

# 5. Schleifen

## 5.1 Allgemeines

Schleifen zählt zu den Zerspanverfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide und wird zur Endbearbeitung von Bauteilen mit hohen Genauigkeitsanforderungen eingesetzt. Man unterscheidet zwischen:

- Außenrundschleifen (Längsschleifen, Einstechschleifen)
- Innenrundschleifen
- Flachsleifen (Umfangsschleifen, Stirnschleifen)
- Spitzenlosschleifen
- Trennschleifen
- Bandschleifen
- Sonderschleifverfahren (Werkzeugschleifen, Gewindeschleifen, Zahnflankenschleifen)

Die üblichen Einstellgrößen beim Schleifen betragen:

- Schnittgeschwindigkeit  $v_c = 10-80$  m/s (bei Keramikscheiben im Durchschnitt 45 m/s)
- Zustellung  $a_p = 5-100$   $\mu\text{m}$  beim Pendelschleifen und  $a_p = 0,2-1$  mm beim Tiefschleifen.

Die üblichen Oberflächenqualitäten beim Schleifen von geschmiedeten Aggregatebauteilen liegen bei  $R_z = 2-3$   $\mu\text{m}$  (Streuung  $\pm 0,5$   $\mu\text{m}$ ; IT-Qualitäten 5-6). Gegenüber Verfahren mit geometrisch bestimmter Schneide sind beim Schleifen die Werte für die Welligkeit (ca. 1-1,5  $\mu\text{m}$ ) und sonstige Formfehler deutlich günstiger.

### 5.1.1 Aufbau der Schleifscheiben

Eine Schleifscheibe besteht aus dem eigentlichen Schneidstoff (Korn), Bindung und Porenraum (Bild 71). Folgende Schneidstoffe werden hauptsächlich für die Stahlbearbeitung verwendet:

- NK-Normalkorund (95-97%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) für niedriglegierte Stähle (Schruppen)
- EK-Edelkorund, weiß (99,9%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) für Präzisionsschliff beim Rund- und Flachsleifen
- EKd-Edelkorund, rosa (über 99%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 0,2-0,3%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) für Flachprofilerschleifen
- HK-Normalkorund mit Edelkorund (98%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) für unlegierten und niedrig legierten Stahl
- FF-Rubinkorund (98%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 2%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) für hochlegierte Stähle
- CBN (kubisches Bornitrid) für legierte und gehärtete Stähle  $> 45$  HRC.

Nach der Festlegung der Kornart in Abhängigkeit des zu bearbeitenden Materials (s. oben) erfolgt als nächster Schritt die Wahl der geeigneten Korngröße. Diese ist ausschlaggebend (u. a.) für die Zerspanleistung oder das Erreichen geforderter Oberflächenqualitäten. Die Korn-

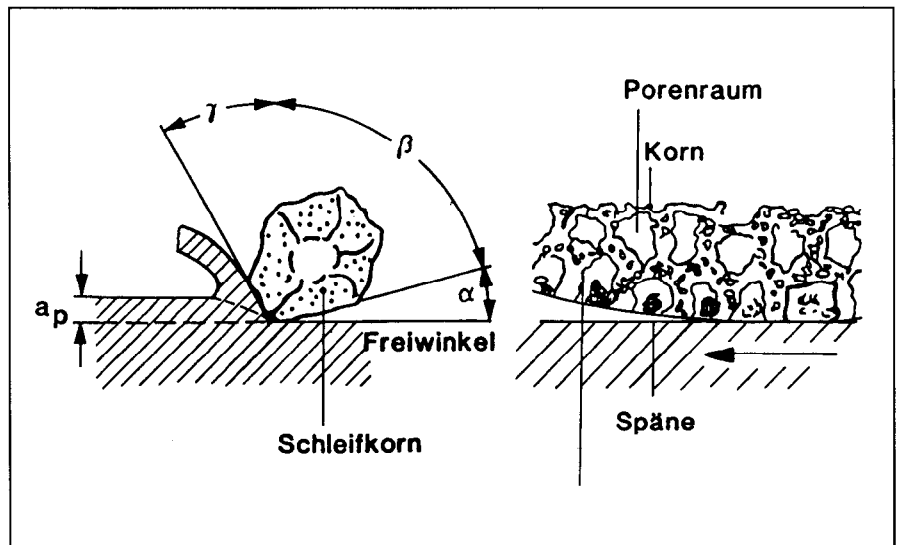


Bild 71: Schleifkörper

größe wird in der Einheit „Anzahl Maschen je inch Seitenlänge eines Siebes“ gemessen, d. h. je höher der Meßwert, desto feiner das Korn. Für hohe Abtragsleistungen beim Grobschliff wählt man entsprechend grobe Körnungen, bei ho-

hen Anforderungen an die Oberflächen-güte feinere Korngrößen. Zur Erreichung des gewünschten Rauigkeitswerts ist oft eine Unterteilung der Schleifoperationen in mehrere Stufen mit steigender Kornfeinheit notwendig:

Bearbeitung	Korntiefe $R_z$ ( $\mu\text{m}$ )	Körnung	Korn-Nenndurchmesser ( $\mu\text{m}$ )
Vorschleifen	5 - 15	20 - 36	1200 - 500
Fertigschleifen	1,5 - 5	46 - 80	420 - 180
Feinschleifen	0,5 - 1,5	100 - 200	150 - 70
Feinstdschleifen	0,2 - 0,5	220 - 600	70 - 15

Die Bindung bestimmt die Haftfestigkeit eines Schleifkorns im Schleifkörperverband. Grundsätzlich unterscheidet man organische und anorganische Bindungen. Zu den ersten zählen u. a. Kunstharz-, Gummi- und Schnellackbindung. Anorganisch sind z. B. die Keramik-, Silikat- und Magnesitbindung. Daneben gibt es auch noch metallische Bindungen, wie z. B. aus Bronze.

Der Härtegrad eines Schleifkörpers wird mit den Buchstaben A-Z nach DIN 69 100 bezeichnet. A bedeutet sehr weich, Z sehr hart. Die Härteangabe ist vollkommen unabhängig von der Härte des Schleifkorns. Die Schleifkörperhärte wird definiert durch die Kraft, mit der das einzelne Korn im Schleifkörperverband gehalten wird. Bestimmt wird diese Haftfestigkeit durch den Anteil der Bindung am Gesamtvolumen des Schleifkörpers, durch die Bindung und die Korndichte. Im Idealfall ist die Bindungskraft so eingestellt, daß die Schleifkörner nach Verlust ihrer Schneidfähigkeit freigegeben werden und nach deren Ausbrechen

neue Schneidspitzen zum Eingriff kommen. Hier spricht man auch von einem Selbstschärfeffekt des Schleifkörpers. Schwierig zerspanbare Werkstoffe haben bekanntlich eine größere Abnutzung oder Abstumpfung des Korns bei relativ geringen Schnittdrücken zur Folge, wogegen leicht zerspanbare Werkstoffe bei nur geringen Verschleißerscheinungen am Schleifkorn oft größere Schnittdrücke erzeugen. Um bei größeren Schnittdrücken einen unnötigen Kornverlust zu vermeiden, sind härtere Scheiben, d. h. solche mit höherem Härtegrad zu wählen. Andererseits treten bei relativ kleinen Zustellwerten und Vorschüben kleinere Schnittdrücke bei relativ großer Verschleißbeanspruchung auf. Es muß daher ein niedriger Härtegrad gewählt werden, weil andernfalls die auftretenden Schnittdrücke nicht ausreichen, um das stumpf gewordene Korn aus der Schleifscheibe herauszubringen. Ein abgestumpftes Korn, das nicht herausbricht, hat zur Folge daß eine unzulässige Erwärmung an der Wirkstelle

auftritt und Gefügebeeinflussungen wie z. B. Weichhaut oder Schleifrisse auftreten können. Die Wahl des richtigen Härtegrades erfordert viel Erfahrung. Sie ist entscheidend für ein optimales Schleifergebnis. In der Serierfertigung werden Werkstücke nach dem Schleifen durch optische Beurteilung beim „Fluxen“ und „Ätzen“ auf thermische Schleifschäden hin überprüft.

Die Struktur bzw. das Gefüge einer Schleifscheibe wird durch die Zahlen 0 bis 14 (sehr dicht bis sehr porös) nach DIN 69 100 beschrieben. Die Zahl gibt Aufschluß über den Anteil des Porenvolumens am Gesamtvolumen des Schleifkörpers sowie der Porengröße. Der Porenraum hat die Aufgabe, den Materialabschliff in der Kontaktzone Werkstück/Schleifkörper aufzunehmen und abzuführen. Außerdem wird der Schleifstelle Kühlflüssigkeit zugeführt. Daher werden teilweise Ausbrennstoffe bei der Schleifscheibenherstellung dazugesetzt, die rückstandsfrei verbrennen und hochporöse Gefüge erzeugen.

Zur Schleifscheibenherstellung werden zwei Verfahren angewendet, das Gieß- und das Preßverfahren. Die meisten Schleifscheiben werden heute nach dem Preßverfahren hergestellt. Hydraulische Pressen verdichten die Masse (Bindung und Körner; ggf. mit Porenbildner) auf ein vorgegebenes Volumen. Anschließend werden die gepreßten Schleifscheiben getrocknet. Das Brennen der Schleifscheiben erfolgt anschließend bei Temperaturen von 900—1300°C.

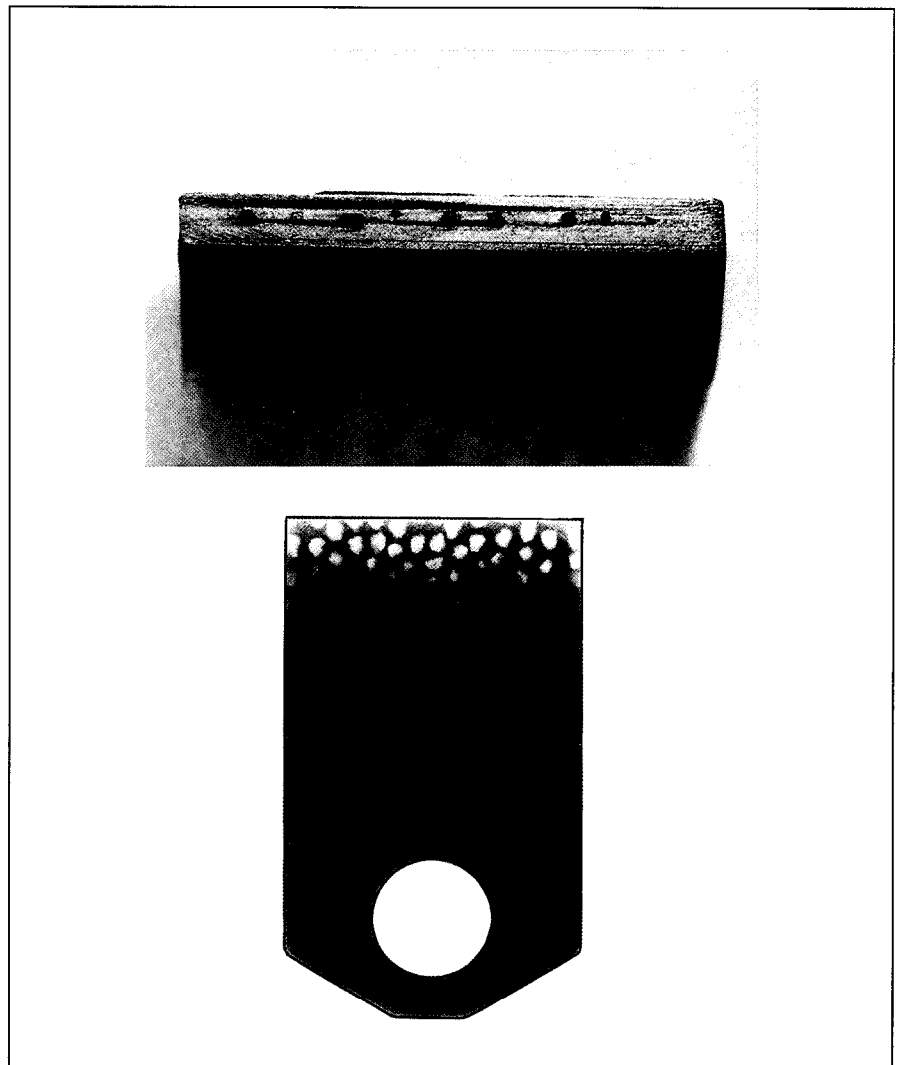


Bild 72: Vielkornabrichter

### 5.1.2 Abrichten

Die Aufgaben des Abrichtens sind:

- Herstellen einer bestimmten Schleifscheibentopographie
- Entfernen zugesetzter Schichten
- Rundlauf erzeugen
- Erzeugen eines gewünschten Profils.

Als „Schneidstoff“ zum Abrichten verwendet man Diamant, entweder als Einkorn- oder Vierkornabrichter. Im erstgenannten Fall kommt wegen der benötigten Größe nur Naturdiamant in Frage. Dieser Diamant ist in einem schaffförmigen Werkzeuggrundkörper eingelassen und wird an der Schleifscheibe entlang geführt. Zu den Vielkornabrichtern zählen der „Igel“ (schaffförmiges Abrichtwerkzeug mit mehreren kleinen Diamanten, Form ähnlich wie beim Einkornabrichter) und die „Fliese“. Bei der „Fliese“ werden in mehreren Schichten Diamantkörner in einen flachen rechteckförmigen Grundkörper gesetzt (Bild 72). Nach dem Verschleiß der ersten Diamantreihe in der Fliese kommen die nächsten Diamanten zum Einsatz. Mit Fliesen anstelle von Einkorndiamanten lassen sich deut-

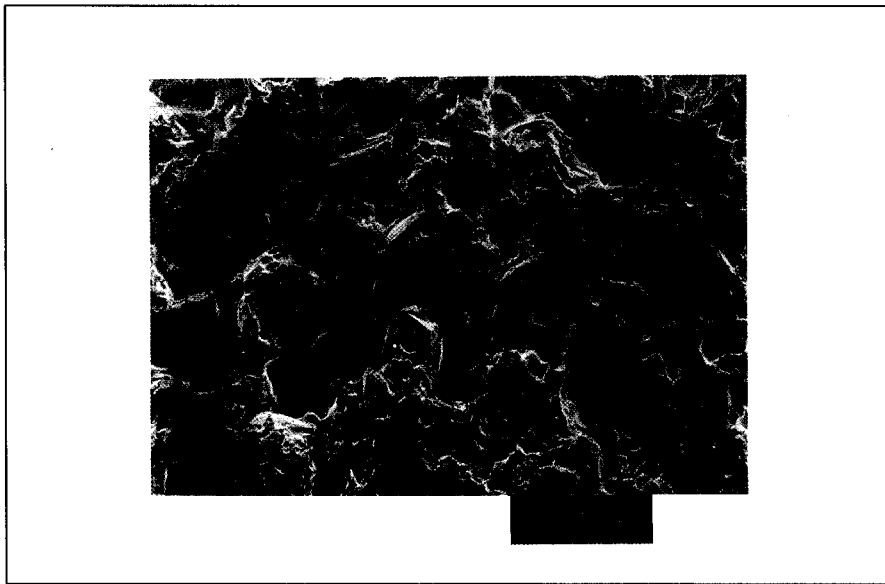
liche Werkzeugkostenvorteile (Einsparungen bis zu 70%) erzielen. Eine weitere Möglichkeit zum Abrichten von Schleifscheiben stellen Diamantrollen dar. Aufgrund der relativ hohen Kosten für ein derartiges Abrichtwerkzeug und der notwendigen maschinellen Voraussetzungen ist im Einzelfall zu klären, ob Diamantrollen wirtschaftlich eingesetzt werden können. Bei allen Abrichtverfahren ist für ausreichende (hinsichtlich Menge und Druck) sowie zielgerichtete Kühlung zu sorgen. Häufig sind schlechte Schleifergebnisse und hoher Verbrauch von Abrichtwerkzeugen die Folge unzureichender Kühlung beim Abrichtvorgang.

### 5.2 Einfluß des Gefüges auf die Schleifbarkeit

Aus Grundsatzuntersuchungen (WZL/Aachen) ist bekannt, daß bei Einkornritzversuchen unterschiedliche Verschleiß-

wirkungen durch verschiedene Wärmebehandlungsvarianten auftreten. Untersucht wurden ein C 135 vergütet 860 HV, ein C 135 normalisiert 390 HV, ein C 135 gegläht 220 HV und  $\alpha$ -Eisen 116 HV. Die Ritzversuche ergaben beim C 135 N den geringsten Werkzeugverschleiß bzw. die größte Ritzlänge. Deutlich höher ist die Verschleißwirkung durch den weichgeglühten C 135, gefolgt vom vergüteten C 135. Am ungünstigsten erwies sich beim Ritzten  $\alpha$ -Eisen.

Ein Beispiel aus der Praxis: Es zeigt sich beim Schleifen von gehärtetem Stahl — wie zu erwarten ist — kein Unterschied in der Zerspanung, egal, ob das Schmiedeteil vorher im vergüteten oder im kontrolliert kontinuierlich abgekühlten Zustand vorlag. Die Endbearbeitung von Nockenwellen aus Cf 53 BY oder Kurbelwellen aus C 38 mod. BY zeigt nach dem Härten keine unterschiedliche Verschleißbeanspruchung der Schleifscheibe im Vergleich zu den früher verwendeten konventionell vergüteten Schmiedeteilen.



**Bild 73:** Topographie CBN-Schleifscheibe

### 5.3 Schleifen mit CBN

Das kubische Bornitrid wurde im Jahr 1962 in den USA entwickelt und 1969 unter der Handelsbezeichnung BORA-ZON in den Handel gebracht. CBN wird ähnlich wie synthetischer Diamant durch Hochdruck-Hochtemperatur-Verfahren hergestellt. Kubisches Bornitrid kommt in der freien Natur nur als hexagonales Ausgangsmaterial vor. CBN ist nach Diamant der zweithärteste Stoff auf der Erde. Als Schleifmittel hat kubisches Bornitrid sowohl in gebundener, als auch in loser Form große Bedeutung erlangt. Allein die Kornform mit ihren scharfen Ecken und Kanten macht CBN zu einem Schleifmittel mit äußerst „kühlschleifenden“ Eigenschaften (s. a. Bild 73). CBN hat gegenüber Diamant den Vorteil, daß es zu den Bestandteilen des Stahls keine chemische Affinität aufweist und es dabei nicht zu einer Karbidbildung, wie beim Schleifen von Stahl mit Diamant, kommen kann. Damit ergibt sich für CBN ein breites Anwendungsgebiet bei der Feinbearbeitung von Einsatz- und Vergütungsstählen. Schmiedeteile können 2–3mal schneller als mit konventionellen Schleifstoffen bei gleichzeitig längerer Standzeit der CBN-Schleifscheiben bearbeitet werden. CBN wird in Kunstharz-, Metall-, galvanischer und neuerdings auch in keramischer Bindung angeboten. Aufgrund der hohen Kosten für CBN, sollten die Schleifkörper möglichst lange in der Bindung gehalten werden. Jedoch ist eine starke Erwärmung der Wirkstelle durch abgeflachte, drückende Schneidkörner zu vermeiden. In Bild 73 ist die Schleifscheibenoberfläche einer CBN-Scheibe mit herausragenden Körnern zu

sehen. Für den Einsatz von CBN sind die keramischen Bindungen zu empfehlen. Die keramische Bindung ist stabiler als eine Kunstharzbindung und ermöglicht ein leichteres Abrichten. Das Zurücksetzen der Bindung bei Kunstharzbindung (durch Schärfe mit Korundblock) entfällt. Bei großen Schleifscheibendurchmessern wäre eine Voll-CBN-Scheibe zu teuer. In diesen Fällen läßt sich eine äußere dünne Schicht auf einen Grundkörper aufbringen. Die Zerspanungsleistungen sind hoch. Die Werkzeuge sind jedoch nicht mehr abrichtbar.

Zum Abrichten von Voll-CBN-Schleifscheiben haben sich rotierende Vielkornabrichter (Diamanttopfscheiben) bewährt. Durch die Entwicklung spezieller keramischer Bindungen ist der automatisierte Einsatz von CBN-Schleifscheiben in der Serienfertigung möglich geworden. Der hohe Kaufpreis dieser Werkzeuge erfordert auf den Schleifstoff abgestimmte Maschinen, Steuerungen und Abrichtverfahren. Einen wesentlichen Einfluß auf die Standzeit hat die Schnittgeschwindigkeit. Aufgrund der abnehmenden Spannungsdicke, die einen geringeren Bindungsabrieb und kleinere Zerspankräfte zur Folge hat, wird mit steigender Schnittgeschwindigkeit sowohl der Werkzeugverschleiß reduziert, als auch eine Verbesserung der Oberflächengüte erzielt. Der Einsatz von Mineralöl gegenüber Emulsion führt zu einer deutlichen Verbesserung des Verschleißverhaltens, da eine hydrodynamische Trennung zwischen Span und Bindung erreicht werden kann. Bei der Kühlschmiermittelzuführung ist unbedingt darauf zu achten, daß unter hohem Druck das Kühlschmiermittel, ggf. durch

speziell konstruierte und angeordnete Düsen, auch wirklich an die Wirkstelle gelangt. Nur so können Maß- und Formabweichungen, Brandflecken, Weichhaut, Schleifrisse und vorzeitiger Werkzeugverschleiß vermieden werden.

#### 5.3.1 Einsatz von CBN beim Innenrunds Schleifen

Das Schleifen ist nach wie vor das komplizierteste und am wenigsten genau von der Wissenschaft beschriebene Zerspanverfahren. Das Zusammenwirken der undefiniert angeordneten Schleifkörner mit der Bindung und dem Porenraum sowie die Wahl der richtigen Abricht- und Schnittbedingungen erfordern in der Regel die Optimierung an der Einsatzstelle.

Beispielhaft soll an dieser Stelle die Anwendung neuerer Technologien beim Innenrunds Schleifen — stellvertretend für andere Schleifverfahren — aufgezeigt werden:

Innenrunds Schleifen ist ein schwieriges und meist mit hohen Fertigungskosten verbundenes Zerspanverfahren. Da der Schleifscheibendurchmesser stets kleiner als der des Werkstücks ist, kommt das Einzelkorn relativ oft zum Eingriff, dadurch wird die Schleifscheibe beim Innenrunds Schleifen wesentlich stärker auf Verschleiß beansprucht als beim Außenrunds Schleifen. Dies wirkt sich negativ auf die Maßgenauigkeit des geschliffenen Werkstücks aus und erhöht die Kosten für Werkzeug und Werkzeugwechsel. Ein weiteres Problem beim Innenrunds Schleifen ist die weiche Abstützung des Werkzeugs. Bedingt durch die hohen Drehzahlen der Schleifspindeln sind die Lager und damit der Spindel durchmesser nach oben begrenzt, so daß die Steifheit des Systems verhältnismäßig gering ist. Die auftretenden Kräfte beim Schleifen führen zu Auslenkungen zwischen Schleifscheibe und Werkstück. Dadurch werden Form- und Maßabweichungen am Werkstück hervorgerufen. Der relative lange Eingriffsbogen und die Schwierigkeit, genügend Kühlmittel an die Wirkstelle zu bringen, erhöhen die thermischen Belastungen von Werkzeug und Werkstück und erschweren eine ausreichend schnelle Spanabfuhr. Weiterhin hängt die Qualität der geschliffenen Teile in besonderem Maße von den bei der Bearbeitung auftretenden Schwingungen ab. Untersuchungen in der Praxis haben ergeben, daß auch unter den aufgezeigten schwierigen Bedingungen beim Innenrunds Schleifen mit CBN-Schleifscheiben deutliche Fertigungsvorteile erzielt werden können. Der CBN-Einsatz wurde im folgenden Beispiel an einem Schraubenrad aus 16 MnCr5 E erprobt (s. a.

Bild 74, Anordnung von Werkstück und Schleifscheibe). Die Werkstückhärte beträgt HRC 60 +/- 2. Der Toleranzbereich des Durchmessers beträgt 16,958 mm—16,944 mm. Die Rauhtiefe soll  $R_z = 6,3 \mu\text{m}$  nicht überschreiten. Das Bild 75 verdeutlicht die hohe Produktivität der eingesetzten CBN-Scheibe. Gegenüber der bisherigen Edelmetallscheibe wurde die 140fache Standmenge mit über 11 000 gefertigten Werkstücken erreicht. Eine andere Kennzahl, das sog. G-Verhältnis (abgeschliffenes Werkstückvolumen/verbrauchtes Schleifscheibenvolumen) ergibt für die CBN-Scheibe einen G-Wert von 1625 gegenüber einem G-Wert von 9 bei der Korundscheibe.

Die Bearbeitung erfolgte auf einer Innerrundschleifmaschine mit 5 kW Antriebsleistung bei einer maximalen Drehzahl von 60 000 U/min. Die Schnittgeschwindigkeit wurde auf 39 m/s eingestellt. Als Kühlschmiermittel kam eine 3%ige Emulsion unter 2 bar Druck zum Einsatz. Abgerichtet wurde die Scheibe jeweils nach ca. 250 Teilen mit der Diamant-Topscheibe, die von einer frequenzregelten Spindel angetrieben wird.

Als Einsatzschwerpunkte des CBN-Schleifens bieten sich die Feinbearbeitung von geschmiedeten Nockenwellen und Kurbelwellen an. Voraussetzung dafür sind geeignete Werkzeugmaschinen und Steuerungen sowie Abrichtverfahren.

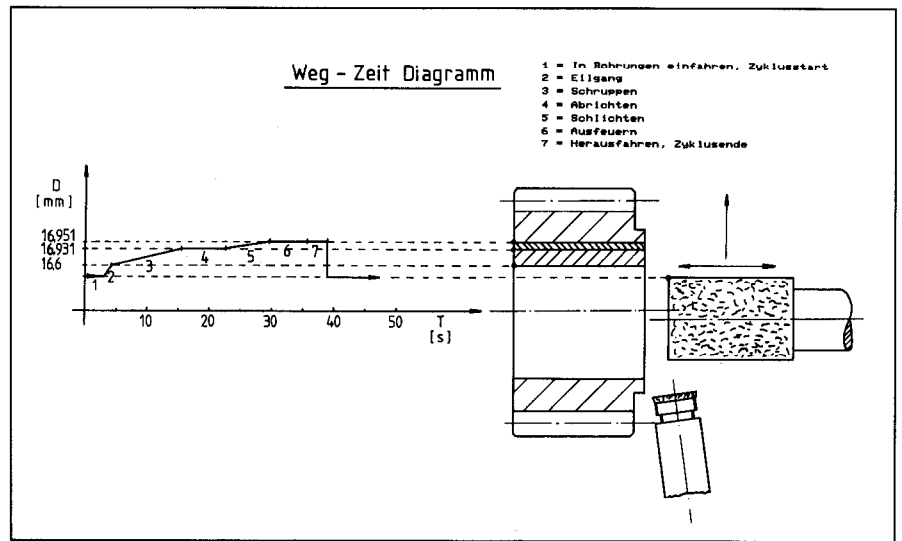


Bild 74: Innerrundschleifen von Schraubenrädern

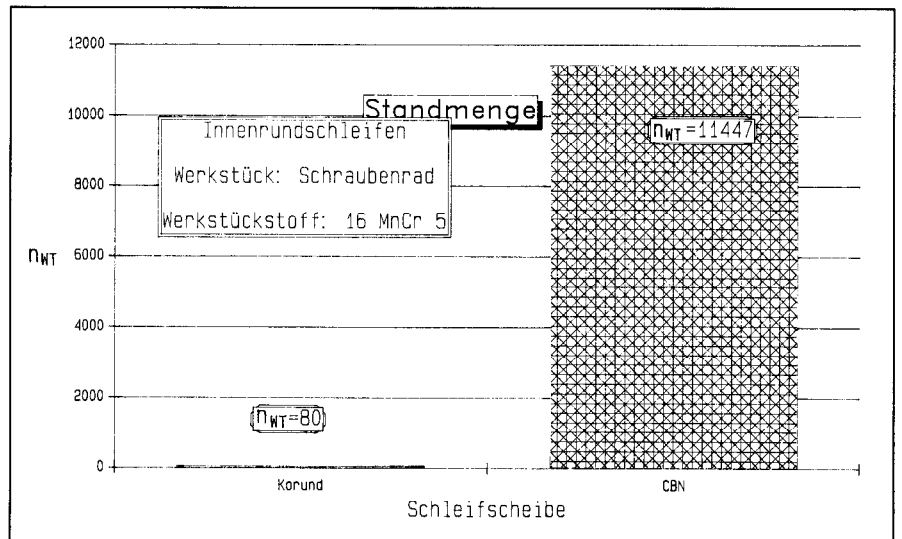


Bild 75: Leistungssteigerung durch CBN beim Schleifen

## 5.4 Praktische Tips

### Schleifprobleme

- Maßfehler
  
  
  
  
  
  
  
  
  
  
  
- Formfehler
  
  
  
  
  
  
  
  
  
  
  
- Rauhtiefe zu hoch
  
  
  
  
  
  
  
  
  
  
  
- Verschleiß zu groß
  
  
  
  
  
  
  
  
  
  
  
- Rattermarken
  
  
  
  
  
  
  
  
  
  
  
- Brandflecken/Schleifrisse

### Abhilfe

- Schleifzugabe verringern
- Kühlung verbessern
- Scheiben auswuchten
- Scheibe öfter abrichten
- Maschine überprüfen
  
  
  
  
  
  
  
  
  
  
  
- Werkstücke vor dem Schleifen richten
- Schleifscheibe optimieren
  - feineres Korn wählen
  - Scheibenhärte vergrößern
  - dichteres Scheibengefüge wählen
- Abrichteinheit überprüfen, s. a. unter Maßfehler
  
  
  
  
  
  
  
  
  
  
  
- Schnittgeschwindigkeit erhöhen
- Einstechgeschwindigkeit reduzieren
- Ausfeuerzeit verlängern
- Schmierölanteil erhöhen
- Korngröße reduzieren
- härtere Bindung wählen
- Abrichtgeschwindigkeit reduzieren
- Wirkbreite vom Abrichtwerkzeug erhöhen
  
  
  
  
  
  
  
  
  
  
  
- härtere Scheibe verwenden
- offenere Scheibe verwenden
- Einstechgeschwindigkeit reduzieren
- Vorschub reduzieren
- Kühlung verbessern
- Schnittgeschwindigkeit erhöhen
  
  
  
  
  
  
  
  
  
  
  
- Härte der Scheibe reduzieren
- Scheibe nachwuchten
- Spannung vom Werkstück überprüfen
- Abrichtwerkzeug wechseln
- Kühlung verbessern
- Abrichtvorrichtung überprüfen
- Schleifspindel überprüfen
- Führungsbahnen überprüfen
- Schnittgeschwindigkeit reduzieren
  
  
  
  
  
  
  
  
  
  
  
- Aufmaß verringern
- Fettgehalt beim Kühlschmiermittel erhöhen
- Kühlung verbessern
- Härte der Scheibe reduzieren
- offeneres Gefüge verwenden
- Abrichtbetrag vergrößern
- Abrichteinheit überprüfen
- Einstechgeschwindigkeit reduzieren
- Schnittgeschwindigkeit reduzieren
- Abrichtgeschwindigkeit erhöhen
- Abrichtwerkzeug mit kleinerer Wirkbreite verwenden