

# GRUNDSÄTZLICHE UND TECHNISCHE FRAGEN DER ERZEUGUNG VON SCHLEIFKÖRPERN AUS KERAMISCH GEBUNDENEN KORUNDKÖRNERN

Von

M. MOSER

Lehrstuhl für Chemische Technologie, Technische Universität Budapest

(Eingegangen am 26. August 1965)

Vorgelegt von Prof. Dr. L. VAJTA

## Historischer Überblick

Sucht man nach dem Ursprung des Schleifens, muß man seinen Blick über viele Jahrtausende hinweg, weit hinein in die prähistorischen Zeiten richten [1], betrachtet man jedoch die Erzeugung künstlicher Schleifwerkzeuge, braucht man kaum mehr als hundert Jahre zurückzublicken.\*

Während die jahrtausendealten Erfahrungen der Feiltechnik die allgemein bekannte Grundlage der jeweiligen Entwicklung bildeten, umgibt die Erzeugung der Schleifwerkzeugen zum großen Teil auch heute noch der Schleier des Geheimnisses.

Nach den Funden in der Höhle von La Madelaine formte der Mensch seine Werkzeuge, die er zum größten Teil aus Knochen und Renntiergeweihen herstellte, bereits in der letzten Stufe des Jungpaläolithikums, (d. h. von etwa 50 000 bis 15 000 v. u. Z.) durch Feilen.

Das Mesolithikum (15 000—5 000 v. u. Z.) kennt bereits bearbeitete Äxte und Beile, und eine weitere Entwicklung erfuhr die Bearbeitungstechnik im Neolithikum (5000—2100 v. u. Z.). Als Werkstoff für die Feilwerkzeuge dienten Sandstein, quarzitisches Konglomerat und sonstige Hartgesteine. Die erste »Schleifmaschine« ist etwa 6000 Jahre alt. Ein scharfer Stein, am Ende einer hölzernen Pendelvorrichtung befestigt, »zersägte« einen unter das Pendel gelegten Steinklotz.

In Ägypten war das Glasschleifen bereits um 2000 v. u. Z. bekannt. Es wurden auch Bronz- und Eisengeräte bearbeitet, an Wandgemälden von Grabkammern finden sich Darstellungen von Sklaven, die Steingeschirr mit Sand oder Naxos-Schmirgel (verunreinigter, natürlicher Korund) aushöhlten, der auf eine Holzscheibe gestreut war.

\* Man spricht bei uns vom Schleifen, wenn der bearbeitende Schleifkörper an dem zu formenden Werkstoff, an verhältnismäßig kleinen Flächen mit großer Geschwindigkeit entlanggleitet. Beim Feilen werden größere Oberflächen mit geringerer Geschwindigkeit gegeneinander bewegt. Im Sinne dieser Definition kann also vom Schleifen eigentlich erst seit der Erfindung der Schleifmaschine im heutigen Sinne, d. h. seit Beginn des vorigen Jahrhunderts gesprochen werden.

### Klassisches Altertum

Eines der sieben Weltwunder der Antike, das Grabmal des Königes *Mausolos* in Halikarnassos, war aus ganz genau zugepaßten Marmorplatten gefügt, die mit der bereits erwähnten Steinsäge zugeschnitten und an der Oberfläche poliert worden waren. Die Verschleißwirkung der Steinsäge wurde dadurch erhöht, daß man auf die zu bearbeitende Oberfläche Sand streute. Die Mosaikfußböden der Römer wurden ähnlich wie heute hergestellt. Schon *Plinius* erwähnt, daß Rubinnachahmungen aus Glas durch Ritzen mit dem Wetzstein von echten Steinen unterschieden werden konnten. Gleichfalls bei *Plinius* finden sich Angaben darüber, daß die Schleifsteine (*cotes*) und Schleifkörner zur Verhinderung der Staubbildung mit Wasser oder Öl benetzt wurden (*cotes oleariae*, *cotes aquariae*). Gold wurde mit Hämatit, Silber mit Kreidepulver (*creta argentaria*) poliert. Glas wurde auf hoher künstlerischer Stufe geschliffen, während man zum Schleifen von Holz Fischhäute verwendete

### Mittelalter

Im Mittelalter bediente man sich zum Antrieb von Schleifscheiben der Wasserkraft. Die Waffenschmiede von Solingen arbeiteten um das 13. Jahrhundert an der Wupper in Schleifmühlen mit Scheiben, die durch Wasserräder gedreht wurden. Es wurden größtenteils Säbel, Jagdwaffen, später (im 16. Jahrhundert) auch Messer jährlich zu mehreren tausend Dutzenden bearbeitet [2].

Bei einer Registrierung der Handwerker von Nürnberg im Jahre 1363 sind unter 50 Handwerksberufen auch die Schleifer («*slieffer*») angeführt.

### Neuzeit

Die Grundlagen zum neuzeitlichen Aufschwung wurden von *Leonardo da Vinci* niedergelegt, der unter vielen anderen auch eine Reihe von Maschinen für die Oberflächenfeinbearbeitung von Glas- und Metallbrennspiegeln, für das Schärfen von Nadeln, für das Oberflächenformen und Polieren von Kugeln und Hohlzylindern konstruierte und baute.

Die Erfindung der Vorgänger unserer zeitgemäßen Schleifmaschinen fällt in die neueste Zeit. Bahnbrechend wirkten auf diesem Gebiet *James Watt* (1790), *Alfred Krupp* (1832) sowie *Brown & Sharpe* (etwa 1850).

Zu den ersten Vertretern der künstlichen Schleifkörper wird der Bimsstein gezählt (hochporöses Produkt aus Quarzkörnern, mit Ton gebunden), dessen Erfinder *Joseph Hardtmuth* (Wien 1810) war.

Um 1825 wurden beim Volksstamm der Tamulen in Ostindien Schleifkörper aus natürlichem, zu Pulver unterschiedlich feiner Körnung verarbei-

tetem Korund und aus Lackharz als Bindemittel hergestellt. Das Lackharz wurde dem erhitzten Korundpulver in einem Tongeschirr zugesetzt, worauf man das Gemenge auf eine Steinplatte goß und durch Kneten homogenisierte. Die benötigten Formen wurden mit Eisenwerkzeugen ausgeschnitten, das Lochen der Scheiben erfolgte mittels glühender Kupfer- oder Eisenstäbe.

Die ersten mit Wasserglas gebundenen Scheiben wurden um 1856 erzeugt, die Herstellung von Produkten mit vulkanisiertem Kautschuk als Bindemittel wurde 1857 patentiert.

Die Vorgänger der heutigen keramisch gebundenen Schleifkörper wurden in der Engelsburger Porzellanfabrik (Deutschland) 1861 hergestellt, wo man Quarzsand unterschiedlicher Körnung mit porzellanartigem Bindemittel zu glasharten Scheiben brannte. Die ersten keramisch gebundenen Scheiben aus Korundkörnern erzeugte 1837 *Norton* (Norton Company, Worcester, Mass. U.S.A.) [3].

### Einleitung

Unter Schleifen ist jenes Verfahren der spanenden Formung zu verstehen, bei dem vom Arbeitsstück mittels vieler, verhältnismäßig kleiner, aber scharfkantiger oder spitzer Schleifkörner Späne abgetragen werden.

Die schnelle Verbreitung der Oberflächenbearbeitung durch Schleifen setzte in der zweiten Hälfte des vorigen Jahrhunderts ein, als die ersten brauchbaren künstlichen Schleifkörper erfunden waren. Einen neuen Auftrieb erhielt sie in den letzten Jahrzehnten dank der Steigerung der Schleifleistung, der Oberflächengüte und der Maßgenauigkeit. Heute kann das Drehen, Fräsen, Hobeln, Schaben, ja selbst das Sägen mit Erfolg durch Schleifen ersetzt werden [4].

Entscheidend wirkte sich auf die Entwicklung der Schleifkörperproduktion und der Schleiftechnik die Erfindung der Herstellung des Siliziumkarbids (ACHESON, U.S.A., 1891) und des Elektrokorunds MOYAT und HASSBACHER, Deutschland, 1894) aus [5]. Bei dem hierzulande verwendeten Elektrokorund handelt es sich teils um den sog. Normalkorund mit ca. 95%, teils um Edeltkorund mit ca. 99%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Gehalt. Die häufigsten Begleitkomponenten des  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sind  $\text{CaO}$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ .

Normalkorund wird aus Bauxit, Edeltkorund aus Tonerde, Siliziumkarbid aus Quarzsand und Petrolkoks auf elektrothermischem Wege hergestellt. Die nach dem Schmelzen abgekühlten Blöcke werden zerkleinert und nach Korngrößen klassiert. Schleifkorn wird teils in Pulverform, teils in gebundenem Zustand benützt.

Die überwiegende Mehrzahl der Schleifkörper ist keramisch gebunden, da diese Herstellungsart hochfestes, wärme- und wasserbeständiges Schleif-

material von porösem Gefüge, in gut regelbaren Härte- und Dichtestufen liefert.

Die keramisch gebundenen Schleifkörper sind nach der keramischen Technologie (Mahlen des Bindemittels, Herstellung des Schleifkorn- und Bindemittelgemenges, Formung durch Pressen oder Gießen, Trocknen, Brennen bei etwa 1300 °C, Bearbeitung der gebrannten Produkte auf genaues Maß, Prüfung, Verpackung) hergestellte spanabhebende Werkzeuge, die aus dem Schleifkorn, dem Bindemittel, welches die Schleifkörner in festem Gerüst hält, und aus Luftporen aufgebaut sind. Die kennzeichnendste Eigenschaft dieser Werkzeuge ist ihre Fähigkeit, sich selbst zu schärfen.

Das Selbstschärfvermögen ist einerseits dem Gefüge des Schleifkörpers, andererseits den Eigenschaften des Schleifkorns und der Bindemittel zu verdanken. Beim Schleifen nützten sich die Körner an der Arbeitsfläche des Schleifkörpers ab.

Mit der fortschreitenden Abnutzung wachsen die auf die Körner wirkenden Kräfte an, so daß sich die Körner aus dem Verband teilweise oder gänzlich lösen. Hinter den ausbröckelnden Körnern befinden sich jedoch unberührte, scharfe Körner, so daß sich die Arbeitsfläche des Werkzeuges fortdauernd regeneriert.

Die Vielfalt der zu bearbeitenden Werkstoffe, die verschiedenen Bearbeitungsansprüche und -umstände erfordern Schleifkörper unterschiedlichen Aufbaus. Die Herstellung der benötigten mannigfaltigen Schleifkörper ist durch die Ausnützung der zahlreichen Kombinationsmöglichkeiten gesichert, die die verschiedenen Kornarten und Körnungen, die unterschiedlichen Bindemittelarten und deren Zusammensetzung sowie die Verschiedenheit der Herstellungsart bieten.

In Ungarn waren es Handwerker, die die Erzeugung von Schleifkörpern Ende der zwanziger Jahre aufnahmen. Die hausindustrieartige Herstellung begann in Piliscsaba (Komitat Pest).

Die Unternehmungslust wurde hierbei nicht so sehr durch das fachliche Interesse, als vielmehr durch die günstigen Geschäftsmöglichkeiten angefacht. Die ersten Unternehmer kamen aus den verschiedensten Berufen.

Bei den ersten künstlichen Schleifkörper wurden noch kalte Bindemittel (Sorelzement-Magnesiabinder) verwendet. Ihnen folgten die keramisch gebundenen, und schließlich wurde die Erzeugung von Schleifkörpern mit Gummi- und Kunstharzbindung aufgenommen. Die Erzeugung wurde unter Berücksichtigung der inzwischen gesammelten Erfahrungen nach ausländischem Muster fortgesetzt.

Der rüstungsbedingte Aufschwung ließ die kleingewerblichen Betriebe vor allem in Budapest zu Werken erheblicher Größe anwachsen. Die technologischen Grundlagen der großindustriellen Produktion wurden in Ungarn größtenteils durch die Fa. Mayer & Schmidt, Schleifmittelwerke, Offenbach a. M.,

sowie durch die Keramische Schleifscheibenfabrik Carl Krebs & Riedel, Karlsruhen a. d. Weser, niedergelegt.

Diese Firmen lieferten nicht nur das Schleifkorn und die Bindemittel, sondern übergaben auch die Herstellungsverfahren (samt Rezepten).

Während des zweiten Weltkrieges waren bereits vier bedeutende Schleifscheibenwerke tätig. Im Laufe der Verstaatlichungen wurden drei nach verschiedenen Technologien arbeitende Werke abgestellt, das Gros der Produktion an einer vierten Stelle konzentriert.

### Übersicht über das Schrifttum

Im Vergleich zur spanabhebenden Formung mit praktisch homogenen Metallwerkzeugen geometrisch regelmäßigen Profils ist die Theorie des Schleifens in ihren Einzelheiten zur Zeit noch mangelhaft geklärt. Einer der Gründe hierfür besteht darin, daß die Eigenschaften der Schleifkörper und die Gesetzmäßigkeiten ihres Aufbaues heute noch wenig bekannt sind [6].

Die Eigenschaften der Schleifkörper klarzulegen, ist vor allem die Maschinenindustrie interessiert, doch betrachtet auch diese den Aufbau der Schleifkörper zumeist vom Gesichtspunkt ihrer Geometrie aus. Die Hersteller der Schleifkörper hingegen beschreiben ihre Erzeugnisse verhältnismäßig wenig und in verallgemeinerter Form, ohne auf die wesentlichen Grundlagen der Erzeugung einzugehen.

Die Schleifwerkzeuge sind durch ihre Form, ihre Abmessungen, durch die Qualität und Größe des Schleifkorns, durch die Art der Bindung, durch die Bindungshärte und -dichte gekennzeichnet [7].

Die Heterogenität dieser produktbildenden Phasen, die Vielfältigkeit ihrer Eigenschaften sowie die nicht genau klargelegten Umstände ihrer Anwendung schließen es von vornherein aus, das Wesen der Herstellung und des Arbeitsprinzips der Schleifkörper einseitig von der Erzeugung oder von der Anwendung her zu erkennen. Trotzdem besteht eines der allgemeinsten Merkmale der uns zugänglichen Literatur über die Schleifkörper in der Einseitigkeit, mit der sie den Problemen näherzukommen trachtet. Auf diesem Gebiete brachten erst die letzten Jahre Änderungen, und es ist kein Zufall, daß sich gerade die in der gegenwärtigen industriellen Entwicklung führenden Staaten anschicken, eine umfassende Theorie dieses zeitgemäßesten spanabhebenden Werkzeuges auszuarbeiten und es zu einem handlichen Mittel der Präzisionsbearbeitung zu entwickeln.

Das Schleifen läßt sich nach J. PEKLENIK [8] folgendermaßen kennzeichnen:

1. Die räumliche Verteilung der Schnitten an der Schleiffläche des Schleifkörpers ist zufällig, d. h. nicht bestimmt.

2. Abmessung und Gestalt der Schneiden schwanken innerhalb eines weiten Bereichs.

3. Der Krümmungsradius der Schneiden ist annähernd gleich der Spanstärke.

4. Die Schleifkörner werden durch das Bindemittel elastisch festgehalten; sie verschieben sich während des Schleifens senkrecht und tangential zur Oberfläche.

5. Der Charakter des Verschleißes der Schneiden weicht von dem der sonstigen spanabhebenden Werkzeuge wesentlich ab.

6. Die Spanstärke ist sehr gering.

7. Die Temperatur an den Schneiden ist zeitweilig äußerst hoch.

Diese Feststellungen, die größtenteils auf Versuchsergebnissen des zitierten Verfassers und seiner Mitarbeiter beruhen und die z. Z. als die am allgemeinsten anerkannten Merkmale des Schleifens gelten, illustrieren gleichzeitig die Abweichungen von den übrigen Verfahren der spanabhebenden Formung (vor allem vom Fräsen).

Nach YOSHIKAWA [9] ist die Arbeit des Schleifens und seine gleichzeitige Abnützung auf drei grundlegende Ursachen zurückzuführen (Abb. 1):

1. Verschleiß der Schleifkörner infolge Reibung.
2. Mechanischer Bruch der Schleifkörner (teilweiser Bruch).
3. Zerstörung der Bindemittelbrücken.

Der teilweise Bruch der Schleifkörner ist aus Abb. 1/b ersichtlich. Ihr völliges Ausbrechen wird durch den Bruch der Bindemittelbrücke verursacht (Abb. 1/c). Diese beiden letzteren Erscheinungen werden als abbröckelnder Verschleiß bezeichnet.

Nach den Versuchen von YOSHIKAWA [9] übt der abbröckelnde Verschleiß keinen wesentlichen Einfluß auf die beim Schleifen wirksamen Kräfte aus (sie bleiben bis zu den unerwartet einsetzenden Brüchen der Körner und Bindemittelbrücken gleich); aus diesem Grunde werden sie bei den Untersuchungen über den bröckelnden Verschleiß unberücksichtigt bleiben.

Bei Untersuchung des bröckelnden Verschleißes werden die Elektrokörner und die glasartigen Bindemittel als spröde betrachtet. Die Festigkeit der glasartigen keramischen Werkstoffe hängt von der Dauer der Beanspruchung ab. Die Dauer der Einwirkung der Schleifkräfte beim Abtrennen je eines Spanes liegt bei  $10^{-4}$  sec. Es erscheint begründet anzunehmen, daß beim Entstehen kurzfristig verzögerter Brüche Rißherde, die von Energiefluktuationen der Atome herrühren, eine ausschlaggebende Rolle spielen. Der verzögerte Bruch ist kennzeichnend für kristalline, feste Stoffe — also auch für Korund —, die Wahrscheinlichkeit eines Bruches der Schleifkörner und der Bindemittelbrücken kann also auf Grund der Herdbildungstheorie (Keimbildungstheorie) berechnet werden.

Gemäß Abb. 1 spanen die aktiven Körner der Schleifscheibenoberfläche das Arbeitsstück am Berührungsbogen entlang. Die Brüche entstehen durch die Spannungen, die durch die spanende Kraft geweckt werden. Die Korn- und die Bindemittelbrückenbrüche beim Schleifen können als voneinander

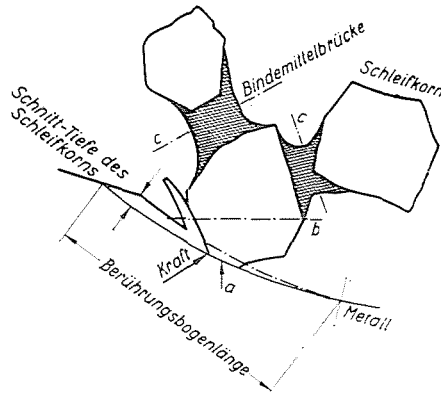


Abb. 1. Einfaches Modell des Schleifkörperverschleißes

- a) Reibungsverschleiß des Schleifkorns
- b) Mechanischer Bruch des Schleifkorns
- c) Bruch der Bindemittelbrücke, d. h. Ausbröckeln des Korns

unabhängig betrachtet werden, d. h. das Maß des bröckelnden Verschleißes kann als Summe dieser beiden Wahrscheinlichkeiten ausgedrückt werden [9], es ist also

$$P_f = \frac{1}{n} A_g \cdot t \cdot \exp(B_g \cdot K_1 \cdot f_g) + A_b \cdot t \cdot \exp\left(B_b \cdot K_2 \cdot \frac{f_g}{V_b}\right) \dots \quad (1)$$

worin

$\frac{1}{n}$  = der Anteil des Rauminhaltes der durch Körnerbruch entstandenen Fragmente am ursprünglichen Körnerrauminhalt;

- $A_g$  u.  $B_g$  = Materialkonstanten der Schleifkörner;
- $f_g$  = die auf die Körner einwirkende Schleifkraft;
- $t$  = Dauer der Beanspruchung;
- $K_1$  u.  $K_2$  = Faktoren, die von der Schleifkornart, von den Kornabmessungen und vom Abstand zwischen den einzelnen Körnern abhängen;

$V_b$  = der Mengenanteil des Bindemittels an dem des Schleifkörpers; sein Kehrwert ist der Bindungsschwäche-Koeffizient.

Zur zahlenmäßigen Deutung der von YOSHIKAWA [9] aufgestellten Beziehungen ist es erforderlich, die Konstanten, die die stoffliche Beschaffenheit, d. h. die Schleifkörner und die Bindemittelbrücken bzw. den Schleifkörper als

Tafel 1

| Schleifkorn                           | Korngröße |            |          |           |
|---------------------------------------|-----------|------------|----------|-----------|
|                                       | Grob      | Mittelgroß | Fein     | Sehr fein |
| Edelkorund = KA                       | 250 (10)  | 80 (30)    | 25 (80)  | 8 (240)   |
| Rosafarbenes Elektrokorund = KR       | 200 (12)  | 63 (36)    | 20 (100) | 6 (320)   |
| Halbedelektrokorund = KF              | 160 (16)  | 50 (46)    | 16 (120) | F40 (400) |
| Normalelektrokorund = KB              | 125 (20)  | 40 (50)    | 12 (150) | F28 (500) |
| Elektrokorund zweiter Qualität = KC   | 100 (24)  | 32 (60)    |          | F20 (600) |
| Grünes Siliziumkarbid = SCZ           |           |            |          |           |
| Schwarzes Siliziumkarbid = SC         |           |            |          |           |
| Siliziumkarbid zweiter Qualität = SCM |           |            |          |           |

solchen kennzeichnen, näher zu betrachten. Die Forschungen des zitierten Verfassers und seiner Mitarbeiter sind sehr bedeutsam, da sie die Gesetzmäßigkeiten des Schleifkörperaufbaues, die physikalisch-chemischen und mechanischen Eigenschaften der Werkzeuge, die Art und Weise ihres Verschleißes und den Schleifvorgang als zusammenhängendes Ganzes behandeln.

Da bei einer zeitgemäßen Fertigung die exakten Arbeits- bzw. Verschleißbedingungen trotz der Vielfalt der Kombinationsmöglichkeiten, die sich aus der Variation der in der Tafel 1 angeführten Faktoren ergeben, sichergestellt sein müssen, ist es unvermeidlich, im Hinblick auf die Kompliziertheit der Probleme bereits bei Behandlung der Literatur sich an ein gewisses System zu halten.

Entsprechend richtet sich die weitere Behandlung des Themas nach folgender Gruppierung:

1. Eigenschaften und Verschleiß der Elektrokorund-Schleifkörner.
2. Keramische Bindemittel.
3. Verhältnis Schleifkorn: Bindemittelphase und ihre räumliche Anordnung (Bindungshärte, Dichte).

### 1. Eigenschaften und Verschleiss der Elektrokorundschleifkörner

a) Die allgemein bekannten Eigenschaften des Korunds ( $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  D<sub>3a</sub>) sind im Schrifttum ausführlich behandelt [10], [11], [12], [13], [14], [15].

Die Ergebnisse der Prüfung von Korundkörnern inländischer Erzeugung sind ebenfalls bekannt [16].

Im Zusammenhang mit der Bindung und dem Verschleiß der Elektrokorundkörner sollen hier vorweg einige ihrer weniger bekannten, besonderen Eigenschaften behandelt werden.



| Bindungshärte |        |      | Gefüge      |        |       | Bindemittel              |      |
|---------------|--------|------|-------------|--------|-------|--------------------------|------|
| Weich         | Mittel | Hart | Geschlossen | Mittel | Offen |                          |      |
| D             | I M    | Q V  | 0           | 4      | 7     | Keramisch                | = Ke |
| E             | J N    | R W  | 1           | 5      | 8     | Bakelit                  | = Ba |
| F             | K O    | S X  | 2           | 6      | 9     | Gummi                    | = Gu |
| G             | L P    | T Y  | 3           |        | 10    | Schellack                | = Se |
| H             |        | U Z  |             |        | 11    | Wasserglas               | = Si |
|               |        |      |             |        | 12    | Magnesium-<br>oxychlorid | = Mg |

Die Bedingungen für die Kristallisation der normalen Elektrokorundkörner hängen in hohem Maße von den grundlegenden technologischen Faktoren der Korunderzeugung (Zusammensetzung des Rohstoffes, Schmelzmethode, elektrische Parameter des Schmelzens) ab [17]. Die Mikrostrukturen der unter verschiedenen Bedingungen geschmolzenen Korundblöcke unterscheiden sich von einander weitgehend. FILONENKO [17] klassifiziert die Mikrostrukturen auf Grund der Korundkristallabmessungen. Der eine derartige Gefügetyp z. B. besteht aus kleinen (vornehmlich 0,4–1,0 mm großen), mehr oder weniger regelmäßig begrenzten, dickplattenförmigen  $\alpha$ -Korundkristallen; die erstarrte Restschmelze setzt sich zwischen den Korundkristallen ab. Ein anderer Typ besteht aus Korundanhäufungen, die größer sind als 2 mm und keine regelmäßigen Grenzflächen besitzen, in deren Innerem sich die Einschlüsse der Restschmelze befinden.

Nach KARLIN [18] soll sich die Mikrostruktur des edlen Elektrokorunds durch verschiedene Metalloxydzusätze gleichmäßiger gestalten lassen.

Titan-, Chrom- und Vanadiumoxyd bilden mit Korund feste Lösungen. SOHOR [19] stellte durch röntgenographische Untersuchungen fest, daß das Gitter unter der Einwirkung der in das Korundgitter eingebauten Titan-, Chrom- und Vanadiumionen auf verschiedene Weise deformiert wird. Bei der Prüfung der Gitterparameter von Edelkorundblöcken fand er ebenfalls meßbare Abweichungen je nach dem, wie sie erschmolzen wurden.

KARLIN [20] entdeckte beim Vergleich des periodischen (Block-)Schmelzens mit der kontinuierlichen Korunderzeugung (Abstehen) wesentliche, von den abweichenden technologischen Bedingungen herrührende Gefügeunterschiede. Zwecks Verbesserung der Kristallstruktur der durch Abstich gewonnenen Blöcke wird vom Verfasser wiederholtes Erhitzen bzw. Umkristallisieren im Kokillenofen empfohlen. Die Kristallisationsbedingungen und im Zusammenhange hiermit das Kristallgefüge werden auch durch die Abmessungen des Schmelzofens stark beeinflusst [21].

FILONENKO [22] stellte beim Vergleich der Mikrogefüge europäischer, asiatischer und nordamerikanischer Normalkorunde wesentliche Unterschiede fest.

Während im Normalkorund die zu etwa 6% vorhandenen und die Eigenschaften beeinflussenden Begleitkomponenten in Form verschiedenster Minerale anwesend sind (z. B. Calciumhexaaluminat, Anorthit, Mullit, Spinell,  $Ti_2O_3$ ,  $Ti_3O_5$ ,  $TiO_2$ , TiN, TiC usw.) [10], werden die Eigenschaften des Edelmetallkorunds ausschlaggebend durch das früher als  $\beta$ -Korund bezeichnete Natriumaluminat ( $Na_2O \cdot 11 Al_2O_3$ ) beeinflusst.

Nach LAWROW [23] nimmt die Schleifleistung des Edelmetallkorunds mit wachsendem Gehalt an Natriumaluminat schnell ab. Das genannte Mineral stört auch die Erzeugung, da es sich beim Brennen der Schleifkörper zersetzt und damit deren mechanische Festigkeit herabsetzt.

Zusammenfassend kann von den technischen Korundkörnern festgestellt werden, daß die Kornmaterialien verschiedener Herkunft gleichzeitig Träger unterschiedlicher Eigenschaften sind. Vor dem näheren Eingehen auf die Arbeit bzw. auf den Verschleiß der Elektrokorundkörner ist es gut, zu betonen, daß das durch Zerkleinerung der erschmolzenen Blöcke entstehende Kornmaterial — auch im Sinne des Gesagten — polykristallin ist. (Im Ausland wird seit langem nach Spezialverfahren auch Haglund-Korund oder nach einer verbreiteten Benennung Monokorund erzeugt.)

b) Nach PEKLENIK [24] ist der Verschleiß der Schleifkörner zur Hauptsache auf die im Laufe der thermischen Einwirkungen einsetzende Druckerweichung zurückzuführen. Die Druckerweichung der Korundkörner setzt bereits bei ca. 1200 °C ein.

Unter der Wirkung der mechanischen Beanspruchungen lösen sich von der Verschleißfläche der Korundkörner Schichten ab, deren Größe von der Dauer der Berührung mit dem zu bearbeitenden Gegenstand sowie von der auftretenden Temperatur abhängt (Abb. 1a). Die in den Oberflächenschichten und im Inneren der Korundkörner auftretenden tangentialen Spannungen sind verschieden, wodurch an der Verschleißfläche der Körner Risse entstehen. Zufolge der Risse vermindert sich die Festigkeit der Körner und unter der Einwirkung der an den Schneidekanten wiederholt auftretenden Beanspruchungen bröckeln einzelne Kristallgruppen ab. Hierdurch verkleinert sich auch die Verschleißfläche (Selbstschärfen der Schleifkörner). Der Selbstanschärfvorgang hängt nach den bei der Beschreibung der experimentellen Arbeit dargelegten elektronenmikroskopischen Untersuchungen in hohem Maße von der Mikrostruktur der Schleifkörner ab. Die Abmessungen der die einzelnen Körner bildenden Kristallite, ihre Orientierung, die Menge der eventuellen glasigen Restschmelzen und deren Eigenschaften sind alle Faktoren, die die Abmessungen und die Form der abbröckelnden Kristallgruppen (Kristallitgruppen) beeinflussen. Der Verschleiß (die Selbstanschärfung) der Schleifkörner steht in engem

Zusammenhang mit ihrer Härte, mit ihrer Hitzebeständigkeit, mit ihrem Widerstand gegenüber Schlag, Stoß und Reibung, deren Gesamtheit als Zähigkeit bezeichnet wird. Der Begriff der Zähigkeit umfaßt eine ganze Reihe physikalischer Kennwerte, folglich ist seine mathematisch exakte Deutung äußerst schwierig, weshalb dann auch diese Frage eher auf experimentellem Wege behandelt wird.

Die Abnutzung der Schleifkörper bzw. der Körner wird offenbar auch durch chemische Reaktionen beeinflusst, die bei den kurzfristig selbst 2000 °C erreichenden Temperaturen auftreten [25].

KORACH und MENYHÁRT [26] beobachteten z. B. bei Untersuchung des Verhaltens von Siliziumkarbid-Formsteinen im Brennraum schon bei 1200 °C deren allmähliche Zersetzung. Die Zersetzungsgeschwindigkeit hängt hierbei weitgehend von der Brennatmosphäre ab. Die Resultate der bei verhältnismäßig tiefer Temperatur durchgeführten Prüfungen weisen auf eine ganze Reihe bisher nicht geklärter Probleme hin, die sich um 2000 °C einerseits zufolge der weit höheren Temperaturen, andererseits infolge der Berührung mit dem zu bearbeitenden Gegenstand sicherlich noch komplizieren.

Man hat erst im letzten Jahrzehnt damit begonnen, sich mit der Chemie des Schleifvorganges zu befassen [27]. Die Oxydation der bearbeiteten Oberfläche und des abgetrennten Spanes ist eine der beim Schleifen auftretenden und bereits bekannten Reaktionen. In Abwesenheit von Sauerstoff können Metalle nicht geschliffen werden, weil sich das Metall bloß hin- und herschiebt, ohne daß sich Späne bildeten. Der Grund hierfür liegt darin, daß sich die neu ausgebildete und noch nicht verunreinigte Metalloberfläche in ganz kurzer Zeit mit einer anderen ähnlichen Fläche vereinigt. So schnell also die Späne entstehen, so schnell haften sie auch wieder am Grundkörper fest. In Gegenwart von Sauerstoff werden die frisch gebildeten Oberflächen sofort von einer Oxydhaut überzogen, die das Festhaften der Späne verhindert. Bei einigen Metallen reicht die Oxydationsgeschwindigkeit nicht aus; in solchen Fällen werden dem Schleifkörper oder der Kühlflüssigkeit Sulfide, Chloride usw. zugesetzt, die im Laufe der an den entstehenden Oberflächen sich abspielenden chemischen Reaktionen eine Sulfid- bzw. Chloridschicht bilden.

## 2. Die keramischen Bindemittel

Zufolge der anhaltenden dynamischen Beanspruchungen durch das Schleifen wird die keramische Bindung zerstört. Im optimalen Fall vollzieht sich dieser Vorgang allmählich, d. h. die Bindemittelbrücken an der Arbeitsfläche des Schleifkörpers, die die Schleifkörner mit einem festen Skelett umfassen, brechen bzw. die durch sie gebundenen Körner verlassen die Bindung erst dann, wenn ihre Schneidkanten abgenützt sind. Dieser Vorgang führt — wie bereits erwähnt — zum Selbstschärfen des Schleifkörpers. Dieses Selbst-

schärfen sowohl der Schleifkörner, als auch der Schleifkörper und im Zusammenhang damit das Verhalten des keramischen Bindemittels ist eine in ihren Einzelheiten noch ungeklärte Frage.

Der regelrechte, der Bestimmung entsprechende Verschleiß der Schleifkörner bzw. der Schleifkörper wird durch eine entsprechend beschaffene keramische Bindung gewährleistet.

Als Bindemittel dienen zumeist Gemenge von Tonmineralen, Quarz und Feldspat in verschiedenen Verhältnissen, die außer den Hauptbestandteilen auch Kalkspat, Magnesit und sonstige Flußmittel enthalten können. Bei den Korund- und Siliziumkarbidkörnern werden unterschiedliche Bindemittel verwendet. Die zur Bindung von Korundkörnern üblichen Bindemittel können auf Grund ihrer Zusammensetzung und Eigenschaften mit den hochfesten, zähen Glasuren verglichen werden, sie sind also glasartig, während die Bindemittel für das Siliziumkarbid dem Weichporzellan verwandt sind.

Bei Korundkörnern kommt es beim Brennen zur Bildung einer glasartigen Bindung, in der die leichter schmelzenden Bestandteile des Bindemittels die übrigen Bestandteile sowie die Oberfläche der Korundkörner lösen, diese letzteren jedoch nur so weit, daß sich einerseits für den im Laufe der Abkühlung fest werdenden Verband Korn—Bindemittel eine hinreichende Festigkeit ergibt (die keramisch gebundenen Schleifscheiben werden im allgemeinen mit 35 m/sec, neuerdings sogar mit noch höherer Umfangsgeschwindigkeit benützt) andererseits die Schneidkanten zufolge der lösenden Wirkung des Bindemittels nur geringfügig abgestumpft werden. Es ist ferner eine grundlegende Forderung, daß die Festigkeit des durch das Brennen gebildeten Verbandes der zu erreichenden Bindungshärte entspreche. In der zwischen dem keramischen Bindemittel und den Korundkörnern entstehenden sog. Übergangsschicht ist der  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Gehalt erheblich erhöht. Hieraus erklärt sich die Tatsache, daß die Schleifkörper bei Temperaturen gebrannt werden können, die um 200, ja selbst um 300 °C über dem Schmelzpunkt des Bindemittels liegen, ohne daß das Bindemittel herausfließen bzw. das Produkt sich deformieren würde [10].

Die wesentlichen Probleme der Bildung und der Rolle der Übergangsschicht sind gegenwärtig noch ungeklärt, bzw. sind im Schrifttum keine diesbezüglichen konkreten Angaben aufzufinden. Die Bindemittel wurden früher auch durch die Seger-Formel gekennzeichnet. Nach GUILLEAUME [28] kann die Zusammensetzung der keramischen Bindemittel durch die Formel



beschrieben werden.

GUILLEAUME [29] — der längere Zeit Präsident der Deutschen Keramischen Gesellschaft und auch Schleifwerkzeugfabrikant war — behandelte in seiner Dissertation sechzig Bindemittel verschiedener Zusammensetzung. Die

Bindemittel sind Gemenge des »Tonsubstanz« — Feldspat — Quarz Dreikomponentensystems mit Marmormehl- und Magnesit-Zusätzen. Guilleaume untersuchte zunächst die gebrannten Bindemittel ohne Zugabe von Korundkörnern. Hernach wurde die Festigkeit der mit denselben Bindemitteln hergestellten Korundformstücke ermittelt. An Korundformstücken, die bei verschiedenen Temperaturen gebrannt worden waren, wurde mit gleich bleibendem Prozentsatz an Bindemitteln gleicher Zusammensetzung die Wirkung der Änderung der Brennbedingungen festgestellt, sodann wurden die Bindemittelbestandteile bei gleichbleibenden Brennbedingungen geändert. Die Wirkung der genannten Varianten wurde an den Festigkeitseigenschaften sowie an den Ergebnissen der *Zeiss-Mackensenschen* Sandstrahl-Härteprüfung untersucht.

Die gefundenen Beziehungen boten lediglich Möglichkeiten zur groben Orientierung, was leicht zu begreifen ist, da z. B. von der mineralogischen Zusammensetzung der einzelnen Bindemittelkomponenten bis dahin keine Rede war. Ebenso genügt eine Kennzeichnung des Brennens durch Angabe des Segerkegels allein zur Definition der Brennbedingungen noch keineswegs. Ein und derselbe Schleifkörper kann »beim selben Segerkegel« je nach der in Abhängigkeit von der Wärmebehandlungsdauer und von den Ofenabmessungen entstehenden Temperaturverteilung im Schleifkörper mit verschiedensten Ergebnissen gebrannt werden.

GOEDECKE [30] wies in seiner Dissertation auf die Bedeutung einer eingehenderen Analyse der Bindemittelleigenschaften hin.

FRANZ [31], der in einer ähnlichen Arbeit die Eigenschaften der Bindemittel auf Grund der Forschungen von GUILLEAUME analysiert, gibt an, daß seines Erachtens bei ein und derselben Bindemittelzusammensetzung die in dem verhältnismäßig kleinen! Temperaturbereich von SK 8—SK 12 (Temperaturdifferenz von ca. 100 °C) gebrannten Schleifkörper Bindungshärteunterschiede bis zu 7 Grad aufweisen können.

Unter Härte (Bindungshärte) der Schleifkörper ist im allgemeinen jener Widerstand zu verstehen, den die Oberflächenschichten gegenüber den die Ausbröckelung bewirkenden Kräften ausüben. Zur Bezeichnung der Härte dient die auf empirischem Wege aufgestellte NORTON-Skala, die die einzelnen Härtegrade in wachsender Reihenfolge von A bis Z mit den Buchstaben des Alphabets angibt.

Die hier erwähnten Verfasser befassen sich mit der Bedeutung der Bindemittelleigenschaften im Zusammenhang mit der Benützung der Schleifkörper. Es ist kennzeichnend, daß man eine ganze Reihe von Dissertationen und Publikationen durchblättern muß, bevor man ab und zu, sehr selten jedenfalls, eine Arbeit findet, die auch die Bindung selbst behandelt.

Die Mitteilung von RIEKE und HAEBERLE [32] enthält eine Anzahl bemerkenswerter Elemente. Nebst Betonung der Bedeutung der Brennbedingungen ergänzen sie die traditionellen Festigkeitsprüfungen (Zug-, Biege-

Druck-, Schlagbiegefestigkeitsprüfungen) durch die Bestimmung des Elastizitätsmoduls (durch Messung der Durchbiegung viereckiger Prismen). Sie fanden, daß der Elastizitätsmodul bei Schleifmitteln mit demselben Bindemittel vor allem vom Bindemittelgehalt abhängt.

Bei ihren Versuchen benützten sie Gemenge, die 15, 20 bzw. 25 Gew.-% Bindemittel enthielten, also Anteile, wie sie auch in der Praxis gebräuchlich sind.

Im Gegensatz zum traditionellen Brennen bei SK 10—SK 14 brannten sie ihre Probekörper, die mit phosphathaltigen Bindemitteln hergestellt waren, bei SK 02a (1060 °C) — SK 1a (1100 °C).

Nach ihren Ermittlungen haben die mit Bindemitteln tieferen Schmelzpunktes hergestellten Probekörper bessere Festigkeitseigenschaften als die mit klassischen Bindemitteln hergestellten Schleifkörper.

Die physikalisch-chemischen Vorgänge, die sich beim Erhitzen der mit traditionellen keramischen Bindemitteln hergestellten Korundschleifkörper abspielen, wenn die Korundkörner zwecks Erhöhung der Rohfestigkeit zum Teil mit Wasserglas als provisorischem Bindemittel benetzt waren, wurden von FILONENKO und LAWROW [10] untersucht.

Im ersten Abschnitt des Brennens, in der Anheizperiode, spielen sich chemische Reaktionen und physikalisch-chemische Umwandlungen ab. Während der Temperaturhalteperiode scheiden aus der Schmelze je nach der Zusammensetzung in geringeren oder größeren Mengen kristalline Verbindungen aus.

Die schnelle Abkühlung der keramisch gebundenen Schleifkörper von der Höchsttemperatur auf ca. 800 °C bewirkt ein Erstarren des Bindemittels in glasigem Zustand und verhindert seine Entglasung. Die Sicherung entsprechender Abkühlungsbedingungen ist erforderlich, um das Entstehen von Spannungen im glasigen Bindemittel zu vermeiden.

Durch die Wärmebehandlung entstehen Schleifkörper aus in einem glasartigen Skelett eingefassten Korundkörnern.

Die Menge der glasartigen Phase des Bindemittels ist bestimmend für das Maß der mechanischen Festigkeit. Die höchste Festigkeit wird erreicht, wenn das Bindemittel gänzlich in eine glasige Schmelze übergeführt wird. Nach FILONENKO und LAWROW [10] wird die mechanische Festigkeit der Schleifkörper unter den kristallinen Verbindungen lediglich durch den Spinell ( $MgO \cdot Al_2O_3$ ) erhöht, der in der an der Berührungsfläche des Bindemittels und der Korundkörner entstehenden, an  $Al_2O_3$  reichen Schmelzzone mit seinen weniger als 8  $\mu$  großen Oktaedern die Korundkörner sozusagen in eine Fassung einbettet.

Die genannten Verfasser verlegen den Bereich der hochfesten Bindemittel in die Nähe der  $SiO_2$ -Spitze der Tetraeder der Vierkomponentensysteme:  $Na_2O - K_2O - Al_2O_3 - SiO_2$  und  $Na_2O - MgO - Al_2O_3 - SiO_2$ .

Während der Wärmebehandlung können sich in den traditionellen keramischen Bindemitteln im Zusammenhang mit der Erhöhung des  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Gehaltes zufolge einer teilweisen Aufschließung der Korundkörner die kristallinen Verbindungen Anorthit, Mullit, Cordierit, Spinell, Plagioklas, Anatas, Rutil, Hämatit, Magnetit bilden.

Im Auftrag der Deutschen Schleifkörper-Forschungsgemeinschaft beschäftigte sich eine Anzahl von Institutionen und Forschern mit der Prüfung von etwa 40 deutschen Tonlagern, um ihre Brauchbarkeit als Bestandteil keramischer Bindemittel zu untersuchen [33]. Die Eignung wurde auf Grund der Festigkeit und der Bindungshärte (gemessen nach der *Zeiss-Mackensenschen* Sandstrahlmethode) beurteilt. Unter Beibehaltung unveränderter Anteile an Quarz und Feldspat wurde im konventionellen Dreikomponentensystem der Anteil an Ton geändert. Nebst Ermittlung der oxydischen Zusammensetzung der einzelnen Bindemittelbestandteile wurden dilatometrische, heizmikroskopische, sowie DTA-Aufnahmen hergestellt. Die Prüfung der gebrannten Bindemittel erfolgte auf mikroskopischem und röntgenometrischem Wege, wobei in ihnen nebst Glasphase Quarz, Cristobalit und Mullit gefunden wurden. Über die Prüfergebnisse werden lediglich Bemerkungen allgemeiner Natur gemacht, was sich offenbar daraus erklärt, daß Daten, die durch zeitgemäße Prüfverfahren ermittelt wurden, mit den Ergebnissen von Bindungshärtebestimmungen verglichen werden, die sich zu exakten Folgerungen kaum eignen.

Inwieweit die optimalen Eigenschaften der Bindemittel und damit der Schleifkörper erreicht wird, hängt weitgehend von den Umständen des Brennens als des wichtigsten technologischen Prozesses ab. Aus dem Wesen des Schleifvorganges folgt, daß die Eigenschaften, auch auf die kleinsten Bauelemente bezogen (s. Abb. 1), praktisch gleichbleibend sein müssen (sollten). Das zentrale Problem der Erzeugung von Schleifkörpern ist das Brennen. Bei diesem werden dem Erzeugnis nicht nur die Fehler mangelhafter Fertigungsplanung und unrichtigen Produktenantwurfs unwiderruflich einverleibt, auch richtig vorbereitete Erzeugnisse können zum Ausschuß werden. Einer der häufigsten Fehler ist der ungleichmäßige Verschleiß. Selten können an verschiedenen Teilen der Schleifkörperfläche die gleichen Härtegrade gemessen werden. Die häufigste Ursache dieses Übelstandes ist im fehlerhaften Brennen zu suchen. Obwohl Theorie und Praxis des zeitgemäßen Brennens keramischer Erzeugnisse (sandwichartiges Brennen) aus den Arbeiten KORACHS (z. B. [34]) seit mehreren Jahrzehnten bekannt sind und zunehmende Verbreitung finden, werden die Schleifkörper vielenorts nach den traditionellen Verfahren gebrannt. Unter den gegenwärtigen Verhältnissen besteht in der etwa 1 m hohen Brennzone der Tunnelöfen zwischen der oberen und der unteren Plattform der Brennwagen eine Temperaturdifferenz von mindestens 30 °C, es fehlen somit einfach die Voraussetzungen für das gleichmäßige Brennen.

Nach PLJAT [37] darf der Unterschied zwischen der Oberflächen- und der Mittelflächentemperatur des Schleifkörpers  $10^{\circ}\text{C}$  nicht überschreiten. Die Nortonschen Schleifscheiben, die qualitativ besten der Welt, werden schon seit 15 Jahren in elektrisch geheizten, nach dem Sandwichsystem arbeitenden Tunnelöfen gebrannt [35].

Nicht allein Schleifkörper mit verschiedenen Bindemitteln, sondern auch solche mit gleichem Bindemittel, aber unterschiedlicher Größe erfordern verschiedene Brennbedingungen [36], [37].

Die keramischen Bindemittel sowie die rohen Bindemittelkomponenten enthalten meist mehrere Mineralien. Für die Kennzeichnung der Bindemittel ist die mineralische Zusammensetzung von ausschlaggebender Bedeutung [38].

In vielen Zweigen der Silikatindustrie ist bei der Festsetzung der Anforderungen an das Fertigprodukt das Erreichen bzw. das Überschreiten einiger — die Qualität kennzeichnender — Minimalwerte vorgeschrieben. Häufig wird ein Produkt innerhalb eines verhältnismäßig breiten Gütebereichs als geeignet betrachtet. Die mehr oder minder strengen Güteanforderungen bestimmen auch die Anforderungen an die Rohmaterialien.

Zur Erzielung der keramischen Bindungen sind Rohmaterialien bekannter Zusammensetzung und Eigenschaften erforderlich.

Beim Entstehen der glasartigen Bindung hängt es in hohem Maße von der Viskosität des geschmolzenen Bindemittels ab, wie weit die Schmelze in die vorhandenen Vertiefungen der Körner und in die sonstigen Oberflächenrauigkeiten eindringen kann. Schon geringe Schwankungen in der Zusammensetzung können wahrnehmbare Verschiebungen im Verhalten des Bindemittels beim Erhitzen hervorrufen und folglich auch die Qualität des Fertigproduktes beeinträchtigen. Auch ist die Rolle der Dispersität der Bindemittel hervorzuheben, zumal dieselbe auch bei gleichbleibender mineralischer Zusammensetzung eine erhebliche Wirkung ausübt. Die Bindung kommt zumeist als Ergebnis kristalchemischer Reaktionen zustande, wobei eine Vergrößerung der Berührungsfläche die Reaktionen beschleunigt und damit die benötigte Wärmebehandlungsdauer verkürzen und eine Senkung der Brenntemperatur ermöglichen kann [39].

Die Bindemittel mineralischer Herkunft sind wegen der häufigen Verunreinigungen zur Herstellung reproduzierbarer Qualitäten unmittelbar selten geeignet.

Die häufig hohe Zahl der mineralischen Bestandteile sowie die Schwankungen in ihrer Beschaffenheit ermöglichen es im Hinblick auf die gestellten Anforderungen nicht, ihre Wirkung rechnerisch zu erfassen und zu steuern.

Um den Bindungsvorgang studieren, deuten und lenken zu können, wird es bei Verwendung mineralischer Rohstoffe erforderlich sein, vergütete Bestandteile zu benützen. Bei der Entwicklung zeitgemäßer hochfester Bindemittel sollten auch die borosilikatischen Bindemittel in Betracht gezogen werden.



Wenn Bindemittelkomponenten mit definierten Eigenschaften verwendet werden, die zeitgemäßer sind als die traditionellen keramischen Bindemittel, wird man der Erschließung des Zustandekommens von Bindungen näher kommen können [40].

### 3. Verhältnis der Schleifkorn- zur Bindemittelphase und ihre räumliche Anordnung (Bindungshärte, Dichte)

Bis zum Ende der vierziger Jahre lag der Schwerpunkt aller Probleme der Schleifkörperproduktion und -verwendung auf der als Bindungshärte bezeichneten Eigenschaft der Schleifkörper. Zum Schleifen wurden zumeist Schleifkörper geeigneter »Härte« gesucht, und entsprechend betrachteten so die Fabrikanten als ihre zentrale Aufgabe, solche Schleifkörper herzustellen.

Obwohl man den Begriff der Bindungshärte selbst heute noch nicht genau zu definieren versteht (ähnlich wie die Härte im allgemeinen), wurde zu ihrer Messung eine ganze Reihe von Apparaten konstruiert, die nach den verschiedensten Prinzipien arbeiten. Das gemeinsame Kennzeichen dieser Einrichtungen ist es, daß sie Relativwerte liefern, die nur im Vergleich mit Etalons zu bewerten sind.

Zur Gewinnung von Schleifkörpern verschiedener Bindungshärtegrade werden vorwiegend der Anteil an Bindemittel, die Bindemittelbestandteile, die Brennbedingungen und der Preßdruck geändert.

Wie aus dem bisher Gesagten leicht denkbar, weisen die Schleifkörper verschiedener Produzenten, auch wenn sie als einander gleich bezeichnet werden, in den seltensten Fällen gleiche Eigenschaften auf.

Die zeitgemäße Härteprüfmethode wurde durch PEKLENIK [41] entwickelt. Mit seinem Apparat kann selbst der Ausbröcklungswiderstand eines einzigen Schleifkornes gemessen werden. Hierzulande bedient man sich der bereits veralteten, seit vierzig Jahren gebräuchliche *Zeiß-Mackensensche* Methode [40], bei der Quarzsand festgesetzten Volumens und gegebener Körnung unter bestimmtem Luftdruck gegen die Oberfläche des Werkzeuges geblasen wird. Als Vergleichsgrundlage dient die Tiefe der entstandenen Ausbuchtung.

Schon 1942 beschrieb OPITZ [42] 16 Härteprüfmethode bzw. -apparate mit verschiedenem Arbeitsprinzip. Ihnen folgten immer neuere, ein Zeichen dafür, daß dieses Problem vorläufig noch der Lösung harret. Unter den neueren verdient die Ultraschallmethode von LEWIS [43] sowie die pneumatische Meßvorrichtung von KALISSER [44] erwähnt zu werden.

Ein Ausweg aus der Problemanhäufung um Begriff und Messung der Bindungshärte ließe sich finden, wenn man mit den Bindungen an die früheren Anschauungen brechen und den Versuch unternehmen würde, die heute als

Härte bezeichnete Eigenschaft tiefer und auf zeitgemäßerer Grundlage zu erschließen. Zeichen und Anfangserfolge solcher Bestrebungen sind in den angeführten Mitteilungen von YOSHIKAWA [9] bereits zu erkennen. Es soll hier auch erwähnt werden, daß die Forschungen, für die die Grundlagen an der Technischen Hochschule, Aachen, geschaffen wurden, auf der Ermittlung der Größe und der Form der Schleifkörner und der Bindungsbrücken fußen.

Aus den Ergebnissen der Messungen an Körnern und Bindungsbrücken wird die volumetrische Gleichung der Schleifkörper abgeleitet. Um der großen Zahl von Kombinationsmöglichkeiten bei der Schleifkörperherstellung gewisse Grenzen zu setzen, wurde der neue Begriff der Bindungsäquivalenz eingeführt, mit dem der spezifische Rauminhalt des Bindemittels, bezogen auf die Oberflächeneinheit der Schleifkörner, bezeichnet wird.

Form und Größe der Schleifkörner wurden ermittelt, wogegen die Bestimmung der Bindemittelbrückengröße auf Annahmen beruht, die heute durch Messungen noch nicht gesichert werden können.

Nach der zitierten Mitteilung [45] bestimmen den Gefügebau und die physikalisch-mechanischen Eigenschaften die Schleifkornabmessungen sowie die volumetrischen Bindemittel- und Kornanteile.

Zur Analyse der korrelativen Beziehungen zwischen dem Gefügebau und den Eigenschaften der Schleifkörper wird der Rauminhalt des Schleifkörpers mit 100% angenommen und folgende Gleichung aufgeschrieben:

$$V_k + V_b + V_p = 100, \quad (2)$$

in der (jeweils in Prozenten)

$V_k$  den volumetrischen Kornanteil,

$V_b$  den volumetrischen Bindemittelanteil,

$V_p$  den volumetrischen Porenanteil bezeichnet.

PEKLENIK [45] betrachtet — unter Bezugnahme auf Literaturangaben — die 62 Vol.-% Schleifkörner enthaltende Stufe als erstes Glied der Härte- und Dichteskala. Die weiteren Glieder der Skala folgen einander in Richtung wachsender Härten, ausgehend von dem Kornanteil von 62 Vol.-%, auf Grund der Gleichung (2), u. zw. derart, daß der volumetrische Bindemittelanteil in einem — durch die Hersteller nicht angegebenen — Verhältnis auf Kosten des Porenanteils stufenweise erhöht wird. Bei den einzelnen Dichtestufen bleibt der Porenraumanteil der Schleifkörper unverändert, hingegen erhöht sich der Bindemittelanteil in bestimmtem prozentualem Verhältnis auf Kosten des Kornraumanteils.

PEKLENIK [45] gelangte in seinen Mitteilungen vom Gesichtspunkt des Schleifens her vornehmlich auf mathematischem Wege zu einer Annäherung jener Probleme, deren Lösung vor allem auf Grund der mit der Fertigung zusammenhängenden Kenntnisse gesucht werden muß. Er behandelt z. B.

sehr ausführlich die Bedeutung von Form und Größe der Bindemittelbrücken, ohne die entscheidende Rolle ihrer Eigenschaften zu erwähnen und hervorzuheben. Die zur Erziehung der einzelnen Bindehärtestufen erforderlichen Korn- und Bindemittelanteile und vor allem die Qualitätskennwerte werden weder in der angeführten Mitteilung, noch im sonstigen Schrifttum behandelt.

Die angegebenen Beziehungen verdienen deshalb unser Interesse, weil sie Hinweis darauf enthalten, daß sich nach Klarstellung der Faktoren, die die Eigenschaften der Schleifkörper bestimmen, Möglichkeiten zur exakten Analyse der Beziehungen zwischen Gefüge und Eigenschaften bieten werden.

Die Herstellung von Schleifkörpern bestimmter Bindungshärte und Dichte in gleichbleibender Qualität bildet heute in aller Welt immer noch das Fabrikationsgeheimnis einiger leitender, fortschrittlicher Werke, die früh und vor allem zur richtigen Zeit erkannt haben, daß sich auf diesem Gebiete Forschung auf höchstem Niveau im Verein mit den langen Produktionserfahrungen gut verzinst.

Jene wenigen Mitteilungen, die auf Grund von Versuchsergebnissen im Zusammenhang mit der Fertigung ähnliche Probleme erörtern, behandeln die genannten Fragen getrennt nach Kornabmessungen.

ZGONNIK [46] untersuchte den Einfluß einiger technologischer Parameter auf die Eigenschaften der Schleifkörper.

Er untersuchte die Beziehungen zwischen Kornvolumen, Bindemittelvolumen, Preßdruck, Bindungshärte und Dichte gesondert für verschiedene Kornarten, Korngrößen und Bindemitteltypen. Bei den Ergebnissen handelte es sich lediglich um experimentelle Angaben, exakte Beziehungen lieferten sie nicht, und dementsprechend können sie nicht verwertet werden, wenn sich irgendeiner der Faktoren ändert. Bedenkt man überdies, daß einige der wichtigsten Faktoren, z. B. die Bindemittel und Korneigenschaften oder die Brennverhältnisse überhaupt nicht geprüft wurden, wird man begreifen, daß die Herstellung von Produkten gegebenen Härte- und Dichtegrades schon bei einer einzigen Kornart und -größe sehr eingehendes und langwieriges Experimentieren beansprucht. Im Hinblick auf die große Zahl von Kombinationsmöglichkeiten ist es klar, daß der Versuch, diese Frage auf dem experimentellen Wege allein zu lösen, ein vergebliches Unternehmen wäre.

KINGERY und Mitarbeiter [47] berichteten über Teilergebnisse von Untersuchungen über das Gefüge und vor allem über die Festigkeits- und Wärmeleitfähigkeitseigenschaften von Schleifkörpern.

Die Verfasser untersuchten hierbei nicht ihre eigenen Erzeugnisse, sondern andere im Handel erhältliche, keramisch gebundene Schleifkörper durch mikroskopische Messungen an deren Gefüge.

Auf Grund der Analyse der mikroskopischen Strukturmessungen schlagen sie zur Kennzeichnung der Eigenschaften der Schleifkörper ein einfaches Mikrogefügemodell vor, welches halbquantitative Schlüsse auf jene Wirkung gestat-

tet, die die Änderungen des Verhältnisses zwischen Schleifkorn, Bindemittel und Porenraum auf die statisch ermittelten Festigkeits- und Wärmeleitfähigkeitswerte ausüben. Ihr Mikrogefügemodell besteht aus kugelförmigen Körnern und aus Bindemittelbrücken mit gebogenen Flächen, die die Körner mit einander verbinden, und schließlich aus Poren, die von diesen beiden Bauelementen umschlossen sind. Das Entstehen der Brücken mit gebogenen Flächen wird durch die Wirkung der Kapillarkräfte in dem beim Brennen verflüssigten Bindemittel erklärt [48]. Die Ergebnisse der an Schleifkörpern verschiedener Härte und Dichte durchgeführten Festigkeits- und Wärmeleitfähigkeitsbestimmungen wurden im Vergleich mit dem Modell ausgewertet. Obwohl die Deutung der Meßergebnisse auf dieser Grundlage allgemein nicht akzeptiert werden kann, weist sie doch auf die reale Möglichkeit hin, das Gefüge auf exakter Grundlage zu analysieren.

Wertvoll ist ihre Feststellung, daß außer der Größe, der Form und der Anordnungsweise der Bindemittelbrücken auch deren Eigenschaften von Bedeutung sind, d. h. daß es nicht nur auf die Menge des Bindemittels, sondern vor allem auf dessen Verhalten im Gebrauch ankommt.

Annehmbare Erklärungen für die Beziehungen zwischen Härte, Bindemittelanteil, Korn-Bindemittel-Verhältnis und Porosität lieferten auch ihre Versuche nicht.

Zusammenfassend kann aus den Schrifttumsangaben über Schleifkörper, soweit sie das vorliegende Thema betreffen, der Schluß gezogen werden, daß auf diesem Gebiete fundiertere Erkenntnisse und Erfolge von umfassender Bedeutung erst dann zu erwarten sind, wenn die Eigenschaften, Proportionen und die räumliche Anordnung der Grundbauelemente der Schleifkörper sowie die Beziehungen zwischen diesen auf Grund zeitgemäßer Forschungsergebnisse analysiert werden.

## Experimenteller Teil

### a) *Auswahl des Modell-Materials*

Zunächst wurden Gefügebau und Eigenschaften eines Schleifkörpers aus der laufenden Erzeugung mit jenen eines zeitgemäßen Erzeugnisses mit derselben Qualitätsbezeichnung und Bestimmung verglichen. Bei den zum Vergleich dienenden Schleifkörpern handelte es sich um tellerförmige Scheiben für Zahnradschleifautomaten System Maag. Ihre normenmäßige Bezeichnung [49] lautet:

XIV 220 × 17 × 40 × 4 KA 32 K 6 Ke.

Die weitere Arbeit setzte sich die Klarstellung der prinzipiellen und technologischen Grundlagen einer zeitgemäßen Fertigung keramisch gebundener Schleifkörper bzw. deren Festlegung in ihren wichtigeren Zügen zum Ziel.

Die systematische Prüfung keramisch gebundener Schleifkörper aus mehreren Ländern ergab, daß hochleistungsfähige und qualitativ verlässliche Erzeugnisse stets auch ein regelmäßiges, geordnetes Gefüge aufweisen.

Zwecks Untersuchung der einzelnen Phasen, aus denen die Schleifkörper aufgebaut sind, sowie ihrer Anordnungsweise wurden von den genannten Maagschen Scheiben mikroskopische Aufnahmen gemacht.

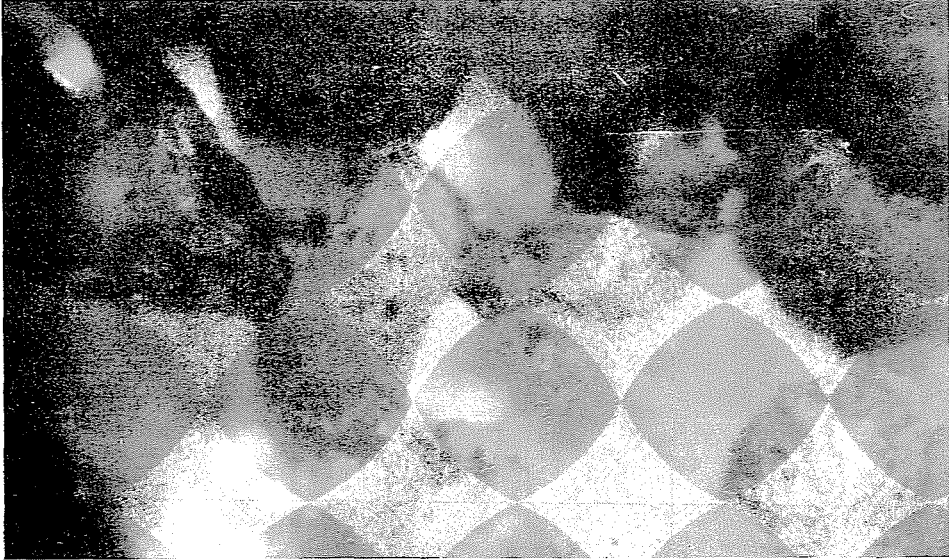


Abb. 2. Gefügestruktur einer Maagschen Zahnradschleifscheibe mit borosilikatischer Bindung 60fach

Die Struktur der Scheiben zurückgebliebener Erzeugung ist aus Abb. 3, die des Vergleichsmusters aus Abb. 2 ersichtlich. Der Unterschied zwischen den beiden Mustern ist recht auffallend. Das eine Produkt (Abb. 3) ist aus Korundkörnern sehr verschiedener Größe und Anordnung aufgebaut. Systemlosigkeit und Unregelmäßigkeit der Abmessungen und der Anordnungsweise kennzeichnet die Bindemittelbrücken.

Die nahezu gleich großen Körner des anderen Musters sind von der Bindemittelschmelze gleichmäßig umhüllt und von deren leicht gebogenen Brücken in ein gleichmäßiges Skelett eingefast.

Vom ersten Muster (Abb. 3) kann ohne eingehendere Untersuchung festgestellt werden, daß dessen Aufbau die Bedingungen für eine gleichmäßige spanabhebende Formung nicht erfüllen kann. Das Bindemittel des Werkzeuges besteht aus einem Gemenge von Tonmineralien und Feldspat. Auf Grund spektrographischer Prüfungen (mit einem Zeisschen Quarzprismenspektrographen Q-24) liegt beim anderen Muster ein borhaltiges bzw. borosilikati-

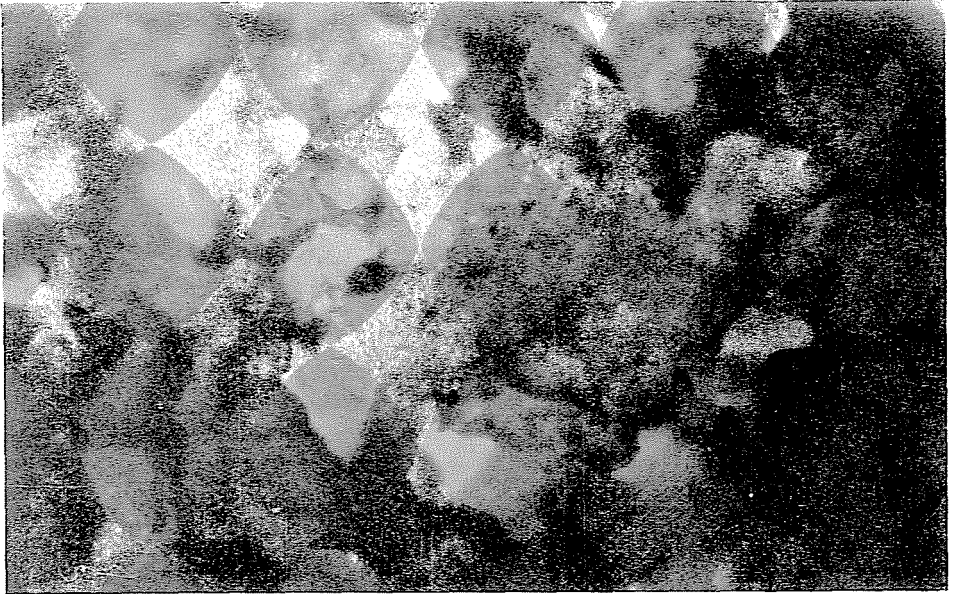


Abb. 3. Gefügestruktur einer Maagschen Zahnradschleifscheibe mit illitischer Bindung 60fach

sches Bindemittel vor. Die nach dem Gefügebild von vornherein zu erwartenden wichtigsten Qualitätsunterschiede lassen sich durch folgende Zahlen kennzeichnen:

|   | Einheimisches<br>Muster | Vergleichsmuster |
|---|-------------------------|------------------|
| Zugfestigkeit, $\text{kp/cm}^2$ .....   | 52                      | 144              |
| Druckfestigkeit, $\text{kp/cm}^2$ ..... | 216                     | 720              |
| Poissonscher Faktor .....               | 0,286                   | 0,217            |
| Bindungshärte nach Norton               | K                       | K                |
| Gesamtporosität, % .....                | 46,32                   | 46,56            |

Der Zug- und Druckfestigkeit kommt wegen der Beanspruchung durch die 35 m/sec und mehr betragende Umfangsgeschwindigkeit sowie durch die Berührung mit dem Arbeitsstück große Bedeutung zu.

Der Poissonsche Faktor, d. h. das Verhältnis der spezifischen Werte der Längenänderungen in der Beanspruchungsrichtung und senkrecht zu dieser, ist allein von der Materialbeschaffenheit abhängig und wurde aus diesem Grunde zur Kennzeichnung der Schleifkörper bzw. der Bindemittel herangezogen.

Der Umstand, daß sich bei beiden Mustern nach der Zeiss—Mackensenschen Härteprüfung die gleiche Bindungshärte ergab, weist darauf hin, daß diese Meßmethode unzuverlässig ist. Die Gesamtporositäten sind ebenfalls nahezu gleich, was mit der Dichte zusammenhängt. Der Unterschied zwischen den beiden Mustern erhellt weit getreuer und eindeutiger daraus, daß das Vergleichsmuster eine 2,08mal größere Spanleistung aufwies (Abb. 2). Letzten Endes ist es jeweils dieser Wert, der für die Beurteilung der Güte entscheidend ist.

Die Aufnahmen sowie die angeführten Angaben veranschaulichen sehr wohl den grundlegenden Unterschied in der Güte der beiden Erzeugnisse. Sie richten zugleich auch das Augenmerk darauf, daß zur Erschließung der wesentlichen Ursachen der Abweichungen eine verzweigte und gründliche Forschungsarbeit nötig ist.

Vor allem sind einige jener kennzeichnenden Eigenschaften der Elektrokörundkörner zu untersuchen, die sowohl das Entstehen der Bindung als auch die Arbeit des Werkzeuges wesentlich beeinflussen.

Zum Studium der rohen Bindemittel und deren Umwandlung zur Bindung wurden die zweckmäßigsten unter den verfügbaren Prüfmethode gewählt, wobei fast jede derselben mit dem wichtigsten technologischen Vorgang, dem Brennen verbunden ist.

Die Möglichkeiten einer Lösung der mit dem Gefügebau zusammenhängenden Probleme werden auf Grund der Meßergebnisse sowie der neuesten Errungenschaften der Silikatchemie analysiert.

### b) Meßmethoden

#### *Elektrokörundkörner*

Lichtmikroskopische Untersuchung der Form, der Oberflächenbeschaffenheit und der polykristallinen Morphologie der Elektrokörundkörner (Edelkorund).

Elektronenmikroskopische Untersuchung der Mikrooberfläche und des Mikrogefüges.

Röntgendiffraktometrische Untersuchung der mineralogischen Zusammensetzung (zusammen mit den Bindemitteln).

#### *Keramische Bindemittel*

Heizmikroskopische, derivatographische, dilatometrische sowie röntgendiffraktometrische Untersuchung der während der Wärmebehandlung traditioneller, modifizierter und neuerer Bindemittel ablaufenden Vorgänge. Untersuchung der Eigenschaften der während der Wärmebehandlung entstandenen Bindung mit einem zum dynamischen Messen der mechanischen Formänderungen geeigneten Dehnungsmeßapparat. Ermittlung der Beziehungen zwischen den Brennbedingungen und den Festigkeitseigenschaften.

## Gefüge

Neuere Deutung des Entstehens und der Rolle der Bindemittelbrücken als der die Eigenschaften der Schleifkörper bestimmenden Grundbauelemente. Lichtmikroskopische Untersuchung der Bindemittelbrücken.

### *Morphologie der Elektrokorundkörner (Edelkorund)*

Ungarn verfügt über auch im Weltvergleich hervorragende Rohstoffe für die Elektrokorunderzeugung.

Für unsere Versuchsarbeit wurde einheimischer Edelkorund angewendet.

Die Prüfung und Beurteilung der Korundkörnergüte beruht hierzulande entscheidend auf der chemischen Analyse und der Siebanalyse [49].

Da es sich um einen kristallinen Stoff handelt, ist die chemische Zusammensetzung an sich nicht entscheidend, die Siebanalyse hingegen liefert — wie aus den weiteren Feststellungen zu ersehen sein wird —, hier ebenfalls zu wenig kennzeichnende Ergebnisse.

Die für die Bindung und für die Spanabhebung gleicherweise wesentlichen Eigenschaften der Schleifkörner sind von mehreren sonstigen Bedingungen abhängig, so z. B. auch von der Kornform [15], [24]. Die gedrungenen, jedoch scharfen, ihrer Form nach regelmäßigen Tetraedern, Hexaedern und Oktaedern gleichenden Körner spanen gleichmäßig und bilden zugleich eine der Grundvoraussetzungen für einen geordneten Gefügebau (Abb. 2). Zuzufolge der Bedingungen der Schmelze und Kristallisierung von Elektrokorundblöcken [16], [17], [20], [22], des inhomogenen Gefüges, der anisotropen Eigenschaften der Korundblöcke sowie der allgemein bekannten Mängel der Zerkleinerung und des Siebens bestehen die fraktionierten Körner außer aus nahe isometrischen, z. T. auch aus flach-splittrigen und nadelförmigen Körnern. Unsere derzeitige Norm [49] begnügt sich damit, daß die durch die verschiedenen Maschenzahlen bestimmten Kornfraktionen zu 50% aus Körnern bestehen, die den Nenngrößen entsprechen.

Die Folgen dieser Tatsache veranschaulicht die Abb. 3. Da die Siebanalyse zur Kennzeichnung der genauen Abmessungen und der Form der Körner nicht geeignet ist, wurden die Kornform, die Oberflächenbeschaffenheit und der polykristalline Aufbau der Körner auf die im weiteren zu beschreibende Art und Weise geprüft. (Damit erfuhren gleichzeitig auch unsere derzeitigen Prüfmethoden eine Erweiterung und Verfeinerung.)

Zunächst wurden auf lichtmikroskopischem Wege die innerhalb einer Siebfraction vorgefundenen Kornformen untersucht; die charakteristischsten unter ihnen sind aus den Abbildungen ersichtlich.

Die Abb. 4 zeigt ein längliches, die Abb. 6 ein gedrungenes Korn. Das Korn der Abb. 5 ist aus Bruchstücken mehrerer Korundkristalle aufgebaut, unter denen ein ungeschmolzener Tonerdeinschluß zu sehen ist.

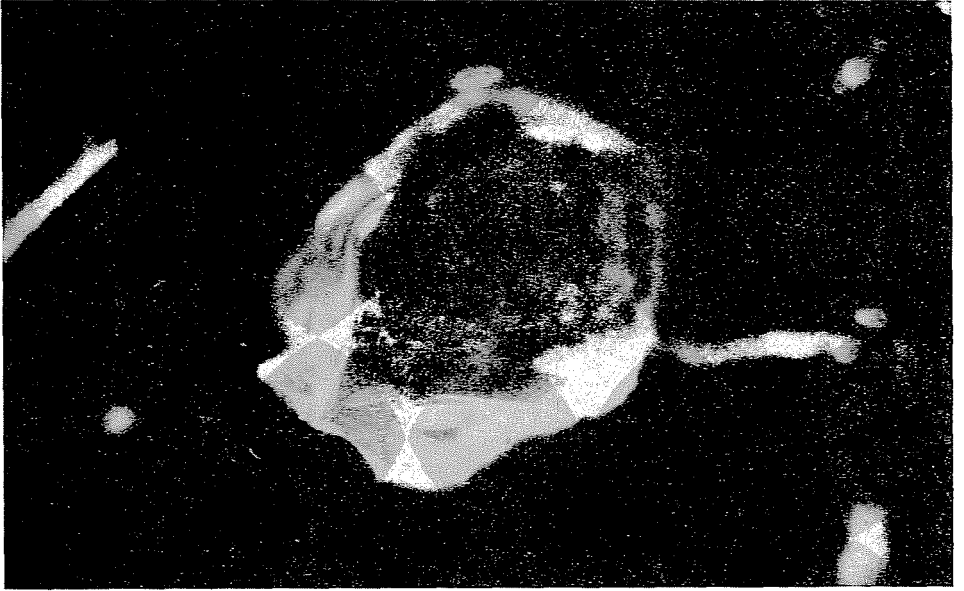




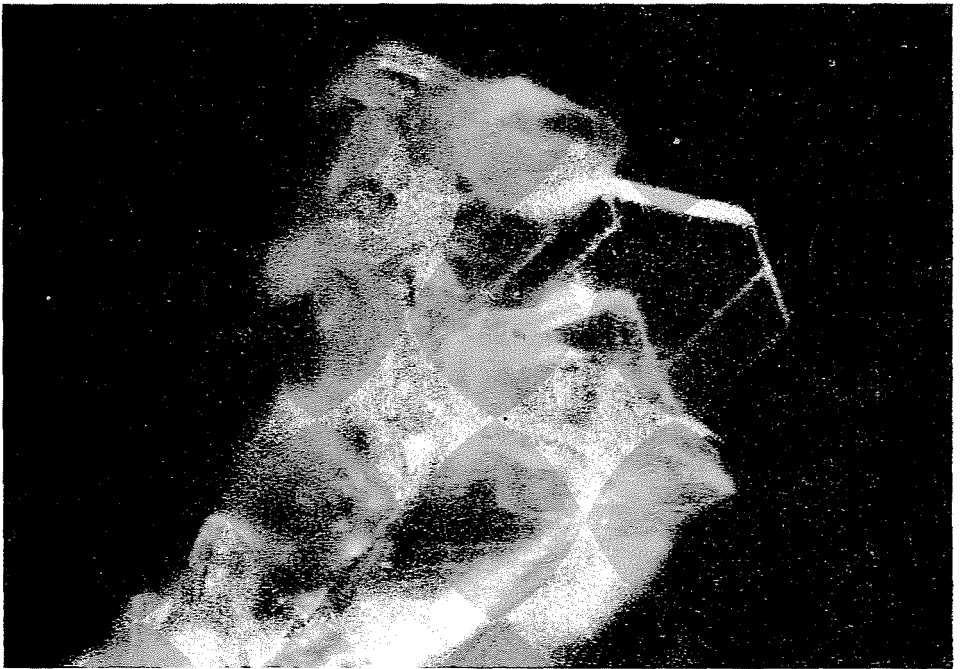
*Abb. 4.* Längliches Elektrokorkorn 130fach



*Abb. 5.* Polykristallines Elektrokorkorn 130fach



*Abb. 6.* Gedrungenes Elektrokorkorn 90fach



*Abb. 7.* Polykristallines Elektrokorkorn mit gut entwickeltem Monokristall 240fach



Abb. 8. Nadelförmig splitterartiges Elektrokorn 70fach

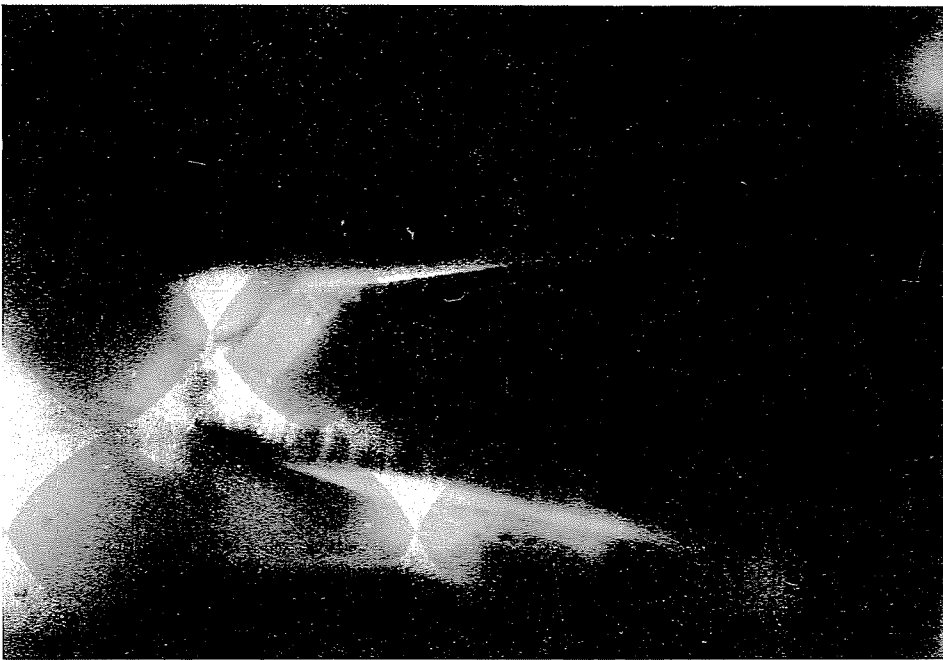


Abb. 9. Schneidekante eines Elektrokorns 100fach

Abb. 8 zeigt einen nadelförmigen Splitter.

Abb. 7 zeigt ein Beispiel für den Aufbau aus mehreren Kristallindividuen. Es ist ein seltener Zufall, daß ein schön entwickelter »Monokristall« während der Zerkleinerung unbeschädigt blieb und im Prüfmuster erschien. (Die gegliederte Oberfläche der in den Abbildungen 5 und 7 gezeigten Exemplare beeinflußt die Lage und das Festhaften des rohen und danach des geschmolzenen Bindemittels offenbar ganz wesentlich. Abb. 9 stellt einen Versuch zur Veranschaulichung der Schneidekante eines Elektrokorundkorns dar. Die elektronenmikroskopische Prüfung der Oberfläche polykristalliner Individuen erwies sich nach den Abbildungen 10 und 11 als äußerst nützlich. Die Prüfungen wurden mit einem Elektronenmikroskop Type KEM I durchgeführt.) Die elektronenmikroskopischen Aufnahmen beweisen, daß sich der polykristalline Aufbau nicht auf die unter dem Lichtmikroskop deutlich unterscheidbaren Körner und Kornkonglomerate allein beschränkt, sondern auch für die verklebten Individuen der Polykristalle kennzeichnend ist. Aus den Abbildungen 10 und 11 erhellt die unterschiedliche Orientierung der Mikrokristallpakette sowie die zwischen ihnen vorhandene Restschmelze sehr gut. Auf Grund der Eigenheiten des Schleifens [8] kann mit Recht angenommen werden, daß die Wirkung der Schleifkörner bzw. der Schleifkörper grundlegend durch die Mikrokristallbeschaffenheit beeinflußt wird, folglich ist die Erschließung des Wesens der Wirkungsweise und der Herstellung der Schleifkörper mit dem Studium über die Rolle des mikrokristallinen Gefüges zu verknüpfen.

Im verfügbaren Schrifttum lassen sich kaum Spuren einer tief gehenden Analyse des Aufbaues der Schleifkörner vorfinden, weswegen die elektronenmikroskopischen Untersuchungen hier auf breiterer Grundlage fortgesetzt wurden.

YOSHIKAWA [9] spricht in seiner bereits zitierten Arbeit, die den Verschleiß der Schleifkörper auf zeitgemäße Weise erklärt, u. a. über den Bruch bzw. über die Bröckelung der Schleifkörner und der Bindemittelbrücken während des Gebrauchs (Abb. 1). Die erwähnten elektronenmikroskopischen Aufnahmen hingegen weisen auf eine Mikroabnutzung der einzelnen Körner hin. Die hiesigen Untersuchungen sollten gleichzeitig nähere Kenntnisse über die Rolle und Funktion der Bindung liefern. Schon die lichtmikroskopischen Untersuchungen zeigten, daß das Bindemittel die Schleifkörner gänzlich umhüllt, folglich kann die Mikroanordnungsweise der Bindemittel- und Schleifkornphasen richtig nur anhand horizontaler Schnitte durch die in der Arbeitsfläche des Schleifkörpers gebundenen Körner erfaßt werden. Beim Schleifen, das sich unter regelrechter Selbstschärfung abspielt, müssen sich im Prinzip solche Schnitte ausbilden. Diese Annahme veranlaßte uns, die von der Arbeitsfläche der bereits beschriebenen und beim Schleifen verwendeten zeitgemäßen Maagschen Scheiben (Abb. 2) hergestellten Abdrücke zunächst unter dem Lichtmikroskop zu prüfen, um auf diese Weise Abdruckteilchen zu finden, die sich

für die weiteren elektronenmikroskopischen Untersuchungen eigneten. Abb. 12—14, die die Elementararbeitsfläche eines beim Schleifen teilweise abgenutzten Schleifkornes in drei Vergrößerungsstufen darstellen, beweisen folgendes.

Die Wirksamkeit der Schleifkörper bzw. der Schleifkörner hängt unmittelbar mit der Abnutzung der Mikrokristalle zusammen. An den Abbildungen läßt sich die Verschleißfläche des ursprünglich aus der vom Bindemittel

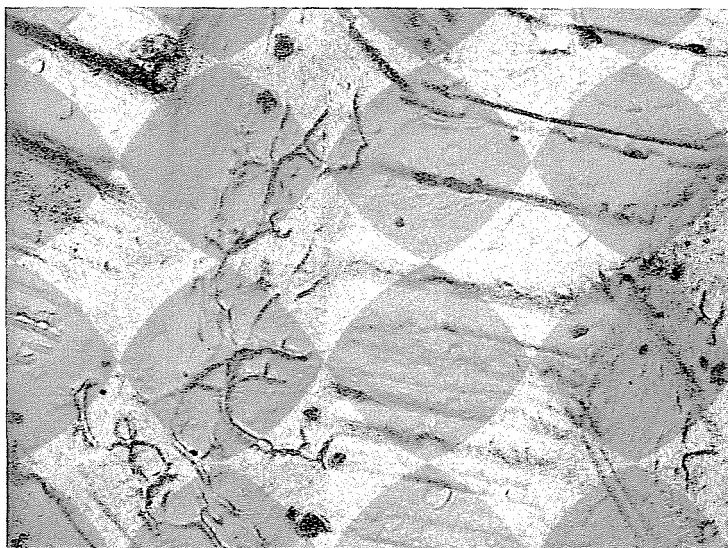


Abb. 10. Elektrokorund-Mikrokristalle, Restschmelze zwischen zwei Kristallpaketen KEM 1 17 000fach

bedeckten Kornoberfläche herausragenden, sodann durch das Schleifens abgenutzten, ein wenig deformierten hexagonalen Mikrokristallprismas deutlich erkennen. Seine Oberfläche zeigt — als Beweis für die Richtigkeit der Annahmen von PEKLENIK [24] und RYSCHKEWITZSCH [11] — Spuren des durch Druckerweichung einsetzenden »Abschleifens«. An den Spitzen der hexagonalen Prismen — die sie mehr oder weniger aufschließen —, befinden sich die an die Makrobindemittelumhüllung gebundenen »Mikrobindemittelbrücken«, die nach den Abbildungen 12—14 in sechser Koordination als Stützpfiler den Korundmikrokristall festhalten. Anhand der Abbildungen kann angenommen werden, daß die Korrosion des Korundmikrokristalles bei der während der Beanspruchung kurzfristig auf etwa 2000 °C angestiegenen Temperatur unter der aufschließenden Wirkung des Bindemittels erfolgte.

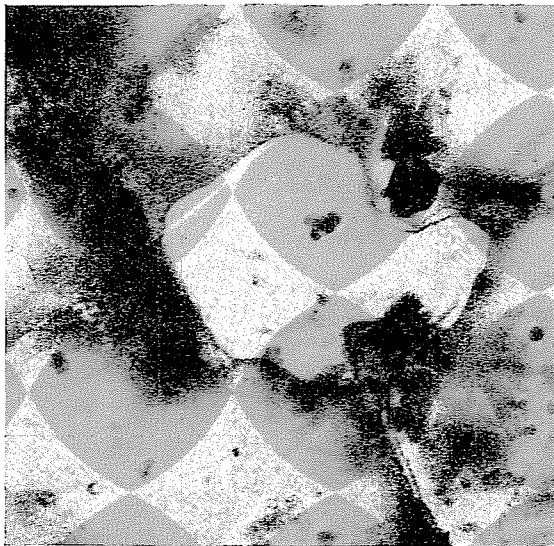
Abb. 15 und 16, die ebenfalls von der Arbeitsfläche gemacht wurden, zeigen beim Schleifen entstandene und zum Herausbrechen der Mikrokristalle führende Risse.

Die Untersuchungen berechtigen zu der Feststellung, daß zu einer exakteren und gründlicheren Kennzeichnung der Elektrokorundkörner die Kenntnis der nur auf elektronenmikroskopischem Wege erschließbaren Mikrostruktur von grundsätzlicher Bedeutung ist.

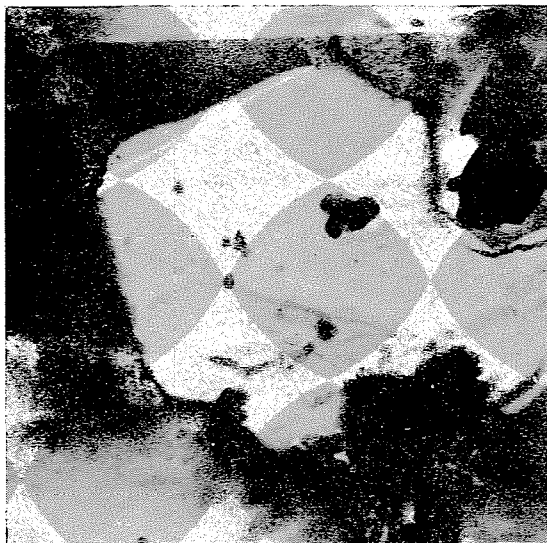


Abb. 11. Elektrokorund-Mikrokristallpakette verschiedener Orientationen KEM 1. 60 000fach

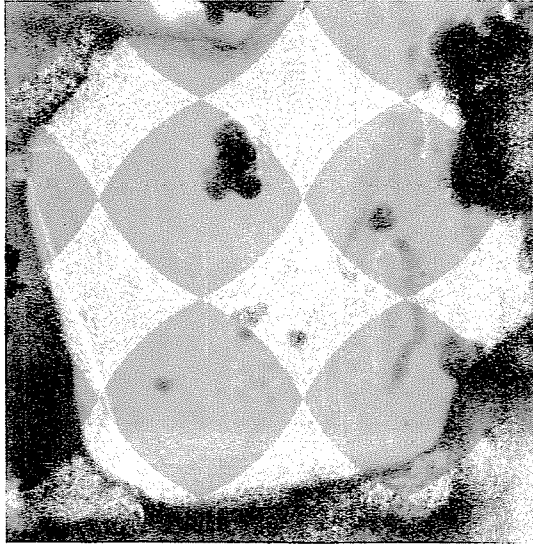
Die nähere Kenntnis dieses Gefüges im engeren Sinne und das Wissen vom polykristallinen Aufbau vermag die exakten Grundlagen für die Lösung der miteinander eng verknüpften Probleme von Bindung und Funktion der Schleifkörner zu liefern.



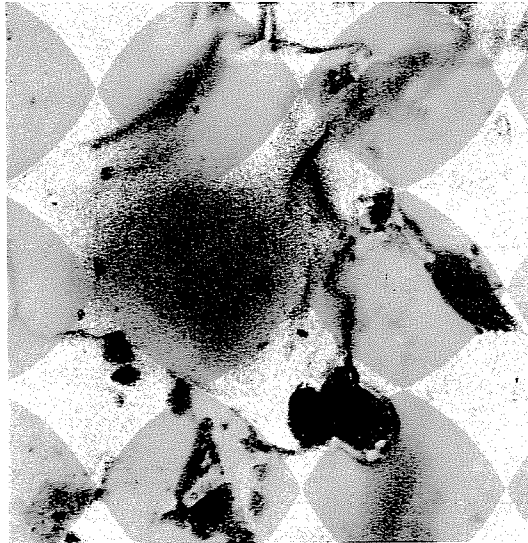
*Abb. 12.* Abnützungsfäche eines Korund-Mikrokristalls mit Bindemittel-Stützfeilern KEM 1.  
60 KV, 15 000fach



*Abb. 13.* Abnützungsfäche eines Korundmikrokristalls mit Bindemittel-Stützfeilern KEM 1.  
60 KV, 23 750fach



*Abb. 14.* Abnützungsfläche eines Korund-Mikrokristalls mit Bindemittel-Stützpfeilern KEM 1. 60 KV, 28 000fach



*Abb. 15.* Risse als Ursache der Ausbröckelung eines Korund-Mikrokristalls KEM 1. 60 KV, 10 000fach



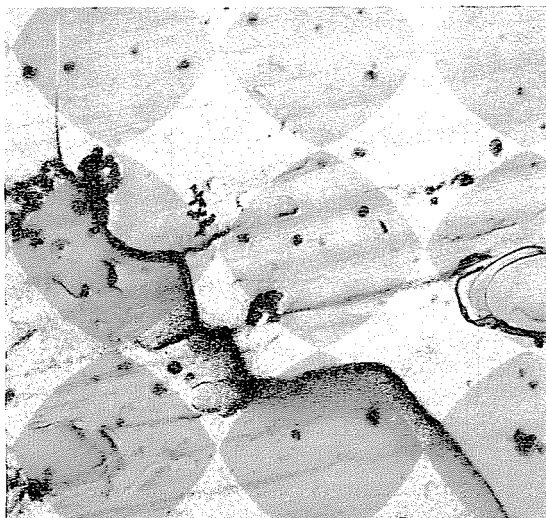


Abb. 16. Risse an der Oberfläche des Korund-Mikrokristalls KEMI. 60 KV 15 000fach

### *Keramische Bindemittel*

#### *Prüfung der keramischen Bindemittel im Heizmikroskop*

Unsere derzeitigen Bindemittel basieren zum Teil auf der »Ton«-Feldspat-Grundlage. Der dritte, herkömmliche Hauptkomponent, der Quarz, spielt als bewußt zugesetzter Bestandteil keine Rolle mehr, sondern gelangt als Begleitmineral des Tones in schwankenden Anteilen in den Zusatz [38].

Unter den Bindemittelkomponenten ist der skandinavische Feldspat von guter und verlässlicher Qualität, Demgegenüber ist der zweite Komponent, das illitische Tongestein von Füzérradvány — wie allgemein bekannt — von schwankender Beschaffenheit [50].

Der dritte Rohstoff, der Ton von Kisterenye (Nemti), ist ein gewöhnlicher Klinkerton.

Die Schwankungen der mineralischen Zusammensetzung und der Beschaffenheit der Bindemittelkomponenten machen es zwecklos, sich mit ihrer chemischen Zusammensetzung zu befassen. Aus unseren derzeitigen einheimischen Bindemitteln wurde zur Untersuchung jenes gewählt, welches folgende Zusammensetzung hat:

- 40 Gew.-% skandinavischer Feldspat
- 30 Gew.-% Ton von Kisterenye
- 30 Gew.-% illitisches Tongestein von Füzérradvány.

Die Korngrößenverteilung des Bindemittels wurde durch Sedimentierung im Robinson-Köhn-Apparat bestimmt, wobei sich folgende Fraktionanteile ergaben:

|       |          |       |
|-------|----------|-------|
| über  | 60 $\mu$ | 8,4%  |
| 60—   | 10 $\mu$ | 51,6% |
| 10—   | 2 $\mu$  | 24,9% |
| unter | 2 $\mu$  | 15,1% |

Mit Rücksicht auf die beschriebenen grundsätzlichen Mängel des auserwählten Bindemittels wurde zur parallelen Untersuchung der Bindungsvorgänge ein borhaltiges, auf eine Korngröße von weniger als 2 $\mu$  vermahlenes Bindemittel aus boroxydhaltiger Fritte, Kaolin und Erdalkalibicarbonaten entwickelt.

Zwischen diesen beiden Bindemitteltypen stand eine dritte, die es ermöglichen sollte, die naheliegendsten Verbesserungen unserer derzeitigen Gegebenheiten kennenzulernen. Die Zusammensetzung dieses dritten Bindemittels ist dieselbe wie die des beschriebenen, illithaltigen Bindemittels, jedoch enthält es Dank dem weiteren Vermahlen ähnlich wie die gefritteten Bindemitteln nur Körner unter 2  $\mu$ .

Die drei Bindemittel bzw. die durch diese gebundenen, korundkornhaltigen Proben werden im weiteren wie folgt bezeichnet:

- illithaltiges Bindemittel bzw. illithaltige Schleifkörper,
- modifiziertes (feingemahlene),
- illithaltiges Bindemittel (bzw. Schleifkörper),
- gefrittetes Bindemittel (bzw. Schleifkörper).

Das Verhalten der Bindemittel während des Erhitzens und ihre kennzeichnenden Formänderungen wurden mit Hilfe eines Leitzschen Heizmikroskops Type II A untersucht. Die Anheizgeschwindigkeit betrug 8,5 °C/min.

Es wurden zunächst Aufnahmen der reinen Bindemittel gemacht und sodann aus einem Gemenge von 20 Gew.-% Bindemittel und 80 Gew.-% Korundkörner von 60  $\mu$  Nennkorngröße unter Zusatz von Dextrin (als provisorischem Bindemittel) in erdfeuchtem Zustand Proben gepreßt und untersucht. 20 Gew.-% ist der gebräuchlicher Bindemittelanteil, die Körner von 60  $\mu$  Nenngröße hingegen sind zum Herstellen von Schliffen (für Zwecke der späteren mikroskopischen Untersuchungen) besser geeignet als die größeren Körner. Die korundhaltigen, zylindrischen Probekörper von 3 mm Durchmesser und 3 mm Höhe wurden während des Erhitzens zur Sicherung der Reproduzierbarkeit der Betriebsverhältnisse mit einer Platinplatte belastet, deren Gewicht demjenigen einer mittelhohen Scheibenkolonne entsprach. Die Aufnahmen zeigen die Schattenbilder der Bindemittel- bzw. Schleifkörperproben in fünffacher Vergrößerung.

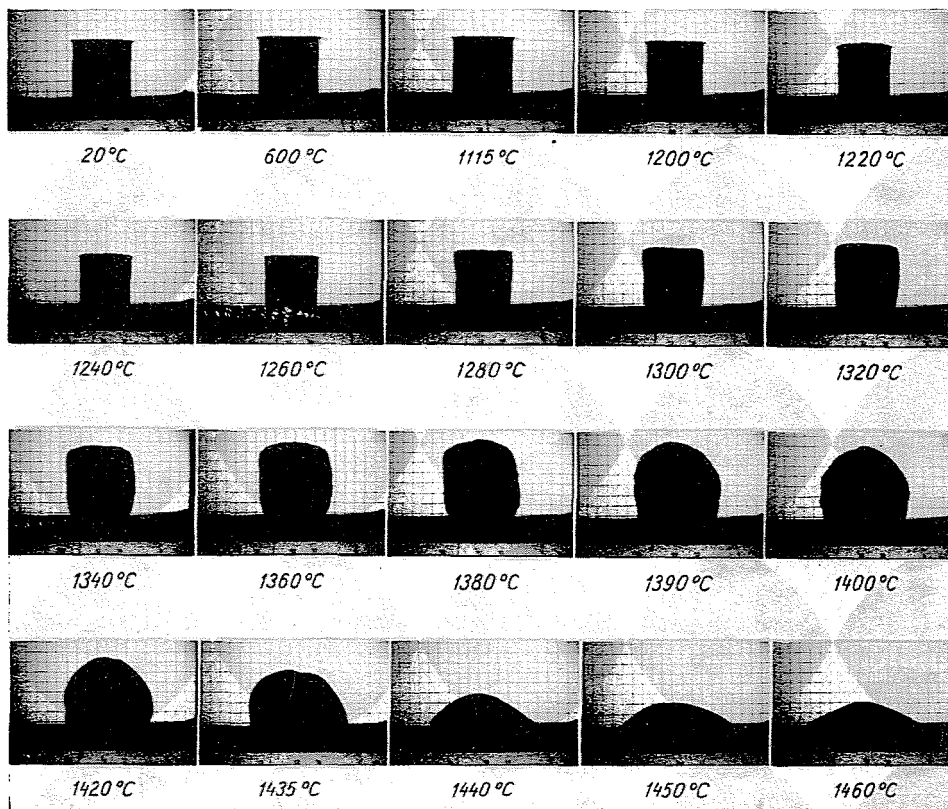


Abb. 17. Heizmikroskopische Aufnahmen eines illithaltigen Bindemittels 5fach

Die Heizmikroskop-Aufnahmen des illithaltigen Bindemittels sind besonders kennzeichnend (Abb. 17).

Bis 1100 °C zeigen sich kaum Veränderungen, bei 1200 °C setzt das Schwinden ein, welches um etwa 1260 °C sein Ende erreicht. Den Beginn der Erweichung bei 1300 °C läßt die Änderung der Umrise erkennen. Das Erweichen setzt sich unter gleichzeitigem Wachsen fort. Wegen des ungleichmäßigen Wachstums kann der vereinbarungsmäßige Schmelzpunkt, bei welchem die Probe halbkugelförmig sein sollte [51], nicht genau ermittelt werden (um etwa 1400 °C).

Das Schmelzen der Probe setzt bei 1370 °C ein, und bei 1450 °C ist die Probe gänzlich zerflossen. Auffallend ist die Tatsache, daß sich der Rauminhalt mit zunehmender Erweichung auf mehr als das Anderthalbfache erhöht. Die Blähung ist nach den mineralogisch-petrographischen Untersuchungen von KISS und TAKÁTS [50] dem im illitischen Tongestein von Füzérradvány häufig vorhandenen Adular und dem Hämatit zuzuschreiben. Der Adular

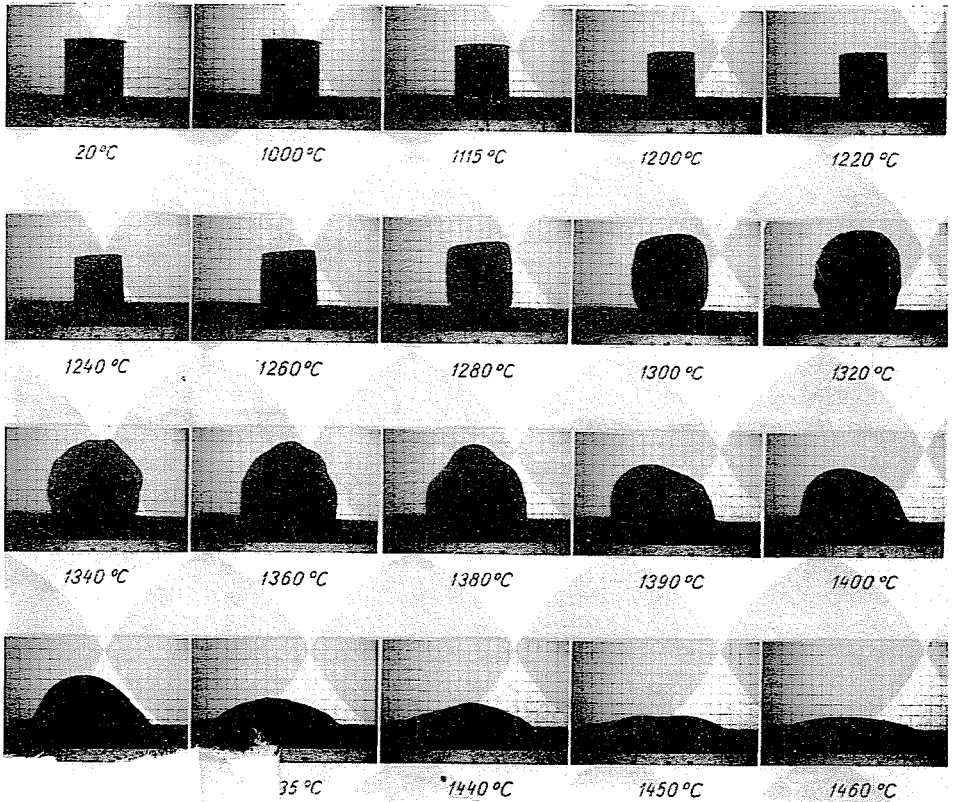


Abb. 18. Heizmittel-optische Aufnahmen eines modifizierten illithaltigen Bindemittels 5fach

findet sich sowohl in den groben als auch in den feinen, meist quarzreichen Fraktionen des illitischen Gesteins in eisenoxyd- und eisenhydroxydreicher Umgebung, u. zw. in Begleitung von Eisenoxyd in Form von Hämatit. In gleicher Weise ist auch der limonithaltige Ton von Kisterenye zu berücksichtigen. Der Adular schmilzt inkongruent bei 1170 °C unter Entstehen von Leuzit und einer  $\text{SiO}_2$ -haltigen Schmelze. Hämatit geht unter Abspaltung von Sauerstoff in Magnetit über, und die Schmelze, die den noch nicht zersetzten Hämatit umhüllt, wird bei der Zersetzung des Hämatits durch das entweichende Gas aufgebläht.

Auf das Verhalten des modifizierten, illithaltigen Bindemittels übt die innige Vermengung und die größere Berührungsfläche der feingemahlene Körner einen ausgeprägten Einfluß aus (Abb. 18). Die Temperaturen liegen beim Einsetzen des Schwindens um etwa 80 °C, beim Erweichen um 40 °C, beim Schmelzen um etwa 50 °C niedriger. Die Abweichung in den abkommen-gemäßen Schmelzpunkte (die auch in diesem Falle nicht genau beobachtet werden konnten) war im Verhältnis zu dem vorherigen geringer.

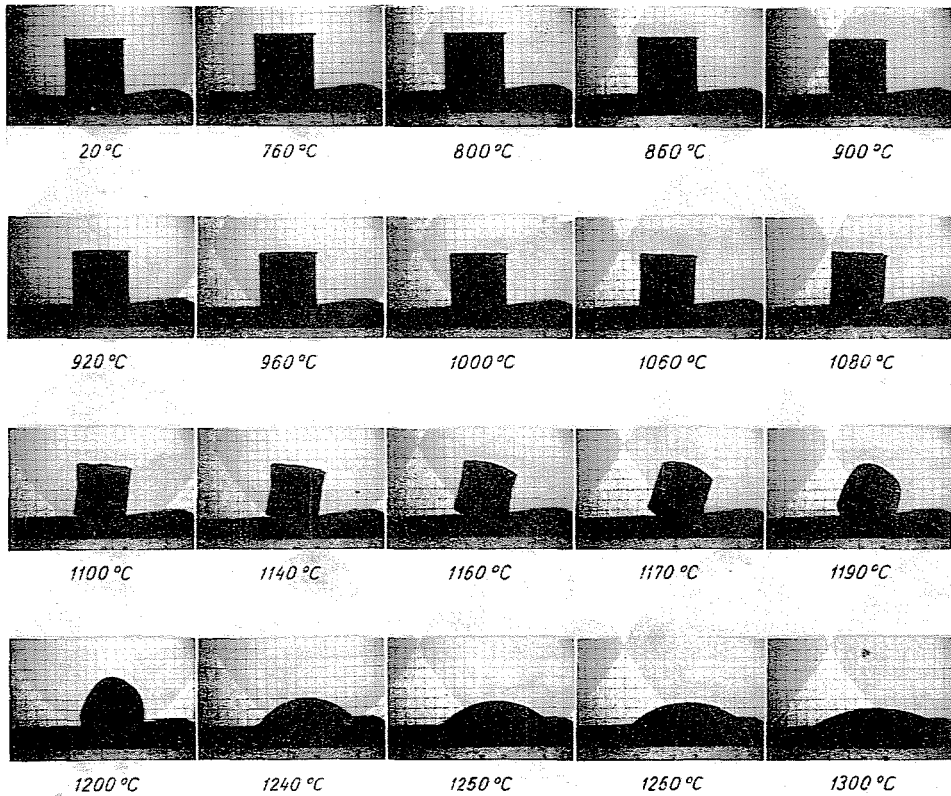


Abb. 19. Heizmikroskopische Aufnahmen eines gefritteten, borosilikatischen Bindemittels 5fach

Der Vergleich des Verhaltens der beiden Proben beim Erhitzen weist auf die Bedeutung des Dispersitätsgrades hin. Durch die Verringerung der Korngröße und durch die durch sie bedingte Vergrößerung der spezifischen Oberfläche werden die mit dem Heizmikroskop gut beobachtbaren Vorgänge beschleunigt. Sie setzen bei der modifizierten Probe aus feingemahlenem Bindemittel um etwa 50 °C früher ein.

Das gefrittete Bindemittel ist im Vergleich zu den beiden anderen durch das bei tieferer Temperatur einsetzende und gleichmäßige Schwinden und Erweichen gekennzeichnet.

Der Rauminhalt nimmt nicht zu, der Schmelzpunkt liegt bei etwa 1220 °C. Bei 1300 °C zerfließt die Probe (Abb. 19). Ein merkliches Schwinden der gebundenen, elektrokorundhaltigen Proben konnte wegen des überwiegenden Korundkörneranteiles nicht beobachtet werden, die Verschiebung der Temperaturen beim Erweichungsverhalten bzw. beim durch Blähung begleiteten Schmelzen macht sich jedoch auch hier bemerkbar. Die illitisch gebundenen, korundkornhaltigen Proben (Abb. 20) erweichen bzw. schmelzen

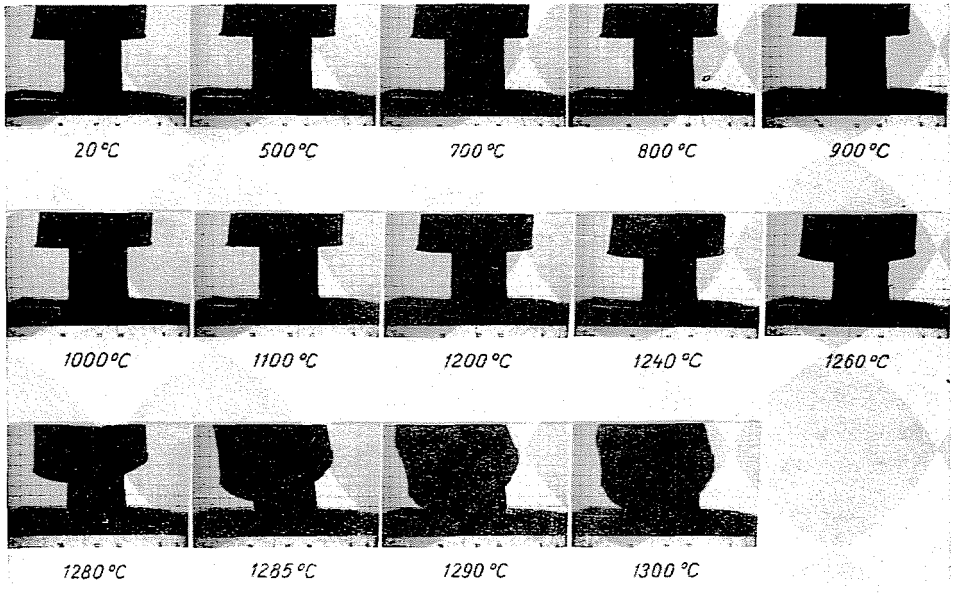


Abb. 20. Heizmikroskopische Aufnahmen eines korundkornhaltigen Schleifkörperzylinders mit illitischer Bindung 5fach

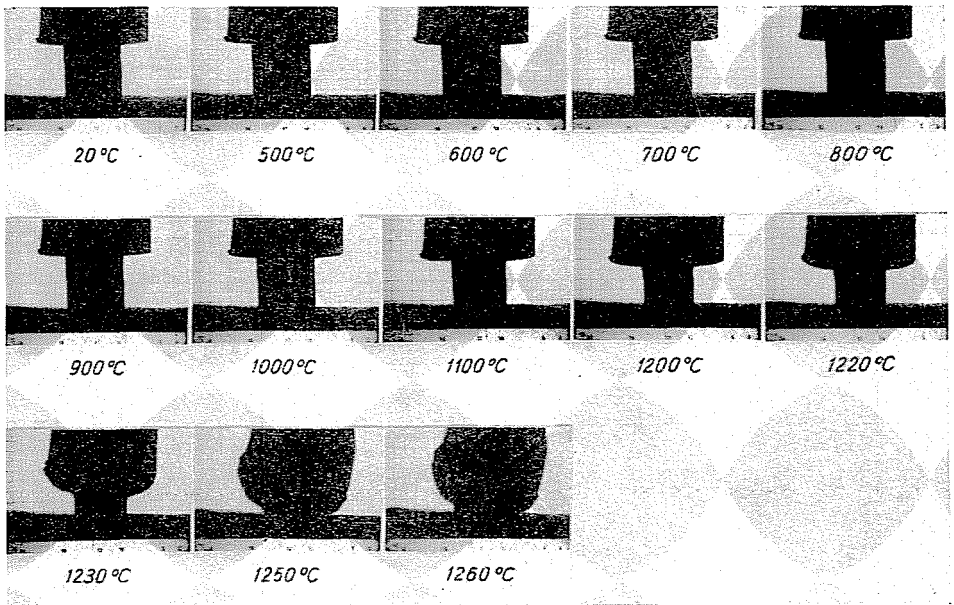


Abb. 21. Heizmikroskopische Aufnahmen eines korundkornhaltigen Schleifkörperzylinders mit modifizierter, illitischer Bindung 5fach

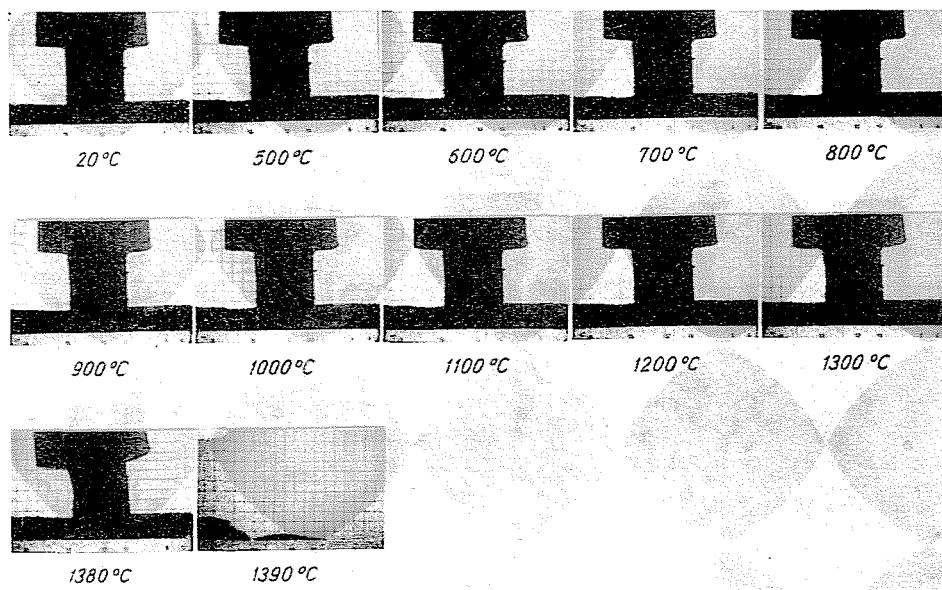


Abb. 22. Heizmikroskopische Aufnahmen eines korundkornhaltigen Schleifkörperzylinders mit gefritteter Bindung 5fach

bei um etwa  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  höheren Temperaturen, als die durch das modifizierte illitische Bindemittel gebundenen (Abb. 21). Der glasige Charakter der Probe mit gefrittetem Bindemittel liefert die Erklärung für das allmähliche Erweichen, welchem bei  $1390\text{ }^{\circ}\text{C}$  sprunghaft das Schmelzen und gleichzeitig das Zerfließen folgt (Abb. 22).

Auffallend ist die Tatsache, daß das gefrittete Bindemittel, welches an sich den tiefsten Schmelzpunkt hat (Abb. 19), beim Binden der Korundkörner bei wesentlich höheren Temperaturen erweicht bzw. schmilzt (Abb. 22). Dies erklärt sich daraus, daß sich wegen der energischen aufschließenden Wirkung des Bindemittels auf der borosilikatischen Grundlage der Gehalt des Bindemittels an  $\text{Al}_2\text{O}_3$  während des Brennens merklich erhöht und auch eine Erhöhung der »Feuerfestigkeit« bewirkt.

Wegen der geringen Größe der Prüfkörper für das Heizmikroskop, ferner wegen der nicht gleichwertigen Reproduktion der Betriebsverhältnisse und schließlich wegen der abweichenden Wärmebehandlungsbedingungen veranschaulichen diese Methode bzw. die erwähnten Aufnahmen das Verhalten der Schleifkörper beim Brennen nur annähernd und weisen somit eher auf die relativen Abweichungen hin. Die Ursachen für die Abweichungen in der Form und in den Abmessungen müssen folglich auf anderem Wege gesucht werden.

### Thermoanalytische Prüfungen

#### a) Derivatographische Messungen

Das Ziel der derivatographischen und dilatometrischen Prüfungen bildete nicht so sehr die genaue Auswertung der thermischen Reaktionen unserer heterogenen, in mineralogisch-petrographischer Hinsicht nicht genau geklärten

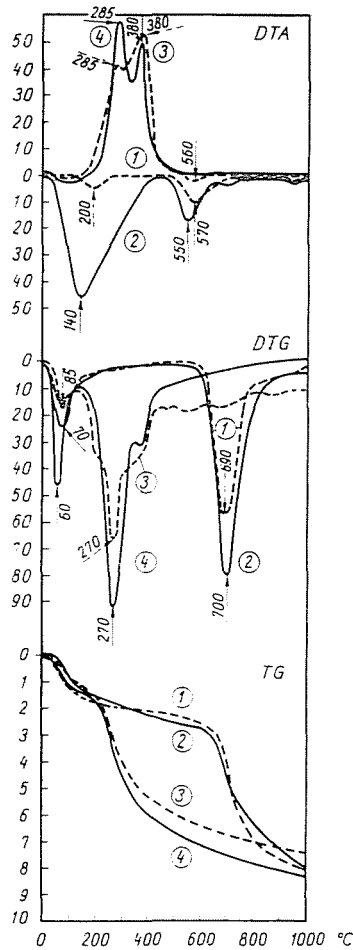


Abb. 23. Derivatographische Aufnahmen von illitischen (1), modifizierten illitischen (2) Bindemitteln und von korundkornhaltigen Gemengen, mit diesen gebunden (3, 4)

Bindemittel von fallweise wechselnder Zusammensetzung, als vielmehr die Klärung der Wirkung jener Faktoren, die die während der Wärmebehandlung sich abspielenden Vorgänge beeinflussen. Die DTA-, DTG- und TG-Aufnahmen



von den illithaltigen und den modifizierten Proben sowie von deren Gemengen mit Korundkörnern werden hier gemeinsam erörtert (Abb. 23). Die Abweichung im Verhalten des illithaltigen und des modifizierten Bindemittels äußert sich auch in diesem Falle. Das adsorbierte und das interlaminaire Wasser entweicht bei etwa 150 °C, das Konstitutionswasser bei Temperaturen zwischen 550°

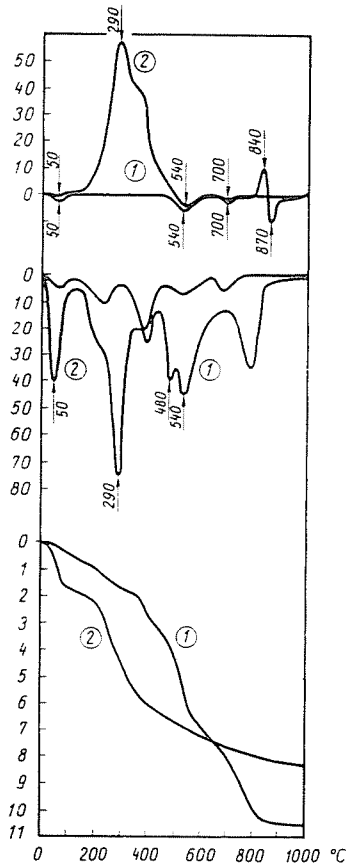


Abb. 24. Derivatographische Aufnahmen des gefritzten, borosilikatischen Bindemittels (1) und dessen Gemenge mit Korundkörnern (2)

und 600 °C. Aus naheliegenden Gründen entweicht das letztere aus dem Bindemittel mit der größeren spezifischen Oberfläche leichter bzw. bei tieferen Temperaturen. Zwischen den endothermen DTA- und DTG-Spitzen, die das Entweichen des Konstitutionswassers andeuten, zeigt sich eine Verschiebung von etwa 50 °C. Bei den gleichen, jedoch mit Korundkörnern vermengten Bindemitteln ist auch der exotherme Effekt des Ausbrennens des provisorischen Bindemittels (Dextrin) auffallend. Der Feldspat, der nahezu die Hälfte des

20 Gew.-% Bindemittelgehaltes der korundkornhaltigen Proben ausmacht, erleidet keine Reaktionen, die einen thermischen Effekt auslösen würden; es ist also klar, daß die thermischen Zersetzungen bei den korundhaltigen Proben — abgesehen vom Ausbrennen des provisorischen Bindemittels — viel schwächere Effekte aufweisen.

Die Wirkung der größeren spezifischen Oberfläche kommt im Einklang mit den Ergebnissen bei den DTA-Kurven auch bei den DTG- und TG-Kurven zur Geltung. An den Aufnahmen vom frittehaltigen Bindemittel (Abb. 24) lassen sich neben den thermischen Effekten des in beträchtlichen Mengen vorhandenen Kaolins auch diejenigen der in verhältnismäßig geringeren Mengen vorhandenen Erdalkalikarbonate erkennen. Die Spitzen der DTG-Kurve des Bindemittels bei 480 °C und bei 530 °C weisen darauf hin, daß der verwendete Kaolin von Sárísáp auch sonstige Mineralien der Kaolinitgruppe enthielt.

Ein thermischer Effekt der zuvor erschmolzenen boroxydhaltigen Fritte ist selbstverständlich nicht direkt festzustellen.

Der kennzeichnende exotherme Ausschlag der korundhaltigen Probe mit frittehaltigem Bindemittel rührt ebenfalls vom Dextrin her. Die Aufnahmen wurden mit einer Anheizgeschwindigkeit von 10 °C/min. gemacht.

### b) Dilatometrische Prüfungen

Die Wärmedehnungskoeffizienten der Korund- und Bindemittelphasen der Schleifkörper weichen im günstigen Falle von einander nicht wesentlich ab [5]. Dies ist aus zwei Gründen von Bedeutung: erstens mit Rücksicht auf die Spannungen, die beim Brennen und Abkühlen der Schleifkörper entstehen,

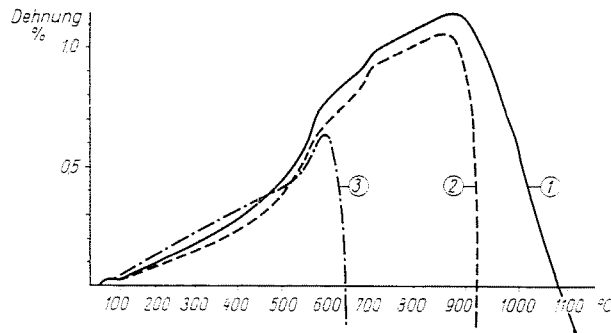


Abb. 25. Dilatometrische Aufnahmen des illithaltigen Bindemittels (1), des modifizierten, illithaltigen Bindemittels (2), des gefrittetten, borosilikathaltigen Bindemittels (3)

zweitens im Hinblick auf die Volumänderungen, die durch die thermischen Beanspruchungen beim Gebrauch der Schleifkörper hervorgerufen werden. Aus den dilatometrischen Kurven der Bindemittel (Abb. 25) kann festgestellt

werden, daß das Feinmahlen der illitischen Proben eine merkliche Verminderung der Ausdehnung zur Folge hat, und daß das starke Schwinden, welches der Zerstörung des Kristallgitters folgt, früher beginnt und sich schneller abspielt. Die Bedeutung dieses Unterschiedes in der Wärmedehnung und im Schwinden wird durch die der Korundkurve weit näher liegende Dilatationskurve des frittehaltigen Bindemittels, die einen für glasige Substanzen kennzeichnenden Verlauf und eine um etwa 50% geringeren Ausschlag zeigt, wesentlich herabgesetzt.

Das Dilatationsverhalten der Bindemittel stellt auch hinsichtlich des Festhaftens des Bindemittels an den Schleifkörnern bzw. des Eindringens in deren Oberflächengebilde und somit hinsichtlich des Zustandekommens der Festigkeits- und Elastizitätseigenschaften ein wichtiges Kennzeichen für die Bindung dar.

Die Aufnahmen wurden mit einem Leitz-Bollenrath-Dilatometer Type UBD bereitet. Die Anheizgeschwindigkeit betrug hierbei 10 °C/min.

### Röntgenographische Untersuchungen

Die Phasenzusammensetzung der keramischen Bindungen und parallel damit die Korundkörner wurden auf röntgenographischem Wege untersucht.

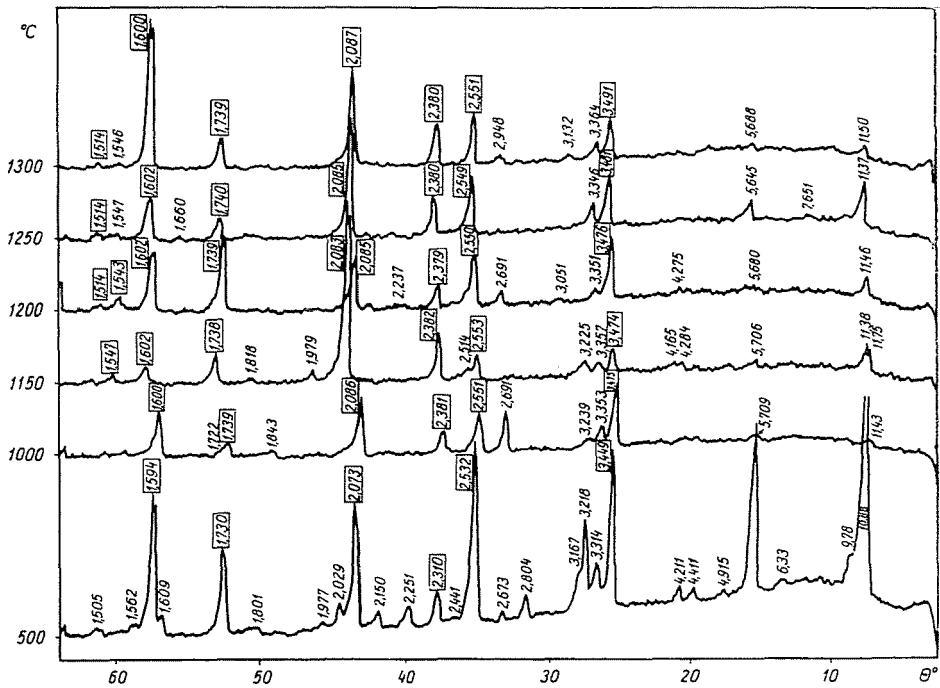


Abb. 26. Röntgendiffraktometrische Aufnahmen von korundkornhaltigen Proben mit illitischer Bindung

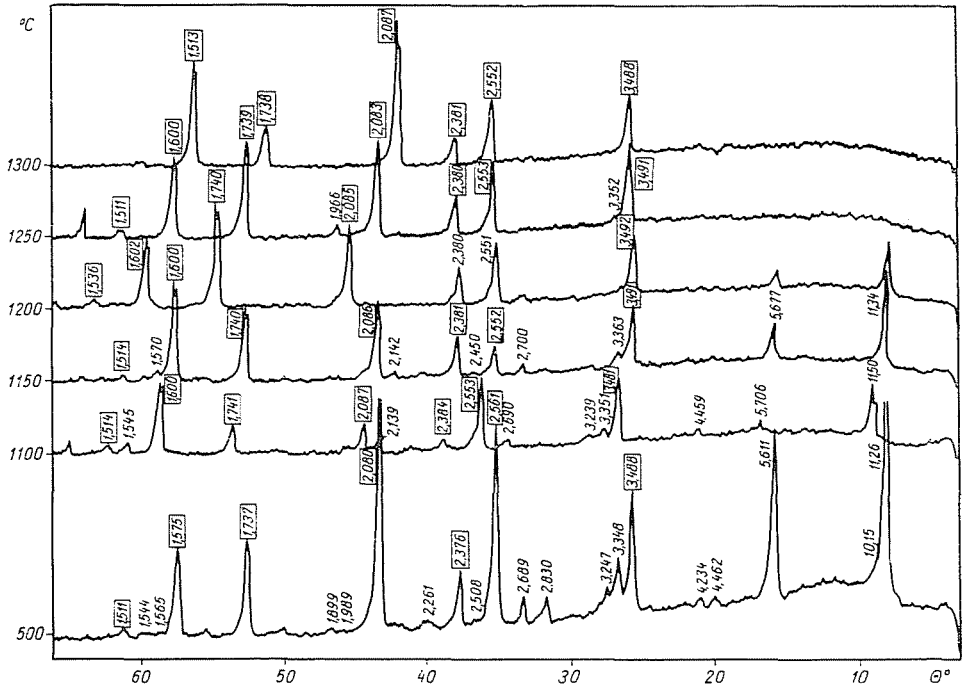


Abb. 27. Röntgendiffraktometrische Aufnahmen von korundkornhaltigen Proben mit modifizierter, illitischen Bindung

Das Schrifttum bezeichnet die keramischen Bindungen zwar einheitlich, aber ohne besondere Begründung und ohne eigentliche Grundlage als glasartige Silikate. In den Arbeiten FILONENKOS [10] finden sich Hinweise darauf, daß die Zug-, Druck- und Bruchfestigkeit des Bindemittels durch die Menge der in ihm enthaltenen glasartigen Phasen bestimmt wird. Im Hinblick auf die neuesten Erkenntnisse vom Wesen des Schleifvorganges [8] sollen hier die Schleifwerkzeuge statt durch die üblichen Festigkeitskennwerte in erster Linie durch die elastische Verformung gekennzeichnet werden, und auch die Phasenzusammensetzung, wie sie sich bei der Endtemperatur des Brennens der Bindemittel ergibt, wird im weiteren in ihrem Zusammenhang mit diesen Eigenschaften analysiert werden.

Die Meßergebnisse sind in den Abbildungen 26, 27 und 28 zusammengefaßt.

Die röntgenographischen Aufnahmen wurden nur qualitativ ausgewertet.

Die Probekörper bestanden aus 80 Gew.-% Korundkörnern und 20 Gew.-% Bindemittel. Sie wurden auf die bei den Festigkeitsprüfungen geschilderte Weise hergestellt.

Der Verlauf des Bindungsprozesses wurde schrittweise verfolgt, u. zw. bei den illitischen Proben beginnend bei 1100 °C in Stufen von je 50 °C,

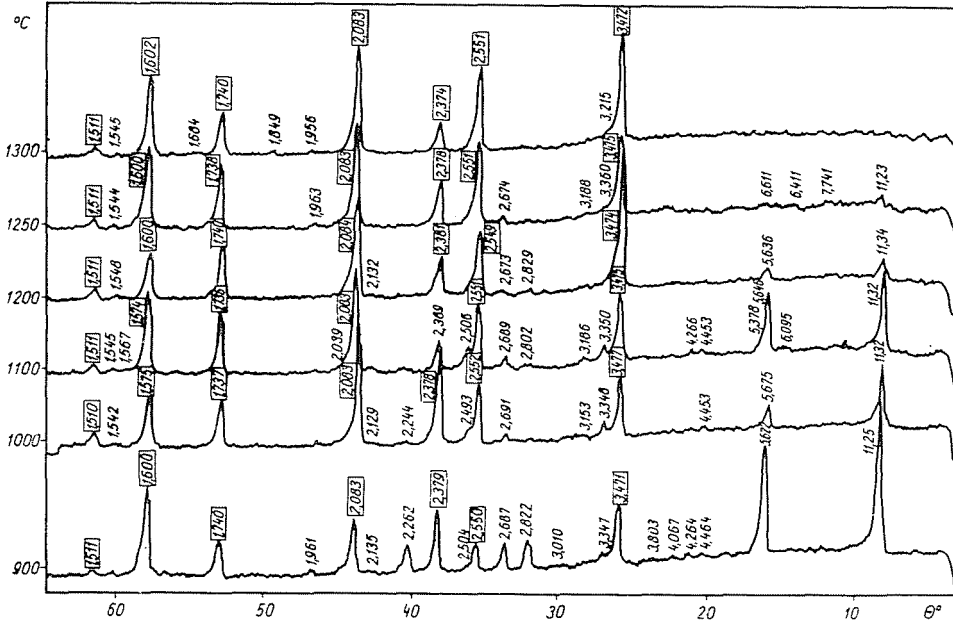


Abb. 28. Röntgendiffraktometrische Aufnahmen von korundkornhaltigen Proben mit gefritteter, borosilikatischen Bindung

bei den gefritzten Proben hingegen von 900 °C an zunächst in Stufen von 100 °C und sodann in solchen von 50 °C bis zur Höchsttemperatur von 1300 °C. Der für die jeweiligen Umstände kennzeichnende Zustand wurde durch rasche Abkühlung der gebrannten Probe fixiert. Bei den illitischen Proben figurieren ergänzend auch Aufnahmen bei 500 °C.

In den Abbildungen sind die Reflexionen des  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  einheitlich mit umgerahmten, sämtliche andere mit einfachen Ziffern bezeichnet.

Betrachtet man die ideale keramische Bindung im Sinne der Literaturangaben [10] als glasartiges Silikat, dann läßt sich die Umwandlung des ursprünglich zur Hauptsache aus kristallinen Komponenten bestehenden Bindemittels zur röntgenamorphen glasigen Bindung anhand der Aufnahmen gut verfolgen. Auf Grund der weiter oben dargelegten Erwägungen liegt die optimale Brenntemperatur für die Proben mit illitischer und gefritteter Bindung unter den geschilderten Versuchsbedingungen bei etwa 1300 °C, bei jenen mit modifizierter illitischer Bindung bei einem um ca. 50 °C niedrigeren Wert.

Der in den illitischen Proben aufscheinende Quarz und Leuzit (Abb. 26: 1250 °C, 1300 °C, Abb. 27: 1250 °C) und der in der gefritteten Probe verbliebene Quarz (Abb. 28: 1300 °C) läßt sich durch weitere Wärmebehandlung umwandeln. Das  $\text{Na}_2\text{O} \cdot 11 \text{Al}_2\text{O}_3$ , welches die Güte der Korundkörner beeinträcht-

tigt, fand sich sowohl in den illitischen als auch in den gefritteten Proben vor.

Die Kenndaten der erwähnten kristallinen Komponenten enthält die hier folgende Tabelle.

| ASTM 3-0467<br>$K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 4SiO_2$ Leucit |     | Ergebnisse der Messungen an den untersuchten Proben |                                     |                      |
|---|-----|---|-------------------------------------|----------------------|
|   |     | illitisch<br>1300 °C                                | modifiziert<br>illitisch<br>1250 °C | gefrittet<br>1300 °C |
| d Å   | L/I | d Å   |                                     |                      |
| .   | .   | .   | .                                   | .                    |
| .   | .   | .   | .                                   | .                    |
| .   | .   | .   | .                                   | .                    |
| 3,27  | 100 | .   | .                                   | 3,21                 |
| 3,14  | 5   | 3,13  | .                                   | .                    |
| 2,93  | 30  | 2,94  | .                                   | .                    |

| ASTM 1-1300<br>$Na_2O \cdot 11Al_2O_3$ Natrium-<br>aluminiumoxid |                  | Ergebnisse der Messungen an den untersuchten Proben |                      |
|--|------------------|---|----------------------|
|  |                  | illitisch<br>500 °C                                 | illitisch<br>1300 °C |
| d Å  | I/I <sub>1</sub> | d Å   |                      |
| 11,8   | 53               | 11,43   | 11,50                |
| 5,7  | 13               | 5,70  | 5,68                 |
| 4,45   | 9                | 4,41  | .                    |
| .  | .                | .   | .                    |
| .  | .                | .   | .                    |
| 2,79   | 17               | 2,80  | .                    |
| 2,67   | 40               | 2,67  | .                    |
| .  | .                | .   | .                    |
| .  | .                | .   | .                    |
| .  | .                | .   | .                    |
| 2,40   | 27               | 2,40  | .                    |
| 2,23   | 27               | 2,23  | .                    |
| .  | .                | .   | .                    |
| .  | .                | .   | .                    |
| 2,02   | 40               | 2,02  | .                    |
| 1,93   | 27               | 1,97  | .                    |
| 1,84   | 13               | 1,84  | .                    |
| 1,59   | 53               | 1,59  | .                    |
| 1,56   | 20               | 1,56  | .                    |

| ASTM 5-0490<br>SiO <sub>2</sub> z-Quarz |                  | Ergebnisse der Messungen an den untersuchten Proben |                                     |                      |
|---|------------------|---|-------------------------------------|----------------------|
|   |                  | illitisch<br>1300 °C                                | modifiziert<br>illitisch<br>1250 °C | gefrittet<br>1300 °C |
| d Å                                     | I I <sub>1</sub> | d Å   |                                     |                      |
| 3,343                                   | 100              | 3,364   | 3,352                               | .                    |
| .                                       | .                | .   | .                                   | .                    |
| .                                       | .                | .   | .                                   | .                    |
| 1,980                                   | 6                | .   | 1,966                               | 1,956                |
| 1,810                                   | 17               | .   | .                                   | 1,849                |
| .                                       | .                | .   | .                                   | .                    |
| .                                       | .                | .   | .                                   | .                    |
| .                                       | .                | .   | .                                   | .                    |
| 1,672                                   | 7                | .   | .                                   | 1,684                |
| .                                       | .                | .   | .                                   | .                    |
| .                                       | .                | .   | .                                   | .                    |
| 1,541                                   | 15               | .   | .                                   | 1,545                |

### Festigkeitsprüfungen

Das Maß der Brauchbarkeit von Schleifkörpern wird auf Grund ihrer Schleifleistung entschieden. Die Resultierende sämtlicher Eigenschaften kommt hier zur Geltung. In der gegenwärtigen Praxis werden die vereinbarungsgemäßen oder die sonstigen Kennwerte der Schleifkörper einzeln ermittelt, da jedoch ihre Gesamtauswirkungen nicht genau bekannt sind, wird die Schleifleistung ausschließlich auf experimentellem Wege bestimmt.

Die neueren Erfolge [52], [53], die auf dem Gebiet der Erschließung des Wesens des Schleifvorganges erzielt wurden, weisen anstelle des unklaren und überholten, jeden realen Inhaltes baren Begriffes der Bindungshärte auf die Eigenschaften der Schleifkörner und der Bindemittelbrücken — als entscheidend wichtigen Strukturelementen des Schleifkörpers — hin. Der heutige Stand der Schleiftechnik läßt es als erwünscht erscheinen und die verfügbare Instrumentation ermöglicht es, daß die Verbraucher nebst der Prüfung der einzelnen Körner auch die Eigenschaften der einzelnen Bindemittelbrücken untersuchen [41]. Vom Gesichtspunkt der vorliegenden Arbeit läuft dies darauf hinaus, daß das Wesen der Ausbildung und der Rolle der Bindemittelbrücken nach den den Verwendungsverhältnissen entsprechenden Gesichtspunkten letzten Endes individuell untersucht werden muß.

Die Schleifkörper schleifen und nützen sich während der periodischen Einwirkung verschiedener Beanspruchungen ihrer Festigkeit ab. Dreht sich z. B. eine Schleifscheibe mit 5000 Umdrehungen je Minute, so erleiden die

Körner und die Bindemittelbrücken an der Arbeitsfläche des Schleifkörpers je Minute 5000 Stöße. Vor allem aus Sicherheitsgründen ist die ausreichende mechanische Festigkeit eine elementare Forderung. Die heutzutage gebräuchlichen Umlaufgeschwindigkeiten, die selbst 100 m/sec erreichen können, erfordern, daß das Bindemittel fest am Schleifkorn haften. Die gut haftenden Bindemittel entwickeln jedoch gegen Temperaturschwankungen, die beim Schleifen entstehen, einen geringeren Widerstand, weshalb die Volumvergrößerungen, die auf die Wärmestöße folgen, die Bindung zerstören können. Aus der Betrachtung der hauptsächlichlichen Kennzeichen des Schleifprozesses [8] geht hervor, daß es hinsichtlich der Festigkeitsbeanspruchungen sehr wesentlich ist, daß die Schleifkörner während des Gebrauchs ihren Platz sowohl in senkrechter als auch in tangentieller Richtung zur Oberfläche wechseln und daß unterdessen an den Schneidekanten außerordentlich hohe Temperaturen (um etwa 2000 °C) auftreten [25]. Dem sich periodisch wiederholenden Platzwechsel und den durch die Wärmestöße ausgelösten Volumänderungen sowie den gleichzeitigen Zug-, Druck-, Schlag-, Biege- und Scherbeanspruchungen vermag nur eine feste und zugleich elastische Bindung zu folgen. Bei Bindemitteln mit hohem Elastizitätsmodul sind zur Erzeugung der Deformationen starke Kräfte erforderlich oder umgekehrt, bei solchen Bindemitteln wecken die stoßartigen Volumänderungen der Körner hohe Spannungen im Bindemittel. Diese Spannungen können die Zug- und Biegefestigkeit übersteigen, was zur Zerstörung der Bindung führt.

Bindemittel mit kleinem Elastizitätsmodul sind gegen plötzliche Temperaturänderungen widerstandsfähiger.

Überlegt man, wie sich einzelne feinkeramische Produkte, Glasuren und feuerfeste Erzeugnisse, mit denen ja die Schleifkörper bzw. deren Bindungen mehr oder weniger vergleichbar sind, mechanischen und thermischen Einwirkungen gegenüber verhalten, wird man verhältnismäßig wenige exakte Beziehungen entdecken [54]. Bei den Schleifkörpern ist die Lage wegen der heterogenen Phasen, wegen der Änderungen in deren Anteilen und wegen der Gebrauchsumstände noch weit verwickelter.

Im Laufe der Bestrebungen, eine Prüfungsgruppe zu finden, die sich dem Eigenheiten des Aufbaues der Schleifkörper und den Beanspruchungen im Gebrauch am besten anpaßt, wurden die unter der Einwirkung von Spannungen entstehenden Formänderungen als die wichtigsten angesehen und deshalb zur Kennzeichnung der Bindung gewählt. Diese Messungen verfolgten das Ziel, eine Analyse der durch die wesentlicheren technologischen Parameter beeinflussten Bindungseigenschaften auf Grund der eng mit dem Gebrauch verknüpften Daten zu ermöglichen. Auf diese Weise kann auch die wechselseitige Entwicklung der Schleiftechnik und der Schleifwerkzeugproduktion gefördert werden.

Das Hookesche Gesetz, das die Grundlage der Festigkeitslehre bildet,



ist einfach und kennzeichnet dabei gut das Verhalten der meisten Werkstoffe. Die Elastizitätsmodulen, die die Proportionalität bezeichnen, sind die wichtigsten Kennwerte der Materialeigenschaften.

Der beträchtliche Unterschied zwischen den Elastizitätsmodulen der keramischen Bindemittel und der Korundkörner gestattete es, die Bindung der Schleifkörper zu untersuchen, ohne daß die Korundphase die Auswertung gestört hätte. Dies war um so wesentlicher, als die bisherigen »Bindungsprüfungen« gerade wegen der Gegenwart der Korundphase keine eindeutigen Werte ergaben.

Die Messungen wurden mit einer Dehnungsmeßvorrichtung durchgeführt, die auf der Messung des elektrischen Widerstandes beruht und zur dynamischen Messung der mechanischen Formänderungen geeignet ist.

Bei den Dehnungsmessungen wurden auf die Prüfkörper in Längs- und Querrichtung Metalldraht-Dehnungsmaßstreifen geklebt. Sie folgen den durch eine Zerreißmaschine erzeugten Dehnungen, die am proportional sich ändernden elektrischen Widerstand gemessen werden.

Die Vorbereitungen zur Einführung der neuen Untersuchungsmethode und die Durchführung der Messungen erforderten verhältnismäßig umfangreiche und sorgfältige Arbeiten, und da dabei die Meßmöglichkeiten beschränkt waren, haben die Untersuchungen nur den Charakter von Vorversuchen. Als solche wurden sie lediglich an zwei Prüfkörpern je Bindemitteltype durchgeführt.

Bei den Messungen wurde eine Zerreißmaschine Type Sz-10 ( $P_{\max} = 10$  Tonnen), eine Dehnungsmeßbrücke Type EMG 2353 und EMG Dehnungsmeßstreifen vorschriftsgemäß verwendet [55].

Aus erdfeuchten Korundkorn-Bindemittel-Dextrin-Gemengen (mit bereits angegebenen Anteilsverhältnissen) wurden unter einem Druck von  $80 \text{ kp/cm}^2$   $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 110 \text{ mm}$  große Prismen gepreßt. Teilweise wurden sie bei  $1250^\circ\text{C}$ , teilweise bei  $1300^\circ\text{C}$  gebrannt, wobei die Anheizgeschwindigkeit  $5^\circ\text{C/min}$ , die Temperaturhalteperiode 30 min betrug.

Das Brennen bei zweierlei Brenntemperaturen war einerseits dadurch begründet, daß die eine ( $1300^\circ\text{C}$ ) die Spitztemperatur unserer gegenwärtigen betriebsmäßigen Fertigung darstellt, andererseits durch die Ergebnisse von Druckfestigkeitsprüfungen begründet, die gewählt wurden, weil sie es gestatteten, den Fortschritt des Bindungsprozesses durch schnell durchführbare Messungen an zahlreichen parallelen Probekörpern zu verfolgen (siehe weiter unten).

Es wurden folgende Bestimmungen durchgeführt:

1. Spezifische Längsdehnung der Probekörper als Funktion der Belastung.
2. Spezifische Seitenkontraktion als Funktion der Belastung.
3. Aus den Ergebnissen dieser Messungen rechnerische Ermittlung des

Elastizitätsmoduls ( $E$ ) sowie der Poissonschen Faktor ( $\mu$ ) der einzelnen Probekörper.

4. Errechnung des Schubmoduls ( $G$ ) aus der Beziehung [58]

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (3)$$

als besonders wichtigen Kennwertes für den Verschleiß der Schleifkörper.

5. Zugfestigkeit durch Erhöhung der Belastung bis zum Zerreißen der Probekörper.

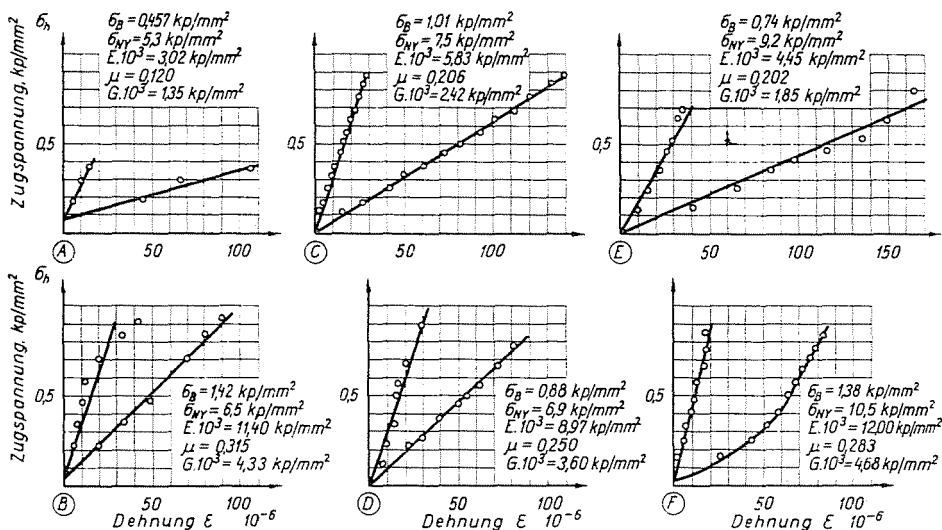


Abb. 29. Elastische Formänderungen bei 1250 °C und bei 1300 °C gebrannter Formkörper

Die Meßgenauigkeit der Dehnungsmeßbrücke entspricht dem Wert von  $10^{-5} \varepsilon$ . Der durch die Querschnittbestimmung bedingte Fehler der Zugfestigkeitsmessung kann im Hinblick auf die durch Schleifen innerhalb einer Toleranz von 0,1 mm gehaltenen Probekörperabmessungen vernachlässigt werden. Die Meßergebnisse sind in Tafel 2 und in der Abb. 29 zusammengefaßt. In den Diagrammen sind gemeinsam mit den spezifischen Längsdehnungswerten die ihnen entsprechenden spezifischen Seitenkontraktionen angeführt.

Die Angaben der Tafel 2 und der Abb. 29 beweisen, daß die Eigenschaften der Schleifkörper unter gegebenen Umständen entscheidend von der Wärmebehandlungstechnologie abhängig sind. Die Erhöhung der Brenntemperatur (in dem durch uns untersuchten Bereich) erhöht die Elastizitätsmodul und damit die Sprödigkeit des Bindemittels. Die Zug- und Druckfestigkeit wird

Tafel 2

## Mechanische Festigkeitswerte der Schleifkörperproben

| Bezeichnung | Probe                            |                       | Zugfestigkeit<br>kp/mm <sup>2</sup> | Druckfestigkeit<br>kp/mm <sup>2</sup> | Elastizitätsmodul<br>bei Zug (E)<br>10 <sup>3</sup> kp/mm <sup>2</sup> | Poissonsche<br>Faktor<br>(μ) | Elastizitätsmodul<br>bei Schub<br>(G)<br>10 <sup>3</sup> kp/mm <sup>2</sup> |
|-------------|----------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|--|------------------------------|---|
|             | Benennung                        | Brenntemperatur<br>°C |                                     |                                       |  |                              |   |
| A           | illithaltig gebunden             | 1250                  | 0,457                               | 5,3                                   | 3,02   | 0,120                        | 1,35  |
| B           | illithaltig gebunden             | 1300                  | 1,42                                | 6,5                                   | 11,40  | 0,315                        | 4,33  |
| C           | modifiziert illithaltig gebunden | 1250                  | 1,01                                | 7,5                                   | 5,83   | 0,206                        | 2,42  |
| D           | modifiziert illithaltig gebunden | 1300                  | 0,88                                | 6,9                                   | 8,97   | 0,250                        | 3,60  |
| E           | frittehaltig gebunden            | 1250                  | 0,74                                | 9,2                                   | 4,45   | 0,202                        | 1,85  |
| F           | frittehaltig gebunden            | 1300                  | 1,38                                | 10,5                                  | 12,00  | 0,283                        | 4,68  |

— nach unserer thermoanalytischen Untersuchung — außer durch die stoffliche Zusammensetzung weitgehend auch durch die Umstände der Glasphasenbildung beeinflusst.

Schon die thermoanalytischen und röntgendiffraktometrischen Untersuchungen zeigten eindeutig, daß die Reaktionen, die zum Entstehen der Bindung führen, durch Vergrößerung der Oberfläche der reagierenden Materialien beschleunigt werden, d. h. daß die Bindung bei gleichbleibender Zusammensetzung bei Verwendung von Bindemitteln mit größerer spezifischer Oberfläche bei niedrigeren Temperaturen zustandekommt. Bei dem Auswerten der Ergebnisse müssen mehrere Gesichtspunkte berücksichtigt werden. Während die Zug- und Druckfestigkeitseigenschaften der bei 1300 °C gebrannten, illithaltigen Proben entschieden günstiger sind, als diejenigen der bei 1250 °C gebrannten, bildet das Brennen bei 1250 °C bei der modifizierten illitischen Bindung das Optimum. Eine weitere Erhöhung der Brenntemperatur hat eine Verminderung der Festigkeit zur Folge. Höhere Festigkeiten und geringere Sprödigkeit (niedrigere Elastizitätsmodulen) treffen sich nur bei den modifizierten illitischen Proben. Zu bemerken ist jedoch, daß zur genauen Deutung der gewonnenen Ergebnisse die Kenntnis der Gebrauchsanforderungen und -umstände unbedingt nötig ist. Konkrete Zeichen dafür, daß solche Verbraucherbestrebungen vorhanden sind, können leider nicht festgestellt und ebendeshalb auch nicht berücksichtigt werden, was jedoch den Wert dieser Angaben keineswegs herabsetzt, da es unser Hauptziel war, die Arten und Möglichkeiten der Planung und Abänderung der Eigenschaften zu erschließen.

Die bisherigen Ergebnisse bringen nicht nur Klarheit über diese Möglichkeiten, sie heben auch die wechselseitige Abhängigkeit von Erzeugung und Verbrauch hervor.

Aus den Meßergebnissen können folgende qualitativen Folgerungen gezogen werden. Die spezifischen Änderungen der Längs- und Querabmessungen der keramischen Bindung, die durch die Spannungen entstehen, sind äußerst kennzeichnende und brauchbare, gut meßbare und verläßlich bestimmbare Kennwerte. Die neuesten Ergebnisse der Forschung über das Schleifen haben die entscheidende Rolle der Elastizitätseigenschaften erwiesen, die Ergebnisse der Dehnungsmessung ermöglichen also die Herstellung von Schleifkörpern, die zur Erreichung optimaler Schleifleistungen geeignet sind.

Im Zuge der Forschungen bezüglich des Schleifvorganges hat die Analyse der geometrischen Belange des Aufbaues und der Eigenschaften von Schleifkörpern Aufschlüsse über die unterschiedlichen Größen der Bindemittelbrücken in einem und demselben Werkzeug und über den Einfluß geliefert, den sie auf die Formänderung ausübt [41].

Bisher war viel von der Bindemittelbrücke, als einem der wichtigsten Strukturelemente gesprochen worden. Auffallenderweise wird dieses Problem fast ausschließlich von Verbraucherseite bzw. im Zusammenhang mit dem Gebrauch behandelt. Im Hinblick auf die Art und Weise des Verschleißes der Schleifkörper erscheint es als selbstverständlich, daß die gleichmäßige Spanabhebung Bindemittelbrücken von gleichbleibender Beschaffenheit und Größe voraussetzt. Vor der näheren Erörterung der Bindemittelbrücken sollen hier zunächst die Festigkeitsprüfungen besprochen werden, an denen die Veränderungen ihres Zustandekommens untersucht wurden.

Die Kinetik des Bindungsvorganges wurde auf Grund der Druckfestigkeitsänderungen untersucht. Die Untersuchungen begannen bei jener Temperatur, bei welcher sich bereits meßbare Werte ergeben, und wurden bis zu einer Höchsttemperatur von 1300 °C fortgesetzt. Es wurden je zehn 15 mm  $\varnothing$   $\times$   $\times$  25 mm messende zylinderförmige Probekörper mit der gleichen Zusammensetzung benutzt, wie sie die weiter oben beschriebenen prismatischen Probekörper hatten. Diese Probekörper wurden bei gegebenen Temperaturen gebrannt und sodann ihre Druckfestigkeitswerte ermittelt (Abb. 30). Der Verlauf der Druckfestigkeitskurve in Abhängigkeit von der Brenntemperatur entsprach jenem, der anhand der bekannten Zugfestigkeitswerte zu erwarten war, eine Tatsache, die als organische Ergänzung bzw. Folge der vorangegangenen Messungen und Folgerungen aufgefaßt werden darf. Diese Ergebnisse zeigen, wie wesentlich die Änderungen in der Zusammensetzung und in den physikalisch-chemischen Eigenschaften der Bindemittel die während der Wärmebehandlung zustande kommenden Eigenschaften der Schleifkörper beeinflussen.

Bei dem frittehaltigen Bindemittel war um 1230 °C ein Rückgang der Festigkeit zu beobachten. Den Ursachen dieser Erscheinung wurde nicht nachgeforscht, zumal die Proben mit diesem Bindemittel bei höheren Endtemperaturen gebrannt wurden.

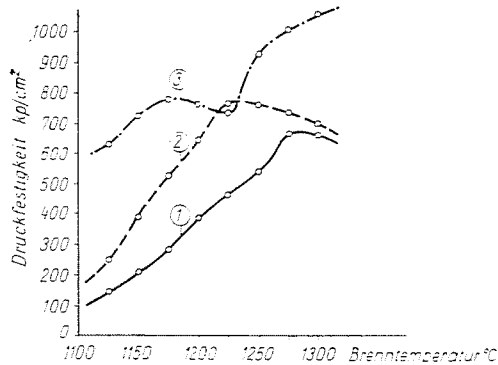


Abb. 30. Druckfestigkeit bei verschiedenen Temperaturen gebrannter Schleifkörper mit illitischem (1), modifiziertem, illitischem (2) und gefrittetem, borosilikatischem Bindemittel (3)

Die bei 1300 °C noch steigende Tendenz der Kurve beweist, daß die Möglichkeiten einer Erhöhung der Festigkeit bei dieser Temperatur noch nicht erschöpft sind. Die Festigkeitsprüfungen bekräftigen auch jene scheinbar selbstverständliche, jedoch nicht überall zur Geltung gebrachte Erkenntnis, daß jeder Bindemittelart und zugleich jeder der verschiedenen Kornsorten, ja selbst der jeweiligen Körnung verschiedentliche optimale Brennbedingungen entsprechen.

### Bindemittelbrücken

Eine häufige Methode der Veranschaulichung des strukturellen Aufbaues der Schleifkörper ist die idealisierte Raumbitterstruktur [56] (Abb. 31). Diese Auffassung liegt weit entfernt von der Wirklichkeit, ihr Wert erschöpft sich fast ausschließlich in ihrer Anschaulichkeit.

Eine der Wirklichkeit weit näher kommende Vorstellung ist die von PEKLENIK [24], die hier kurz erörtert werden soll (Abb. 32).

Der in Abb. 3 gezeigte Gefügebau ist im allgemeinen für die zeitgemäßen Erzeugnisse kennzeichnend. In ihm ist auf den ersten Blick die regelmäßige Anordnung der Strukturelemente zu erkennen.

Für die Erschließung der Schleifkörpereigenschaften und vor allem für die Steuerung ihres Zustandekommens ist neben den Eigentümlichkeiten der Grundbauelemente auch die Art und Weise entscheidend, nach der sie am Aufbau beteiligt sind.

In Abb. 3 können die Koordinationsverhältnisse der Bindemittelbrücken (der Bindungen) nur in der Ebene genau betrachtet werden.

Die einzelnen Körner sind (in der Ebene) von vier Bindemittelbrücken umgeben; ihre räumliche Anordnung entspricht einer oktaedrischen Koordination (dies konnte mit dem Mikroskop nicht erfaßt werden). Die Größe und die Art der Anordnung der die einzelnen Körner umgebenden Bindemittel-

brücken werden außer durch die Kornform auch durch die Beschaffenheit des Bindemittels und durch die technologischen Prozesse bestimmt. Das Photographieren der Bindemittelbrücken ist äußerst umständlich. Dünnschliffe

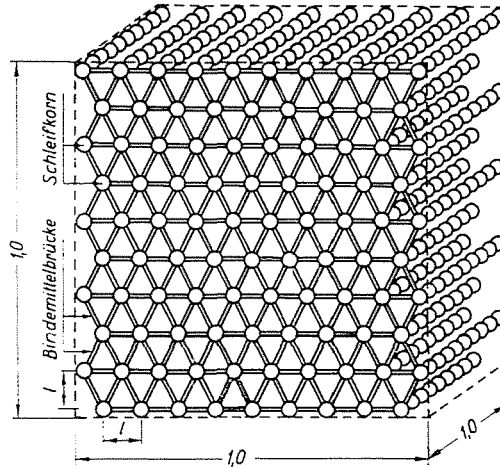


Abb. 31. Idealisierte Veranschaulichung der Schleifkörperstruktur

der außerordentlich harten, gebrannten Proben konnten nur mit eigens zu diesem Zweck hergestellter in Metall gefaßten Diamantschleifscheiben hergestellt werden. An der Oberfläche der so gewonnenen Dünnschliffe werden die Bindemittelbrücken in der Regel zerstört. Nach zahlreichen erfolgreichen

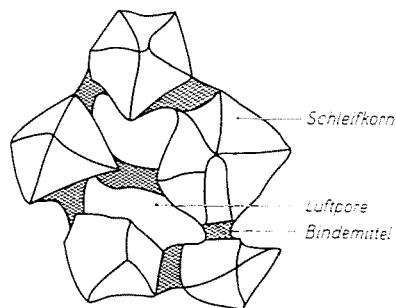
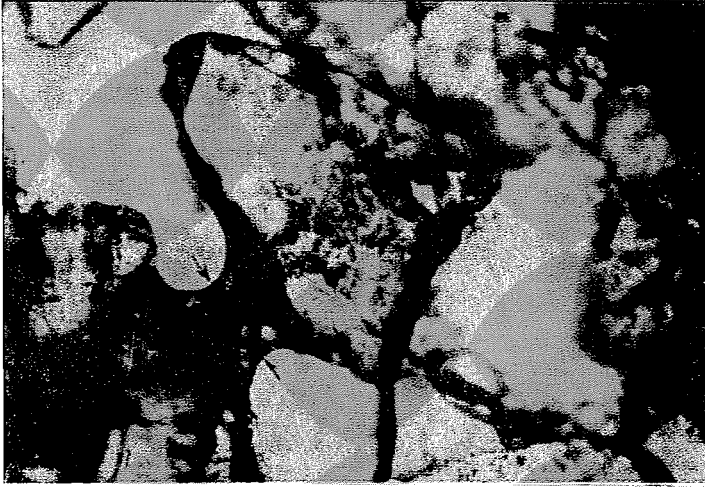


Abb. 32. Annähernde Veranschaulichung der Schleifkörperstruktur

Versuchen ist es schließlich in einem einzigen Falle gelungen, eine intakte Bindemittelbrücke zu photographieren (Abb. 34), die zu weiteren Forschungsarbeiten als klassisches Beispiel dienen kann.



*Abb. 34.* Mikroskopische Aufnahme einer die Korundkörner verbindenden, bogenförmigen Bindemittelbrücke 260fach





Die Oberflächenkrümmung der Bindemittelbrücke läßt vermuten, daß bei ihrer Entstehung die Oberflächenspannung des beim Brennen geschmolzenen Bindemittels eine wichtige Rolle spielt.

Im Zusammenhang mit der Forschung über die quantitativen Beziehungen der Schwindvorgänge bei Glasgemengen und feuerfesten Metalloxyden untersuchten CLARK und WHITE [48] die die einzelnen Körner verbindenden glasigen Schmelzbrücken (Abb. 33). Nach ihren Untersuchungen zieht die zwi-

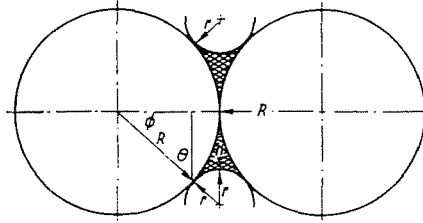


Abb. 33. Modell der Mikrogefügestruktur der Schleifkörper

schen den Körner befindliche Schmelze die Körner unter der Wirkung der Oberflächenkräfte aneinander. Diese Kräfte sind jenen ähnlich, die das Steigen der Flüssigkeiten in Kapillaren bewirken. Die Druckdifferenz, die an der gekrümmten Kapillaroberfläche wirkt, ist gleich dem Produkt der Oberflächenspannung  $a$  und der Differenz der reziproken Werte des Krümmungsradius  $r$  der sphärischen und des Krümmungsradius  $h$  der zylindrischen Fläche (Abb. 33):

$$\Delta P = a \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{h} \right). \quad (4)$$

Die Druckdifferenz wird gleich Null, wenn  $r = h$ . Bis dahin kann der Bindemittelanteil erhöht werden, ohne daß sich hierdurch die Körner trennen würden. Bei Erhöhung des Bindemittelanteiles über diesen Zustand hinaus trennen sich die Körner.

Die genannten Verfasser berechneten das Verhältnis des zylindrischen Halsradius  $h$  zum Oberflächenradius  $r$  in Abhängigkeit vom Winkel  $\theta$  gemäß Abb. 33 zu

$$\frac{h}{r} = \frac{\sin \theta - 1 + \sqrt{1 - \sin^2 \theta}}{1 - \sin \theta}. \quad (5)$$

Sie berechneten auch den Bindemittelrauminhalt, bezogen auf den Rauminhalt des Kornanteiles gleichfalls als Funktion des Winkels  $\theta$ . KINGERY,

SIDHWA und WAUGH [47] wiesen darauf hin, daß das Raumverhältnis  $V_b/V_a$  des Bindemittels zum Kornanteil sich als halbes Produkt der Koordinationszahl  $n$  mit dem erwähnten relativen Rauminhalt des Bindemittels ausdrücken läßt, daß also

$$\frac{V_b}{V_a} = \frac{3}{4} n \left( \frac{1 - \sin^2 \theta}{\sin \theta} \right)^2 \left( 1 - \theta \sqrt{\frac{1 - \sin^2 \theta}{\sin \theta}} \right). \quad (6)$$

Werden nun die Gleichungen (5) und (6) durch Substitution von  $\theta$  vereinigt, so ergibt sich  $V_b/V_a$  als Funktion von  $h/r$ . Für die Schleifkornbindung ist das Gebiet von  $h \leq r$  maßgebend. Ist  $h = r$ , ergibt sich ein relatives Bindungsvolumen von 0,283, wenn als Koordinationszahl 6 angenommen wird. Da ein Haufwerk, bestehend aus sphärischen Körnern gleichen Durchmessers in sechser Koordination einen Hohlraumanteil von 47,6% aufweist, beträgt der Porenraumanteil bei  $h = r$   $47,6 - 52,4 \times 0,283 = 32,8\%$ . Dies ist also die geringste Porosität für den Zustand, in welchem sich die Körner noch gerade berühren. Durch Verringerung des Bindemittelanteils wird die Porosität höher. Die Kornpackungen mit höheren Koordinationszahlen ergeben bedeutend geringere Hohlraumanteile und da bei Schleifkörpern trotz verschiedener Härte im allgemeinen Porositäten von etwa 50% gefunden werden, kann dies als ein Beweis für die Richtigkeit der sechser Koordination angesehen werden (vgl. Abb. 2).

Die obigen Überlegungen sind streng nur für kugelförmige Körner gleichen Durchmessers gültig, wenn das Bindemittel die Kornoberfläche völlig benetzt. In Wirklichkeit sind diese Bedingungen nicht erfüllt, doch haben geringe Abweichungen des Benetzungswinkels von Null kaum einen Einfluß auf die Gültigkeit der Beziehungen. Die eckige Form der Körner ergibt hingegen ein sperrigeres Haufwerk mit höherem Hohlraumanteil bzw. mit größerer Porosität. Dafür wiederum bewirken abweichende Korngrößen eine dichtere Kornpackung.

Die Prüfung der kapillaren Eigenschaften der Schleifkornhaufwerke bildet heute bereits Gegenstand der fortschrittlichen Normung [57].

Auf Grund dessen, was über die Bindemittelbrücken ausgeführt wurde, sowie auf Grund der Abbildungen (Abb. 3, 33, 34) hängen die Größe, die Form und die Anordnungsweise dieser Strukturelemente und folglich die Gebrauchseigenschaften außer von der Ausgangszusammensetzung vor allem von der Größe, der Form und der Oberflächenbeschaffenheit der Schleifkörper und von den Wärmebehandlungsumständen ab.

Die Erschließung der den günstigsten Gebrauchseigenschaften zugehörigen prinzipiellen und technologischen Bedingungen ist eng verknüpft mit der Erschließung der physikalisch-chemischen sowie der geometrischen Verhältnisse ihres Zustandekommens.

Aus den erzielten Ergebnissen lassen sich zusammenfassend folgende Schlußfolgerungen ziehen:

1. Dem Wesen des Schleifvorganges entsprechend müssen zeitgemäße Schleifkörper aus Grundbauelementen gleichbleibender Eigenschaften und geordneten Gefüges aufgebaut werden.

2. Nach unseren elektronenmikroskopischen Untersuchungen sind als Grundbauelemente der Schleifkörper statt des Schleifkorn-Bindemittel-Verbandes — im makroskopischen Sinne — die durch Bindemittelpfeiler festgehaltenen Mikrokristalle zu betrachten.

3. Der mikrokristalline Aufbau spielt nicht nur beim Reibungsverschleiß der Schleifkörper eine Rolle, sondern auch bei deren Ausbröckelung.

4. Die bestimmungsgemäße Verwendung der Schleifkörper sichernde Selbstanschärfungsfähigkeit beruht grundlegend auf dem mineralogischen und mikrokristallinen Aufbau der Elektrokorundkörner sowie auf den Eigenschaften der Bindemittelbrücken.

5. Zwecks Entscheidung über die Bedingungen zur Herstellung von Schleifkörpern bestimmter Beschaffenheit sowie zwecks exakter Deutung ihrer Eigenschaften müssen die tatsächlichen Kennwerte des Mikrogefüges bekannt sein (Abb. 34).

6. Die komplexen Elastizitäts- und Festigkeitsmessungen zur Prüfung der Bindemittelbrücken wurden unter Bedingungen durchgeführt, die den Beanspruchungen im Gebrauch nahestehen, sie weisen gemeinsam mit den übrigen Untersuchungen auf folgende Aspekte hin:

a) Um eine Bindung von gewünschter Beschaffenheit (Härte und Dichte) entwickeln zu können, ist die Kenntnis der chemischen, mineralogischen und granulometrischen Zusammensetzung der Rohstoffe sowie die Kenntnis vom Wesen und von der Wirkung der während der Wärmebehandlung sich abspielenden Vorgänge erforderlich.

b) Gegebene Eigenschaften erfordern bestimmte Brennbedingungen, d. h. Schleifkörper mit verschiedenen Kornarten und -größen und mit verschiedenen Bindemitteln erfordern unterschiedliche Wärmebehandlungsbedingungen.

c) Der glasige Zustand des Bindemittels an sich kann nicht als Voraussetzung der optimalen Bindung betrachtet werden. Die Eignung der Bindung wird durch die günstige Kombination der Festigkeits- und Elastizitätseigenschaften gesichert.

7. Der gegenwärtig geltende Begriff der Bindungshärte hat keinen realen Inhalt, weshalb er durch solche reproduzierbar zu messenden Kennwerte ersetzt werden muß, die für die bestimmungsgemäße Verwendbarkeit des Schleifkörpers tatsächlich maßgebend sind.

Das weitere Ziel unserer Arbeit bildet die Vorbereitung der praktischen Erfüllung dieser Gesichtspunkte.

## Zusammenfassung

Die Faktoren, die die Eigenschaften der keramisch gebundenen Schleifkörper bestimmen, werden durch lichtmikroskopische, elektronenmikroskopische, thermoanalytische, röntgenographische Untersuchungen sowie durch Festigkeits- und Elastizitätsprüfungen der Korundkörner und der Bindemittelbrücken analysiert. Zur exakten Erschließung der Schleifkörpereigenschaften wird ein reales Mikrogefügemodell vorgeschlagen. Die Arbeit behandelt die neueren grundlegenden Gesichtspunkte der Entwicklung von Bindungshärte- und Dichteskalen.

## Schrifttum

1. SCHROEDER, A.: Entwicklung der Schleiftechnik, Dissertation, TH. Braunschweig, 1930.
2. VOOS, K.: Das Schleifen, Plieten und Polieren in der Solinger Stahlwarenindustrie, Dissertation, TH. Dresden, 1937.
3. Berichte DKG 36, 10 (1959).
4. KLEINSCHMIDT, B.: Handbuch der Schleif- und Poliertechnik I., Technischer Verlag Herbert Cram, Berlin, 1950.
5. MATTYASOVSKY-ZSOLNAY, L.: A csiszolkorong,  pítésügyi Kiad, Budapest, 1953.
6. TARASOW, L. P.: Proceedings of the International Production Engineering Research Conference, Pittsburgh, 1963.
7. STADE, G.: Technologie des Schleifens, Carl Hanser Verlag, Mnchen, 1962.
8. PEKLENIK, J.: Proceedings of the International Production Engineering Research Conference, Pittsburgh, 1963.
9. YOSHIKAWA, H.: Proceedings of the International Production Engineering Research Conference, Pittsburgh, 1963.
10. FILONENKO, N. E.—LAWROW, I. V.: Petrografija Iskustwennykh Abraziwow, Maschgis., 1958.
11. RYSCHKEWITZSCH, E.: Berichte DKG 22 (1941).
12. Radex Rundschau I (1959).
13. GIESEN, K.: Radex Rundschau 5, 640—659 (1959).
14. ABRECHT, H.—LUKACS, J.—PLTZ, E.: Berichte DKG 8, 359—361 (1960).
15. KINGERY, W. D.: Introduction to Ceramics, New York, London, 1960.
16. MOSER, M.:  pítésanyag 8, 300—311 (1964).
17. FILONENKO, N. E.: Referatsammlung der Arbeiten der VNIAS, Leningrad, 1961 (1—7).
18. KARLIN, V. V.: Referatsammlung der Arbeiten der VNIAS, Leningrad, 1961 (11—12).
19. SOHOR, M. I.: Referatsammlung der Arbeiten der VNIAS, Leningrad, 1961 (13—15).
20. KARLIN, W. W.: Referatsammlung der Arbeiten der VNIAS, Leningrad, 1961 (15—18).
21. KLASCHTORNIJ, I. A.: VNIAS Abrasiwy 23, Moskau, 1959.
22. FILONENKO, N. E.: VNIAS Abrasiwy 22, Moskau, 1959.
23. LAWROW, I. W.: VNIAS Abrasiwy 22, Moskau, 1959.
24. PEKLENIK, J.: Industrie-Anzeiger 46, 82—84 (1960).
25. AUTWATER, J. O.—SHAW, M. C.: Transactions of the ASME, New York, Juni 1952, S. 73—86.
26. KORACH, M.—MENYHART, J.: Acta Chim. Acad. Sc. Hung. 35, 321—350 (1963).
27. COES, L. Ir.: Industrial and Engineering Chemistry, Washington, 12 (1955).
28. GUILLEAUME, A.: Berichte DKG 11, 284—297 (1930).
29. GUILLEAUME, A.: Dissertation, TH. Berlin, 1927.
30. GOEDECKE, H.: Dissertation, TH. Aachen, 1934.
31. FRANZ, W.: Dissertation, TH. Braunschweig, 1936.
32. RIEKE, R.—HAEBERLE, CH.: Berichte DKG 5, 117—144 (1943).
33. ZIMMERMANN, K.—LORE-BOSTON—BANNING: Sprechsaal 94, 10, 245—258 (1961).
34. KORACH, M.: Berichte DKG 39, 383—388 (1962).
35. WARREN, S.—LUNDELL, P. E.: Industrial Heating, 1465—1480 (1964).
36. ZGONNIK, N. P.: VNIAS Abrasiwy 22, Moskau, 1959.
37. PLJAT, S. N.: Referatsammlung der Arbeiten der VNIAS, Leningrad, 1961, S. 48—54.
38. MOSER, M.:  pítésanyag 1960, S. 66—75.
39. MOSER, M.: Periodica Polytechnica 8, No 2 (1964).
40. MOSER, M.: Periodica Polytechnica 8, No 4 (1964).
41. PEKLENIK, J.: Industrie-Anzeiger 82, 23—27 (1960).
42. OPTIZ, H.: TZ fr praktische Metallbearbeitung 52, 177—181 (1942).
43. LEWIS, KENNETH, B.: The Grinding Wheel, Cleveland, Ohio, 1959.

44. KALISSER, H.: 3rd International Machine Tool Design and Research Conference, Birmingham, 1962.
45. PEKLENIK, J.: *Industrie-Anzeiger* **46**, 75—81 (1960).
46. ZGONNIK, N. P.: *VNIIS Abrasiwy* **23**, 35—45 (1959).
47. KINGERY, W. D.—SIDHWA, A. P.—WAUGH, A.: *American Ceramic Society Bull.* **5**, 297—303 (1963).
48. CLARK, P. W.—WHITE, J.: *Trans. Brit. Ceram. Soc.* **49**, 305—333 (1950).
49. Norm der Ung. Volksrep. MSZ 4506.
50. KISS, L.—TAKÁTS, T.: *ÉAKKI Tudományos Közlemények* **10** (1963).
51. DIN 51730.
52. PEKLENIK, J.: Dissertation, TH. Aachen, 1957.
53. PEKLENIK, J.: *Industrie-Anzeiger* 20—25 (1958).
54. SALMANG, H.: *Die Keramik*, Springer-Verl., 1958.
55. HUSZÁR, I.: *Feszültségmérések*, Ausgabe des Mérnöktovábbképző Intézet, 1954.
56. MASLOW, E. N.: *A fémek kőszőrülésének elméleti alapelvei*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1953.
57. ASA B74.5—1964.
58. PONOMARJOW, S. D.: *Szilárdságtani számítások a gépészetben*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1963.

Miklós MOSER, Budapest XI. Budafoki út 8, Ungarn.