

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 offeneporige, konventionelle Schleifscheiben (z.B. EK-weiß).

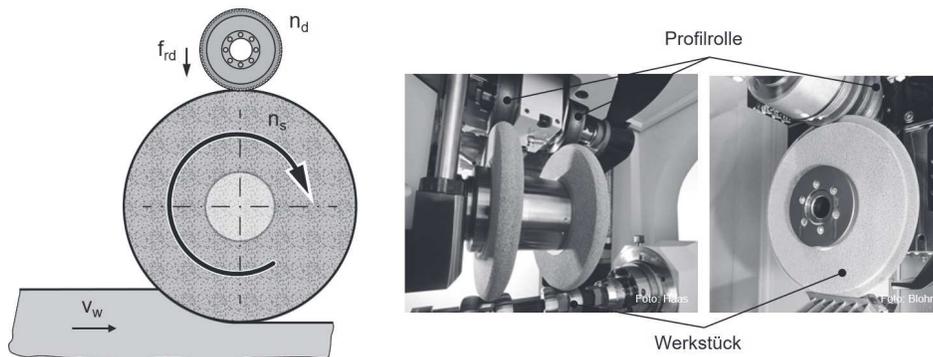


Bild 3.7 Kontinuierliches Abrichten (CD-Abrichten) während der Schleifbearbeitung (continuous dressing)

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.¹⁴⁰

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

Die Eingriffskinetik 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, Lagersringe, Sicherungsringe, Wälzkörper u.v.m..

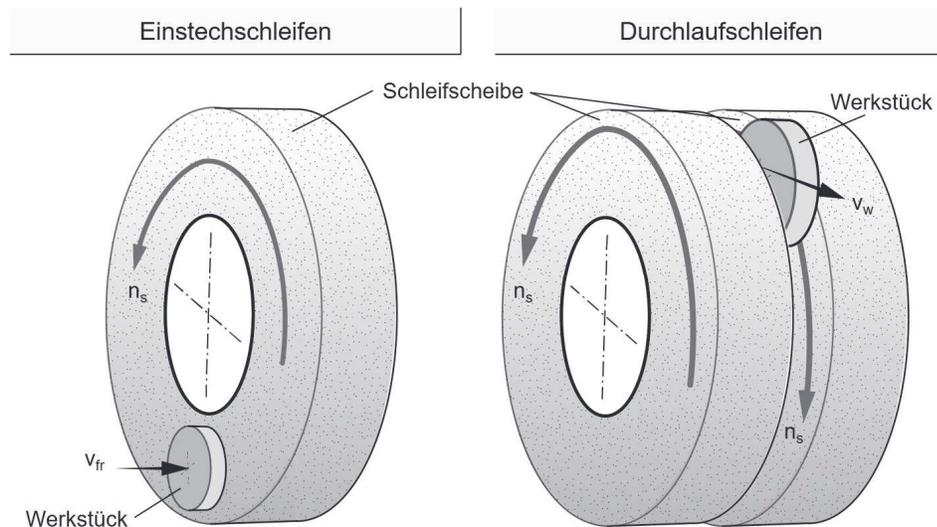


Bild 3.8 Quer-Seiten-Planschleifverfahren

¹⁴⁰ 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 zykloiden 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 $1 \mu\text{m}$ bei sehr hoher Ebenheit erreicht werden.¹⁴¹

¹⁴¹ Runkel 2008

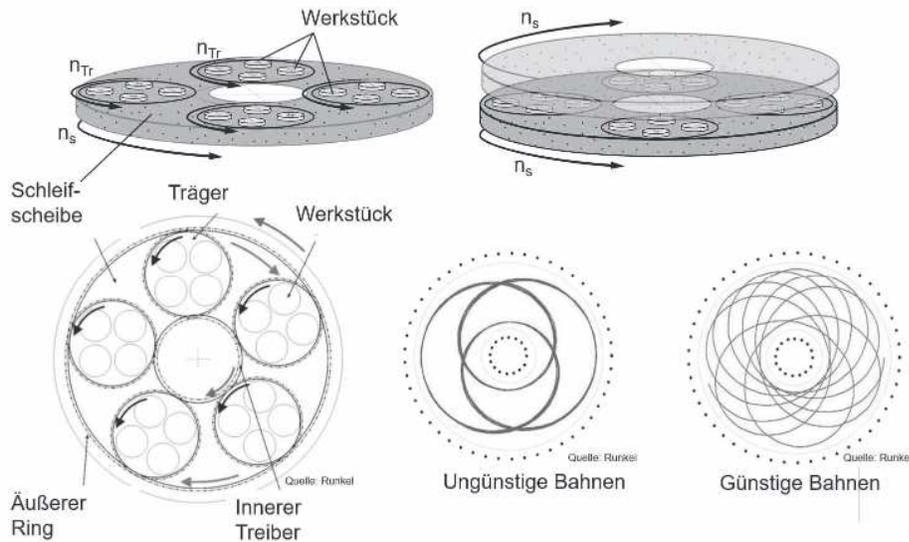


Bild 3.9 Doppelseitenplanschleifen mit Planetenkinematik

3.2 Außenrundscheifen

Rotationssymmetrische aber auch unsymmetrische, exzentrische, unrunde oder gewindeförmige Außenflächen lassen sich über das Außenrundscheifen bearbeiten. 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.

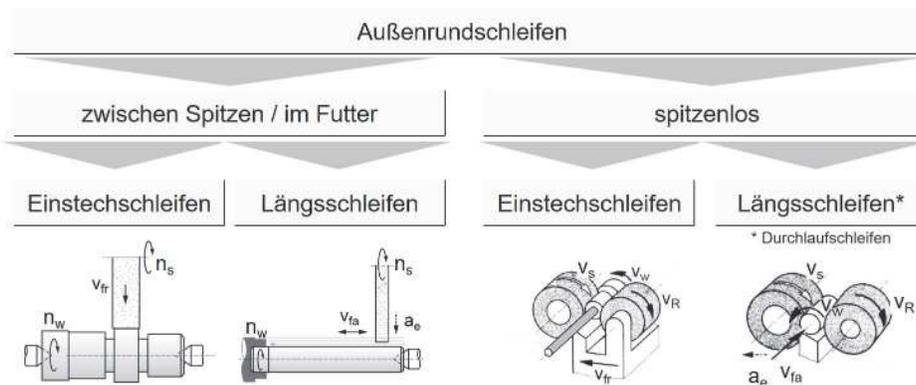


Bild 3.10 Außenrundscheifverfahren

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 .^{142,143,144}

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

¹⁴² Lierse 2015

¹⁴³ Klocke 2018, S. 191ff

¹⁴⁴ 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 Überschliff (Schäl-schliff) zerspannt. Wegen der hohen Schleifscheibenbelastung kommen bei der Stahlbearbeitung überwiegend CBN-Schleifscheiben zum Einsatz. Schmale Schleifscheiben erlauben die flexible Bearbeitung unterschiedlicher Werkstückkonturen.

Das „klassische“ **Längs-Außenrundscheifen** 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.

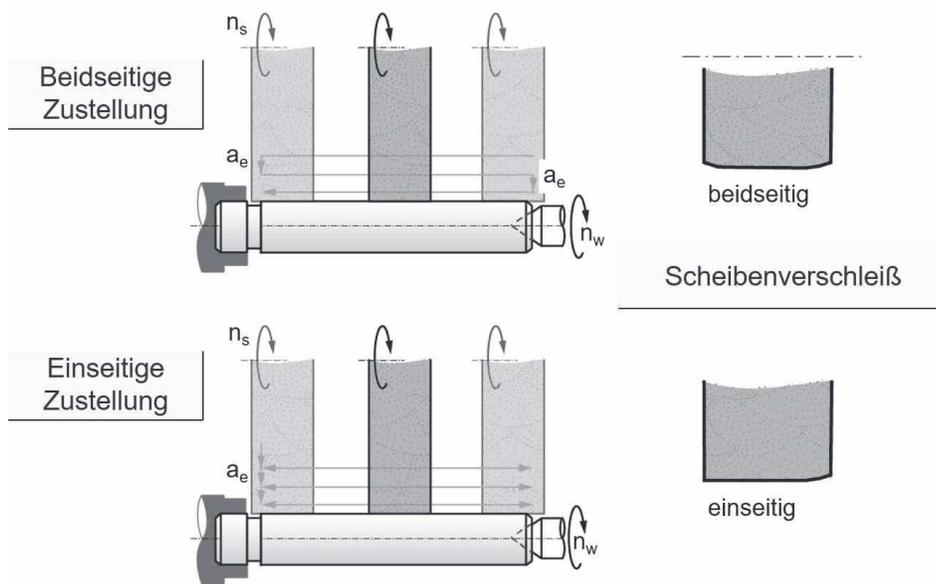


Bild 3.12 Schleifscheibenverschleiß durch ein- oder beidseitige Zustellung

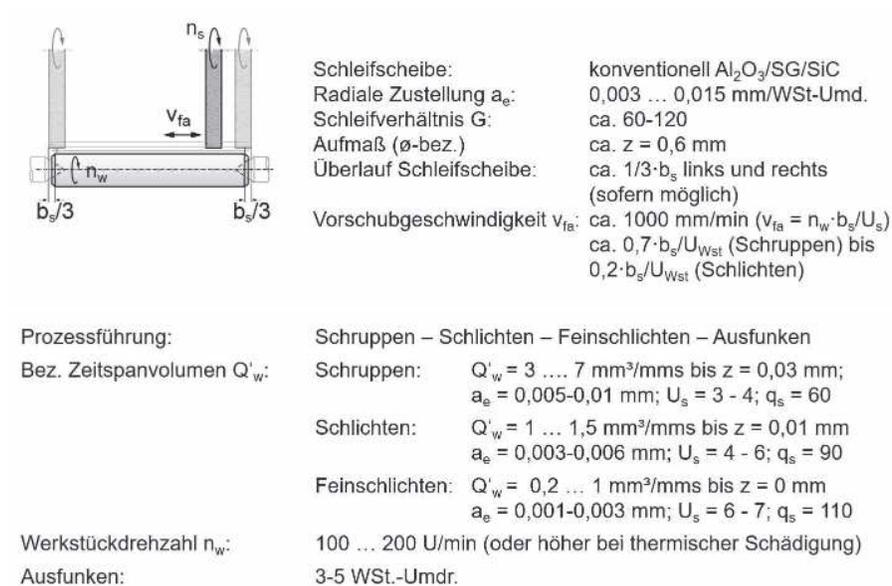


Bild 3.13 Typische Stellgrößen beim Längsschleifen mit konventionellen Schleifscheiben

Eine Verfahrensvariante ist das **Außenrund-Schälschleifen**, bei dem das gesamte Bearbeitungsaufmaß in einem Überschliff 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.^{145,146}

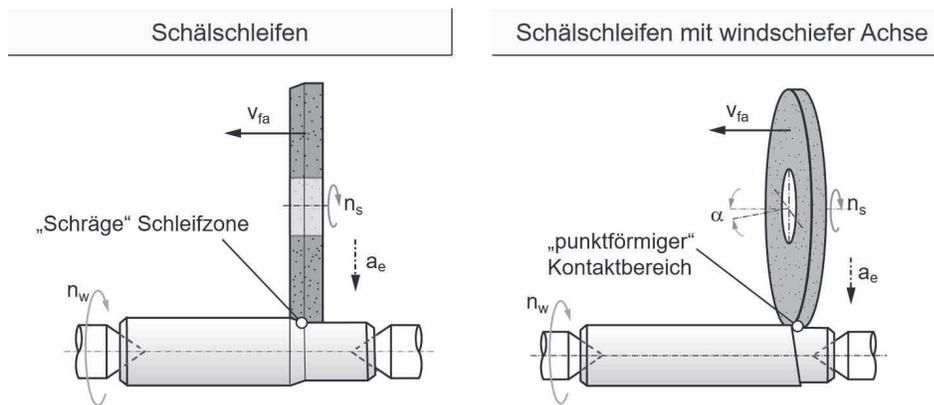


Bild 3.14 Schälschleifverfahren

Eine Sonderform stellt das **Schälschleifen mit windschiefer Achsanordnung** dar. Bei dieser auch als **„Quickpoint“-Verfahren**¹⁴⁷ 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

¹⁴⁵ Meister 2011, S. 442ff

¹⁴⁶ Hegener 1998

¹⁴⁷ *Quickpoint*-Schleifen ist eine Firmenbezeichnung der Fa. Junker

hohen Scheibenbelastung¹⁴⁸, 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.¹⁴⁹

Zur Bearbeitung eines Außendurchmessers und einer Planfläche (Schulter) wird das **Form-Schrägeneinstechschleifen** 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-Einstechschleifen** 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.¹⁵⁰

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-Einstechschleifen.

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.

¹⁴⁸ Klocke 2018, S. 201

¹⁴⁹ z.B. Fiebelkorn 2016, S. 633

¹⁵⁰ Lierse 2015

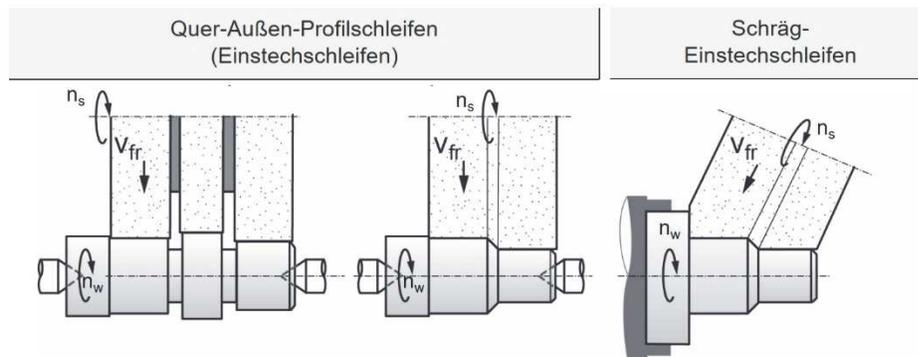
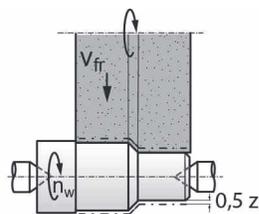


Bild 3.15 Einstechschleifen und Schräg-Einstechschleifen



Prozessführung:

Bez. Zeitspanvolumen Q'_w :

Schleifscheibe: konventionell $Al_2O_3/SG/SiC$
 Vorschubgeschwindigkeit v_{fr} : 0,35 ... 0,5 mm/min
 (konventionelle Maschinen)
 0,45 ... 0,7 mm/min
 (stabile Masch., CBN-Schl.)
 bzw. radialer Vorschub f_r : 0,003 ... 0,01 mm/WSt-Umd.
 Schleifgeschw.-verhältnis q_s : 60...90

Schuppen – Schichten – Feinschichten – Ausfunken

1,5 (Schichten) ... 8 (Leistungsschleifen) mm³/mms**Zielwert ca. 3,5 mm³/mms**

bei stabilen WSt: Schuppen: 1 ... 5 mm³/mms
 Schichten: 0,5 ... 1,5 mm³/mms
 Feinschichten: 0,1 ... 0,3 mm³/mms
 bei schlanken WSt: Schuppen: 0,5 ... 3 mm³/mms
 Schichten: 0,3 ... 0,7 mm³/mms
 Feinschichten: 0,05 ... 0,2 mm³/mms

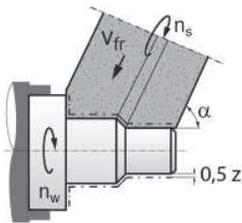
Ausfunken:

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° bis 30° 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	$z = 0,3 \text{ mm im } \varnothing$; 0,05mm Stirn
Einsteichwinkel:	ca. 60°
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.