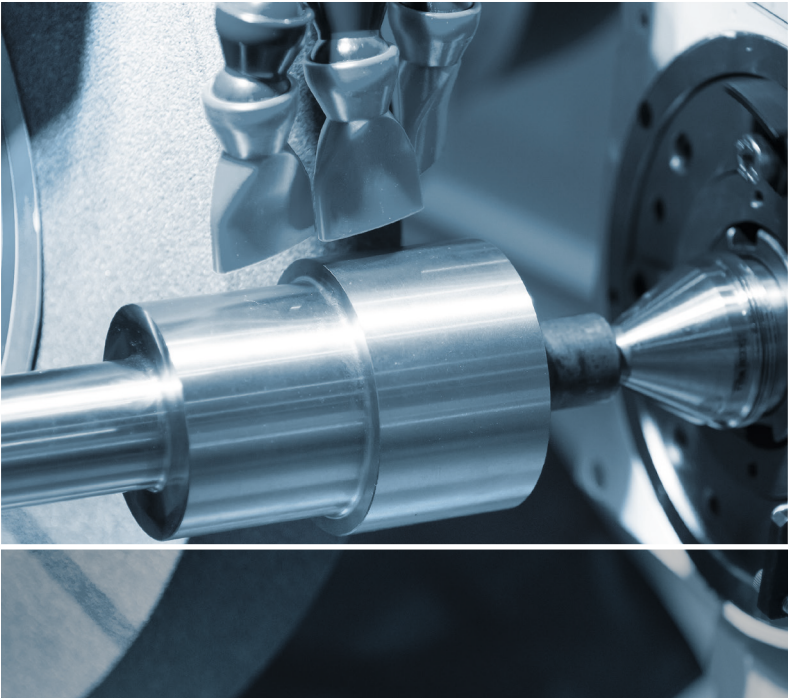


Tjark Lierse

Schleif- und Abrichttechnik



HANSER

Lierse

Schleif- und Abrichttechnik



Bleiben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Tjark Lierse

Schleif- und Abrichttechnik

Mit 230 Bildern und zahlreichen Tabellen und Formeln

HANSER

Der Autor:

Prof. Dr.-Ing. Tjark Lierse, Hochschule Hannover, Fakultät Maschinenbau und Bioverfahrenstechnik



Alle in diesem Buch enthaltenen Informationen wurden nach bestem Wissen zusammengestellt und mit Sorgfalt geprüft und getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Buch enthaltenen Informationen mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor und Verlag übernehmen in folgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Art aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht.

Ebenso wenig übernehmen Autor und Verlag die Gewähr dafür, dass beschriebene Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

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

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) – auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2020 Carl Hanser Verlag München

www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Dipl.-Ing. Volker Herzberg

Herstellung: Björn Gallinge

Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Titelmotiv: © shutterstock.com/Pixel B

Coverrealisation: Max Kostopoulos

Satz: Prof. Dr.-Ing. Tjark Lierse

Druck und Bindung: CPI books GmbH, Leck

Printed in Germany

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

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

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

Vorwort	V
1 Grundlagen des Schleifprozesses	1
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
2	Schleifwerkzeuge	77
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

3	Schleifverfahren.....	123
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
4	Grundlagen des Abrichtprozesses	181
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
5	Abrichten mit Diamantwerkzeugen	197
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
6	Literatur	313
7	Index.....	323

1

Grundlagen des Schleifprozesses

Das Schleifen ist ein seit langem bekanntes Verfahren zur Feinbearbeitung harter Werkstoffe. Grob bearbeitete Steinbeile wurden bereits in der Steinzeit mithilfe von Steinstaub durch Schleifen und Polieren feinbearbeitet. Auch im alten Ägypten und Griechenland waren Schleifgeräte bekannt.¹ Die ersten Schleifmaschinen im nördlichen Mitteleuropa nutzten um 1300 n.Chr. nachweisbar in der Pfarrei Solingen die Wasserkraft zur Feinbearbeitung von Waffen². Dabei wurden natürliche Schleifsteine aus Eifelsandstein mit Durchmessern bis zu drei Metern eingesetzt, die über ein Getriebe angetrieben wurden^{3,4}. Aus dem 15. Jahrhundert sind handbetriebene Schleifmaschinen für die Bearbeitung von Edelsteinen bekannt⁵. *Leonardo da Vinci* entwarf bereits in dieser Zeit eine Hohlspiegelschleifmaschine, wahrscheinlich für Brennspiegel⁶.

Mit der Entwicklung der Dampfmaschinenteknik im 18. Jahrhundert durch *Thomas Savery*, *Thomas Newcomen* und später *James Watt* wurde ein neues Zeitalter eingeläutet. Während die Rotgusszylinder der Dampfmaschinen auf Bohrwerken aufgebohrt und mit Öl, Schmirgel und einem Bleiklotz ausgeschliffen wurden, war zu der Zeit noch keine Drehmaschine mit festem Werkzeughalter zur Herstellung genauer Kolben vorhanden. Erst die Erfindung der Leitspindeldrehbank mit Werkzeugschlitten von *Henry Maudslay* (1771-1831) ermöglichte einen Qualitätssprung⁷. Ab 1860 führte die Entwicklung einer Universal-Fräsmaschine von *Joseph R. Brown* zu neuen Anwendungsgebieten. Allerdings war die Instandsetzung der aus gehärtetem Stahl bestehenden Fräswerkzeuge aufwendig. Verschlissene Werkzeuge mussten nach dem Weichglühen mittels Feile nachgearbeitet und anschließend erneut gehärtet werden. Aus diesem Umstand entstand 1868 von *Brown & Sharpe* die erste Universalschleifmaschine. Die ersten Schleifscheiben wurden aus Naturkorund von *Charles H. Norton* (1851-1942) in unterschiedlichen

¹ Spur 1991, S. 25ff

² Spur 1991, S. 76

³ Mutz 2019

⁴ Wipperkotten

⁵ Spur 1991, S. 90

⁶ Lohrmann

⁷ Przywara 2006, S. 32ff

Qualitäten geliefert.⁸ Gegen 1878 begann die Firma *Naxos-Union* in Frankfurt mit der Entwicklung von Maschinen zum Einsatz von Schleifrädern aus Korund, die das Anfangs aus Griechenland importierte Naxos-Schmirgel ablösten.⁹ Von der Möglichkeit der Feinstbearbeitung von Oberflächen profitierte bald der gesamte Maschinenbau, da dies die Herstellung maßgenauer, präziser Bauteile aus gehärtetem Stahl ermöglichte.

1.1 Einordnung des Schleifprozesses

Das Schleifen mit rotierendem, vielschneidigen Werkzeug ist ein **trennendes Fertigungsverfahren**. Die in ihrer Art, Lage und Form geometrisch unbestimmten Schneidkörner sind durch ein Bindematerial zu einem rotationsymmetrischen Schleifkörper gebunden. Die Schleifkörper aus natürlichen oder synthetischen Schleifmitteln rotieren mit hoher Geschwindigkeit und erzeugen durch den Eingriff in das Werkstück eine Werkstofftrennung. Nach DIN 8589-11 gliedert sich das Fertigungsverfahren der Untergruppe „3.3.1 Schleifen mit rotierendem Werkzeug“ in Plan-, Rund-, Schraub-, Wälz-, Profil- und Formschleifen (siehe Bild 1.1). Daneben gibt es noch weitere Verfahren oder Abwandlungen, deren Namen entweder an die Bearbeitungsaufgabe oder teilweise auch an den Maschinenhersteller gekoppelt sind. Jedes einzelne Verfahren stellt besondere Anforderungen an die Prozessführung und -gestaltung und hat ihre kinematischen Besonderheiten.

Das Schleifen ist häufig ein **Endbearbeitungsverfahren gehärteter Stahlwerkstoffe** mit einem Bearbeitungsaufmaß von wenigen Zehnteln oder Hundertsteln Millimetern. Oft steht es am Ende einer Prozesskette (Weichbearbeitung – Wärmebehandlung – Hartbearbeitung) zur **Erzeugung der Funktionseigenschaften** eines Bauteiles. Die Wertschöpfungskette ist damit schon recht lang, womit den letzten Bearbeitungsschritten eine besondere Aufmerksamkeit zukommt. Fehler in diesem Produktionsstadium führen i.d.R. zu einem beträchtlichen wirtschaftlichen Schaden.

Andererseits kann das Schleifen auch zur **Bearbeitung schwer zerspanbarer Werkstoffe** wie Glas, Keramik, Hartmetall oder Silicium genutzt werden. Da bei solchen Werkstoffen keine Weichbearbeitung möglich ist, ist hier das Bearbeitungsaufmaß in vielen Fällen hoch und entspricht der Differenz zwischen Halb-

⁸ Przywara 2006, S. 78ff

⁹ Spur 1991, S. 299

zeug/Rohling und Fertigprodukt. Das zu bearbeitende Werkstoffvolumen ist vergleichsweise groß und der Schleifprozess wird zur Vor- und Fertigbearbeitung genutzt.

Fertigungsverfahren						
1	2	3	4	5	6	
Urformen	Umformen	Trennen	Fügen	Beschichten	Stoffeigenschaften ändern	
3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	
Zerteilen	Spanen mit geometrisch bestimmter Schneide	Spanen mit geometrisch unbestimmter Schneide	Abtragen	Zerlegen	Reinigen	
DIN 8588	DIN 8589-0	DIN 8589-0	DIN 8590	DIN 8591	DIN 8592	
3.3.1	3.3.2	3.3.3	3.3.4	3.3.5	3.3.6	3.3.7
Schleifen mit rotierendem Werkzeug	Bandschleifen	Hubschleifen	Honen	Läppen	Strahlspanen	Gleitspanen
DIN 8589-11	DIN 8589-12	DIN 8589-13	DIN 8589-14	DIN 8589-15	DIN 8200	DIN 8589-17
3.3.1.1	3.3.1.2	3.3.1.3	3.3.1.4	3.3.1.5	3.3.1.6	
Planschleifen	Rundschleifen	Schraubschleifen	Wälzschleifen	Profilschleifen	Formschleifen	

Bild 1.1 Übersicht über die Fertigungsverfahren nach DIN 8589

Neben dem Schleifen sind in der DIN 8589 noch weitere Fertigungsverfahren beschrieben, die ebenfalls geometrisch undefinierte Schneidkörner nutzen.

Das **Bandschleifen** nutzt als Grundkörper eine flexible Unterlage, auf dem die einzelnen Schneidkörner durch ein Bindungsmaterial aufgebracht sind. Das Schleifband umläuft mindestens zwei Rollen (Stützrollen) und in einigen Verfahrensvarianten zusätzlich Stützschuhe oder -platten, die den Kontakt zwischen Werkstück und Schleifband herstellen. I.d.R. kann beim Bandschleifen nur eine Kornlage aktiv genutzt werden. Die Bearbeitung geometrisch komplexer Konturen ist nicht möglich. Das Anwendungsspektrum dieses Verfahrens reicht von der Grobzerspannung von Gussstücken über das Messerschleifen bis hin zur Ultrafinishbearbeitung von hochgenauen Wellen. Wie beim Schleifen mit rotierendem Werkzeug wird beim Bandschleifen auch zwischen Umfangs- bzw. Seiten- und Längs- bzw. Quer- oder Schrägbandschleifen unterschieden. Technologische Zusammenhänge lassen sich in vielen Punkten ableiten und übertragen, wobei den Stützrollen beim Bandschleifen bzgl. ihrer geometrischen und mechanischen Eigenschaften (Größe, Härte,

Dämpfung, Anpresskraft, u.a.) eine besondere Bedeutung zukommt. Weiterführende Zusammenhänge zum Bandschleifen sind z.B. in *DIN 8589-12*, *Heidtmann*¹⁰, *Klocke*¹¹ zu finden.

Das in DIN 8589-13 beschriebene Plan- oder Profil-**Hubschleifen** nutzt eine translatorische Hin- und Herbewegung des Werkzeugs zum Werkstoffabtrag, ist in der ursprünglichen Form jedoch nicht mehr als Fertigungsverfahren in industriellen Anwendungen vertreten. Das Hubschleifen ist vielmehr durch das **Honen** abgelöst worden, das zusätzlich zur Rotation des Honwerkzeugs oder des Werkstücks zur Erzeugung einer Schnittgeschwindigkeit eine überlagerte oszillierende Bewegung verwendet. Die Honleisten werden i.d.R. mit einer Kraft auf die Werkstückoberfläche gedrückt, was den Werkstoffabtrag durch die Schneidkörner ermöglicht. Durch die kinematische Kopplung von Rotation und Oszillation entstehen gekreuzte oder bogenförmige Eingriffsbahnen der Schneidkörner und damit ungerichtete Bearbeitungsspuren. Eine sehr detaillierte Zusammenstellung der aktuellen Hontechnologie findet sich z.B. in *Klink*¹².

Das **Läppen** (DIN 8589-15) nutzt loses Korn in einem Fluid, um einen Werkstoffabtrag am Werkstück unter Zuhilfenahme eines Läppmittelträgers zu ermöglichen. Der Läppmittelträger drückt das Schneidkorn an die Werkstückoberfläche und führt zusätzlich eine Bewegung aus, sodass das Schneidkorn raumgebunden durch eine abrollende Bewegung zu einem Werkstoffabtrag führt. Zu den Hauptanwendungen gehören die Erzeugung von ebenen Flächen (keramische Dichtscheiben, ebene Waferflächen) oder das Zerteilen von hochharten Werkstoffen (Drahtschneiden von Wafern). Für weiterführende Informationen siehe z.B. *Klocke*¹³, *Wolters*¹⁴.

Beim **Strahlspanen** wird das Schneidmittel durch die kinetische Energie eines Strahlmediums (Luft oder Fluid) auf die Werkstückoberfläche transportiert und führt dort durch einen Aufprall zum Werkstückabtrag. (s. z.B. *Klocke*¹⁵)

Das **Gleitschleifen bzw. Gleitspanen** (DIN 8589-17) verwendet wiederum gebundene Schneidkörner, die mittels einer Bindung zu kleinen Pellets verbacken werden. Zusammen mit i.d.R. vielen kleinen Werkstücken werden diese Pellets in schwingungsangeregten oder rotierenden Maschinen zu einem Werkstoffabtrag durch gegenseitiges Aneinandergleiten angeregt. Damit lassen sich sehr gute Oberflächenqualitäten, allerdings keine gezielten Maß- und Formänderungen erreichen. Zumeist liegt das Aufgabenfeld in der Oberflächenveredelung und dem

¹⁰ Heidtmann 2014, S. 670ff

¹¹ Klocke 2018, S. 225ff

¹² Klink 2015

¹³ Klocke 2018, S. 341ff

¹⁴ Wolters 2014, S. 907ff

¹⁵ Klocke 2018, S. 384ff

Entgraten von kleinen Serienbauteilen. Beim Trommel-, Vibrations-, Tauch-, oder Schleppgleitschleifen kommen gebundene Schleifpellets, beim Druckfließbläppen Schleifpasten zum Einsatz.¹⁶

1.2 Wirkprinzip des Schleifens

Alle Schleifverfahren mit rotierendem Werkzeug nutzen das gleiche Wirkprinzip: Eine mit hoher Umfangsgeschwindigkeit rotierende Schleifscheibe wird durch eine entsprechende Zustell- und Vorschubbewegung durch das Werkstück bewegt. Die einzelnen Schneiden erzeugen durch ihren Eintritt in den Werkstoff eine Werkstofftrennung. Damit kann das Verfahren als „**bahn- bzw. weggebundenes**“ **Fertigungsverfahren** aufgefasst werden. Die Bahnsteuerung der einzelnen Schneiden erfolgt durch die Rotation des Schleifwerkzeugs in Verbindung mit einer Zustell- und/oder Vorschubbewegung relativ zum Werkstück, die durch die Steuerung der Schleifmaschine übernommen wird.

Vielfach wird das Schleifen zur Endbearbeitung vorbearbeiteter Werkstücke mit einer Härte größer HRC 45 zur Verbesserung der Werkstückqualität wie Rauheit, Maß- und Formgenauigkeit sowie Randzonenausbildung eingesetzt. Durch Weiterentwicklungen von Schleifverfahren, -maschinen und -werkzeugen können heute aber auch große Werkstoffvolumina zerspannt werden, um z.B. Prototypbauteile aus dem Vollen herzustellen, ohne zusätzlich geometrisch bestimmte Werkzeuge zur Vorbearbeitung nutzen zu müssen.

Makroskopisch betrachtet ergibt sich eine **Kontaktfläche** A_k (Berührfläche) zwischen Schleifwerkzeug und Werkstück, die durch die **Breite des Werkzeugeingriffs** a_p und die **Kontaktlänge** l_k beschrieben wird. Die einzelnen Schneiden führen zu einer Vielzahl von einzelnen Werkstoffabträgen mit jeweils sehr kleinen **Einzelkornspanungsdicken** h_c . Die abgetrennten Späne werden mithilfe des Spanraums der Schleifscheibe aus der Kontaktzone heraus transportiert. Durch die hohen Umfangsgeschwindigkeiten von $v_s = 10$ bis 180 m/s erfolgt die Werkstofftrennung in einem kurzen Zeitintervall. Im Vergleich zu Zerspanverfahren mit geometrisch definierter Schneide ist der Energiebedarf beim Schleifen aufgrund der kleinen Spannungsdicken sowie der negativen Spanwinkel und kaum vorhandenen Freiwinkel relativ groß. Die damit verbundenen großen Reibanteile bei der Spanbildung führen zu hohen Temperaturen im Kontaktbereich zwischen Schneide und Werkstoff, womit das Schleifen i.d.R. nur unter Verwendung von

¹⁶ z.B. Klocke 2018, S. 389ff

Kühlschmierstoff möglich ist. Ein optimales Schleifergebnis kann somit nur durch einen Kompromiss bzw. das Gleichgewicht zwischen den reibungsbedingten thermischen und den mechanischen Wirkungen infolge der wirkenden Kräfte erreicht werden.

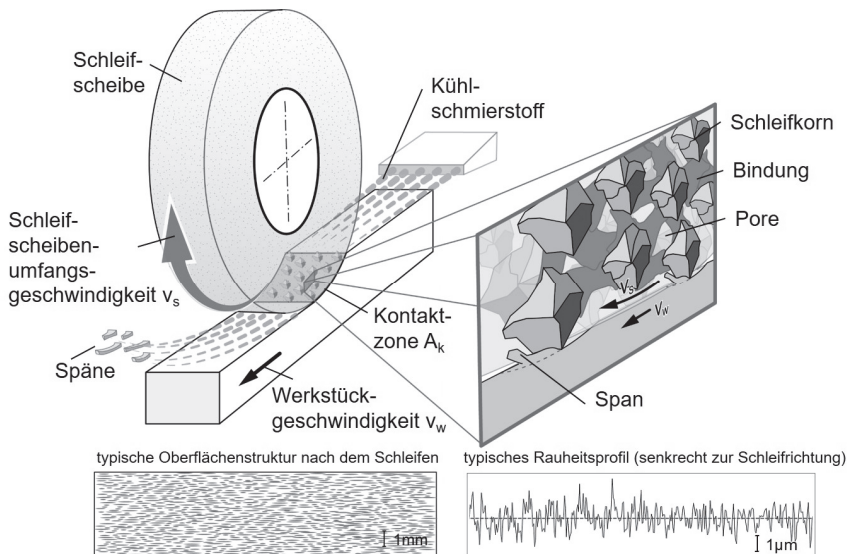


Bild 1.2 Prinzip des Schleifens und erzeugte typische Oberflächenausbildung

Grundsätzlich werden durch das Schleifen gerichtete Oberflächenstrukturen erzeugt. Die einzelnen Schneideneingriffe infolge der hohen Umfangsgeschwindigkeit v_s und der bahngesteuerten Zustell- und Vorschubbewegung der Schleifscheibe und/oder des Werkstücks v_w führen zu einem Werkstoffabtrag, der durch eine ausgeprägte Vorzugsrichtung der einzelnen kleinen Spanspuren im Werkstück gekennzeichnet ist. Quer zur Bearbeitungsrichtung ergibt sich ein charakteristisches Rauheitsprofil, das eine unregelmäßige Struktur aufzeigt (s. Bild 1.2).

1.3 Kenngrößen des Schleifprozesses

Schleifprozesse sind durch eine Vielzahl von Parametern (Eingangsgrößen) beeinflusst. Die für einen Schleifprozess eingesetzte Maschine ist z.B. gekennzeichnet durch Steifigkeit, Dämpfungsvermögen, Antriebsleistung, Kühlschmierstoff oder auch durch die Spannungsmöglichkeit für ein Werkstück. Daneben lassen sich die Umfangsgeschwindigkeit, Zustellung, Vorschubgeschwindigkeit und eine Reihe anderer Parameter ändern, um einen Einfluss auf den Prozess nehmen zu können.

Unterschieden werden drei Arten von Eingangsgrößen: Zum Ersten **Systemgrößen**, die sich nicht unmittelbar ändern lassen und von der eingesetzten Technik abhängen. Zum Zweiten änderbare „**direkte**“ **Stellgrößen** die eine direkte Einflussnahme auf den Prozessverlauf ermöglichen; und zum Dritten „**abgeleitete**“ **Stellgrößen**“, die sich aus den Stellgrößen und/oder Systemgrößen ableiten bzw. berechnen lassen.

Zu den **Systemgrößen** zählen Maschinenausführung, Werkstück, Schleifscheibenspezifikation und -geometrie, Abrichtwerkzeug, Kühlschmierstoff, Werkstückspannung oder Auswuchtung.

Direkte Stellgrößen sind Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit v_s , Werkstückgeschwindigkeit v_w , Zustellung a_e , Vorschub v_f oder Abrichtbedingungen.

Abgeleitete Stellgrößen sind berechnete Größen wie das Zeitspanvolumen Q_w , Schleifgeschwindigkeitsverhältnis q_s , Kontaktlängen l_g bzw. -flächen A_k , Spannungsdicken h_c , Schleifüberdeckungsgrade U_s .

Je nach Belastung der Schleifscheibe infolge der eingesetzten Stell- und Systemgrößen können sich während der Bearbeitung sehr unterschiedliche Prozessverläufe ergeben. Die sich damit verändernden **Prozessgrößen** führen zu einer Änderung der **Ergebnisgrößen**, wobei das wirtschaftliche Endergebnis wie z.B. die Mengenleistung oder die Fertigungskosten von besonderem Interesse sind. Eingangsgrößen sind die System- und Stellgrößen eines Prozesses.

Prozessgrößen sind Temperaturen, Kräfte, Leistungen, Energieumsetzung, Geräusche (Körperschall, Acoustic Emission), Schwingungen¹⁷ oder die Bearbeitungszeit.

¹⁷ Im Prozess auftretende Schwingungen sind i.d.R. unerwünscht und zählen daher auch zu den Störgrößen.

Die **Ergebnisgrößen bzw. Ausgangsgrößen** sind Oberflächenqualität, Form- und Maßgenauigkeit, Randzonenbeeinflussung oder Werkzeugverschleiß, Mengenleistung, Fertigungskosten.

Nach Bild 1.3 kann der Schleifprozess als ein komplexes System aufgefasst werden. Die Eingangsgrößen bilden die Stell- und Systemgrößen des Prozesses. Während des Prozesses wirken die Prozessgrößen und beeinflussen die Ausgangsgrößen und damit das Arbeitsergebnis.

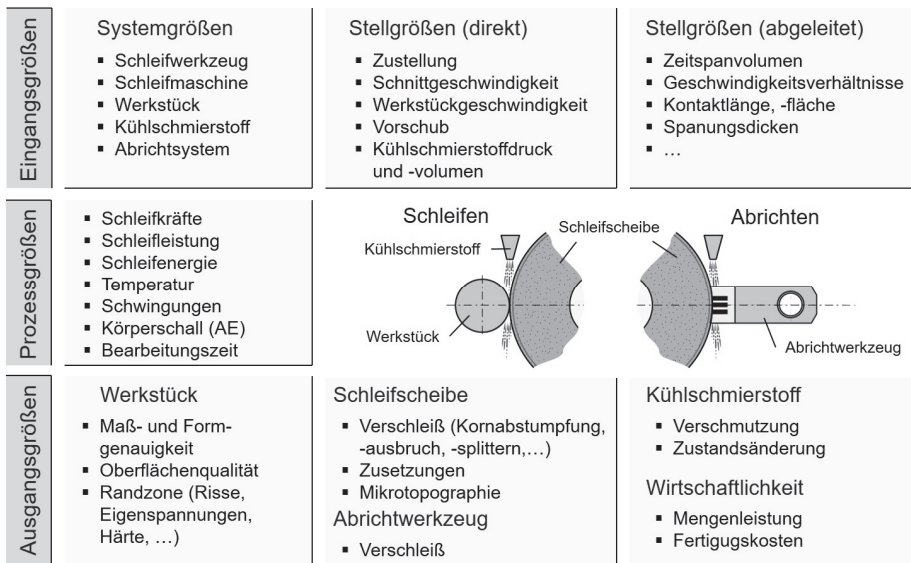


Bild 1.3 Der Schleifprozess und seine Kenngrößen

Die Leistungsfähigkeit des Schleifwerkzeugs selbst wird nicht nur durch seinen Aufbau (Kornart, Bindung, Struktur/Gefüge) bestimmt, sondern ebenfalls durch die Einsatzvorbereitung. Die einzelnen Schleifkörner können während des Prozesses brechen, abstumpfen, splintern, oder die Porenräume können durch Werkstoffreste zugesetzt werden. Damit ändert sich das Prozessverhalten. Um für die entsprechende Bearbeitungsaufgabe stets eine schnittfreudige Schleifscheibe mit entsprechendem Profil zur Verfügung zu haben, müssen die meisten Schleifscheiben in regelmäßigen Abständen auf den Schleifprozess „vorbereitet“ werden. Daher kommt bei vielen Schleifprozessen noch mindestens ein weiterer Prozessschritt

zum Tragen: das **Abrichten** (genauer, aber weniger gebräuchlich das **Konditionieren**), d.h. die Schleifscheibe wird für den Schleifprozess vorbereitet. Durch diesen zusätzlichen Prozessschritt werden die Geometrie und Schnittfreudigkeit der Schleifscheibe wiederhergestellt.

In den meisten Fällen werden Werkstoff und Geometrie eines Bauteils von der **Konstruktion und Entwicklung** festgelegt, um ein gewünschte Funktionseigenschaft zu erreichen. Dabei muss die Konstruktion eines technischen Produktes (Maschine, Anlage, Apparat, Gerät, Bauteil) bereits so ausgeführt sein, dass seine Fertigung möglich ist. Das Arbeitsergebnis der Konstruktion sind die für die Fertigung nötigen Unterlagen, d.h. i.d.R. die technischen Zeichnungen mit Angaben zum Werkstoff und den Gestaltungsmaßen mit den geforderten Qualitätsvorgaben wie Toleranzen, Maß-, Form- und Lagetoleranzen, Rauheiten und ggf. Randzoneneigenschaften wie Angaben zu Eigenspannungen.

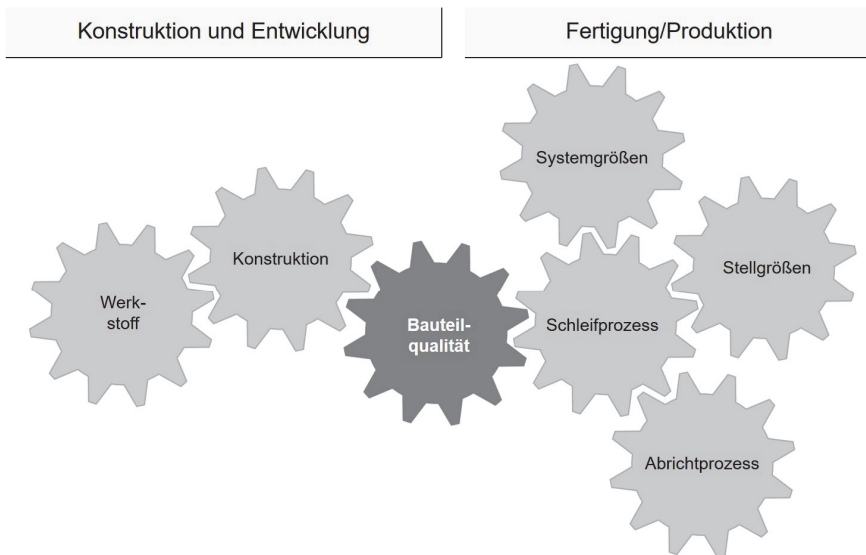


Bild 1.4 Parameter zur Optimierung des Schleifprozesses

Die zentrale Aufgabe der **Fertigung** ist es, die in der Werkstückzeichnung definierten Qualitätsvorgaben unter wirtschaftlichen Aspekten herzustellen. Jeder Fertigungsprozess wird dabei durch die Stell- und Systemgrößen und zusätzlich durch Prozessstörungen beeinflusst. Äußerst komplex sind diese Zusammenhänge bei dem Fertigungsverfahren Schleifen, da oft schwer zu bearbeitende Werkstoffe mit

einer i.d.R. hohen Härte und hohen Qualitätsvorgaben zu bearbeiten sind. Das Zusammenspiel zwischen Maschine, Kühlschmierstoff (KSS), Schleifscheibe und dem Abrichtprozess mit seiner Vielzahl an Stell- und Systemgrößen führt zu einer Komplexität, die so hoch ist, dass bislang keine Simulation in der Lage war, die Vorgänge beim Schleifen auch nur halbwegs vollständig und realitätsnah zu beschreiben¹⁸.

Bild 1.4 verdeutlicht die hohe Komplexität des Schleifens. Bereits kleine Veränderungen der Stellgrößen, aber auch Änderungen der Systemgrößen beeinflussen den Schleifprozess und damit die Bauteilqualität. Zusätzlich sind viele Schleifprozesse auf einen weiteren Prozess – den Abrichtprozess – angewiesen, womit die Anzahl der Parameter des Gesamtprozesses noch einmal deutlich steigt. In den meisten Fällen ist eine optimale Prozessführung nur durch das Zusammenspiel zwischen den am Prozess beteiligten Personen aus den Bereichen Maschine und Werkzeug erreichbar.

Um die Komplexität des Schleifens noch weiter zu verdeutlichen, verknüpft Bild 1.5 die wesentlichen Wechselwirkungen des Prozesses schematisch am Beispiel eines Bauteils, dessen Rauheit im Schleifprozess verbessert werden soll (*Rz geringer*). Da die Schleifscheibentopographie und die damit verbundene Spanbildung letztlich die Oberflächenqualität des Werkstücks beeinflusst, kann die bessere Rauheit am Werkstück nur durch eine „*feinere Schleifscheibenmikrostruktur*“ erreicht werden. Um dies zu erreichen, können eine feinere Schleifscheibe (\Rightarrow Systemgröße), veränderte Abrichtbedingungen (\Rightarrow Stellgröße) oder angepasste Schleifbedingungen (\Rightarrow veränderte Stellgrößen) verwendet werden.

Bei unveränderter Wirtschaftlichkeit führt eine feine Mikrostruktur der Schleifscheibe jedoch i.d.R. zu größeren Schleifkräften. Infolge der höheren Reibung während der Spanbildung entstehen größere Prozesstemperaturen, die durch die wirkenden Kräfte, Leistungen und Energieumsetzungen hervorgerufen werden. Die erhöhten Temperaturen können wiederum Gefügeschädigungen hervorrufen und Zugeigenspannungen im oberflächennahen Bereich der bearbeiteten Oberfläche auslösen. Im Extremfall kann es zu Rissen oder Oberflächenverfärbungen (Schleifbrand) des Bauteils kommen. Aber auch schon nicht-sichtbare Veränderungen in Form von veränderten Spannungszuständen in unmittelbarer Nähe der bearbeiteten Oberfläche können negative Auswirkungen auf das Festigkeitsverhalten des Bauteils haben. Diese als **Randzonenbeeinflussung** (s. Kap. 1.8.3) bezeichneten Zustände beschreiben die Werkstoffeigenschaften unterhalb der Oberfläche und

¹⁸ vgl. Paul 1994

sind durch Gefüge-, Härte-, Versetzungsdichte- und Eigenspannungsveränderungen, im Extremfall auch durch Rissbildung, gekennzeichnet.

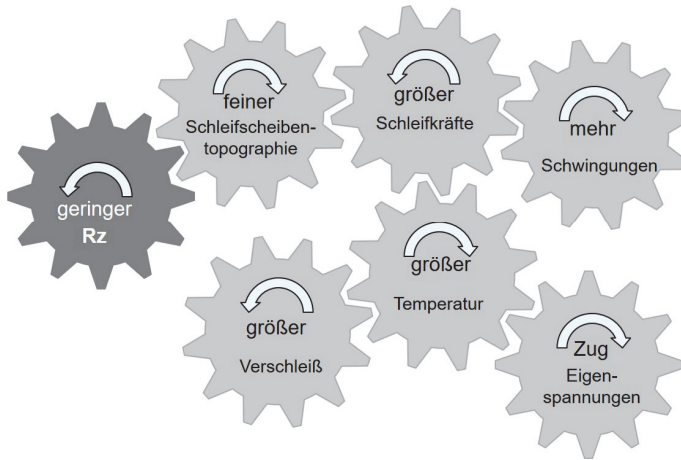


Bild 1.5 Wechselwirkungen beim Schleifen

Die thermischen und mechanischen Belastungen führen i.d.R. zu einem erhöhten Verschleiß am Schleifwerkzeug durch Kornausbruch, -abrieb, -abstumpfung oder Zusetzung, womit die Wirtschaftlichkeit negativ beeinflusst wird. Die veränderte Schleifscheibentopographie bedingt mechanische, thermische und dynamische Rückkopplungseffekte, die in Abhängigkeit der Maschinen- und Bauteilsteifigkeit ihrerseits auch wieder das Schleifergebnis beeinflussen. Ziel ist es daher, alle System-, Stell- und Prozessgrößen beim Schleifen so zusammenwirken zu lassen, dass sich ein stationäres Prozessverhalten einstellt, das unter den gegebenen Randbedingungen optimale Resultate in Bezug auf Bauteilqualität, Mengenleistung und Prozesskosten erzielt.

Wenn dieser Zustand erreicht und eingestellt ist, ist **das Schleifen ein grundsätzlich sehr „robuster“, reproduzierbarer Fertigungsprozess**. Sind die Randbedingungen zum Erzeugen einer gewünschten Qualität in einem Schleifprozess einmal definiert und lassen sich diese über einen längeren Zeitraum reproduzierbar einhalten (durch z.B. reproduzierbare Systemgrößen wie Schleifwerkzeug, Abrichtwerkzeug, Kühlschmierbedingungen usw.), hat das Schleifen im Bereich der Serienfertigung gegenüber vielen anderen Hartbearbeitungsprozessen große Vorteile.

1.4 Systemgrößen des Schleifprozesses

Als Systemgrößen werden die „nicht-direkt-veränderbaren“ Eingangsgrößen eines Schleifprozesses definiert: sie sind „vom System vorgegeben“. Dazu gehören i.d.R. die Schleifscheibe, die Schleifmaschine, das Werkstück mit der entsprechenden Werkstückaufnahme, der Kühlschmierstoff mit der entsprechenden Aufbereitung und den Düsensystemen sowie das auf der Maschine installierte Abrichtsystem.

1.4.1 Schleifscheiben

Das zentrale Element in einem Schleifprozess bildet die Schleifscheibe. Im Zusammenhang mit einer Prozessauslegung ist die Ausführung der Schleifscheibe mit ihrem Schleifmittel und der Bindung aber auch dem Grundkörper zu definieren. Diese Entscheidung kann in vielen Fällen nicht ohne Kenntnis der Maschine erfolgen. Die Systemgrößen Antriebsleistung, Spindeldrehzahl, Kühlschmierstoff, Steifigkeit usw. lassen nicht alle möglichen Konstellationen zu und schränken die möglichen Schleifscheibensysteme ein. Grundsätzlich ist die Entscheidung zu treffen, ob der Prozess mit abrichtbarer oder nicht-abrichtbarer Schleifscheibe betrieben werden soll (s. Bild 1.6).

Bei den **nicht-abrichtbaren Schleifscheiben** handelt es sich um Werkzeuge mit einem einschichtigen Belag aus CBN oder Diamant. Der Werkstoffabtrag und die Erzeugung der geforderten Profilgeometrie des Werkstücks erfolgt nur mit einer Lage Schleifkorn. Das Werkzeug, mit dem sich auch komplexe Profile erzeugen lassen, ist nur durch einen Schleifbelagwechsel durch den Werkzeughersteller regenerierbar. Die Prozessführung ist somit eingeschränkt und nur durch Änderungen der Stellgrößen (wie Schnittgeschwindigkeit oder Zustellung) zu beeinflussen. Da die Werkzeuge geometriengebunden vom Werkzeuglieferanten geliefert werden, kann im Prozess selbst kein Einfluss auf die entstehende Geometrie des Werkstücks genommen werden. Daher sind diese Werkzeuge häufig in der Serienfertigung (z.B. Zahnrad- oder Ventulfertigung) anzutreffen.

Die **abrichtbaren Schleifscheiben** lassen sich in zwei Kategorien unterteilen:

Konventionelle Schleifscheiben bestehen aus i.d.R. Korunde- oder Siliciumcarbidgekörnern, die mittels verschiedener Bindungen zu einem Volumenkörper gebunden werden. Bis auf den durch den Flansch abgedeckten Teil der Scheibe kann das gesamte Schleifscheibenvolumen genutzt werden. Da konventionelle Schneidstoffe einen erhöhten Verschleiß unterliegen, muss der aktive Schleifbereich in regelmäßigen Abständen **abgerichtet** werden (strenggenommen: **konditioniert**). Damit verliert die Schleifscheibe an Durchmesser, sodass die Maschinensteuerung

diesen Verlust entsprechend kompensieren muss. Der Aufbau von konventionellen Schleifscheiben wird in Kap. 2, die verschiedenen Arten der Einsatzvorbereitung (das Abrichten) in Kap. 4 behandelt.

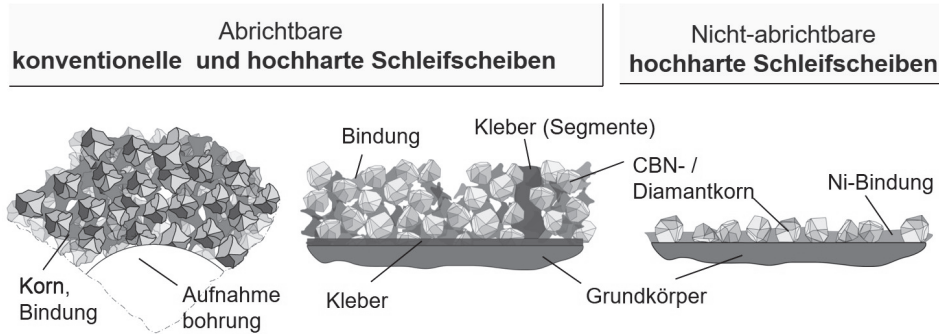


Bild 1.6 Abrichtbare und nicht-abrichtbare Schleifscheiben

Hochharte Schleifscheiben (engl. *super abrasives*) nutzen für die Stahlbearbeitung CBN (kubisches Bornitrid) und für die Bearbeitung von Nichteisenmetallen (Hartmetall, Keramik, Glas...) Diamant. Der Schleifbelag von einigen Millimetern Dicke ist i.d.R. auf einen Grundkörper geklebt. Auch diese Werkzeuge unterliegen einem Verschleiß und müssen daher in regelmäßigen Abständen abgerichtet bzw. profiliert werden. Hochharte Schleifscheiben lassen sich auch in einer einschichtigen Variante herstellen. Diese als *galvanische Schleifscheiben* bezeichneten Werkzeuge nutzen nur eine Kornlage CBN oder Diamant und können daher in ihrer Geometrie nicht verändert werden. Sie zählen zu den nicht-abrichtbaren Schleifscheiben.

Durch die Art des Schleifmittels ist die Prozessführung bereits in weiten Teilen vorgegeben. Durch den Schleifscheibenverschleiß und dem damit notwendigen Abrichtprozess wird die Schleifscheibe kontinuierlich kleiner. Damit wiederum verändern sich die Kontaktbedingungen zwischen Werkzeug und Werkstück.

Die Kontaktverhältnisse zwischen Schleifwerkzeug und Werkstück werden neben den Stellgrößen Zustellung bzw. Vorschub auch von der Geometrie des Werkstücks (außenrund, innenrund oder flach) und besonders von dem Durchmesser des Schleifwerkzeugs bestimmt.

Insbesondere auf Maschinen, die keine v_c -konstant-Regelung haben, sondern mit einer festen Schleifscheibendrehzahl arbeiten, ist die Änderung des Schleifscheibendurchmessers während einer Schleifperiode zu beachten, da sich damit eine

Reihe abgeleiteter Stellgrößen ändern und dies Auswirkungen auf den Prozessverlauf hat.

Für eine störungsfreie Bearbeitung ist es erforderlich, die schnelllaufende Schleifscheibe zusammen mit ihrem Flansch zu wuchten. Eine **Unwucht** tritt bei jedem rotierenden Körper auf, dessen Rotationsachse nicht mit der Hauptträgheitsachse übereinstimmt. Es können Schwingungen auftreten, die den regulären Prozessablauf negativ beeinflussen. Zusätzlich zur Unwucht ist auch die **Exzentrizität**, d.h. der Rundlauf der Schleifscheibe von großer Bedeutung.

1.4.2 Schleifmaschine

Eine der komplexesten Systemgrößen ist die Schleifmaschine selbst, die durch ihre Haupt- und Achsantriebe, Führungssysteme, Abmaße des Arbeitsraumes, Spannsysteme, Kühlschmierstoffversorgung, Einhausung usw. definiert wird. Wichtige Kenngrößen einer Schleifmaschine sind die Antriebsleistung und -drehzahl, Verfahrensgeschwindigkeiten, Zustellgenauigkeiten, Steifigkeiten in den Achsen, Anordnung und Art der Abrichteinheit usw. Da weitere Ausführungen den Umfang dieses Buches sprengen würden, wird an dieser Stelle auf weiterführende Literatur von z.B. *Brecher*¹⁹, *Oppelt*^{20,21}, *Lierse*²², *Fiebelkorn*²³, *Otto*²⁴, *Reichel*²⁵, *Lang u. Salje*²⁶, *Schriefer*²⁷ verwiesen.

1.4.3 Werkstückaufnahme

Jedes zu schleifende Werkstück muss während der Bearbeitung festgehalten werden. Für die unterschiedlichen Schleifanwendungen gibt es eine Vielzahl an Spannmöglichkeiten bzw. Werkstückaufnahmen, die sich nach der Art der Betätigung unterscheiden (s. auch *Corsico*²⁸).

¹⁹ Brecher 2019, S. 185ff

²⁰ Oppelt 2014, S. 600ff

²¹ Oppelt 2015, S. 655ff

²² Lierse 2015, S. 630ff

²³ Fiebelkorn 2014, S. 620ff

²⁴ Otto 2014, S. 643ff

²⁵ Reichel 2014 S. 665ff

²⁶ Lang u. Salje 1989, S. 93ff

²⁷ Schriefer 2008

²⁸ Corsico 2014, S. 590ff

Runde, kegelige Werkstücke lassen sich mittels **passiver Mitnehmer** in Form von flachen Kegelwinkeln, die durch Reib- und Formschluss eine Selbsthemmung zwischen Werkstück und Aufnahme erzeugen, spannen (s. Bild 1.7).

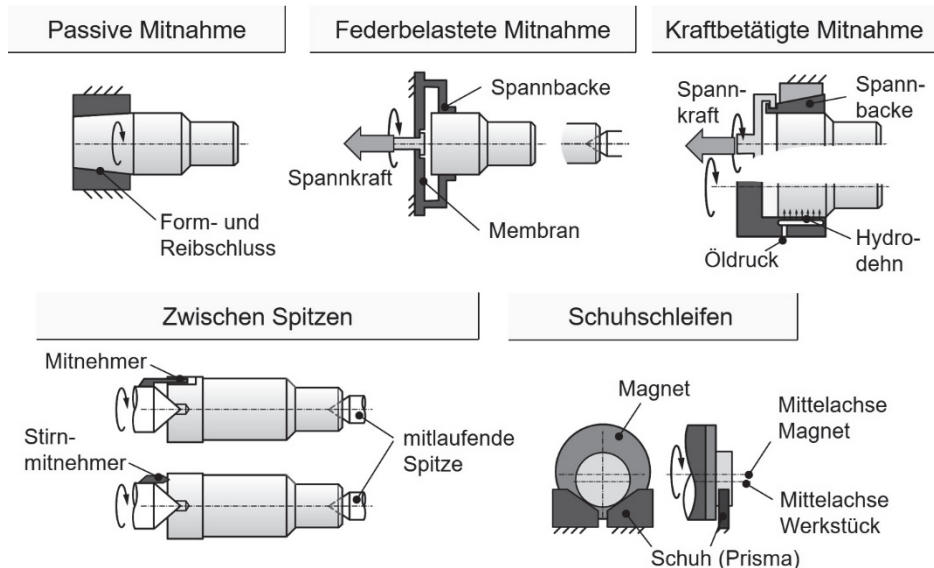


Bild 1.7 Spannen runder Werkstücke

Federbelastete Spannmittel erzeugen durch eine permanente Lastwirkung einen Mitnahmeeffekt. Spannzangen oder Hydrodehnspannfutter sind **manuell selbsthemmende oder kraftbetätigte Spannmittel**. Beim **Spannen kurzer Werkstücke** bis zu einem Verhältnis $L/D < 3$ reicht häufig eine **einseitige (fliegende) Einspannung** aus. Da die zu bearbeitenden Werkstücke in den meisten Fällen keinen **Spannkegel** aufweisen, werden zylindrische Wellen häufig feder- oder kraftbelastet mit **Membranfedern, Spannhülsen** oder **Hydrodehnelementen** gespannt. Werkstücke mit einem Verhältnis $L/D > 3$ sollten zusätzlich mittels **Zentrierspitze** über den Reitstock abgestützt werden. Sofern der gesamte Durchmesserbereich bearbeitet werden soll, oder um bestmögliche Umspannergebnisse zu erhalten, ist die **Bearbeitung zwischen Spitzen** möglich, wobei die angetriebene Spitze in den meisten Fällen einen Mitnehmer aufweist. Für sehr lange, schlanke Bauteile ($L/D > 10$) werden zusätzlich **Lünetten** eingesetzt, die ein Durchbiegen des Werkstücks durch das Eigengewicht bzw. die Bearbeitungskräfte verhindern.

Eine Variante der Spitzenlosbearbeitung ist das **Schuhschleifen**, bei dem die

Werkstücke auf Prismen geführt und mittels einer Magnetspannung am axialen Wandern gehindert werden. Damit lassen sich besonders gute Rundheiten (Innen- und Außenbearbeitung) erreichen. Weiterhin wird auch die **Magnetspannung** über die Planfläche des Werkstücks eingesetzt, sofern die Werkstückgewichte und die Anlageflächen dies erlauben.²⁹

Prismatische Werkstücke für eine Plan- oder Profilschleifbearbeitung werden vielfach auf Permanent- und/oder Elektro-Magnet-Spannplatten fixiert. Beim Einsatz der Magnetspannung für dünnwandige und filigrane Werkstücke ist auf das Verbiegen infolge der Magnetkraft zu achten (Rückfederungseffekt). Sehr komplexe Werkstücke können für die Bearbeitung auch in aushärtende Kunststoffe oder niedrigschmelzende Metallegierungen eingossen werden.

1.4.4 Kühlschmierstoff, -reinigung, -zuführung

Die *primären Aufgaben* von Kühlschmierstoffen sind³⁰:

- Reduzierung der Reibung zwischen der Schleifscheibe (Schleifkorn und Bindung) und dem Werkstück
- Kühlung der Kontaktzone und der Werkstückoberfläche

Zusätzlich müssen durch den Kühlschmierstoff folgende weitere *sekundäre Aufgaben* übernommen werden:

- die Späne aus der Kontaktzone transportieren
- die Schleifscheibe und das Werkstück reinigen
- die Maschine und das Werkstück gegen Korrosion schützen

Grundsätzlich lassen sich die Kühlschmierstoffe in die drei Gruppen nicht-wassermischbar, wassermischbar und wassergemischt gliedern. Nach DIN 51385 werden die Kühlschmierstoffe in einer Reihe Untergruppen geführt.^{31,32}

In vielen Schleifanwendungen kommen wassermischbare Kühlschmierstoffe wie Emulsionen oder Lösungen zum Einsatz, die neben einer guten Schmierwirkung den Prozess auch sehr gut kühlen. Zudem sind Verwirbelungen bzw. die zerstäubten Nebel von Emulsionen und Lösungen nicht brennbar bzw. explosiv. Sicherheitsvorrichtungen an der Maschine sind damit nicht erforderlich.

²⁹ Fiebelkorn 2014, S. 637

³⁰ vgl. z.B. Klocke 2018, S. 119ff

³¹ siehe dazu auch z.B. Meister 2011, S. 295ff

³² siehe dazu auch Heinzel 1999

Kühlschmierlösungen sind aus Wasser und einer bis zu 10%-igen, mineralölfreien, vollsynthetischen Konzentraten aus z.B. Polymeren und Salzen gemischt. Da keine Emulgatoren eingesetzt werden müssen, tritt eine Schaumbildung kaum auf. Wegen der schlechten Schmierwirkung werden die Konzentrate i.d.R. zusätzlich mit entsprechenden Additiven angereichert. Die im Vergleich zu Emulsionen teuren Kühlschmierlösungen sind deutlich langlebiger und bei entsprechender Reinigung von Fremdölverschmutzungen weniger anfällig gegen Schimmel-, Bakterien- und Pilzbildung.³³

Kühlschmieremulsionen sind 3,5 bis 10%-ige Mischungen eines emulgierbaren, ölhaltigen und häufig additvierten Konzentrats mit Wasser. Der Ölanteil im Konzentrat kann zwischen 10 und 80% liegen, womit sich die Schmierwirkung besser an den Prozess anpassen lässt als bei Lösungen. Allerdings neigen Emulsionen zur Schaumentwicklung und sind bei ungenügender Wartung anfällig für einen Bakterien-, Schimmel- und Pilzbefall. Trotz einer notwendigen regelmäßigen (wöchentlichen) Kontrolle der Konzentration und des pH-Wertes beträgt die Lebensdauer einer Emulsion i.d.R. nur ca. 3 bis 6 Wochen.³⁴

Hochleistungsschleifprozesse nutzen heute außerdem **Schleiföle** auf Basis additviertes Mineralöle oder nativer Esteröle. Schwefel- und Chlorverbindungen sowie andere Additive verbessern die Schmierung des Grundöls und reduzieren den Werkzeugverschleiß. Diese niedrigviskosen Öle haben grundsätzlich eine geringere Kühlwirkung als wasserbasierte Kühlschmierstoffe, sind aber in vielen Fällen technologisch überlegen und durch ihre lange Lebensdauer sehr wirtschaftlich.

Schleifprozesse mit CBN- oder Sinterkorund-Schleifscheiben bei Schnittgeschwindigkeiten $v_s > 80$ m/s werden heute häufig mit stark legierten (additvierten) Schleifölen auf vollgekapselten Schleifmaschinen realisiert, die wegen der Brandgefahr über entsprechende Explosionsklappen und Feuerlöscheinrichtungen verfügen müssen.

Da die Kühlschmierstoffe in einem Kreislaufsystem arbeiten, hat die **Kühlschmierstoff-Reinigung** bei allen Schleifprozessen eine große Bedeutung³⁵. Für die Reinigung des aus der Schleifzone rückfließenden Kühlschmierstoffs stehen unterschiedliche Anschwemm-, Band-, Zentrifugenfilter und für ferromagnetische Späne Magnetabscheider zur Verfügung. Das Reinigen des mit Schleifspänen verunreinigten Kühlschmierstoffs kostet Zeit, sodass das Gesamtkühlschmierstoffvolumen ausreichend dimensioniert sein muss. Viele Einzelanlagen benötigen Kühl-

³³ Klocke 2018, S. 126

³⁴ Klocke 2018, S. 124ff

³⁵ Klocke 2018, S. 136ff

schmierstoffvolumina von 2 bis 4 m³, um eine ausreichende Kühlschmierstoffversorgung in der Schleif- und Abrichtzone zu gewährleisten. Insbesondere bei hochgenauen Schleifanwendungen ist eine exakte Temperierung des Kühlschmierstoffs auf wenige Zehntel °C durch spezielle Kühlaggregate erforderlich, um den Wärmegang der Maschine zu stabilisieren.

Mit der Weiterentwicklung der Hochleistungsschleifprozesse ist die Art der **Kühlschmierdüsen** und die Dimensionierung der Pumpen immer wichtiger geworden. Neben Rund-, Flachsitz- oder Formdüsen sind heute Kammer- bzw. Schuh- und Nadeldüsen im Einsatz, die im Hinblick auf die Strömungseigenschaften an die jeweilige Bearbeitungsaufgabe angepasst sind³⁶. Bei hohen Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeiten bis $v_s = 120$ m/s müssen die Systemdrücke je nach Anwendung bis 80 bar ausgelegt werden, sodass die Kühlschmier-Pumpen häufig Antriebsleistungen von bis zu 25 kW aufweisen.

1.4.5 Abrichtsystem

Alle Schleifanwendungen mit abrichtbaren Schleifscheiben benötigen den zusätzlichen Prozess „**Abrichten**“, um die verschlissene Schleifscheibe zu regenerieren, d.h. in regelmäßigen Abständen in einen schnittfreudigen Zustand zu überführen, und die Geometrie des Schleifbelags zu erneuern. Wie in späteren Kapiteln detailliert beschrieben wird, gibt es eine Reihe unterschiedlicher Abrichtverfahren, die i.d.R. Diamantwerkzeuge nutzen. Mithilfe des Diamantwerkzeuges wird die Mikro- und Makrostruktur der Schleifscheibe wiederhergestellt, um die geforderten Qualitäten am Werkstück kontinuierlich zu erzeugen. Im einfachsten Fall wird der Abrichtprozess mit einem stehenden, einschneidigen Diamantwerkzeug ausgeführt. Damit ist das Abrichtsystem relativ einfach aufgebaut: im Maschinenraum befindet sich an geeigneter Stelle ein **Abrichterhalter**. Diese Aufnahmen sind häufig durch den Maschinenhersteller definiert, sodass es eine Vielzahl verschiedener Halter auf dem Markt gibt. Als Standard kann der Morsekegel (MK0, MK1) oder der zylindrische Schaft (z.B. $\varnothing 8$ mm oder $\varnothing 10$ mm) angesehen werden. Es gibt jedoch auch nach Maschinenherstellern benannte Systeme, die z.B. einen Kegel verwenden. Abrichtplatten werden häufig in Schwenk- und Wechselhalter gespannt, die dann in die zylindrische oder Morsekegelaufnahme im Maschinenraum eingebracht werden. Bei einem Werkzeugwechsel ist auf die exakte Ausrichtung des Abrichtwerkzeugs zu achten.³⁷

³⁶ z.B. Montandon 2018

³⁷ VDI 3392-1

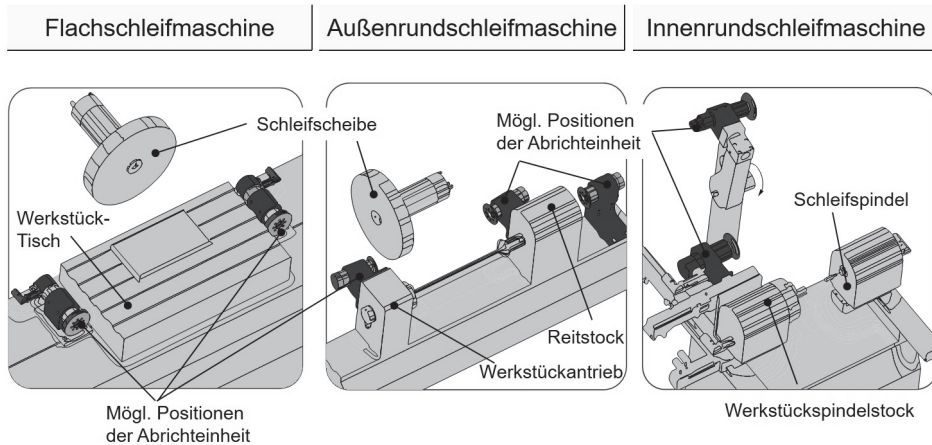


Bild 1.8 Unterschiedliche Positionen von Abrichtspindeln auf einer Flach-, Außenrund- und Innenrundsleifmaschine

Andere Abrichtverfahren nutzen rotierende Diamantwerkzeuge (Form- oder Profilrolle). Um diese Werkzeuge mit definierten Drehzahlen rotieren lassen zu können, werden **Abrichtspindeln** eingesetzt, die sich entsprechend der Anwendung in ihrer Dimensionierung unterscheiden. Da die Umfangsgeschwindigkeit des Abrichtwerkzeugs v_d als Stellgröße des Abrichtprozesses aufzufassen ist, müssen die Drehzahlen in vielen Fällen sehr genau regelbar sein, um gewünschte Effekte an der Schleifscheibe zu erzielen. Während des Kontaktes zwischen Schleifscheibe und Abrichter treten Abrichtkräfte sowohl in radialer als auch in tangentialer Richtung auf. Sie können bei einigen Prozessen durch Kräfte in Achsrichtung des Abrichtwerkzeuges ergänzt werden. Die Abrichtkräfte sind in vielen Fällen ein wichtiges Kriterium für die Dimensionierung eines Abrichtspindelnsystems. Sehr häufig werden zusätzliche Sensoren in den Spindelnsystemen verbaut, die zur Erkennung des Kontaktes zwischen Schleifscheibe und Abrichtwerkzeug (AE-Sensoren - Acoustic Emission) sowie zur Überwachung von Temperatur- oder Drehzahlsschwankungen genutzt werden. Für die unterschiedlichen Abrichtaufgaben mit Formrolle stehen heute direkt angetriebene Abrichtspindeln mit Drehzahlen bis $n_d = 60.000$ U/min und Antriebsleistungen bis $P_c = 1,5$ kW zur Verfügung. Abrichtspindelnsysteme für Profilrollen haben häufig eine beidseitige Lagerung und werden über einen externen Motor und einen Riemen angetrieben.³⁸

³⁸ Kaiser 2012

Die **Abrichtspindel- bzw. Abrichterhalterposition** kann sehr unterschiedlich ausfallen und ist i.d.R. vom Maschinenhersteller für das entsprechende Maschinenkonzept festgelegt. Bild 1.8 zeigt für eine Plan-, Außenrund- und Innenrundmaschine mögliche Spindelpositionen (die genauso auch für stehende Abrichterhalter gelten). Bei einer Flachsleifmaschine kann die Position auf dem Maschinentisch rechts oder links vom Werkstück angeordnet sein, beim CD-Abrichten jedoch auch oberhalb (bzw. auf der „Rückseite“) der Schleifscheibe³⁹. Gleiches gilt für Außenrundschleifmaschinen: auch hier kann die Abrichtspindel am Schleifspindel- oder am Werkstückspindelstock angeflanscht sein oder sich direkt auf dem Maschinenbett befinden. Im Beispiel für eine Innenrundschleifmaschine ist ebenfalls eine Befestigung am Werkstückspindelstock gezeigt, zusätzlich aber auch die Variante einer einschwenkbaren Spindel.

1.5 Direkte Stellgrößen des Schleifprozesses

Für die Auslegung von Schleifprozessen stehen eine Reihe von Stellgrößen zur Verfügung, die zum Teil große Wechselwirkungen untereinander besitzen. Die **direkten Stellgrößen** sind die an der Maschine einstellbaren Parameter, aus denen sich, in Verbindung mit den Systemgrößen des Prozesses, **abgeleitete Stellgrößen** ergeben.

Als **direkte Stellgrößen** lassen sich einerseits

- **Geschwindigkeiten** über die Drehzahl und den Durchmesser des rotierenden Werkzeugs oder andererseits
- **Vorschubgeschwindigkeiten** zwischen Werkzeug und Werkstück und
- **Weginformationen** wie Zustellungen in verschiedenen Richtungen an einer Maschine einstellen.

Bild 1.9 führt in die einzelnen Begrifflichkeiten zum Schleifen ein und gibt einen Überblick über den Schleifprozess am einfachen Beispiel des Flachsleifens. Die Schleifscheibe mit einem Durchmesser d_s erzeugt mit der Drehzahl n_s am Außendurchmesser eine Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit v_s . Durch die Zustellung (oder Schnitttiefe) a_e zusammen mit einer Werkstückvorschubbewegung in Form einer Werkstückgeschwindigkeit v_w wird der Werkstoff durch die einzelnen aktiven Schneiden zerspant. Die Späne verlassen die Kontaktzone und werden

³⁹ das CD-Abrichten ist in Bild 1.8 nicht dargestellt, siehe dafür z.B. Bild 3.7

durch den Kühlschmierstoff mitgenommen und aus dem Prozess entfernt. Weitere abgeleitete Größen sind die Eingriffsbreite a_p , der Spanungsquerschnitt A_w , die geometrische Kontaktlänge l_g und die Kontaktfläche A_k , die in den folgenden Kapiteln näher erläutert werden.

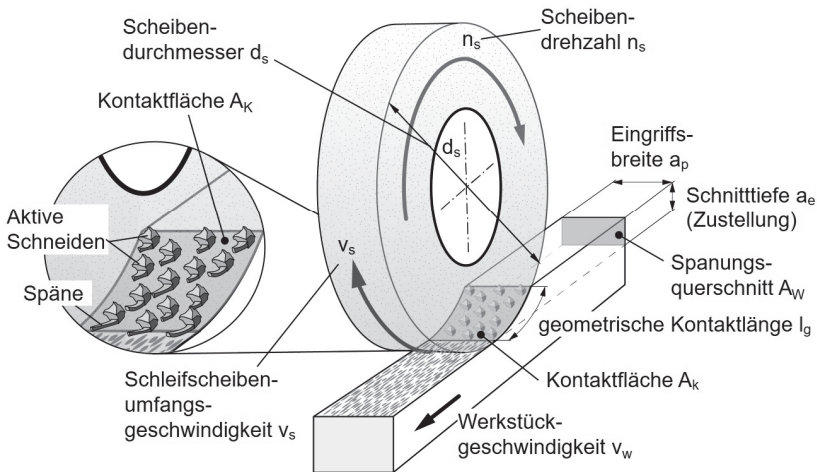


Bild 1.9 Wesentliche Stellgrößen am Beispiel eines Flachsleifprozesses

1.5.1 Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit

Die Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit v_s ergibt sich aus der Drehzahl der Schleifscheibe n_s und dem Schleifscheibendurchmesser d_s . Für eine *zylindrische Schleifscheibe*, wie in Bild 1.9 gilt:

$$v_s = \pi \cdot d_s \cdot n_s \quad \leftrightarrow \quad n_s = \frac{v_s}{\pi \cdot d_s} \quad (1-1)$$

Unter Berücksichtigung der Einheiten gilt in der Praxis häufig:

$$v_s = \frac{\pi \cdot d_s \text{ (in mm)} \cdot n_s \text{ (in } \frac{\text{U}}{\text{min}})}{1000 \cdot 60} \text{ (in m/s)} \quad (1-2)$$

Bei *profilierten Schleifscheiben* entstehen durch die Veränderungen des Scheibendurchmessers über der Profilbreite an jedem Punkt der Schleifscheibe andere Umfangsgeschwindigkeiten (s. Bild 1.10). Dies ist bei einer detaillierten Betrachtung der Stellgrößen eines Prozesses und der damit verbundenen Auswirkungen auf das Prozessverhalten unter Umständen zu berücksichtigen (siehe Kap. 1.6.5).

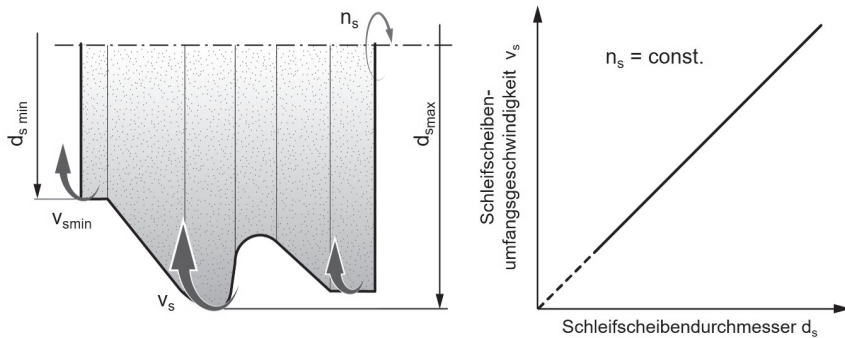


Bild 1.10 Ermittlung der Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit v_s bei profilierten Schleifscheiben

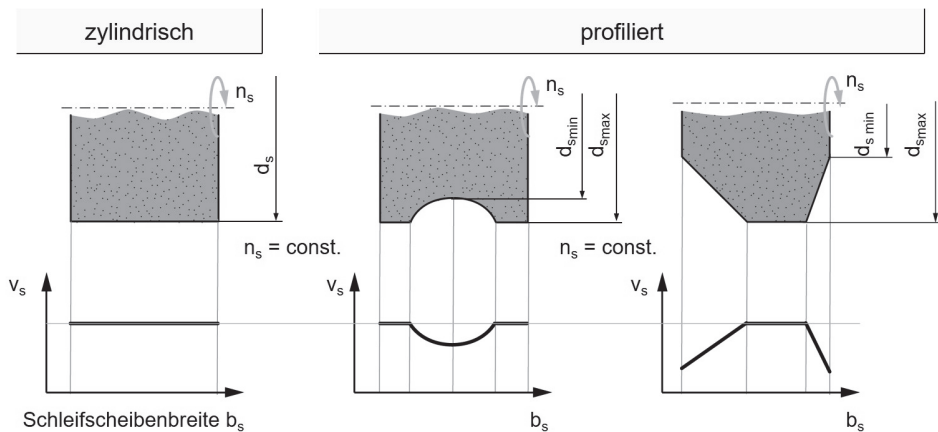


Bild 1.11 Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit v_s bei unterschiedlichen Schleifscheibenprofilen

Da die Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit eine wichtige direkte Stellgröße des Prozesses ist und zur Ermittlung abgeleiteter Stellgrößen herangezogen wird,