

Schleifen ist keine Kunst sondern eine komplexe Technologie

Das Schleifen zählt zu den spanabhebenden Bearbeitungsverfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide. Hinter dem Begriff geometrisch unbestimmte Schneide verbirgt sich die Komplexität für die rechnerische Behandlung dieses Verfahrens. Der markante Unterschied in der Spanbildung zwischen geometrisch bestimmter und unbestimmter Schneide liegt in der Größe des Spanwinkels. Damit ist beim Schleifen die Normalkraft größer als die Schnittkraft. Außerdem kann die beim Ausschleifen des Spans über die Spanfläche entstehende Wärme beim Schleifen direkter in die Oberfläche des Werkstücks gelangen.

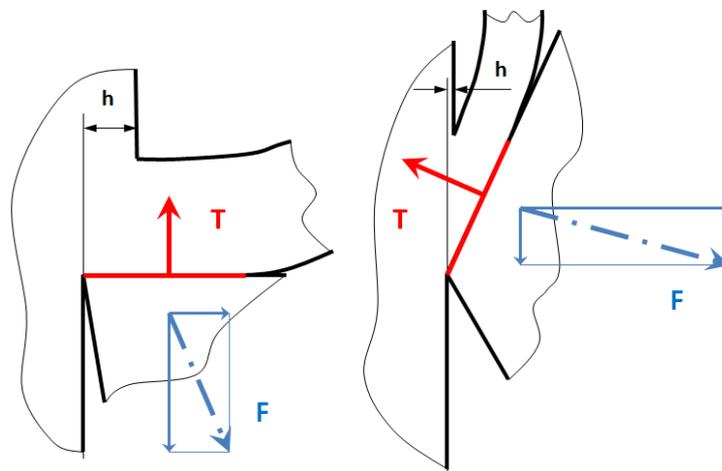


Abb. 1: Schema der Spanbildung, geometrisch bestimmte und unbestimmte Schneide

Die unbestimmte Form sowie die Anordnung der Schneiden erschwert zwar die rechnerische Behandlung. Geht man jedoch davon aus, dass bei qualitativ guten Schleifwerkzeugen bei gleichem Aufbau des Werkzeugs reproduzierbare Ergebnisse erzielt werden, so lässt sich die Anordnung der Schneiden durch Mittelung ähnlich der eines Fräswerkzeugs abbilden.

Für die Auslegung einer gestellten Schleifaufgabe ist es erforderlich, eine notwendige und eine hinreichende Bedingung bezüglich des Bearbeitungsergebnisses sicherzustellen. Ein Schleifergebnis ist nur dann IO wenn der Anteil der Wärme, welche in die Werkstückoberfläche eindringt, keine Gefügeumwandlung verursacht. In dieser Forderung besteht die notwendige Bedingung für die Durchführung der Bearbeitung. Die hinreichende Bedingung besteht darin, die Kosten für die Bearbeitung niedrig zu halten.

Für die rechnerische Vorgabe von Maschineneinstellenden, welche die notwendige Bedingung erfüllen, ist es erforderlich, ihren Einfluss auf die maximal mögliche Temperatur im Bereich der Werkstückoberfläche analytisch darzustellen. Die Ableitung entsprechender Berechnungsgrundlagen bedarf einer Modellvorstellung bezüglich der Aufheizung beim Überschleif. Hierzu lassen sich die Ergebnisse von zwei unterschiedlichen Untersuchungen heranziehen.

In der ersten dieser Versuchsreihen wurde die Temperatur an der Werkstückoberfläche bei jedem Überschleifen gemessen. Abgetragen wurde dabei jeweils das gleiche bezogene Zeit-spanvolumen. Die Schnittgeschwindigkeit wurde bei allen Versuchen konstant gehalten. Begonnen wurde mit einem kleinen Wert für die Zustellung und hoher Vorschubgeschwindigkeit und beendet mit dem umgekehrten Verhältnis.

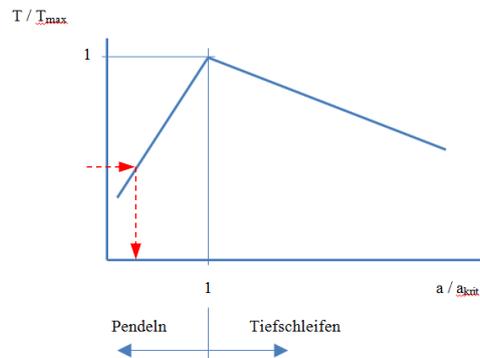


Abb. 2: qualitative Ergebnisse von Schleifversuchen

Die Ergebnisse sind in Abb. 2 in qualitativer Form wiedergegeben. Bei der Durchführung der Versuchsreihen wurde zunächst eine niedrige Temperatur gemessen. Mit Steigerung der Zustellung nahm die Temperatur anfänglich zu. Ab einem kritischen Wert der Zustellung trat dann ein Temperaturabfall mit Zunahme der Zustellung auf. Dieses Verhalten lässt sich durch die Ergebnisse einer zweiten Versuchsreihe erklären.

Dabei wurde ein Werkstück bei jedem Überschleif mit gleichem Wert für das bezogene Zeit-spanvolumen sowie gleichen Schnittdaten überschleift. Bei jedem Überschleif wurde dabei die Kühlmenge verändert.

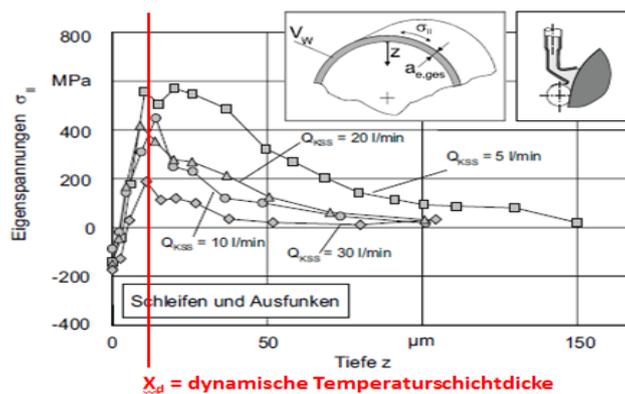


Abb. 3: Eigenspannungen im oberflächennahen Bereich nach Überschleif

Die durch den Überschleif induzierten Eigenspannungen sind in Abb. 3 dokumentiert. Sie weisen unabhängig von der Menge des eingesetzten Kühlmittels etwa in einem Abstand von 10 µm von der Werkstückoberfläche die höchsten Druckwerte auf. Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass sich in dieser Tiefe jeweils die höchste Temperatur beim Überschleif ausgebildet hat. Die dadurch hervorgerufenen Dehnungen haben in dieser Tiefe zu Druckspannungen geführt und an der Werkstückoberfläche Zugspannungen induziert.

Wo liegt der physikalische Zusammenhang zwischen den Ergebnissen nach Abb. 2 und 3? Das Temperaturfeld im Bereich der Werkstückoberfläche baut sich nach den Gesetzen der instationären Wärmeausbreitung in einen Körper hinein auf. Die Werkstückoberfläche wird bei jedem Spanabtrag mit einem Wärmepuls beaufschlagt. Ein Teil dieser Wärme breitet sich in das Werkstück hinein aus. Bis der nächste Puls erfolgt fließt ein Teil der eingebrachten Wärme wieder heraus. Der Begriff dynamische Temperaturschicht bedeutet, dass in diesem Teil der Werkstückoberfläche wechselnde Temperaturen anliegen solange der Überschleiff dauert. Mit zunehmendem Abstand von der Werkstückoberfläche nimmt die Amplitude der Temperaturschwankungen ab. In dem Abstand von der Werkstückoberfläche, welcher dem Wert der dynamischen Temperaturschichtdicke entspricht, sind diese Schwankung abgeklungen. Die an dieser Stelle registrierten Eigenspannungen weisen darauf hin, dass hier jeweils die höchste Temperatur angelegen hat.

Der Wärmeeintrag pro Puls hängt von der Kühlmenge ab. Mit geringerer Kühlmenge erhöht sich der Maximalwert der Temperatur. Beim Einsatz der geringsten Kühlmenge weist der Verlauf der Eigenspannungen statt des Maximums ein Plateau auf. Dies deutet darauf hin, dass bei dieser Kühlmenge der höchste Wert der Temperatur erreicht wurde. Die dynamische Temperaturschicht war in diesem Fall „gesättigt“. Der Teil des Wärmepulses, welcher tiefer in das Werkstück eindringt ist in diesem Fall gleich groß wie der Teil des Wärmepulses, welcher wieder zurückfließt. Die Maximaltemperatur steigt damit nicht weiter an. Das erreichte Temperaturniveau breitet sich solange in das Werkstück hinein aus wie der Überschleiff dauert.

Übertragen auf die Ergebnisse von Abb. 2 liefert dieses Modell wie folgt die Erklärung für den dort dargestellten Verlauf der Temperatur. Für die beim Überschleiff eines jeden Versuches auftretende maximale Temperatur ist nach Erkenntnissen der Thermodynamik neben der Intensität des Wärmepulses, welcher beim Spanabtrag entsteht, auch die Anzahl der Wärmepulse maßgebend. Bei der oben beschriebenen Versuchsdurchführung wurde der Abtrag zunächst mit einer großen Intensität der Pulse gekoppelt mit einer geringen Anzahl von Impulsen durchgeführt. Mit steigendem Wert für die Zustellung nahm dann die Intensität ab wobei die Anzahl der Pulse zunahm. Im Bereich des Pendelschleifens überwiegt damit die Anzahl der Pulse auf die maximal auftretende Temperatur während im Bereich des Tiefschleifens ihre Intensität den Ausschlag gibt.

Die kritische Zustellung ist bei einem vorgegebenen Wert für das Zeitspanvolumen somit dadurch festgelegt, dass die Anzahl der Pulse gerade ausreicht, die dynamische Temperaturschicht mit Wärme aufzufüllen. Aus diesem Zusammenhang lässt sich bei Vorgabe einer Schleifaufgabe sowie der Wahl des Werkzeugs für deren Durchführung der Wert für den kritischen Zustellbetrag berechnen. Die Berechnung der maximal auftretenden Temperatur kann wegen der Komplexität der Pulsfolge für die praktische Anwendung mit vertretbarem Aufwand nicht berechnet werden. Um bei der rechnerischen Auslegung auf der sicheren Seite zu liegen kann man davon ausgehen, dass im Bereich der Spanbildung maximal die Schmelztemperatur auftritt. Mit dieser Annahme lässt sich der Bereich möglicher Zustellwerte festlegen, bei deren Einsatz keine Gefügeumwandlung auftreten kann und somit die notwendige Bedingung für die Sicherstellung eines wirtschaftlichen Schleifergebnisses gegeben ist.

Die hinreichende Bedingung zielt auf die Minimierung der Kosten für die Durchführung der Bearbeitung ab. Um die Kosten gering zu halten ist darauf zu achten, dass die Bearbeitungszeit kurz ist und die Abnutzung des Werkzeugs dabei in vertretbaren Grenzen bleibt.

Die Belastbarkeit eines Werkzeugs hängt von der Spezifikation des Schleifmittels sowie den Eingriffsverhältnissen in das Werkstück ab. Ein Maß hierfür ist der Verschleißindex. Er wird gebildet aus dem Quotienten von Belastung der Schleifkörner / Belastbarkeit des Schleifmittels (Korn plus Bindung). Die Spanbildung erfolgt an den Schneiden der Schleifkörner. Die dabei auftretende Kraft muss von der Bindung auf den Schleifkörper abgeleitet werden. Die Belastbarkeit des Schleifmittels lässt sich durch eine Standzeitkurve darstellen. Maßgeblich für das Versagen des Verbundes von Korn und / oder Bindung ist die Kombination aus Höhe der Belastung und Anzahl der Lastzyklen. Diese Kombination hängt ab von dem Wert der Zustellung pro Überschliff und dem kinematischen Geschwindigkeitsverhältnis.

Die Zustellung pro Überschliff hängt linear ab vom Verschleißindex VI. Der Durchmesserverlust einer Schleifscheibe nimmt mit dem Wert des Verschleißindex exponentiell zu. Somit ergibt der Quotient von Zustellung / Durchmesserverlust der Schleifscheibe den in Abb. 4 dargestellten qualitativen Verlauf.

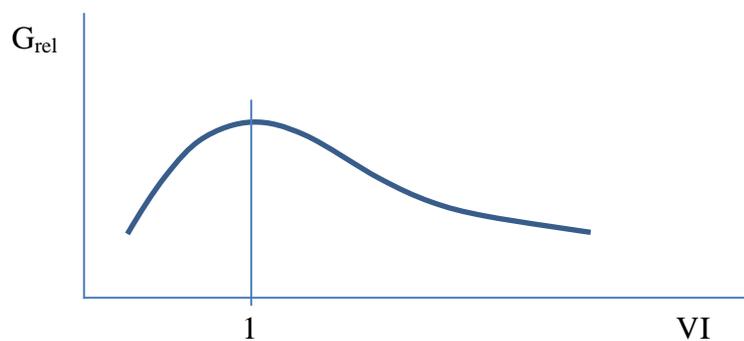


Abb. 4: Relativer G Faktor in Abhängigkeit vom Verschleißindex

Der in Abb. 4 dargestellte Verlauf bietet zwar keine absoluten Werte für den G Faktor, liefert jedoch die Anhaltswerte für den gezielten Einsatz eines Schleifwerkzeugs. Im Bereich kleiner Werte des Verschleißindex ist das Schleifmittel in der Lage, die durch die Spanbildung entstehende Belastung ohne große Verluste aufzunehmen. Im Bereich des Verschleißindex mit dem Wert 1 tritt Selbstschärfung auf. Steigert man die Belastung des Werkzeugs weiter, so tritt überhöhter Verschleiß auf. In diesem Bereich geht die Steigerung des bezogenen Zeit-spanvolumens auf Kosten des hohen Werkzeugverschleißes.

Für die rechnerische Auslegung einer durchzuführenden Schleifaufgabe mit einem vorgegebenen Werkzeug lassen sich die dargestellten Zusammenhänge wie folgt nutzen. Die Forderung, welche an die Durchführung der Schleifaufgabe gestellt wird, bestimmt den Vorgabewert für den Verschleißindex. Wählt man einen Wert kleiner 1, so zielt man auf möglichst lange Zykluszeiten für das Abrichten ab. Die Erfahrung hat allerdings gezeigt, dass Werte unter $1/3$ zu unregelmäßigem Abtragsverhalten führen, da kein gezielter Werkzeugverschleiß mehr gegeben ist. Korn- oder Bindungsversagen kann in diesem Bereich sporadisch auftreten oder ausbleiben. Im Bereich der Selbstschärfung zu fahren empfiehlt sich dann, wenn über lange Strecken ohne Abrichten gearbeitet wird (Walzenschleifen). Kommt es dagegen bei

der Durchführung der gestellten Schleifaufgabe auf Schnelligkeit an, so wird man Werte für den Verschleißindex wählen, welche über 1 liegen.

Nach der Wahl der Größe des Verschleißindex legt man als Nächstes das zulässige Temperaturniveau fest und erhält wie in Abb. 2 rot eingezeichnet den Bereich, in dessen Grenzen der Quotient Zustellung / kritische Zustellung wählbar ist. Nach den Vorgaben der Schleifaufgabe (Schruppen / Schlichten) legt man danach unter Benutzung des berechneten Wertes für die kritische Zustellung den entsprechenden Wert für die Zustellung fest.

Mit der Vorgabe des Verschleißindex wird dann unter Benutzung des Wertes für die festgelegte Zustellung der Wert für das Geschwindigkeitsverhältnis berechnet. Damit ist die Forderung nach möglichst langer Standzeit bzw. kurzer Bearbeitungszeit erfüllt.

Die Forderung nach kurzer Bearbeitungszeit setzt das Erreichen eines möglichst großen Wertes für das bezogene Zeitspanvolumen voraus. Das Zeitspanvolumen ergibt sich aus dem Produkt äquivalente Spanungsdicke * Schnittgeschwindigkeit. Der Wert für die äquivalente Spanungsdicke wird gebildet aus dem Quotienten Zustellung / Geschwindigkeitsverhältnis. Da die Werte für Zustellung und Geschwindigkeitsverhältnis wie oben geschildert bereits ermittelt wurden bleibt der Wert für die vorzugebende Schnittgeschwindigkeit noch offen. Um die Forderung nach einem möglichst hohen Wert für das bezogene Zeitspanvolumen zu erfüllen, ist in diesem Fall die maximal mögliche Schnittgeschwindigkeit vorzugeben.

Beim Flachsleifen geht man dabei beispielsweise wie folgt vor. Das Geschwindigkeitsverhältnis ist der Quotient aus Schnittgeschwindigkeit / Vorschubgeschwindigkeit. Dieser Zusammenhang ist in der Abb. 5 skizziert.

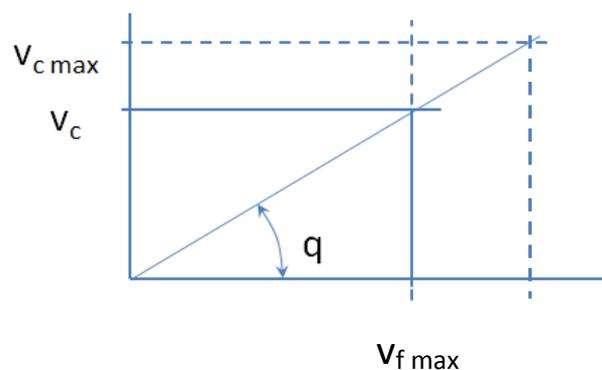


Abb. 5: Begrenzung der Achsbewegungen

Das Schleifwerkzeug kann nur mit der maximal zulässigen Schnittgeschwindigkeit eingesetzt werden. Die Geschwindigkeit des Tischvorschubes ist ebenfalls begrenzt. Die Größe des Geschwindigkeitsverhältnisses liefert damit die Maschineneinstelldaten für Schnittgeschwindigkeit und Tischvorschub wie in Abb. 5 skizziert.

Beim oben geschilderten Auslegungsprozess wurde von einem vorgegebenen Schleifwerkzeug ausgegangen. Setzt man dieses Werkzeug mit den ausgewählten Schnittdaten ein, so bleibt noch die Frage offen, ob es hart oder weich arbeitet. Arbeitet es hart, so besteht die Gefahr des Kornschneidenverschleißes. Arbeitet es weich, so wird seine Leistungsfähigkeit nicht voll genutzt.

Ob das Werkzeug bei den gewählten Einsatzbedingungen hart oder weich arbeitet wird mittels Berechnung des Wirkindex kontrolliert. Der Wirkindex setzt die minimale Spannungsdicke in's Verhältnis zur Späneinsatztiefe. Ist dieser Wert kleiner eins, arbeitet das Werkzeug hart, bei einem Wert größer eins dagegen weich.

Entsprechende Berechnungstools wurden für **die gängigsten Schleifverfahren** erstellt. Die einfache Handhabbarkeit der komplexen Zusammenhänge lässt sich dem angehängten EXCEL Schema für das Rund Einstech Schleifen entnehmen.

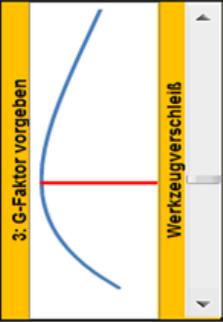
Das Schema enthält 4 Bereiche. Schleifaufgabe, Spezifikation Werkzeug, Auslegungshilfen und Ergebnisse Berechnung. Sind die Eingaben für die Schleifaufgaben getätigt, geht es zu der Spezifikation des Werkzeugs. Dabei kann entweder die Spezifikation eines ausgewählten Werkzeugs eingegeben oder ein neues spezifiziert werden. Im Bereich 2 erfolgt die Eingabe für die Parameter der Werkzeugspezifikation sowie die Einstellung des gewünschten Wertes für den relativen G Faktor und die gewählte Zustellung pro Überschliff (der Schieber bei der Zustellung liefert dabei dem Programm den Wert für das zulässige Temperaturniveau, programmintern wird mit Hilfe des berechneten Wertes für die kritische Zustellung die entsprechende Zustellung berechnet und über dem Schieber angezeigt). Im Bereich 3 wird die Wirkungsweise des Werkzeugs angezeigt, welche sich durch die eingegebenen Werte einstellt. Ebenso wird in einem Diagramm dargestellt, ob der zulässige Wert für die Schnittgeschwindigkeit oder die höchst mögliche Drehzahl des Werkstücks die Begrenzung für das zu erreichende bezogene Zeitspannvolumen darstellen. Im Bereich 4 sind die berechneten Werte für die Maschineneinstellaten sowie das Schleifergebnis angezeigt.

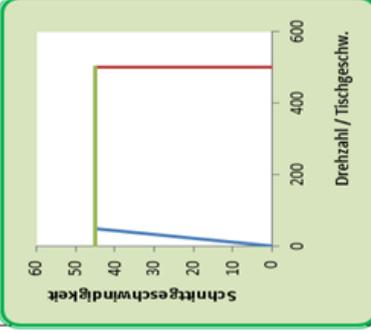
Bei Veränderung eines Eingabewertes oder einer Einstellgröße erfolgt eine neue Durchrechnung und Ausgabe der neu berechneten Werte. Damit lässt sich das Schleifergebnis durch Modifikation der Eingabewerte einstellen, welches für die Durchführung der Schleifaufgabe gefordert wird.

Jeder Praktiker weiß, dass mit der Berechnung keine Punktlandung zu erwarten ist. Dazu stecken eine Menge Modellannahmen im Berechnungsschema. Die langjährige Praxis hat allerdings gezeigt, dass Verbesserungen gegenüber der bisher angewandten Methode Trial and Error erzielbar sind, welche gezielt ohne Testläufe zu Steigerungsraten im höheren zweistelligen Bereich führen.

Programm zur Auswahl und zum Einsatz von Schleifwerkzeugen

Schleifaufgabe	
Werkstück	
Durchmesser	mm 400
Vickers Härte	HV 800
Ra gefordert	µm 0.7
max. Drehzahl	U / min 500

Spezifikation Werkzeug	
1: Kornart wählen konventionell	
Kornart	EKW
Körnung	100
Bindungshärte	N
Struktur	9
Höchstgeschw.	m / s 45
Durchmesser außen	mm 400
hochhart 100 % blockig	
Korngröße	µm 107
Bindungshärte	L
Konzentration	160
Höchstgeschw.	m / s 45
Durchmesser außen	mm 400
2: Körnung wählen Ra zu erwarten µm 0.3 Ra gefordert µm 0.7	
3: G-Faktor vorgeben 	
4: Abtrag vorgeben Zustellung / Hub µm / U 6	
5: Bindungshärte wählen	
6: Struktur wählen	

Auslegungshilfen	
Scheibe wirkt hart normal weich	
	

Ergebnisse Berechnung	
Maschineneinstelldaten	
Schnittgeschwindigkeit	m / s 45
Werkstückdrehzahl	mm / min 51
Zustelgeschwindigkeit	mm / min 0.30
Bearbeitungsergebnis	
bezog. Zeitspanvolumen	mm ³ / mm s 6.2
bezog. Normalkraft	N / mm 14.6