

Herstellung und Eigenschaften von Kohlenstoff- und Graphitwerkstoffen

Die Herstellung von Kohlenstoff- und Graphitwerkstoffen erfolgt nach Fertigungsmethoden, die an die klassische keramische Technologie angelehnt sind. Rohstoffe wie Petrolkokse, Pechkokse, Ruße oder Graphite mit einer definierten

Korngrößenverteilung werden bei erhöhter Temperatur mit einem thermoplastischen Bindemittel gemischt. Hierfür kommen sowohl Peche auf Steinkohlenteer- oder Petroleumbasis als auch Kunstharze in Betracht. Besondere Eigenschaften

können durch die Verwendung mineralischer Zuschlagstoffe oder Metallpulver erzielt werden. So ist zum Beispiel der Einsatz von Kupferpulver für die Herstellung von Kohlebürsten für Niederspannungsmotoren charakteristisch.

Materialaufbereitung und Mischen

Für die Materialaufbereitung und den Mischprozess werden bei Schunk Kohlenstofftechnik bevorzugt rechnergesteuerte kontinuierliche Prozesse eingesetzt. Die Korngrößenverteilung der aufbereiteten Rohstoffe wird mittels Laserbeugungsanalyse teilweise auch im Online-Betrieb überwacht.

Der Mischprozess erfolgt in Doppelschnecken-Extrudern und wird über Durchsatz, Schneckenkonfiguration und Temperaturprofil innerhalb eines engen Parameterfeldes geführt.

Formgebung

Die pressfertigen Mischungen werden in Gesenkpresen, isostatischen Pressen oder Strangpressen zu so genannten grünen Körpern geformt. Der Formgebungsprozess kann kalt oder bei erhöhter Temperatur erfolgen; der Pressdruck kann zwischen 2 und 400 MPa variieren.

Glühen

Im Anschluss an den Formgebungsprozess wird das Material geglüht. Abhängig von Werkstoff, Abmessungen und den gewünschten

Werkstoffeigenschaften wird der Glühprozess in kontinuierlichen oder im Chargenbetrieb arbeitenden Öfen mit unterschiedlichen Aufheizraten, Maximaltemperaturen (bis 1200 °C) und Ofenatmosphären durchgeführt.

Während des Glühvorganges erfolgt die Pyrolyse, d. h. die Zersetzung des Bindemittels in flüchtige Bestandteile und Kohlenstoff. Dieser so genannte Binderkokk sorgt für die Integrität des geformten und geglühten Körpers.

Nach dem Glühprozess liegt noch keine durchgehende Graphitstruktur vor. Die geglühten Körper sind spröde und in der Regel fest und hart. Für viele Anwendungen, z. B. für Gleitlager, zeigen solche Kohlenstoffe jedoch bereits die gewünschten Eigenschaften. Man bezeichnet diese Werkstoffe als Kohlenstoffgraphite.

Graphitieren

Der Graphitierungsprozess – eine zweite Temperaturbehandlung bis 3000 °C – verleiht Kohlenstoff die für viele Einsatzzwecke erforderlichen graphitischen Eigenschaften.

Bei Schunk Kohlenstofftechnik erfolgt der Prozess vorwiegend nach dem Acheson-Verfahren. Hierbei wird das zu graphitierende Material

zwischen zwei Ofenelektroden gepackt und ist als Widerstand im Sekundärkreis eines Transformators angeordnet. Das Material wird also durch Widerstandserhitzung auf die Graphitierungstemperatur gebracht.

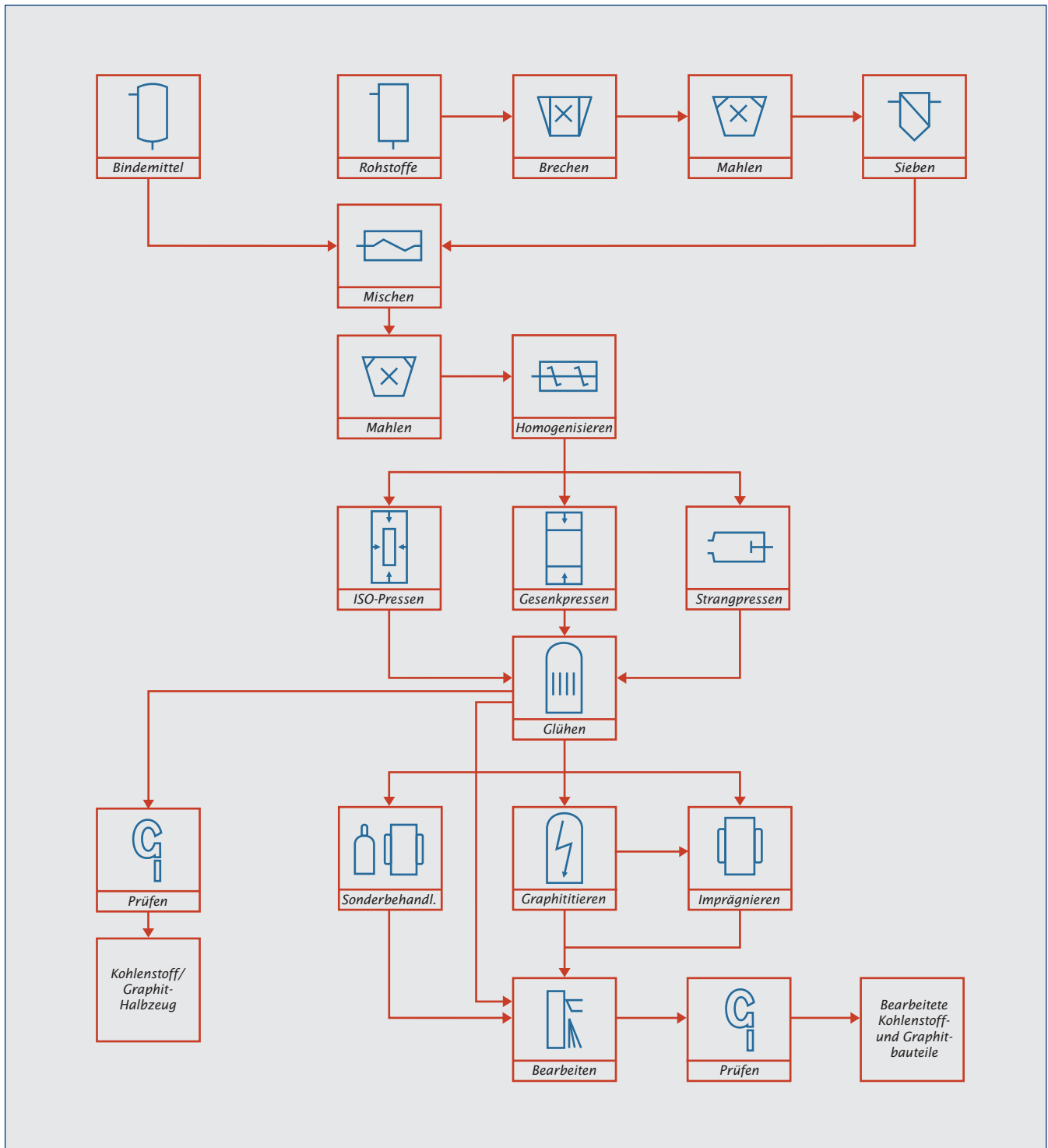
Hierbei bilden sich durch Rekristallisation größere graphitische Bereiche aus, die die Materialeigenschaften graphitierter Körper prägen. Solche Elektrographite weisen im Allgemeinen gute Gleiteigenschaften auf, besitzen einen niedrigen elektrischen Widerstand, eine hohe Wärmeleitfähigkeit sowie eine gegenüber nicht graphitierten Werkstoffen verbesserte Korrosionsbeständigkeit.

Graphitwerkstoffe werden dort verwendet, wo gute Gleiteigenschaften, hohe chemische Beständigkeit, hohe Temperaturwechselfestigkeit sowie hohe Reinheit als spezielle Anforderungen einzeln oder in Kombination gefordert werden.

Insbesondere für kohlenstofffaserverstärkte Kohlenstoffwerkstoffe, aber auch bei Vorliegen sehr hoher Reinheitsanforderungen, werden induktiv beheizte Graphitierungsöfen und Vakuumgraphitierungsöfen eingesetzt.

Der Herstellprozess von Kohlenstoff- und Graphitwerkstoffen umfasst folgende Stufen:

- Rohmaterialaufbereitung
- Mischen
- Formgebung
- Glühen
- Graphitieren
- eventuell Imprägnieren, Reinigen, Beschichten
- Bearbeitung zum Fertigteil



Imprägnieren

Im Anschluss an den eigentlichen Herstellprozess lassen sich den Werkstoffen durch Imprägnieren mit Kunstharzen, Pechen oder Metallen für bestimmte Einsatzgebiete spezielle Eigenschaften aufprägen. So kann durch Kunstharzimpregnierung das infolge der Bindemittelpyrolyse entstandene poröse Gefüge gas- und flüssigkeitsdicht gemacht werden. Durch eine Imprägnierung mit Metallen kann zusätzlich eine Härte- und Festigkeitssteigerung um den Faktor 2–5 erreicht werden.

Kunstharzbindung

Besondere Eigenschaften lassen sich auch mit kunstharzgebundenen Kohlenstoffwerkstoffen erzielen. So können zum Beispiel flüssigkeits- und gasdichte Materialien hergestellt werden, ohne dass die Prozesse Glühen und Imprägnieren angewandt werden müssen. Die wegen des fehlenden Graphitierprozesses a priori schlechteren Gleiteigenschaften lassen sich durch den Einsatz von Naturgraphit oder Elektrographit als Rohmaterial verbessern. Nachteilig ist, dass kunstharzgebundene Kohlenstoffkörper nur bis zur Aushärtetemperatur des Kunstharzes, das sind im Allgemeinen 180 °C bis 280 °C, eingesetzt werden können. Zudem gestattet dieser Prozess nicht die Herstellung von niederohmigen Kontaktwerkstoffen.

Sonderbehandlungen

Es gibt eine Vielzahl möglicher Sonderbehandlungen und Veredlungsverfahren, wie zum Beispiel

- die Reinigung von Graphitteilen zur Produktion von Werkstoffen höchster Reinheit,
- die Beschichtung von Reinstgraphiten mit Pyrokohlenstoff (PyC) und/oder Siliciumcarbid (SiC),
- die Hochvakuum-Entgasung.

Dank der vielfältigen Möglichkeiten, den Werkstoff Kohlenstoff oder Graphit zu modifizieren und im Hinblick auf spezielle Einsatzgebiete zu optimieren, haben sich die Anwendungsgebiete dieser Werkstoffgruppe in alle Bereiche der Technik hineinentwickelt und weiten sich noch ständig aus.

Struktur- und bindungsbedingte Eigenschaften

Aufgrund der Bindungsverhältnisse des Kohlenstoffatoms im Graphitgitter und der daraus resultierenden hexagonalen Schichtstruktur kann man von struktur- und bindungsbedingten Eigenschaften der Kohlenstoffwerkstoffe sprechen. Hierzu gehören die guten Gleiteigenschaften und die Anisotropie der elektrischen und thermischen Leitfähigkeit sowie des thermischen Ausdehnungskoeffizienten.

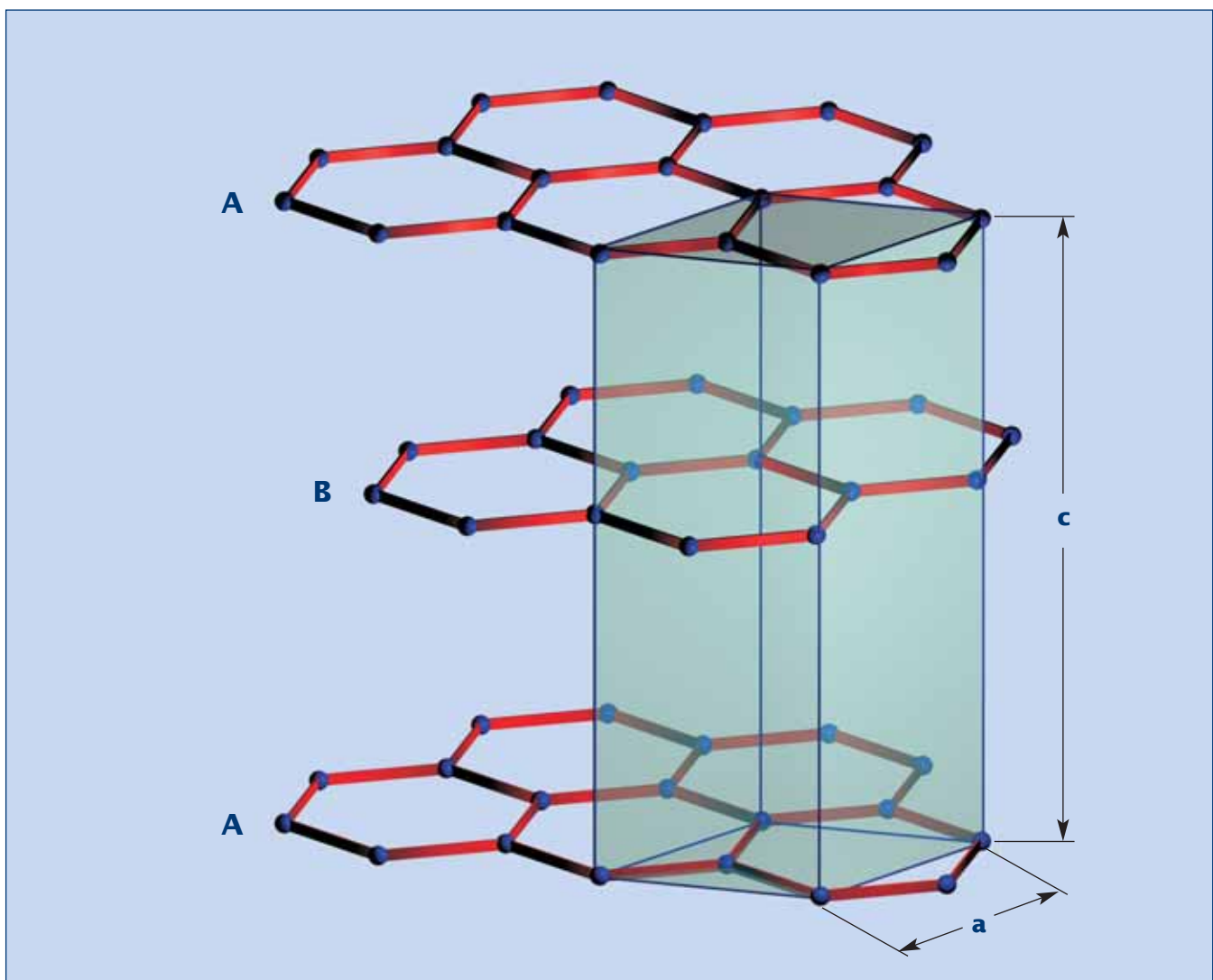
Ebenfalls durch die Bindungsverhältnisse des Kohlenstoffatoms im Gitter bestimmt sind die chemischen Eigenschaften von Kohlenstoffwerkstoffen.

Durch die große Stärke der kovalenten Bindungen innerhalb der Gitterschicht verfügen Kohlenstoffwerkstoffe über eine hohe chemische Resistenz gegen Säuren, Basen, Gase, Schmelzen etc.

Einzig gegenüber stark oxidierenden Medien und Sauerstoff sind Kohlenstoffwerkstoffe nur bedingt

beständig. Bei Temperaturen oberhalb von 350°C werden Kohlenstoffgraphitwerkstoffe merklich oxidiert, oberhalb von 500°C – 600°C auch graphitisierte Werkstoffe.

Unsere Broschüre „Chemische Beständigkeit“ (39.12) informiert Sie über die für die Praxis relevante chemische Resistenz von Kohlenstoff- und Graphitwerkstoffen.



Verfahrensbedingte Eigenschaften

Neben diesen struktur- und bindungsbedingten Charakteristika weisen Kohlenstoffwerkstoffe Eigenschaften auf, die vom Herstellverfahren mitgeprägt werden. So werden verfahrensbedingt die nach dem beschriebenen Herstellprozess gefertigten Kohlenstoffkörper mit polygranularem und polykristallinem Gefüge hergestellt.

Oft sind die Mikrokristallite in den als Feststoffen eingesetzten Füllerkörnern zufällig angeordnet, so dass sich selbst innerhalb eines Kornes die Gitteranisotropie der Kristallite praktisch nicht mehr auswirkt.

Eine besondere, vom Herstellverfahren geprägte Eigenschaft ist die Porosität, die sich in den Grenzen zwischen 0% und 50% bewegen kann. Die Porosität lässt sich durch das Porenvolumen und durch die Porengrößenverteilung beschreiben, die für verschiedene Werkstoffe und Herstellverfahren charakteristisch ist. Im Allgemeinen unterscheidet man zugängliche und geschlossene Porosität. Zugängliche Porosität ist zum Beispiel für Imprägniermittel erreichbar.

Aufgrund der Porosität des Kohlenstoffwerkstoffes sowie des unterschiedlichen graphitischen Ordnungsgrades haben alle technisch hergestellten polykristallinen Kohlenstoffkörper eine geringere Dichte als die theoretisch auf der Basis der Kristallstruktur zu errechnende.

Ebenfalls verfahrensabhängig sind die in weiten Grenzen variierbaren Biege- und Druckfestigkeiten. Die Biegefestigkeiten können im Bereich zwischen 10 und 150 MPa liegen.

Messmethoden für charakteristische Eigenschaften

Zunächst sind die Eigenschaften zu betrachten, die relativ einfach zu bestimmen, aber charakteristisch für einen Werkstoff sind:

- Spezifischer elektrischer Widerstand (DIN 51911)
- Härte Rockwell (DIN 51917)
- Rohdichte (DIN IEC 60413, DIN 51918)
- Biegefestigkeit (DIN 51902)
- Aschewert (DIN 51903)

Diese Eigenschaften ermöglichen eine rasche Werkstoffidentifizierung sowie Qualitätskontrolle und sind somit die Basis für eine Liefervereinbarung zwischen Kunden und Hersteller.

Die aufgeführten Messmethoden sind speziell für Kohlebürsten in der DIN IEC 60413 zusammengefasst. Weitere Normen zur Prüfung von Kohlenstoffmaterialien finden sich in der DIN-Normen-Reihe 51901 bis 51940.

Weitere charakteristische Daten

An Kohlenstoff- und Graphitwerkstoffen lassen sich weitere charakteristische Werkstoffdaten bestimmen, wie zum Beispiel der Elastizitätsmodul, die Zug- und Druckfestigkeit sowie thermophysikalische Daten wie Wärmeausdehnungskoeffizient, Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität.

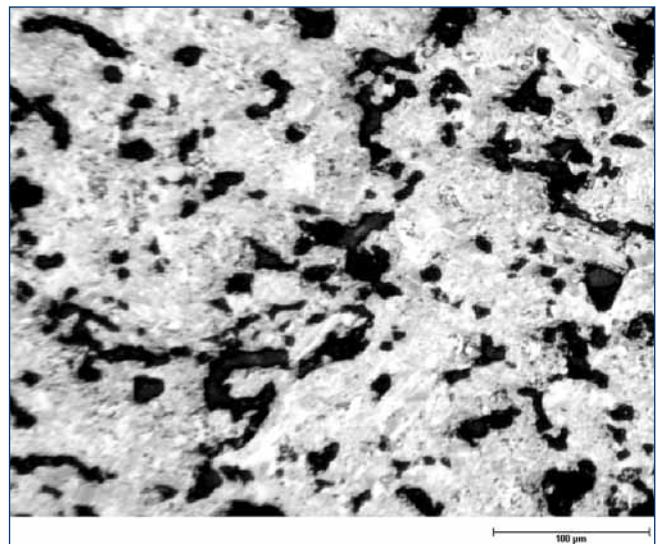
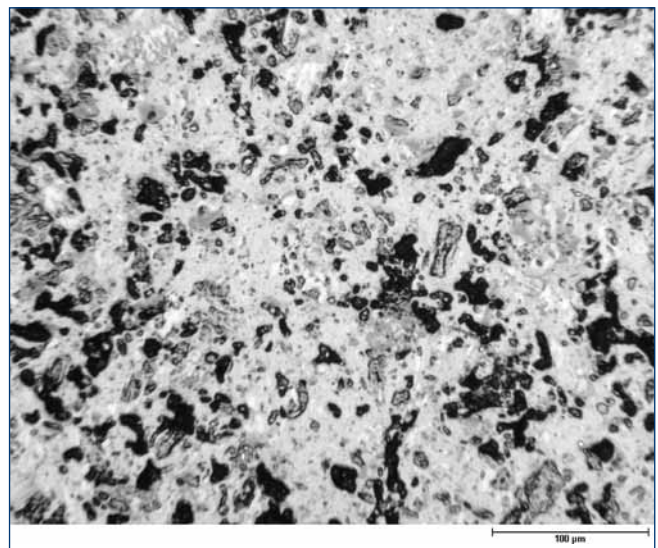
Die Bestimmung dieser Eigenschaften geht einher mit einem nicht unbedeutlichen Messaufwand. Die Kenntnis der Daten ist jedoch für verschiedene Anwendungsgebiete und interne Untersuchungszwecke unabdingbar.

So reicht beispielsweise für eine Aussage über die Imprägnierbarkeit eines Kohlenstoff- oder Graphitwerkstoffes die Angabe der Porosität im Allgemeinen nicht aus. Oft ist es erforderlich, auch die Porengrößenverteilung zu messen, ferner mikroskopisch das Gefüge des Werkstoffes zu untersuchen sowie möglicherweise auch das Benetzungsverhalten gegenüber verschiedenen Imprägniermitteln zu bestimmen.

Darüber hinaus interessiert oftmals die Auswirkung des Imprägnierprozesses auf bestimmte Werkstoffeigenschaften, wie zum Beispiel die Abbrandfestigkeit oder die Permeabilität.

Die entsprechenden Messungen erfordern im Allgemeinen eine umfangreiche Laborausstattung. Hierüber informieren wir unsere Kunden im Bedarfsfall gerne.

Schliffbilder von Kohlenstoffgefügen mit unterschiedlicher Porosität und Porenstruktur

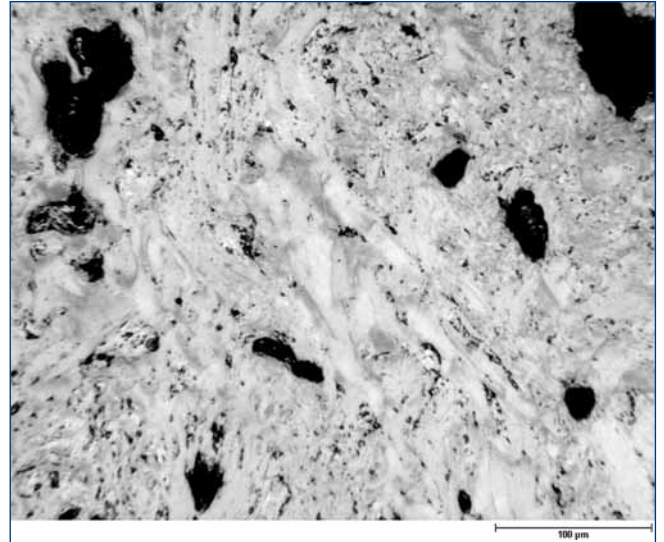


Anwendungsbezogene Untersuchungen

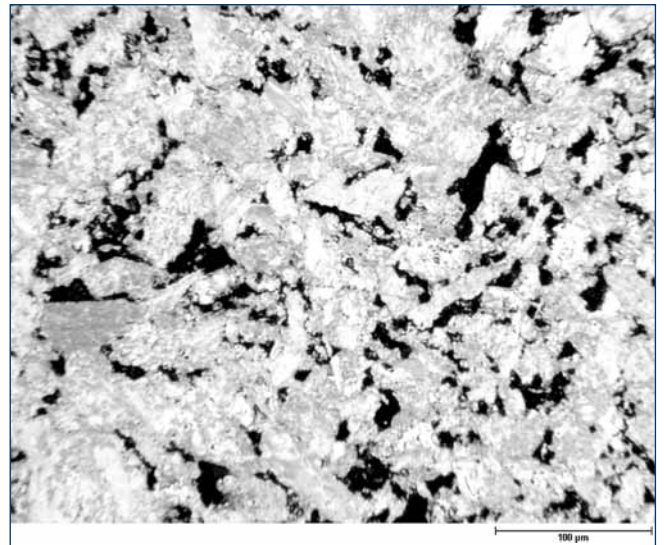
Neben den in den vorangegangenen Abschnitten aufgeführten Materialeigenschaften werden weitere anwendungsbezogene Untersuchungen an bestimmten Produkten durchgeführt, wie zum Beispiel die Bestimmung

- des Reibungskoeffizienten gegenüber verschiedenen Materialien,
- des Übergangswiderstandes eines Gleitkontaktes,
- des Verschleißes unter verschiedenen Laufbedingungen,
- der Adsorption von Gasen,
- des Benetzungsverhaltens gegenüber Schmelzen,
- des Funkstörverhaltens eines elektrischen Gleitkontaktes sowie
- des Verhaltens eines Widerstandsmaterials in Abhängigkeit von der Temperatur.

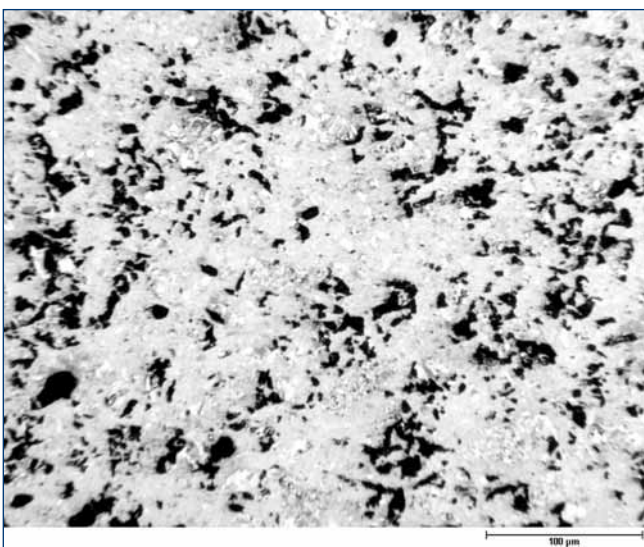
Polykristalliner Graphit



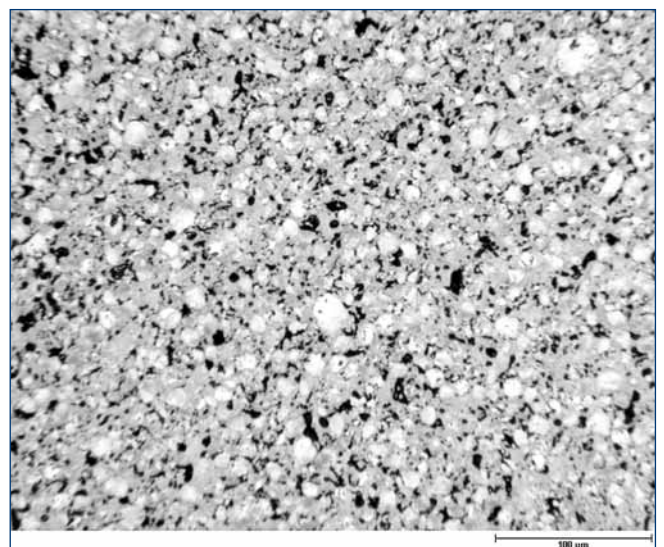
Grobkörnig FE934



Feinkörnig FE219



Feinkörnig FE679



Feinstkörnig FE779

Technische Formen der Kohlenstoffwerkstoffe

Kohlenstoff- und Graphitwerkstoffe werden im Allgemeinen in polygranularer oder polykristalliner Form hergestellt. Dies bedeutet, dass die Rohstoffkörner solcher Kohlenstoffwerkstoffe aus kleinsten Kristalliten verschiedener Orientierung zusammengesetzt sind. Aufgrund dieser mikrokristallinen Struktur weist der makroskopische Körper oft nicht die typischen anisotropen Kristalleigenschaften des Graphit-Einkristalls auf. Die extreme Anisotropie der elektrischen Leitfähigkeit oder des Wärmeausdehnungskoeffizienten ist bei polykristallinen Werkstoffen kaum vorhanden oder zumindest abgeschwächt.

Die Anisotropie der Eigenschaften, die bei polykristallinen Kohlenstoffwerkstoffen auftritt, ist außer durch die Art der Rohstoffe vorwiegend durch das Pressverfahren bedingt. So haben zum Beispiel isostatisch gepresste Kohlenstoffwerkstoffe keine oder nur eine sehr geringe Anisotropie, während ein- oder zweiseitig hydraulisch gepresste Werkstoffe eine stärker ausgeprägte Anisotropie besitzen. Aus diesem Grund wird bei der Angabe der physikalischen Daten oft zwischen den Eigenschaften senkrecht und parallel zur Pressrichtung unterschieden.

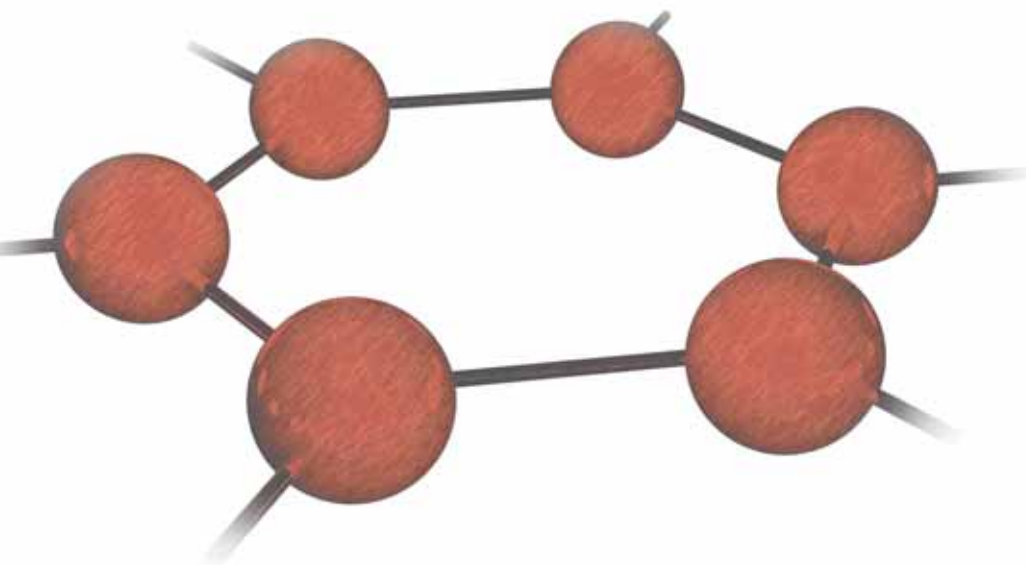
Eine andere technische Form von Kohlenstoff oder Graphit ist der Pyrokohlenstoff bzw. Pyrographit. Es handelt sich hierbei um einen Werkstoff, der aus einer kohlenwasserstoffhaltigen Gasphase auf einen erhitzten Trägerkörper abgeschieden wird (CVD-Verfahren). Dieser Werkstoff hat aufgrund der Herstellbedingungen Eigenschaften, die wesentlich stärker denjenigen des Graphit-Einkristalls entsprechen.

Da der Herstellprozess apparativ aufwendig und daher kostenintensiv ist, werden diese Verfahren im Allgemeinen nur zur Oberflächenveredelung normaler polykristalliner Kohlenstoffe verwendet, z. B. um eine niedrige Gaspermeabilität zu erzeugen oder um eine abriebfeste Oberfläche herzustellen. In wenigen Fällen wird Pyrographit kompakt zum Beispiel zur Herstellung von Hochleistungsröhrengittern eingesetzt.

Eine weitere technische Kohlenstoffproduktklasse stellen Kohlenstoff- oder Graphitfasern dar. Sie werden zum Beispiel durch Verkokung von Polymerfasern – meist aus Polyacrylnitril (PAN) – hergestellt. Kohlenstofffasern dienen zur Verstärkung von Polymeren (CFK), Kohlenstoff (CFC, C/C), Keramik (CMC) und Metallen.

Diese Verbundwerkstoffe werden vor allem dort eingesetzt, wo hohe Steifigkeit und Festigkeit bei geringem Gewicht eine entscheidende Rolle spielen. Typische Anwendungsgebiete für CFK sind Sportartikel oder Bauteile für die Luft- und Raumfahrt, die keine hohe Temperaturbelastung erfahren. Für Hochtemperaturanwendungen, z. B. in der Halbleitertechnik oder im Ofenbau, werden C/C-Werkstoffe eingesetzt.

Eine weitere, preiswertere Form von Kohlenstofffasern liegt im Kohlenstoff-Filz vor, der als thermisches Isolationsmaterial verwendet wird.



Einsatzgebiete von Kohlenstoff- und Graphitwerkstoffen

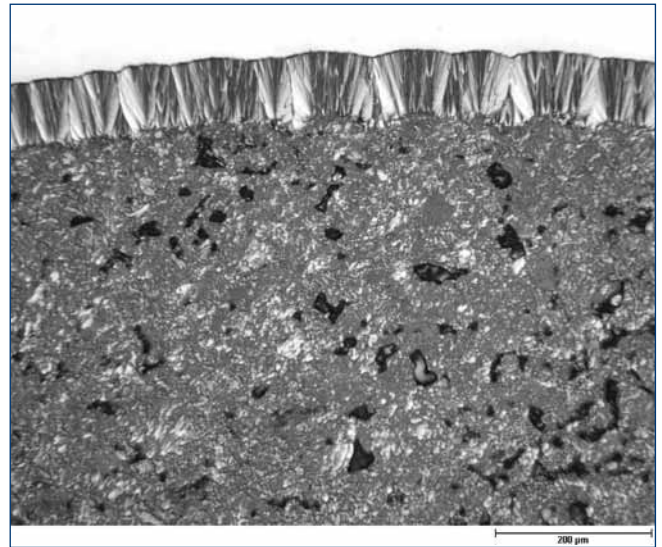
Werkstoffe von Schunk Kohlenstofftechnik werden aufgrund ihrer besonderen Eigenschaften für elektrotechnische Kohlenstoffprodukte, für Elemente im Maschinenbau sowie für Spezialprodukte in der Anlagentechnik, Halbleitertechnik, Analysetechnik oder im medizinischen Bereich eingesetzt.

Über die Besonderheiten der Produkte in den jeweiligen Einsatzgebieten geben unsere entsprechenden Broschüren Auskunft.

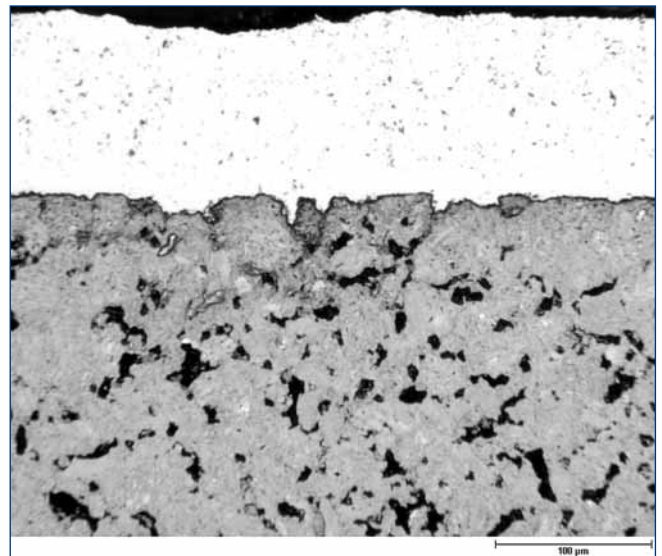
Schunk Werkstoffbezeichnungen

Die Schunk Werkstoffbezeichnungen sind alphanumerisch aufgebaut. So bezeichnet die erste Buchstaben-Gruppe die Zugehörigkeit zu einer bestimmten Werkstoffgruppe. Die diesen Kennbuchstaben folgende Ziffernkombination unterscheidet die einzelnen Werkstoffe innerhalb der Werkstoffgruppen. Zusätzliche Veredelungsschritte werden durch abschließende Buchstaben bzw. Buchstaben/Zahlen-Kombinationen ausgewiesen. Die Bedeutung der Buchstaben ist nachfolgend aufgeführt.

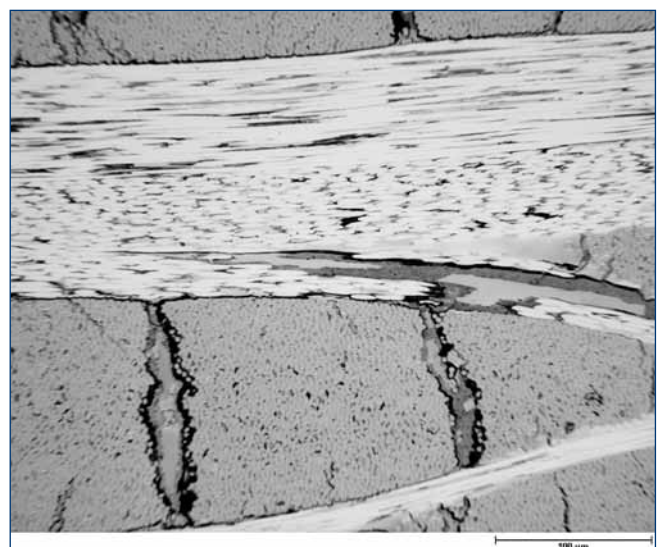
Bezeichnungen von Werkstoffen, die zur Herstellung von Kohlebürsten verwendet werden, bestehen nur aus einem Buchstaben, während alle anderen Werkstoffe durch zwei Buchstaben gekennzeichnet sind. Das „F“ bedeutet dabei Formkörper und weist, wenn es an erster Stelle steht, auf vorwiegend mechanische Anwendungen hin.



Elektrographit mit PyC-Schicht



Elektrographit mit SiC-Schicht



Gefüge eines kohlenstofffaserverstärkten Kohlenstoffes

**Werkstoffbezeichnung
Bezeichnung Gruppenmerkmal**

A	Naturgraphit/Kupfer
B, C	Naturgraphit/Kupfer Weißmetall-Legierung
E	Elektrographit
F	Naturgraphit, kunstharzgebunden
H	Kohlenstoffgraphit
K	Naturgraphit/Kupfer, pechgebunden
L	Kohlenstoffgraphit
S	Naturgraphit/Silber
U	Sonderwerkstoff
BH	Kohlenstoffgraphit, Schleifleistenmaterial
WH	Kohlenstoffgraphit, Widerstandsmaterial
FE	Elektrographit
FF	Kunstharzgebundene Werkstoffe
FH	Kohlenstoffgraphit
FR, FP, FG	Elektrographit höherer und höchster Reinheit
CF	Faserverstärkter Werkstoff
FU	Sonderwerkstoff

**Bezeichnung der wichtigsten
Nachbehandlungen**

A	Imprägnierung mit Antimon
B	Imprägnierung mit Blei-Antimon
C	Imprägnierung mit Kupfer
D	Imprägnierung mit Bleibronze
F, H, V	Imprägnierung zur Verbesserung des Laufverhaltens bei Kohlebürsten
G	Hochvakuum-Entgasung
M	Geklebte Schichtkohlebürsten (Sandwich)
Q, M, PS	Salzprägnierung
R	Röntgenprüfung
S	Imprägniermittel verkocht
T	Imprägnierung zur Erhöhung der Abrasivität von Kohlebürsten
U	Ultraschall-Entstaubung
X, Z, ZP	Kunstharzprägnierung
Y	Kunstharzprägnierung, verkocht

Schunk Kohlenstofftechnik GmbH

Rodheimer Straße 59
35452 Heuchelheim
Germany

Telefon: +49 (0) 641 608-0
Telefax: +49 (0) 641 608-1436

www.schunk-group.com
E-Mail: research.skt@schunk-group.com