

4. Dichte geformte feuerfeste Erzeugnisse

(Gesamtporosität < 45 Vol.-%)

4.1 Nichtbasische geformte Erzeugnisse

Diese Erzeugnisgruppe umfasst die Werkstoffe der SiO_2 - Al_2O_3 -Reihe und andere nach ihrem chemischen Reaktionsverhalten nicht näher eingruppierbare Werkstoffe, wie Siliciumcarbid (SiC)- und Kohlenstoff-Produkte.

Die hoch SiO_2 -haltigen Werkstoffe werden auch als saure Werkstoffe bezeichnet. Nach dem chemischen Reaktionsverhalten ist SiO_2 ein saures Oxid, welches mit Wasser eine Säure bildet. Die als neutral einzustufenden Werkstoffe auf Basis Forsterit, Spinell und Chromit werden üblicherweise den basischen Erzeugnissen zugeordnet.

4.1.1 Silikasteine

Fred Brunk

Silikasteine bestehen chemisch zu über 93 Gew.-% aus SiO_2 . In der Regel liegt der SiO_2 -Gehalt bei 95 bis 97 Gew.-%. Nach ASTM C 416-84 sind für die chemische Zusammensetzung folgende Grenzwerte festgelegt: < 1,5 % Al_2O_3 , < 2,5 % Fe_2O_3 , < 0,2 % TiO_2 , < 4 % CaO. Die weitere Unterteilung lehnt sich sehr stark an den jeweiligen Verwendungszweck an. Die Bezeichnung einzelner Gruppen ist unterschiedlich und erfolgt zum Teil nach nationalen Normen [1, 2]. Einteilungskriterien sind die prozentualen Gehalte an den Flussmitteln Al_2O_3 und Alkalien, die stark die thermo-mechanischen Eigenschaften der Silikasteine bestimmen. Ein weiteres Einteilungsmerkmal ist die nach dem Steinbrand vorliegende nicht umgewandelte Menge an β -Quarz. Dieser so genannte Restquarz-Gehalt gibt Hinweise auf das zu erwartende Nachwachsen der Steine im Einsatz.

Für die Herstellung von sehr dichten, hochwärmeleitenden Silikasteinen werden Siliciumnitrid (Si_3N_4) oder Siliciumcarbid (SiC) als Versatzkomponenten verwendet [3–5]. Durch Oxidation während des Brandes bildet sich hieraus kristallines SiO_2 , welches die intergranularen Poren ausfüllt.

Als Rohstoff für die Silikasteinherstellung werden überwiegend chemisch reine Quarzite mit SiO_2 -Gehalten größer 96 Gew.-% eingesetzt. Anteilig finden auch Quarzsande mit hohem Reinheitsgrad Verwendung.

Hinsichtlich ihrer Genese aus quarzreichen Sanden unterscheidet man zwei Typen von Quarziten: den tektonisch verfestigten grobkristallinen Felsquarzit und den chemisch verfestigten überwiegend feinkristallinen Zementquarzit. Die chemische Analyse, insbesondere der Gehalt an Flussmitteln Al_2O_3 , TiO_2 und Alkalien, ist wichtig für die Beurteilung der Quarzite. Das SiO_2 liegt in der Tieftemperaturmodifikation β -Quarz vor. Dieser durchläuft in Abhängigkeit von Temperatur und Zeit displazive und rekonstruktive Umwandlungen, was mit mehr oder weniger intensiven Dichte- bzw. Volumenänderungen verbunden ist.

Die Kinetik der Umwandlung ist neben den Brennbedingungen in hohem Maße abhängig von Größe und Verteilung der Körner im Gefüge sowie Art, Menge und Verteilung vorhandener Verunreinigungen. Felsquarzite wandeln daher langsamer in die Hochtemperaturmodifikation Cristobalit bzw. Tridymit um als die feinkörnigeren Zementquarzite. Tridymit bildet sich nur bei Anwesenheit geringer Gehalte an Fremdionen.

Zur Herstellung einer pressfähigen Masse werden die gewaschenen Quarzite in die gewünschte Korngröße zerkleinert. Die übliche Körnung von Silikamassen setzt sich zusammen aus (in Gew-%): 25 bis 35 mm, 1 bis 4 mm, 35 bis 50 mm, 0,063 bis 1 mm und dem Rest < 0,063 mm. Zur Steigerung der Sinteraktivität wird den gekörnten Rohstoffen beim Mischen ca. 1 bis 4 Gew.-% CaO, in der Regel als Calciumhydroxid, zugesetzt. Das CaO reagiert oberhalb 600 °C mit dem SiO₂ unter Bildung von α-Wollastonit (CaO-SiO₂). Die Festigkeit des gebrannten Silikasteines wird hierdurch wesentlich geprägt, ohne dabei die Feuerfestigkeit merklich zu erniedrigen. Eine zusätzliche Verwendung von Eisenoxiden (< 1 Gew.-%) oder anderer sogenannter Mineralisatoren [10] fördert die Umwandlung von Quarz in Tridymit. Die CaO-Komponente sowie ein geringer Zusatz an organischem Klebmittel verleihen dem gepressten Rohling die erforderliche Grünfestigkeit.

Beim Brand von Silikasteinen führt man den in den Rohstoffen vorliegenden β-Quarz weitestgehend in die Hochtemperaturmodifikationen α-Tridymit und α-Cristobalit über. Der Umwandlungsgrad ist abhängig von der Zusammensetzung und Korngrößenverteilung der SiO₂-Rohstoffkomponenten sowie vom Brennprozeß und liegt in der Regel bei über 94 %. Wie bereits erwähnt, ist dieser Vorgang aufgrund des polymorphen Verhaltens des SiO₂ mit extremen Volumenänderungen verbunden. Der Brand der Silikasteine erfolgt bei 1.420 bis 1.480 °C bei Einhaltung spezieller Brennprogramme. Das lineare Brennverhalten der Steine beträgt ca. 4 bis 5 %.

TABELLE 4.1 gibt einen Überblick über die beim Erhitzen und Abkühlen von Silikasteinen auftretenden SiO₂-Modifikationsänderungen.

Die mineralogische Zusammensetzung der gebrannten Silikasteine schwankt rohstoff- und herstellungsbedingt. Der durchschnittliche Phasenbestand beträgt (in Gew.-%)

Modifikationsänderungen ↔ reversibel → irreversibel	Umwandlungs- temperatur °C	Volumen- änderung %
β ↔ α-Quarz	573	0,8-1,3
α-Quarz → α-Cristobalit	1250	17,4
β ↔ α Cristobalit	≈ 260	2-2,8
α-Quarz → α-Tridymit	≈ 870	14,4
α ↔ γ-Tridymit	117-163	0,5
α-Tridymit → α-Cristobalit	1470	0
α-Cristobalit → Schmelze	1713 ± 10	-
α-Tridymit → Schmelze	1670 ± 10	-
Kieselglas → α-Cristobalit	ab ≈ 1150	≈ 0

α = Hochtemperaturform

β = Tieftemperaturform (Bezeichnung oft auch umgekehrt)

TABELLE 4.1:
Technisch relevante
Modifikations- und
Volumenänderungen
des SiO₂

0,5 bis 3 β -Quarz, ca. 5 Pseudowollastonit, ca. 4 bis 8 röntgenamorphe Phase, 40 bis 50 γ -Tridymit und 35 bis 45 β -Cristobalit. Sehr lange gebrannte Steine können bis zu 75 Gew.-% aus Tridymit bestehen.

Des Weiteren sind sehr geringe Mengen an Calciumferrit, Magnetit, Hämatit u. a. vorhanden, welche für die Färbung und Fleckenbildung der Steine verantwortlich sind.

Von den physikalischen Eigenschaften ist bei Silikasteinen primär das Wärmedehnungsverhalten für die Praxis wichtig. Der Verlauf der reversiblen thermischen Dehnung wird dabei durch die reversiblen Umwandlungen der drei SiO_2 -Modifikationen geprägt. Beim Aufheizen dehnen sich Silikasteine stark aus, bei 800 bis 1.000 °C ist das Maximum der thermischen Dehnung mit etwa 12 bis 15 mm/m erreicht. Der Wert der maximalen Dehnung wird dabei weitgehend vom Verhältnis von Tridymit zu Cristobalit bestimmt.

Steine, die praktisch keinen Restquarz mehr enthalten, weisen zu höheren Temperaturen hin eine negative Dehnung auf (etwa 0,1 bis 0,26 %), welche auf eine Gitterkontraktion des Tridymits zurückgeführt wird.

Im Gegensatz hierzu zeigen schlecht umgewandelte Steine mit erheblichen Restquarzgehalten über 10 Gew. % bei Temperaturen oberhalb von etwa 1.300 °C eine beachtliche Nachdehnung. Der irreversible, rohstoffspezifische Nachdehneffekt wird mit steigender Druckbelastung und Herabsetzung der Aufheizgeschwindigkeit vermindert [6]. Diese beiden gegenläufigen Dehnungseffekte können im praktischen Einsatz durch einen definierten, aber niedrigen Restquarzgehalt kompensiert werden [7]. Für verschiedene Anwendungen haben sich daher Silikasteine mit einem mittleren Restquarzgehalt von etwa 2 bis 3 %, jedoch mit Begrenzung nach oben, bewährt.

Oberhalb ca. 600 °C besitzen gut umgewandelte Silikasteine aufgrund der geringen Änderung der Wärmedehnung eine außerordentlich gute Temperaturwechselbeständigkeit. Unterhalb ca. 500 °C sind Silikasteine extrem temperaturwechselempfindlich, weil in diesem Temperaturbereich der Gradient der thermischen Dehnung am höchsten ist. Verantwortlich hierfür sind die aus der Tief-Hoch-Temperaturumwandlung von Tridymit, Cristobalit und, falls vorhanden, Quarz resultierenden Volumen- und Längenänderungen. Beim Anheizen von Öfen begegnet man dieser Eigenschaft durch eine angemessene langsame Temperatursteigerung bis etwa 900 °C, insbesondere im Bereich von Raumtemperatur bis etwa 300 °C.

Hochwertige Silikasteine können im Einsatz unter günstigen Bedingungen im Temperaturbereich bis nahe 1.700 °C eingesetzt werden. Zurückzuführen ist dies auf einen auch bei hohen Temperaturen vorliegenden geringen Anteil an Schmelzphase, der abhängig vom Verunreinigungsgrad, erst oberhalb ca. 1.650 °C mehr oder weniger stark zunimmt. Der starke Flussmittelcharakter von Alkalien und Al_2O_3 ist hierbei im Wesentlichen maßgebend. Beim Erweichen unter Druckbelastung ist daher zu beachten, dass bei Überschreiten einer kritischen Temperatur schlagartig eine schnell ablaufende Deformation einsetzt. Bei der Druckfeuerbeständigkeitsprüfung zeigen Silikasteine daher eine geringe Differenz von nur etwa 10 °C zwischen beginnendem und vollständigem Erweichen. Flussmittelarme Silikasteinsorten sind durch einen sogenannten flux-factor, der Summe aus Al_2O_3 -Gehalt plus doppelten Alkaligehalt, von $\leq 0,5$ Gew.-% gekennzeichnet.

	Al ₂ O ₃ %	SiO ₂ %	Fe ₂ O ₃ %	CaO %	Na ₂ O+K ₂ O %
Silika-Koksofensteine	0,8-0,9	95	0,6-0,7	2,7	0,2
Silika-Glasofensteine	0,2-0,7	95,5	0,3	2,2-2,4	0,1-0,2
Kieselglas kompakt		99,5			
gepresste Kieselglassteine	0,03-3	94-97	0,1-0,4	1,2-4	0,1
Kieselglas schlickergegossen		99			

TABELLE 4.2: Eigenschaftswerte von Silika- und Kieselglaserzeugnissen (oft auch als Quarzguterzeugnisse bezeichnet)

4

	Dichte g/cm ³	Rohdichte g/cm ³	offene Porosität %	Kaltdruckfestigkeit MPa	Druck-erweichen (DE) T ₀₅ °C	therm. Dehnung 1000 °C %	Wärmeleitfähigkeit 1000 °C W/mK
Silika-Koksofensteine	2,31-2,35	1,78-1,90	18-23	30-60	1610-1650	1,3	1,8-2,2
Silika-Glasofensteine	2,31-2,35	1,81-1,85	19,5-21,5	30-40	1630-1670	1,4-1,5	1,8-1,9
Kieselglas kompakt	2,2	2,16	0	200	1200*	0,06	
gepresste Kieselglassteine		1,8-1,9	13-24	25-35		0,1-0,3	
Kieselglas schlickergegossen	2,2	1,9	13-16	50-80		0,06	1,7

* nach Entglasen 1700 °C

** nach Brand 1350 °C

In **TABELLE 4.2** sind verschiedene Eigenschaften von Silikasteinen zusammengestellt.

Stark reduzierende wie auch H₂-haltige Atmosphären reduzieren SiO₂ bei Temperaturen oberhalb von 1.000 °C unter Bildung von gasförmigem SiO. Die Folge sind Gefügezerrütung und schließlich Zerstörung des Silikamaterials. In reduzierender Atmosphäre ist der Silikastein bis etwa 1.600 °C widerstandsfähig gegenüber Kohlenstoff.

Die Korrosionsbeständigkeit gegenüber sauren Schmelzen ist gut. Alkalihaltige Gase und Dämpfe können unterhalb von 1.470 °C durch Bildung von Alkalisilikatschmelzen eine intensive Korrosion verursachen.

Silikasteine zeigen im Gebrauch in einem deutlichen Temperaturgefälle durch thermische und korrosive Belastungen die Ausbildung charakteristischer zonarer Gefüge. Diese Zonenbildung ist zurückzuführen auf die Migration von Eigen- und Fremdbestandteilen sowie Gefügeumwandlungen, d. h. Um- und Rekristallisationsvorgänge, Kristallwachstum und Texturierung. Hiermit verbunden sind ebenfalls zonare Veränderungen der Materialeigenschaften. Die thermisch höher beanspruchten Zonen zeigen im Vergleich zum ungebrauchten Stein eine Verbesserung der thermo-mechanischen Eigenschaftswerte [4, 8].

Wichtige Anwendungsgebiete für Silikasteine sind: Koks- und Gasöfen, Oberbau von Glas-schmelzöfen, Winderhitzer (Besatzsteine) und Deckel von Lichtbogenöfen.

Literatur

- [1] DIN 1089, Teil 1: Feuerfeste Werkstoffe für Koksöfen; Silikasteine, Anforderungen und Prüfung. Febr. 1995
- [2] ASTM C 416-84: Standard classification of silica refractory brick
- [3] Naruse, Y., Hoshino, Y., Tanaka, T.: Silica bricks for coke oven. Taikabutsu Overseas 2 (1982) Heft 1, S. 110–120
- [4] Koschlig, H. J.: Refractory materials for modern large-capacity coke oven batteries. In: Unitecr '89 Proceedings Vol. 1. Hrsg. L. J. Trostel, American Ceramic Society. Westerville-OH (USA) 1989, S. 244–262
- [5] Jeschke, P., u. a.: Super dense silica bricks for modern coke ovens. In: Unitecr '89 Proceedings Vol. 1. Hrsg. L. J. Trostel, American Ceramic Society. Westerville (USA), 1989, S. 263–283
- [6] Majdic, A.; Hagemann, L.; Maercker, G.; Overkott, E.; Suckow, A.: Das Wärmedehnungsverhalten von Silikasteinen für den Kokssofenbau. Keramische Zeitschrift 34 (1982) Heft 2, S. 89–92
- [7] Lepère, K. E.; Overkott, E.; Beckmann, R.; Escher, L.: Requirements with respect to silica bricks as building material for the next coke oven generation. Cokemaking International 4 (1992) Heft 2, S. 28–32
- [8] Brunk, F.; Weßling, W.: Verhalten von Silika-Gewölbesteinen in Glaswannen. In: XXXVI. Int. Feuerfest-Koll. 1993, feuerf. Werkst. i. Glasind. (1993), S. 20, 23–26
- [9] Suenga, Y.; Tabuchi, H.; Uemura, H.: On silica brick for glass tank crown. Shinagawa Techn. Report 24 (1980), S. 1–6
- [10] Lach, V.: Einfluß von Mineralisatoren auf die Umwandlung von Quarziten. Sprechsaal 125 (1990), S. 811–813
- [11] Brunk, F.: Feuerfeste Werkstoffe für das Gewölbe. In: Feuerfeste Werkstoffe für die Glasindustrie und deren Prüfung. HVG-Fortbildungskurs Nov. 1998, S. 39–53
- [12] Panda, K. B.; Panda, J. D.: Thermo-mechanical properties of silica bricks at high temperature. In: Unitecr '99 Congress Proceedings (1999), S. 345–347
- [13] LeBlanc, J.: Impact of silica refractory on soda lime oxy-fuel furnaces. Glas-Ingenieur 1 (1997), S. 63–65
- [14] Buttol, X.; Dramais, R.; Gunn, D.: Refractories for superstructures in oxy-fuel fired glass furnaces: Are all silica products equivalent? Ceram. Eng. Sci. Proc. 21 (2000) Heft 1, S. 251–262
- [15] Brunk, F.: Silica refractories. CN Refractories Special Issues 5 (2001), S. 27–30
- [16] Brunk, F., Kochanski, U.: Manufacturing and characteristics of modern silica brick material for coke ovens. AISTech 2010, Iron and Steel Technology Conference, AIST, Proceedings, Pittsburgh, PA, US, S. 345–350

4.1.1.1 Kieselglaserzeugnisse

Hauptrohstoffkomponente ist amorphes, hochreines SiO₂. Man unterscheidet zwischen dem transparenten, von Fremdionen weitgehend freien Quarzglas (Kieselglas) und dem undurchlässigen (trüben) Quarzgut (auch als Kieselgut bezeichnet). Letzterer enthält eingeschlossene, sehr kleine Luftblasen (∅ max. 0,5 mm), die sich herstellungsbedingt nicht

entfernen lassen. Des Weiteren weist Quarzglas Verunreinigungen im ppm-Bereich auf (primär Al_2O_3 und Fe_2O_3).

Für refraktäre Zwecke wird Quarzglas gezielt hergestellt. Hierbei werden hochwertige, zum Teil vielfach gereinigte Quarzsande mit SiO_2 -Gehalten $\geq 99,7\%$ elektrisch im rotierenden Lichtbogenofen bei oberhalb 1.480 °C weitestgehend geschmolzen. Die bis zu ca. 4 t schweren Kokillen werden ca. drei Tage lang auf RT abgekühlt und anschließend die Kruste (enthält Cristobalit und Quarz) mechanisch entfernt. Der nachfolgende Prozess beinhaltet die Zerkleinerung in definierte Kornklassen (von Grobkorn bis Pulver) mit entsprechender nachgeschalteter Magnetabscheidung von möglichen Fremdpartikeln aus den Zerkleinerungsaggregaten.

Aus Kieselglas werden z. B. Rohre, Scheiben (Infrarot- und UV-durchlässig) und Laborgläser hergestellt. Ausschussmaterial, welches in entsprechende Körnungen aufbereitet wird, kann auch bei der Herstellung von feuerfesten Kieselglaserzeugnissen Verwendung finden.

4

Quarzglas besitzt eine Rohdichte von $2,00$ bis $2,10\text{ g/cm}^3$, die Porosität beträgt ca. 5 bis $7,5\%$. Kieselglas ist dichter (Rohdichte ca. $2,21\text{ g/cm}^3$). Charakteristische Eigenschaften von amorphem SiO_2 sind der extrem niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient (ca. $0,06\%$ Dehnung bei 1.000 °C , $\alpha_{20-1000\text{ °C}}$ ca. $0,6 \cdot 10^{-6}\text{ K}^{-1}$) und die irreversible Umwandlung in Cristobalit, welche für Quarzglas ab ca. 1.150 °C erfolgt (Kieselglas ab etwa 1.300 °C).

Die Herstellung der refraktär verwendeten Kieselglaserzeugnisse erfolgt in Sonderfällen über die Schmelze (es werden kompakt erschmolzene Blöcke bzw. hieraus geschnittene Formate hergestellt), hauptsächlich aber nach folgenden keramischen Verfahren:

- Im Trockenpressverfahren (überwiegend „klassische“ Steinformate, hohe Stückzahlen kostenmoderat darstellbar). Die gekörnten Rohstoffe werden unter Verwendung eines chemischen (P_2O_5 -haltig, Natriumsilikat, vereinzelt auch Silikasole) oder hydraulischen Bindemittels (CaO -haltig) und ggf. eines organischen Presshilfs-/Klebstoffes mechanisch verpresst oder handgestampft.
- Durch Vibrationsverdichtung (bevorzugt bei großen Blöcken) unter Verwendung eines hydraulischen Bindemittels.
- Schlickergießen in Gips- oder Kunststoffformen (ca. 90% Feststoffanteil, Einsatz von Verflüssigern, Bindemitteln z. B. Silikasil), insbesondere komplizierte Formteile, die formatabhängige Verweilzeit beträgt einige Stunden bis eine Woche. Die getrockneten Abgüsse besitzen eine hohe Grünfestigkeit, welche die Nachbearbeitung auf Endmaße durch Schneiden und Bohren ermöglicht.

Die Press- bzw. Formlinge werden bei Temperaturen zwischen 150 °C und 1.000 °C getempert bzw. gebrannt, um die Festigkeit zu erhöhen bzw. um gegebenenfalls chemisch gebundenes Wasser auszutreiben.

Herausragende Eigenschaften der Kieselglaserzeugnisse als Feuerfestmaterial sind die extrem geringe thermische Ausdehnung (s. o.) und die hieraus resultierende ausgezeichnete Temperaturwechselbeständigkeit, das für alle SiO_2 -Erzeugnisse charakteristische gutartige Auflösungsverhalten im Kontakt mit Glasschmelzen und die ausgezeichnete Beständigkeit gegenüber Säuren (Ausnahmen: Flusssäure und heiße Phosphorsäure).

Ab etwa 1.150 °C beginnt die Rekristallisation zu Cristobalit. Dabei kann abhängig vom verwendeten Rohstoff und von der Art und Menge des Bindemittels ggf. eine merkliche Schrumpfung auftreten (bis zu ca. 1,8 % bei 1.500 °C). Mit der Umwandlung werden die Eigenschaften cristobalitreicher, dichter Silikasteine erreicht, d. h. hohe Standsfestigkeit bis zur Anwendungsgrenze von rund 1.650 °C, aber Empfindlichkeit beim Abkühlen unterhalb ca. 400 °C.

Gepresste Quarzgutsteine werden in Glasschmelzwannen zur Heißreparatur und z. B. als Vorhangsteine im Gemengeaufgabebereich eingesetzt. Bei der Heißreparatur von Koks-ofenheizwänden und im Säurebau finden sie ebenfalls Verwendung.

Vibrierte, blockähnliche Formate werden insbesondere zur Heißreparatur von Koksofenwänden eingesetzt (Minimierung der Anzahl von Steinformaten, kürzere Reparaturzeiten, Vermeidung von Gleitfugen zwischen neuem und altem Steinverband).

Komplizierte, schlickergegossene Formteile finden Anwendung z. B. in der Stahlindustrie (Rohre, Tauchausgüsse und Schlackenschutzringe für den Strangguss), der Glasindustrie (Trichter und Ringe für Hohlglas, Schieber und Rollen für Flachglas) oder im Ofenbau (Rollen, Platten).

Schmelzgegossene Blöcke werden im unmittelbaren Glaskontakt im Bassinbereich von Glasschmelzwannen von alkaliarmen oder alkalifreien, SiO₂-reichen Gläsern (z. B. Borosilikatgläser) bei Temperaturen oberhalb 1.470 °C eingesetzt.

Literatur

- [1] Verworner, O.: Quarzgut und seine Verwendung im Glasofenbau. Silikatechnik 27 (1976) Heft 1, S. 24–28
- [2] Schulz, P.: Schlickergießen von amorpher Kieselsäure von großformatigen und komplizierten Teilen. Keram. Z. 38 (1986) Heft 7, S. 442–445
- [3] Brunk, F.; Spitz, J.: Experience with coke oven wall repairs using low thermal expansion silica brick material. Coke making international 10 (1998), S. 74–76
- [4] Itell, E. W.; Henson, C. T.: Coke-oven wall repairs using low thermal expansion fused silica brick. Iron and Steel Engineer, March 1991, S. 50–53
- [5] Poirier, J.; Leroy, J. M.; et al.: Non-dilating silica elements for the repair of coke ovens: results and prospects. Revue de Métallurgie 96 (1999), S. 709–713
- [6] Borens, M; Postrach, S.: Characteristics and behaviour of the slip-casted material Quarzal, or is slip-casted fused silica still up-to-date for glass production? In: 48th International Colloquium on Refractories 2005, Refractories for Industrials, S. 121–124

4.1.2 Schamotte- und aluminareiche Steine

Gerald Routschka

Bei den feuerfesten Erzeugnissen der SiO₂-Al₂O₃-Reihe bilden die beiden Endglieder SiO₂ und Al₂O₃ die Grundlage der Silika- bzw. der reinen Korunderzeugnisse. Das Gebiet von