa 86  
rot 86  
weiß 86  
Eigenspannungen 65  
  Abrichtgeschwindigkeitsverhältnis 253  
  Abrichtüberdeckungsgrad 253  
Eigenspannungsanalyse  
  Bohrlochmethode 65  
  mikromagnetisch 66  
  röntgenographisch 65  
Eigenspannungstiefenverlauf 67  
Eingangsgrößen, Schleifprozess 7  
Eingriffslinie, Zahnrad 161  
Einkorndiamant 204  
Einkristallkorund 86  
Einstechschleifen 133, 139  
  Schräg- 141  
ELID-Abrichten 194  
Ergebnisgrößen 7  
Evolvente 159  
Evolventenverzahnung 158  
Exzentrizität 14, 115

## F

Feinschichten 26  
Festwalzen 68  
Flach-Pendelschleifen 129  
Flachschleifen 126  
Form- und Lagegenauigkeiten 60  
Formen, Schleifwerkzeug 106  
Formrolle 189, 198, 203, 205, 210, 241, 270, 278  
  formstabil 270  
  Instandsetzung 283  
  Nachschleifen 283  
  verschleißend 271, 282

## G

Galvanische Bindung 95  
Galvanische Schleifscheibe  
  Herstellung 98  
  Wiederbelegung 97  
Gangzahl, Schleifschnecke 295  
Gefügeschädigung 54, 66  
Gefügeveränderungen 64  
Gegenlaufabrichten 234  
Gegenlaufschleifen 24, 44, 51  
Genauigkeit, geometrische 60  
Gewindeschleifen 151  
Gleichlaufabrichten 234  
Gleichlaufschleifen 24, 25, 44, 51  
Gleitschleifen 4  
Globoidschnecke 172  
Granat 78, 81  
Grundkreis, Zahnrad 160  
Gummibindung 95  
G-Verhältnis 71, 75, 184

## H

Halbedelkorund 86  
Hartdrehen 61  
Härte  
  Schleifmittel 82  
  Schleifscheibe 100, 102, 107, 111  
  Werkstoff 63  
Hartmetall 77  
Herstellung Abrichtwerkzeug  
  Doppelumkehrverfahren 261  
  Galvanisch negative Abrichter 259  
  Gesinterte Abrichter 258  
  Negativverfahren 258  
  Positivverfahren 255

Hochdruck-

  Hochtemperatursynthese 89

Höhenballigkeit (Zahnrad) 292

Hohlkugelkorund 87

Honen 4

Honleiste 4

Hubschleifen 4

Hybridbindung 95

Hydrodehnspannfutter 15

## I

Innenrundschleifen 145

  Einstech- 151

  Längs- 146

  Profil- 151

  Prozessführung 147

  Quer- 151

Innenschleifkörper

  Schaftwerkstoff 147

  Schleifstifte 106

Innenschleifspindeln 147

## K

Kantenverrundung 69

Kantenverschleiß 72

Kantenverstärkung 204, 257, 258,  
260, 286

Kennzeichnung, Schleifwerkzeug  
104

Keramische Bindung 91

Klangtest 113

Konditionieren 9, 181, 183

Kontaktfläche 5, 38, 39

Kontaktlänge 5, 37, 38

  geometrische 38

  kinematische 40

Kontaktzonentemperatur 54, 57

Koordinatenschleifen 154

Kopfrücknahme (Zahnrad) 292

Kornabspitterungen 69

Kornausbruch 69

Kornfliese 264

Kornkonzentration 103

Kornplatte 264

Korund 78, 84

Kraftmessung 50

Kreisevolvente 160

Kubisches Bornitrid 88

Kugeldruckverfahren 111

Kugelstrahlen 68

Kühlschmierstoff 16

  Düsen 18

  Emulsion 17

  Filteranlagen 17

  Lösung 17

  Reinigung 17

  Schleiföl 17

Kunstharzbindung 93

## L

Läppen 4

Lötbindung 99

Lünette 15

## M

Magnetspannung 16

Maßgenauigkeit 60

Meisterrad 292

Metallsinterbindung 94

Mikrohärtemessung 64

Mindestspannungsdicke 61

Mischkeramik 77

Mitnehmer 15

MKD (monokristalliner Diamant)  
77, 201

MKD-Abrichter 266

Momentenunwucht 115  
Monokristalliner Diamant 77

## N

Nadelfliesen 264  
Naturdiamant-Abrichter 262  
Naturdiamanten 272  
Natürlicher Korund 81  
Nickelsulfamatelektrolyt 98  
Nitaltest 64  
Normalkorund 86  
 $n_s$ -konstant-Maschine 230

## O

Oberflächenqualität 60  
Oxidkeramik 77

## P

PCBN (polykristallines Bornitrid)  
77  
Pendelschleifen 126, 128, 129  
PKB (polykristallines Bornitrid) 77  
PKD (polykristalliner Diamant) 78  
Planschleifen 124  
Längs-Seiten- 131  
Quer-Seiten- 133  
Polykristalliner Diamant 78  
Poren 80, 100  
Porenbildner 79, 92  
Porosität 112  
Profilabrichten 273  
Profilballigkeit, Zahnrad 164  
Profildiamant 203, 204, 263  
Profilieren 183  
Profilmodifikationen, Zahnrad 163  
Profilrolle 187, 190, 199, 204, 206,  
242, 284

galvanisch negativ 285  
galvanisch positiv 284  
Instandsetzung 296  
mehrrippig 292, 294  
negativ gesintert 285  
Profilrollensatz 291, 294  
Profilschleifen 23, 26, 126, 130,  
139  
Profilschleifen von Zahnrädern 170  
Diskontinuierliches 170  
Kontinuierliches 172  
Profilschleifscheibe 22, 25  
Prozessführung 63  
Außenrund-Längsschleifen 136  
Einstechschleifen 139  
Innenrundscheifen 147  
mehrstufig 67, 121  
Schleifen 119, 182  
Schräg-Einstechschleifen 141  
Prozessgrößen 7, 49  
Prozessverlauf Schleifen 72  
Prüfung, Schleifwerkzeug 111  
Punktcrushieren 249

## Q

Quarz 78, 80  
Quer-Seiten-Rundscheifen 142  
Quervorschub (Planschleifen)  
intermittierend 126  
kontinuierlich 126

## R

Radialverschleiß 71  
Radienabrichter 209, 210, 221, 223,  
225, 229  
Radienrücknahme (Zahnrad) 293  
Randzonenbeeinflussung 10, 63



Randzoneneigenschaft 9, 54, 60, 63,  
67, 252  
Rattermarken 59  
Ratterschwingungen 59  
Regelscheibe 142  
Reinigen, Schleifbelag 186  
Rubinkorund 86

## S

Sandstrahlverfahren 111  
Satzprofilrolle 291  
Schälschleifen siehe Außenrund-  
Schälschleifen  
Schärfen 183, 184, 185, 191, 192,  
194  
Korundblock 156, 191  
Wasserabrasivstrahl 186  
Schleichgangschleifen siehe  
Tiefschleifen  
Schleifbrand 41, 63, 66, 254  
Schleifenergie 54  
kontaktflächenbezogen 54, 57  
spezifische 56  
Schleifgeschwindigkeitsverhältnis  
43, 46, 47  
Schleifkorn 79  
Schleifkörnung  
hochhart 106  
Klassifizierung 104  
konventionell 105  
Schleifkraft 49, 51  
Schleifkraft, bezogene 52  
Schleifleistung 52, 53, 57, 66  
bezogen 54  
kontaktflächenbezogen 54, 65  
Schleifmaschine 14  
Schleifmittel 80  
Diamant 89  
hochharte 78  
konventionell 183  
konventionelle 78  
natürliche 78  
synthetische 78  
Schleifrisse 65  
Schleifscheibe 12, 77  
abrichtbar 12, 119  
Aufbau 79  
Diamant 185  
galvanisch 13  
Grundkörper 79  
hochhart 13, 106, 184  
hochhart, abrichten 280  
konventionell 12, 79, 106  
konventionell, abrichten 277  
nicht-abrichtbar 12  
Schleifscheibenaufnahme 110  
Schleifscheibenbindungen 90  
Schleifscheibendurchmesser 21, 25,  
42, 230, 241, 264  
Schleifscheibendurchmesser,  
äquivalenter 37  
Schleifscheibengefüge 100  
Schleifscheibenumfangs-  
geschwindigkeit 21, 25  
Schleifschnecke  
globoidförmig 172  
zylindrisch 176  
Schleifstift 109, 111  
Schleifstoff siehe Schleifmittel  
Schleiftemperatur 56  
Schleifüberdeckung 28  
Schleifverfahren, Einteilung 123  
Schleifverhältnis 71  
Schleifwerkzeug siehe  
Schleifscheibe  
Schichten 26, 28, 63, 67  
Schmelzbindungen 92  
Schmelzkorund 85  
Schmirgel 78, 80

Schneidenbahnen 45  
Schneideneingriffsbahn 62  
Schneidenfaktor 42  
Schneidstoffe  
  hochharte 77  
  konventionelle 77  
Schnellarbeitsstahl 77  
Schnellhubschleifen 129  
Schnittgeschwindigkeit 25  
Schnittkraft, spezifische 56  
Schnitttiefe 25  
Schräg-Einsteichschleifen 279  
Schraubschleifen 151  
  Längs- 152  
  Quer- 153  
Schruppen 26, 28, 63, 67  
Schuhschleifen 15  
Schwingungen 58  
  fremderregt 58  
  regenerativ 58  
  selbsterregt 58  
Seitenschleifen mit  
  Planetenkinematik 133  
Selbstschärfeffekt 70  
Siliciumcarbid 78, 87  
  grün 88  
  schwarz 88  
Siliciumnitrid 77  
Sinterbindungen 92  
Sinterkorund 78, 84, 87  
Sol-Gel-Korund 84, 87  
Spannmittel 15  
Spannzange 15  
Spannungsdicke 5, 40, 47  
  äquivalente 40  
  Einzelkorn- 42  
Spannungsquerschnitt 30, 32  
Spindelleistung 250  
Spitzenlos-Durchlaufschleifen 143  
Spitzenlos-Einsteichschleifen 143

Spitzenlosschleifen 142  
Stäbchenkorund 87  
Stehender Abrichter 187, 197, 202,  
  210, 262  
  Verschleiß 268  
Stellgrößen  
  abgeleitet 7, 30  
  direkt 7, 20  
Stichelprüfung 111  
Stirnradsverzahnungen  
  Herstellung 166  
Stirnschleifen 131  
Strahlspanen 4  
Super abrasives 13, 81, 89  
Synthetischer Diamant 78  
Systemgrößen 7, 12

## T

Teilwälzschleifen,  
  Diskontinuierliches 173  
Temperaturbeständigkeit,  
  Schleifmittel 82  
Textur 63  
Tiefschleifen 39, 48, 128, 130, 131  
Trennschleifen 179  
Triebstockverzahnung 158

## U

Überdeckungsgrad 28  
Ultrafinishbearbeitung 3  
Universalschleifmaschinen 146  
Unwucht 14  
  dynamische 115  
  -prüfung 113  
  statische 114

**V**

- $v_c$ -konstant-Maschine 13, 232
- Verzahnungsgesetz 157
- Verzahnungsschleifen 157
- Vollschnittschleifen siehe  
Tiefschleifen
- Vorschub 27
  - axialer 27
  - effektiver radialer 29
  - radialer 29, 31
- Vorschubgeschwindigkeit 27
  - axiale 28, 72, 136
  - radiale 142, 151

**W**

- Wälzschleifen von Zahnrädern 173
- Wälzschleifen, Kontinuierliches  
174
  - Prozessführung 179
  - Zahnfußbearbeitung 177
- Wärmeleitfähigkeit, Schleifmittel  
82
- Warmhärte, Schleifmittel 82
- WEDD-Abrichten 196
- Werkstückauflage 142
- Werkstückaufnahme 14
- Werkstückgeschwindigkeit 23
- Werkzeugschleifen 94, 95, 155, 197
- Werkzeugverschleiß 68
- Wildhaber-Novikov-Verzahnung  
158
- Wirkhärte, Schleifscheibe 102
- Wuchten
  - Festortmethode 118

Spreizwinkelmethode 117

**Z**

- Zahnrad
  - Flankenballigkeit 166
  - Herstellung 167
  - Höhenballigkeit 174
  - Kenngößen 162
  - Kopfrücknahme 174
  - Profilmodifikationen 163
  - Prozesskette 166
  - Verschränkung 166
  - Vorverzahnung 168
- Zeitspanvolumen 32, 35, 39, 44, 52,  
53, 61, 67, 129, 178
  - Abricht- 219
  - Außenrundscheifen 34
    - äußeres 41
    - bezogenes 33, 35, 37
    - inneres 41
  - Längsschleifen 36
- Zentrierspitze 15
- Zerspanarbeit 56
- Zerspanvolumen 32, 33, 35, 36, 54,  
56, 72, 119, 120
  - Abricht- 219
  - bezogen 33
- Zirkonkorund 78, 86
- Zusetzungen 69, 211
- Zustellung 7, 20, 25, 26, 29, 31, 39,  
40, 47, 72, 126, 128, 130
  - Abricht- siehe Abrichtzustellung
  - effektive 27
- Zwischen-Spitzen-Schleifen 15
- Zykloidenverzahnung 157