

# HANSER

Vorwort

Markus Meister

Vademecum des Schleifens

ISBN: 978-3-446-42618-4

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser.de/978-3-446-42618-4>

sowie im Buchhandel.

# Vorwort

Irgendwann war der Gedanke da, ein Buch über das Schleifen zu schreiben. Ein Buch, welches dem fortgeschrittenen Fachmann genauso dienen kann, wie dem Operateur an der Schleifmaschine. Es muss die wichtigsten Hinweise zum Verfahren selbst beinhalten, darf aber nicht so anspruchsvoll sein, dass man nur einmal reinschaut und es dann für immer zur Seite legt.

Wenn ich mit praktischen Anwendungen konfrontiert werde, steht für mich nicht nur die Schleifscheibe im Vordergrund, sondern die gesamte Schleifaufgabe, die damit zu erledigen ist. Mich interessieren auch die Vorgaben und Einstellwerte, der eingesetzte Kühlschmierstoff und selbstverständlich das erzielte Ergebnis. Da kann es durchaus vorkommen, dass ich zum Taschenrechner greife und mir einige wenige Prozessgrößen – das sind insbesondere Werte, die man nicht direkt einstellt – etwas genauer ansehe. Was dabei herauskommt, zeigt oftmals, dass viele Schleifpraktiker die Einflussgrößen und ihre Zusammenhänge untereinander nur in ungenügendem Mass kennen.

Vor einigen Monaten entschloss ich mich, als Vorläufer von diesem Buch, ein gut verständliches kleineres Büchlein mit dem Titel „Grindy“ zu verfassen. Darin sind die Schleifstoffe, ihre Herkunft, die Herstellungsverfahren, Wichtiges zu den Korngrößen und zu den Strukturen und vieles mehr zu finden. Es ist ansprechend illustriert und kann beispielsweise Lernenden genauso wie erfahrenen Schleifern einiges an Wissenswertem bieten. Besonders Schulen könnten davon profitieren, weil überhaupt keine Kenntnisse über Schleifstoffe vorausgesetzt werden. Im Gegenteil, diese Kenntnisse werden in „Grindy“ vermittelt.

Bedauerndswert ist vor allem, dass nicht nur an den Fachschulen das Schleifen recht stiefmütterlich behandelt wird, sondern auch in speziellen Zerspanungsbüchern. Unlängst suchte ich in einem solchen Buch nach Angaben und Hinweisen zum Hartdrehen, zweifellos ein ernstzunehmendes Verfahren, welches in gewissen Bereichen das Schleifen durchaus konkurrieren kann. Ungewollt stiess ich dabei auf das Kapitel „Schleifen“. Es bestand gerademal aus einer halben Buchseite mit absolut nichts sagendem Text. Weder die verschiedenen Schleifverfahren noch sonst etwas Nützliches war zu lesen. Warum gibt es, abgesehen von Dissertationen und wenigen Vortragsauszügen, kaum brauchbare Literatur über das Schleifen?

Vielleicht ist das der Grund, der mich veranlasst hat, dieses Buch zu schreiben. Die massgebenden Erkenntnisse in Bezug auf die Einflussgrößen und ihre Zusammenhänge sind nämlich etwa

seit dem Ende der Achtzigerjahre bekannt. Sie hätten somit längst in Buchform veröffentlicht werden können. Wendet man diese Kenntnisse in der Praxis richtig an, würde zweifellos in vielen Fällen die Änderung eines oder zweier Parameter genügen, um einen gegebenen Schleifprozess schneller, problemloser oder optimaler durchzuführen. Man muss nicht gleich andere Schleifscheiben besorgen oder den Kühlschmierstoff auswechseln, auch wenn das möglicherweise die bessere Lösung wäre. Nein, es gilt in erster Linie, die Gegebenheiten zu analysieren um mit Parameterkorrekturen das Ergebnis zu verbessern. Aber eben, wie macht man das?

Mit diesem Buch wird der Leser in die Grundlagen der Schleiftechnologie eingeführt. Es beansprucht aber keineswegs die absolute Vollkommenheit, denn diese zu erlangen – gerade in Sachen Schleifen – würde mehrere Jahre in Anspruch nehmen und sowohl die praktische Anwendung als auch die theoretische Vertiefung auf der gesamten Breite voraussetzen. Ich sehe darin viel eher ein Handbuch, welches sowohl der Aneignung von guten schleiftechnischen Kenntnissen dient wie auch als Nachschlagewerk bei der täglichen Arbeit Verwendung finden kann.

Mich würde es jedenfalls freuen, wenn ich mit dem „Vademekum des Schleifens“ auch meine über 33 Jahre hinweg ausgeübten Tätigkeiten für die Schleiftechnologie und die damit verbundene Erfahrung den folgenden Generationen weiter vermitteln und gleichzeitig die seit Jahren bestehende Literaturlücke schliessen könnte.

Ich wünsche Ihnen viel Vergnügen beim Lesen.

Andelfingen, im Frühjahr 2011

*Ihr Markus Meister*

# Einleitung

Es hat sich mittlerweile herumgesprochen – das Schleifen ist und bleibt die älteste, spanabhebende Bearbeitungsmethode der Menschheit. Dazu braucht es kaum Beweise, denn schon die ersten Werkzeuge aus Holz, tierischen Knochen, Gesteinsbrocken und erst viel später auch aus Metallen, wurden mit rauen Steinen bearbeitet, umgeformt oder geschärft.

Aber weil der Mensch von Natur aus immer nach Möglichkeiten sucht, sich die Arbeit leichter zu gestalten, kam er irgendwann auf die kuriose Idee, einen rundgehauenen Sandstein mit einer Holzachse zu versehen und diesen dann mittels einer Kurbel zu drehen. Damit war die erste „Schleifmaschine“ erfunden!

Jetzt brauchte es nur noch etwas Phantasie. Die Sandsteinschleifscheibe wurde immer genauer hergestellt und „maschinell“ angetrieben. Als die grosse technische Revolution die Welt auf den Kopf zu stellen versuchte, hielt auch beim Antrieb von Schleifscheiben zuerst die Wasserkraft und danach die Dampfmaschine Einzug. Sogar kleine Betriebe verfügten über einen für alle Maschinen über Transmissionswellen arbeitenden Dampfantrieb. Auf alten Bildern und den ersten Fotografien kann man noch solche Antriebe bestaunen. Oben an der Decke waren die über die gesamte Hallenlänge reichenden Hauptwellen angeordnet. Von dort aus trieben unterschiedlich grosse, hölzerne Scheibenräder via Lederbänder die Dreh-, Fräs-, Bohr- und Schleifmaschinen an. Weil jedes Bearbeitungsverfahren individuelle Antriebsdrehzahlen erforderte, wurde das Gegenrad an der Maschine entsprechend angepasst. Die Sicherheit fand damals noch kaum Beachtung, es gab mit den Riementrieben oftmals sehr schwere Unfälle. Eine echte Alternative zum Transmissionsantrieb brachte erst die Entdeckung der Elektrizität und später die Erfindung des Elektromotors.

Die Frage, wann die Elektrizität entdeckt worden ist, kann gar nicht genau beantwortet werden. Schon in der Frühzeit betrachteten Hochkulturen den Blitz als Waffe der Götter. Aus der griechischen Antike stammt das so genannte Elmsfeuer, bei welchem elektrische Entladungen an der Spitze von Schiffsmasten herumzuckten. Und schliesslich kannte die Menschheit seit dem 4. Jahrhundert v. Chr. die anziehende Kraft von Bernstein. Im 18. Jahrhundert hielt die Elektrizität Einzug in die Wissenschaft. *Benjamin Franklin* wurde 1752 bekannt durch seinen „Blitzableiter“. 1786 fand *Luigi Galvani* heraus, dass Froschschenkel beim Kontakt mit geringer elektrischer Ladung zusammensuckten. Aber erst *Alessandro Volta*, ein erfahrener Chemiker und Physiker,

erkannte etwa 1795 das „galvanische Element“, die Batterie. Beim Hintereinanderschalten stieg die Spannung proportional zu der Anzahl der Elemente, was die Welt sofort begeisterte, weil man jetzt – so schien es – die elektrische Wirkung endlos steigern konnte. *Volta* führte seine Experimente 1801 in Paris vor und erhielt dafür eine fürstliche Belohnung. Doch es dauerte noch weit ins 19. Jahrhundert hinein, bis alltagstaugliche Batterien hergestellt werden konnten.

Der Däne *Hans Christian Ørsted* kam 1820 auf die Idee, eine Magnetnadel unter einen Batterie-strom führenden Draht zu halten und beobachtete dabei eine Ablenkung der Nadel. Das war eine epochale Entdeckung und die Voraussetzung für die elektromagnetische Messtechnik und für Elektromotoren. Der Brite *Michael Faraday* erkannte 1831 den umgekehrten Effekt, nämlich dass mittels elektrischer Ströme und mit Hilfe von Magnetismus sich auch andere elektrische Ströme erzeugen liessen. Die elektromagnetische Induktion war damit erfunden!

Jetzt erst stand dem Bau elektrischer Generatoren zur Stromerzeugung eigentlich nichts mehr im Wege. Doch es sollte noch Jahrzehnte dauern, bis sich daraus die Starkstromtechnik entwickelte. Schon bald gab es Generatoren und auch Elektromotoren, aber nur für wissenschaftliche Versuche und für eine äusserst bescheidene Strassenbeleuchtung.

Das änderte sich mit der Entdeckung des dynamoelektrischen Prinzips durch *Werner von Siemens* 1866. Der Restmagnetismus in normalem Eisen reichte aus, um durch Selbstverstärkung genügend starke Magnetfelder zur Stromerzeugung aufzubauen. Solche „Dynamomaschinen“ nutzte man aber fast nur für Bogenlichtlampen oder für die Galvanotechnik. Erst nach 1880 waren Dynamomaschinen, Elektromotoren und die Fernübertragung von Strom so weit entwickelt, dass die in Kraftwerken produzierte Elektrizität über weite Strecken geleitet werden konnte und damit die Versorgung von Elektroantrieben, etwa für Kräne, Fahrstühle und Werkzeugmaschinen, möglich wurde. Ein ganz wesentlicher Anteil daran hatte die Entwicklung der Glühlampe. Bereits 1854 präsentierte *Heinrich Goebel*, ein in Amerika lebender Deutscher, die ersten Glühlampen mit Kohlefäden und evakuiertem Glaskolben. Der Universalerfinder und Geschäftsmann *Thomas Alva Edison* produzierte dann ab 1878 solche Glühlampen. Von da an trat diese ihren Weg um die ganze Welt an, zusammen mit Elektrizitätswerken und Dynamomaschinen (Generatoren).

Was soll dieser Exkurs in die Vergangenheit? Ganz einfach, kaum eine Spannungstechnologie weist einen dermassen grossen Energiebedarf auf, wie das Schleifen. Es beginnt schon mit der Herstellung der konventionellen Schleifstoffe im Elektrohochofen und der hochharten Schleifstoffe in der Retorte und zieht sich wie ein roter Faden durch das gesamte Verfahren in unterschiedlichster Weise weiter. Es gibt jedoch Wege, um zumindest mit dem geringst möglichen Energiebedarf einen Schleifprozess zu bewältigen und dennoch erstaunlich hohe Abtragsleistungen dabei zu erreichen. Und hier beginnt jetzt eigentlich mein Buch. Ich möchte zeigen, was machbar sein kann, wenn man die moderne Schleiftechnik mit ihren vielen Einflussgrössen und deren Zusammenhänge untereinander kennt und begriffen hat.

In den einzelnen Kapiteln wird ausführlicher auf viele wichtige Dinge eingegangen. Deshalb nur ein Beispiel, welches die durchaus realisierbare Reduktion von Leistungsbedarf eines Schleifprozesses manifestiert. Eine Schleifaufgabe mit nicht allzu grossen Anforderungen an die Abtragsleistung steht an. Die Maschine verfügt über eine ausreichende Antriebsleistung an

der Schleifspindel, ist steuerungsmässig gut und variabel ausgelegt, verfügt über die für das gegebene Werkstück notwendige Konditioniereinrichtung und ist an eine Kühlmittelversorgung mit genügend Pumpenfördermenge und -druck angeschlossen. Als Kühlschmierstoff steht eine organische Lösung zur Verfügung. Man hat sich zu deren Wahl seinerzeit entschlossen, weil Lösungen unkritisch in der Wartung sind, lange Standzeiten erreichen können und – was viele „Schleifer“ immer wieder betonen – die Beobachtung des Prozessablaufes ermöglichen würden. Sofern eine entsprechende Anzeige vorhanden ist, kann beispielsweise für diese Arbeit und den dafür gewählten Vorgabeparametern ein Leistungsbedarf der Schleifscheibe von 12.5 kW abgelesen werden. Würde dieser Prozess unter absolut gleichen Vorgaben, aber mit einer mittel geschmierten Emulsion gefahren, könnte man den Leistungsbedarf um etwa 20 % auf 10.0 kW reduzieren. Die Scheibe wirkt so allerdings ein bisschen härter; dafür steigt ihre Standzeit in etwa um den gleichen Prozentbetrag. Aber nicht genug: Stünde ein hoch additiviertes Schleiföl als Kühlschmierstoff zur Verfügung, könnte man beobachten, dass der Leistungsbedarf für die Schleifscheibe – immer noch mit gleichen Vorgaben – auf 50–60 %, d. h. auf 6.25–7.5 kW, abgefallen ist. Logisch, jetzt müsste die Scheibe mehr gefordert werden, zumal ihre Härtewirkung nochmals angestiegen ist. Wie macht man das? Reduktion der Schnittgeschwindigkeit um ca. 3–5 m/s. Jetzt sinkt der Leistungsbedarf nochmals geringfügig. Oberflächenqualität und Standzeit der Schleifscheibe verbessern sich massgeblich.

Resümee: Über den Damen gepeilt, nur noch rund die Hälfte des ursprünglichen Leistungsbedarfs. Dazu kommt die um den gleichen Prozentsatz geringere Leistungsaufnahme zur Werkstückbewegung – Tisch- oder Drehantrieb – und eine reduzierte Menge an Kühlschmierstoff, also weniger Pumpenleistung. Ferner erhöht sich die Scheibenstandzeit spürbar und die Geometrie sowie die Oberflächenqualität sind angestiegen. Auch die Abricht- bzw. Konditionierabstände haben sich vergrössert. Gespart wird somit nicht nur am Leistungsbedarf, sondern gleichzeitig auch an der Schleifscheibe sowie an der Schleif- und Konditionierzeit. Das nennt der Fachmann „Schleifprozessoptimierung“.

Zwei Punkte dürfen allerdings nicht unerwähnt bleiben:

- Noch kein Mensch hat bis zum heutigen Tag einen Schleifprozess, bzw. die Spanbildung beim Schleifen beobachten können. Der Einsatz einer organischen Lösung ist, zumindest aus diesem Grund, in keiner Weise gerechtfertigt.
- Um Schleiföl einsetzen zu dürfen, muss die Schleifmaschine mit allen vorgeschriebenen Sicherheitseinrichtungen (öldunstdichte Abdeckung, Ölnebelabsaugung und -rückführung, Explosionsklappe und automatische CO<sub>2</sub>-Löscheinrichtung) ausgerüstet sein. Das kostet zwar etwas mehr, zahlt sich aber in kurzer Zeit durch die eingesparten Energiekosten und die höhere Produktion wieder aus.

Sicher denken jetzt einige, welche Rolle denn bloss die in der Schule irgendwann einmal diskutierte Wärmeleitfähigkeit von Wasser und Öl hier spielt. Die von Öl ist doch rund 2.5mal schlechter, als jene von Wasser. Stimmt, nur die mittels eines guten Schleiföls reduzierte Reibleistung zwischen der Schleifscheibe und dem Werkstück ist eben grösser. Es ist deshalb kein Schleifbrand zu befürchten.

Korrekterweise müsste ich nun auch noch den deutlich verminderten Leistungsbedarf durch die Anwendung hoher Schnittgeschwindigkeit an der Schleifscheibe erörtern, aber das ist etwas zu früh. Wir kommen später auf diesen Punkt bestimmt zurück.

Den Grund für den hohen Leistungsbedarf beim Schleifen habe ich bis jetzt gar nicht angesprochen. Die investierte Leistung wird zu etwa 92–95 % durch Reibung in Wärme umgewandelt. Der Rest dient der Spanumformung, dem Furchen und der übrigen mechanischen Arbeit. Die Schleifkörner bilden bekanntlich negative Schneiden, die so aussehen, als könnten damit keine Späne gebildet werden. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von der nicht definierten Schneide beim Schleifen im Gegensatz zur definierten beim Drehen, Fräsen, Räumen und Bohren. Um einen Span zu erzeugen, muss der abzutragende Werkstoff in einer dünnen Schicht zur Kornschneide hin zuerst einmal plastifiziert werden. Das geschieht in Bruchteilen von Sekunden durch Reibung jeder einzelnen Kornschneide im Kontaktbereich. Hat man die Vorgaben richtig gewählt, dann müsste die Abspangeschwindigkeit gleich oder besser etwas schneller sein, als die Wärmeeindringgeschwindigkeit. Mit anderen Worten, die enorm grosse Wärmemenge wird in den Spänen abtransportiert, bevor sie einen thermischen Schaden an der Werkstücks Oberfläche anrichten kann. Das ist die hohe Kunst des Schleifens.

Es bedarf wenig Vorstellungsvermögen, um sich darüber im Klaren zu sein, dass ein wirtschaftlich und ökonomisch effizientes Schleifen nur dann erreicht werden kann, wenn man die gesamten Grundlagen des Schleifens kennt. Da gehört die Kinematik der Spanbildung genauso dazu, wie die Scheiben- und Kühlschmierstoffwahl, die Konditionierbedingungen sowie das Zusammenspiel der Stellgrößen (Vorgaben) und die daraus resultierenden Ergebnisse. In diesem Buch wird der Leser keine Beispiele aus der Praxis finden, es sei denn, irgendein Zusammenhang lässt sich nur mit einem solchen entsprechend erklären. Beispiele weisen nämlich den grossen Nachteil auf, dass sie so gut wie nie mit eigenen Gegebenheiten voll und ganz übereinstimmen. Und, wie nun bekannt sein sollte, wenn es „nur“ der verwendete Kühlschmierstoff ist. Da können Welten dazwischen liegen.

Fundiertes schleiftechnisches Wissen ist umso wichtiger, als es gilt, hohe und höchste Abtragsleistungen zu erzielen, welche sich beispielsweise mit dem Fräsen messen können. Dabei soll man mit dem geringsten möglichen Leistungsbedarf auskommen. Weil das keinesfalls einfach ist, müssen die Einflüsse und ihre Zusammenhänge untereinander bekannt sein. Das genügt aber noch nicht ganz. Der Schleiffachmann muss auch in der Lage sein, das erhaltene Resultat beurteilen zu können, um – sofern notwendig und sinnvoll –, die richtigen Gegenmassnahmen einzuleiten. Auf der einen Seite steht da ganz bestimmt die eigene Erfahrung im Vordergrund, möglicherweise sogar verbunden mit angelernten Kenntnissen. Auf der andern Seite ist jeder bestimmt daran interessiert, sich neueres, aktuelles Wissen anzueignen. Und genau hier stösst man auf eine sonderbare Tatsache: Es gibt nur ganz wenig einschlägige Bücher zu kaufen, deren Inhalt wirklich nutzbringend angewandt werden kann. Obwohl das Schleifen das älteste spanabhebende Bearbeitungsverfahren ist, hat man sich bis heute nur wenig Mühe gemacht, die speziellen Eigenheiten des Schleifens so wiederzugeben, dass der Fachmann damit etwas anfangen kann. Was in den allgemeinen Zerspanungsbüchern über das Schleifen zu finden ist,

lässt sich bestenfalls als äusserst dürftig bezeichnen. Daran hat sich so gut wie nichts geändert. Mit Ausnahme einschlägiger Dissertationen sowie weniger Publikationen von Schleifexperten und/oder Schleifmaschinenherstellern, ist in den Buchhandlungen kaum etwas zu finden. Die Zerspaner mit den definierten Schneiden kommen dagegen in jeder Weise auf ihre Rechnung. Sogar über den neuesten Stand von Schneidenbeschichtungen und dergleichen wird laufend orientiert. Abhandlungen zum Hartdrehen und Hochgeschwindigkeitsfräsen dominieren in Fachzeitschriften und in den aktuellen Unterlagen von Werkzeugherstellern. Schleifer, welche es mit der undefinierten Schneide zu tun haben, können dagegen lange nach nützlichen Informationen suchen. Allerdings sind in den letzten Jahren einige wenige Schleifscheibenhersteller zum Teil in die Bresche gesprungen und haben in ihren Katalogen und Unterlagen einiges für den Fachmann getan. Sie publizieren ihre Neuentwicklungen und/oder bieten eigene Schulungen an. Bezüglich schriftlicher Unterlagen und Schulungen darf ein Pionier auf diesem Gebiet nicht unerwähnt bleiben, *Helmut W. Ott* [8]. Er kann mit Fug und Recht als „Erfinder“ der schleiftechnischen Schulung schlechthin bezeichnet werden – ja, die Nachahmer können diese Tatsache nur bestätigen.

Einer der das herrschende Manko in Sachen Schleifen recht früh erkannte, war *Professor Dr.-Ing. Ernst Saljé*. Ende der 50er-Jahre publizierte er von Versuchsarbeiten abgeleitete, anspruchsvollere Formeln zum Schleifen. Im Jahre 1976 führte er ein zwei Tage dauerndes schleiftechnisches Kolloquium am IWF der Hochschule Braunschweig durch. Zu diesem Zeitpunkt erschien das vom Vulkan Verlag in Essen herausgegebene Jahrbuch „Schleif-, Hon-, Läpp- und Poliertechnik“ in der 47. Ausgabe [siehe auch 5]. Es handelt sich hier wohl um das zweifellos am meisten gekaufte Buch, dessen Inhalt über alle Techniken, die mit dem Schleifen irgendwie in Verbindung stehen, fundiertes Wissen liefert. Die einzelnen Themen stammen sowohl aus der Wissenschaft als auch aus der Praxis. Das Jahrbuch – es erhielt zwischenzeitlich den neuen Titel „Schleifen, Honen, Läppen und Polieren“ – gibt es mittlerweile in der 63. Ausgabe [5].

Aber auch die beiden ehemaligen Lehrstuhlinhaber des IWF der ETH Zürich, die Professoren *Dr.-Ing. Eugen Matthias* und *Dr.-Ing. Fritz Rehsteiner* hielten ihr Augenmerk in gebührender Weise auf die Schleiftechnik. Seither ist es relativ still geworden am IWF, soweit dies das Schleifen betrifft. Anlässlich seiner Antrittsvorlesung im Jahre 2003 versprach zwar *Prof. Dr.-Ing. K. Wegener*, der neue Lehrstuhlinhaber des IWF, die von seinem Vorgänger ins Leben gerufenen internationalen „IWF-Feinbearbeitungs-Kolloquien“ weiterzuführen. Das hat sich bis heute leider nicht bewahrheitet.

In Deutschland entwickelte sich an den verschiedenen IWF's dagegen ein wahres „Ringens“ um Teilnehmer für schleiftechnische Seminare. Praktisch alle Institute für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF) bieten seit Jahren schleiftechnische Seminare an. Da wird allerdings im Allgemeinen beim Teilnehmer ein gewisser Wissensstand vorausgesetzt, weil er andernfalls vielen Referaten gar nicht folgen könnte. Besonders dann gilt dies, wenn komplexe mathematische Herleitungen gezeigt werden, die ihm als Anwender weder einen Nutzen bringen könnten, noch von ihm in den wenigsten Fällen nachvollziehbar wären.

Dieses Buch soll ganz gezielt die Lücke zwischen theoretischem Wissen und der praktischen Anwendung zu schliessen versuchen. Nach einer Einführung in die Kinematik des Schleifens, folgt das Kapitel „Einflussgrößen und Zusammenhänge“. Zumal das Schleifen, genau wie alle anderen Zerspanungsverfahren, der physikalischen Zerspanungslehre folgen muss, ist es logisch, dass man sich ab und zu auch mit Formel befassen sollte. Formeln sind keine mathematischen Schikanen, sondern sie zeigen in sofort verständlicher Form, was wie und mit wem zusammenhängt. Ich habe es bereits weiter vorne schon angedeutet: Noch kein Mensch konnte jemals die Spanbildung beim Schleifen beobachten. Aber wie lässt sich dieses Problem lösen? Genau gleich, wie die Chemiker dies tun würden. Man beginnt zu experimentieren und zu beobachten, sucht dann nach Erklärungen und sinnvollen Rückschlüssen, muss aber bereit sein, Annahmen oder Vermutungen immer kritisch zu überprüfen und gegebenenfalls einem neueren Erkenntnisstand anzupassen, bis das Ziel erreicht ist. Das nennt man ein „empirisches Vorgehen“. Beim Schleifen ist es genau gleich. Weil keine Möglichkeit besteht, die Spanbildung zu beobachten, hilft nur ein gutes Vorstellungsvermögen weiter. Aufgrund der Ergebnisse aus mehreren Versuchen mit gezielt veränderten Eingangsgrößen, zieht man einen bestimmten Schluss darüber, was da wohl zwischen der Scheibe und dem Werkstück geschehen ist. Stimmt die Annahme, so muss sie reproduzierbar sein. Man wird die nächsten Versuche – wie der Zerspanungstechnologe zu sagen pflegt – auf mindestens einer höheren und einer tieferen Ebene, aber ganz gezielt mit festen Vorgaben durchführen. Die Ergebnisse müssten, sofern keine Fehler begangen wurden, mindestens angenähert voraussehbar sein. Waren dagegen die Annahmen falsch, dann beginnt man eben nochmals von vorn, nicht mit den gesamten Versuchen, sondern mit der notwendigen „Hirnarbeit“ und sucht nach der Ursache der falschen Annahmen. Schon bei einer mehr oder weniger sicheren Vermutung, immer basierend auf der für uns alle geltenden Physik, werden einem plötzlich Dinge klar, die vorher noch im Verborgenen lagen. Und was besonders wichtig ist: Die Freude am zunehmend besseren Verständnis für die Einflussgrößen und ihren Zusammenhängen führt schon in kurzer Zeit zum Beherrschen von schwierigsten Schleifaufgaben. Die geschilderte Problematik soll hier abgeschlossen werden, aber nicht ohne an die Arbeiten bzw. an die Aussagen von zwei Koryphäen zu erinnern:

**Professor Dr.-techn. Max Kurrein**  
1913–1933

**Professor an der TU-Berlin**

**1927: Die Messung der Schleifkraft, Werkstatttechnik 21 (1927) S. 585–594**  
und

**Professor Dr.-Ing. E. h. Dr.-Ing. Gothold Palitzsch**  
1938

**„Forschung in der Schleiftechnik tut Not!“**

Bedauerlicherweise hat das Interesse an der Schleiftechnik erst Jahre nach dem Zweiten Weltkrieg so richtig angefangen, obwohl doch immer geschliffen wurde. In den Sechziger- und frühen Siebzigerjahren erschienen in Deutschland mehrere Dissertationen über schleiftechnische Untersuchungen.

Zwei Arbeiten können als besonders interessant und wichtig bezeichnen: Einerseits beschrieb *Dr.-Ing. Wilhelm Ernst* [1] 1965 das Aussenrunds Schleifen mit erhöhten Schnittgeschwindigkeiten und andererseits definierte *Dr.-Ing. Helmut Fuchs* [2] 1967 die Abhängigkeit der Schleifkornbelastung von der Momentanspandicke. Erstaunlich war, dass man sich in der Praxis, Maschinenhersteller als auch Anwender, kaum oder gar nicht für die hier gewonnen Erkenntnisse interessierte. Das Hochgeschwindigkeitsschleifen wurde nicht einmal nach dem Erscheinen der Dissertation von *Dr.-Ing. Konrad Gühring* [13] 1967 umgesetzt und angewandt. Er selbst hat schon wenige Jahre danach gezeigt, wie man beispielsweise HSS-Bohrernuten in wenigen Sekunden in einem Durchgang und in voller Tiefe mit hohen Schnittgeschwindigkeiten schleifen kann – auf seinen eigenen Maschinen. Trotzdem war die grosse Mehrheit immer noch der Meinung, dass das Hochgeschwindigkeitsschleifen keine oder nur in Sonderfällen eine Zukunft hätte. Erst Ende der Achtzigerjahre änderte man dann diese falsche Einschätzung. Aber nicht ganz ohne Grund, denn plötzlich machten zwei neue Zerspanungsverfahren dem Schleifen das Feld streitig, das Hochgeschwindigkeitsfräsen und etwas später das Hartdrehen. Allein mit Schnittgeschwindigkeiten von 120 bis 185 m/s konnten zeitbezogene Abtragsmengen auf Flachprofil- und Rundschleifmaschinen erreicht werden, die sich durchaus mit den anderen Verfahren vergleichen liessen oder, weil beim Schleifen die Werkstoffhärte nur eine untergeordnete Rolle spielt, sogar höher lagen.

An dieser Stelle sollte unbedingt auf die 1971 in Amerika gestartete, internationale Delphi-Umfrage kurz eingegangen werden. Die Delphi-Vergleiche mit Schülern – in modernem Deutsch „PISA-Studien“ – haben in den letzten Jahren im In- und Ausland von sich Reden gemacht. Aber die wenigsten wissen, was da genau dahinter steckt. Die RAND-Corporation in Kalifornien entwickelte in den Sechzigerjahren die Delphi-Methode. Nach ihr werden Expertengruppen mit gezielt zusammengestellten Fragen betreffend ihrem Tätigkeitsbereich konfrontiert und zwar nicht nur einmal, sondern in bestimmten zeitlichen Abständen mehrmals. Stellt man immer wieder dieselben Fragen, ändern sich interessanterweise oftmals die Antworten, weil Erfahrungswerte und besseres Wissen bei jedem Befragten neu mit einfließen. Somit nähern sich die Antworten statistisch und führen gesamthaft gesehen zu einer höheren Wahrscheinlichkeit, bezüglich des Zutreffens, als dies Einzelmeinungen tun würden. In dieser Delphi-Umfrage (1971) wurden 73 Experten zur allgemeinen Entwicklung des Schleifens befragt. Was dabei heraus kam war äusserst interessant [3, 5]:

Nachfolgen ein Auszug über die allgemeine Entwicklung der Schleiftechnik:

- 25 % der gesamten Zerspanung wird ab 1985 durch das Schleifen erfolgen.
- Ab 1990 erfolgen 50 % aller Endbearbeitungen im Anschluss an die Formgebung durch Schleifen.
- Schon 1985 wird es exakte Methoden geben, um ein Schleifergebnis für alle Werkstücke, Schleifscheiben und Schleifmaschinenkombinationen vorauszusagen.
- Auch nach 2000 verdrängen keine neuartigen bzw. verbesserten Bearbeitungsverfahren das Schleifen.

Entwicklung der Technologie des Schleifens:

- In der Praxis wird ab 1990 mit Scheibenumfangsgeschwindigkeiten von 300 m/s gearbeitet.
- Andere Schleifmittel als  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , SiC,  $\text{ZrO}_2$  und Diamant werden ab 1980 eingesetzt.
- Ab 1985 gibt es Schleifscheiben mit konstanten Eigenschaften, deren Korngeometrie und Spanraumvolumen definiert sind.
- Schon ab 1980 gelangen neuartige Scheiben zum Einsatz, welche 3-fach höher als bisher belastet werden können.
- Völlig neue Scheibenstrukturen mit eingelagerten Whiskern oder anderen künstlichen Kristallen kommen ab 1990 zum Einsatz.

Es bleibt dem Leser überlassen, was er von diesen auszugsweise wiedergegebenen Meinungen der befragten Experten hält. Nicht vergessen darf man dabei, dass zu diesem Zeitpunkt lediglich die konventionellen Schleifkornarten bekannt waren, noch niemand mit 300 m/s schleifen konnte und CBN erst gerade auf den Markt gekommen, aber noch keineswegs als Schleifmittel eingeführt war.

Was festgehalten werden sollte sind folgende Tatsachen: Das Schleifen als Präzisions- und Qualitäts-Bearbeitungsverfahren hat sich bis heute gehalten und wird es auch weiterhin tun. Dazu gekommen ist das Leistungs- und Hochleistungsschleifen, beide Verfahren verbunden mit hohen Schnittgeschwindigkeiten und mehrheitlich mit CBN-Schleifscheiben. Da sich praktisch jeder Werkstoff, unabhängig von seiner Härte, schleiftechnisch bearbeiten lässt und das bis zu extremsten Genauigkeiten und Oberflächenqualitäten, wird man auch in der nahen Zukunft kaum auf das Schleifen verzichten können.

Logisch, die maschinenseitigen Ansprüche sind drastisch gestiegen. Nicht nur die verfügbare Leistung an der Schleifspindel oder die hochdynamischen Antriebe von Schlitten, Tischen und Wellen sind damit gemeint. Auch die statische Steifigkeit (Verformungen) und die dynamische Starrheit (Schwingungsverhalten) gehören dazu. Und letztendlich müssen Schleifmaschinen, auf welchen Hochgeschwindigkeitsprozess realisierbar sein sollen, hohe Sicherheitsbedingungen uneingeschränkt erfüllen.

Daneben wurde selbstverständlich auch die Entwicklung der Schleifscheiben enorm forciert. Die konventionellen und die hochharten Schleifstoffe sind gleich geblieben, aber bezüglich der Bindungen haben einige Scheibenhersteller grossartige Rezepturen zusammengestellt, welche nur noch am Rande mit den ehemaligen Glasbindungen etwas zu tun haben. Weil hochharte Schleifstoffe (Diamant und CBN) in keramischer Bindung die üblichen Ofentemperaturen von 1100–1250 °C nicht ertragen würden, mussten so genannte „Niederbrandbindungen“ kreiert werden, welche ab etwa 500 °C im Ofen die volle, ausgehärtete Festigkeit erreichen. Die Kunstharzbindungen werden in zunehmendem Masse von diesen keramischen Spezialbindungen verdrängt, weil letztere nicht nur anders im Prozess reagieren, sondern nach dem Konditionieren geöffnet werden müssen. Dagegen haben nach wie vor die spröden Bronzebindungen und die galvanischen Bindungen ihren festen Platz in der modernen Präzisionsschleiftechnik.

Man spricht übrigens nicht mehr vom Abrichten oder Profilieren, sondern generell vom Konditionieren. Unter diesen Begriff fallen alle Scheibebearbeitungsverfahren, sei es mit stehenden oder mit bewegten bzw. drehenden Werkzeugen. Zumal Schleifscheiben die einzigen Werkzeuge sind, welche sich verkleinern während ihrer Einsatzdauer, sofern sie aus konventionellen oder aus keramisch gebundenen hochharten Schleifstoffen bestehen, ist es verständlich, dass das Konditionieren – schon der dafür benötigten Zeit wegen – auch immer mit den prädestiniertesten Werkzeugen durchgeführt werden sollte. Schleifscheiben werden kleiner, o. k. aber es sind gleichzeitig die einzigen Werkzeuge, welche sich über den gesamten Nutzungsbereich immer wieder neu „in Form“ bringen lassen.

Kombiniert man die heute gebotenen Möglichkeiten mit einem ausreichend guten schleiftechnischen Grundwissen, so stehen der Lösung von schwierigsten Schleifaufgaben kaum noch Hindernisse im Weg.

In dieser Einleitung wurden viele Dinge angesprochen, welche dem Neuling noch unbekannt sein dürften, dem Praktiker und Technologen aber durchaus ein Kopfnicken oder gar ein Lächeln entlocken könnten. Die folgenden Kapitel führen in gut verständlicher Weise durch die Grundlagen der Schleiftechnologie. Grundlagen, die wie das Einmaleins oder das Alphabet zum täglichen Leben des Schleifpraktikers gehören und eine breite Anwendungsmöglichkeit bieten.

Interessant sind drei Tatsachen, welche das Schleifen in der Anwendung immer wieder „bremsen“: Erstens haben nach wie vor zu viele Anwender Berührungsängste mit dem Kenntnisstand über die moderne Schleiftechnik und dessen Umsetzung in der Praxis. Zweitens hätte man wissenschaftliche Erkenntnisse bereits in den Sechzigerjahren anwenden können und drittens sind die grundlegenden physikalischen Zusammenhänge über die Schleiftechnologie schon Ende der Achtzigerjahre so weitreichend erarbeitet und bekannt gewesen, dass beim Schleifen keineswegs mehr von einem Verfahren gesprochen werden konnte, welches von Fall zu Fall nur durch Versuche lösbar sei. Ganz im Gegenteil, längstens könnten die meisten Anwendungen schon im Voraus berechnet und mit grosser Sicherheit bereits auf hohem Niveau gefahren werden. Setzt man ferner beispielsweise die von *H. W. Ott* [12] schon 1985 entwickelten Schleifprogramme dazu ein, dann lassen sich alle Standardschleifprozesse am Schreibtisch planen und – mit denselben Programmen – an der Maschine noch optimieren. Die dabei erstellten Ausdrucke enthalten gleichzeitig alle relevanten Prozessdaten, wodurch jederzeit die problemlose Reproduzierung möglich ist. Und hier noch eine Schlussbemerkung: Nichts ist schwieriger, zeitaufwändiger und auch teurer, als eine nicht genügend protokollierte Schleifaufgabe nach einer gewissen Zeitspanne rekonstruieren zu wollen. Besonders bei fehlenden schriftlichen Unterlagen und/oder wenn ein tüchtiger Operateur seinen Arbeitgeber verlässt und das vielleicht über Jahre sich selbst angeeignete Wissen mitnimmt, schlagen die auftretenden Probleme gewaltig zu Buche.

Sollten Sie Fragen zum Schleifen ganz allgemein oder im Zusammenhang mit Schleifscheiben haben, können Sie mich unter meiner E-Mail-Adresse erreichen.

*Markus Meister*

meister-markus@bluewin.ch

Beschreiben Sie kurz Ihr Problem und ich werde versuchen, Ihnen in nützlicher Frist eine Antwort zu übermitteln. Vergessen Sie bitte deshalb nicht, auch Ihre E-Mail-Adresse anzugeben.

Danksagung: An dieser Stelle möchte ich Herrn Helmut W. Ott für seine fachlich kompetente Unterstützung danken. Immer wenn es darum ging, bestimmte Zusammenhänge zwischen den Einflussgrößen etwas genauer zu erklären, konnte ich auf seine Hilfe in jeder Weise zählen.