

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES  
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges

Eigentum

Internationales Büro

(43) Internationales

Veröffentlichungsdatum

22. Juni 2017 (22.06.2017)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer

WO 2017/103121 A2

(51) Internationale Patentklassifikation:

C03B 19/06 (2006.01) C03B 20/00 (2006.01)

C03C 3/06 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2016/081446

(22) Internationales Anmeldedatum:

16. Dezember 2016 (16.12.2016)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:

15201141.7 18. Dezember 2015 (18.12.2015) EP

(71) Anmelder: HERAEUS QUARZGLAS GMBH & CO.  
KG [DE/DE]; Quarzstraße 8, 63450 Hanau (DE).

(72) Erfinder: OTTER, Matthias; Leni-Schulze-Everding-  
Platz 2, 59075 Hamm (DE). HÜNERMANN, Michael;  
Drosselweg 19, 63755 Alzenau (DE). NIELSEN, Nils  
Christian; Habsburger Ring 14, 67307 Göllheim (DE).

WESSELY, Frank; Am Forst 27, 64807 Dieburg (DE).  
SCHREIBER, Andreas; Büdinger Straße 14 a, 63633  
Birstein (DE). ROOS, Björn; Tulpenweg 21, 63579  
Freigericht-Somborn (DE). SCHEICH, Gerrit;  
Schäferstraße 10, 63500 Seligenstadt (DE).

(74) Anwalt: HERZOG FIESSER & PARTNER  
PATENTANWÄLTE PARTG MBG; Immermannstrasse  
40, 40210 Düsseldorf (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für  
jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL,  
AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW,  
BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK,  
DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM,  
GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KH,  
KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY,  
MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA,  
NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO,  
RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV,

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: PRODUCTION OF AN OPAQUE SILICA GLASS ARTICLE

(54) Bezeichnung : HERSTELLUNG EINES OPAKEN QUARZGLASKÖRPERS

(57) Abstract: The invention relates to a method for producing a silica glass article, involving method steps i.) providing a silica granulate made of a pyrogenically produced silica powder, ii.) forming a glass melt from the silica granulate, iii.) forming a silica glass article from at least some of the glass melt, iv.) comminuting the silica glass article so as to obtain silica glass grains, v.) processing the silica glass article to obtain a preform, and vi.) forming an opaque silica glass article from the preform. The invention further relates to an opaque silica glass article that can be obtained by said method. The invention also relates to a reactor and an arrangement, each of which can be obtained by further processing the opaque silica glass article.

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Herstellen eines Quarzglaskörpers beinhaltend die Verfahrensschritte i.) Bereitstellen eines Siliziumdioxidgranulats aus einem pyrogen erzeugten Siliziumdioxidpulver, ii.) Bilden einer Glasschmelze aus dem Siliziumdioxidgranulat, iii.) Bilden eines Quarzglaskörpers aus zumindest einem Teil der Glasschmelze, iv.) Zerkleinern des Quarzglaskörpers unter Erhalt einer Quarzglaskörnung, v.) Verarbeiten des Quarzglaskörpers zu einer Vorform und vi.) Bilden eines opaken Quarzglaskörpers aus der Vorform. Die Erfindung betrifft weiterhin einen opaken Quarzglaskörper, der durch dieses Verfahren erhältlich ist. Weiterhin betrifft die Erfindung einen Reaktor und eine Anordnung, die jeweils durch Weiterverarbeiten des opaken Quarzglaskörpers erhältlich sind.

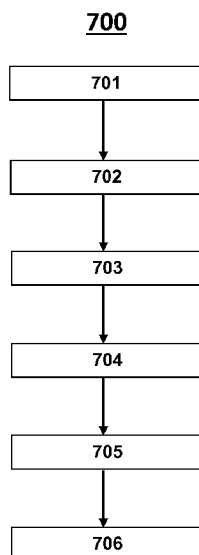


Fig. 7



SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC,  
VN, ZA, ZM, ZW.

RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI,  
CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD,  
TG).

- (84) Bestimmungsstaaten** (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO,

**Veröffentlicht:**

- ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts (Regel 48 Absatz 2 Buchstabe g)

### Herstellung eines opaken Quarzglaskörpers

5 Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Herstellen eines Quarzglaskörpers beinhaltend die Verfahrensschritte i.) Bereitstellen eines Siliziumdioxidgranulats aus einem pyrogen erzeugten Siliziumdioxidpulver, ii.) Bilden einer Glasschmelze aus dem Siliziumdioxidgranulat, iii.) Bilden eines Quarzglaskörpers aus zumindest einem Teil der Glasschmelze, iv.) Zerkleinern des Quarzglaskörpers unter Erhalt einer Quarzglaskörnung, v.) Verarbeiten des Quarzglaskörpers zu einer Vorform und vi.) Bilden eines opaken Quarzglaskörpers aus der Vorform. Die Erfindung betrifft weiterhin einen opaken Quarzglaskörper, der durch dieses Verfahren erhältlich ist. Weiterhin betrifft 10 die Erfindung einen Reaktor und eine Anordnung, die jeweils durch Weiterverarbeiten des opaken Quarzglaskörpers erhältlich sind.

### Hintergrund der Erfindung

15 Quarzglas, Quarzglaserzeugnisse und Erzeugnisse, die Quarzglas enthalten, sind bekannt. Ebenso sind verschiedene Verfahren zum Herstellen von Quarzglas, Quarzglaskörpern und Körnungen aus Quarzglas bereits bekannt. Nichtsdestotrotz werden weiterhin erhebliche Bemühungen unternommen, Herstellungsverfahren aufzuzeigen, mittels derer Quarzglas von noch höherer Reinheit, das bedeutet Abwesenheit von Verunreinigungen, hergestellt werden können. So werden bei manchen Einsatzgebieten von Quarzglas und seinen Verarbeitungsprodukten be- 20 sonders hohe Anforderungen, zum Beispiel hinsichtlich Reinheit gestellt. Dies ist unter anderem der Fall bei Quarzglas, das für den Einsatz in Produktionsschritten in der Halbleiterfertigung vorgesehen ist. Hier führt jede Verunreinigung eines Glaskörpers potentiell zu Defekten der Halbleiter, und somit zu Ausschuss in der Fertigung. Die für diese Verfahren eingesetzten hochreinen Quarzglassorten werden daher sehr aufwendig hergestellt. Sie sind hochpreisig.

25 Weiterhin besteht im Markt der Wunsch nach dem bereits genannten hochreinen Quarzglas und Erzeugnissen daraus zu einem niedrigeren Preis. Daher besteht das Bestreben, hochreines Quarzglas zu einem niedrigeren Preis als bisher anbieten zu können. In diesem Hinblick werden sowohl kostengünstigere Herstellungsverfahren als auch günstigere Rohstoffquellen gesucht.

30 Bekannte Verfahren zum Herstellen von Quarzglaskörnungen beinhalten das Schmelzen von Siliziumdioxid, das Formen zu Quarzglaskörpern aus der Schmelze und das Zerkleinern des Quarzglaskörpers zu einer Körnung. Verunreinigungen des eingangs gebildeten Glaskörpers können zu einem Versagen eines aus der Körnung gebildeten opaken Glaskörpers bei Belastung führen, insbesondere bei hohen Temperaturen, oder die Verwendung für 35 einen bestimmten Zweck ausschließen. So können Verunreinigungen des quarzglasbildenden Rohstoffs im opaken Glaskörper herausgearbeitet und auf die behandelten Halbleiterbauteile übertragen werden. Dies ist zum Beispiel bei Ätzverfahren der Fall und führt dann zu Ausschuss bei den Halbleiterrohlingen. Ein häufig auftretendes Problem bei den bekannten Herstellungsverfahren ist folglich eine ungenügende Qualität der Quarzglaskörper hinsichtlich ihrer Reinheit.

40

Ein weiterer Aspekt betrifft die Rohstoffeffizienz. Es erscheint vorteilhaft, an anderer Stelle als Nebenprodukt anfallendes Quarzglas und Rohstoffe dafür möglichst einer industriellen Verarbeitung zu Quarzglaserzeugnissen zuzuführen, anstatt diese Nebenprodukte wie bisher als Füllmaterial, z.B. im Hochbau, zu verbringen oder kostspielig als Müll zu entsorgen. Diese Nebenprodukte werden oftmals als Feinstaub in Filtern abgeschieden. Der Feinstaub wirft weitere Probleme, insbesondere im Hinblick auf Gesundheit, Arbeitsschutz und Handhabung auf.

### Aufgaben

Eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, einen oder mehrere der sich aus dem Stand der Technik ergebenden Nachteile zumindest teilweise zu überwinden.

Es ist eine weitere Aufgabe der Erfindung, opake Bauteile mit einer langen Lebensdauer bereitzustellen. Unter opaken Bauteilen werden insbesondere Geräte verstanden, die für oder in Reaktoren für chemische und/oder physikalische Behandlungsschritte einsetzbar sind.

Es ist eine weitere Aufgabe der Erfindung, opake Bauteile bereitzustellen, die insbesondere für bestimmte Behandlungsschritte in der Halbleiterfertigung insbesondere bei der Herstellung von Wafern, geeignet sind. Beispiele für so einen bestimmten Behandlungsschritt sind das Plasmaätzen, das chemisches Ätzen und Plasmadotierungen.

Es ist eine weitere Aufgabe der Erfindung, opake Bauteile bereitzustellen, die blasenfrei oder blasenarm sind.

Es ist eine weitere Aufgabe der Erfindung, opake Bauteile bereitzustellen, die eine hohe Opazität aufweisen.

Es ist eine weitere Aufgabe der Erfindung, opake Bauteile bereitzustellen, die eine hohe Formtreue aufweisen. Insbesondere ist es eine Aufgabe der Erfindung, opake Bauteile bereitzustellen, die bei hohen Temperaturen nicht verformen. Insbesondere ist es eine Aufgabe der Erfindung, opake Bauteile bereitzustellen, die auch bei Ausbildung großer Abmessungen formstabil sind.

Es ist eine weitere Aufgabe der Erfindung, opake Bauteile bereitzustellen, die reiß- und bruchfest sind.

Es ist eine weitere Aufgabe der Erfindung, opake Bauteile bereitzustellen, die effizient herstellbar sind.

Es ist eine weitere Aufgabe der Erfindung, opake Bauteile bereitzustellen, die kostengünstig herstellbar sind.

Es ist eine weitere Aufgabe der Erfindung, opake Bauteile bereitzustellen, bei deren Herstellung auf lange Nachbehandlungsschritte, zum Beispiel Tempern verzichtet werden kann.

Es ist eine weitere Aufgabe der Erfindung, opake Bauteile bereitzustellen, die eine hohe Temperaturwechselbeständigkeit aufweisen. Es ist insbesondere eine Aufgabe der Erfindung, opake Bauteile bereitzustellen, die bei starken thermischen Schwankungen eine geringe Wärmeausdehnung aufweisen.

Es ist eine weitere Aufgabe der Erfindung, opake Bauteile bereitzustellen, die eine hohe Härte aufweisen.

Es ist eine weitere Aufgabe der Erfindung, opake Bauteile bereitzustellen, die eine hohe Reinheit und eine geringe Kontamination mit Fremdatomen aufweisen. Unter Fremdatomen werden Bestandteile in einer Konzentration von weniger als 10 ppm verstanden, die nicht gezielt eingebracht wurden.

Es ist eine weitere Aufgabe der Erfindung, opake Bauteile bereitzustellen, die eine geringe Menge an Dotierstoffen enthalten.

Es ist eine weitere Aufgabe der Erfindung, opake Bauteile bereitzustellen, die eine hohe Stoffhomogenität aufweisen. Die Stoffhomogenität ist ein Maß für die Gleichmäßigkeit der Verteilung von im opaken Bauteil enthaltenen Elementen und Verbindungen, insbesondere von OH, Chlor, Metallen, insbesondere Aluminium, Erdalkalimetalle, Refraktärmetallen und Dotierstoffen.

Es ist eine weitere Aufgabe der Erfindung, stark reflektierende Bauteile aus Quarzglas bereitzustellen. Es ist eine weitere Aufgabe der Erfindung, gleichmäßig reflektierende Bauteile aus Quarzglas bereitzustellen.

Es ist eine weitere Aufgabe der Erfindung, Bauteile aus Quarzglas bereitzustellen, die eine geringe Wärmeleitung aufweisen. Es ist eine weitere Aufgabe der Erfindung, Bauteile aus Glas bereitzustellen, die geringe Spannungen unter thermischer Belastung zeigen.

Es ist eine weitere Aufgabe der Erfindung, dünne Bauteile aus Quarzglas bereitzustellen. Es ist eine weitere Aufgabe der Erfindung, leichte Bauteile aus Quarzglas bereitzustellen. Es ist eine weitere Aufgabe der Erfindung, Bauteile Glas bereitzustellen, die lange Standzeiten aufweisen.

Es ist eine weitere Aufgabe der Erfindung, große Bauteile aus Quarzglas bereitzustellen.

Es ist eine weitere Aufgabe der Erfindung, Bauteile aus Quarzglas bereitzustellen, die eine geringe Marmorierung aufweisen. Es ist eine weitere Aufgabe der Erfindung, Bauteile aus Quarzglas bereitzustellen, die keine Transmissionsflecken aufweisen.

Es ist eine weitere Aufgabe der Erfindung, Bauteile aus Quarzglas bereitzustellen, die leicht ätzbar sind.

Es ist eine weitere Aufgabe der Erfindung, Bauteile aus Quarzglas bereitzustellen, die gleichmäßig opak und gleichzeitig dicht gesintert sind.

Es ist eine weitere Aufgabe der Erfindung, kostengünstige Schmelztiegel aus synthetischem Quarzglas bereitzustellen.

Es ist eine weitere Aufgabe der Erfindung, Bett-Materialien aus synthetischem Quarzglas für die Verwendung in metallischen Schweißverfahren bereitzustellen. Es ist insbesondere eine Aufgabe der Erfindung, Bett-Materialien aus synthetischem Quarzglas für die Verwendung in metallischen Schweißverfahren bereitzustellen, die Kontaminationen vermeiden.

Es ist eine weitere Aufgabe der Erfindung, einen opaken Quarzglaskörper bereitzustellen, der für die Verwendung in Bauteilen aus Quarzglas geeignet ist und mindestens eine, bevorzugt mehrere der bereits beschriebenen Aufgaben zumindest teilweise löst.

Es ist eine weitere Aufgabe, einen opaken Quarzglaskörper bereitzustellen, der eine hohe Homogenität über die gesamte Länge des Quarzglaskörpers aufweist.

Insbesondere ist es eine Aufgabe der Erfindung, einen opaken Quarzglaskörper bereitzustellen, der über die gesamte Länge des opaken Quarzglaskörpers eine hohe Stoffhomogenität aufweist.

Insbesondere ist es eine Aufgabe der Erfindung, einen opaken Quarzglaskörper bereitzustellen, der über die gesamte Länge des opaken Quarzglaskörpers eine hohe optische Homogenität aufweist.

Es ist eine weitere Aufgabe, einen opaken Quarzglaskörper bereitzustellen, der Quarzglas einer definierten Zusammensetzung beinhaltet.

Es ist eine weitere Aufgabe der Erfindung, einen opaken Quarzglaskörper mit hoher Reinheit bereitzustellen.

Es ist eine weitere Aufgabe, einen opaken Quarzglaskörper effizient und kostengünstig bereitzustellen.

Es ist eine weitere Aufgabe der Erfindung, ein Verfahren bereitzustellen, mit dem opake Quarzglaskörper hergestellt werden können, mittels derer mindestens ein Teil der bereits beschriebenen Aufgaben zumindest zum Teil gelöst ist.

Es ist eine weitere Aufgabe der Erfindung, ein Verfahren bereitzustellen, mit dem opake Quarzglaskörper durch einfacher hergestellt werden können.

Es ist eine weitere Aufgabe der Erfindung, ein Verfahren bereitzustellen, mit dem opake Quarzglaskörper mit höherer Geschwindigkeit gebildet werden können.

Es ist eine weitere Aufgabe der Erfindung, ein Verfahren bereitzustellen, mit dem opake Quarzglaskörper mit geringem Ausschuss hergestellt werden können.

### Bevorzugte Ausführungsformen der Erfindung

Ein Beitrag zur mindestens teilweisen Erfüllung mindestens einer der zuvor genannten Aufgaben wird durch die unabhängigen Ansprüche geleistet. Die abhängigen Ansprüche stellen bevorzugte Ausführungsformen bereit, die zur mindestens teilweisen Erfüllung mindestens einer der Aufgaben beitragen.

[1] Ein Verfahren zum Herstellen eines opaken Quarzglaskörpers beinhaltend die Verfahrensschritte:

- i.) Bereitstellen eines Siliziumdioxidgranulats, wobei das Siliziumdioxidgranulat aus pyrogen erzeugtem Siliziumdioxidpulver hergestellt wurde;
- ii.) Bilden einer Glasschmelze aus dem Siliziumdioxidgranulat in einem Schmelztiegel;
- iii.) Bilden eines Quarzglaskörpers aus mindestens einem Teil der Glasschmelze;
- iv.) Zerkleinern des Quarzglaskörpers unter Erhalt einer Quarzglaskörnung;
- v.) Verarbeiten der Quarzglaskörnung zu einer Vorform;
- vi.) Bilden, bevorzugt Sintern des opaken Quarzglaskörpers aus der Vorform.

[2] Das Verfahren nach Ausführungsform [1], wobei der Schmelztiegel in Schritt ii.) mindestens einen Einlass und einen Auslass aufweist und wobei der Einlass über dem Auslass angeordnet ist.

[3] Das Verfahren nach einer der vorhergehenden Ausführungsformen, wobei das Zerkleinern in Schritt iv.) mittels Hochspannungsentladungspulsen erfolgt.

[4] Das Verfahren nach einer der vorhergehenden Ausführungsformen, wobei die Quarzglaskörnung mindestens eines der folgenden Merkmale aufweist:

- I/ einen OH-Gehalt von weniger als 500 ppm;
- II/ einen Chlorgehalt von weniger als 60 ppm;
- III/ einen Aluminiumgehalt von weniger als 200 ppb;
- IV/ eine BET-Oberfläche von weniger als 1 m<sup>2</sup>/g;
- V/ eine Schüttdichte in einem Bereich von 1,1 bis 1,4 g/cm<sup>3</sup>;
- VI/ eine Partikelgröße D<sub>50</sub> für Schmelzeinsatz in einem Bereich von 50 bis 500 µm;
- VII/ eine Partikelgröße D<sub>50</sub> für Schlickereinsatz in einem Bereich von 0,5 bis 5 mm;
- VIII/ einen Metallgehalt von Metallen, die von Aluminium verschieden sind, von weniger als 2 ppm;
- IX/ eine Viskosität (p=1013 hPa) in einem Bereich von log<sub>10</sub> (η (1250°C) / dPas) = 11,4 bis log<sub>10</sub> (η (1250°C) / dPas) = 12,9 oder log<sub>10</sub> (η (1300°C) / dPas) = 11,1 bis log<sub>10</sub> (η (1300°C) / dPas) = 12,2 oder log<sub>10</sub> (η (1350°C) / dPas) = 10,5 bis log<sub>10</sub> (η (1350°C) / dPas) = 11,5;

wobei die ppm und ppb jeweils auf das Gesamtgewicht an Quarzglaskörnung bezogen sind.

- [5] Das Verfahren nach einer der vorhergehenden Ausführungsformen, wobei die Schmelzenergie in Verfahrensschritt ii.) über eine feste Oberfläche auf das Siliziumdioxidgranulat übertragen wird.

- [6] Das Verfahren nach einer der vorhergehenden Ausführungsformen, wobei das Siliziumdioxidgranulat mindestens eines der folgenden Merkmale aufweist:

- A) eine BET-Oberfläche in einem Bereich von 20 bis 50 m<sup>2</sup>/g;
- B) eine mittlere Partikelgröße in einem Bereich von 50 bis 500 µm;
- C) eine Schüttdichte in einem Bereich von 0,5 bis 1,2 g/cm<sup>3</sup>;
- D) einen Kohlenstoffgehalt von weniger als 50 ppm;
- E) einen Aluminiumgehalt von weniger als 200 ppb;
- F) eine Stampfdichte in einem Bereich von 0,7 bis 1,0 g/cm<sup>3</sup>;
- G) ein Porenvolumen in einem Bereich von 0,1 bis 2,5 mL/g;
- H) einen Schüttwinkel in einem Bereich von 23 bis 26°;
- I) eine Partikelgrößenverteilung D<sub>10</sub> in einem Bereich von 50 bis 150 µm;
- J) eine Partikelgrößenverteilung D<sub>50</sub> in einem Bereich von 150 bis 300 µm;
- K) eine Partikelgrößenverteilung D<sub>90</sub> in einem Bereich von 250 bis 620 µm,

wobei die ppm und ppb jeweils auf das Gesamtgewicht des Siliziumdioxidgranulats bezogen sind.

- [7] Das Verfahren nach einer der vorhergehenden Ausführungsformen, wobei das Siliziumdioxidpulver herstellbar ist aus einer Verbindung ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus Siloxanen, Siliziumalkoxiden und Siliziumhalogeniden.

- [8] Das Verfahren nach einer der vorhergehenden Ausführungsformen, wobei Schritt v.) folgende Einzelschritte beinhaltet:

- v.-1.) Erzeugen einer Aufschlämmung der Quarzglaskörnung mit einer Flüssigkeit; und
- v.-2.) Formen einer Vorform aus der Aufschlämmung unter Verlust von Flüssigkeit.

- [9] Das Verfahren nach einer der Ausführungsformen [1] bis [7], wobei Schritt v.) folgenden Schritt beinhaltet:

- v.-a.) Einbringen der Quarzglaskörnung in eine rotierende Hohlform.

- [10] Das Verfahren nach einer der vorhergehenden Ausführungsformen, wobei das Bilden des opaken Quarzglaskörpers in Schritt vi.) ein Sintern beinhaltet.

- [11] Ein opaker Quarzglaskörper, erhältlich durch ein Verfahren gemäß einer der vorhergehenden Ausführungsformen.

- [12] Ein opaker Quarzglaskörper nach Ausführungsform [11] gekennzeichnet durch folgende Merkmale:

- [I] eine Opazität von mehr als 5;
- [II] eine BET-Oberfläche von weniger als 1 m<sup>2</sup>/g.

|13| Der opake Quarzglaskörper nach Ausführungsform |11| oder |12|, wobei der opake Quarzglaskörper mindestens eines der folgenden Merkmale aufweist:

[III] eine zylindrische Form;

[IV] eine Schicht;

[V] einen OH-Gehalt von weniger als 500 ppm;

[VI] einen Chlorgehalt von weniger als 60 ppm;

[VII] einen Aluminiumgehalt von weniger als 200 ppb;

[VIII] einen ODC Anteil von weniger als  $5 \cdot 10^{18}/\text{cm}^3$ ;

[IX] einen Kohlenstoffgehalt von weniger als 5 ppm;

[X] einen Gesamtgehalt an von Aluminium verschiedenen Metallen von weniger als 2 ppm;

wobei die ppm und ppb jeweils auf das Gesamtgewicht des opaken Quarzglaskörpers bezogen sind.

|14| Ein Reaktor, beinhaltend als Reaktorbestandteile:

i] eine Lage aus opakem Quarzglas,

wobei die Lage zumindest zum Teil aus einem opaken Quarzglaskörper gemäß einer der Ausführungsformen |11| bis |13| gebildet ist;

ii] einen Quarzlashohlkörper beinhaltend eine Öffnungsfläche,

wobei die Öffnungsfläche auf die Lage aus opakem Quarzglas folgt.

|15| Der Reaktor nach Ausführungsform |14|, beinhaltend mindestens eines der folgenden Reaktorbestandteile:

iii] eine Dichtung aus einem von Quarzglas verschiedenen Material;

iv] eine auf die Dichtung folgende Auflage;

v] einen Gaseinlass;

vi] einen Gasauslass;

vii] einen Injektor;

viii] ein Thermoelementröhrchen;

ix] eine Innenfläche, die feuerblank und mikrorissfrei ist.

|16| Eine Anordnung, beinhaltend als Anordnungsbestandteile:

i} einen Substrathalter;

ii} ein Gestell;

wobei der Substrathalter von dem Gestell getragen wird; und

wobei das Gestell zumindest zum Teil aus einem opaken Quarzglaskörper gemäß einer der Ausführungsformen |11| bis |13| gebildet ist;

|17| Die Anordnung gemäß Ausführungsform |16|, gekennzeichnet durch folgendes Merkmal:

iii} einen Quarzlashohlkörper mit mindestens einer Öffnung.

|18| Eine Verwendung einer Quarzglaskörnung zur Verbesserung der thermischen Belastbarkeit opaker Quarzglaskörper, wobei die Quarzglaskörnung folgende Merkmale aufweist:



- I/ einen OH-Gehalt von weniger als 500 ppm;
  - II/ einen Chlorgehalt von weniger als 60 ppm;
  - III/ einen Aluminiumgehalt von weniger als 200 ppb,
- wobei die ppm und ppb jeweils auf das Gesamtgewicht der Quarzglaskörnung bezogen sind.

5

[19] Eine Verwendung einer Quarzglaskörnung zur Herstellung opaker Reaktorbestandteile für die Halbleiterfertigung, wobei die Quarzglaskörnung folgende Merkmale aufweist:

- I/ einen OH-Gehalt von weniger als 500 ppm;
  - II/ einen Chlorgehalt von weniger als 60 ppm;
  - III/ einen Aluminiumgehalt von weniger als 200 ppb,
- wobei die ppm und ppb jeweils auf das Gesamtgewicht der Quarzglaskörnung bezogen sind.

10

### Allgemeines

15 In der vorliegenden Beschreibung beinhalten Bereichsangaben auch die als Grenzen genannten Werte. Eine Angabe der Art „im Bereich von X bis Y“ in Bezug auf eine Größe A bedeutet folglich, dass A die Werte X, Y und Werte zwischen X und Y annehmen kann. Einseitig begrenzte Bereiche der Art „bis zu Y“ für eine Größe A bedeuten entsprechend als Werte Y und kleiner als Y.

20

### Ausführliche Beschreibung der Erfindung

Ein erster Gegenstand der vorliegenden Erfindung ist ein Verfahren zum Herstellen eines opaken Quarzglaskörpers beinhaltend die Verfahrensschritte:

- i.) Bereitstellen eines Siliziumdioxidgranulats, wobei das Siliziumdioxidgranulat aus pyrogen erzeugtem Siliziumdioxidpulver hergestellt wurde;
- ii.) Bilden einer Glasschmelze aus dem Siliziumdioxidgranulat in einem Schmelztiegel;
- iii.) Bilden eines Quarzglaskörpers aus mindestens einem Teil der Glasschmelze;
- iv.) Zerkleinern des Quarzglaskörpers unter Erhalt einer Quarzglaskörnung;
- v.) Verarbeiten der Quarzglaskörnung zu einer Vorform;
- vi.) Bilden des opaken Quarzglaskörpers aus der Vorform.

30

### Schritt i.)

Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform des ersten Gegenstands der Erfindung beinhaltet das Bereitstellen des Siliziumdioxidgranulats folgende Verfahrensschritte:

- I. Bereitstellen eines pyrogen erzeugten Siliziumdioxidpulvers; und
- II. Verarbeiten des Siliziumdioxidpulvers zu einem Siliziumdioxidgranulat, wobei das Siliziumdioxidgranulat einen größeren Partikeldurchmesser aufweist als das Siliziumdioxidpulver.

35

Unter einem Pulver werden Partikel trockener fester Stoffe mit einer Primärpartikelgröße im Bereich von 1 bis weniger als 100 nm verstanden.

40

Das Siliziumdioxidgranulat kann durch Granulieren von Siliziumdioxidpulver erhalten werden. Ein Siliziumdioxidgranulat weist in der Regel eine BET-Oberfläche von  $3 \text{ m}^2/\text{g}$  oder mehr und eine Dichte von weniger als  $1,5 \text{ g/cm}^3$  auf. Unter Granulieren versteht man das Überführen von Pulverteilchen in Granulen. Beim Granulieren bilden sich Zusammenlagerungen von mehreren Siliziumdioxidpulverteilchen, also größere Agglomerate, die als „Siliziumdioxidgranulen“ bezeichnet werden. Diese werden oft auch als „Siliziumdioxidgranulatteilchen“ oder „Granulatteilchen“ bezeichnet. In ihrer Gesamtheit bilden Granulen ein Granulat, z.B. die Siliziumdioxidgranulen ein „Siliziumdioxidgranulat“. Das Siliziumdioxidgranulat weist einen größeren Partikeldurchmesser auf als das Siliziumdioxidpulver.

Der Vorgang des Granulierens, um ein Pulver in Granulate zu überführen, wird später näher erläutert.

Unter Siliziumdioxidkörnung werden im vorliegenden Kontext Siliziumdioxidpartikel verstanden, die durch ein Zerkleinern eines Siliziumdioxidkörpers, insbesondere eines Quarzglaskörpers erhältlich sind. Eine Siliziumdioxidkörnung weist in der Regel eine Dichte von mehr als  $1,2 \text{ g/cm}^3$ , zum Beispiel in einem Bereich von  $1,2$  bis  $2,2 \text{ g/cm}^3$ , und besonders bevorzugt von etwa  $2,2 \text{ g/cm}^3$  auf. Weiter bevorzugt beträgt die BET-Oberfläche einer Siliziumdioxidkörnung in der Regel weniger als  $1 \text{ m}^2/\text{g}$ , bestimmt gemäß DIN ISO 9277:2014-01.

Als Siliziumdioxidpartikel kommen prinzipiell alle dem Fachmann geeigneten Siliziumdioxidpartikel in Betracht. Bevorzugt ausgewählt werden Siliziumdioxidgranulat und Siliziumdioxidkörnung.

Unter einem Partikeldurchmesser oder einer Partikelgröße wird der Durchmesser eines Partikels verstanden, der sich als „area equivalent circular diameter  $x_{Ai}$ “ gemäß der Formel  $x_{Ai} = \sqrt{\frac{4A_i}{\pi}}$  ergibt, wobei  $A_i$  die Fläche des betrachteten Partikels bei einer Bildanalyse bedeutet. Als Methoden zur Bestimmung eignen sich zum Beispiel ISO 13322-1:2014 oder ISO 13322-2:2009. Vergleichende Angaben wie „größerer Partikeldurchmesser“ bedeutet immer, dass die in Bezug gesetzten Werte mit derselben Methode bestimmt wurden.

### **Siliziumdioxidpulver**

Im Rahmen der vorliegenden Erfindung wird synthetisches Siliziumdioxidpulver, nämlich pyrogen erzeugtes Siliziumdioxidpulver verwendet.

Das Siliziumdioxidpulver kann jedes Siliziumdioxidpulver sein, das mindestens zwei Teilchen aufweist. Als Herstellungsverfahren kommt jedes Verfahren in Betracht, das dem Fachmann geläufig und für den vorliegenden Zweck geeignet erscheint.

Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung wird das Siliziumdioxidpulver bei der Herstellung von Quarzglas als Nebenprodukt erzeugt, insbesondere bei der Herstellung von sogenannten Sootkörpern. Siliziumdioxid solcher Herkunft wird oftmals auch als „Sootstaub“ bezeichnet.

Eine bevorzugte Quelle für das Siliziumdioxidpulver sind Siliziumdioxidpartikel, die bei der synthetischen Herstellung von Sootkörpern unter Einsatz von Flammhydrolysebrennern erhalten werden. Bei der Herstellung eines

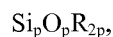
Sootkörpers wird entlang einer Brennerreihe ein rotierendes Trägerrohr, das eine Zylindermantelfläche aufweist, reversierend hin- und her bewegt. Den Flammhydrolysebrennern können dabei als Brennergase jeweils Sauerstoff und Wasserstoff sowie die Ausgangsmaterialien für die Bildung von Siliziumdioxidprimärpartikeln zugeführt werden. Die Siliziumdioxidprimärpartikel weisen bevorzugt eine Primärpartikelgröße von bis zu 100 nm auf. Die durch Flammenhydrolyse erzeugten Siliziumdioxidprimärpartikel aggregieren oder agglomerieren zu Siliziumdioxidpartikeln mit Partikelgrößen von etwa 9 µm (DIN ISO 13320:2009-1). In den Siliziumdioxidpartikeln sind die Siliziumdioxidprimärpartikel durch Raster-Elektronen-Mikroskopie in ihrer Form erkennbar und die Primärpartikelgröße kann bestimmt werden. Ein Teil der Siliziumdioxidpartikel werden auf der Zylindermantelfläche des um seine Längsachse rotierenden Trägerrohrs abgeschieden. So wird Schicht für Schicht der Sootkörper aufgebaut. Ein anderer Teil der Siliziumdioxidpartikel wird nicht auf der Zylindermantelfläche des Trägerrohrs abgeschieden, sondern fällt als Staub an, z.B. in einer Filteranlage. Dieser andere Teil Siliziumdioxidpartikel bildet das Siliziumdioxidpulver, oftmals auch als „Sootstaub“ bezeichnet. In der Regel ist der auf dem Trägerrohr abgeschiedene Teil Siliziumdioxidpartikel größer als der als Sootstaub anfallende Teil Siliziumdioxidpartikel im Rahmen der Sootkörperherstellung, bezogen auf das Gesamtgewicht der Siliziumdioxidpartikel.

Heutzutage wird der Sootstaub in der Regel aufwendig und kostenintensiv als Abfall entsorgt oder ohne Wertschöpfung als Füllstoff verbracht, z.B. im Straßenbau, als Zuschlagstoffe in der Farbstoffindustrie, als Rohstoff für die Fliesenherstellung und zur Herstellung von Hexafluorkieselsäure, welche zur Sanierung von Bauwerksfundamenten eingesetzt wird. Im Fall der vorliegenden Erfindung eignet es sich als Ausgangsstoff und kann zu einem hochwertigen Produkt verarbeitet werden.

Durch Flammenhydrolyse hergestelltes Siliziumdioxid wird gewöhnlich als pyrogenes Siliziumdioxid bezeichnet. Pyrogenes Siliziumdioxid liegt üblicherweise in Form amorpher Siliziumdioxidprimärpartikel oder Siliziumdioxidpartikel vor.

Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform kann das Siliziumdioxidpulver durch Flammenhydrolyse aus einem Gasgemisch hergestellt werden. In diesem Fall werden die Siliziumdioxidpartikel ebenfalls in der Flammenhydrolyse gebildet und als Siliziumdioxidpulver abgeführt, bevor sich Agglomerate oder Aggregate bilden. Hier ist das zuvor als Sootstaub bezeichnete Siliziumdioxidpulver Hauptprodukt.

Als Ausgangsmaterialien für die Bildung des Siliziumdioxidpulvers eignen sich bevorzugt Siloxane, Siliziumalkoxide und anorganische Siliziumverbindungen. Unter Siloxanen werden lineare und cyclische Polyalkylsiloxane verstanden. Bevorzugt haben Polyalkylsiloxane die allgemeine Formel



wobei p eine ganze Zahl von mindestens 2, bevorzugt von 2 bis 10, besonders bevorzugt von 3 bis 5, und R eine Alkylgruppe mit 1 bis 8 C-Atomen, bevorzugt mit 1 bis 4 C-Atomen, besonders bevorzugt eine Methylgruppe ist.

Besonders bevorzugt sind Siloxane ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus Hexamethyldisiloxan, Hexamethylcyclotrisiloxan (D3), Octamethylcyclotetrasiloxan (D4) und Dekamethylcyclopentasiloxan (D5) oder einer Kom-

bination von zwei oder mehr davon. Umfasst das Siloxan D3, D4 und D5, ist D4 bevorzugt die Hauptkomponente. Die Hauptkomponente liegt bevorzugt mit einem Anteil von mindestens 70 Gew.-%, bevorzugt von mindestens 80 Gew.-%, zum Beispiel von mindestens 90 Gew.-% oder von mindestens 94 Gew.-%, besonders bevorzugt von mindestens 98 Gew.-%, jeweils bezogen auf die Gesamtmenge Siliziumdioxidpulver, vor. Bevorzugte Siliziumalkoxide sind Tetramethoxysilan und Methyltrimethoxysilan. Bevorzugte anorganische Siliziumverbindungen als Ausgangsmaterial für Siliziumdioxidpulver sind Siliziumhalogenide, Silikate, Siliziumcarbid und Siliziumnitrid. Besonders bevorzugt als anorganische Siliziumverbindung als Ausgangsmaterial für Siliziumdioxidpulver sind Siliziumtetrachlorid und Trichlorsilan.

10 Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform ist das Siliziumdioxidpulver aus einer Verbindung ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus Siloxanen, Siliziumalkoxiden und Siliziumhalogeniden herstellbar.

Bevorzugt ist das Siliziumdioxidpulver herstellbar aus einer Verbindung ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus Hexamethyldisiloxan, Hexamethylcyclotrisiloxan, Octamethylcyclotetrasiloxan und Dekamethylcyclopentasiloxan, Tetramethoxysilan und Methyltrimethoxysilan, Siliziumtetrachlorid und Trichlorsilan oder einer Kombination aus zwei oder mehr davon, zum Beispiel aus Siliziumtetrachlorid und Octamethylcyclotetrasiloxan, besonders bevorzugt aus Octamethylcyclotetrasiloxan.

Für die Bildung von Siliziumdioxid aus Siliziumtetrachlorid durch Flammhydrolyse sind verschiedene Parameter von Bedeutung. Eine bevorzugte Zusammensetzung eines geeigneten Gasgemisches beinhaltet einen Anteil an Sauerstoff bei der Flammenhydrolyse in einem Bereich von 25 bis 40 Vol.-%. Der Anteil an Wasserstoff kann in einem Bereich von 45 bis 60 Vol.-% betragen. Der Anteil an Siliziumtetrachlorid liegt bevorzugt bei 5 bis 30 Vol.-%, alle der vorgenannten Vol.-% bezogen auf das Gesamtvolumen des Gasstroms. Weiter bevorzugt ist eine Kombination der vorgenannten Volumenanteile für Sauerstoff, Wasserstoff und  $\text{SiCl}_4$ . Die Flamme in der Flammenhydrolyse weist bevorzugt eine Temperatur in einem Bereich von 1500 bis 2500 °C, beispielsweise in einem Bereich von 1600 bis 2400 °C, besonders bevorzugt in einem Bereich von 1700 bis 2300 °C auf. Bevorzugt werden die in der Flammenhydrolyse gebildeten Siliziumdioxidprimärpartikel als Siliziumdioxidpulver abgeführt, bevor sich Agglomerate oder Aggregate bilden.

30 Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform des ersten Gegenstands der Erfindung weist das Siliziumdioxidpulver mindestens eines, zum Beispiel mindestens zwei oder mindestens drei oder mindestens vier, besonders bevorzugt mindestens fünf der folgenden Merkmale auf:

- a. eine BET-Oberfläche in einem Bereich von 20 bis 60  $\text{m}^2/\text{g}$ , zum Beispiel von 25 bis 55  $\text{m}^2/\text{g}$ , oder von 30 bis 50  $\text{m}^2/\text{g}$ , besonders bevorzugt von 20 bis 40  $\text{m}^2/\text{g}$ ,
- 35 b. eine Schüttdichte 0,01 bis 0,3  $\text{g}/\text{cm}^3$ , zum Beispiel im Bereich von 0,02 bis 0,2  $\text{g}/\text{cm}^3$ , bevorzugt im Bereich von 0,03 bis 0,15  $\text{g}/\text{cm}^3$ , weiter bevorzugt im Bereich von 0,1 bis 0,2  $\text{g}/\text{cm}^3$  oder im Bereich von 0,05 bis 0,1  $\text{g}/\text{cm}^3$ .
- c. einen Kohlenstoffgehalt von weniger als 50 ppm, zum Beispiel von weniger als 40 ppm oder von weniger 30 ppm, besonders bevorzugt in einem Bereich von 1 ppb bis 20 ppm;
- 40 d. einen Chlorgehalt von weniger als 200 ppm, zum Beispiel von weniger als 150 ppm oder von weniger 100 ppm, besonders bevorzugt in einem Bereich von 1 ppb bis 80 ppm;

- e. einen Aluminiumgehalt von weniger als 200 ppb, zum Beispiel im Bereich von 1 bis 100 ppb, besonders bevorzugt im Bereich von 1 bis 80 ppb;
  - f. einen Gesamtgehalt an Metallen, die von Aluminium verschieden sind, von weniger als 5 ppm, zum Beispiel von weniger als 2 ppm, besonders bevorzugt in einem Bereich von 1 ppb bis 1 ppm;
  - g. mindestens 70 Gew.-% der Pulverteilchen weisen eine Primärpartikelgröße in einem Bereich von 10 bis weniger als 100 nm, zum Beispiel im Bereich von 15 bis weniger als 100 nm, besonders bevorzugt im Bereich von 20 bis weniger als 100 nm auf;
  - h. eine Stampfdichte in einem Bereich von 0,001 bis 0,3 g/cm<sup>3</sup>, zum Beispiel im Bereich von 0,002 bis 0,2 g/cm<sup>3</sup> oder von 0,005 bis 0,1 g/cm<sup>3</sup>, bevorzugt im Bereich von 0,01 bis 0,06 g/cm<sup>3</sup>, auch bevorzugt im Bereich von 0,1 bis 0,2 g/cm<sup>3</sup>, oder im Bereich von 0,15 bis 0,2 g/cm<sup>3</sup>;
  - i. eine Restfeuchte von weniger als 5 Gew.-%, zum Beispiel im Bereich von 0,25 bis 3 Gew.-%, besonders bevorzugt im Bereich von 0,5 bis 2 Gew.-%;
  - j. eine Partikelgrößenverteilung D<sub>10</sub> im Bereich von 1 bis 7 µm, zum Beispiel im Bereich von 2 bis 6 µm oder im Bereich von 3 bis 5 µm, besonders bevorzugt im Bereich von 3,5 bis 4,5 µm;
  - k. eine Partikelgrößenverteilung D<sub>50</sub> im Bereich von 6 bis 15 µm, zum Beispiel im Bereich von 7 bis 13 µm oder im Bereich von 8 bis 11 µm, besonders bevorzugt im Bereich von 8,5 bis 10,5 µm;
  - l. eine Partikelgrößenverteilung D<sub>90</sub> im Bereich von 10 bis 40 µm, zum Beispiel im Bereich von 15 bis 35 µm, besonders bevorzugt im Bereich von 20 bis 30 µm;
- wobei die Gew.-%, ppm und ppb jeweils auf das Gesamtgewicht des Siliziumdioxidpulvers bezogen sind.

Das Siliziumdioxidpulver enthält Siliziumdioxid. Bevorzugt enthält das Siliziumdioxidpulver Siliziumdioxid in einer Menge von mehr als 95 Gew.-%, zum Beispiel in einer Menge von mehr als 98 Gew.-% oder von mehr als 99 Gew.-% oder von mehr als 99,9 Gew.-%, jeweils bezogen auf das Gesamtgewicht des Siliziumdioxidpulvers. Besonders bevorzugt enthält das Siliziumdioxidpulver Siliziumdioxid in einer Menge von mehr als 99,99 Gew.-%, bezogen auf das Gesamtgewicht des Siliziumdioxidpulvers.

Bevorzugt weist das Siliziumdioxidpulver einen Metallgehalt an von Aluminium verschiedenen Metallen von weniger als 5 ppm, zum Beispiel von weniger als 2 ppm, besonders bevorzugt von weniger als 1 ppm, jeweils bezogen auf das Gesamtgewicht des Siliziumdioxidpulvers, auf. Oftmals weist das Siliziumdioxidpulver jedoch einen Gehalt an von Aluminium verschiedenen Metallen in einer Menge von mindestens 1 ppb auf. Solche Metalle sind beispielsweise Natrium, Lithium, Kalium, Magnesium, Calcium, Strontium, Germanium, Kupfer, Molybdän, Wolfram, Titan, Eisen und Chrom. Diese können zum Beispiel als Element, als Ion, oder als Teil eines Moleküls oder eines Ions oder eines Komplexes vorliegen.

Bevorzugt hat das Siliziumdioxidpulver einen Gesamtanteil an weiteren Bestandteilen von weniger als 30 ppm, zum Beispiel von weniger als 20 ppm, besonders bevorzugt von weniger als 15 ppm, die ppm jeweils bezogen auf das Gesamtgewicht des Siliziumdioxidpulvers. Oftmals weist das Siliziumdioxidpulver jedoch einen Gehalt an weiteren Bestandteilen in einer Menge von mindestens 1 ppb auf. Unter weiteren Bestandteilen werden alle Bestandteile des Siliziumdioxidpulvers verstanden, die nicht zu der folgenden Gruppe gehören: Siliziumdioxid, Chlor, Aluminium, OH-Gruppen.

Im vorliegenden Kontext bedeutet die Angabe eines Bestandteils, wenn der Bestandteil ein chemisches Element ist, dass er als Element oder als Ion in einer Verbindung oder einem Salz vorliegen kann. Zum Beispiel beinhaltet die Angabe „Aluminium“ neben metallischem Aluminium auch Aluminiumsalze, Aluminiumoxide und Aluminiummetallkomplexe. Zum Beispiel beinhaltet die Angabe „Chlor“ neben elementarem Chlor, Chloride wie Natriumchlorid und Chlorwasserstoff. Oftmals liegen die weiteren Bestandteile in dem gleichen Aggregatzustand vor wie der Stoff, in dem sie enthalten sind.

Im vorliegenden Kontext bedeutet die Angabe eines Bestandteils, wenn der Bestandteil eine chemische Verbindung oder eine funktionelle Gruppe ist, dass der Bestandteil in der genannten Form, als geladene chemische Verbindung oder als Derivat der chemischen Verbindung vorliegen kann. Zum Beispiel beinhaltet die Angabe des chemischen Stoffes Ethanol, neben Ethanol auch Ethanolat, zum Beispiel Natriumethanolat. Die Angabe „OH-Gruppe“ beinhaltet auch Silanol, Wasser und Metallhydroxide. Zum Beispiel beinhaltet die Angabe Derivat bei Essigsäure auch Essigsäureester und Acetanhydrid.

Bevorzugt weisen mindestens 70 % der Pulverteilchen des Siliziumdioxidpulvers, bezogen auf die Anzahl an Pulverteilchen, eine Primärpartikelgröße von weniger als 100 nm auf, zum Beispiel im Bereich von 10 bis 100 nm oder von 15 bis 100 nm, und besonders bevorzugt im Bereich von 20 bis 100 nm auf. Die Primärpartikelgröße wird durch dynamische Lichtstreuung nach ISO 13320:2009-10 bestimmt.

Bevorzugt weisen mindestens 75 % der Pulverteilchen des Siliziumdioxidpulvers, bezogen auf die Anzahl an Pulverteilchen, eine Primärpartikelgröße von weniger als 100 nm auf, zum Beispiel im Bereich von 10 bis 100 nm oder von 15 bis 100 nm, und besonders bevorzugt im Bereich von 20 bis 100 nm auf.

Bevorzugt weisen mindestens 80 % der Pulverteilchen des Siliziumdioxidpulvers, bezogen auf die Anzahl an Pulverteilchen, eine Primärpartikelgröße von weniger als 100 nm auf, zum Beispiel im Bereich von 10 bis 100 nm oder von 15 bis 100 nm, und besonders bevorzugt im Bereich von 20 bis 100 nm auf.

Bevorzugt weisen mindestens 85 % der Pulverteilchen des Siliziumdioxidpulvers, bezogen auf die Anzahl an Pulverteilchen, eine Primärpartikelgröße von weniger als 100 nm auf, zum Beispiel im Bereich von 10 bis 100 nm oder von 15 bis 100 nm, und besonders bevorzugt im Bereich von 20 bis 100 nm auf.

Bevorzugt weisen mindestens 90 % der Pulverteilchen des Siliziumdioxidpulvers, bezogen auf die Anzahl an Pulverteilchen, eine Primärpartikelgröße von weniger als 100 nm auf, zum Beispiel im Bereich von 10 bis 100 nm oder von 15 bis 100 nm, und besonders bevorzugt im Bereich von 20 bis 100 nm auf.

Bevorzugt weisen mindestens 95 % der Pulverteilchen des Siliziumdioxidpulvers, bezogen auf die Anzahl an Pulverteilchen, eine Primärpartikelgröße von weniger als 100 nm auf, zum Beispiel im Bereich von 10 bis 100 nm oder von 15 bis 100 nm, und besonders bevorzugt im Bereich von 20 bis 100 nm auf.

Bevorzugt weist das Siliziumdioxidpulver eine Partikelgröße  $D_{10}$  im Bereich von 1 bis 7  $\mu\text{m}$  auf, zum Beispiel im Bereich von 2 bis 6  $\mu\text{m}$  oder im Bereich von 3 bis 5  $\mu\text{m}$ , besonders bevorzugt im Bereich von 3,5 bis 4,5  $\mu\text{m}$ .

Bevorzugt weist das Siliziumdioxidpulver eine Partikelgröße  $D_{50}$  im Bereich von 6 bis 15  $\mu\text{m}$  auf, zum Beispiel im Bereich von 7 bis 13  $\mu\text{m}$  oder im Bereich von 8 bis 11  $\mu\text{m}$ , besonders bevorzugt im Bereich von 8,5 bis 10,5  $\mu\text{m}$ . Bevorzugt weist das Siliziumdioxidpulver eine Partikelgröße  $D_{90}$  im Bereich von 10 bis 40  $\mu\text{m}$  auf, zum Beispiel im Bereich von 15 bis 35  $\mu\text{m}$ , besonders bevorzugt im Bereich von 20 bis 30  $\mu\text{m}$ .

5

Bevorzugt weist das Siliziumdioxidpulver eine spezifische Oberfläche (BET-Oberfläche) in einem Bereich von 20 bis 60  $\text{m}^2/\text{g}$  auf, zum Beispiel von 25 bis 55  $\text{m}^2/\text{g}$ , oder von 30 bis 50  $\text{m}^2/\text{g}$ , besonders bevorzugt von 20 bis 40  $\text{m}^2/\text{g}$ . Die BET-Oberfläche wird nach der Methode von Brunauer, Emmet und Teller (BET) anhand der DIN 66132 ermittelt und basiert auf Gasabsorption an der zu messenden Oberfläche.

10

Bevorzugt hat das Siliziumdioxidpulver einen pH-Wert von weniger als 7, zum Beispiel im Bereich von 3 bis 6,5 oder von 3,5 bis 6 oder von 4 bis 5,5, besonders bevorzugt im Bereich von 4,5 bis 5. Der pH-Wert kann mittels Einstabmesselektrode ermittelt werden (4 % Siliziumdioxidpulver in Wasser).

15 Das Siliziumdioxidpulver weist bevorzugt die Merkmalskombination a./b./c. oder a./b./f. oder a./b./g. auf, weiter bevorzugt die Merkmalskombination a./b./c./f. oder a./b./c./g. oder a./b./f./g., besonders bevorzugt die Merkmalskombination a./b./c./f./g.

20 Das Siliziumdioxidpulver weist bevorzugt die Merkmalskombination a./b./c. auf, wobei die BET-Oberfläche in einem Bereich von 20 bis 40  $\text{m}^2/\text{g}$  liegt, die Schüttdichte in einem Bereich von 0,05 bis 0,3  $\text{g/mL}$  liegt und der Kohlenstoffgehalt weniger als 40 ppm beträgt.

25 Das Siliziumdioxidpulver weist bevorzugt die Merkmalskombination a./b./f. auf, wobei die BET-Oberfläche in einem Bereich von 20 bis 40  $\text{m}^2/\text{g}$ , die Schüttdichte in einem Bereich von 0,05 bis 0,3  $\text{g/mL}$  und der Gesamtgehalt an Metallen, die von Aluminium verschieden sind, in einem Bereich von 1 ppb bis 1 ppm liegt.

30 Das Siliziumdioxidpulver weist bevorzugt die Merkmalskombination a./b./g. auf, wobei die BET-Oberfläche in einem Bereich von 20 bis 40  $\text{m}^2/\text{g}$  liegt, die Schüttdichte in einem Bereich von 0,05 bis 0,3  $\text{g/mL}$  liegt und mindestens 70 Gew.-% der Pulverteilchen eine Primärpartikelgröße in einem Bereich von 20 bis weniger als 100 nm aufweisen.

35 Das Siliziumdioxidpulver weist weiter bevorzugt die Merkmalskombination a./b./c./f. auf, wobei die BET-Oberfläche in einem Bereich von 20 bis 40  $\text{m}^2/\text{g}$  liegt, die Schüttdichte in einem Bereich von 0,05 bis 0,3  $\text{g/mL}$  liegt, der Kohlenstoffgehalt weniger als 40 ppm beträgt und der Gesamtgehalt an Metallen, die von Aluminium verschieden sind, in einem Bereich von 1 ppb bis 1 ppm liegt.

40 Das Siliziumdioxidpulver weist weiter bevorzugt die Merkmalskombination a./b./c./g. auf, wobei die BET-Oberfläche in einem Bereich von 20 bis 40  $\text{m}^2/\text{g}$  liegt, die Schüttdichte in einem Bereich von 0,05 bis 0,3  $\text{g/mL}$  liegt, der Kohlenstoffgehalt weniger als 40 ppm beträgt und mindestens 70 Gew.-% der Pulverteilchen eine Primärpartikelgröße in einem Bereich von 20 bis weniger als 100 nm aufweisen.

Das Siliziumdioxidpulver weist weiter bevorzugt die Merkmalskombination a./b./f./g. auf, wobei die BET-Oberfläche in einem Bereich von 20 bis 40 m<sup>2</sup>/g liegt, die Schüttdichte in einem Bereich von 0,05 bis 0,3 g/mL liegt, der Gesamtgehalt an Metallen, die von Aluminium verschieden sind, in einem Bereich von 1 ppb bis 1 ppm liegt und mindestens 70 Gew.-% der Pulverteilchen eine Primärpartikelgröße in einem Bereich von 20 bis weniger als 100 nm aufweisen.

Das Siliziumdioxidpulver weist besonders bevorzugt die Merkmalskombination a./b./c./f./g. auf, wobei die BET-Oberfläche in einem Bereich von 20 bis 40 m<sup>2</sup>/g liegt, die Schüttdichte in einem Bereich von 0,05 bis 0,3 g/mL liegt, der Kohlenstoffgehalt weniger als 40 ppm beträgt, der Gesamtgehalt an Metallen, die von Aluminium verschieden sind, in einem Bereich von 1 ppb bis 1 ppm liegt und mindestens 70 Gew.-% der Pulverteilchen eine Primärpartikelgröße in einem Bereich von 20 bis weniger als 100 nm aufweisen.

## Schritt II.

Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform des ersten Gegenstands der Erfindung wird das Siliziumdioxidpulver in Schritt II zu einem Siliziumdioxidgranulat verarbeitet, wobei das Siliziumdioxidgranulat einen größeren Partikeldurchmesser aufweist als das Siliziumdioxidpulver. Dazu geeignet sind prinzipiell alle dem Fachmann bekannten Verfahren, die zu einer Erhöhung der Partikeldurchmesser führen.

Das Siliziumdioxidgranulat weist einen Partikeldurchmesser auf, der größer ist, als der Partikeldurchmesser des Siliziumdioxidpulvers. Bevorzugt ist der Partikeldurchmesser des Siliziumdioxidgranulats in einem Bereich von 500 bis 50.000 mal größer als der Partikeldurchmesser des Siliziumdioxidpulvers, zum Beispiel 1.000 bis 10.000 mal größer, besonders bevorzugt 2.000 bis 8000 mal größer.

Bevorzugt sind mindestens 90 % des in Schritt i.) bereitgestellten Siliziumdioxidgranulats aus pyrogen erzeugtem Siliziumdioxidpulver gebildet, zum Beispiel mindestens 95 Gew.-% oder mindestens 98 Gew.-%, besonders bevorzugt mindestens 99 Gew.-% oder mehr, jeweils bezogen auf das Gesamtgewicht des Siliziumdioxidgranulats.

Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform des ersten Gegenstands der Erfindung weist das eingesetzte Siliziumdioxidgranulat mindestens eines, bevorzugt mindestens zwei oder mindestens drei oder mindestens vier, besonders bevorzugt alle der folgenden Merkmale auf:

- A) eine BET-Oberfläche im Bereich von 20 m<sup>2</sup>/g bis 50 m<sup>2</sup>/g;
- B) eine mittlere Partikelgröße in einem Bereich von 50 bis 500 µm;
- C) eine Schüttdichte in einem Bereich von 0,5 bis 1,2 g/cm<sup>3</sup>, zum Beispiel in einem Bereich von 0,6 bis 1,1 g/cm<sup>3</sup>, besonders bevorzugt in einem Bereich von 0,7 bis 1,0 g/cm<sup>3</sup>;
- D) einen Kohlenstoffgehalt von weniger als 50 ppm;
- E) einen Aluminiumgehalt von weniger als 200 ppb;
- F) eine Stampfdichte in einem Bereich von 0,7 bis 1,2 g/cm<sup>3</sup>;
- G) ein Porenvolumen in einem Bereich von 0,1 bis 2,5 mL/g, zum Beispiel in einem Bereich von 0,15 bis 1,5 mL/g; besonders bevorzugt in einem Bereich von 0,2 bis 0,8 mL/g;
- H) einen Schüttwinkel in einem Bereich von 23 bis 26°;



- I) eine Partikelgrößenverteilung  $D_{10}$  in einem Bereich von 50 bis 150  $\mu\text{m}$ ;
  - J) eine Partikelgrößenverteilung  $D_{50}$  in einem Bereich von 150 bis 300  $\mu\text{m}$ ;
  - K) eine Partikelgrößenverteilung  $D_{90}$  in einem Bereich von 250 bis 620  $\mu\text{m}$ ,
- wobei die ppm und ppb jeweils auf das Gesamtgewicht des Siliziumdioxidgranulats bezogen sind.

5

Bevorzugt weisen die Granulen des Siliziumdioxidgranulats eine sphärische Morphologie auf. Unter einer sphärischen Morphologie wird eine runde bis ovale Form der Partikel verstanden. Die Granulen des Siliziumdioxidgranulats weisen bevorzugt eine mittlere Sphärizität in einem Bereich von 0,7 bis 1,3 SPHT3, zum Beispiel eine mittlere Sphärizität in einem Bereich von 0,8 bis 1,2 SPHT3, besonders bevorzugt eine mittlere Sphärizität in einem Bereich von 0,85 bis 1,1 SPHT3 auf. Das Merkmal SPHT3 ist in den Testmethoden beschrieben.

10

Weiterhin bevorzugt weisen die Granulen des Siliziumdioxidgranulats eine mittlere Symmetrie in einem Bereich von 0,7 bis 1,3 Symm3, zum Beispiel eine mittlere Symmetrie in einem Bereich von 0,8 bis 1,2 Symm3, besonders bevorzugt eine mittlere Symmetrie in einem Bereich von 0,85 bis 1,1 Symm3 auf. Das Merkmal der mittleren Symmetrie Symm3 ist in den Testmethoden beschrieben.

15

Bevorzugt weist das Siliziumdioxidgranulat einen Metallgehalt an von Aluminium verschiedenen Metallen von weniger als 1000 ppb, zum Beispiel von weniger als 500 ppb, besonders bevorzugt von weniger als 100 ppb, jeweils bezogen auf das Gesamtgewicht des Siliziumdioxidgranulats, auf. Oftmals weist das Siliziumdioxidgranulat jedoch einen Gehalt an von Aluminium verschiedenen Metallen in einer Menge von mindestens 1 ppb auf. Oftmals weist das Siliziumdioxidgranulat einen Metallgehalt an von Aluminium verschiedenen Metallen von weniger als 1 ppm, bevorzugt in einem Bereich von 40 bis 900 ppb, zum Beispiel in einem Bereich von 50 bis 700 ppb, besonders bevorzugt in einem Bereich von 60 bis 500 ppb, jeweils bezogen auf das Gesamtgewicht des Siliziumdioxidgranulats. Solche Metalle sind beispielsweise Natrium, Lithium, Kalium, Magnesium, Calcium, Strontium, Germanium, Kupfer, Molybdän, Titan, Eisen und Chrom. Diese können zum Beispiel als Element, als Ion, oder als Teil eines Moleküls oder eines Ions oder eines Komplexes vorliegen.

25

Das Siliziumdioxidgranulat kann weitere Bestandteile, beispielsweise in Form von Molekülen, Ionen oder Elementen beinhalten. Bevorzugt beinhaltet das Siliziumdioxidgranulat weniger als 500 ppm, zum Beispiel weniger als 300 ppm, besonders bevorzugt weniger als 100 ppm, jeweils bezogen auf das Gesamtgewicht des Siliziumdioxidgranulats, weitere Bestandteile. Oftmals sind weitere Bestandteile in einer Menge von mindestens 1 ppb enthalten. Die weiteren Bestandteile können insbesondere ausgewählt sein aus der Gruppe bestehend aus Kohlenstoff, Fluorid, Jodid, Bromid, Phosphor oder einer Mischung von mindestens zwei hiervon.

30

Bevorzugt beinhaltet das Siliziumdioxidgranulat weniger als 10 ppm Kohlenstoff, zum Beispiel weniger als 8 ppm oder weniger als 5 ppm, besonders bevorzugt weniger als 4 ppm, jeweils bezogen auf das Gesamtgewicht des Siliziumdioxidgranulats. Oftmals ist Kohlenstoff in einer Menge von mindestens 1 ppb im Siliziumdioxidgranulat enthalten.

35

Bevorzugt beinhaltet das Siliziumdioxidgranulat weniger als 100 ppm, zum Beispiel weniger als 80 ppm, besonders bevorzugt weniger als 70 ppm, jeweils bezogen auf das Gesamtgewicht des Siliziumdioxidgranulats, an

40

weiteren Bestandteilen. Oftmals sind die weiteren Bestandteile jedoch in einer Menge von mindestens 1 ppb enthalten.

Bevorzugt beinhaltet Schritt II. folgende Schritte:

- 5 II.1. Bereitstellen einer Flüssigkeit;
  - II.2. Mischen des Siliziumdioxidpulvers mit der Flüssigkeit unter Erhalt einer Aufschlämmung bein-  
haltend Siliziumdioxidpulver;
  - II.3. Granulieren der Aufschlämmung beinhaltend Siliziumdioxidpulver.
- 10 Eine Flüssigkeit wird im Sinne der vorliegenden Erfindung als ein Stoff oder ein Stoffgemisch verstanden, das bei einem Druck von 1013 hPa und einer Temperatur von 20 °C flüssig ist.

Eine „Aufschlämmung“ im Sinne der vorliegenden Erfindung bedeutet ein Gemisch aus mindestens zwei Stoffen, wobei das Gemisch bei den bei Betrachtung vorliegenden Bedingungen mindestens eine Flüssigkeit und min-  
15 tens einen Feststoff aufweist.

Als Flüssigkeit eignen sich prinzipiell alle dem Fachmann bekannten und zum vorliegenden Einsatzzweck geeig-  
net erscheinende Stoffe und Stoffgemische. Bevorzugt ist die Flüssigkeit ausgewählt aus der Gruppe bestehend  
aus organischen Flüssigkeiten und Wasser. Bevorzugt ist das Siliziumdioxidpulver in der Flüssigkeit in einer  
20 Menge von weniger als 0,5 g/L, bevorzugt in einer Menge von weniger als 0,25 g/L, besonders bevorzugt in einer  
Menge von weniger als 0,1 g/L löslich, die g/L jeweils angegeben als g Siliziumdioxidpulver pro Liter Flüssig-  
keit.

Bevorzugt eignen sich als Flüssigkeit polare Lösungsmittel. Dies können organische Flüssigkeiten oder Wasser  
25 sein. Bevorzugt ist die Flüssigkeit ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus Wasser, Methanol, Ethanol, n-  
Propanol, iso-Propanol, n-Butanol, tert-Butanol und Mischungen aus mehr als einem davon. Besonders bevorzugt  
ist die Flüssigkeit Wasser. Besonders bevorzugt beinhaltet die Flüssigkeit destilliertes oder entionisiertes Wasser.

Bevorzugt wird das Siliziumdioxidpulver zu einer Aufschlämmung beinhaltend Siliziumdioxidpulver verarbeitet.  
30 Das Siliziumdioxidpulver ist in der Flüssigkeit bei Raumtemperatur nahezu unlöslich, kann jedoch in die Flüssig-  
keit in hohen Gewichts-Anteilen unter Erhalt der Aufschlämmung beinhaltend Siliziumdioxidpulver eingebracht  
werden.

Das Siliziumdioxidpulver und die Flüssigkeit können in beliebiger Weise gemischt werden. Zum Beispiel kann  
35 das Siliziumdioxidpulver zu der Flüssigkeit, oder die Flüssigkeit zum Siliziumdioxidpulver gegeben werden. Das  
Gemisch kann während des Zugebens oder nach dem Zugeben bewegt werden. Besonders bevorzugt wird das  
Gemisch während und nach dem Zugeben bewegt. Beispiele für das Bewegen sind ein Schütteln und ein Rühren,  
oder eine Kombination von beidem. Bevorzugt kann das Siliziumdioxidpulver unter Rühren zu der Flüssigkeit  
gegeben werden. Weiter bevorzugt kann ein Teil des Siliziumdioxidpulvers zu der Flüssigkeit gegeben werden,  
40 wobei das so erhaltene Gemisch bewegt wird, und das Gemisch anschließend mit dem übrigen Teil des Silizium-  
dioxidpulvers vermischt wird. Ebenso kann ein Teil der Flüssigkeit zu dem Siliziumdioxidpulver gegeben wer-

den, wobei das so erhaltene Gemisch bewegt wird, und das Gemisch anschließend mit dem übrigen Teil der Flüssigkeit vermischt wird.

Durch das Mischen des Siliziumdioxidpulvers und der Flüssigkeit wird eine Aufschlämmung beinhaltend Siliziumdioxidpulver erhalten. Bevorzugt ist die Aufschlämmung beinhaltend Siliziumdioxidpulver eine Suspension, in der das Siliziumdioxidpulver gleichmäßig in der Flüssigkeit verteilt ist. Unter „gleichmäßig“ wird verstanden, dass die Dichte und die Zusammensetzung der Aufschlämmung beinhaltend Siliziumdioxidpulver an jeder Stelle um nicht mehr als 10 % von der durchschnittlichen Dichte und der durchschnittlichen Zusammensetzung abweichen, jeweils bezogen auf die Gesamtmenge an Aufschlämmung beinhaltend Siliziumdioxidpulver. Eine gleichmäßige Verteilung des Siliziumdioxidpulvers in der Flüssigkeit kann durch wie ein zuvor bereits beschriebenes Bewegen hergestellt, oder erhalten werden, oder beides.

Bevorzugt hat die Aufschlämmung beinhaltend Siliziumdioxidpulver ein Litergewicht im Bereich von 1000 bis 2000 g/L, zum Beispiel im Bereich von 1200 bis 1900 g/L oder von 1300 bis 1800 g/L, besonders bevorzugt im Bereich von 1400 bis 1700 g/L. Das Litergewicht wird mittels Auswiegen eines volumenkalibrierten Behälters bestimmt.

Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform gilt für die Aufschlämmung beinhaltend Siliziumdioxidpulver mindestens eines, zum Beispiel mindestens zwei oder mindestens drei oder mindestens vier, besonders bevorzugt mindestens fünf der folgenden Merkmale:

- a.) die Aufschlämmung beinhaltend Siliziumdioxidpulver wird in Kontakt mit einer Kunststoffoberfläche transportiert;
- b.) die Aufschlämmung beinhaltend Siliziumdioxidpulver wird geschert;
- c.) die Aufschlämmung beinhaltend Siliziumdioxidpulver weist eine Temperatur von mehr als 0°C auf, bevorzugt in einem Bereich von 5 bis 35°C;
- d.) die Aufschlämmung beinhaltend Siliziumdioxidpulver weist ein Zeta-Potential bei einem pH-Wert von 7 in einem Bereich von 0 bis -100 mV auf, zum Beispiel von -20 bis -60 mV, besonders bevorzugt von -30 bis -45 mV;
- e.) die Aufschlämmung beinhaltend Siliziumdioxidpulver weist einen pH-Wert in einem Bereich von 7 oder mehr auf, zum Beispiel von mehr als 7 oder einen pH-Wert im Bereich von 7,5 bis 13 oder von 8 bis 11, besonders bevorzugt von 8,5 bis 10;
- f.) die Aufschlämmung beinhaltend Siliziumdioxidpulver weist einen isoelektrischen Punkt von weniger als 7, zum Beispiel in einem Bereich von 1 bis 5 oder in einem Bereich von 2 bis 4, besonders bevorzugt in einem Bereich von 3 bis 3,5;
- g.) die Aufschlämmung beinhaltend Siliziumdioxidpulver weist einen Feststoffgehalt von mindestens 40 Gew.-%, zum Beispiel in einem Bereich von 50 bis 80 Gew.-%, oder in einem Bereich von 55 bis 75 Gew.-%, besonders bevorzugt in einem Bereich von 60 bis 70 Gew.-% auf, jeweils bezogen auf das Gesamtgewicht der Aufschlämmung;
- h.) die Aufschlämmung beinhaltend Siliziumdioxidpulver weist eine Viskosität gemäß DIN 53019-1 (5 rpm, 30 Gew.-%) in einem Bereich von 500 bis 1000 mPas, zum Beispiel im Bereich von 600 bis 900 mPas oder von 650 bis 850 mPas, besonders bevorzugt im Bereich von 700 bis 800 mPas auf;

- i.) die Aufschlämmung beinhalten Siliziumdioxidpulver weist eine Thixotropie gemäß DIN SPEC 91143-2 (30 Gew.-% in Wasser, 23 °C, 5 rpm/50 rpm) im Bereich von 3 bis 6, zum Beispiel im Bereich von 3,5 bis 5, besonders bevorzugt im Bereich von 4,0 bis 4,5 auf;
- j.) die Siliziumdioxidpartikel in der Aufschlämmung beinhalten Siliziumdioxidpulver weisen in einer 4 Gew.-%igen Aufschlämmung beinhalten Siliziumdioxidpulver eine mittlere Partikelgröße in Suspension gemäß DIN ISO 13320-1 im Bereich von 100 bis 500 nm, zum Beispiel in einem Bereich von 200 bis 300 nm auf.

Bevorzugt weisen die Siliziumdioxidpartikel in einer 4 Gew.-%igen wässrigen Aufschlämmung beinhalten Siliziumdioxidpulver eine Partikelgröße  $D_{10}$  in einem Bereich von 50 bis 250 nm auf, besonders bevorzugt im Bereich von 100 bis 150 nm. Bevorzugt weisen die Siliziumdioxidpartikel in einer 4 Gew.-%igen wässrigen Aufschlämmung beinhalten Siliziumdioxidpulver eine Partikelgröße  $D_{50}$  in einem Bereich von 100 bis 400 nm auf, besonders bevorzugt im Bereich von 200 bis 250 nm. Bevorzugt weisen die Siliziumdioxidpartikel in einer 4 Gew.-%igen wässrigen Aufschlämmung beinhalten Siliziumdioxidpulver eine Partikelgröße  $D_{90}$  in einem Bereich von 200 bis 600 nm auf, besonders bevorzugt in einem Bereich von 350 bis 400 nm. Die Partikelgröße wird mittels DIN ISO 13320-1 bestimmt.

Unter dem „isolektrischen Punkt“ wird der pH-Wert verstanden, bei dem das Zeta-Potential den Wert 0 annimmt. Das Zeta-Potential wird gemäß ISO 13099-2:2012 bestimmt.

Bevorzugt wird der pH-Wert der Aufschlämmung beinhalten Siliziumdioxidpulver auf einen Wert in dem oben genannten Bereich eingestellt. Bevorzugt können zum Einstellen des pH-Werts Stoffe wie NaOH oder  $\text{NH}_3$ , zum Beispiel als wässrige Lösung der Aufschlämmung beinhalten Siliziumdioxidpulver zugegeben werden. Dabei wird die Aufschlämmung beinhalten Siliziumdioxidpulver oftmals bewegt.

### Granulation

Das Siliziumdioxidgranulat wird durch Granulieren von Siliziumdioxidpulver erhalten. Unter Granulieren versteht man das Überführen von Pulverteilchen in Granulen. Beim Granulieren bilden sich durch Zusammenlagerungen von mehreren Siliziumdioxidpulverteilchen größere Agglomerate, die als „Siliziumdioxidgranulen“ bezeichnet werden. Diese werden oft auch als „Siliziumdioxidpartikel“, „Siliziumdioxidgranulatteilchen“ oder „Granulatteilchen“ bezeichnet. In ihrer Gesamtheit bilden Granulen ein Granulat, z.B. die Siliziumdioxidgranulen ein „Siliziumdioxidgranulat“.

Im vorliegenden Fall kann prinzipiell jedes Granuliertverfahren ausgewählt werden, das dem Fachmann bekannt und zum Granulieren von Siliziumdioxidpulver geeignet erscheint. Bei den Granuliertverfahren kann zwischen Aufbaugranulation und Pressgranulation, und weiter zwischen Nass- und Trocken-Granuliertverfahren unterschieden werden. Bekannte Methoden sind Rollgranulation in einem Granulierteller, Sprühgranulation, Zentrifugalzerstäubung, Wirbelschichtgranulation, Granuliertverfahren unter Einsatz einer Granuliertmühle, Kompaktierung, Walzenpressen, Brikettierung, Schülpenherstellung oder Extrudierung.

**Sprühtrocknen**

Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform des ersten Gegenstands der Erfindung wird ein Siliziumdioxidgranulat durch Sprühgranulieren der Aufschlämmung beinhaltend Siliziumdioxidpulver erhalten. Das Sprühgranulieren wird auch als Sprühtrocknen bezeichnet.

5

Das Sprühtrocknen erfolgt bevorzugt in einem Sprühturm. Zum Sprühtrocknen wird die Aufschlämmung beinhaltend Siliziumdioxidpulver bei erhöhter Temperatur unter Druck gesetzt. Die unter Druck stehende Aufschlämmung beinhaltend Siliziumdioxidpulver wird anschließend über eine Düse entspannt und so in den Sprühturm gesprüht. In Folge dessen bilden sich Tropfen, die augenblicklich trocknen und zunächst trockene Kleinstpartikel („Keime“) bilden. Die Kleinstpartikel bilden zusammen mit einem auf die Partikel wirkenden Gasstrom eine Wirbelschicht. Sie werden so im Schwebezustand gehalten und können damit eine Oberfläche zum Trocknen weiterer Tröpfchen bilden.

10

15

Die Düse, durch die die Aufschlämmung beinhaltend Siliziumdioxidpulver in den Sprühturm gesprüht wird, bildet bevorzugt einen Einlass in den Innenraum des Sprühturms.

20

Die Düse weist beim Sprühen bevorzugt eine Kontaktfläche mit der Aufschlämmung beinhaltend Siliziumdioxidpulver auf. Unter der „Kontaktfläche“ wird der Bereich der Düse verstanden, der beim Sprühen in Kontakt mit der Aufschlämmung beinhaltend Siliziumdioxidpulver kommt. Oftmals ist zumindest ein Teil der Düse als Rohr geformt, durch das die Aufschlämmung beinhaltend Siliziumdioxidpulver beim Sprühen geleitet wird, so dass die Innenseite des Hohlrohrs mit der Aufschlämmung beinhaltend Siliziumdioxidpulver in Berührung kommt.

25

Die Kontaktfläche beinhaltet bevorzugt ein Glas, einen Kunststoff oder eine Kombination davon. Bevorzugt beinhaltet die Kontaktfläche ein Glas, besonders bevorzugt Quarzglas. Bevorzugt beinhaltet die Kontaktfläche einen Kunststoff. Prinzipiell sind alle dem Fachmann bekannten Kunststoffe geeignet, die bei den Verfahrenstemperaturen stabil sind und keine Fremdatome an die Aufschlämmung beinhaltend Siliziumdioxidpulver abgeben. Bevorzugte Kunststoffe sind Polyolefine, zum Beispiel Homo- oder Copolymere beinhaltend mindestens ein Olefin, besonders bevorzugt Homo- oder Copolymere beinhaltend Polypropylen, Polyethylen, Polybutadien oder Kombinationen aus zwei oder mehr davon. Bevorzugt besteht die Kontaktfläche aus einem Glas, einem Kunststoff oder einer Kombination davon, zum Beispiel ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus Quarzglas und Polyolefinen, besonders bevorzugt ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus Quarzglas und Homo- oder Copolymere beinhaltend Polypropylen, Polyethylen, Polybutadien oder Kombinationen aus zwei oder mehr davon. Bevorzugt beinhaltet die Kontaktfläche keine Metalle, insbesondere kein Wolfram, Titan, Tantal, Chrom, Cobalt, Nickel, Eisen, Vanadium, Zirkonium und Mangan.

30

35

40

Es ist prinzipiell möglich, dass die Kontaktfläche und die weiteren Teile der Düse aus dem gleichen oder aus verschiedenen Materialien bestehen. Bevorzugt enthalten die weiteren Teile der Düse das gleiche Material wie die Kontaktfläche. Es ist ebenso möglich, dass die weiteren Teile der Düse ein von der Kontaktfläche verschiedenes Material enthalten. Zum Beispiel kann die Kontaktfläche mit einem geeigneten Material, zum Beispiel einem Glas oder einem Kunststoff beschichtet sein.

Bevorzugt ist die Düse zu mehr als 70 Gew.-%, bezogen auf das Gesamtgewicht der Düse, aus einem Element ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus Glas, Kunststoff oder einer Kombination von Glas und Kunststoff gebildet, zum Beispiel zu mehr als 75 Gew.-% oder zu mehr als 80 Gew.-% oder zu mehr als 85 Gew.-% oder zu mehr als 90 Gew.-% oder zu mehr als 95 Gew.-%, besonders bevorzugt zu mehr als 99 Gew.-%.

Bevorzugt umfasst die Düse ein Düsenplättchen. Das Düsenplättchen ist bevorzugt aus Glas, Kunststoff oder einer Kombination aus Glas und Kunststoff gebildet. Bevorzugt ist das Düsenplättchen aus Glas gebildet, besonders bevorzugt Quarzglas. Bevorzugt ist das Düsenplättchen aus Kunststoff gebildet. Bevorzugte Kunststoffe sind Polyolefine, zum Beispiel Homo- oder Copolymere beinhaltend mindestens ein Olefin, besonders bevorzugt Homo- oder Copolymere beinhaltend Polypropylen, Polyethylen, Polybutadien oder Kombinationen aus zwei oder mehr davon. Bevorzugt beinhaltet das Düsenplättchen keine Metalle, insbesondere kein Wolfram, Titan, Tantal, Chrom, Cobalt, Nickel, Eisen, Vanadium, Zirkonium und Mangan.

Bevorzugt umfasst die Düse eine Drallschnecke. Die Drallschnecke ist bevorzugt aus Glas, Kunststoff oder einer Kombination aus Glas und Kunststoff gebildet. Bevorzugt ist die Drallschnecke aus Glas gebildet, besonders bevorzugt Quarzglas. Bevorzugt ist die Drallschnecke aus Kunststoff gebildet. Bevorzugte Kunststoffe sind Polyolefine, zum Beispiel Homo- oder Copolymere beinhaltend mindestens ein Olefin, besonders bevorzugt Homo- oder Copolymere beinhaltend Polypropylen, Polyethylen, Polybutadien oder Kombinationen aus zwei oder mehr davon. Bevorzugt beinhaltet die Drallschnecke keine Metalle, insbesondere kein Wolfram, Titan, Tantal, Chrom, Cobalt, Nickel, Eisen, Vanadium, Zirkonium und Mangan.

Die Düse kann darüber hinaus weitere Bestandteile umfassen. Bevorzugte weitere Bauteile sind ein Düsenkörper, besonders bevorzugt ist ein die Drallschnecke und das Düsenplättchen umgebender Düsenkörper, ein Kreuzstück und eine Prallplatte. Bevorzugt umfasst eine Düse eines oder mehr, besonders bevorzugt alle, der weiteren Bauteile. Die weiteren Bauteile können unabhängig voneinander prinzipiell aus einem beliebigen, dem Fachmann bekannten und zu diesem Zweck geeigneten Material bestehen, zum Beispiel aus einem Metall-haltigen Material, aus Glas oder aus einem Kunststoff. Bevorzugt ist der Düsenkörper aus Glas gebildet, besonders bevorzugt Quarzglas. Bevorzugt sind die weiteren Bauteile aus Kunststoff gebildet. Bevorzugte Kunststoffe sind Polyolefine, zum Beispiel Homo- oder Copolymere beinhaltend mindestens ein Olefin, besonders bevorzugt Homo- oder Copolymere beinhaltend Polypropylen, Polyethylen, Polybutadien oder Kombinationen aus zwei oder mehr davon. Bevorzugt beinhalten die weiteren Bauteile keine Metalle, insbesondere kein Wolfram, Titan, Tantal, Chrom, Cobalt, Nickel, Eisen, Vanadium, Zirkonium und Mangan.

Bevorzugt weist der Sprühturm einen Gaseinlass und einen Gasauslass auf. Durch den Gaseinlass kann Gas in den Innenraum des Sprühturms eingebracht, und durch den Gasauslass kann es ausgeleitet werden. Es ist auch möglich, Gas über die Düse in den Sprühturm einzuleiten. Ebenso kann Gas über den Auslass des Sprühturms ausgeleitet werden. Weiterhin bevorzugt kann Gas über die Düse und einen Gaseinlass des Sprühturms zugeführt, und über den Auslass des Sprühturms und einen Gasauslass des Sprühturms ausgeleitet werden.

Bevorzugt liegt im Innenraum des Sprühturms eine Atmosphäre ausgewählt aus Luft, einem Inertgas, mindestens zwei Inertgasen oder eine Kombination von Luft mit mindestens einem Inertgas, bevorzugt eine Kombination von Luft mit mindestens einem Inertgas, bevorzugt mit mindestens zwei Inertgasen vor. Als Inertgase sind bevorzugt ausgewählt aus der Liste bestehend aus Stickstoff, Helium, Neon, Argon, Krypton und Xenon. Zum Beispiel liegt  
5 im Innenraum des Sprühturms Luft, Stickstoff oder Argon vor, besonders bevorzugt Luft.

Weiter bevorzugt ist die im Sprühturm vorliegende Atmosphäre Teil eines Gasstroms. Der Gasstrom wird in den Sprühturm bevorzugt über einen Gaseinlass eingeleitet und über einen Gasauslass ausgeleitet. Es ist auch möglich Teile des Gasstroms über die Düse einzuleiten und Teile des Gasstroms über einen Feststoffauslass auszuleiten.

10 Der Gasstrom kann im Sprühturm weitere Bestandteile aufnehmen. Diese können beim Sprühtrocknen aus der Aufschlämmung beinhaltend Siliziumdioxidpulver stammen und in den Gasstrom übergehen.

Bevorzugt wird dem Sprühturm ein trockener Gasstrom zugeführt. Unter einem trockenen Gasstrom wird ein Gas oder ein Gasgemisch verstanden, dessen relative Feuchte bei der im Sprühturm eingestellten Temperatur unter-  
15 halb des Kondensationspunktes liegt. Eine relative Luftfeuchte von 100 % entspricht einer Wassermenge von 17,5 g/m<sup>3</sup> bei 20°C. Das Gas wird bevorzugt auf eine Temperatur in einem Bereich von 150 bis 450°C, zum Beispiel von 200 bis 420°C oder von 300 bis 400°C, besonders bevorzugt von 350 bis 400°C vorgewärmt.

Der Innenraum des Sprühturms ist bevorzugt temperierbar. Bevorzugt beträgt die Temperatur im Innenraum des  
20 Sprühturms bis zu 550°C, zum Beispiel 300 bis 500°C, besonders bevorzugt 350 bis 450°C.

Der Gasstrom hat am Gaseinlass bevorzugt eine Temperatur in einem Bereich von 150 bis 450°C, zum Beispiel von 200 bis 420°C oder von 300 bis 400°C, besonders bevorzugt von 350 bis 400°C.

25 Am Feststoffauslass, dem Gasauslass oder an beiden Orten hat der ausgeleitete Gasstrom bevorzugt eine Temperatur von weniger als 170°C, zum Beispiel von 50 bis 150°C, besonders bevorzugt von 100 bis 130°C.

Weiter bevorzugt liegt der Unterschied zwischen der Temperatur des Gasstroms beim Einleiten und dem Gasstrom beim Ausleiten in einem Bereich von 100 bis 330°C, zum Beispiel von 150 bis 300 °C.

30 Die so erhaltenen Siliziumdioxidgranulen liegen als Agglomerat einzelner Teilchen von Siliziumdioxidpulver vor. Die einzelnen Teilchen des Siliziumdioxidpulvers sind im Agglomerat weiterhin erkennbar. Die mittlere Teilchengröße der Teilchen des Siliziumdioxidpulvers liegt bevorzugt im Bereich von 10 bis 1000 nm, zum Beispiel im Bereich von 20 bis 500 nm oder von 30 bis 250 nm oder von 35 bis 200 nm oder von 40 bis 150 nm, oder  
35 besonders bevorzugt im Bereich von 50 bis 100 nm. Die mittlere Teilchengröße dieser Teilchen wird gemäß DIN ISO 13320-1 ermittelt.

Das Sprühtrocknen kann in Anwesenheit von Hilfsstoffen durchgeführt werden. Prinzipiell können alle Stoffe als Hilfsstoffe eingesetzt werden, die dem Fachmann bekannt sind und zum vorliegenden Einsatzzweck geeignet  
40 erscheinen. Als Hilfsstoffe kommen zum Beispiel sogenannte Bindemittel in Betracht. Beispiele für geeignete

Bindemittel sind Metalloxide wie Calciumoxid, Metallcarbonate wie Calciumcarbonat und Polysaccharide wie Cellulose, Celluloseether, Stärke und Stärkederivate.

Besonders bevorzugt wird das Sprühtrocknen im Rahmen der vorliegenden Erfindung ohne Hilfsstoffe durchgeführt.

Bevorzugt wird vor, nach oder vor und nach dem Entnehmen des Siliziumdioxidgranulats aus dem Sprühturm ein Teil davon abgetrennt. Zum Abtrennen kommen alle dem Fachmann bekannten und geeignet erscheinenden Verfahren in Betracht. Bevorzugt erfolgt das Abtrennen durch ein Sichten oder ein Sieben.

Bevorzugt werden vor dem Entnehmen des durch Sprühtrocknung gebildeten Siliziumdioxidgranulats aus dem Sprühturm Partikel mit einer Partikelgröße von weniger als 50 µm, zum Beispiel mit einer Partikelgröße von weniger als 70 µm besonders bevorzugt mit einer Partikelgröße von weniger als 90 µm durch Sichten abgetrennt. Das Sichten erfolgt bevorzugt durch einen Zyklon, der bevorzugt im unteren Bereich des Sprühturms, besonders bevorzugt oberhalb des Auslasses des Sprühturms, angeordnet ist.

Bevorzugt werden nach dem Entnehmen des Siliziumdioxidgranulats aus dem Sprühturm Teilchen mit einer Partikelgröße von mehr als 1000 µm, zum Beispiel mit einer Partikelgröße von mehr als 700 µm besonders bevorzugt mit einer Partikelgröße von mehr als 500 µm durch Sieben abgetrennt. Das Sieben der Partikel kann prinzipiell nach allen dem Fachmann bekannten und zu diesem Zweck geeigneten Verfahren erfolgen. Bevorzugt erfolgt das Sieben mittels einer Rüttelrinne.

Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform ist das Sprühtrocknen der Aufschlämmung beinhaltend Siliziumdioxidpulver durch eine Düse in einen Sprühturm durch mindestens eines, zum Beispiel zwei oder drei, besonders bevorzugt alle der folgenden Merkmale gekennzeichnet:

- a] Sprühgranulieren in einem Sprühturm;
- b] Vorliegen eines Drucks der Aufschlämmung beinhaltend Siliziumdioxidpulver an der Düse von nicht mehr als 40 bar, zum Beispiel in einem Bereich von 1,3 bis 20 bar von 1,5 bis 18 bar oder von 2 bis 15 bar oder von 4 bis 13 bar, oder besonders bevorzugt im Bereich von 5 bis 12 bar, wobei der Druck absolut (in Bezug auf  $p = 0$  hPa) angegeben ist;
- c] eine Temperatur der Tröpfchen beim Eintritt in den Sprühturm in einem Bereich von 10 bis 50°C, bevorzugt in einem Bereich von 15 bis 30°C, besonders bevorzugt in einem Bereich von 18 bis 25°C.
- d] eine Temperatur an der dem Sprühturm zugewandten Seite der Düse in einem Bereich von 100 bis 450°C, zum Beispiel in einem Bereich von 250 bis 440°C, besonders bevorzugt von 350 bis 430°C;
- e] einen Durchsatz an Aufschlämmung beinhaltend Siliziumdioxidpulver durch die Düse in einem Bereich von 0,05 bis 1 m<sup>3</sup>/h, zum Beispiel in einem Bereich von 0,1 bis 0,7 m<sup>3</sup>/h oder von 0,2 bis 0,5 m<sup>3</sup>/h, besonders bevorzugt in einem Bereich von 0,25 bis 0,4 m<sup>3</sup>/h;
- f] einen Feststoffgehalt der Aufschlämmung beinhaltend Siliziumdioxidpulver von mindestens 40 Gew.-%, zum Beispiel in einem Bereich von 50 bis 80 Gew.-%, oder in einem Bereich von 55 bis 75 Gew.-%, besonders bevorzugt in einem Bereich von 60 bis 70 Gew.-% auf, jeweils bezogen auf das Gesamtgewicht der Aufschlämmung beinhaltend Siliziumdioxidpulver;



- g] einen Gaszustrom in den Sprühturm in einem Bereich von 10 bis 100 kg/min, zum Beispiel in einem Bereich von 20 bis 80 kg/min oder von 30 bis 70 kg/min, besonders bevorzugt in einem Bereich von 40 bis 60 kg/min;
- h] eine Temperatur des Gasstroms beim Eintritt in den Sprühturm in einem Bereich von 100 bis 450°C, zum Beispiel in einem Bereich von 250 bis 440°C, besonders bevorzugt von 350 bis 430°C;
- i] eine Temperatur des Gasstroms beim Austritt aus dem Sprühturm von weniger als 170°C;
- j] das Gas ist ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus Luft, Stickstoff und Helium, oder einer Kombination von zwei oder mehr davon; bevorzugt Luft;
- k] eine Restfeuchte des Granulats bei Entnahme aus dem Sprühturm von weniger als 5 Gew.-%, zum Beispiel von weniger als 3 Gew.-% oder von weniger als 1 Gew.-% oder in einem Bereich von 0,01 bis 0,5 Gew.-%, besonders bevorzugt in einem Bereich von 0,1 bis 0,3 Gew.-%, jeweils bezogen auf das Gesamtgewicht des bei der Sprühtrocknung entstehenden Siliziumdioxidgranulats;
- l] mindestens 50 Gew.-% des Sprühgranulats, bezogen auf das Gesamtgewicht des bei der Sprühtrocknung entstehenden Siliziumdioxidgranulats, vollzieht eine Flugzeit in einem Bereich von 1 bis 100 s, zum Beispiel über einen Zeitraum von 10 bis 80 s, besonders bevorzugt über einen Zeitraum von 25 bis 70 s;
- m] mindestens 50 Gew.-% des Sprühgranulats, bezogen auf das Gesamtgewicht des bei der Sprühtrocknung entstehenden Siliziumdioxidgranulats, legt eine Flugstrecke von mehr als 20 m zurück, zum Beispiel von mehr als 30 oder von mehr als 50 oder von mehr als 70 oder von mehr als 100 oder von mehr als 150 oder von mehr als 200 oder in einem Bereich von 20 bis 200 m oder von 10 bis 150 oder von 20 bis 100, besonders bevorzugt in einem Bereich von 30 bis 80 m.
- n] der Sprühturm weist eine zylindrische Geometrie auf;
- o] eine Höhe des Sprühturms von mehr als 10 m, zum Beispiel von mehr als 15 m oder von mehr als 20 m oder von mehr als 25 m oder von mehr als 30 m oder in einem Bereich von 10 bis 25 m, besonders bevorzugt in einem Bereich von 15 bis 20 m;
- p] Absichten von Partikeln mit einer Größe von weniger als 90 µm vor der Entnahme des Granulats aus dem Sprühturm;
- q] Absieben von Partikeln mit einer Größe von mehr als 500 µm nach der Entnahme des Granulats aus dem Sprühturm, bevorzugt auf einer Rüttelrinne;
- r] der Austritt der Tröpfchen der Aufschlämmung beinhalten Siliziumdioxidpulver aus der Düse erfolgt in einem Winkel von 30 bis 60 Grad entgegen der Lotrichtung, besonders bevorzugt bei einem Winkel von 45 Grad entgegen der Lotrichtung.

Unter der Lotrichtung wird die Richtung des Schwerkraftvektors verstanden.

Die Flugstrecke bedeutet den Weg, den ein Tröpfchen der Aufschlämmung beinhalten Siliziumdioxidpulver ab Austritt aus der Düse im Gasraum des Sprühturms unter Bildung einer Granule bis zum Abschluss des Flug- und Fallvorgangs zurücklegt. Der Flug- und Fallvorgang endet regelmäßig durch Auftreffen der Granule am Boden des Sprühturms, oder durch Auftreffen der Granule auf bereits auf dem Boden des Sprühturms liegenden anderen Granulen, je nachdem, was zuerst eintritt.

Die Flugzeit ist die Dauer, die eine Granule für das Zurücklegen der Flugstrecke im Sprühturm benötigt. Bevorzugt weisen die Granulen im Sprühturm eine helixförmige Flugbahn auf.

5 Bevorzugt legen mindestens 60 Gew.-% des Sprühgranulats, bezogen auf das Gesamtgewicht des bei der Sprühtrocknung entstehenden Siliziumdioxidgranulats, eine mittlere Flugstrecke von mehr als 20 m zurück, zum Beispiel von mehr als 30 oder von mehr als 50 oder von mehr als 70 oder von mehr als 100 oder von mehr als 150 oder von mehr als 200 oder in einem Bereich von 20 bis 200 m oder von 10 bis 150 oder von 20 bis 100, besonders bevorzugt einem Bereich von 30 bis 80 m.

10 Bevorzugt legen mindestens 70 Gew.-% des Sprühgranulats, bezogen auf das Gesamtgewicht des bei der Sprühtrocknung entstehenden Siliziumdioxidgranulats, eine mittlere Flugstrecke von mehr als 20 m zurück, zum Beispiel von mehr als 30 oder von mehr als 50 oder von mehr als 70 oder von mehr als 100 oder von mehr als 150 oder von mehr als 200 oder in einem Bereich von 20 bis 200 m oder von 10 bis 150 oder von 20 bis 100, besonders bevorzugt einem Bereich von 30 bis 80 m.

15 Bevorzugt legen mindestens 80 Gew.-% des Sprühgranulats, bezogen auf das Gesamtgewicht des bei der Sprühtrocknung entstehenden Siliziumdioxidgranulats, eine mittlere Flugstrecke von mehr als 20 m zurück, zum Beispiel von mehr als 30 oder von mehr als 50 oder von mehr als 70 oder von mehr als 100 oder von mehr als 150 oder von mehr als 200 oder in einem Bereich von 20 bis 200 m oder von 10 bis 150 oder von 20 bis 100, besonders bevorzugt einem Bereich von 30 bis 80 m.

20 Bevorzugt legen mindestens 90 Gew.-% des Sprühgranulats, bezogen auf das Gesamtgewicht des bei der Sprühtrocknung entstehenden Siliziumdioxidgranulats, eine mittlere Flugstrecke von mehr als 20 m zurück, zum Beispiel von mehr als 30 oder von mehr als 50 oder von mehr als 70 oder von mehr als 100 oder von mehr als 150 oder von mehr als 200 oder in einem Bereich von 20 bis 200 m oder von 10 bis 150 oder von 20 bis 100, besonders bevorzugt einem Bereich von 30 bis 80 m.

### **Rollgranulation**

30 Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform des ersten Gegenstands der Erfindung wird ein Siliziumdioxidgranulat durch Rollgranulieren der Aufschlämmung beinhaltend Siliziumdioxidpulver erhalten.

Das Rollgranulieren erfolgt durch Rühren der Aufschlämmung beinhaltend Siliziumdioxidpulver in Gegenwart eines Gases bei erhöhter Temperatur. Bevorzugt erfolgt das Rollgranulieren in einem mit einem Rührwerkzeug ausgerüsteten Rührbehälter. Bevorzugt rotiert der Rührbehälter gegensinnig zum Rührwerkzeug. Bevorzugt weist 35 der Rührbehälter außerdem einen Einlass, durch den Siliziumdioxidpulver in den Rührbehälter eingetragen werden kann, einen Auslass, durch den Siliziumdioxidgranulat entnommen werden kann, einen Gaseinlass und einen Gasauslass, auf.

Für das Rühren der Aufschlämmung beinhaltend Siliziumdioxidpulver wird bevorzugt ein Stiftwirbler verwendet. 40 Unter einem Stiftwirbler wird ein Rührwerkzeug verstanden, das mit mehreren länglichen Stiften versehen ist,

deren Längsachse jeweils coaxial zur Rotationsachse des Rührwerkzeugs verläuft. Der Bewegungsablauf der Stifte beschreibt bevorzugt koaxiale Kreise um die Rotationsachse.

Bevorzugt wird die Aufschlämmung beinhaltend Siliziumdioxidpulver auf einen pH-Wert von weniger als 7 eingestellt, zum Beispiel auf einen pH-Wert im Bereich von 2 bis 6,5, besonders bevorzugt auf einen pH-Wert in einem Bereich von 4 bis 6. Zum Einstellen des pH-Werts wird bevorzugt eine anorganische Säure verwendet, zum Beispiel eine Säure ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus Salzsäure, Schwefelsäure, Salpetersäure und Phosphorsäure, besonders bevorzugt Salzsäure.

Bevorzugt liegt im Rührbehälter eine Atmosphäre ausgewählt aus Luft, einem Inertgas, mindestens zwei Inertgasen oder eine Kombination von Luft mit mindestens einem Inertgas, bevorzugt mindestens zwei Inertgasen vor. Als Inertgase sind bevorzugt ausgewählt aus der Liste bestehend aus Stickstoff, Helium, Neon, Argon, Krypton und Xenon. Zum Beispiel liegt im Rührbehälter Luft, Stickstoff oder Argon vor, besonders bevorzugt Luft.

Weiter bevorzugt ist die im Rührbehälter vorliegende Atmosphäre Teil eines Gasstroms. Der Gasstrom wird in den Rührbehälter bevorzugt über den Gaseinlass eingeleitet und über den Gasauslass ausgeleitet. Der Gasstrom kann im Rührbehälter weitere Bestandteile aufnehmen. Diese können beim Rollgranulieren aus der Aufschlämmung beinhaltend Siliziumdioxidpulver stammen und in den Gasstrom übergehen.

Bevorzugt wird dem Rührbehälter ein trockener Gasstrom zugeführt. Unter einem „trockenen Gasstrom“ wird ein Gas oder ein Gasgemisch verstanden, dessen relative Feuchte bei der im Rührbehälter eingestellten Temperatur unterhalb des Kondensationspunktes liegt. Das Gas wird bevorzugt auf eine Temperatur in einem Bereich von 50 bis 300°C, zum Beispiel von 80 bis 250°C, besonders bevorzugt von 100 bis 200°C vorgewärmt.

Bevorzugt werden pro 1 kg der eingesetzten Aufschlämmung beinhaltend Siliziumdioxidpulver 10 bis 150 m<sup>3</sup> Gas pro Stunde in den Rührbehälter eingeleitet, zum Beispiel 20 bis 100 m<sup>3</sup> Gas pro Stunde, besonders bevorzugt 30 bis 70 m<sup>3</sup> Gas pro Stunde.

Durch den Gasstrom wird die Aufschlämmung beinhaltend Siliziumdioxidpulver während des Rührens unter Bildung von Siliziumdioxidgranulen getrocknet. Das gebildete Granulat wird der Rührkammer entnommen.

Bevorzugt wird das entnommene Granulat weiter getrocknet. Bevorzugt erfolgt die Trocknung kontinuierlich, zum Beispiel in einem Drehrohrofen. Bevorzugte Temperaturen zur Trocknung liegen in einem Bereich von 80 bis 250°C, zum Beispiel in einem Bereich von 100 bis 200°C, besonders bevorzugt in einem Bereich von 120 bis 180°C.

Kontinuierlich bedeutet im Kontext der vorliegenden Erfindung in Bezug auf ein Verfahren, dass dieses fortlaufend betrieben werden kann. Das bedeutet, dass Zufuhr und Entnahme von am Verfahren beteiligten Stoffen und Materialien beim Durchführen des Verfahrens laufend erfolgen kann. Es ist nicht notwendig, dafür das Verfahren zu unterbrechen.

Kontinuierlich als Attribut eines Gegenstands, z.B. in Bezug auf einen „kontinuierlichen Ofen“, bedeutet, dass dieser Gegenstand so ausgelegt ist, dass ein in ihm erfolgendes Verfahren oder in ihm erfolgender Verfahrensschritt kontinuierlich geführt werden kann.

- 5 Das durch Rollgranulieren erhaltene Granulat kann gesiebt werden. Das Sieben kann vor oder nach dem Trocknen erfolgen. Bevorzugt wird vor dem Trocknen gesiebt. Bevorzugt werden Granulen mit einer Partikelgröße von weniger als 50  $\mu\text{m}$  zum Beispiel mit einer Partikelgröße von weniger als 80  $\mu\text{m}$  besonders bevorzugt mit einer Partikelgröße von weniger als 100  $\mu\text{m}$  ausgesiebt. Weiter bevorzugt werden Granulen mit einer Partikelgröße von mehr als 900  $\mu\text{m}$ , zum Beispiel mit einer Partikelgröße von mehr als 700  $\mu\text{m}$ , besonders bevorzugt mit einer Partikelgröße von mehr als 500  $\mu\text{m}$  ausgesiebt. Das Aussieben größerer Partikel kann prinzipiell nach allen dem Fachmann bekannten und zu diesem Zweck geeigneten Verfahren erfolgen. Bevorzugt erfolgt das Absieben größerer Partikel mittels einer Rüttelrinne.

Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform ist das Rollgranulieren durch mindestens eines, zum Beispiel zwei oder drei, besonders bevorzugt aller der folgenden Merkmale gekennzeichnet:

- 15 [a] das Granulieren erfolgt in einem rotierenden Rührbehälter;  
[b] das Granulieren erfolgt unter einem Gasstrom von 10 bis 150 kg Gas pro Stunde und pro 1 kg Aufschlämmung beinhaltend Siliziumdioxidpulver;  
[c] die Gastemperatur beträgt beim Einleiten 40 bis 200°C;  
20 [d] Granulen mit einer Partikelgröße von weniger als 100  $\mu\text{m}$  und von mehr als 500  $\mu\text{m}$  werden abgesiebt;  
[e] die gebildeten Granulen weisen eine Restfeuchte von 15 bis 30 Gew.-% auf;  
[f] die gebildeten Granulen werden bei 80 bis 250°C getrocknet, bevorzugt in einem kontinuierlichen Trockenrohr, besonders bevorzugt bis zu einer Restfeuchte von weniger als 1 Gew.-%.

25 Bevorzugt wird das durch Granulieren, bevorzugt durch Sprüh- oder Rollgranulieren, erhaltene Siliziumdioxidgranulat, auch als Siliziumdioxidgranulat I bezeichnet, behandelt, bevor es zu Quarzglaskörpern verarbeitet wird. Diese Vorbehandlung kann verschiedenen Zwecken dienen, die entweder die Verarbeitung zu Quarzglaskörpern erleichtern oder die Eigenschaften der resultierenden Quarzglaskörper beeinflussen. Zum Beispiel kann das Siliziumdioxidgranulat I verdichtet, gereinigt, oberflächenmodifiziert oder getrocknet werden.

Bevorzugt kann das Siliziumdioxidgranulat I einer thermischen, mechanischen oder chemischen Behandlung oder einer Kombination aus zwei oder mehr Behandlungen unterworfen werden, wobei ein Siliziumdioxidgranulat II erhalten wird.

35 **chemisch**  
Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform des ersten Gegenstands der Erfindung weist das Siliziumdioxidgranulat I einen Kohlenstoffgehalt  $w_{\text{C(I)}}$  auf. Der Kohlenstoffgehalt  $w_{\text{C(I)}}$  beträgt bevorzugt weniger als 50 ppm, zum Beispiel von weniger als 40 ppm oder von weniger 30 ppm, besonders bevorzugt in einem Bereich von 1 ppb bis 40 20 ppm, jeweils auf das Gesamtgewicht des Siliziumdioxidgranulats I bezogen.

Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform des ersten Gegenstands der Erfindung beinhaltet das Siliziumdioxidgranulat I mindestens zwei Teilchen. Bevorzugt können die mindestens zwei Teilchen eine Relativbewegung zueinander ausführen. Als Maßnahmen zum Erzeugen der Relativbewegung kommen prinzipiell alle dem Fachmann bekannten und geeignet erscheinenden Maßnahmen in Betracht. Insbesondere bevorzugt ist ein Mischen.

- 5 Ein Mischen kann prinzipiell in beliebiger Weise durchgeführt werden. Bevorzugt wird hierfür ein Durchlaufofen ausgewählt. Dementsprechend können die mindestens zwei Teilchen bevorzugt eine Relativbewegung zueinander ausführen, indem sie in einem Durchlaufofen, zum Beispiel einem Drehrohrföfen, bewegt werden.

- 10 Unter Durchlauföfen werden Öfen verstanden, bei denen das Be- und Entladen des Ofens, die sogenannte Chargierung, kontinuierlich erfolgt. Beispiele für Durchlauföfen sind Drehrohröfen, Rollenöfen, Förderbandöfen, Durchfahröfen, Durchstoßöfen. Bevorzugt werden zur Behandlung des Siliziumdioxidgranulats I Drehrohröfen verwendet.

- 15 Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform des ersten Gegenstands der Erfindung wird das Siliziumdioxidgranulat I mit einem Reaktanden unter Erhalt eines Siliziumdioxidgranulats II behandelt. Das Behandeln wird durchgeführt, um die Konzentration bestimmter Stoffe im Siliziumdioxidgranulat zu verändern. Das Siliziumdioxidgranulat I kann Verunreinigungen oder bestimmte Funktionalitäten aufweisen, deren Anteil verringert werden soll, wie zum Beispiel: OH-Gruppen, kohlenstoffhaltige Verbindungen, Übergangsmetalle, Alkalimetalle und Erdalkalimetalle. Die Verunreinigungen und Funktionalitäten können aus dem Ausgangsmaterial stammen oder im Laufe des
- 20 Verfahrens eingetragen werden. Die Behandlung des Siliziumdioxidgranulats I kann verschiedenen Zwecken dienen. Zum Beispiel kann der Einsatz von behandeltem Siliziumdioxidgranulat I, also Siliziumdioxidgranulat II, die Verarbeitung des Siliziumdioxidgranulats zu Quarzglaskörpern vereinfachen. Ferner können durch diese Auswahl die Eigenschaften der resultierenden Quarzglaskörper angepasst sein. Zum Beispiel kann das Siliziumdioxidgranulat I gereinigt oder oberflächenmodifiziert werden. Die Behandlung des Siliziumdioxidgranulats I
- 25 kann also eingesetzt werden, um die Eigenschaften der resultierenden Quarzglaskörper zu verbessern.

- Bevorzugt eignen sich als Reaktand ein Gas oder eine Kombination mehrerer Gase. Diese wird auch als Gasgemisch bezeichnet. Prinzipiell können alle dem Fachmann bekannten Gase eingesetzt werden, die für die genannte Behandlung bekannt sind und geeignet erscheinen. Bevorzugt wird ein Gas ausgewählt aus der Gruppe bestehend
- 30 aus HCl, Cl<sub>2</sub>, F<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>F<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>, HClO<sub>4</sub>, Luft, Inertgas, z.B. N<sub>2</sub>, He, Ne, Ar, Kr, oder Kombinationen aus zwei oder mehr davon eingesetzt. Bevorzugt erfolgt die Behandlung in Anwesenheit eines Gases oder einer Kombination aus zwei oder mehr als Gasen. Bevorzugt erfolgt die Behandlung in einem Gasgegenstrom, oder in einem Gasgleichstrom.

- 35 Bevorzugt ist der Reaktand ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus HCl, Cl<sub>2</sub>, F<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> oder Kombinationen von zwei oder mehr davon. Bevorzugt werden Gemische von zwei oder mehr der zuvor genannten Gase zum Behandeln von Siliziumdioxidgranulat I verwendet. Durch die Anwesenheit von F, Cl oder beiden können Metalle, die als Verunreinigungen im Siliziumdioxidgranulat I enthalten sind, wie zum Beispiel Übergangsmetalle, Alkalimetalle und Erdalkalimetalle, entfernt werden. Dabei können die vorgenannten Metalle mit Bestandteilen
- 40 des Gasgemischs unter den Verfahrensbedingungen gasförmige Verbindungen eingehen, die anschließend ausge-

tragen werden und so nicht mehr im Granulat vorliegen. Weiter bevorzugt kann der OH-Gehalt in dem Siliziumdioxidgranulat I durch die Behandlung des Siliziumdioxidgranulats I mit diesen Gasen verringert werden.

Bevorzugt wird als Reaktand ein Gasgemisch von HCl und Cl<sub>2</sub> eingesetzt. Bevorzugt weist das Gasgemisch einen Gehalt an HCl in einem Bereich von 1 bis 30 Vol.-%, beispielsweise in einem Bereich von 2 bis 15 Vol.-%, besonders bevorzugt in einem Bereich von 3 bis 10 Vol.-% auf. Ebenfalls bevorzugt weist das Gasgemisch einen Gehalt an Cl<sub>2</sub> in einem Bereich von 20 bis 70 Vol.-%, beispielsweise in einem Bereich von 25 bis 65 Vol.-%, besonders bevorzugt in einem Bereich von 30 bis 60 Vol.-% auf. Der Rest zu 100 Vol.-% kann durch ein oder mehrere Inertgase, z.B. N<sub>2</sub>, He, Ne, Ar, Kr, oder durch Luft ergänzt werden. Bevorzugt liegt der Anteil an Inertgas in Reaktanden in einem Bereich von 0 bis weniger als 50 Vol.-%, zum Beispiel in einem Bereich von 1 bis 40 Vol.-% oder von 5 bis 30 Vol.-%, besonders bevorzugt in einem Bereich von 10 bis 20 Vol.-%, jeweils bezogen auf das Gesamtvolumen des Reaktanden.

O<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>F<sub>2</sub>, oder Mischungen davon mit Cl<sub>2</sub> werden bevorzugt zur Reinigung von Siliziumdioxidgranulat I verwendet, das aus einem Siloxan oder eines Gemischs mehrerer Siloxane hergestellt wurde.

Der Reaktand in Form eines Gases oder Gasgemisches wird bevorzugt als Gasstrom oder als Teil eines Gasstroms mit einem Durchsatz in einem Bereich von 50 bis 2000 L/h, beispielsweise in einem Bereich von 100 bis 1000 L/h, besonders bevorzugt in einem Bereich von 200 bis 500 L/h mit dem Siliziumdioxidgranulat kontaktiert. Eine bevorzugte Ausgestaltung des Kontaktierens ist ein Kontakt von Gasstrom und Siliziumdioxidgranulat in einem Durchlaufofen, zum Beispiel einem Drehrohrföfen. Eine andere bevorzugte Ausgestaltung des Kontaktierens ist ein Wirbelschichtverfahren (fluidized bed).

Durch das Behandeln des Siliziumdioxidgranulats I mit dem Reaktanden wird ein Siliziumdioxidgranulat II mit einem Kohlenstoffgehalt  $w_{C(2)}$  erhalten. Der Kohlenstoffgehalt  $w_{C(2)}$  des Siliziumdioxidgranulats II ist kleiner als der Kohlenstoffgehalt  $w_{C(1)}$  des Siliziumdioxidgranulats I, bezogen auf das Gesamtgewicht des jeweiligen Siliziumdioxidgranulats. Bevorzugt ist  $w_{C(2)}$  um 0,5 bis 99 %, beispielsweise um 20 bis 80 % oder 50 bis 95 %, besonders bevorzugt um 60 bis 99 % kleiner als  $w_{C(1)}$ .

### **thermisch**

Bevorzugt wird das Siliziumdioxidgranulat I zusätzlich einer thermischen oder mechanischen Behandlung oder einer Kombination dieser Behandlungen unterworfen. Eine oder mehrere dieser zusätzlichen Behandlungen können vor oder während der Behandlung mit dem Reaktanden erfolgen. Alternativ oder ergänzend kann die zusätzlich Behandlung auch am Siliziumdioxidgranulat II durchgeführt werden. Die im Folgenden verwendete allgemeine Bezeichnung „Siliziumdioxidgranulat“ beinhaltet die Alternativen „Siliziumdioxidgranulat I“ und „Siliziumdioxidgranulat II“. Ebenso ist es möglich, die nachfolgend beschriebenen Behandlungen sowohl am „Siliziumdioxidgranulat I“, als auch am behandelten Siliziumdioxidgranulat I, dem „Siliziumdioxidgranulat II“, durchzuführen.

Die Behandlung des Siliziumdioxidgranulats kann verschiedenen Zwecken dienen. Zum Beispiel erleichtert diese Behandlung die Verarbeitung des Siliziumdioxidgranulats zu Quarzglaskörpern. Die Behandlung kann auch die

Eigenschaften der resultierenden Quarzglaskörper beeinflussen. Zum Beispiel kann das Siliziumdioxidgranulat verdichtet, gereinigt, oberflächenmodifiziert oder getrocknet werden. Dabei kann sich die spezifische Oberfläche (BET) verringern. Ebenso können die Schüttdichte und die mittlere Partikelgröße aufgrund von Agglomerationen von Siliziumdioxidpartikeln zunehmen. Die thermische Behandlung kann dynamisch oder statisch durchgeführt werden.

Für die dynamisch thermische Behandlung eignen sich prinzipiell alle Öfen, in denen das Siliziumdioxidgranulat thermisch behandelt und dabei bewegt werden kann. Für die dynamisch thermische Behandlung werden bevorzugt Durchlauföfen verwendet.

Eine bevorzugte mittlere Verweilzeit des Siliziumdioxidgranulats bei der dynamisch thermischen Behandlung ist mengenabhängig. Bevorzugt liegt die mittlere Verweilzeit des Siliziumdioxidgranulats bei der dynamisch thermischen Behandlung im Bereich von 10 bis 180 min, zum Beispiel im Bereich von 20 bis 120 min oder von 30 bis 90 min. Besonders bevorzugt liegt die mittlere Verweilzeit des Siliziumdioxidgranulats bei der dynamisch thermischen Behandlung im Bereich von 30 bis 90 min.

Im Fall eines kontinuierlichen Verfahrens gilt zur Bestimmung der Verweilzeit als eine Charge eine definierte Portion eines Stroms an Siliziumdioxidgranulat, z.B. ein Gramm, ein Kilogramm oder eine Tonne. Beginn und Ende des Verweilens sind hier durch Ein- und Ausführen aus dem kontinuierlichen Ofenbetrieb bestimmt.

Bevorzugt liegt der Durchsatz des Siliziumdioxidgranulats bei einem kontinuierlichen Verfahren zur dynamisch thermischen Behandlung im Bereich von 1 bis 50 kg/h, zum Beispiel im Bereich von 5 bis 40 kg/h oder von 8 bis 30 kg/h. Besonders bevorzugt liegt der Durchsatz hier im Bereich von 10 bis 20 kg/h.

Im Falle eines diskontinuierlichen Verfahrens zur dynamisch thermischen Behandlung ergibt sich die Behandlungszeit aus dem Zeitraum zwischen einem Beladen und anschließendem Entladen des Ofens.

Im Falle eines diskontinuierlichen Verfahrens zur dynamisch thermischen Behandlung beträgt der Durchsatz in einem Bereich von 1 bis 50 kg/h, zum Beispiel im Bereich von 5 bis 40 kg/h oder von 8 bis 30 kg/h. Besonders bevorzugt beträgt der Durchsatz im Bereich von 10 bis 20 kg/h. Der Durchsatz kann durch eine Charge einer bestimmten Menge, die eine Stunde lang behandelt wird, erreicht werden. Gemäß einer anderen Ausführungsform kann der Durchsatz erreicht werden durch eine Anzahl von Chargen pro Stunde, wobei zum Beispiel die Menge einer Charge dem Durchsatz pro Stunde durch die Anzahl der Chargen entspricht. Die Behandlungszeit entspricht dann dem Bruchteil einer Stunde, der sich aus 60 Minuten durch die Anzahl der Chargen pro Stunde ergibt.

Bevorzugt erfolgt die dynamisch thermische Behandlung des Siliziumdioxidgranulats bei einer Ofentemperatur von mindestens 500°C, zum Beispiel im Bereich von 510 bis 1700°C oder von 550 bis 1500°C oder von 580 bis 1300°C, besonders bevorzugt im Bereich von 600 bis 1200°C.

In der Regel hat der Ofen in der Ofenkammer die angegebene Temperatur. Bevorzugt weicht diese Temperatur um weniger als 10 % von der angegebenen Temperatur nach oben oder unten ab, bezogen auf die gesamte Be-

handlungszeit und die gesamte Länge des Ofens sowohl zu jedem Zeitpunkt der Behandlung als auch an jeder Stelle des Ofens.

Alternativ kann insbesondere das kontinuierliche Verfahren einer dynamisch thermischen Behandlung des Siliziumdioxidgranulats bei unterschiedlichen Ofentemperaturen erfolgen. Beispielsweise kann der Ofen über die Behandlungszeit eine konstante Temperatur aufweisen, wobei die Temperatur über die Länge des Ofens in Abschnitten variiert. Solche Abschnitte können gleich lang oder unterschiedlich lang sein. Bevorzugt ist in diesem Fall eine vom Eingang des Ofens zum Ausgang des Ofens hin zunehmende Temperatur. Bevorzugt ist die Temperatur am Eingang um wenigstens 100°C niedriger als am Ausgang, zum Beispiel 150°C niedriger oder 200°C niedriger oder 300°C niedriger oder 400°C niedriger. Weiter bevorzugt beträgt die Temperatur am Ausgang bevorzugt mindestens 500°C, zum Beispiel im Bereich von 510 bis 1700°C oder von 550 bis 1500°C oder von 580 bis 1300°C, besonders bevorzugt im Bereich von 600 bis 1200°C. Weiter bevorzugt beträgt die Temperatur am Eingang bevorzugt mindestens 300°C, zum Beispiel von 400 bis 1000°C oder von 450 bis 900°C oder von 500 bis 800°C oder von 550 bis 750°C, besonders bevorzugt von 600 bis 700°C. Weiter kann jeder der genannten Temperaturbereiche am Ofeneingang mit jedem der genannten Temperaturbereiche am Ofenausgang kombiniert werden. Bevorzugte Kombinationen von Ofeneingangs- und Ofenausgangstemperaturbereichen sind:

Bereich Ofeneingangstemperatur [°C]	Bereich Ofenausgangstemperatur [°C]
400 – 1000	510 – 1300
450 – 900	550 – 1260
480 – 850	580 – 1200
500 – 800	600 – 1100
530 – 750	630 – 1050

Für die statisch thermische Behandlung des Siliziumdioxidgranulats werden bevorzugt in einem Ofen angeordnete Tiegel verwendet. Als Tiegel eignen sich Sintertiegel oder Blechtiegel. Bevorzugt sind Walzblechtiegel aus mehreren, miteinander vernieteten Platten. Als Tiegelmateriale sind beispielsweise Refraktärmetalle, insbesondere Wolfram, Molybdän und Tantal. Die Tiegel können ferner aus Graphit gebildet sein oder im Falle der Tiegel aus Refraktärmetallen mit Graphitfolie ausgeschlagen sein. Weiter bevorzugt können die Tiegel aus Siliziumdioxid gebildet sein. Besonders bevorzugt werden Siliziumdioxidtiegel eingesetzt.

Die mittlere Verweilzeit des Siliziumdioxidgranulats bei der statisch thermischen Behandlung ist mengenabhängig. Bevorzugt liegt die mittlere Verweilzeit des Siliziumdioxidgranulats bei der statisch thermischen Behandlung bei einer Menge von 20 kg Siliziumdioxidgranulat I im Bereich von 10 bis 180 min, zum Beispiel im Bereich von 20 bis 120 min, besonders bevorzugt im Bereich von 30 bis 90 min.

Bevorzugt erfolgt die statisch thermische Behandlung des Siliziumdioxidgranulats bei einer Ofentemperatur von mindestens 800°C, zum Beispiel im Bereich von 900 bis 1700°C oder von 950 bis 1600°C oder von 1000 bis 1500°C oder von 1050 bis 1400°C, besonders bevorzugt im Bereich von 1100 bis 1300°C.



Bevorzugt erfolgt die statisch thermische Behandlung des Siliziumdioxidgranulats I bei konstanter Ofentemperatur. Die statisch thermische Behandlung kann auch bei einer variierenden Ofentemperatur erfolgen. Bevorzugt nimmt in diesem Fall die Temperatur im Laufe der Behandlung zu, wobei die Temperatur zu Beginn der Behandlung um wenigstens 50°C niedriger ist als am Ende, zum Beispiel 70°C niedriger oder 80°C niedriger oder 100°C niedriger oder 110°C niedriger, und wobei die Temperatur am Ende bevorzugt mindestens 800°C, zum Beispiel im Bereich von 900 bis 1700°C oder von 950 bis 1600°C oder von 1000 bis 1500°C oder von 1050 bis 1400°C, besonders bevorzugt im Bereich von 1100 bis 1300°C beträgt.

#### **mechanisch**

Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform kann das Siliziumdioxidgranulat I mechanisch behandelt werden. Die mechanische Behandlung kann zum Erhöhen der Schüttdichte durchgeführt werden. Die mechanische Behandlung kann mit der zuvor beschriebenen thermischen Behandlung kombiniert werden. Mittels einer mechanischen Behandlung kann vermieden werden, dass die Agglomerate im Siliziumdioxidgranulat und damit die mittlere Partikelgröße der einzelnen, behandelten Siliziumdioxidgranulen im Siliziumdioxidgranulat zu groß werden. Eine Vergrößerung der Agglomerate kann die Weiterverarbeitung erschweren oder nachteilige Auswirkungen auf die Eigenschaften der mit dem erfindungsgemäßen Verfahren hergestellten Quarzglaskörper haben, oder eine Kombination beider Effekte bedeuten. Eine mechanische Behandlung des Siliziumdioxidgranulats fördert zudem einen gleichmäßigen Kontakt der Oberflächen der einzelnen Siliziumdioxidgranulen mit dem Gas oder den Gasen. Dies wird insbesondere bei einer Kombination aus gleichzeitiger mechanischer und chemischer Behandlung mit einem oder mehreren Gasen erreicht. Dadurch kann die Wirkung der chemischen Behandlung verbessert werden.

Die mechanische Behandlung des Siliziumdioxidgranulats kann durch Bewegen von zwei oder mehr Siliziumdioxidgranulen in einer Relativbewegung zueinander erfolgen, beispielsweise durch das Drehen des Rohrs eines Drehrohrofens.

Bevorzugt wird das Siliziumdioxidgranulat I chemisch, thermisch und mechanisch behandelt. Besonders erfolgt eine simultane chemische, thermische und mechanische Behandlung des Siliziumdioxidgranulats I.

Bei der chemischen Behandlung wird der Gehalt an Verunreinigungen im Siliziumdioxidgranulat I verringert. Dazu kann das Siliziumdioxidgranulat I in einem Drehrohrföfen bei erhöhter Temperatur unter chlor- und sauerstoffhaltiger Atmosphäre behandelt werden. Im Siliziumdioxidgranulat I vorliegendes Wasser verdampft, organische Materialien reagieren zu CO und CO<sub>2</sub>. Metallverunreinigungen können zu flüchtigen, chlorhaltigen Verbindungen konvertiert werden.

Bevorzugt wird das Siliziumdioxidgranulat I in einer chlor- und sauerstoffhaltigen Atmosphäre in einem Drehrohrföfen bei einer Temperatur von mindestens 500°C, bevorzugt in einem Temperaturbereich von 550 bis 1300°C oder von 600 bis 1260°C oder von 650 bis 1200°C oder von 700 bis 1000°C, besonders bevorzugt in einem Temperaturbereich von 700 bis 900°C behandelt. Die chlorhaltige Atmosphäre enthält beispielsweise HCl oder Cl<sub>2</sub> oder eine Kombination aus beiden. Diese Behandlung bewirkt eine Reduzierung des Kohlenstoffgehalts.

Ferner werden bevorzugt Alkali- und Eisenverunreinigungen reduziert. Bevorzugt wird zudem eine Verringerung der Anzahl an OH-Gruppen erreicht. Bei Temperaturen unterhalb von 700°C können sich lange Behandlungsdauern ergeben, bei Temperaturen oberhalb von 1100°C besteht die Gefahr, dass sich Poren des Granulats unter Einschluss von Chlor oder gasförmigen Chlorverbindungen schließen.

5

Bevorzugt ist es auch möglich, mehrere chemische Behandlungsschritte bei jeweils gleichzeitiger thermischer und mechanischer Behandlung nacheinander durchzuführen. Beispielsweise kann das Siliziumdioxidgranulat I erst in einer chlorhaltigen Atmosphäre und anschließend in einer sauerstoffhaltigen Atmosphäre behandelt werden. Daraus resultierende niedrige Konzentrationen an Kohlenstoff, Hydroxylgruppen und Chlor erleichtern das Einschmelzen des Siliziumdioxidgranulats II.

10

Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform ist Schritt II.2) durch mindestens eines, zum Beispiel durch mindestens zwei oder mindestens drei, besonders bevorzugt durch eine Kombination von allen der folgenden Merkmale gekennzeichnet:

15

- N1) der Reaktand beinhaltet HCl, Cl<sub>2</sub> oder eine Kombination davon;
- N2) die Behandlung wird in einem Drehrohrofen durchgeführt;
- N3) Die Behandlung wird bei einer Temperatur in einem Bereich von 600 bis 900°C durchgeführt;
- N4) der Reaktand bildet einen Gegenstrom;
- N5) der Reaktand weist einen Gasstrom in einem Bereich von 50 bis 2000 L/h, bevorzugt 100 bis 1000 L/h, besonders bevorzugt 200 bis 500 L/h auf;
- N6) der Reaktand weist einen Volumenanteil an Inertgas in einem Bereich von 0 bis weniger als 50 Vol.-%.

20

Bevorzugt weist das Siliziumdioxidgranulat I einen Partikeldurchmesser auf, der größer ist, als der Partikeldurchmesser des Siliziumdioxidpulvers. Bevorzugt ist der Partikeldurchmesser des Siliziumdioxidgranulats I bis zu 300 mal größer als der Partikeldurchmesser des Siliziumdioxidpulvers, zum Beispiel bis zu 250 mal größer oder bis zu 200 mal größer oder bis zu 150 mal größer oder bis zu 100 mal größer oder bis zu 50 mal größer oder bis zu 20 mal größer oder bis zu 10 mal größer, besonders bevorzugt 2 bis 5 mal größer.

25

Das so erhaltene Siliziumdioxidgranulat wird auch als Siliziumdioxidgranulat II bezeichnet. Besonders bevorzugt wird das Siliziumdioxidgranulat II aus dem Siliziumdioxidgranulat I in einem Drehrohrofen mittels einer Kombination aus thermischer, mechanischer und chemischer Behandlung erhalten.

30

Das in Schritt i.) bereitgestellte Siliziumdioxidgranulat ist bevorzugt ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus Siliziumdioxidgranulat I, Siliziumdioxidgranulat II und einer Kombination davon.

35

Unter „Siliziumdioxidgranulat I“ wird ein Granulat aus Siliziumdioxid verstanden, dass durch Granulation von Siliziumdioxidpulver entsteht, welches bei der Pyrolyse von Siliziumverbindungen in einer Brenngasflamme erhalten wurde. Bevorzugt als Brenngas sind Knallgas, Erdgas oder Methangas, besonders bevorzugt ist Knallgas.

40

Unter „Siliziumdioxidgranulat II“ wird ein Granulat aus Siliziumdioxid verstanden, dass durch Nachbehandlung des Siliziumdioxidgranulats I entsteht. Als Nachbehandlung kommen chemische, thermische und/oder mechanische Behandlungen in Betracht. Hierzu wird ausführlich im Rahmen der Beschreibung des Bereitstellens des Siliziumdioxidgranulats (Verfahrensschritts II. des ersten Gegenstands der Erfindung) ausgeführt.

5

Besonders bevorzugt ist das in Schritt i.) bereitgestellte Siliziumdioxidgranulat das Siliziumdioxidgranulat I. Das Siliziumdioxidgranulat I weist folgende Merkmale auf:

- [A] eine BET-Oberfläche im Bereich von 20 bis 50 m<sup>2</sup>/g, zum Beispiel in einem Bereich von 20 bis 40 m<sup>2</sup>/g; besonders bevorzugt in einem Bereich von 25 bis 35 m<sup>2</sup>/g; dabei beläuft sich bevorzugt der Mikroporenanteil auf eine BET-Oberfläche in einem Bereich von 4 bis 5 m<sup>2</sup>/g; zum Beispiel in einem Bereich von 4,1 bis 4,9 m<sup>2</sup>/g; besonders bevorzugt in einem Bereich von 4,2 bis 4,8 m<sup>2</sup>/g; und
- [B] eine mittlere Partikelgröße in einem Bereich von 180 bis 300 µm.

10

15

Bevorzugt ist das Siliziumdioxidgranulat I gekennzeichnet durch mindestens eines, zum Beispiel durch mindestens zwei oder mindestens drei oder mindestens vier, besonders bevorzugt durch mindestens fünf der folgenden Merkmale:

20

25

30

35

40

- [C] eine Schüttdichte in einem Bereich von 0,5 bis 1,2 g/cm<sup>3</sup>, zum Beispiel in einem Bereich von 0,6 bis 1,1 g/cm<sup>3</sup>, besonders bevorzugt in einem Bereich von 0,7 bis 1,0 g/cm<sup>3</sup>;
- [D] einen Kohlenstoffgehalt von weniger als 50 ppm, zum Beispiel weniger als 40 ppm oder weniger als 30 ppm oder weniger als 20 ppm oder weniger als 10 ppm, besonders bevorzugt in einem Bereich von 1 ppb bis 5 ppm;
- [E] einen Aluminiumgehalt von weniger als 200 ppb, bevorzugt von weniger als 100 ppb, zum Beispiel von weniger als 50 ppb oder von 1 bis 200 ppb oder von 15 bis 100 ppb, besonders bevorzugt in einem Bereich von 1 bis 50 ppb auf.
- [F] eine Stampfdichte in einem Bereich von 0,5 bis 1,2 g/cm<sup>3</sup>, zum Beispiel in einem Bereich von 0,6 bis 1,1 g/cm<sup>3</sup>, besonders bevorzugt in einem Bereich von 0,75 bis 1,0 g/cm<sup>3</sup>;
- [G] ein Porenvolumen in einem Bereich von 0,1 bis 1,5 mL/g, zum Beispiel in einem Bereich von 0,15 bis 1,1 mL/g; besonders bevorzugt in einem Bereich von 0,2 bis 0,8 mL/g,
- [H] einen Chlorgehalt von weniger als 200 ppm, bevorzugt von weniger als 150 ppm, zum Beispiel weniger als 100 ppm, oder von weniger als 50 ppm, oder von weniger als 1 ppm, oder von weniger als 500 ppb, oder von weniger als 200 ppb, oder in einem Bereich von 1 ppb bis weniger als 200 ppm, oder von 1 ppb bis 100 ppm, oder von 1 ppb bis 1 ppm, oder von 10 ppb bis 500 ppb, oder von 10 ppb bis 200 ppb, besonders bevorzugt von 1 ppb bis 80 ppb;
- [I] Metallgehalt von Metallen, die von Aluminium verschieden sind, von weniger als 1000 ppb, bevorzugt in einem Bereich von 1 bis 900 ppb, zum Beispiel in einem Bereich von 1 bis 700 ppb, besonders bevorzugt in einem Bereich von 1 bis 500 ppb;
- [J] eine Restfeuchte von weniger als 10 Gew.-%, bevorzugt in einem Bereich von 0,01 Gew.-% bis 5 Gew.-%, zum Beispiel von 0,02 bis 1 Gew.-%, besonders bevorzugt von 0,03 bis 0,5 Gew.-%; wobei die Gew.-%, ppm und ppb jeweils auf das Gesamtgewicht des Siliziumdioxidgranulats I bezogen sind.

Unter dem OH-Gehalt, auch Hydroxygruppengehalt, wird der Gehalt an OH-Gruppen in einem Material, zum Beispiel in Siliziumdioxidpulver, in Siliziumdioxidgranulat oder in einem Quarzglaskörper, verstanden. Der Gehalt an OH-Gruppen wird spektroskopisch nach im Infrarot durch Vergleich der ersten und der dritten OH-Bande bestimmt.

5

Unter dem Chlorgehalt wird der Gehalt an elementarem Chlor oder Chlorid-Ionen in dem Siliziumdioxidgranulat, dem Siliziumdioxidpulver oder dem Quarzglaskörper verstanden.

Unter dem Aluminiumgehalt wird der Gehalt an elementarem Aluminium oder Aluminium-Ionen in dem Siliziumdioxidgranulat, dem Siliziumdioxidpulver oder dem Quarzglaskörper verstanden.

10

Bevorzugt weist das Siliziumdioxidgranulat I einen Mikroporenanteil in einem Bereich von 4 bis 5 m<sup>2</sup>/g auf; zum Beispiel in einem Bereich von 4,1 bis 4,9 m<sup>2</sup>/g; besonders bevorzugt in einem Bereich von 4,2 bis 4,8 m<sup>2</sup>/g.

Das Siliziumdioxidgranulat I weist bevorzugt eine Dichte in einem Bereich von 2,1 bis 2,3 g/cm<sup>3</sup>, besonders bevorzugt in einem Bereich von 2,18 bis 2,22 g/cm<sup>3</sup> auf.

15

Das Siliziumdioxidgranulat I weist bevorzugt eine mittlere Partikelgröße in einem Bereich von 180 bis 300 µm, zum Beispiel in einem Bereich von 220 bis 280 µm, besonders bevorzugt in einem Bereich von 230 bis 270 µm auf.

20

Das Siliziumdioxidgranulat I weist bevorzugt eine Partikelgröße D<sub>50</sub> in einem Bereich von 150 bis 300 µm, zum Beispiel in einem Bereich von 180 bis 280 µm, besonders bevorzugt in einem Bereich von 220 bis 270 µm. Weiterhin bevorzugt weist das Siliziumdioxidgranulat I eine Partikelgröße D<sub>10</sub> in einem Bereich von 50 bis 150 µm auf, zum Beispiel in einem Bereich von 80 bis 150 µm, besonders bevorzugt in einem Bereich von 100 bis 150 µm auf. Weiterhin bevorzugt weist das Siliziumdioxidgranulat I eine Partikelgröße D<sub>90</sub> in einem Bereich von 250 bis 620 µm, zum Beispiel in einem Bereich von 280 bis 550 µm, besonders bevorzugt in einem Bereich von 300 bis 450 µm auf.

25

Das Siliziumdioxidgranulat I weist bevorzugt die Merkmalskombination [A]/[B]/[C] oder [A]/[B]/[E] oder [A]/[B]/[G] auf, weiter bevorzugt die Merkmalskombination [A]/[B]/[C]/[E] oder [A]/[B]/[C]/[G] oder [A]/[B]/[E]/[G], besonders bevorzugt die Merkmalskombination [A]/[B]/[C]/[E]/[G].

30

Das Siliziumdioxidgranulat I weist bevorzugt die Merkmalskombination [A]/[B]/[C] auf, wobei die BET-Oberfläche in einem Bereich von 20 bis 40 m<sup>2</sup>/g, die mittlere Partikelgröße in einem Bereich von 180 bis 300 µm und die Schüttdichte in einem Bereich von 0,6 bis 1,1 g/mL liegt.

35

Das Siliziumdioxidgranulat I weist bevorzugt die Merkmalskombination [A]/[B]/[E] auf, wobei die BET-Oberfläche in einem Bereich von 20 bis 40 m<sup>2</sup>/g, die mittlere Partikelgröße in einem Bereich von 180 bis 300 µm und der Aluminiumgehalt in einem Bereich von 1 bis 50 ppb liegt.

40

Das Siliziumdioxidgranulat I weist bevorzugt die Merkmalskombination [A]/[B]/[G] auf, wobei die BET-Oberfläche in einem Bereich von 20 bis 40 m<sup>2</sup>/g, die mittlere Partikelgröße in einem Bereich von 180 bis 300 µm und das Porenvolumen in einem Bereich von 0,2 bis 0,8 mL/g liegt.

- 5 Das Siliziumdioxidgranulat I weist bevorzugt die Merkmalskombination [A]/[B]/[C]/[E] auf, wobei die BET-Oberfläche in einem Bereich von 20 bis 40 m<sup>2</sup>/g, die mittlere Partikelgröße in einem Bereich von 180 bis 300 µm, die Schüttdichte in einem Bereich von 0,6 bis 1,1 g/mL und der Aluminiumgehalt in einem Bereich von 1 bis 50 ppb liegt.
- 10 Das Siliziumdioxidgranulat I weist bevorzugt die Merkmalskombination [A]/[B]/[C]/[G] auf, wobei die BET-Oberfläche in einem Bereich von 20 bis 40 m<sup>2</sup>/g, die mittlere Partikelgröße in einem Bereich von 180 bis 300 µm, die Schüttdichte in einem Bereich von 0,6 bis 1,1 g/mL und das Porenvolumen in einem Bereich von 0,2 bis 0,8 mL/g liegt.
- 15 Das Siliziumdioxidgranulat I weist bevorzugt die Merkmalskombination [A]/[B]/[E]/[G] auf, wobei die BET-Oberfläche in einem Bereich von 20 bis 40 m<sup>2</sup>/g, die mittlere Partikelgröße in einem Bereich von 180 bis 300 µm, der Aluminiumgehalt in einem Bereich von 1 bis 50 ppb und das Porenvolumen in einem Bereich von 0,2 bis 0,8 mL/g liegt.
- 20 Das Siliziumdioxidgranulat I weist bevorzugt die Merkmalskombination [A]/[B]/[C]/[E]/[G] auf, wobei die BET-Oberfläche in einem Bereich von 20 bis 40 m<sup>2</sup>/g, die mittlere Partikelgröße in einem Bereich von 180 bis 300 µm, die Schüttdichte in einem Bereich von 0,6 bis 1,1 g/mL, der Aluminiumgehalt in einem Bereich von 1 bis 50 ppb und das Porenvolumen in einem Bereich von 0,2 bis 0,8 mL/g liegt.

- 25 Unter Partikelgröße wird die Größe der aus den Primärpartikeln zusammengelagerten Teilchen verstanden, die in einem Siliziumdioxidpulver, in einer Aufschlämmung oder in einem Siliziumdioxidgranulat vorliegen. Unter der mittleren Partikelgröße wird der arithmetische Mittelwert aller Partikelgrößen des genannten Stoffes verstanden. Der D<sub>50</sub>-Wert gibt an, dass 50 % der Partikel, bezogen auf die gesamte Teilchenzahl, kleiner als der angegebene Wert sind. Der D<sub>10</sub>-Wert gibt an, dass 10 % der Partikel, bezogen auf die gesamte Teilchenzahl, kleiner als der angegebene Wert sind. Der D<sub>90</sub>-Wert gibt an, dass 90 % der Partikel, bezogen auf die gesamte Teilchenzahl, kleiner als der angegebene Wert sind. Die Partikelgröße wird mittels dynamischem Bildanalyseverfahren nach ISO 13322-2:2006-11 bestimmt.

- 35 Weiter besonders bevorzugt ist das in Schritt i.) bereitgestellte Siliziumdioxidgranulat das Siliziumdioxidgranulat II. Das Siliziumdioxidgranulat II weist folgende Merkmale auf:
  - (A) eine BET-Oberfläche im Bereich von 10 bis 35 m<sup>2</sup>/g, zum Beispiel in einem Bereich von 10 bis 30 m<sup>2</sup>/g, besonders bevorzugt in einem Bereich von 20 bis 30 m<sup>2</sup>/g; und
  - (B) eine mittlere Partikelgröße in einem Bereich von 100 bis 300 µm auf, zum Beispiel in einem Bereich von 150 bis 280 µm oder von 200 bis 270 µm, besonders bevorzugt in einem Bereich von 230 bis 260 µm.

Bevorzugt weist das Siliziumdioxidgranulat II mindestens eines, zum Beispiel mindestens zwei oder mindestens drei oder mindestens vier, besonders bevorzugt mindestens fünf der folgenden Merkmale auf:

- (C) eine Schüttdichte in einem Bereich von 0,7 bis 1,2 g/cm<sup>3</sup>, zum Beispiel in einem Bereich von 0,75 bis 1,1 g/cm<sup>3</sup>, besonders bevorzugt in einem Bereich von 0,8 bis 1,0 g/cm<sup>3</sup>;
  - (D) einen Kohlenstoffgehalt von weniger als 5 ppm, zum Beispiel weniger als 4,5 ppm oder in einem Bereich von 1 ppb bis 4 ppm, besonders bevorzugt von weniger als 4 ppm;
  - (E) einen Aluminiumgehalt von weniger als 200 ppb, zum Beispiel von weniger als 150 ppb oder von weniger als 100 ppb oder von 1 bis 150 ppb oder von 1 bis 100 ppb, besonders bevorzugt in einem Bereich von 1 bis 80 ppb;
  - (F) Stampfdichte in einem Bereich von 0,7 bis 1,2 g/cm<sup>3</sup>, zum Beispiel in einem Bereich von 0,75 bis 1,1 g/cm<sup>3</sup>, besonders bevorzugt in einem Bereich von 0,8 bis 1,0 g/cm<sup>3</sup>;
  - (G) ein Porenvolumen in einem Bereich von 0,1 bis 2,5 mL/g, zum Beispiel in einem Bereich von 0,2 bis 1,5 mL/g; besonders bevorzugt in einem Bereich von 0,4 bis 1 mL/g;
  - (H) einen Chlorgehalt von weniger als 500 ppm, bevorzugt von weniger als 400 ppm, zum Beispiel weniger als 350 ppm oder bevorzugt von weniger als 330 ppm oder in einem Bereich von 1 ppb bis 500 ppm oder von 10 ppb bis 450 ppm besonders bevorzugt von 50 ppb bis 300 ppm;
  - (I) einen Metallgehalt von Metallen, die von Aluminium verschieden sind, von weniger als 1000 ppb, zum Beispiel in einem Bereich von 1 bis 400 ppb, besonders bevorzugt in einem Bereich von 1 bis 200 ppb;
  - (J) eine Restfeuchte von weniger als 3 Gew.-%, zum Beispiel in einem Bereich von 0,001 Gew.-% bis 2 Gew.-%, besonders bevorzugt von 0,01 bis 1 Gew.-%,
- wobei die Gew.-%, ppm und ppb jeweils auf das Gesamtgewicht des Siliziumdioxidgranulats II bezogen sind.

Bevorzugt weist das Siliziumdioxidgranulat II einen Mikroporenanteil in einem Bereich von 1 bis 2 m<sup>2</sup>/g zum Beispiel in einem Bereich von 1,2 bis 1,9 m<sup>2</sup>/g, besonders bevorzugt in einem Bereich von 1,3 bis 1,8 m<sup>2</sup>/g auf.

Das Siliziumdioxidgranulat II weist bevorzugt eine Dichte in einem Bereich von 0,5 bis 2,0 g/cm<sup>3</sup>, zum Beispiel von 0,6 bis 1,5 g/cm<sup>3</sup>, besonders bevorzugt von 0,8 bis 1,2 g/cm<sup>3</sup> auf. Die Dichte wird entsprechend der in den Testmethoden beschriebenen Methode bestimmt.

Das Siliziumdioxidgranulat II weist bevorzugt eine Partikelgröße D<sub>50</sub> in einem Bereich von 150 bis 250 µm, zum Beispiel in einem Bereich von 180 bis 250 µm, besonders bevorzugt in einem Bereich von 200 bis 250 µm. Weiterhin bevorzugt weist der Siliziumdioxidgranulat II eine Partikelgröße D<sub>10</sub> in einem Bereich von 50 bis 150 µm auf, zum Beispiel in einem Bereich von 80 bis 150 µm, besonders bevorzugt in einem Bereich von 100 bis 150 µm auf. Weiterhin bevorzugt weist der Siliziumdioxidgranulat II eine Partikelgröße D<sub>90</sub> in einem Bereich von 250 bis 450 µm, zum Beispiel in einem Bereich von 280 bis 420 µm, besonders bevorzugt in einem Bereich von 300 bis 400 µm auf.

Das Siliziumdioxidgranulat II weist bevorzugt die Merkmalskombination (A)/(B)/(D) oder (A)/(B)/(F) oder (A)/(B)/(I) auf, weiter bevorzugt die Merkmalskombination (A)/(B)/(D)/(F) oder (A)/(B)/(D)/(I) oder (A)/(B)/(F)/(I), besonders bevorzugt die Merkmalskombination (A)/(B)/(D)/(F)/(I).

- 5 Das Siliziumdioxidgranulat II weist bevorzugt die Merkmalskombination (A)/(B)/(D) auf, wobei die BET-Oberfläche in einem Bereich von 10 bis 30 m<sup>2</sup>/g liegt, die mittlere Partikelgröße in einem Bereich von 150 bis 280 µm liegt und der Kohlenstoffgehalt weniger als 4 ppm beträgt.

- Das Siliziumdioxidgranulat II weist bevorzugt die Merkmalskombination (A)/(B)/(F) auf, wobei die BET-  
10 Oberfläche in einem Bereich von 10 bis 30 m<sup>2</sup>/g, die mittlere Partikelgröße in einem Bereich von 150 bis 280 µm und die Stampfdichte in einem Bereich von 0,8 bis 1,0 g/mL liegt.

- Das Siliziumdioxidgranulat II weist bevorzugt die Merkmalskombination (A)/(B)/(I) auf, wobei die BET-  
Oberfläche in einem Bereich von 10 bis 30 m<sup>2</sup>/g, die mittlere Partikelgröße in einem Bereich von 150 bis 280 µm  
15 und der Metallgehalt von Metallen, die von Aluminium verschieden sind, in einem Bereich von 1 bis 400 ppb liegt.

- Das Siliziumdioxidgranulat II weist bevorzugt die Merkmalskombination (A)/(B)/(D)/(F) auf, wobei die BET-  
Oberfläche in einem Bereich von 10 bis 30 m<sup>2</sup>/g liegt, die mittlere Partikelgröße in einem Bereich von 150 bis  
20 280 µm liegt, der Kohlenstoffgehalt weniger als 4 ppm beträgt und die Stampfdichte in einem Bereich von 0,8 bis 1,0 g/mL liegt.

- Das Siliziumdioxidgranulat II weist bevorzugt die Merkmalskombination (A)/(B)/(D)/(I) auf, wobei die BET-  
Oberfläche in einem Bereich von 10 bis 30 m<sup>2</sup>/g liegt, die mittlere Partikelgröße in einem Bereich von 150 bis  
25 280 µm liegt, der Kohlenstoffgehalt weniger als 4 ppm beträgt und der Metallgehalt von Metallen, die von Aluminium verschieden sind, in einem Bereich von 1 bis 400 ppb liegt.

- Das Siliziumdioxidgranulat II weist bevorzugt die Merkmalskombination (A)/(B)/(F)/(I) auf, wobei die BET-  
Oberfläche in einem Bereich von 10 bis 30 m<sup>2</sup>/g, die mittlere Partikelgröße in einem Bereich von 150 bis 280 µm,  
30 die Stampfdichte in einem Bereich von 0,8 bis 1,0 g/mL und der Metallgehalt von Metallen, die von Aluminium verschieden sind, in einem Bereich von 1 bis 400 ppb liegt.

- Das Siliziumdioxidgranulat II weist bevorzugt die Merkmalskombination (A)/(B)/(D)/(F)/(I) auf, wobei die BET-  
Oberfläche in einem Bereich von 10 bis 30 m<sup>2</sup>/g liegt, die mittlere Partikelgröße in einem Bereich von 150 bis  
35 280 µm liegt, der Kohlenstoffgehalt weniger als 4 ppm beträgt, die Stampfdichte in einem Bereich von 0,8 bis 1,0 g/mL liegt und der Metallgehalt von Metallen, die von Aluminium verschieden sind, in einem Bereich von 1 bis 400 ppb liegt.

**Schritt ii.)**

Gemäß Schritt ii.) wird aus dem Siliziumdioxidgranulat eine Glasschmelze gebildet. Üblicherweise wird dabei das Siliziumdioxidgranulat erwärmt, bis eine Glasschmelze erhalten wird. Das Erwärmen des Siliziumdioxidgranulats zu einer Glasschmelze kann prinzipiell auf allen dem Fachmann zu diesem Zwecke bekannten Wegen erfolgen.

**Herstellen einer Glasschmelze**

Das Bilden einer Glasschmelze aus dem Siliziumdioxidgranulat, zum Beispiel durch Erwärmen, kann durch ein kontinuierliches Verfahren erfolgen. Im erfindungsgemäßen Verfahren zum Herstellen eines Quarzglaskörpers kann das Siliziumdioxidgranulat bevorzugt kontinuierlich in einen Ofen eingebracht oder die Glasschmelze kontinuierlich dem Ofen entnommen werden, oder beides. Besonders bevorzugt wird das Siliziumdioxidgranulat kontinuierlich in den Ofen eingebracht und die Glasschmelze kontinuierlich dem Ofen entnommen.

Dazu geeignet ist prinzipiell ein Ofen, der mindestens einen Einlass und mindestens einen Auslass aufweist. Unter einem Einlass wird eine Öffnung verstanden, durch die Siliziumdioxid und gegebenenfalls weitere Stoffe in den Ofen eingetragen werden können. Unter einem Auslass wird eine Öffnung verstanden, durch die zumindest ein Teil des Siliziumdioxids aus dem Ofen entnommen werden kann. Der Ofen kann beispielsweise vertikal und horizontal ausgerichtet sein. Bevorzugt ist der Ofen vertikal ausgerichtet. Bevorzugt liegt mindestens ein Einlass über mindestens einem Auslass. „Über“ bedeutet im Zusammenhang mit Einbauten und Merkmalen eines Ofens, insbesondere einem Ein- und Auslass, dass die Einbaute oder das Merkmal, das „über“ einem anderen angeordnet ist, eine höhere Lage über NormalNull (NN) aufweist. Unter „vertikal“ wird verstanden, dass die direkte Verbindung zwischen dem Einlass und dem Auslass des Ofens eine Abweichung von nicht mehr als 30° zur Lotrichtung aufweist.

Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform des ersten Gegenstands der Erfindung beinhaltet der Ofen einen hängenden Blechtiegel. In den hängenden Blechtiegel wird das Siliziumdioxidgranulat eingetragen und unter Erhalt einer Glasschmelze erwärmt. Unter einem Blechtiegel wird ein Tiegel verstanden der mindestens ein Walzblech beinhaltet. Bevorzugt weist ein Blechtiegel mehrere Walzbleche auf. Unter einem hängenden Blechtiegel wird ein Blechtiegel der zuvor beschriebenen Art verstanden, der in einem Ofen hängend angeordnet ist.

Der hängende Blechtiegel kann prinzipiell aus allen dem Fachmann bekannten und zum Schmelzen von Siliziumdioxid geeigneten Materialien bestehen. Bevorzugt beinhaltet das Blech des hängenden Blechtiegels ein gesinter-tes Material, zum Beispiel ein Sintermetall. Unter Sintermetallen werden Metalle oder Legierungen verstanden, die durch Sintern von Metallpulvern erhalten werden.

Bevorzugt beinhaltet das Blech des Blechtiegels mindestens ein Element ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus Refraktärmetallen. Unter Refraktärmetallen werden die Metalle der 4. Nebengruppe (Ti, Zr, Hf), der 5. Nebengruppe (V, Nb, Ta) und der 6. Nebengruppe (Cr, Mo, W) verstanden.

Bevorzugt beinhaltet das Blech des Blechtiegels ein Sintermetall ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus Molybdän, Wolfram oder einer Kombination davon. Weiter bevorzugt enthält das Blech des Blechtiegels mindestens



ein weiteres Refraktärmetall, besonders bevorzugt Rhenium, Osmium, Iridium, Ruthenium oder einer Kombination aus zwei oder mehr davon.

Bevorzugt beinhaltet das Blech des Blechtiegels eine Legierung aus Molybdän mit einem Refraktärmetall, oder Wolfram mit einem Refraktärmetall. Besonders bevorzugte Legierungsmetalle sind Rhenium, Osmium, Iridium, Ruthenium oder einer Kombination aus zwei oder mehr davon. Gemäß einem weiteren Beispiel ist das Blech des Blechtiegels eine Legierung aus Molybdän mit Wolfram, Rhenium, Osmium, Iridium, Ruthenium oder einer Kombination aus zwei oder mehr davon. Zum Beispiel ist das Blech des Blechtiegels eine Legierung aus Wolfram mit Molybdän, Rhenium, Osmium, Iridium, Ruthenium oder einer Kombination aus zwei oder mehr davon.

Bevorzugt kann das zuvor beschriebene Blech des Blechtiegels mit einem Refraktärmetall beschichtet sein. Gemäß einem bevorzugten Beispiel ist das Blech des Blechtiegels mit Rhenium, Osmium, Iridium, Ruthenium, Molybdän oder Wolfram, oder einer Kombination aus zwei oder mehr davon beschichtet.

Bevorzugt weisen das Blech und die Beschichtung verschiedene Zusammensetzungen auf. Zum Beispiel ist ein Molybdänblech mit einer oder mehreren Schichten aus Rhenium, Osmium, Iridium, Ruthenium, Wolfram oder jeweils einer Kombination von zwei oder mehr davon beschichtet. Gemäß einem anderen Beispiel ist ein Wolframblech mit einer oder mehreren Schichten aus Rhenium, Osmium, Iridium, Ruthenium, Molybdän oder jeweils einer Kombination von zwei oder mehr davon beschichtet. Gemäß einem weiteren Beispiel kann das Blech des Blechtiegels aus mit Rhenium legierten Molybdän oder aus mit Rhenium legierten Wolfram bestehen, und zur Tiegellinnenseite mit einer oder mehreren Schichten beinhaltend Rhenium, Osmium, Iridium, Ruthenium oder jeweils einer Kombination von zwei oder mehr davon beschichtet sein.

Bevorzugt weist das Blech des hängenden Blechtiegels eine Dichte 95 % oder mehr der theoretischen Dichte auf, zum Beispiel eine Dichte von 95 % bis 98 % oder von 96 % bis 98 %. Weiter bevorzugt sind höhere theoretische Dichten, insbesondere im Bereich von 98 bis 99,95 %. Die theoretische Dichte eines Werkstoffs entspricht der Dichte eines porenfreien und 100 % dichten Materials. Eine Dichte des Blechs des Blechtiegels von mehr als 95 % der theoretischen Dichte kann beispielsweise durch Sintern eines Sintermetalls und anschließendes Verdichten des gesinterten Materials erhalten werden. Besonders bevorzugt ist ein Blechtiegel durch Sintern eines Sintermetalls, Walzen unter Erhalt eines Blechs und Verarbeiten des Blechs zu einem Tiegel erhältlich.

Bevorzugt weist der Blechtiegel mindestens einen Deckel, eine Wand und eine Bodenplatte auf. Bevorzugt weist der hängende Blechtiegel mindestens eines, zum Beispiel mindestens zwei oder mindestens drei oder mindestens vier, besonders bevorzugt mindestens fünf oder alle der folgenden Merkmale auf:

- (a) mindestens eine, z.B. mehr als eine oder mindestens zwei oder mindestens drei oder mindestens fünf, besonders bevorzugt drei oder vier Lagen des Blechs;
- (b) mindestens ein Blech, z.B. mindestens drei oder mindestens vier oder mindestens sechs oder mindestens acht oder mindestens zwölf oder mindestens 15 oder mindestens 16 oder mindestens 20 Bleche, besonders bevorzugt zwölf oder 16 Bleche;
- (c) mindestens eine Verbindung von zwei Blechstücken, z.B. mindestens zwei oder mindestens fünf oder mindestens zehn oder mindestens 18 oder mindestens 24 oder mindestens 36 oder mindestens 48 oder

mindestens 60 oder mindestens 72 oder mindestens 48 oder mindestens 96 oder mindestens 120 oder mindestens 160, besonders bevorzugt 36 oder 48 Verbindungen von zwei gleichen oder mehreren verschiedenen Blechstücken des hängenden Blechtiegels;

- (d) die Blechstücke des hängenden Blechtiegels sind vernietet, z.B. an mindestens einer Verbindung, durch Tiefziehen, z.B. durch eine Kombination von Tiefziehen mit Blech-Ansetzen, oder durch Senken verbunden, verschraubt oder verschweißt, z.B. durch Elektronenstrahlschweißen und Versintern der Schweißstellen, besonders bevorzugt vernietet;
- (e) das Blech des hängenden Blechtiegels ist durch einen Umformschritt, der mit einer Erhöhung der physikalischen Dichte verbunden ist, erhältlich, bevorzugt durch Umformen eines gesinterten Metalls oder einer gesinterten Legierung; weiter bevorzugt ist das Umformen ein Walzen;
- (f) eine Aufhängung aus Kupfer, Aluminium, Stahl, Eisen, Nickel oder einem Refraktärmetall, z.B. aus dem Tiegelmateriale, bevorzugt eine wassergekühlte Aufhängung aus Kupfer oder Stahl;
- (g) eine Düse, bevorzugt eine fest mit dem Tiegel verbundene Düse;
- (h) einen Dorn, zum Beispiel einen mit Stegen an der Düse befestigten Dorn oder einen mit einer Haltestange am Deckel befestigten Dorn oder einen von unterhalb des Tiegels mit einer Haltestange verbundenen Dorn;
- (i) mindestens einen Gaseinlass, z.B. in Form eines Füllrohrs oder als separater Einlass;
- (j) mindestens einen Gasauslass, z.B. als separater Auslass am Deckel oder in der Wand des Tiegels;
- (k) einen gekühlten Mantel, bevorzugt einen wassergekühlten Mantel;
- (l) eine Isolation von außen, bevorzugt eine Isolation von Außen aus Zirkoniumoxid.

Der hängende Blechtiegel kann prinzipiell auf jede dem Fachmann geläufige und hierfür geeignet erscheinende Art beheizt werden. Der hängende Blechtiegel kann beispielsweise mittels elektrischer Heizelemente (resistiv) oder durch Induktion erhitzt werden. Bei resistiver Heizung wird die feste Oberfläche des Blechtiegels von außen erwärmt und gibt die Energie von dort an deren Innenseite ab.

Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung erfolgt der Energieeintrag in den Schmelztiegel nicht durch ein Erwärmen des Schmelztiegels, oder eines darin vorliegenden Schmelzguts, oder beidem, mittels einer Flamme, wie zum Beispiel einer in den Schmelztiegel oder auf den Schmelztiegel gerichteten Brennerflamme.

Durch die hängende Anordnung kann der hängende Blechtiegel im Ofen bewegt werden. Bevorzugt kann der Tiegel in den Ofen zumindest teilweise hinein- und herausgefahren werden. Liegen im Ofen verschiedene Heizzonen vor, werden deren Temperaturprofile auf den sich im Ofen befindlichen Tiegel übertragen. Durch das Verändern der Position des Tiegels im Ofen können so mehrere Heizzonen, variierende Heizzonen oder mehrere variierende Heizzonen im Tiegel realisiert werden.

Der Blechtiegel weist eine Düse auf. Die Düse ist aus einem Düsenmaterial gebildet. Bevorzugt beinhaltet das Düsenmaterial ein vorverdichtetes Material, zum Beispiel mit einer Dichte in einem Bereich von mehr als 95 %, zum Beispiel von 98 bis 100%, besonders bevorzugt von 99 bis 99,999 %, jeweils bezogen auf die theoretische Dichte des Düsenmaterials. Bevorzugt beinhaltet das Düsenmaterial ein Refraktärmetall, zum Beispiel Molybdän,

Wolfram oder eine Kombination davon mit einem weiteren Refraktärmetall. Als Düsenmaterial besonders bevorzugt ist Molybdän. Bevorzugt kann eine Düse beinhaltend Molybdän eine Dichte von 100 % der theoretischen Dichte aufweisen.

- 5 Bevorzugt ist die in einem Blechtiegel enthaltene Bodenplatte dicker als die Seiten des Blechtiegels. Bevorzugt besteht die Bodenplatte aus dem gleichen Material wie die Seiten des Blechtiegels. Bevorzugt ist die Bodenplatte des Blechtiegels kein Walzblech. Die Bodenplatte ist zum Beispiel 1,1 bis 5000 mal dicker oder 2 bis 1000 mal dicker oder 4 bis 500 mal dicker, besonders bevorzugt 5 bis 50 mal dicker, jeweils mit Bezug auf eine Wand des Blechtiegels.

10

Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform des ersten Gegenstands der Erfindung beinhaltet der Ofen einen hängenden oder einen stehenden Sintertiegel. In den hängenden oder stehenden Sintertiegel wird das Siliziumdioxidgranulat eingetragen und unter Erhalt einer Glasschmelze erwärmt.

- 15 Unter einem Sintertiegel wird ein Tiegel verstanden, der aus einem Sintermaterial gefertigt ist, das mindestens ein Sintermetall beinhaltet und eine Dichte von nicht mehr als 96 % der theoretischen Dichte des Metalls aufweist. Unter Sintermetallen werden Metalle oder Legierungen verstanden, die durch Sintern von Metallpulvern erhalten werden. Das Sintermaterial und das Sintermetall in einem Sintertiegel sind nicht gewalzt.

- 20 Bevorzugt weist das Sintermaterial des Sintertiegels eine Dichte von 85 % oder mehr der theoretischen Dichte des Sintermaterials auf, zum Beispiel eine Dichte von 85 % bis 95 % oder von 90 % bis 94 %, besonders bevorzugt von 91 % bis 93 %.

- 25 Das Sintermaterial kann prinzipiell aus allen dem Fachmann bekannten und zum Schmelzen von Siliziumdioxid geeigneten Materialien bestehen. Bevorzugt ist das Sintermaterial gefertigt aus mindestens einem der Elemente ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus Refraktärmetallen, Graphit oder mit Graphitfolie ausgeschlagenen Materialien.

- 30 Bevorzugt beinhaltet das Sintermaterial ein erstes Sintermetall ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus Molybdän, Wolfram und einer Kombination davon. Weiter bevorzugt beinhaltet das Sintermaterial außerdem mindestens ein weiteres Refraktärmetall, das von dem ersten Sintermetall verschieden ist, besonders bevorzugt ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus Molybdän, Wolfram, Rhenium, Osmium, Iridium, Ruthenium oder einer Kombination aus zwei oder mehr davon.

- 35 Bevorzugt beinhaltet das Sintermaterial eine Legierung aus Molybdän mit einem Refraktärmetall, oder Wolfram mit einem Refraktärmetall. Besonders bevorzugt als Legierungsmetall sind Rhenium, Osmium, Iridium, Ruthenium oder einer Kombination aus zwei oder mehr davon. Gemäß einem weiteren Beispiel beinhaltet das Sintermaterial eine Legierung aus Molybdän mit Wolfram, Rhenium, Osmium, Iridium, Ruthenium oder einer Kombination aus zwei oder mehr davon. Zum Beispiel beinhaltet das Sintermaterial eine Legierung aus Wolfram mit Mo-
- 40 lybdän, Rhenium, Osmium, Iridium, Ruthenium oder einer Kombination aus zwei oder mehr davon.

Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform kann das zuvor beschriebene Sintermaterial eine Beschichtung beinhalten, die ein Refraktärmetall, insbesondere Rhenium, Osmium, Iridium, Ruthenium oder eine Kombination aus zwei oder mehr davon enthält. Gemäß einem bevorzugten Beispiel enthält die Beschichtung Rhenium, Osmium, Iridium, Ruthenium, Molybdän oder Wolfram, oder eine Kombination aus zwei oder mehr davon.

Bevorzugt weisen das Sintermaterial und seine Beschichtung verschiedene Zusammensetzungen auf. Zum Beispiel ist ein Sintermaterial beinhalten Molybdän mit einer oder mehreren Schichten aus Rhenium, Osmium, Iridium, Ruthenium, Wolfram oder jeweils einer Kombination von zwei oder mehr davon beschichtet. Gemäß einem anderen Beispiel ist ein Sintermaterial beinhalten Wolfram mit einer oder mehreren Schichten aus Rhenium, Osmium, Iridium, Ruthenium, Molybdän oder jeweils einer Kombination von zwei oder mehr davon beschichtet. Gemäß einem weiteren Beispiel kann das Sintermaterial aus mit Rhenium legierten Molybdän oder aus mit Rhenium legierten Wolfram bestehen, und zur Tiegellinnenseite mit einer oder mehreren Schichten beinhalten Rhenium, Osmium, Iridium, Ruthenium oder jeweils einer Kombination von zwei oder mehr davon beschichtet sein.

Bevorzugt wird ein Sintertiegel durch Sintern des Sintermaterials in einer Form gefertigt. Der Sintertiegel kann als Ganzes in einer Form gefertigt werden. Es ist ebenso möglich, dass einzelne Teile des Sintertiegels in einer Form gefertigt und anschließend zu dem Sintertiegel verarbeitet werden. Bevorzugt wird der Tiegel aus mehr als einem Teil gefertigt, zum Beispiel aus einer Bodenplatte und einem oder mehreren Seitenteilen. Die Seitenteile sind bevorzugt in einem Stück bezogen auf den Umfang des Tiegels gefertigt. Bevorzugt kann der Sintertiegel aus mehreren übereinander angeordneten Seitenteilen gefertigt werden. Bevorzugt werden die Seitenteile des Sintertiegels durch Verschrauben oder durch eine Nut-Feder Verbindung abgedichtet. Ein Verschrauben erfolgt bevorzugt durch Fertigen von Seitenteilen, die an den Rändern ein Gewinde aufweisen. Bei einer Nut-Feder-Verbindung haben zwei zu verbindende Seitenteile an den Rändern je eine Nut, in die als verbindendes drittes Teil eine Feder eingesteckt wird, so dass eine formschlüssige Verbindung senkrecht zur Tiegelwandebene gebildet wird. Besonders bevorzugt wird ein Sintertiegel aus mehr als einem Seitenteil gefertigt, zum Beispiel aus zwei oder mehr Seitenteilen, besonders bevorzugt aus drei oder mehr Seitenteilen. Besonders bevorzugt sind die Teile des hängenden Sintertiegels verschraubt. Besonders bevorzugt sind die Teile des stehenden Sintertiegels mittels einer Nut-Feder-Verbindung verbunden.

Die Bodenplatte kann prinzipiell durch alle dem Fachmann bekannten und zu diesem Zweck geeigneten Maßnahmen mit der Tiegelwand verbunden werden. Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform ist die Bodenplatte mit einem Außengewinde versehen und wird durch Einschrauben der Bodenplatte in die Tiegelwand mit dieser verbunden. Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform wird die Bodenplatte mit Hilfe von Schrauben mit der Tiegelwand verbunden. Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform wird die Bodenplatte in den Sintertiegel eingehängt, beispielsweise durch einlegen der Bodenplatte auf einen Innenkragen der Tiegelwand. Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform werden zumindest ein Teil der Tiegelwand und eine verdickte Bodenplatte in einem Stück gesintert. Besonders bevorzugt sind die Bodenplatte und die Tiegelwand des hängenden Sintertiegels verschraubt. Besonders bevorzugt sind die Bodenplatte und die Tiegelwand des stehenden Sintertiegels mittels einer Nut-Feder-Verbindung verbunden.

Bevorzugt ist die in einem Sintertiegel enthaltene Bodenplatte dicker als die Seiten, zum Beispiel 1,1 bis 20 mal dicker oder 1,2 bis 10 mal dicker oder 1,5 bis 7 mal dicker, besonders bevorzugt 2 bis 5 mal dicker. Bevorzugt weisen die Seiten über den Umfang und über die Höhe des Sintertiegels eine konstante Wandstärke auf.

- 5 Der Sintertiegel weist eine Düse auf. Die Düse ist aus einem Düsenmaterial gebildet. Bevorzugt beinhaltet das Düsenmaterial ein vorverdichtetes Material, zum Beispiel mit einer Dichte in einem Bereich von mehr als 95 %, zum Beispiel von 98 bis 100%, besonders bevorzugt von 99 bis 99,999 %, jeweils bezogen auf die theoretische Dichte des Düsenmaterials. Bevorzugt beinhaltet das Düsenmaterial ein Refraktärmetall, zum Beispiel Molybdän, Wolfram oder eine Kombination davon mit einem Refraktärmetall. Als Düsenmaterial besonders bevorzugt ist
- 10 Molybdän. Bevorzugt kann eine Düse beinhaltend Molybdän eine Dichte von 100 % der theoretischen Dichte aufweisen.

- Der hängende Sintertiegel kann prinzipiell auf jede dem Fachmann geläufige und hierfür geeignet erscheinende Weise beheizt werden. Der hängende Sintertiegel kann beispielsweise induktiv oder resistiv erhitzt werden. Bei
- 15 induktiver Heizung wird die Energie direkt durch Spulen in die Seitenwand des Sintertiegels eingekoppelt und von dort an die Tiegellinnenseite abgegeben. Bei resistiver Heizung wird die Energie durch Strahlung eingekoppelt, wobei die feste Oberfläche von außen erwärmt wird und die Energie von dort an deren Innenseite abgegeben wird. Bevorzugt wird der Sintertiegel induktiv erhitzt.

- 20 Bevorzugt weist der Sintertiegel eine oder mehr als eine Heizzone auf, zum Beispiel eine oder zwei oder drei oder mehr als drei Heizzonen, bevorzugt eine oder zwei oder drei Heizzonen, besonders bevorzugt eine Heizzone. Die Heizzonen des Sintertiegels können auf die gleiche oder unterschiedliche Temperaturen gebracht werden. Zum Beispiel können alle Heizzonen auf eine Temperatur oder alle Heizzonen auf verschiedene Temperaturen oder zwei oder mehr Heizzonen auf eine und eine oder mehr Heizzonen unabhängig voneinander auf andere Tempera-
- 25 turen gebracht werden. Bevorzugt werden alle Heizzonen auf unterschiedliche Temperaturen gebracht, zum Beispiel nimmt die Temperatur der Heizzonen in Richtung des Materialtransports des Siliziumdioxidgranulats zu.

Unter einem hängenden Sintertiegel wird ein Sintertiegel der zuvor beschriebenen Art verstanden, der in einem Ofen hängend angeordnet ist.

- 30 Bevorzugt weist der hängende Sintertiegel mindestens eines, zum Beispiel mindestens zwei oder mindestens drei oder mindestens vier, besonders bevorzugt alle der folgenden Merkmale auf:

- {a} eine Aufhängung, bevorzugt eine höhenverstellbare Aufhängung;
- {b} mindestens zwei abgedichtete Ringe als Seitenteile, bevorzugt mindestens zwei miteinander verschraubte Ringe als Seitenteile;
- 35 {c} eine Düse, bevorzugt eine fest mit dem Tiegel verbundene Düse;
- {d} einen Dorn, zum Beispiel einen mit Stegen an der Düse befestigten Dorn oder einen mit einer Haltestange am Deckel befestigten Dorn oder einen von unterhalb des Tiegels mit einer Haltestange verbundenen Dorn;
- 40 {e} mindestens einen Gaseinlass, z.B. in Form eines Füllrohrs oder als separater Einlass, besonders bevorzugt in Form eines Füllrohrs;

- {f} mindestens einen Gasauslass, z.B. am Deckel oder in der Wand des Tiegels.
- {g} einen gekühlten Mantel, besonders bevorzugt einen wassergekühlten Mantel;
- {h} eine Isolation auf der Außenseite des Tiegels, zum Beispiel auf der Außenseite des gekühlten Mantels, bevorzugt eine Isolationsschicht aus Zirkoniumoxid.

5

Als Aufhängung bevorzugt ist eine bei der Fertigung des hängenden Sintertiegels angebrachte Aufhängung, zum Beispiel eine als integraler Bestandteil des Tiegels vorgesehene Aufhängung, besonders bevorzugt eine als integraler Bestandteil des Tiegels vorgesehene Aufhängung aus dem Sintermaterial. Als Aufhängung weiterhin bevorzugt ist eine an den Sintertiegel angebrachte Aufhängung aus einem von dem Sintermaterial verschiedenen Material, zum Beispiel aus Aluminium, Stahl, Eisen, Nickel oder Kupfer, bevorzugt aus Kupfer, besonders bevorzugt eine gekühlte, zum Beispiel eine wassergekühlte, an den Sintertiegel angebrachte Aufhängung aus Kupfer.

10

Durch die hängende Anordnung kann der hängende Sintertiegel im Ofen bewegt werden. Bevorzugt kann der Tiegel in den Ofen zumindest teilweise hinein- und herausgefahren werden. Liegen im Ofen verschiedene Heiz-

15 zonen vor, werden deren Temperaturprofile auf den sich im Ofen befindlichen Tiegel übertragen. Durch das Verändern der Position des Tiegels im Ofen können so mehrere Heizzonen, variierende Heizzonen oder mehrere variierende Heizzonen im Tiegel realisiert werden.

15

Unter einem stehenden Sintertiegel wird ein Sintertiegel der zuvor beschriebenen Art verstanden, der in einem Ofen stehend angeordnet ist.

20

Bevorzugt weist der stehende Sintertiegel mindestens eines, zum Beispiel mindestens zwei oder mindestens drei oder mindestens vier, besonders bevorzugt alle der folgenden Merkmale auf:

25

- /a/ einen als Stehfläche geformten Bereich, bevorzugt einen als Stehfläche geformten Bereich am Boden des Tiegels, weiter bevorzugt einen in der Bodenplatte des Tiegels als Stehfläche geformten Bereich, besonders bevorzugt einen als Stehfläche geformten Bereich am äußeren Rand des Bodens des Tiegels;
- /b/ mindestens zwei abgedichtete Ringe als Seitenteile, bevorzugt mindestens zwei durch eine Nut-Feder-Verbindung abgedichtete Ringe als Seitenteile;
- /c/ eine Düse, bevorzugt eine fest mit dem Tiegel verbundene Düse, besonders bevorzugt eine im nicht als Stehfläche geformten Bereich des Bodens des Tiegels;
- 30 /d/ einen Dorn, zum Beispiel einen mit Stegen an der Düse befestigten Dorn oder einen mit Stegen am Deckel befestigten Dorn oder einen von unterhalb des Tiegels mit einer Haltestange verbundenen Dorn;
- /e/ mindestens einen Gaseinlass, z.B. in Form eines Füllrohrs oder als separater Einlass;
- /f/ mindestens einen Gasauslass, z.B. als separater Auslass am Deckel oder in der Wand des Tiegels;
- 35 /g/ einen Deckel.

30

35

Der stehende Sintertiegel weist bevorzugt eine Trennung der Gasräume im Ofen und im Bereich unterhalb des Ofens auf. Unter dem Bereich unterhalb des Ofens wird der Bereich unterhalb der Düse verstanden, in dem sich die entnommene Glasschmelze befindet. Bevorzugt werden die Gasräume durch die Fläche, auf der der Tiegel steht, getrennt. Gas, das sich im Gasraum des Ofens zwischen Ofeninnenwand und Tiegelaußenwand befindet,

40 kann nicht nach unten in den Bereich unterhalb des Ofens entweichen. Die entnommene Glasschmelze hat keinen

40

Kontakt zu den Gasen aus dem Gasraum des Ofens. Bevorzugt weisen aus einem Ofen mit einem stehend angeordneten Sintertiegel entnommene Glasschmelzen und daraus gebildete Quarzglaskörper eine höhere Oberflächenreinheit auf als aus einem Ofen mit einem hängend angeordneten Sintertiegel entnommene Glasschmelzen und daraus gebildete Quarzglaskörper.

5

Bevorzugt ist der Tiegel so mit dem Einlass und dem Auslass des Ofens verbunden, dass durch den Einlass des Ofens Siliziumdioxidgranulat über den Einlass des Tiegels in den Tiegel gelangen kann und durch den Auslass des Tiegels und den Auslass des Ofens Glasschmelze entnommen werden kann.

10 Bevorzugt beinhaltet der Tiegel neben dem mindestens einen Einlass mindestens eine Öffnung, bevorzugt mehrere Öffnungen, durch die Gas ein- und ausgeleitet werden kann. Bevorzugt umfasst der Tiegel mindestens zwei Öffnungen, wobei mindestens eine als Gaseinlass und mindestens eine als Gasauslass verwendet werden kann. Bevorzugt führt die Verwendung mindestens einer Öffnung als Gaseinlass und mindestens einer Öffnung als Gasauslass zu einem Gasstrom im Tiegel.

15

Durch den Einlass des Tiegels wird das Siliziumdioxidgranulat in den Tiegel eingebracht und anschließend im Tiegel erwärmt. Das Erwärmen kann in Anwesenheit eines Gases oder eines Gemisches aus zwei oder mehr Gasen durchgeführt werden. Beim Erwärmen kann außerdem an das Siliziumdioxidgranulat gebundenes Wasser in die Gasphase übergehen und so ein weiteres Gas bilden. Das Gas oder das Gemisch aus zwei oder mehr Gasen befindet sich im Gasraum des Tiegels. Unter dem Gasraum des Tiegels wird der Bereich im Innern des Tiegels verstanden, der nicht von einer festen oder flüssigen Phase belegt ist. Geeignete Gase sind zum Beispiel Wasserstoff, Inertgase sowie zwei oder mehr davon. Unter Inertgasen werden solche Gase verstanden, die bis zu einer Temperatur von 2400 °C mit den im Tiegel vorgesehenen Stoffen nicht reagieren. Bevorzugte Inertgase sind Stickstoff, Helium, Neon, Argon, Krypton und Xenon, besonders bevorzugt Argon und Helium. Bevorzugt wird das Erwärmen in reduzierender Atmosphäre durchgeführt. Diese kann bevorzugt durch Wasserstoff oder eine Kombination von Wasserstoff und einem Inertgas, zum Beispiel durch eine Kombination von Wasserstoff und Helium, oder von Wasserstoff und Stickstoff, oder von Wasserstoff und Argon, besonders bevorzugt durch eine Kombination aus Wasserstoff und Helium bereitgestellt werden.

30 Bevorzugt wird ein zumindest teilweiser Gasaustausch von Luft, Sauerstoff und Wasser gegen Wasserstoff, mindestens ein Inertgas, oder gegen eine Kombination von Wasserstoff und mindestens einem Inertgas an dem Siliziumdioxidgranulat durchgeführt. Der zumindest teilweise Gasaustausch wird an dem Siliziumdioxidgranulat beim Einbringen des Siliziumdioxidgranulats, oder vor dem Erwärmen, oder während des Erwärmens, oder während mindestens zwei der vorgenannten Tätigkeiten durchgeführt. Bevorzugt wird das Siliziumdioxidgranulat in einem Gasstrom von Wasserstoff und mindestens einem Inertgas, zum Beispiel Argon oder Helium, zum Schmelzen erwärmt.

40 Bevorzugt beträgt der Taupunkt des Gases beim Austritt durch den Gasauslass weniger als 0°C. Unter dem Taupunkt wird die Temperatur verstanden, unterhalb der bei unverändertem Druck ein Bestandteil des untersuchten Gases oder Gasgemisches kondensiert. Im Allgemeinen versteht man darunter die Kondensation von Wasser. Der

Taupunkt wird mit einem Taupunktspiegelhygrometer gemäß der im Methodenteil beschriebenen Messmethode bestimmt

Bevorzugt weist der Ofen, bevorzugt auch ein darin befindlicher Schmelztiiegel, mindestens einen Gasauslass auf, durch den dem Ofen zugeführtes und beim Betrieb des Ofens gebildetes Gas entnommen wird. Der Ofen kann zudem mindestens einen dedizierten Gaseinlass aufweisen. Alternativ oder zusätzlich kann Gas durch die Feststoffzuführung, auch als Feststoffeinlass bezeichnet, eingebracht werden, zum Beispiel zusammen mit den Siliziumdioxidpartikeln, oder davor, danach, oder durch eine Kombination von zwei oder mehr der vorgenannten Möglichkeiten.

Bevorzugt weist das Gas, das durch den Gasauslass dem Ofen entnommen wird, beim Austritt aus dem Ofen durch den Gasauslass einen Taupunkt von weniger als 0°C, zum Beispiel von weniger als -10°C, oder weniger als -20°C auf. Der Taupunkt wird gemäß der im Methodenteil beschriebenen Messmethode bei einem schwachen Überdruck von 5 bis 20 mbar bestimmt. Als Messgerät geeignet ist zum Beispiel ein Gerät mit der Bezeichnung „Optidew“ der Firma Michell Instruments GmbH, D-61381 Friedrichsdorf.

Der Taupunkt des Gases wird bevorzugt an einer Messstelle in einem Abstand von 10 cm oder mehr von dem Gasauslass des Ofens bestimmt. Oftmals beträgt dieser Abstand zwischen 10 cm und 5 m. In diesem Abstandsreich – hier beschrieben durch „beim Austritt“ - ist der Abstand der Messstelle vom Gasauslass des Ofens für das Ergebnis der Taupunktmessung unerheblich. Das Gas wird von dem Auslass bis zur Messstelle fluidleitend geführt, zum Beispiel in einem Schlauch oder einem Rohr. Die Temperatur des Gases beträgt an der Messstelle oftmals zwischen 10 und 60°C, zum Beispiel 20 bis 50°C insbesondere 20 bis 30°C.

Geeignete Gase und Gasgemische wurden bereits beschrieben. Es wurde im Rahmen eigener Versuche festgestellt, dass die vorstehend genannten Angaben für jedes der genannten Gase und Gasgemische gilt.

Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform weist das Gas oder das Gasgemisch vor Eintritt in den Ofen, insbesondere den Schmelztiiegel einen Taupunkt von weniger als -50°C, zum Beispiel weniger als -60°C, oder weniger als -70°C, oder weniger als -80 °C auf. Ein Taupunkt von -60°C wird in der Regel nicht überschritten. Ebenfalls sind folgende Bereiche für den Taupunkt bei Eintritt in den Ofen bevorzugt: von -50 bis -100°C; von -60 bis -100°C und von -70 bis -100°C.

Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform beträgt der Taupunkt des Gases vor Eintritt in den Ofen mindestens 50°C weniger als beim Austritt aus dem Schmelztiiegel, zum Beispiel mindestens 60°C, oder auch 80°C. Für das Messen des Taupunkts beim Austritt aus dem Schmelztiiegel gelten die obenstehenden Angaben. Für eine Messung des Taupunkts vor Eintritt in den Ofen gilt entsprechendes. Da zwischen dem Ort der Messung und dem Ofen keine Quelle für einen Feuchtigkeitseintrag und keine Möglichkeit des Kondensationsniederschlags vorgesehen ist, kommt es hier auf den Abstand der Messstelle zum Gaseinlass des Ofens nicht an.

Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform wird der Ofen insbesondere der Schmelztiiegel mit einer Gasaustauschrate in einem Bereich von 200 bis 3000 L/h betrieben.



Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform wird der Taupunkt in einer Messzelle bestimmt, wobei die Messzelle durch eine Membran von dem durch den Gasauslass tretenden Gas getrennt ist. Die Membran ist bevorzugt permeabel für Feuchtigkeit. Mit dieser Maßnahme kann die Messzelle vor einer im Gasstrom befindlichen Menge an Staub und anderen Partikeln geschützt werden, die durch den Gasstrom aus dem Schmelzofen, insbesondere einem Schmelztiegel mit ausgetragen werden. Durch diese Maßnahme kann die Einsatzzeit einer Messsonde erheblich verlängert werden. Die Einsatzzeit bedeutet die Zeitspanne unter dem Betrieb des Ofens, während der weder ein Austausch der Messsonde, noch Reinigen der Messsonde erforderlich werden.

10 Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform wird zum Bestimmen des Taupunkts ein Taupunktspiegelmessgerät eingesetzt.

Der Taupunkt am Gasauslass des Ofens kann eingestellt werden. Bevorzugt beinhaltet ein Verfahren zum Einstellen des Taupunkts am Auslass des Ofens die folgenden Schritte:

- 15 I) Bereitstellen eines Eingangsmaterials in einem Ofen, wobei das Eingangsmaterial eine Restfeuchte aufweist;  
II) Betreiben des Ofens, wobei ein Gasstrom durch den Ofen geführt wird, und  
III) Variieren der Restfeuchte des Eingangsmaterials, oder der Gasaustauschrate des Gasstroms.

20 Bevorzugt kann durch dieses Verfahren der Taupunkt auf einem Bereich von weniger als 0°C, zum Beispiel von weniger als -10°C, besonders bevorzugt von weniger als -20°C eingestellt werden. Weiter bevorzugt kann der Taupunkt auf einem Bereich von weniger als 0°C bis -100°C, zum Beispiel von weniger als -10°C bis -80°C, besonders bevorzugt von weniger als -20°C bis -60°C eingestellt werden.

25 Unter „Eingangsmaterial“ werden zum Herstellen eines Quarzglaskörpers bereitgestellte Siliziumdioxidpartikel verstanden, bevorzugt Siliziumdioxidgranulat, Siliziumdioxidkörnung oder Kombinationen davon. Die Siliziumdioxidpartikel, das Granulat und die Körnung sind bevorzugt durch die im Rahmen des ersten Gegenstands beschriebenen Merkmale gekennzeichnet.

30 Der Ofen und der Gasstrom sind bevorzugt durch die im Rahmen des ersten Gegenstands beschriebenen Merkmale gekennzeichnet. Bevorzugt wird der Gasstrom durch Einleiten eines Gases durch einen Einlass in den Ofen und durch Ausleiten eines Gases durch einen Auslass aus dem Ofen gebildet. Unter der „Gasaustauschrate“ wird das Volumen an Gas verstanden, dass pro Zeit durch den Auslass aus dem Ofen geführt wird. Die Gasaustauschrate wird auch als Durchsatz des Gasstroms oder als Volumendurchsatz bezeichnet.

35 Das Einstellen des Taupunkts kann insbesondere durch Variieren der Restfeuchte des Eingangsmaterials oder der Gasaustauschrate des Gasstroms erfolgen. Beispielsweise kann durch Erhöhung von Restfeuchte des Eingangsmaterials der Taupunkt erhöht werden. Durch Verringern von Restfeuchte des Eingangsmaterials kann der Taupunkt erniedrigt werden. Eine erhöhte Gasaustauschrate kann zu einer Verringerung des Taupunkts führen. Eine verringerte Gasaustauschrate kann dagegen einen erhöhten Taupunkt zur Folge haben.

40

Bevorzugt liegt die Gasaustauschrate des Gasstroms in einem Bereich von 200 bis 3000 L/h, zum Beispiel von 200 bis 2000 L/h, besonders bevorzugt von 200 bis 1000 L/h.

Die Restfeuchte des Eingangsmaterials liegt bevorzugt in einem Bereich von 0,001 Gew.-% bis 5 Gew.-%, zum Beispiel von 0,01 bis 1 Gew.-%, besonders bevorzugt von 0,03 bis 0,5 Gew.-%, jeweils bezogen auf das Gesamtgewicht des Eingangsmaterials.

Bevorzugt kann der Taupunkt darüber hinaus durch weitere Maßnahmen beeinflusst werden. Beispiele solcher Maßnahmen sind Taupunkt des Gasstroms beim Eintritt in den Ofen, die Ofentemperatur und die Zusammensetzung des Gasstroms. Eine Verringerung des Taupunkts des Gasstroms beim Eintritt in den Ofen, einer Verringerung der Ofentemperatur oder eine Verringerung der Temperatur des Gasstroms am Auslass des Ofens können zu einer Verringerung des Taupunkts des Gasstroms am Auslass führen. Die Temperatur des Gasstroms am Ausgang des Ofens hat keinen Einfluss auf den Taupunkt, sofern sie oberhalb des Taupunkts liegt.

Besonders bevorzugt wird zum Einstellen des Taupunkts am Auslass des Ofens die Gasaustauschrate des Gasstroms variiert.

Bevorzugt ist das Verfahren durch mindestens eines, zum Beispiel mindestens zwei oder mindestens drei, besonders bevorzugt mindestens vier der folgenden Merkmale gekennzeichnet:

- I} eine Restfeuchte des Eingangsmaterials in einem Bereich von 0,001 bis 5 Gew.-%, zum Beispiel von 0,01 bis 1 Gew.-%, besonders bevorzugt von 0,03 bis 0,5 Gew.-%, jeweils bezogen auf das Gesamtgewicht des Eingangsmaterials;
- II} eine Gasaustauschrate des Gasstroms in einem Bereich von 200 bis 3000 L/h, zum Beispiel von 200 bis 2000 L/h, besonders bevorzugt von 200 bis 1000 L/h;
- III} eine Ofentemperatur in einem Bereich von 1700 bis 2500°C, zum Beispiel in einem Bereich von 1900 bis 2400°C, besonders bevorzugt in einem Bereich von 2100 bis 2300°C;
- IV} einen Taupunkt des Gasstroms beim Eintritt in den Ofen in einem Bereich von -50°C bis -100°C, zum Beispiel von -60°C bis -100°C, besonders bevorzugt von -70°C bis -100°C;
- V} der Gasstrom Helium, Wasserstoff oder eine Kombination davon beinhaltet, bevorzugt Helium und Wasserstoff in einem Verhältnis von 20:80 bis 95:5;
- VI} eine Temperatur des Gases am Auslass in einem Bereich von 10 bis 60°C, zum Beispiel von 20 bis 50°C, besonders bevorzugt von 20 bis 30°C.

Es ist beispielsweise bevorzugt, bei Verwendung eines Siliziumdioxidgranulats mit hoher Restfeuchte einen Gasstrom mit hoher Gasaustauschrate und einem geringen Taupunkt am Einlass des Ofens zu verwenden. Bei Verwendung eines Siliziumdioxidgranulats mit einer geringen Restfeuchte kann dagegen ein Gasstrom mit geringer Gasaustauschrate und einem höheren Taupunkt am Einlass des Ofens verwendet werden.

Besonders bevorzugt liegt bei der Verwendung eines Siliziumdioxidgranulats mit einer Restfeuchte von weniger als 3 Gew.-% die Gasaustauschrate eines Gasstroms beinhaltend Helium und Wasserstoff in einem Bereich von 200 bis 3000 L/h.

Wird ein Siliziumdioxidgranulat mit einer Restfeuchte von 0,1 % in einer Menge von 30 kg/h dem Ofen zugeführt, wird bevorzugt eine Gasaustauschrate des Gasstroms, im Fall von  $\text{He}/\text{H}_2 = 50:50$  in einem Bereich von 2800 bis 3000 l/h, im Fall von  $\text{He}/\text{H}_2 = 30:70$  in einem Bereich von 2700 bis 2900 l/h und ein Taupunkt des Gasstroms vor Eintritt in den Ofen von -90 °C gewählt. Am Gasauslass wird so ein Taupunkt von weniger als 0°C erhalten.

Wird ein Siliziumdioxidgranulat mit einer Restfeuchte von 0,05 % in einer Menge von 30 kg/h dem Ofen zugeführt, wird bevorzugt eine Gasaustauschrate des Gasstroms, im Fall von  $\text{He}/\text{H}_2 = 50:50$  von in einem Bereich von 1900 bis 2100 l/h, im Fall von  $\text{He}/\text{H}_2 = 30:70$  von in einem Bereich von 1800 bis 2000 l/h und ein Taupunkt des Gasstroms vor Eintritt in den Ofen von -90 °C gewählt. Am Gasauslass wird so ein Taupunkt von weniger als 0°C erhalten.

Wird ein Siliziumdioxidgranulat mit einer Restfeuchte von 0,03 % in einer Menge von 30 kg/h dem Ofen zugeführt, wird bevorzugt eine Gasaustauschrate des Gasstroms, im Fall von  $\text{He}/\text{H}_2 = 50:50$  von in einem Bereich von 1400 bis 1600 l/h, im Fall von  $\text{He}/\text{H}_2 = 30:70$  von in einem Bereich von 1200 bis 1400 l/h und ein Taupunkt des Gasstroms vor Eintritt in den Ofen von -90 °C gewählt. Am Gasauslass wird so ein Taupunkt von weniger als 0°C erhalten.

Die Ofentemperatur zum Schmelzen des Siliziumdioxidgranulats liegt bevorzugt im Bereich von 1700 bis 2500°C, zum Beispiel im Bereich von 1900 bis 2400°C, besonders bevorzugt im Bereich von 2100 bis 2300°C.

Bevorzugt beträgt die Verweilzeit im Ofen in einem Bereich von 1 Stunde bis 50 Stunden, zum Beispiel 1 bis 30 Stunden, besonders bevorzugt 5 bis 20 Stunden. Die Verweilzeit bedeutet im Kontext der vorliegenden Erfindung die Zeit, die benötigt wird, um während des Durchführens des erfindungsgemäßen Verfahrens dem Schmelzofen, in dem die Glasschmelze gebildet wird, eine Füllmenge des Schmelzofens verfahrensgemäß zu entnehmen. Die Füllmenge ist die insgesamt im Schmelzofen vorliegende Masse an Siliziumdioxid. Das Siliziumdioxid kann dabei als Feststoff und als Glasschmelze vorliegen.

Bevorzugt nimmt die Ofentemperatur über die Länge, in Richtung des Materialtransports zu. Bevorzugt nimmt die Ofentemperatur über die Länge, in Richtung des Materialtransports um mindestens 100°C, zum Beispiel um mindestens 300°C oder um mindestens 500°C oder um mindestens 700°C, besonders bevorzugt um mindestens 1000°C zu. Bevorzugt beträgt die höchste Temperatur im Ofen 1700 bis 2500°C, zum Beispiel 1900 bis 2400°C, besonders bevorzugt 2100 bis 2300°C. Die Zunahme der Ofentemperatur kann gleichmäßig oder entsprechend eines Temperaturprofils erfolgen.

Bevorzugt nimmt die Ofentemperatur, bevor die Glasschmelze aus dem Ofen entnommen wird, ab. Bevorzugt nimmt die Ofentemperatur bevor die Glasschmelze aus dem Ofen entnommen wird um 50 bis 500°C ab, zum Beispiel um 100°C oder um 400°C, besonders bevorzugt um 150 bis 300°C. Bevorzugt beträgt die Temperatur der Glasschmelze beim Entnehmen 1750 bis 2100°C, zum Beispiel 1850 bis 2050°C, besonders bevorzugt 1900 bis 2000°C.

Bevorzugt nimmt die Ofentemperatur über die Länge, in Richtung des Materialtransports zu und bevor die Glasschmelze aus dem Ofen entnommen wird ab. Bevorzugt nimmt dabei die Ofentemperatur über die Länge, in Richtung des Materialtransports um mindestens 100°C, zum Beispiel um mindestens 300°C oder um mindestens 500°C oder um mindestens 700°C, besonders bevorzugt um mindestens 1000°C zu. Bevorzugt beträgt die höchste Temperatur im Ofen 1700 bis 2500°C, zum Beispiel 1900 bis 2400°C, besonders bevorzugt 2100 bis 2300°C. Bevorzugt nimmt die Ofentemperatur bevor die Glasschmelze aus dem Ofen entnommen wird um 50 bis 500°C ab, zum Beispiel um 100°C oder um 400°C, besonders bevorzugt um 150 bis 300°C.

#### **Vorheizstrecke**

Bevorzugt weist der Ofen mindestens eine erste und eine weitere miteinander durch einen Durchlass verbundene Kammern auf, wobei die erste und die weitere Kammer verschiedene Temperaturen aufweisen, wobei die Temperatur der ersten Kammer niedriger ist als die Temperatur der weiteren Kammer. In der weiteren Kammer wird aus dem Siliziumdioxidgranulat eine Glasschmelze gebildet. Diese Kammer wird im Folgenden als Schmelzkammer bezeichnet. Eine mit der Schmelzkammer über eine Stoffführung verbundene, aber vorgelagerte Kammer wird auch als Vorheizstrecke bezeichnet. Es ist zum Beispiel diejenige, bei der mindestens ein Auslass unmittelbar mit einem Einlass der Schmelzkammer verbunden ist. Die vorgenannte Anordnung kann auch in eigenständigen Öfen ausgebildet sein. Dann ist die Schmelzkammer ein Schmelzofen. In Bezug auf die weitere Beschreibung kann der Schmelzofen jedoch synonym zur Schmelzkammer verstanden werden. Dementsprechend gelten die Ausführungen zum Schmelzofen auch für die Schmelzkammer, und umgekehrt. Der Begriff der Vorheizstrecke ist beiden Betrachtungsweisen gleich.

Bevorzugt hat das Siliziumdioxidgranulat bei Eintritt in den Ofen eine Temperatur in einem Bereich von 20 bis 1300°C.

Gemäß einer ersten Ausführungsform wird das Siliziumdioxidgranulat vor Eintritt in die Schmelzkammer nicht temperiert. Zum Beispiel hat das Siliziumdioxidgranulat bei Eintritt in den Ofen eine Temperatur in einem Bereich von 20 bis 40°C, besonders bevorzugt von 20 bis 30°C. Wird gemäß Schritt i.) Siliziumdioxidgranulat II bereitgestellt, hat es beim Eintritt in den Ofen bevorzugt eine Temperatur in einem Bereich von 20 bis 40°C, besonders bevorzugt von 20 bis 30°C.

Gemäß einer anderen Ausführungsform wird das Siliziumdioxidgranulat vor Eintritt in den Ofen auf eine Temperatur in einem Bereich von 40 bis 1300°C temperiert. Temperieren bedeutet das Einstellen der Temperatur auf einen gewählten Wert. Das Temperieren kann prinzipiell auf allen dem Fachmann bekannten und zum Temperieren von Siliziumdioxidgranulat bekannten Wegen erfolgen. Zum Beispiel kann das Temperieren in einem separat von der Schmelzkammer angeordneten Ofen oder in einem mit der Schmelzkammer verbundenen Ofen erfolgen.

Bevorzugt erfolgt das Temperieren in einer mit der Schmelzkammer verbundenen Kammer. Bevorzugt umfasst der Ofen also eine Vorheizstrecke, in der das Siliziumdioxid temperiert werden kann. Bevorzugt ist die Vorheizstrecke selbst ein Durchlaufofen, besonders bevorzugt ein Drehrohrföfen. Unter einem Durchlauföfen wird eine beheizte Kammer verstanden, die während des Betriebs eine Bewegung des Siliziumdioxids von einem Einlass

des Durchlaufofens zu einem Auslass des Durchlaufofens bewirkt. Bevorzugt ist der Auslass mit dem Einlass des Schmelzofens direkt verbunden. So kann das Siliziumdioxidgranulat aus der Vorheizstrecke ohne weitere Zwischenschritte oder Maßnahmen in den Schmelzofen gelangen.

- 5 Es ist weiter bevorzugt, dass die Vorheizstrecke mindestens einen Gaseinlass und mindestens einen Gasauslass umfasst. Durch den Gaseinlass kann Gas in den Innenraum, den Gasraum der Vorheizstrecke gelangen, und durch den Gasauslass kann es ausgeleitet werden. Es ist auch möglich, Gas über den Einlass für das Siliziumdioxidgranulat der Vorheizstrecke in die Vorheizstrecke einzuleiten. Ebenso kann Gas über den Auslass der Vorheizstrecke ausgeleitet und anschließend von dem Siliziumdioxidgranulat getrennt werden. Weiterhin bevorzugt kann Gas  
10 über den Einlass für das Siliziumdioxidgranulat und einen Gaseinlass der Vorheizstrecke zugeführt, und über den Auslass der Vorheizstrecke und einen Gasauslass der Vorheizstrecke ausgeleitet werden.

- Bevorzugt wird in der Vorheizstrecke durch Verwenden des Gaseinlasses und des Gasauslasses ein Gasstrom ausgebildet. Geeignete Gase sind zum Beispiel Wasserstoff, Inertgase sowie zwei oder mehr davon. Bevorzugte  
15 Inertgase sind Stickstoff, Helium, Neon, Argon, Krypton und Xenon, besonders bevorzugt Stickstoff und Helium. Bevorzugt liegt in der Vorheizstrecke eine reduzierende Atmosphäre vor. Diese kann bevorzugt durch Wasserstoff oder eine Kombination von Wasserstoff und einem Inertgas, zum Beispiel durch eine Kombination von Wasserstoff und Helium oder von Wasserstoff und Stickstoff, besonders bevorzugt durch eine Kombination aus Wasserstoff und Helium, bereitgestellt werden. Weiter bevorzugt liegt in der Vorheizstrecke eine oxidierende  
20 Atmosphäre vor. Diese kann bevorzugt durch Sauerstoff oder eine Kombination aus Sauerstoff und einem oder mehreren weiteren Gasen bereitgestellt werden, besonders bevorzugt ist Luft. Es ist weiter bevorzugt möglich, das Siliziumdioxid bei vermindertem Druck in der Vorheizstrecke zu temperieren.

- Zum Beispiel hat das Siliziumdioxidgranulat bei Eintritt in den Ofen eine Temperatur in einem Bereich von 100  
25 bis 1100°C oder von 300 bis 1000 oder von 600 bis 900°C. Wird gemäß Schritt i.) Siliziumdioxidgranulat II bereitgestellt, hat es beim Eintritt in den Ofen bevorzugt eine Temperatur in einem Bereich von 100 bis 1100°C oder von 300 bis 1000 oder von 600 bis 900°C.

- Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform des ersten Gegenstands der Erfindung beinhaltet der Ofen mindestens zwei Kammern. Bevorzugt beinhaltet der Ofen eine erste und mindestens eine weitere Kammer. Die erste und die weitere Kammer sind miteinander durch einen Durchlass verbunden.  
30

- Die mindestens zwei Kammern können in dem Ofen prinzipiell beliebig angeordnet sein, bevorzugt vertikal oder horizontal, besonders bevorzugt vertikal. Bevorzugt sind die Kammern im Ofen so angeordnet, dass bei der  
35 Durchführung des Verfahrens gemäß dem ersten Gegenstand der Erfindung Siliziumdioxidgranulat die erste Kammer passiert und anschließend in der weiteren Kammer unter Erhalt einer Glasschmelze erhitzt wird. Die weitere Kammer weist bevorzugt die zuvor beschriebenen Merkmale des Schmelzofens und des darin angeordneten Tiegels auf.

- 40 Bevorzugt enthält jede der Kammern einen Einlass und einen Auslass. Bevorzugt ist der Einlass des Ofens mit dem Einlass der ersten Kammer durch einen Durchlass verbunden. Bevorzugt ist der Auslass des Ofens mit dem

Auslass der weiteren Kammer durch einen Durchlass verbunden. Bevorzugt ist der Auslass der ersten Kammer durch einen Durchlass mit dem Einlass der weiteren Kammer verbunden.

Bevorzugt sind die Kammern so im Ofen angeordnet, dass durch den Einlass des Ofens das Siliziumdioxidgranulat in die erste Kammer gelangen kann. Bevorzugt sind die Kammern so im Ofen angeordnet, dass durch den Auslass des Ofens eine Siliziumdioxidglasschmelze aus der weiteren Kammer entnommen werden kann. Besonders bevorzugt kann durch den Einlass des Ofens das Siliziumdioxidgranulat in die erste Kammer gelangen und durch den Auslass des Ofens eine Siliziumdioxidglasschmelze aus einer weiteren Kammer entnommen werden.

Durch den Durchlass kann das Siliziumdioxid als Granulat oder Pulver in der durch das Verfahren vorgegebenen Richtung des Materialtransports von einer ersten in eine weitere Kammer gelangen. Durch einen Durchlass verbundene Kammern schließen Anordnungen ein, in denen zwischen einer ersten und einer weiteren Kammer weitere Zwischenelemente in Richtung des Materialtransports angeordnet sind. Den Durchlass können prinzipiell Gase, Flüssigkeiten und Feststoffe passieren. Bevorzugt können Siliziumdioxidpulver, Aufschlämungen von Siliziumdioxidpulver und Siliziumdioxidgranulat den Übergang zwischen einer ersten und einer weiteren Kammer passieren. Während der Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens können über den Durchlass zwischen der ersten und der weiteren Kammer alle in die erste Kammer eingetragenen Stoffe in die weitere Kammer gelangen. Bevorzugt gelangt über den Durchlass zwischen der ersten und weiteren Kammer nur Siliziumdioxid in Form von Granulat oder Pulver in die weitere Kammer. Bevorzugt ist der Durchlass zwischen der ersten und der weiteren Kammer durch das Siliziumdioxid verschlossen, so dass der Gasraum der ersten und der weiteren Kammer voneinander getrennt sind, bevorzugt so, dass in den Gasräumen verschiedene Gase oder Gasgemische, verschiedene Drücke oder beides vorliegen können. Gemäß einer anderen bevorzugten Ausgestaltung wird der Durchlass von einer Schleuse gebildet, bevorzugt durch eine Zellenradschleuse.

Bevorzugt weist die erste Kammer des Ofens mindestens einen Gaseinlass und mindestens einen Gasauslass auf. Der Gaseinlass kann prinzipiell jede Form aufweisen, die dem Fachmann bekannt und zum Einleiten eines Gases geeignet ist, zum Beispiel eine Düse, ein Ventil oder ein Rohr. Der Gasauslass kann prinzipiell jede Form aufweisen, die dem Fachmann bekannt und zum Ausleiten eines Gases geeignet ist, zum Beispiel eine Düse, ein Ventil oder ein Rohr.

Bevorzugt wird durch den Einlass des Ofens Siliziumdioxidgranulat in die erste Kammer eingebracht und erwärmt. Das Erwärmen kann in Anwesenheit eines Gases oder einer Kombination aus zwei oder mehr Gasen durchgeführt werden. Dazu liegt das Gas oder die Kombination aus zwei oder mehr Gasen im Gasraum der ersten Kammer vor. Unter dem Gasraum der ersten Kammer wird der Bereich der ersten Kammer verstanden, der nicht von einer festen oder flüssigen Phase belegt ist. Geeignete Gase sind zum Beispiel Wasserstoff, Sauerstoff, Inertgase sowie zwei oder mehr davon. Bevorzugte Inertgase sind Stickstoff, Helium, Neon, Argon, Krypton und Xenon, besonders bevorzugt sind Stickstoff, Helium und eine Kombination davon. Bevorzugt wird das Erwärmen in reduzierender Atmosphäre durchgeführt. Diese kann bevorzugt durch Wasserstoff oder eine Kombination von Wasserstoff und Helium bereitgestellt werden. Bevorzugt wird das Siliziumdioxidgranulat in der ersten Kammer in einem Strom des Gases oder der Kombination aus zwei oder mehr Gasen erwärmt.

Es ist weiter bevorzugt, dass das Siliziumdioxidgranulat in der ersten Kammer bei vermindertem Druck, zum Beispiel bei einem Druck von weniger als 500 mbar oder weniger als 300 mbar, zum Beispiel 200 mbar oder weniger erwärmt wird.

- 5 Bevorzugt ist die erste Kammer mit mindestens einer Vorrichtung versehen, mit der das Siliziumdioxidgranulat, bewegt wird. Prinzipiell können alle Vorrichtungen ausgewählt werden, die dem Fachmann zu diesem Zwecke bekannt sind und geeignet erscheinen. Bevorzugt geeignet sind Rühr-, Schüttel- oder Schwenkvorrichtungen.

- 10 Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform des ersten Gegenstands der Erfindung sind die Temperaturen in der ersten und in der weiteren Kammer verschieden. Bevorzugt ist die Temperatur in der ersten Kammer geringer als die Temperatur in der weiteren Kammer. Bevorzugt liegt die Temperaturdifferenz zwischen der ersten und der weiteren Kammer in einem Bereich von 600 bis 2400°C, zum Beispiel in einem Bereich von 1000 bis 2000°C oder von 1200 bis 1800°C, besonders bevorzugt in einem Bereich von 1500 bis 1700°C. Weiter bevorzugt ist die Temperatur in der ersten Kammer 600 bis 2400°C, zum Beispiel 1000 bis 2000°C oder 1200 bis 1800°C, besonders bevorzugt 1500 bis 1700°C niedriger als die Temperatur in der weiteren Kammer.

- 20 Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform ist die erste Kammer des Ofens eine Vorheizstrecke, besonders bevorzugt eine wie oben beschriebene Vorheizstrecke, die die oben beschriebenen Merkmale aufweist. Bevorzugt ist die Vorheizstrecke durch einen Durchlass mit der weiteren Kammer verbunden. Bevorzugt gelangt Siliziumdioxid aus der Vorheizstrecke über einen Durchlass in die weitere Kammer. Der Durchlass zwischen der Vorheizstrecke und der weiteren Kammer kann verschlossen sein, so dass keine in die Vorheizstrecke eingeleiteten Gase durch den Durchlass in die weitere Kammer gelangen. Bevorzugt ist der Durchlass zwischen der Vorheizstrecke und der weiteren Kammer verschlossen, so dass das Siliziumdioxid nicht mit Wasser in Berührung kommt. Der Durchlass zwischen der Vorheizstrecke und der weiteren Kammer kann verschlossen sein, so dass der Gasraum der Vorheizstrecke und der ersten Kammer so voneinander getrennt sind, dass in den Gasräumen verschiedene Gase oder Gasgemische, verschiedene Drücke oder beides vorliegen können. Als Durchlass eignen sich bevorzugt die zuvor beschriebenen Ausgestaltungen.

- 30 Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform ist die erste Kammer des Ofens keine Vorheizstrecke. Zum Beispiel ist die erste Kammer eine Ausgleichskammer. Unter einer Ausgleichskammer wird eine Kammer des Ofens verstanden, in der Durchsatzvariationen in einer vorgeschalteten Vorheizstrecke oder Durchsatzunterschiede zwischen einer Vorheizstrecke und der weiteren Kammer ausgeglichen werden. Zum Beispiel kann der ersten Kammer wie oben beschrieben ein Drehrohrföfen vorgeschaltet sein. Dieser weist üblicherweise einen Durchsatz auf, der um bis zu 6 % des durchschnittlichen Durchsatzes variieren kann. Bevorzugt wird Siliziumdioxid in einer Ausgleichskammer auf der Temperatur gehalten, mit der es in die Ausgleichskammer gelangt.

- 40 Es ist ebenso möglich, dass der Ofen eine erste Kammer und mehr als eine weitere Kammer aufweist, zum Beispiel zwei weitere Kammern oder drei weitere Kammern oder vier weitere Kammern oder fünf weitere Kammern oder mehr als fünf weitere Kammern, besonders bevorzugt zwei weitere Kammern. Weist der Ofen zwei weitere Kammern auf, ist die erste Kammer bevorzugt eine Vorheizstrecke, die erste der weiteren Kammern eine Aus-

gleichskammer und die zweite der weiteren Kammern die Schmelzkammer, bezogen auf die Richtung des Materialtransports.

Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform liegt in der ersten Kammer ein Additiv vor. Das Additiv ist bevorzugt ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus Halogenen, Inertgasen, Basen, Sauerstoff oder einer Kombination aus zwei oder mehr davon.

Als Additive sind prinzipiell Halogene in elementarer Form und Halogenverbindungen geeignet. Bevorzugte Halogene sind ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus Chlor, Fluor, chlorhaltigen Verbindungen und fluorhaltigen Verbindungen. Besonders bevorzugt sind elementares Chlor und Chlorwasserstoff.

Als Additive sind prinzipiell alle Inertgase sowie Mischungen aus zwei oder mehr davon geeignet. Bevorzugte Inertgase sind Stickstoff, Helium oder eine Kombination daraus.

Als Additive sind prinzipiell auch Basen geeignet. Bevorzugte Basen als Additive sind anorganische und organische Basen.

Weiter geeignet als Additiv ist Sauerstoff. Der Sauerstoff liegt bevorzugt als sauerstoffhaltige Atmosphäre vor, zum Beispiel in Kombination mit einem Inertgas oder einem Gemisch aus zwei oder mehr Inertgasen, besonders bevorzugt in Kombination mit Stickstoff, Helium oder Stickstoff und Helium.

Die erste Kammer kann prinzipiell jedes Material beinhalten, dass dem Fachmann bekannt und zum Erhitzen von Siliziumdioxid geeignet ist. Bevorzugt beinhaltet die erste Kammer mindestens ein Element ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus Quarzglas, einem Refraktärmetall, Aluminium und einer Kombination aus zwei oder mehr davon, besonders bevorzugt beinhaltet die erste Kammer Quarzglas oder Aluminium.

Bevorzugt übersteigt die Temperatur in der ersten Kammer 600°C nicht, wenn die erste Kammer ein Polymer oder Aluminium beinhaltet. Bevorzugt beträgt die Temperatur in der ersten Kammer 100 bis 1100°C, wenn die erste Kammer Quarzglas beinhaltet. Bevorzugt beinhaltet die erste Kammer im wesentlichen Quarzglas.

Beim Transport des Siliziumdioxids von der ersten Kammer zur weiteren Kammer durch den Durchlass zwischen der ersten und der weiteren Kammer kann das Siliziumdioxid prinzipiell in jedem beliebigen Zustand vorliegen. Bevorzugt liegt das Siliziumdioxid als Feststoff vor, zum Beispiel als Partikel, Pulver oder Granulat. Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform des ersten Gegenstands der Erfindung erfolgt der Transport des Siliziumdioxids von der ersten zur weiteren Kammer als Granulat.

Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform ist die weitere Kammer ein Tiegel aus einem Blech oder einem Sintermaterial, welches ein Sintermetall beinhaltet, wobei das Blech oder das Sintermetall ausgewählt ist aus der Gruppe bestehend aus Molybdän, Wolfram und einer Kombination davon.

Die Glasschmelze wird durch den Auslass aus dem Ofen, bevorzugt über eine Düse, entnommen.



**Schritt iii.)**

Ein Quarzglaskörper wird aus mindestens einem Teil der Glasschmelze gebildet. Bevorzugt wird dazu mindestens ein Teil der in Schritt ii) hergestellten Glasschmelze entnommen und daraus der Quarzglaskörper gebildet.

Die Entnahme eines Teils der in Schritt ii) hergestellten Glasschmelze kann prinzipiell kontinuierlich aus dem Schmelzofen oder der Schmelzkammer, oder nach abgeschlossener Herstellung der Glasschmelze erfolgen. Bevorzugt wird ein Teil der Glasschmelze kontinuierlich entnommen. Die Glasschmelze wird durch den Auslass aus dem Ofen oder den Auslass der Schmelzkammer, jeweils bevorzugt über eine Düse, entnommen.

Die Glasschmelze kann vor, während oder nach der Entnahme auf eine Temperatur abgekühlt werden, die das Formen der Glasschmelze ermöglicht. Mit dem Abkühlen der Glasschmelze ist ein Ansteigen der Viskosität der Glasschmelze verbunden. Die Glasschmelze wird bevorzugt soweit abgekühlt, dass beim Formen die gebildete Form erhalten bleibt und das Formen gleichzeitig möglichst zügig, zuverlässig und mit geringem Kraftaufwand durchgeführt werden kann. Der Fachmann kann die Viskosität der Glasschmelze zum Formen durch Variieren der Temperatur der Glasschmelze am Formwerkzeug einfach ermitteln. Bevorzugt hat die Glasschmelze beim Entnehmen eine Temperatur im Bereich von 1750 bis 2100°C, zum Beispiel 1850 bis 2050°C, besonders bevorzugt 1900 bis 2000°C. Bevorzugt wird die Glasschmelze nach dem Entnehmen auf eine Temperatur von weniger als 500°C, zum Beispiel von weniger als 200°C oder weniger als 100°C oder weniger als 50°C, besonders bevorzugt auf eine Temperatur im Bereich von 20 bis 30°C abgekühlt.

Der gebildete Quarzglaskörper kann ein massiver Körper oder ein Hohlkörper sein. Unter einem massiven Körper wird ein Körper verstanden, der im Wesentlichen aus einem einzigen Material besteht. Gleichwohl kann ein massiver Körper einen oder mehrere Einschlüsse aufweisen, z.B. Gasblasen. Solche Einschlüsse in einem massiven Körper haben oftmals eine Größe von 65 mm<sup>3</sup> oder weniger, zum Beispiel von weniger als 40 mm<sup>3</sup>, oder von weniger als 20 mm<sup>3</sup>, oder von weniger als 5 mm<sup>3</sup>, oder von weniger als 2 mm<sup>3</sup>, besonders bevorzugt von weniger als 0,5 mm<sup>3</sup>. Bevorzugt beinhaltet ein massiver Körper weniger als 0,02 Vol.-% seines Volumens, zum Beispiel weniger als 0,01 Vol.-% oder weniger als 0,001 Vol.-% an Einschlüssen, jeweils bezogen auf das Gesamtvolumen des massiven Körpers.

Der Quarzglaskörper weist eine äußere Form auf. Unter der äußeren Form wird die Form des Außenrands des Querschnitts des Quarzglaskörpers verstanden. Die äußere Form des Quarzglaskörpers ist im Querschnitt bevorzugt rund, elliptisch oder polygon mit drei oder mehr Ecken, zum Beispiel 4, 5, 6, 7 oder 8 Ecken, besonders bevorzugt ist der Quarzglaskörper rund.

Bevorzugt hat der Quarzglaskörper eine Länge im Bereich von 100 bis 10000 mm, zum Beispiel von 1000 bis 4000 mm, besonders bevorzugt von 1200 bis 3000 mm.

Bevorzugt hat der Quarzglaskörper einen Außendurchmesser im Bereich von 1 bis 500 mm, zum Beispiel in einem Bereich von 2 bis 400 mm, besonders bevorzugt in einem Bereich von 5 bis 300 mm.

Das Formen des Quarzglaskörpers erfolgt mittels einer Düse. Dazu wird die Glasschmelze durch die Düse geführt. Die äußere Form eines durch die Düse geformten Quarzglaskörpers wird durch die Form der Öffnung der Düse bestimmt. Ist die Öffnung der Düse rund, wird beim Formen des Quarzglaskörpers ein Zylinder gebildet. Weist die Öffnung der Düse eine Struktur auf, wird diese Struktur auf die äußere Form des Quarzglaskörpers übertragen. Ein Quarzglaskörper, der mittels einer Düse mit Strukturen an der Öffnung gebildet wird, weist ein Abbild der Strukturen in Längsrichtung auf dem Glasstrang auf.

Die Düse ist in den Schmelzofen integriert. Bevorzugt ist sie als Teil des Tiegels in den Schmelzofen integriert, besonders bevorzugt als Teil des Auslasses des Tiegels.

Bevorzugt wird der mindestens eine Teil der Glasschmelze durch die Düse entnommen. Die äußere Form des Quarzglaskörpers wird durch das Entnehmen mindestens eines Teils der Glasschmelze durch die Düse gebildet.

Bevorzugt wird der Quarzglaskörper nach dem Bilden abgekühlt, um seine Form zu erhalten. Bevorzugt wird der Quarzglaskörper nach dem Formen auf eine Temperatur abgekühlt, die mindestens 1000°C unterhalb der Temperatur der Glasschmelze beim Formen liegt, zum Beispiel mindestens 1500°C oder mindestens 1800°C, besonders bevorzugt 1900 bis 1950°C. Bevorzugt wird der Quarzglaskörper auf eine Temperatur von weniger als 500°C, zum Beispiel von weniger als 200°C oder weniger als 100°C oder weniger als 50°C, besonders bevorzugt auf eine Temperatur im Bereich von 20 bis 30°C abgekühlt.

Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform des ersten Gegenstands der Erfindung kann der erhaltene Quarzglaskörper mit mindestens einer Maßnahme ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus chemischer, thermischer oder mechanischer Behandlung behandelt werden.

Bevorzugt wird der Quarzglaskörper chemisch nachbehandelt. Nachbehandeln betrifft das Behandeln eines bereits gebildeten Quarzglaskörpers. Unter chemischem Nachbehandeln des Quarzglaskörpers wird prinzipiell jede Maßnahme verstanden, die dem Fachmann bekannt ist und geeignet erscheint, durch den Einsatz von Stoffen die chemische Struktur oder die Zusammensetzung der Oberfläche des Quarzglaskörpers, oder beides, zu verändern. Bevorzugt umfasst das chemische Nachbehandeln mindestens eine Maßnahme ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus Behandeln mit Fluorverbindungen und Ultraschallreinigung.

Als Fluorverbindungen kommen insbesondere Fluorwasserstoff und Fluor enthaltende Säuren, zum Beispiel Flusssäure, in Frage. Die Flüssigkeit weist bevorzugt einen Gehalt an Fluorverbindungen in einem Bereich von 35 bis 55 Gew.-%, bevorzugt in einem Bereich von 35 bis 45 Gew.-% auf, die Gew.-% jeweils bezogen auf die Gesamtmenge an Flüssigkeit. Der Rest zu 100 Gew.-% ist üblicherweise Wasser. Bevorzugt wird als Wasser vollentsalztes oder deionisiertes Wasser ausgewählt.

Eine Ultraschallreinigung erfolgt bevorzugt in einem Flüssigkeitsbad, besonders bevorzugt in Anwesenheit von Detergenzien. Im Fall der Ultraschallreinigung kommen in der Regel keine Fluorverbindungen, zum Beispiel weder Flusssäure noch Fluorwasserstoff, zum Einsatz.

Die Ultraschallreinigung des Quarzglaskörpers wird bevorzugt unter mindestens einer, zum Beispiel mindestens zwei oder mindestens drei oder mindestens vier oder mindestens fünf, besonders bevorzugt allen der folgenden Bedingungen durchgeführt:

- Die Ultraschallreinigung erfolgt in einem kontinuierlichen Verfahren.
- Die Anlage zur Ultraschallreinigung weist sechs miteinander durch Rohre verbundene Kammern auf.
- Die Verweilzeit der Quarzglaskörper in jeder Kammer kann eingestellt werden. Bevorzugt ist die Verweilzeit der Quarzglaskörper in jeder Kammer gleich. Bevorzugt liegt die Verweilzeit in jeder Kammer in einem Bereich von 1 bis 120 min, zum Beispiel von weniger als 5 min oder von 1 bis 5 min oder von 2 bis 4 min oder von weniger als 60 min oder von 10 bis 60 min oder von 20 bis 50 min, besonders bevorzugt in einem Bereich von 5 bis 60 min.
- Die erste Kammer umfasst ein basisches Medium, bevorzugt enthaltend Wasser und eine Base, und einen Ultraschallreiniger.
- Die dritte Kammer umfasst ein saures Medium, bevorzugt enthaltend Wasser und eine Säure, und einen Ultraschallreiniger.
- In der zweiten Kammer und in der vierten bis sechsten Kammer wird der Quarzglaskörper mit Wasser, bevorzugt entsalztem Wasser gereinigt.
- Die vierte bis sechste Kammer wird als Kaskade mit Wasser, bevorzugt entsalztem Wasser betrieben. Bevorzugt wird das Wasser nur in die sechste Kammer eingeleitet und läuft von der sechsten in die fünfte und von der fünften in die vierte Kammer.

Bevorzugt wird der Quarzglaskörper thermisch nachbehandelt. Unter thermischem Nachbehandeln des Quarzglaskörpers wird prinzipiell jede Maßnahme verstanden, die dem Fachmann bekannt ist und geeignet erscheint, den Quarzglaskörper durch Einwirkung von Temperatur in seiner Form oder Struktur oder beidem zu verändern. Bevorzugt umfasst das thermische Nachbehandeln mindestens eine Maßnahme ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus Tempern, Stauchen, Aufblasen, Ausziehen, Verschweißen und einer Kombination aus zwei oder mehr davon. Bevorzugt erfolgt die thermische Nachbehandlung ohne das Ziel des Materialabtrags.

Das Tempern erfolgt bevorzugt durch Erhitzen des Quarzglaskörpers in einem Ofen, bevorzugt auf eine Temperatur in einem Bereich von 900 bis 1300 °C, zum Beispiel in einem Bereich von 900 bis 1250°C oder von 1040 bis 1300°C, besonders bevorzugt in einem Bereich von 1000 bis 1050°C oder von 1200 bis 1300°C. Bevorzugt wird bei der thermischen Behandlung eine Temperatur von 1300°C nicht für einen zusammenhängenden Zeitraum von mehr als 1 h überschritten, besonders bevorzugt wird eine Temperatur von 1300°C während der gesamten thermischen Behandlungsdauer nicht überschritten. Das Tempern kann prinzipiell bei vermindertem Druck, bei Normaldruck oder bei erhöhtem Druck erfolgen, bevorzugt bei vermindertem Druck, besonders bevorzugt im Vakuum.

Das Stauchen erfolgt bevorzugt durch Erhitzen des Quarzglaskörpers, bevorzugt auf eine Temperatur von etwa 2100°C, und anschließendes Umformen während einer rotierenden Drehbewegung, bevorzugt mit einer Drehgeschwindigkeit von etwa 60 U/min. Beispielsweise kann ein Quarzglaskörper in Form einer Stange durch Stauchen zu einem Zylinder umgeformt werden.

Bevorzugt kann ein Quarzglaskörper durch Einblasen eines Gases in den Quarzglaskörper aufgeblasen werden. Zum Beispiel kann ein Quarzglaskörper durch Aufblasen zu einem Großrohr umgeformt werden. Bevorzugt wird dazu der Quarzglaskörper, bevorzugt auf eine Temperatur von etwa 2100°C, während eine rotierenden Drehbewegung, bevorzugt mit einer Drehgeschwindigkeit von etwa 60 U/min, ausgeführt wird, erhitzt und der Innenraum mit einem Gas gespült, bevorzugt bei einem definierten und geregelten Innendruck bis etwa 100 mbar. Unter einem Großrohr wird ein Rohr mit einem Außendurchmesser von mindestens 500 mm verstanden.

Ein Quarzglaskörper kann bevorzugt ausgezogen werden. Das Ausziehen erfolgt bevorzugt durch Erhitzen des Quarzglaskörpers, bevorzugt auf eine Temperatur von etwa 2100°C, und anschließendes Ziehen mit einer geregelten Ziehgeschwindigkeit auf den gewünschten Außendurchmesser des Quarzglaskörpers. Zum Beispiel können aus Quarzglaskörpern durch Ausziehen Lampenrohre geformt werden.

Bevorzugt wird der Quarzglaskörper mechanisch nachbehandelt. Unter mechanischem Nachbehandeln des Quarzglaskörpers wird prinzipiell jede Maßnahme verstanden, die dem Fachmann bekannt ist und geeignet erscheint, durch eine abrasive Maßnahme die Gestalt des Quarzglaskörpers zu verändern oder den Quarzglaskörper in mehrere Stücke zu teilen. Insbesondere beinhaltet das mechanische Nachbehandeln mindestens eine Maßnahme ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus Schleifen, Bohren, Honen, Sägen, Wasserstrahlschneiden, Laserstrahlschneiden, Aufrauen durch Sandstrahlen, Fräsen und einer Kombination aus zwei oder mehr davon.

Bevorzugt wird der Quarzglaskörper mit einer Kombination dieser Maßnahmen, zum Beispiel mit einer Kombination aus einer chemischen und einer thermischen Nachbehandlung oder einer chemischen und einer mechanischen Nachbehandlung oder einer thermischen und einer mechanischen Nachbehandlung, besonders bevorzugt mit einer Kombination aus einer chemischen, einer thermischen und einer mechanischen Nachbehandlung behandelt. Weiterhin bevorzugt kann der Quarzglaskörper jeweils, unabhängig voneinander, mehreren der vorgenannten Maßnahmen unterworfen werden.

### **Vorverdichten**

Es ist prinzipiell möglich, das in Schritt i.) bereitgestellte Siliziumdioxidgranulat einem oder mehreren Vorbehandlungsschritten zu unterziehen, bevor es in Schritt ii.) bis zum Erhalt einer Glasschmelze erwärmt wird. Als Vorbehandlungsschritte kommen beispielsweise thermische oder mechanische Behandlungsschritte in Betracht. Zum Beispiel wird das Siliziumdioxidgranulat vor dem Erwärmen in Schritt ii.) verdichtet. Unter „Verdichten“ wird eine Verringerung der BET-Oberfläche und eine Verringerung des Porenvolumens verstanden.

Das Siliziumdioxidgranulat wird bevorzugt thermisch durch Erhitzen des Siliziumdioxidgranulats oder mechanisch durch Ausüben eines Drucks auf das Siliziumdioxidgranulat, beispielsweise Walzen oder Pressen des Siliziumdioxidgranulats, verdichtet. Bevorzugt wird das Siliziumdioxidgranulat durch Erhitzen verdichtet. Besonders bevorzugt erfolgt das Verdichten des Siliziumdioxidgranulats durch Erhitzen mittels einer mit dem Schmelzofen verbundenen Vorheizstrecke.

Bevorzugt wird das Siliziumdioxid durch Erhitzen bei einer Temperatur in einem Bereich von 800 bis 1400°C, zum Beispiel bei einer Temperatur in einem Bereich von 850 bis 1300°C, besonders bevorzugt bei einer Temperatur in einem Bereich von 900 bis 1200°C verdichtet.

- 5 In einer bevorzugten Ausführungsform des ersten Gegenstands der Erfindung wird die BET-Oberfläche des Siliziumdioxidgranulats vor dem Erwärmen in Schritt ii.) nicht auf weniger als 5 m<sup>2</sup>/g verringert, bevorzugt nicht auf weniger als 7 m<sup>2</sup>/g oder nicht auf weniger als 10 m<sup>2</sup>/g, besonders bevorzugt nicht auf weniger als 15 m<sup>2</sup>/g. Es ist weiterhin bevorzugt, dass die BET-Oberfläche des Siliziumdioxidgranulats vor dem Erwärmen in Schritt ii.) gegenüber dem in Schritt i.) bereitgestellten Siliziumdioxidgranulat nicht verringert wird.

- 10 In einer bevorzugten Ausführungsform des ersten Gegenstands der Erfindung wird die BET-Oberfläche des Siliziumdioxidgranulats auf weniger als 20 m<sup>2</sup>/g verringert, zum Beispiel auf weniger als 15 m<sup>2</sup>/g, oder auf weniger als 10 m<sup>2</sup>/g, oder auf einen Bereich von mehr als 5 bis weniger als 20 m<sup>2</sup>/g oder von 7 bis 15 m<sup>2</sup>/g, besonders bevorzugt auf einen Bereich von 9 bis 12 m<sup>2</sup>/g. Bevorzugt wird die BET-Oberfläche des Siliziumdioxidgranulats  
15 vor dem Erwärmen in Schritt ii.) gegenüber dem in Schritt i.) bereitgestellten Siliziumdioxidgranulat um weniger als 40 m<sup>2</sup>/g verringert, zum Beispiel um 1 bis 20 m<sup>2</sup>/g oder um 2 bis 10 m<sup>2</sup>/g, besonders bevorzugt um 3 bis 8 m<sup>2</sup>/g, wobei die BET-Oberfläche nach dem Verdichten mehr als 5 m<sup>2</sup>/g beträgt.

- Das verdichtete Siliziumdioxidgranulat wird im Folgenden als Siliziumdioxidgranulat III bezeichnet. Bevorzugt  
20 weist das Siliziumdioxidgranulat III mindestens eines, zum Beispiel mindestens zwei oder mindestens drei oder mindestens vier, besonders bevorzugt mindestens fünf der folgenden Merkmale auf:

- A. eine BET-Oberfläche in einem Bereich von mehr als 5 bis weniger als 40 m<sup>2</sup>/g, zum Beispiel von 10 bis 30 m<sup>2</sup>/g, besonders bevorzugt auf einen Bereich von 15 bis 25 m<sup>2</sup>/g;
- B. eine Partikelgröße D<sub>10</sub> in einem Bereich von 100 bis 300 µm, besonders bevorzugt in einem Bereich  
25 von 120 bis 200 µm;
- C. eine Partikelgröße D<sub>50</sub> in einem Bereich von 150 bis 550 µm, besonders bevorzugt in einem Bereich von 200 bis 350 µm;
- D. eine Partikelgröße D<sub>90</sub> in einem Bereich von 300 bis 650 µm, besonders bevorzugt in einem Bereich von 400 bis 500 µm;
- 30 E. eine Schüttdichte in einem Bereich von 0,8 bis 1,6 g/cm<sup>3</sup>, besonders bevorzugt von 1,0 bis 1,4 g/cm<sup>3</sup>;
- F. eine Stampfdichte in einem Bereich von 1,0 bis 1,4 g/cm<sup>3</sup>, besonders bevorzugt von 1,15 bis 1,35 g/cm<sup>3</sup>;
- G. eine Menge von Kohlenstoff von weniger als 5 ppm, zum Beispiel von weniger als 4,5 ppm, besonders bevorzugt von weniger als 4 ppm;
- 35 H. einen Cl-Gehalt von weniger als 500 ppm, besonders bevorzugt von 1 ppb bis 200 ppm, wobei die ppm und ppb jeweils auf das Gesamtgewicht des Siliziumdioxidgranulats III bezogen sind.

Das Siliziumdioxidgranulat III weist bevorzugt die Merkmalskombination A./F./G. oder A./F./H. oder A./G./H. auf, besonders bevorzugt die Merkmalskombination A./F./G./H.

Das Siliziumdioxidgranulat III weist bevorzugt die Merkmalskombination A./F./G. auf, wobei die BET-Oberfläche in einem Bereich von 10 bis 30 m<sup>2</sup>/g liegt, die Stampfdichte in einem Bereich von 1,15 bis 1,35 g/mL liegt und der Kohlenstoffgehalt weniger als 4 ppm beträgt.

- 5 Das Siliziumdioxidgranulat III weist bevorzugt die Merkmalskombination A./F./H. auf, wobei die BET-Oberfläche in einem Bereich von 10 bis 30 m<sup>2</sup>/g, die Stampfdichte in einem Bereich von 1,15 bis 1,35 g/mL und der Chlorgehalt in einem Bereich von 1 ppb bis 200 ppm liegt.

- 10 Das Siliziumdioxidgranulat III weist bevorzugt die Merkmalskombination A./G./H. auf, wobei die BET-Oberfläche in einem Bereich von 10 bis 30 m<sup>2</sup>/g liegt, der Kohlenstoffgehalt weniger als 4 ppm beträgt und der Chlorgehalt in einem Bereich von 1 ppb bis 200 ppm liegt.

- 15 Das Siliziumdioxidgranulat III weist bevorzugt die Merkmalskombination A./F./G./H. auf, wobei die BET-Oberfläche in einem Bereich von 10 bis 30 m<sup>2</sup>/g liegt, die Stampfdichte in einem Bereich von 1,15 bis 1,35 g/mL liegt, der Kohlenstoffgehalt weniger als 4 ppm beträgt und der Chlorgehalt in einem Bereich von 1 ppb bis 200 ppm liegt.

- 20 Bevorzugt wird in mindestens einem Verfahrensschritt eine von Siliziumdioxid verschiedene Siliziumkomponente zugegeben. Die Zugabe einer von Siliziumdioxid verschiedenen Siliziumkomponente wird im Folgenden auch als Si-Dotieren bezeichnet. Prinzipiell kann das Si-Dotieren in jedem Verfahrensschritt erfolgen. Bevorzugt erfolgt das Si-Dotieren in Schritt i.) oder in Schritt ii.).

- 25 Die von Siliziumdioxid verschiedene Siliziumkomponente kann prinzipiell in beliebiger Form zugegeben werden, zum Beispiel als Feststoff, als Flüssigkeit, als Gas, in Lösung oder als Dispersion. Bevorzugt wird die von Siliziumdioxid verschiedene Siliziumkomponente als Pulver zugegeben. Ebenfalls bevorzugt wird die von Siliziumdioxid verschiedene Siliziumkomponente als Flüssigkeit oder als Gas zugegeben.

- 30 Die von Siliziumdioxid verschiedene Siliziumkomponente wird bevorzugt in einer Menge in einem Bereich von 1 bis 100.000 ppm zugegeben, zum Beispiel in einem Bereich von 10 bis 10.000 ppm oder von 30 bis 1000 ppm oder in einem Bereich von 50 bis 500 ppm, besonders bevorzugt in einem Bereich von 80 bis 200 ppm, , weiter besonders bevorzugt in einem Bereich von 200 bis 300 ppm, jeweils bezogen auf das Gesamtgewicht an Siliziumdioxid.

- 35 Die von Siliziumdioxid verschiedene Siliziumkomponente kann fest, flüssig oder gasförmig vorliegen. Ist sie fest, weist sie bevorzugt eine mittlere Partikelgröße von bis zu 10 mm auf, zum Beispiel von bis zu 1000 µm von bis zu 400 µm oder in einem Bereich von 1 bis 400 µm, zum Beispiel 2 bis 200 µm oder 3 bis 100 µm, besonders bevorzugt in einem Bereich von 5 bis 50 µm. Die Partikelgrößenangaben sind bezogen auf den Zustand der von Siliziumdioxid verschiedenen Siliziumkomponente bei Raumtemperatur.

Die Siliziumkomponente weist bevorzugt eine Reinheit von mindestens 99.5 Gew.-% auf, zum Beispiel von mindestens 99,8 Gew.-% oder von mindestens 99.9 Gew.-%, besonders bevorzugt von mindestens 99,94 Gew.-%, jeweils bezogen auf das Gesamtgewicht der Siliziumkomponente. Bevorzugt weist die Siliziumkomponente eine Menge an Kohlenstoff von nicht mehr als 1000 ppm auf, zum Beispiel nicht mehr als 700 ppm, besonders bevorzugt nicht mehr als 500 ppm, jeweils bezogen auf das Gesamtgewicht der Siliziumkomponente. Besonders bevorzugt gilt dies für als Siliziumkomponente eingesetztes Silizium. Bevorzugt weist die Siliziumkomponente eine Menge an Verunreinigungen ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus Al, Ca, Co, Cr, Cu, Fe, Ge, Hf, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Ni, Ti, V, W, Zn, Zr von nicht mehr als 250 ppm auf, zum Beispiel nicht mehr als 150 ppm, besonders bevorzugt nicht mehr als 100 ppm, jeweils bezogen auf das Gesamtgewicht der Siliziumkomponente. Besonders bevorzugt gilt dies für als Siliziumkomponente eingesetztes Silizium.

Bevorzugt wird in Verfahrensschritt i.) eine von Siliziumdioxid verschiedene Siliziumkomponente zugegeben. Bevorzugt wird die von Siliziumdioxid verschiedene Siliziumkomponente während des Verarbeitens des Siliziumdioxidpulvers zu einem Siliziumdioxidgranulat zugegeben (Schritt II.). Zum Beispiel kann die von Siliziumdioxid verschiedene Siliziumkomponente vor, während oder nach dem Granulieren zu dem Siliziumdioxid gegeben werden.

Bevorzugt kann das Siliziumdioxid durch Zugabe der von Siliziumdioxid verschiedenen Siliziumkomponente zu der Aufschlämmung beinhaltend Siliziumdioxidpulver Si-dotiert werden. Zum Beispiel wird dazu die von Siliziumdioxid verschiedene Siliziumkomponente mit Siliziumdioxidpulver vermischt und anschließend in einer Flüssigkeit aufgeschlämmt, oder die von Siliziumdioxid verschiedene Siliziumkomponente wird zu einer Aufschlämmung aus Siliziumdioxidpulver in einer Flüssigkeit gegeben und aufgeschlämmt, oder das Siliziumdioxidpulver wird zu einer Aufschlämmung oder Lösung aus der von Siliziumdioxid verschiedenen Siliziumkomponente in einer Flüssigkeit gegeben und aufgeschlämmt.

Bevorzugt kann das Siliziumdioxid durch Zugabe der von Siliziumdioxid verschiedenen Siliziumkomponente beim Granulieren Si-dotiert werden. Es ist prinzipiell möglich, die von Siliziumdioxid verschiedene Siliziumkomponente zu jedem beliebigen Zeitpunkt während des Granulierens zuzugeben. Im Falle des Sprühgranulierens kann die von Siliziumdioxid verschiedene Siliziumkomponente zum Beispiel durch die Düse gemeinsam mit der Aufschlämmung beinhaltend Siliziumdioxidpulver in den Sprühturm gesprüht werden. Im Falle des Rollgranulierens kann die von Siliziumdioxid verschiedene Siliziumkomponente bevorzugt in fester Form oder als Aufschlämmung beinhaltend Siliziumdioxidpulver zum Beispiel nach dem Eintragen der Aufschlämmung beinhaltend Siliziumdioxidpulver in den Rührbehälter gegeben werden.

Weiter bevorzugt kann das Siliziumdioxid durch Zugabe der von Siliziumdioxid verschiedenen Siliziumkomponente nach dem Granulieren Si-dotiert werden. Zum Beispiel kann das Siliziumdioxid bei der Behandlung des Siliziumdioxidgranulats I zum Siliziumdioxidgranulat II dotiert werden, bevorzugt durch Zugabe der von Siliziumdioxid verschiedenen Siliziumkomponente während der thermischen oder mechanischen Behandlung des Siliziumdioxidgranulats I.

Bevorzugt wird das Siliziumdioxidgranulat II mit der von Siliziumdioxid verschiedenen Siliziumkomponente dotiert.

Weiter bevorzugt kann die von Siliziumdioxid verschiedene Siliziumkomponente auch während mehrerer der vorgenannten Abschnitte zugegeben werden, insbesondere während und nach der thermischen oder mechanischen Behandlung des Siliziumdioxidgranulats I zum Siliziumdioxidgranulat II.

Die von Siliziumdioxid verschiedene Siliziumkomponente kann prinzipiell Silizium oder jede dem Fachmann bekannte und reduzierend wirkende Silizium-haltige Verbindung sein. Bevorzugt ist die von Siliziumdioxid verschiedene Siliziumkomponente Silizium, eine Silizium-Wasserstoff-Verbindung, zum Beispiel ein Silan, eine Silizium-Sauerstoff-Verbindung, zum Beispiel Siliziummonooxid, oder eine Silizium-Wasserstoff-Sauerstoff-Verbindung, zum Beispiel Disiloxan. Beispiele für bevorzugte Silane sind Monosilan, Disilan, Trisilan, Tetrasilan, Pentasilan, Hexasilan, Heptasilan, höhere Homologe und Isomere der zuvor genannten, sowie zyklische Silane wie Cyclopentasilan.

Bevorzugt wird in Verfahrensschritt ii.) eine von Siliziumdioxid verschiedene Siliziumkomponente zugegeben.

Bevorzugt kann die von Siliziumdioxid verschiedene Siliziumkomponente zusammen mit dem Siliziumdioxidgranulat direkt in den Schmelztiegel gegeben werden. Bevorzugt kann Silizium als die von Siliziumdioxid verschiedene Siliziumkomponente zusammen mit dem Siliziumdioxidgranulat in den Schmelztiegel gegeben werden. Das Silizium wird bevorzugt als Pulver zugegeben, insbesondere in der für die von Siliziumdioxid verschiedene Siliziumkomponente bereits genannten Partikelgröße.

Bevorzugt wird die von Siliziumdioxid verschiedene Siliziumkomponente vor dem Einführen in den Schmelztiegel zu dem Siliziumdioxidgranulat gegeben. Die Zugabe kann prinzipiell jederzeit nach der Bildung des Granulats erfolgen, zum Beispiel in der Vorheizstrecke, vor oder während dem Vorverdichten des Siliziumdioxidgranulats II oder zu dem Siliziumdioxidgranulat III.

Ein durch Zugabe von einer von Siliziumdioxid verschiedenen Siliziumkomponente erhaltenes Siliziumdioxidgranulat wird im Folgenden als „Si-dotiertes Granulat“ bezeichnet. Bevorzugt weist das Si-dotierte Granulat mindestens eines, zum Beispiel mindestens zwei oder mindestens drei oder mindestens vier, besonders bevorzugt mindestens fünf der folgenden Merkmale auf:

[1] eine BET-Oberfläche in einem Bereich von mehr als 5 bis weniger als 40 m<sup>2</sup>/g, zum Beispiel von 10 bis 30 m<sup>2</sup>/g, besonders bevorzugt in einem Bereich von 15 bis 25 m<sup>2</sup>/g;

[2] eine Partikelgröße D<sub>10</sub> in einem Bereich von 100 bis 300 µm, besonders bevorzugt in einem Bereich von 120 bis 200 µm;

[3] eine Partikelgröße D<sub>50</sub> in einem Bereich von 150 bis 550 µm, besonders bevorzugt in einem Bereich von 200 bis 350 µm;

[4] eine Partikelgröße D<sub>90</sub> in einem Bereich von 300 bis 650 µm, besonders bevorzugt in einem Bereich von 400 bis 500 µm;

[5] eine Schüttdichte in einem Bereich von 0,8 bis 1,6 g/cm<sup>3</sup>, besonders bevorzugt von 1,0 bis 1,4 g/cm<sup>3</sup>;



- [6] eine Stampfdichte in einem Bereich von 1,0 bis 1,4 g/cm<sup>3</sup>, besonders bevorzugt von 1,15 bis 1,35 g/cm<sup>3</sup>;
- [7] eine Menge von Kohlenstoff von weniger als 5 ppm, zum Beispiel von weniger als 4,5 ppm, besonders bevorzugt von weniger als 4 ppm;
- 5 [8] einen Cl-Gehalt von weniger als 500 ppm, besonders bevorzugt von 1 ppb bis 200 ppm;
- [9] einen Al-Gehalt von weniger als 200 ppb, besonders bevorzugt von 1 ppb bis 100 ppb;
- [10] einen Metallgehalt von Metallen, die von Aluminium verschieden sind, von weniger als 1000 ppb, zum Beispiel in einem Bereich von 1 bis 400 ppb, besonders bevorzugt in einem Bereich von 1 bis 200 ppb;
- [11] eine Restfeuchte von weniger als 3 Gew.-%, zum Beispiel in einem Bereich von 0,001 Gew.-% bis 2
- 10 Gew.-%, besonders bevorzugt von 0,01 bis 1 Gew.-%;
- wobei die Gew.-%, ppm und ppb jeweils auf das Gesamtgewicht des Si-dotierten Granulats bezogen sind.

15 In einer bevorzugten Ausführungsform des ersten Gegenstands der Erfindung wird die Schmelzenergie über eine feste Oberfläche auf das Siliziumdioxidgranulat übertragen.

Als feste Oberfläche wird eine Oberfläche verstanden, die von der Oberfläche des Siliziumdioxidgranulats verschieden ist und die bei Temperaturen, auf die das Siliziumdioxidgranulat zum Schmelzen erhitzt wird, nicht schmilzt oder sich zersetzt. Geeignete Materialien der festen Oberfläche sind zum Beispiel die als Tiegelmateria-

20 lien geeigneten Materialien.

Die feste Oberfläche kann prinzipiell jede dem Fachmann bekannte und für diese zwecke geeignete Oberfläche sein. Zum Beispiel kann als feste Oberfläche der Tiegel oder ein separates Bauteil, das nicht der Tiegel ist, verwendet werden.

25 Die feste Oberfläche kann prinzipiell auf allen dem Fachmann bekannten und für diese Zwecke geeigneten Wegen erhitzt werden, um die Schmelzenergie auf das Siliziumdioxidgranulat zu übertragen. Bevorzugt wird die feste Oberfläche durch resistive Beheizung oder Induktionsheizung erhitzt. Bei induktiver Heizung wird die Energie direkt durch Spulen in die feste Oberfläche eingekoppelt und von dort an deren Innenseite abgegeben.

30 Bei resistiver Heizung wird die feste Oberfläche von außen erwärmt und gibt die Energie von dort an deren Innenseite ab. Dabei ist ein Heizraumgas mit niedrigerer Wärmekapazität, beispielsweise eine Argonatmosphäre oder eine argonhaltige Atmosphäre, vorteilhaft. Zum Beispiel kann die feste Oberfläche elektrisch oder auch durch Befeuern der festen Oberfläche mit einer Flamme von außen erhitzt werden. Bevorzugt wird die feste Oberfläche auf eine Temperatur erhitzt, die eine zum Schmelzen des Siliziumdioxidgranulats ausreichende Energie-

35 menge auf das Siliziumdioxidgranulat und/oder bereits zum Teil geschmolzenes Siliziumdioxidgranulat übertragen kann.

Wird als feste Oberfläche ein separates Bauteil verwendet, kann dieses in beliebiger Weise mit dem Siliziumdioxidgranulat in Kontakt gebracht werden, zum Beispiel durch Auflegen des Bauteils auf das Siliziumdioxidgranulat oder durch Einführen des Bauteils zwischen die Granulen des Siliziumdioxidgranulats oder durch Unterschieben des Bauteils zwischen Tiegel und Siliziumdioxidgranulat oder durch eine Kombination von zwei oder mehr

40

davon. Das Bauteil kann vor oder während oder vor und während des Übertragens der Schmelzenergie erhitzt werden.

Bevorzugt wird die Schmelzenergie über die Tiegellinnenseite auf das Siliziumdioxidgranulat übertragen. Dabei wird der Tiegel soweit erhitzt, dass das Siliziumdioxidgranulat schmilzt. Der Tiegel wird bevorzugt resistiv oder induktiv erhitzt. Die Wärme wird von der Außenseite auf die Innenseite des Tiegels übertragen. Die feste Oberfläche der Tiegellinnenseite überträgt die Schmelzenergie auf das Siliziumdioxidgranulat.

Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung wird die Schmelzenergie auf das Siliziumdioxidgranulat nicht über einen Gasraum auf das Siliziumdioxidgranulat übertragen. Weiter bevorzugt wird die Schmelzenergie auf das Siliziumdioxidgranulat nicht durch Befeuern des Siliziumdioxidgranulats mit einer Flamme übertragen. Beispiele für diese ausgeschlossenen Energieübertragungswege sind Richten von einer oder mehreren Brennerflammen von oben in den Schmelztiegel, oder auf das Siliziumdioxid, oder beides.

Das vorstehend beschriebene Verfahren gemäß dem ersten Gegenstand der Erfindung betrifft die Herstellung eines Quarzglaskörpers.

Bevorzugt weist der Quarzglaskörper mindestens eines der folgenden Merkmale, zum Beispiel mindestens zwei oder mindestens drei oder mindestens vier, besonders bevorzugt mindestens fünf der folgenden Merkmale auf:

- A] einen OH-Gehalt von weniger als 500 ppm, zum Beispiel von weniger als 400 ppm, besonders bevorzugt von weniger als 300 ppm;
- B] einen Chlorgehalt von weniger als 60 ppm, bevorzugt von weniger als 40 ppm, zum Beispiel von weniger als 40 ppm oder weniger als 2 ppm oder weniger als 0,5 ppm, besonders bevorzugt von weniger als 0,1 ppm;
- C] einen Aluminiumgehalt von weniger als 200 ppb, zum Beispiel von weniger als 100 ppb, besonders bevorzugt von weniger als 80 ppb;
- D] einen ODC-Anteil von weniger als  $5 \cdot 10^{15} / \text{cm}^3$ , zum Beispiel in einem Bereich von  $0,1 \cdot 10^{15}$  bis  $3 \cdot 10^{15} / \text{cm}^3$ , besonders bevorzugt in einem Bereich von  $0,5 \cdot 10^{15}$  bis  $2,0 \cdot 10^{15} / \text{cm}^3$ ;
- E] einen Metallgehalt von Metallen, die von Aluminium verschieden sind, von weniger als 1 ppm, zum Beispiel von weniger als 0,5 ppm, besonders bevorzugt von weniger als 0,1 ppm;
- F] eine Viskosität ( $p=1013 \text{ hPa}$ ) in einem Bereich von  $\log_{10} (\eta (1250^\circ\text{C}) / \text{dPas}) = 11,4$  bis  $\log_{10} (\eta (1250^\circ\text{C}) / \text{dPas}) = 12,9$  und/oder  $\log_{10} (\eta (1300^\circ\text{C}) / \text{dPas}) = 11,1$  bis  $\log_{10} (\eta (1300^\circ\text{C}) / \text{dPas}) = 12,2$  und/oder  $\log_{10} (\eta (1350^\circ\text{C}) / \text{dPas}) = 10,5$  bis  $\log_{10} (\eta (1350^\circ\text{C}) / \text{dPas}) = 11,5$ ;
- G] eine Standardabweichung des OH-Gehalts von nicht mehr als 10 %, bevorzugt nicht mehr als 5 %, bezogen auf den OH-Gehalt A] des Quarzglaskörpers;
- H] eine Standardabweichung des Chlorgehalts von nicht mehr als 10 %, bevorzugt nicht mehr als 5 %, bezogen auf den Chlorgehalt B] des Quarzglaskörpers;
- I] eine Standardabweichung des Aluminiumgehalts von nicht mehr als 10 %, bevorzugt nicht mehr als 5 %, bezogen auf den Aluminiumgehalt C] des Quarzglaskörpers;
- J] eine Brechzahlhomogenität von weniger als  $10^{-4}$ ;
- K] eine zylindrische Form,

L] einen Wolframgehalt von weniger als 1000 ppb, zum Beispiel von weniger als 500 ppb oder von weniger als 300 ppb oder von weniger als 100 ppb oder in einem Bereich von 1 bis 500 ppb oder von 1 bis 300 ppb, besonders bevorzugt in einem Bereich von 1 bis 100 ppb;

M] einen Molybdängehalt von weniger als 1000 ppb, zum Beispiel von weniger als 500 ppb oder von weniger als 300 ppb oder von weniger als 100 ppb oder in einem Bereich von 1 bis 500 ppb oder von 1 bis 300 ppb, besonders bevorzugt in einem Bereich von 1 bis 100 ppb,

wobei die ppb und ppm jeweils auf das Gesamtgewicht des Quarzglaskörpers bezogen sind.

Bevorzugt weist der Quarzglaskörper einen Metallgehalt an von Aluminium verschiedenen Metallen von weniger als 1000 ppb, zum Beispiel von weniger als 500 ppb, besonders bevorzugt von weniger als 100 ppb, jeweils bezogen auf das Gesamtgewicht des Quarzglaskörpers, auf. Oftmals weist der Quarzglaskörper jedoch einen Gehalt an von Aluminium verschiedenen Metallen in einer Menge von mindestens 1 ppb auf. Solche Metalle sind beispielsweise Natrium, Lithium, Kalium, Magnesium, Calcium, Strontium, Germanium, Kupfer, Molybdän, Titan, Eisen und Chrom. Diese können zum Beispiel als Element, als Ion, oder als Teil eines Moleküls oder eines Ions oder eines Komplexes vorliegen.

Der Quarzglaskörper kann weitere Bestandteile beinhalten. Bevorzugt beinhaltet der Quarzglaskörper weniger als 500 ppm, zum Beispiel weniger als 450 ppm, besonders bevorzugt weniger als 400 ppm an weiteren Bestandteilen, wobei die ppm jeweils bezogen sind auf das Gesamtgewicht des Quarzglaskörpers. Als weitere Bestandteile kommen zum Beispiel Kohlenstoff, Fluor, Jod, Brom und Phosphor in Betracht. Diese können zum Beispiel als Element, als Ion, oder als Teil eines Moleküls oder eines Ions oder eines Komplexes vorliegen. Oftmals weist der Quarzglaskörper jedoch einen Gehalt an weiteren Bestandteilen in einer Menge von mindestens 1 ppb auf.

Bevorzugt beinhaltet der Quarzglaskörper Kohlenstoff in einer Menge von weniger als 5 ppm, zum Beispiel weniger als 4,5 ppm, besonders bevorzugt weniger als 4 ppm, jeweils bezogen auf das Gesamtgewicht des Quarzglaskörpers. Oftmals weist der Quarzglaskörper jedoch einen Gehalt an Kohlenstoff in einer Menge von mindestens 1 ppb auf.

Bevorzugt weist der Quarzglaskörper eine homogen verteilte OH-Menge, Cl-Menge oder Al-Menge auf. Ein Indikator für die Homogenität des Quarzglaskörpers kann in der Standardabweichung der OH-Menge, Cl-Menge oder Al-Menge ausgedrückt werden. Die Standardabweichung ist das Maß für die Streubreite der Werte einer Variablen, hier der OH-Menge, Chlormenge oder Aluminiummenge, um deren arithmetisches Mittel. Zur Bestimmung der Standardabweichung wird der Gehalt der zu bestimmenden Komponente in der Probe, z.B. OH, Chlor oder Aluminium, an mindestens sieben Messpunkten bestimmt.

Der Quarzglaskörper weist bevorzugt die Merkmalskombination A]/B]/C] oder A]/B]/D] oder A]/B]/F] auf, weiter bevorzugt die Merkmalskombination A]/B]/C]/D] oder A]/B]/C]/F] oder A]/B]/D]/F], besonders bevorzugt die Merkmalskombination A]/B]/C]/D]/F].

Der Quarzglaskörper weist bevorzugt die Merkmalskombination A]/B]/C] auf, wobei der OH-Gehalt weniger als 400 ppm, der Chlorgehalt weniger als 100 ppm und der Aluminiumgehalt weniger als 80 ppb beträgt.

Der Quarzglaskörper weist bevorzugt die Merkmalskombination A]/B]/D] auf, der OH-Gehalt weniger als 400 ppm beträgt, der Chlorgehalt weniger als 100 ppm beträgt und der ODC-Anteil in einem Bereich von  $0,1 \cdot 10^{15}$  bis  $3 \cdot 10^{15} / \text{cm}^3$  liegt.

5

Der Quarzglaskörper weist bevorzugt die Merkmalskombination A]/B]/F] auf, wobei der OH-Gehalt weniger als 400 ppm, der Chlorgehalt weniger als 100 ppm und die Viskosität ( $p=1013 \text{ hPa}$ ) in einem Bereich von  $\log_{10} (\eta (1250^\circ\text{C}) / \text{dPas}) = 11,4$  bis  $\log_{10} (\eta (1250^\circ\text{C}) / \text{dPas}) = 12,9$  liegt.

10 Der Quarzglaskörper weist bevorzugt die Merkmalskombination A]/B]/C]/D] auf, wobei der OH-Gehalt weniger als 400 ppm, der Chlorgehalt weniger als 100 ppm, der Aluminiumgehalt weniger als 80 ppb beträgt und der ODC-Anteil in einem Bereich von  $0,1 \cdot 10^{15}$  bis  $3 \cdot 10^{15} / \text{cm}^3$  liegt.

15 Der Quarzglaskörper weist bevorzugt die Merkmalskombination A]/B]/C]/F] auf, wobei der OH-Gehalt weniger als 400 ppm, der Chlorgehalt weniger als 100 ppm, der Aluminiumgehalt weniger als 80 ppb beträgt und die Viskosität ( $p=1013 \text{ hPa}$ ) in einem Bereich von  $\log_{10} (\eta (1250^\circ\text{C}) / \text{dPas}) = 11,4$  bis  $\log_{10} (\eta (1250^\circ\text{C}) / \text{dPas}) = 12,9$  liegt.

20 Der Quarzglaskörper weist bevorzugt die Merkmalskombination A]/B]/D]/F] auf, wobei der OH-Gehalt weniger als 400 ppm beträgt, der Chlorgehalt weniger als 100 ppm beträgt, der ODC-Anteil in einem Bereich von  $0,1 \cdot 10^{15}$  bis  $3 \cdot 10^{15} / \text{cm}^3$  liegt und die Viskosität ( $p=1013 \text{ hPa}$ ) in einem Bereich von  $\log_{10} (\eta (1250^\circ\text{C}) / \text{dPas}) = 11,4$  bis  $\log_{10} (\eta (1250^\circ\text{C}) / \text{dPas}) = 12,9$  liegt.

25 Der Quarzglaskörper weist bevorzugt die Merkmalskombination A]/B]/C]/D]/F] auf, wobei der OH-Gehalt weniger als 400 ppm, der Chlorgehalt weniger als 100 ppm, der Aluminiumgehalt weniger als 80 ppb beträgt und der ODC-Anteil in einem Bereich von  $0,1 \cdot 10^{15}$  bis  $3 \cdot 10^{15} / \text{cm}^3$  liegt und die Viskosität ( $p=1013 \text{ hPa}$ ) in einem Bereich von  $\log_{10} (\eta (1250^\circ\text{C}) / \text{dPas}) = 11,4$  bis  $\log_{10} (\eta (1250^\circ\text{C}) / \text{dPas}) = 12,9$  liegt.

### 30 **Schritt iv.)**

Erfindungsgemäß beinhaltet das Verfahren als Schritt iv.) das Zerkleinern des Quarzglaskörpers aus Schritt iii.). Es wird eine Quarzglaskörnung erhalten. Das Zerkleinern des Quarzglaskörpers kann prinzipiell auf allen dem Fachmann bekannten und für diese Zwecke geeigneten Wegen erfolgen. Bevorzugt wird der Quarzglaskörper mechanisch oder elektromechanisch zerkleinert.

35

Besonders bevorzugt wird der Quarzglaskörper elektromechanisch zerkleinert. Bevorzugt erfolgt das elektromechanische Zerkleinern mit Hilfe von Hochspannungsentladungspulsen, zum Beispiel mit Hilfe eines Lichtbogens.

Bevorzugt wird der Quarzglaskörper zu Partikeln mit einer Partikelgröße  $D_{50}$  in einem Bereich von  $50 \mu\text{m}$  bis  $5 \text{ mm}$  zerkleinert. Es ist bevorzugt, den Quarzglaskörper zu einer Quarzglaskörnung mit einer Partikelgröße  $D_{50}$  in einem Bereich von  $50 \mu\text{m}$  bis  $500 \mu\text{m}$  zu zerkleinern, zum Beispiel in einem Bereich von  $75$  bis  $350 \mu\text{m}$ , beson-

40

ders bevorzugt in einem Bereich von 100 bis 250  $\mu\text{m}$ . Es ist außerdem bevorzugt, den Quarzglaskörper zu einer Quarzglaskörnung mit einer Partikelgröße  $D_{50}$  in einem Bereich von 500  $\mu\text{m}$  bis 5 mm zu zerkleinern, zum Beispiel in einem Bereich von 750  $\mu\text{m}$  bis 3,5 mm, besonders bevorzugt in einem Bereich von 1 bis 2,5 mm.

- 5 Im Rahmen einer weiteren Ausführungsform ist es möglich, dass der Quarzglaskörper erst elektromechanisch und anschließend mechanisch weiter zerkleinert wird. Bevorzugt erfolgt das elektromechanische Zerkleinern wie vorstehend beschrieben. Bevorzugt wird der Quarzglaskörper elektromechanisch auf Partikel mit einer Partikelgröße  $D_{50}$  von mindestens 2 mm, zum Beispiel in einem Bereich von 2 bis 50 mm oder von 2,5 bis 20 mm, besonders bevorzugt in einem Bereich von 3 bis 5 mm zerkleinert.

10 Bevorzugt erfolgt das mechanische Zerkleinern durch Druckzerkleinerung, Prallzerkleinerung, Schlagzerkleinerung, Scherung oder Reibung, bevorzugt mit Hilfe von Brechern oder Mühlen, zum Beispiel mit Hilfe von Backenbrechern, Walzenbrechern, Kegelbrechern, Prallbrechern, Hammerbrechern, Schreddern oder Kugelmühlen, besonders bevorzugt mit Hilfe von Backenbrechern oder Walzenbrechern.

15 Bevorzugt weist die nach dem mechanischen Zerkleinern erhaltene Quarzglaskörnung eine Partikelgröße  $D_{50}$  in einem Bereich von 50  $\mu\text{m}$  bis 5 mm auf. Weiter bevorzugt liegt.

20 Bevorzugt wird eine Quarzglaskörnung, deren Herstellung ein mechanisches Zerkleinern umfasst, in einem weiteren Bearbeitungsschritt gereinigt. Bevorzugte Reinigungsmaßnahmen sind Flotationsschritte, Magnetscheiden, Säuerung, bevorzugt mit HF, Heißchlorieren mit HCl,  $\text{Cl}_2$  oder einer Kombination davon.

25 Bevorzugt wird der Feinanteil der Quarzglaskörnung entfernt. Die Entfernung des Feinanteils erfolgt zum Beispiel durch Sichten oder Sieben oder eine Kombination davon. Als Feinanteil wird Quarzglaskörnung mit einer Korngröße von weniger als 10  $\mu\text{m}$ , zum Beispiel von weniger als 20  $\mu\text{m}$  oder von weniger als 30  $\mu\text{m}$ , besonders bevorzugt von weniger als 50  $\mu\text{m}$  entfernt.

Bevorzugt weist die Quarzglaskörnung mindestens eines, zum Beispiel mindestens zwei oder mindestens drei oder mindestens vier, besonders bevorzugt mindestens fünf der folgenden Merkmale auf:

- 30 I/ einen OH-Gehalt von weniger als 500 ppm, zum Beispiel von weniger als 400 ppm, besonders bevorzugt von weniger als 300 ppm;
- II/ einen Chlorgehalt von weniger als 60 ppm, bevorzugt von weniger als 40 ppm, zum Beispiel von weniger als 40 ppm oder weniger als 2 ppm oder weniger als 0,5 ppm, besonders bevorzugt von weniger als 0,1 ppm;
- 35 III/ einen Aluminiumgehalt von weniger als 1000 ppb, zum Beispiel von weniger als 500 ppb, besonders bevorzugt von weniger als 200 ppb;
- IV/ eine BET-Oberfläche von weniger als 1  $\text{m}^2/\text{g}$ , zum Beispiel von weniger als 0,5  $\text{m}^2/\text{g}$ , besonders bevorzugt von weniger als 0,2  $\text{m}^2/\text{g}$ ;
- 40 V/ eine Schüttdichte in einem Bereich von 1,1 bis 1,4  $\text{g}/\text{cm}^3$ , zum Beispiel in einem Bereich von 1,15 bis 1,35  $\text{g}/\text{cm}^3$ , besonders bevorzugt in einem Bereich von 1,2 bis 1,3  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;

- VI/ eine Partikelgröße  $D_{50}$  für den Schmelzeinsatz in einem Bereich von 50 bis 500  $\mu\text{m}$ , zum Beispiel in einem Bereich von 75 bis 350  $\mu\text{m}$ , besonders bevorzugt in einem Bereich von 100 bis 250  $\mu\text{m}$ ;
- VII/ eine Partikelgröße  $D_{50}$  für den Schlickereinsatz 0,5 bis 5 mm, zum Beispiel in einem Bereich von 750  $\mu\text{m}$  bis 3,5 mm, besonders bevorzugt in einem Bereich von 1 bis 2,5 mm;
- 5 VIII/ einen Metallgehalt von Metallen, die von Aluminium verschieden sind, von weniger als 2000 ppb, zum Beispiel von weniger als 500 ppb, besonders bevorzugt von weniger als 100 ppb;
- IX/ eine Viskosität ( $p=1013 \text{ hPa}$ ) in einem Bereich von  $\log_{10} (\eta (1250^\circ\text{C}) / \text{dPas}) = 11,4$  bis  $\log_{10} (\eta (1250^\circ\text{C}) / \text{dPas}) = 12,9$  und/oder  $\log_{10} (\eta (1300^\circ\text{C}) / \text{dPas}) = 11,1$  bis  $\log_{10} (\eta (1300^\circ\text{C}) / \text{dPas}) = 12,2$  und/oder  $\log_{10} (\eta (1350^\circ\text{C}) / \text{dPas}) = 10,5$  bis  $\log_{10} (\eta (1350^\circ\text{C}) / \text{dPas}) = 11,5$ ;
- 10 wobei die ppm und ppb jeweils auf das Gesamtgewicht der Quarzglaskörnung bezogen sind.

Bevorzugt weist die Quarzglaskörnung einen Metallgehalt an von Aluminium verschiedenen Metallen von weniger als 1000 ppb, zum Beispiel von weniger als 500 ppb, besonders bevorzugt von weniger als 100 ppb, jeweils bezogen auf das Gesamtgewicht der Quarzglaskörnung, auf. Oftmals weist die Quarzglaskörnung jedoch einen

15 Gehalt an von Aluminium verschiedenen Metallen in einer Menge von mindestens 1 ppb auf. Solche Metalle sind beispielsweise Natrium, Lithium, Kalium, Magnesium, Calcium, Strontium, Germanium, Kupfer, Molybdän, Titan, Eisen und Chrom. Diese können zum Beispiel als Element, als Teil eines Moleküls oder eines Ions oder eines Komplexes vorliegen.

20 Die Quarzglaskörnung kann weitere Bestandteile beinhalten. Bevorzugt beinhaltet die Quarzglaskörnung weniger als 500 ppm, zum Beispiel weniger als 450 ppm, besonders bevorzugt weniger als 400 ppm an weiteren Bestandteilen, wobei die ppm jeweils bezogen sind auf das Gesamtgewicht der Quarzglaskörnung. Oftmals weist die Quarzglaskörnung jedoch einen Gehalt an weiteren Bestandteilen in einer Menge von mindestens 1 ppb auf.

25 Bevorzugt beinhaltet die Quarzglaskörnung Kohlenstoff in einer Menge von weniger als 5 ppm, zum Beispiel weniger als 4 ppm oder weniger als 3 ppm, besonders bevorzugt weniger als 2 ppm, jeweils bezogen auf das Gesamtgewicht der Quarzglaskörnung. Oftmals weist die Quarzglaskörnung jedoch einen Gehalt an Kohlenstoff in einer Menge von mindestens 1 ppb auf.

30 Die Quarzglaskörnung weist bevorzugt die Merkmalskombination I//II//III/ oder I//II//IV/ oder I//II//V/ auf, weiter bevorzugt die Merkmalskombination I//II//III/IV/ oder I//II//III/V/ oder I//II//IV/V/, besonders bevorzugt die Merkmalskombination I//II//III/IV/V/.

Die Quarzglaskörnung weist bevorzugt die Merkmalskombination I//II//III/ auf, wobei der OH-Gehalt weniger als

35 400 ppm, der Chlorgehalt weniger als 40 ppm und der Aluminiumgehalt weniger als 200 ppb beträgt.

Die Quarzglaskörnung weist bevorzugt die Merkmalskombination I//II//IV/ auf, der OH-Gehalt weniger als 400 ppm, der Chlorgehalt weniger als 40 ppm und die BET-Oberfläche weniger als  $0,5 \text{ m}^2/\text{g}$  beträgt.

Die Quarzglaskörnung weist bevorzugt die Merkmalskombination I//II//V/ auf, wobei der OH-Gehalt weniger als 400 ppm beträgt, der Chlorgehalt weniger als 40 ppm beträgt und die Schüttdichte in einem Bereich von 1,15 bis 1,35 g/cm<sup>3</sup> liegt.

- 5 Die Quarzglaskörnung weist bevorzugt die Merkmalskombination I//II//III//IV/ auf, wobei der OH-Gehalt weniger als 400 ppm, der Chlorgehalt weniger als 40 ppm, der Aluminiumgehalt weniger als 200 ppb und die BET-Oberfläche weniger als 0,5 m<sup>2</sup>/g beträgt.

- 10 Die Quarzglaskörnung weist bevorzugt die Merkmalskombination I//II//III//V/ auf, wobei der OH-Gehalt weniger als 400 ppm beträgt, der Chlorgehalt weniger als 40 ppm beträgt, der Aluminiumgehalt weniger als 200 ppb beträgt und die Schüttdichte in einem Bereich von 1,15 bis 1,35 g/cm<sup>3</sup> liegt.

- 15 Die Quarzglaskörnung weist bevorzugt die Merkmalskombination I//II//IV//V/ auf, wobei der OH-Gehalt weniger als 400 ppm beträgt, der Chlorgehalt weniger als 40 ppm beträgt, die BET-Oberfläche weniger als 0,5 m<sup>2</sup>/g beträgt und die Schüttdichte in einem Bereich von 1,15 bis 1,35 g/cm<sup>3</sup> liegt.

- 20 Die Quarzglaskörnung weist bevorzugt die Merkmalskombination I//II//III//IV//V/ auf, wobei der OH-Gehalt weniger als 400 ppm beträgt, der Chlorgehalt weniger als 40 ppm beträgt, der Aluminiumgehalt weniger als 200 ppb beträgt, die BET-Oberfläche weniger als 0,5 m<sup>2</sup>/g beträgt und die Schüttdichte in einem Bereich von 1,15 bis 1,35 g/cm<sup>3</sup> liegt.

#### Schritt v.)

- 25 Erfindungsgemäß beinhaltet das Verfahren als Schritt v.) das Verarbeiten der Quarzglaskörnung zu einer Vorform.

- 30 Prinzipiell sind alle dem Fachmann bekannten und zum Formen einer Vorform aus einer Körnung geeigneten Verfahren möglich. Die Vorform kann zum Beispiel aus einer trockenen Quarzglaskörnung oder aus einer Aufschlämmung einer Quarzglaskörnung gebildet werden.

- Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform des ersten Gegenstands der Erfindung beinhaltet das Bilden der Vorform folgende Einzelschritte:

- v.-1.) Erzeugen einer Aufschlämmung der Quarzglaskörnung mit einer Flüssigkeit; und
- v.-2.) Formen einer Vorform aus der Aufschlämmung unter Verlust von Flüssigkeit.

- 35 Gemäß Schritt v.-1.) wird zunächst eine Aufschlämmung der Quarzglaskörnung mit einer Flüssigkeit gebildet, im Folgenden als „Aufschlämmung beinhaltend Quarzglaskörnung“ bezeichnet.

- 40 Als Flüssigkeit eignen sich prinzipiell alle dem Fachmann bekannten und zum vorliegenden Einsatzzweck geeignet erscheinende Stoffe und Stoffgemische. Bevorzugt ist die Flüssigkeit ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus organischen Flüssigkeiten und Wasser.

Bevorzugt eignen sich als Flüssigkeit polare Lösungsmittel. Dies können organische Flüssigkeiten oder Wasser sein. Bevorzugt ist die Flüssigkeit ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus Wasser, Methanol, Ethanol, n-Propanol, iso-Propanol, n-Butanol, tert-Butanol und Mischungen aus mehr als einem davon. Besonders bevorzugt ist die Flüssigkeit Wasser. Besonders bevorzugt beinhaltet die Flüssigkeit destilliertes oder entionisiertes Wasser.

Die Quarzglaskörnung und die Flüssigkeit können in beliebiger Weise gemischt werden. Zum Beispiel kann die Quarzglaskörnung zu der Flüssigkeit, oder die Flüssigkeit zu der Quarzglaskörnung gegeben werden. Das Gemisch kann während des Zugebens oder nach dem Zugeben bewegt werden. Besonders bevorzugt wird das Gemisch während und nach dem Zugeben bewegt. Beispiele für das Bewegen sind ein Schütteln und ein Rühren, oder eine Kombination von beidem. Bevorzugt kann die Quarzglaskörnung unter Rühren zu der Flüssigkeit gegeben werden. Weiter bevorzugt kann ein Teil der Quarzglaskörnung zu der Flüssigkeit gegeben, wobei das so erhaltene Gemisch bewegt wird, und das Gemisch anschließend mit dem übrigen Teil der Quarzglaskörnung vermischt werden. Ebenso kann ein Teil der Flüssigkeit zu der Quarzglaskörnung gegeben, wobei das so erhaltene Gemisch bewegt wird, und das Gemisch anschließend mit dem übrigen Teil der Flüssigkeit vermischt wird.

Bevorzugt hat die Aufschlämmung beinhaltend Quarzglaskörnung ein Litergewicht im Bereich von 700 bis 2000 g/L, zum Beispiel im Bereich von 1000 bis 1900 g/L oder von 1200 bis 1800 g/L, besonders bevorzugt im Bereich von 1400 bis 1700 g/L. Das Litergewicht wird mittels Auswiegen eines volumenkalierten Behälters bestimmt. Bevorzugt beträgt der Feststoffanteil in der Flüssigkeit mindestens 70 %, zum Beispiel mindestens 75 %, weiter bevorzugt von 75 bis 80 %, jeweils bezogen auf das Gesamtgewicht der Flüssigkeit. Oftmals werden 85 % Feststoffanteil nicht überschritten, bezogen auf das Gesamtgewicht der Flüssigkeit.

Die in die Flüssigkeit eingebrachte Quarzglaskörnung weist bevorzugt eine Partikelgröße  $D_{50}$  in einem Bereich von 50  $\mu\text{m}$  bis 5 mm auf.

Eine Aufschlämmung beinhaltend eine Quarzglaskörnung mit einer Partikelgröße  $D_{50}$  von mehr als 500  $\mu\text{m}$  wird bevorzugt vor dem Weiterverarbeiten gemäß Schritt v.-2.) einem Mahlverfahren unterzogen.

Eine Aufschlämmung beinhaltend eine Quarzglaskörnung mit einer Partikelgröße  $D_{50}$  in einem Bereich von 50 bis 500  $\mu\text{m}$  kann direkt gemäß Schritt v.-2.) weiter verarbeitet werden.

Bevorzugt wird eine Aufschlämmung beinhaltend eine Quarzglaskörnung mit einer Partikelgröße  $D_{50}$  in einem Bereich von 50 bis 500  $\mu\text{m}$  vor dem Weiterverarbeiten gemäß Schritt v.-2.) einem Mahlverfahren unterzogen. Die im Anschluss an ein Mahlverfahren erhaltene Aufschlämmung beinhaltet bevorzugt eine Quarzglaskörnung mit einer Partikelgröße  $D_{50}$  in einem Bereich von 10 bis 60  $\mu\text{m}$ . Prinzipiell können alle dem Fachmann bekannten und zu diesem Zwecke geeigneten Mahlverfahren an der Aufschlämmung durchgeführt werden.

Gemäß Schritt v.-2.) wird aus der Aufschlämmung beinhaltend Quarzglaskörnung unter Verlust von Flüssigkeit eine Vorform gebildet.



Bevorzugt wird die Vorform in einem Behälter gebildet, bevorzugt in einem Behälter aus einem wasserdurchlässigen Material, besonders bevorzugt in einem Behälter aus Gips oder aus Kunststoff. Bevorzugt wird die Aufschlammung in dem Behälter entwässert unter Bildung eines Grünkörpers. Der Grünkörper wird bevorzugt aus dem Behälter entnommen, getrocknet, bearbeitet und gesintert. Das Entwässern erfolgt bevorzugt durch Saugen, Pressen oder Zentrifugieren, wobei die Flüssigkeit bevorzugt durch das Material des Behälter hindurchtritt.

Bevorzugt wird der Grünkörper mit einem gegenüber Normaldruck reduzierten Druck beaufschlagt, bevorzugt in einem Bereich von 0,001 bis 0,9 bar, zum Beispiel in einem Bereich von 0,01 bis 0,5 bar, besonders bevorzugt in einem Bereich von 0,05 bis 0,2 bar.

Bevorzugt wird der Grünkörper mittels eines Druckgussverfahrens getrocknet, wobei die Flüssigkeit über einen Druckgradienten aus dem Grünkörper gedrückt wird. Bevorzugt wird dazu ein Überdruck von oben oder ein Unterdruck von unten oder beides angelegt. Durch einen Überdruck von oben werden der Grünkörper und darin befindliche Flüssigkeit nach unten in die Form gedrückt, wobei die Flüssigkeit durch die Form gedrückt und so aus dem Grünkörper entfernt wird. Unter einem Überdruck wird ein gegenüber Normaldruck erhöhter Druck verstanden. Der Überdruck liegt bevorzugt in einem Bereich von 1,2 bis 10 bar, besonders bevorzugt in einem Bereich von 1,5 bis 2,5 bar. Bei einem Unterdruck von unten wird unterhalb der Form von außen ein verminderter Druck aufgebaut. Unter einem Unterdruck wird ein gegenüber Normaldruck verminderter Druck verstanden. Durch den Unterdruck wird Flüssigkeit nach unten durch die Form gesaugt und dadurch aus dem Grünkörper entfernt. Bevorzugt wird ein Unterdruck in einem Bereich von 0,001 bis 0,9 bar, zum Beispiel in einem Bereich von 0,01 bis 0,5 bar, besonders bevorzugt in einem Bereich von 0,05 bis 0,2 bar.

Bevorzugt wird der Grünkörper nach Entnahme aus dem Behälter getrocknet, zum Beispiel durch Erhitzen, zum Beispiel auf eine Temperatur in einem Bereich von 30 bis 700°C oder von 30 bis 100°C, besonders bevorzugt von 40 bis 90°C.

Bevorzugt wird der Grünkörper bei der oben beschriebenen Temperatur für eine Zeitdauer in einem Bereich von 4 h bis 14 Tagen temperiert, zum Beispiel für eine Zeitdauer in einem Bereich von 10 h bis 10 Tagen oder von 1 Tag bis 7 Tagen, besonders bevorzugt von 3 bis 5 Tagen.

Bevorzugt wird der Grünkörper solange getrocknet, bis die Flüssigkeit entfernt ist. So wird eine flüssigkeitsarme oder sogar flüssigkeitsfreie Vorform gebildet. Bevorzugt beinhaltet die Vorform einen Gehalt an Flüssigkeit, insbesondere Wasser, von weniger als 5 Gew.-%, zum Beispiel weniger als 2 Gew.-%, besonders bevorzugt weniger als 1 Gew.-%, die Gewichtsprozent jeweils bezogen auf das Gesamtgewicht der Vorform. Oftmals wird ein Gehalt an Flüssigkeit der Vorform von 0,01 Gew.-% nicht unterschritten, die Gewichtsprozent bezogen auf das Gesamtgewicht der Vorform.

Gemäß einer anderen bevorzugten Ausführungsform des ersten Gegenstands der Erfindung beinhaltet das Bilden der Vorform folgenden Schritt:

v.-a.) Einbringen der Quarzglaskörnung in eine rotierende Hohlform.

Bevorzugt lagert sich die Quarzglaskörnung durch den Eintrag in die rotierende Hohlform als Schicht an der Innenwand der rotierenden Hohlform an.

Die rotierende Hohlform kann topfförmig sein, das heißt einen Boden aufweisen. Die Hohlform kann massiv oder gasdurchlässig sein. Sie weist bevorzugt Bohrungen auf. Weiter bevorzugt kann an der Hohlform von außen ein Unterdruck angelegt werden. So kann die eingefüllte Quarzglaskörnung in der Hohlform fixiert werden. Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform kann der Körnung eine Innenkontur während des Rotierens zum Beispiel durch Anlegen einer Schablone gegeben.

Gemäß einer alternativen Ausgestaltung von Schritt v.-a.) wird die Quarzglaskörnung in eine rohrförmige Hohlform eingebracht. Diese weist bevorzugt eine horizontale Rotationsachse auf. Die Hohlform kann massiv oder gasdurchlässig sein. Sie weist bevorzugt Bohrungen auf. Weiter bevorzugt wird ein Vakuum angelegt, mit dem die eingefüllte Quarzglaskörnung an der Hohlform fixiert wird. Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform kann der Körnung eine Innenkontur während des Rotierens zum Beispiel durch Anlegen einer Schablone gegeben.

#### **Schritt vi.)**

Erfindungsgemäß beinhaltet das Verfahren als Schritt vi.) das Bilden des opaken Quarzglaskörpers aus der in Schritt v.) erhaltenen Vorform.

Der opake Quarzglaskörper kann prinzipiell auf allen dem Fachmann bekannten und dazu geeigneten Wegen gebildet werden, insbesondere bevorzugt durch Erwärmen der Vorform.

Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform kann die Vorform in einem Ofen erwärmt werden. Zum Beispiel umfasst das Erwärmen ein Sintern. Unter Sintern wird ein Erwärmen bei einem bestimmten Druck auf eine Temperatur unterhalb des Schmelzbereichs eines als Körnung vorliegenden Stoffes verstanden, bei der die Körner zu einem gesinterten Körper geformt werden. In Bezug auf die erfindungsgemäße Quarzglaskörnung kann ein Sintern zum Beispiel bei einem Druck von 1 bar und einer Temperatur in einem Bereich von 1350 bis 1450°C durchgeführt werden. Beim Sintern bleiben die Korngrenzen zwischen den zu dem gesinterten Körper geformten Körnern erhalten. Die optische Opazität beruht auf einer Ablenkung von eintreffendem Licht an diesen Korngrenzen. Weiter bevorzugt ist das Bilden des opaken Quarzglaskörpers in Schritt vi.) ein Sintern.

Bevorzugt wird eine Vorform, die gemäß den Schritten v.-1) und v.-2.) erhalten wird, in einem Ofen erwärmt.

Bevorzugt wird die Vorform auf eine Temperatur von mehr als 1100°C, zum Beispiel von mehr als 1200 oder von mehr als 1300 oder von mehr als 1350°C erwärmt. Bevorzugt wird die Vorform auf eine Temperatur von weniger als 1700°C erwärmt. Bevorzugt wird die Vorform auf eine Temperatur in einem Bereich von 1100 bis 1700°C erwärmt, zum Beispiel in einem Bereich von 1200 bis 1600°C oder von 1300 bis 1500°C, besonders bevorzugt in einem Bereich von 1350 bis 1450°C.

Bevorzugt wird die Vorform für eine Zeitdauer von mindestens 40 min erhitzt, zum Beispiel für eine Zeitdauer in einem Bereich von 1 bis 240 h oder von 2 bis 150 h oder von 5 bis 100 h, bevorzugt von 10 bis 50 h.

Bevorzugt wird die Vorform in einer Gasatmosphäre erwärmt, zum Beispiel in einer Inertgasatmosphäre, in einer oxidierenden Atmosphäre oder in einer reduzierenden Atmosphäre, besonders bevorzugt in einer oxidierenden Atmosphäre. Eine Inertgasatmosphäre beinhaltet bevorzugt ausschließlich Inertgase, zum Beispiel Stickstoff, Helium, Neon, Argon, Krypton und Xenon oder Kombinationen aus zwei oder mehr davon, besonders bevorzugt Stickstoff, Argon oder eine Kombination davon. Eine oxidierende Atmosphäre beinhaltet bevorzugt Sauerstoff, zum Beispiel eine Kombination aus Sauerstoff und einem oder mehr als einem Inertgas, besonders bevorzugt Luft. Eine reduzierende Atmosphäre beinhaltet bevorzugt Wasserstoff, zum Beispiel eine Kombination aus Wasserstoff und einem oder mehr als einem Inertgas, besonders bevorzugt eine Kombination aus Wasserstoff mit Helium. Besonders bevorzugt ist die Atmosphäre beim Sintern Luft.

Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform kann die Vorform durch ein Plasma, bevorzugt einen oder mehrere Lichtbogen, erwärmt werden. Bevorzugt wird eine Vorform, die gemäß Schritt v.-a) erhalten wird, durch ein Plasma, bevorzugt durch einen Lichtbogen, erwärmt.

Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform kann an der rotierenden Hohlform mit Bohrungen auch während des Bildens des Quarzglaskörpers ein Vakuum von außen angelegt werden. So kann der Blasengehalt des geschmolzenen Materials eingestellt werden.

Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform kann der Innenraum rotierenden Hohlform mit einem Unterdruck beaufschlagt werden. Zwischen zwei oder mehreren Elektroden wird ein Plasma-Lichtbogen entlang der Rotationsachse gezündet, das die synth. Körnung zu einem transparenten oder opaken Glas in Zylinderform schmilzt. Das Verfahren kann in iterativ wiederholt werden, um mehrere Schichten in Lagen aufzubauen und die Wandstärke zu erhöhen.

Bevorzugt umfasst die rotierende Hohlform einen Gaseinlass, zum Beispiel aus Quarzglas. Durch den Gaseinlass kann ein Gas in die rotierende Hohlform eingeleitet werden.

Bevorzugt wird der so erhaltene opake Quarzglaskörper abgekühlt, bevorzugt mit einer Abkühlgeschwindigkeit von mehr als 5 K/min, zum Beispiel in einem Bereich von 10 bis 60 K/min, besonders bevorzugt in einem Bereich von 15 bis 30 K/min.

Die nach dem ersten Gegenstand der Erfindung erhältlichen opaken Quarzglaskörper können prinzipiell jede beliebige Form aufweisen. Zum Beispiel können opake Quarzglaskörper in massiver Form, wie Zylinder, Schichten, Platten, Quader, Kugeln, oder in Form von Hohlkörpern, z.B. Hohlkörper mit einer Öffnung, Hohlkörper mit zwei Öffnungen wie Rohre und Flansche, oder mit mehr als zwei Öffnungen gefertigt werden. Durch die Verwendung einer rotierenden Hohlform erhältliche opake Quarzglaskörper weisen bevorzugt eine rotationssymmetrische, hohle Form mit zwei Öffnungen auf, zum Beispiel die Form von Rohren oder Flanschen. Durch die Verwendung eines Behälters erhältliche opake Quarzglaskörper sind bevorzugt massiv.

Unter einer Schicht wird eine flächenhafte Ausdehnung eines Materials auf einem Substrat verstanden.

Bevorzugt weist der opake Quarzglaskörper folgende Merkmale auf:

- [I] eine Opazität von mehr als 5, zum Beispiel mehr als 10 oder mehr als 20 oder mehr als 50;
- 5 [II] eine BET-Oberfläche von weniger als 1 m<sup>2</sup>/g, zum Beispiel von weniger als 0,5 m<sup>2</sup>/g, besonders bevorzugt von weniger als 0,2 m<sup>2</sup>/g.

Die Opazität („O“) ist ein Maß für die Lichtundurchlässigkeit eines Materials. Sie entspricht dem Verhältnis der Intensität des einfallenden Lichts  $I_0$  zur Intensität des ausfallenden Lichts  $I$  und damit dem Kehrwert der Transmission eines Körpers (vgl. Formel (I)).

$$O = I_0 / I \quad (I)$$

Unter „opak“ wird ein Material mit einer Opazität ( $I_0/I$ ) von mehr als 2 bei Wellenlängen im Bereich von 400 bis 780 nm und bei einer Schichtdicke der Materialprobe von 10 mm verstanden. Bevorzugt weist der opake Quarzglaskörper eine Opazität von mehr als 5, zum Beispiel von mehr als 10 oder von mehr als 20 oder von mehr als 50 auf.

Bevorzugt weist der opake Quarzglaskörper außerdem mindestens eine, zum Beispiel mindestens zwei oder mindestens drei oder mindestens vier, besonders bevorzugt mindestens fünf der folgenden Merkmale auf:

- [III] eine zylindrische Form;
- [IV] eine Schicht;
- [V] einen OH-Gehalt von weniger als 500 ppm, zum Beispiel von weniger als 400 ppm, besonders bevorzugt von weniger als 300 ppm;
- 25 [VI] einen Chlorgehalt von weniger als 60 ppm, bevorzugt von weniger als 40 ppm, zum Beispiel von weniger als 20 ppm oder weniger als 2 ppm oder weniger als 0,5 ppm, besonders bevorzugt von weniger als 0,1 ppm;
- [VII] einen Aluminiumgehalt von weniger als 200 ppb, zum Beispiel von weniger als 150 ppb, besonders bevorzugt von weniger als 100 ppb;
- 30 [VIII] einen ODC-Anteil von weniger als  $5 \cdot 10^{18}/\text{cm}^3$ ;
- [IX] einen Kohlenstoffgehalt von weniger als 5 ppm, zum Beispiel von weniger als 4 ppm oder von weniger als 3 ppm, besonders bevorzugt von weniger als 2 ppm;
- [X] einen Gesamtgehalt an von Aluminium verschiedenen Metallen von weniger als 2000 ppb, zum Beispiel von weniger als 500 ppb, besonders bevorzugt von weniger als 100 ppb;
- 35 wobei die ppm und ppb jeweils auf das Gesamtgewicht des opaken Quarzglaskörpers bezogen sind.

Bevorzugt weist der opake Quarzglaskörper einen Metallgehalt an von Aluminium verschiedenen Metallen von weniger als 1000 ppb, zum Beispiel von weniger als 500 ppb, besonders bevorzugt von weniger als 100 ppb, jeweils bezogen auf das Gesamtgewicht des opake Quarzglaskörpers, auf. Oftmals weist der opake Quarzglaskörper jedoch einen Gehalt an von Aluminium verschiedenen Metallen in einer Menge von mindestens 1 ppb auf. Solche Metalle sind beispielsweise Natrium, Lithium, Kalium, Magnesium, Calcium, Strontium, Germanium,

Kupfer, Molybdän, Titan, Eisen und Chrom. Diese können zum Beispiel als Element, als Teil eines Moleküls oder eines Ions oder eines Komplexes vorliegen.

5 Der opake Quarzglaskörper kann weitere Bestandteile beinhalten. Bevorzugt beinhaltet der opake Quarzglaskörper weniger als 500 ppm, zum Beispiel weniger als 450 ppm, besonders bevorzugt weniger als 400 ppm an weiteren Bestandteilen, wobei die ppm jeweils bezogen sind auf das Gesamtgewicht des opake Quarzglaskörpers. Oftmals weist der opake Quarzglaskörper jedoch einen Gehalt an weiteren Bestandteilen in einer Menge von mindestens 1 ppb auf.

10 Bevorzugt beinhaltet der opake Quarzglaskörper Kohlenstoff in einer Menge von weniger als 5 ppm, zum Beispiel weniger als 4 ppm oder weniger als 3 ppm, besonders bevorzugt weniger als 2 ppm, jeweils bezogen auf das Gesamtgewicht des opake Quarzglaskörpers. Oftmals weist der opake Quarzglaskörper jedoch einen Gehalt an Kohlenstoff in einer Menge von mindestens 1 ppb auf.

15 Der opake Quarzglaskörper weist bevorzugt die Merkmalskombination [I]/[II]/[VI] oder [I]/[II]/[VIII] oder [I]/[II]/[IX] auf, weiter bevorzugt die Merkmalskombination [I]/[II]/[VI]/[VIII] oder [I]/[II]/[VI]/[IX] oder [I]/[II]/[VIII]/[IX], besonders bevorzugt die Merkmalskombination [I]/[II]/[VI]/[VIII]/[IX].

20 Der opake Quarzglaskörper weist bevorzugt die Merkmalskombination [I]/[II]/[VI] auf, wobei die Opazität mehr al 20 beträgt, die BET-Oberfläche weniger als  $0,2 \text{ m}^2/\text{g}$  beträgt und der Chlorgehalt weniger als 20 ppm beträgt.

25 Der opake Quarzglaskörper weist bevorzugt die Merkmalskombination [I]/[II]/[VIII] auf, wobei die Opazität mehr al 20 beträgt, die BET-Oberfläche weniger als  $0,2 \text{ m}^2/\text{g}$  beträgt und der ODC-Anteil weniger als  $5 \cdot 10^{18} / \text{cm}^3$  beträgt.

Der opake Quarzglaskörper weist bevorzugt die Merkmalskombination [I]/[II]/[IX] auf, wobei die Opazität mehr al 20 beträgt, die BET-Oberfläche weniger als  $0,2 \text{ m}^2/\text{g}$  beträgt und der Kohlenstoffgehalt weniger als 3 ppm beträgt.

30 Der opake Quarzglaskörper weist bevorzugt die Merkmalskombination [I]/[II]/[VI]/[VIII] auf, wobei die Opazität mehr al 20 beträgt, die BET-Oberfläche weniger als  $0,2 \text{ m}^2/\text{g}$  beträgt, der Chlorgehalt weniger als 20 ppm beträgt und der ODC-Anteil weniger als  $5 \cdot 10^{18} / \text{cm}^3$  beträgt.

35 Der opake Quarzglaskörper weist bevorzugt die Merkmalskombination [I]/[II]/[VI]/[IX] auf, wobei die Opazität mehr al 20 beträgt, die BET-Oberfläche weniger als  $0,2 \text{ m}^2/\text{g}$  beträgt der Chlorgehalt weniger als 20 ppm beträgt und der Kohlenstoffgehalt weniger als 3 ppm beträgt.

40 Der opake Quarzglaskörper weist bevorzugt die Merkmalskombination [I]/[II]/[VIII]/[IX] auf, wobei die Opazität mehr al 20 beträgt, die BET-Oberfläche weniger als  $0,2 \text{ m}^2/\text{g}$  beträgt, der ODC-Anteil weniger als  $5 \cdot 10^{18} / \text{cm}^3$  beträgt und der Kohlenstoffgehalt weniger als 3 ppm beträgt.

Der opake Quarzglaskörper weist bevorzugt die Merkmalskombination [I]/[II]/[VI]/[VIII]/[IX] auf, wobei die Opazität mehr als 20 beträgt, die BET-Oberfläche weniger als  $0,2 \text{ m}^2/\text{g}$  beträgt der Chlorgehalt weniger als 20 ppm beträgt, der ODC-Anteil weniger als  $5 \cdot 10^{18} / \text{cm}^3$  beträgt und der Kohlenstoffgehalt weniger als 3 ppm beträgt.

5

Ein zweiter Gegenstand der vorliegenden Erfindung ist ein opaker Quarzglaskörper erhältlich durch ein Verfahren gemäß dem ersten Gegenstand der Erfindung.

Das Verfahren ist bevorzugt gekennzeichnet durch die im Rahmen des ersten Gegenstands beschriebene Merkmale. Der opake Quarzglaskörper ist bevorzugt gekennzeichnet durch die im Rahmen des ersten Gegenstands beschriebene Merkmale.

Ein dritter Gegenstand der vorliegenden Erfindung ist ein Reaktor. Der Reaktor beinhaltet als Reaktorbestandteile:

- i] eine Lage aus opakem Quarzglas, und
- ii] einen Quarzglashohlkörper.

Erfindungsgemäß ist die Lage aus opakem Quarzglas, auch als Lage bezeichnet, zumindest zum Teil aus einem opaken Quarzglaskörper gemäß dem zweiten Gegenstand der Erfindung gebildet. Bevorzugt ist die Lage zu mehr als 50 Gew.-%, bezogen auf das Gesamtgewicht der Lage, aus einem opaken Quarzglaskörper gebildet, zum Beispiel zu mehr als 60 Gew.-% oder zu mehr als 70 Gew.-% oder zu mehr als 80 Gew.-% oder zu mehr als 90 Gew.-% oder zu mehr als 95 Gew.-% oder zu bis zu 100 Gew.-%, besonders bevorzugt zu 100 Gew.-%.

Unter einer Lage wird ein Bauteil verstanden, das als Auflage für die Öffnung eines Quarzglashohlkörpers dienen kann. Beispiele für Lagen sind Schichten, Stopfen, Deckel, Flansche, und Spacer. Die Lage ist bevorzugt ein Flansch oder ein Spacer. Unter einem Spacer wird ein opaker Rohrabschnitt, insbesondere zur Temperaturabschirmung, verstanden.

Erfindungsgemäß beinhaltet der Quarzglashohlkörper einer Öffnungsfläche auf. Erfindungsgemäß folgt die Öffnungsfläche auf die Lage aus opakem Quarzglas.

Bevorzugt weist der Reaktor zusätzlich mindestens eines, zum Beispiel mindestens zwei oder mindestens drei oder mindestens vier, besonders bevorzugt mindestens fünf der folgenden Reaktorbestandteile auf:

- iii] eine Dichtung aus einem von Quarzglas verschiedenen Material, zum Beispiel aus einem Material beinhaltend Gummi, Metall, Viton, Teflon, Graphit oder einem Kombination aus zwei oder mehr davon, besonders bevorzugt aus einem Material beinhaltend Viton, Teflon oder Graphit.
- iv] eine auf die Dichtung folgende Auflage, zum Beispiel aus einem Material beinhaltend Edelstahl;
- v] einen Gaseinlass;
- vi] einen Gasauslass;
- vii] einen Injektor;

- viii] ein Thermoelementröhrchen;
- ix] eine Innenfläche, die feuerblank und mikrorissfrei ist.

Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform ist die Lage mit dem Quarzglashohlkörper verbunden, zum Beispiel verschweißt oder verschmolzen. Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform ist die Lage mit dem Quarzglashohlkörper nicht fest verbunden.

Ein vierter Gegenstand der vorliegenden Erfindung ist eine Anordnung. Die Anordnung beinhaltet als Anordnungsbestandteile:

- i} einen Substrathalter; und
- ii} ein Gestell.

Erfindungsgemäß wird der Substrathalter von dem Gestell getragen. Bevorzugt besteht der Substrathalter aus Quarzglas, besonders bevorzugt aus transparentem Quarzglas. Die Transparenz beschreibt das Verhältnis der Intensität des ausfallenden Lichts zur Intensität des einfallenden Lichts. Unter transparent wird ein Material mit einer Transparenz ( $I/I_0$ ) von mindestens 0,5 bei Wellenlängen im Bereich von 400 bis 780 nm und bei einer Schichtdicke der Materialprobe von 10 mm verstanden.

Erfindungsgemäß ist das Gestell zumindest zum Teil aus einem opaken Quarzglaskörper gemäß dem zweiten Gegenstand der Erfindung gebildet. Bevorzugt ist die Lage zu mehr als 50 Gew.-%, bezogen auf das Gesamtgewicht der Lage, aus einem opaken Quarzglaskörper gebildet, zum Beispiel zu mehr als 60 Gew.-% oder zu mehr als 70 Gew.-% oder zu mehr 80 Gew.-% oder zu mehr als 90 Gew.-% oder zu mehr als 95 Gew.-% oder zu bis zu 100 Gew.-%, besonders bevorzugt zu 100 Gew.-%.

Bevorzugt weist die Anordnung zusätzlich folgenden Anordnungsbestandteil auf:

- iii} einen Quarzglashohlkörper mit mindestens einer Öffnung.

Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform ist ein Quarzglashohlkörper erhältlich gemäß dem im Rahmen des ersten Gegenstands der Erfindung beschriebenen Verfahren, insbesondere Schritte i.) bis iii.) unter Erhalt eines Hohlkörpers. Der Hohlkörper kann prinzipiell auf dem Fachmann bekannten Wegen geformt werden. Bevorzugt wird der Hohlkörper mittels einer Düse geformt. Bevorzugt enthält die Düse in der Mitte ihrer Öffnung eine Vorrichtung, die die Glasschmelze beim Formen ableitet. So kann direkt aus einer Glasschmelze ein Quarzglashohlkörper geformt werden.

Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform ist ein Quarzglashohlkörper erhältlich gemäß der im Rahmen des ersten Gegenstands der Erfindung beschriebenen Schritte i.) bis iii.) unter Erhalt eines massiven Quarzglaskörpers, sowie dem Bilden eines Hohlkörpers aus dem massiven Quarzglaskörper. Dazu eignen sich prinzipiell alle dem Fachmann bekannten Verfahren zur Herstellung eines Hohlkörpers aus einem massiven Körper, zum Beispiel das Stauchen von Kanälen, Bohren, Honen oder Schleifen. Bevorzugt geeignet ist das Führen des massiven Körpers über einen oder mehrere Dornen, wobei ein Hohlkörper gebildet wird. Ebenso kann der Dorn in den

massiven Körper unter Bilden eines Hohlkörpers eingebracht werden. Bevorzugt wird der Hohlkörper nach dem Bilden abgekühlt.

Bevorzugt weist ein Quarzglashohlkörper die im Rahmen des ersten Gegenstands der Erfindung beschriebenen Merkmale eines Quarzglaskörpers auf.

Ein fünfter Gegenstand ist die Verwendung einer Quarzglaskörnung zur Herstellung opaker Reaktorbestandteile für die Halbleiterfertigung, wobei die Quarzglaskörnung folgende Merkmale aufweist:

I/ einen OH-Gehalt von weniger als 500 ppm;

II/ einen Chlorgehalt von weniger als 60 ppm;

III/ einen Aluminiumgehalt von weniger als 200 ppb,

wobei die ppm und ppb jeweils auf das Gesamtgewicht der Quarzglaskörnung bezogen sind.

## Figuren

**Fig. 1** Flussdiagramm (Verfahren zum Herstellen eines Quarzglaskörpers)

**Fig. 2** Flussdiagramm (Verfahren zum Herstellen eines Siliziumdioxidgranulats I)

**Fig. 3** Flussdiagramm (Verfahren zum Herstellen eines Siliziumdioxidgranulats II)

**Fig. 6** Flussdiagramm (Verfahren zum Herstellen einer Quarzglaskörnung)

**Fig. 7** Flussdiagramm (Verfahren zum Herstellen eines opaken Quarzglaskörpers)

**Fig. 8** schematische Darstellung eines hängenden Tiegels in einem Ofen

**Fig. 9** schematische Darstellung eines stehenden Tiegels in einem Ofen

**Fig. 10** schematische Darstellung eines Tiegels mit einem Spülring

**Fig. 11** schematische Darstellung eines Sprühturms

**Fig. 14** schematische Darstellung eines Tiegels mit einer Taupunktmessvorrichtung

**Fig. 15** schematische Darstellung eines Gasdruck-Sinter-Ofens (GDS-Ofen)

## Beschreibung der Figuren

**Figur 1** zeigt ein Flussdiagramm enthaltend die Schritte 101 bis 104 eines Verfahrens 100 zur Herstellung eines Quarzglaskörpers gemäß der vorliegenden Erfindung. In einem ersten Schritt 101 wird ein Siliziumdioxidgranulat bereitgestellt. In einem zweiten Schritt 102 wird aus dem Siliziumdioxidgranulat eine Glasschmelze gebildet.

Bevorzugt werden zum Schmelzen Formen eingesetzt, die in einen Ofen eingebracht und wieder aus ihm entnommen werden können. Solche Formen werden oftmals aus Graphit hergestellt. Sie ergeben eine Negativform des Gießlings. Das Siliziumdioxidgranulat wird in die Form eingefüllt, in dem dritten Schritt 103 zunächst in der Form zum Schmelzen gebracht. Anschließend bildet sich in derselben Form durch Abkühlen der Schmelze der Quarzglaskörper. Dieser wird dann aus der Form herausgelöst und weiter bearbeitet, zum Beispiel in einem optionalen Schritt 104. Diese Vorgehensweise ist diskontinuierlich. Das Bilden der Schmelze erfolgt bevorzugt bei



reduziertem Druck, insbesondere bei Vakuum. Es ist ferner möglich, während Schritt 103 zeitweise den Ofen mit einer reduzierenden, wasserstoffhaltigen Atmosphäre zu beaufschlagen.

Bei einer anderen Vorgehensweise werden bevorzugt als Schmelztiegel hängende oder stehende Tiegel eingesetzt. Das Schmelzen erfolgt bevorzugt in einer reduzierenden, wasserstoffhaltigen Atmosphäre. In einem dritten Schritt 103 wird ein Quarzglaskörper gebildet. Die Bildung des Quarzglaskörpers erfolgt hier bevorzugt durch Entnehmen zumindest eines Teils der Glasschmelze aus dem Tiegel und Abkühlen. Die Entnahme erfolgt bevorzugt durch eine Düse am unteren Ende des Tiegels. In diesem Fall kann die Form des Quarzglaskörpers durch die Ausgestaltung der Düse bestimmt werden. So können beispielsweise massive Körper erhalten werden. Hohle Körper werden beispielsweise erhalten, wenn in der Düse zusätzlich ein Dorn vorgesehen ist. Dieses exemplarisch dargestellte Verfahren zur Herstellung von Quarzglaskörpern, und insbesondere Schritt 103, erfolgt bevorzugt kontinuierlich. Aus einem massiven Quarzglaskörper kann in einem optionalen Schritt 104 ein Hohlkörper geformt werden.

**Figur 2** zeigt ein Flussdiagramm enthaltend die Schritte 201, 202 und 203 eines Verfahrens 200 zur Herstellung eines Siliziumdioxidgranulats I. In einem ersten Schritt 201 wird ein Siliziumdioxidpulver bereitgestellt. Ein Siliziumdioxidpulver wird bevorzugt aus einem synthetischen Prozess erhalten, bei dem ein siliziumhaltiges Material, beispielsweise ein Siloxan, ein Siliziumalkoxid oder ein Siliziumhalogenid in einem pyrogenen Verfahren zu Siliziumdioxid umgesetzt wird. In einem zweiten Schritt 202 wird das Siliziumdioxidpulver mit einer Flüssigkeit, bevorzugt mit Wasser, gemischt unter Erhalt einer Aufschlämmung. In einem dritten Schritt 203 wird das in der Aufschlämmung enthaltene Siliziumdioxid in ein Siliziumdioxidgranulat überführt. Das Granulieren erfolgt mittels Sprühgranulieren. Dazu wird die Aufschlämmung durch eine Düse in einen Sprühturm eingesprüht und unter Bildung von Granulen getrocknet, wobei die Kontaktfläche zwischen der Düse und der Aufschlämmung ein Glas oder einen Kunststoff beinhaltet.

**Figur 3** zeigt ein Flussdiagramm enthaltend die Schritte 301, 302, 303 und 304 eines Verfahrens 300 zur Herstellung eines Siliziumdioxidgranulats II. Die Schritte 301, 302 und 303 verlaufen dabei entsprechend den Schritten 201, 202 und 203 gemäß Figur 2. In Schritt 304 wird das in Schritt 303 erhaltene Siliziumdioxidgranulat I zu einem Siliziumdioxidgranulat II verarbeitet. Dies erfolgt bevorzugt durch Erwärmen des Siliziumdioxidgranulats I in einer chlorhaltigen Atmosphäre.

**Figur 6** zeigt ein Flussdiagramm enthaltend die Schritte 601 bis 604 eines Verfahrens zum Herstellen einer Quarzglaskörnung 600. In einem ersten Schritt 601 wird ein Siliziumdioxidgranulat bereitgestellt. In einem zweiten Schritt 602 wird aus dem Siliziumdioxid eine Glasschmelze gebildet. Bevorzugt wird dazu das Siliziumdioxidgranulat in einen Schmelztiegel eingeführt und darin erwärmt, bis sich eine Glasschmelze bildet. Bevorzugt werden als Schmelztiegel hängende Blech- oder Sintertiegel oder stehende Sintertiegel eingesetzt. Das Schmelzen erfolgt bevorzugt in einer reduzierenden, wasserstoffhaltigen Atmosphäre. In einem dritten Schritt 603 wird ein Quarzglaskörper gebildet. Das Bilden des Quarzglaskörpers erfolgt bevorzugt durch Entnehmen zumindest eines Teils der Glasschmelze aus dem Tiegel und Abkühlen. Die Entnahme erfolgt bevorzugt durch eine Düse am unteren Ende des Tiegels. Die Form des Quarzglaskörpers kann durch die Ausgestaltung der Düse bestimmt werden. Die Herstellung von Quarzglaskörpern, und insbesondere Schritt 603, erfolgt bevorzugt kontinuierlich. In einem

vierten Schritt 604 wird der Quarzglaskörper zerkleinert, bevorzugt durch Hochspannungsentladungspulse, unter Erhalt einer Quarzglaskörnung.

**Figur 7** zeigt ein Flussdiagramm enthaltend die Schritte 701 bis 706 eines Verfahrens zum Herstellen eines opaken Quarzglaskörpers 700. In einem ersten Schritt 701 wird ein Siliziumdioxidgranulat bereitgestellt. In einem zweiten Schritt 702 wird aus dem Siliziumdioxid eine Glasschmelze gebildet. Bevorzugt wird dazu das Siliziumdioxidgranulat in einen Schmelztiegel eingeführt und darin erwärmt bis sich eine Glasschmelze bildet. Bevorzugt werden als Schmelztiegel hängende Blech- oder Sintertiegel oder stehende Sintertiegel eingesetzt. Das Schmelzen erfolgt bevorzugt in einer reduzierenden, wasserstoffhaltigen Atmosphäre. In einem dritten Schritt 703 wird ein Quarzglaskörper gebildet. Das Bilden des Quarzglaskörpers erfolgt bevorzugt durch Entnehmen zumindest eines Teils der Glasschmelze aus dem Tiegel und Abkühlen. Die Entnahme erfolgt bevorzugt durch eine Düse am unteren Ende des Tiegels. Die Form des Quarzglaskörpers kann durch die Ausgestaltung der Düse bestimmt werden. Die Herstellung von Quarzglaskörpern, und insbesondere Schritt 703, erfolgt bevorzugt kontinuierlich. In einem vierten Schritt 704 wird der Quarzglaskörper zerkleinert, bevorzugt durch Hochspannungsentladungspulse, unter Erhalt einer Quarzglaskörnung. In einem fünften Schritt 705 wird die Quarzglaskörnung zu einer Vorform verarbeitet. Dazu wird die Quarzglaskörnung bevorzugt mit einer Flüssigkeit unter Erhalt einer Aufschlammung vermischt und unter Verlust von Flüssigkeit zu einer Vorform geformt. Das Formen erfolgt bevorzugt durch Einbringen der Aufschlammung in einen Behälter, wobei die Form der Vorform durch die Ausgestaltung des Behälters festgelegt ist. Alternativ wird die Vorform durch Einbringen der Quarzglaskörnung in eine rotierende Hohlform gebildet. In einem sechsten Schritt 706 wird die Vorform erwärmt unter Erhalt eines opaken Quarzglaskörpers.

In **Figur 8** ist eine bevorzugte Ausführungsform eines Ofens 800 mit einem hängenden Tiegel gezeigt. Der Tiegel 801 ist in dem Ofen 800 hängend angeordnet. Der Tiegel 801 weist in seinem oberen Bereich eine Aufhängung 802, sowie einen Feststoffeinlass 803 und eine Düse 804 als Auslass auf. Der Tiegel 801 wird über den Feststoffeinlass 803 mit Siliziumdioxidgranulat 805 befüllt. Im Betrieb liegt im oberen Bereich des Tiegels 801 Siliziumdioxidgranulat 805 vor, während im unteren Bereich des Tiegels 801 eine Glasschmelze 806 vorliegt. Der Tiegel 801 ist durch Heizelemente 807 beheizbar, die auf der Außenseite der Tiegelwand 810 angeordnet sind. Der Ofen weist zudem zwischen den Heizelementen 807 und der Ofenaußenwand 808 eine Isolationsschicht 809 auf. Der Raum zwischen der Isolationsschicht 809 und der Tiegelwand 810 kann mit einem Gas befüllt werden und weist dazu einen Gaseinlass 811 und einen Gasauslass 812 auf. Durch die Düse 804 kann ein Quarzglaskörper 813 aus dem Ofen entnommen werden.

In **Figur 9** ist eine bevorzugte Ausführungsform eines Ofens 900 mit einem stehenden Tiegel gezeigt. Der Tiegel 901 ist in dem Ofen 900 stehend angeordnet. Der Tiegel 901 weist eine Standfläche 902, einen Feststoffeinlass 903 und eine Düse 904 als Auslass auf. Der Tiegel 901 wird über den Einlass 903 mit Siliziumdioxidgranulat 905 befüllt. Im Betrieb liegt im oberen Bereich des Tiegels Siliziumdioxidgranulat 905 vor, während im unteren Bereich des Tiegels eine Glasschmelze 906 vorliegt. Der Tiegel ist durch Heizelemente 907 beheizbar, die auf der Außenseite der Tiegelwand 910 angeordnet sind. Der Ofen weist zudem zwischen den Heizelementen 907 und der Ofenaußenwand 908 eine Isolationsschicht 909 auf. Der Raum zwischen der Isolationsschicht 909 und der Tiegelwand 910 kann mit einem Gas befüllt werden und weist dazu einen Gaseinlass 911 und einen Gasauslass 912 auf. Durch die Düse 904 kann ein Quarzglaskörper 913 aus dem Tiegel 901 entnommen werden.

In **Figur 10** ist eine bevorzugte Ausführungsform eines Tiegels 1000 gezeigt. Der Tiegel 1000 weist einen Feststoffeinlass 1001 und eine Düse 1002 als Auslass auf. Der Tiegel 1000 wird über den Feststoffeinlass 1001 mit Siliziumdioxidgranulat 1003 befüllt. Im Betrieb liegt im oberen Bereich des Tiegels 1000 Siliziumdioxidgranulat 1003 als Schüttkegel 1004 vor, während im unteren Bereich des Tiegels eine Glasschmelze 1005 vorliegt. Der Tiegel 1000 kann mit einem Gas befüllt werden. Er weist einen Gaseinlass 1006 und einen Gasauslass 1007 auf. Der Gaseinlass ist ein oberhalb des Siliziumdioxidgranulats an der Tiegelfwand angebrachter Spülring. Durch den Spülring (mit einer hier nicht gezeigten Gaszuführung) wird das Gas im Tiegelinneren knapp oberhalb des Schmelzespiegels und/oder des Schüttkegels nahe der Tiegelfwand freigesetzt und fließt in Richtung Gasauslass 1007, der ringförmig im Deckel 1008 des Tiegels 1000 angeordnet ist. Der so entstehende Gasstrom 1010 bewegt sich so entlang der Tiegelfwand und überspült diese. Durch die Düse 1002 kann ein Quarzglaskörper 1009 aus dem Tiegel 1000 entnommen werden.

In **Figur 11** ist eine bevorzugte Ausführungsform eines Sprühturms 1100 zum Sprühgranulieren von Siliziumdioxid gezeigt. Der Sprühturm 1100 umfasst eine Zuführung 1101, durch die eine unter Druck stehende Aufschlammung enthaltend Siliziumdioxidpulver und eine Flüssigkeit dem Sprühturm zugeführt wird. Am Ende der Leitung befindet sich eine Düse 1102, durch die die Aufschlammung fein verteilt in den Sprühturm eingebracht wird. Bevorzugt ist die Düse schräg nach oben ausgerichtet, so dass die Aufschlammung als feine Tröpfchen in Richtung der Düsenausrichtung in den Sprühturm gesprüht wird und dann im Bogen schwerkraftgetrieben nach unten fällt. Am oberen Ende des Sprühturms befindet sich ein Gaseinlass 1103. Durch das Einführen eines Gases durch den Gaseinlass 1103 wird ein der Austrittsrichtung der Aufschlammung aus der Düse 1102 entgegengerichteter Gasstrom erzeugt. Der Sprühturm 1100 umfasst außerdem eine Sichtvorrichtung 1104 und eine Siebvorrichtung 1105. Durch die Sichtvorrichtung 1104 werden Teilchen abgesaugt, die eine definierte Teilchengröße unterschreiten, und durch die Abführung 1106 entfernt. Entsprechend der Teilchengröße der anzusaugenden Teilchen kann die Ansaugstärke der Sichtvorrichtung 1104 reguliert werden. Durch die Siebvorrichtung 1105 werden Teilchen oberhalb einer definierten Teilchengröße abgesiebt und durch die Abführung 1107 entfernt. Entsprechend der Teilchengröße der abzusiebenden Teilchen kann die Siebdurchlässigkeit der Siebvorrichtung 1105 gewählt werden. Die verbleibenden Teilchen, ein Siliziumdioxidgranulat der gewünschten Teilchengröße, werden durch den Auslass 1108 entnommen.

**Figur 14** zeigt eine bevorzugte Ausführungsform eines Tiegels 1400. Der Tiegel weist einen Feststoffeinlass 1401 und einen Auslass 1402 auf. Im Betrieb liegt im oberen Bereich des Tiegels 1400 Siliziumdioxidgranulat 1403 in einem Schüttkegel 1404 vor, während im unteren Bereich des Tiegels eine Glasschmelze 1405 vorliegt. Der Tiegel 1400 weist einen Gaseinlass 1406 und einen Gasauslass 1407 auf. Der Gaseinlass 1406 und der Gasauslass 1407 sind oberhalb des Schüttkegels 1404 des Siliziumdioxidgranulats 1403 angeordnet. Der Gasauslass 1406 umfasst eine Leitung zur Gasführung 1408 und eine Vorrichtung 1409 zur Messung des Taupunkts des austretenden Gases. Die Vorrichtung 1409 umfasst ein Taupunktspiegelhygrometer (hier nicht gezeigt). Der Abstand zwischen dem Tiegel und der Vorrichtung 1409 zur Messung des Taupunkts kann variieren. Durch den Auslass 1402 des Tiegels 1400 kann ein Quarzglaskörper 1410 entnommen werden.

**Figur 15** zeigt eine bevorzugte Ausführungsform eines Ofens 1500, der für ein Vakuumsinterverfahren, ein Gasdrucksinterverfahren und insbesondere eine Kombination davon geeignet ist. Der Ofen weist von außen nach

innen eine druckfeste Hülle 1501 und eine thermische Isolierschicht 1502 auf. Der davon umschlossene Raum, als Ofeninneres bezeichnet, kann über eine Gaszuführung 1504 mit einem Gas oder einem Gasgemisch beaufschlagt werden. Ferner ist das Ofeninnere mit einem Gasauslass 1505 versehen, über den Gas entnommen werden kann. Je nach Bilanz des Gastransports zwischen Gaszuführung 1504 und Gasentnahme bei 1505 kann ein Überdruck, ein Vakuum oder auch ein Gasstrom im Innern des Ofens 1500 erzeugt werden. Ferner sind im Innern des Ofens 1500 Heizelemente 1506 vorgesehen. Diese sind oftmals an der Isolierschicht 1502 angebracht (hier nicht gezeigt). Zum Schutz des Schmelzguts vor Kontamination ist das Innere des Ofens mit einem sogenannten „Liner“ 1507 versehen, der die Ofenkammer 1503 von den Heizelementen 1506 trennt. In die Ofenkammer 1503 können Schmelzformen 1508 mit Schmelzgut 1509 eingebracht werden. Die Schmelzform 1508 kann auf einer Seite offen sein (hier gezeigt) oder das Schmelzgut 1509 vollständig umgeben (nicht gezeigt).

### **Testmethoden**

#### a. Fiktive Temperatur

Die fiktive Temperatur wird mittels Ramanspektroskopie anhand der Ramanstreuintensität bei etwa  $606\text{ cm}^{-1}$  ermittelt. Die Vorgehensweise und Auswertung ist in dem Beitrag von *Pfleiderer et. al.*; „The UV-induced 210 nm absorption band in fused Silica with different thermal history and stoichiometry“; Journal of Non-Crystalline Solids, Band 159 (1993), Seiten 145-153 beschrieben.

#### b. OH-Gehalt

Der OH Gehalt des Glases wird durch Infrarotspektroskopie bestimmt. Die in von D. M. Dodd & D. M. Fraser angegebene Methode „Optical Determinations of OH in Fused Silica“ (J.A.P. 37, 3991 (1966)) wird angewendet. Statt des darin angegebenen Geräts, wird ein FTIR-Spektrometer (Fourier-Transform-Infrarotspektrometer, aktuell System 2000 der Fa. Perkin Elmer) eingesetzt. Die Auswertung der Spektren kann prinzipiell sowohl an der Absorptionsbande bei ca.  $3670\text{ cm}^{-1}$  als auch bei der Absorptionsbande bei ca.  $7200\text{ cm}^{-1}$  erfolgen. Die Auswahl der verwendeten Bande erfolgt nach der Regel, dass der Transmissionsverlust durch die OH-Absorption zwischen 10 und 90% liegt.

#### c. Oxygen Deficiency Centers (ODCs)

Zum quantitativen Nachweis wird die ODC(I)-Absorption bei 165 nm mittels einer Transmissionsmessung an zwischen 1-2 mm dicken Probe mittels eines Vakuum-UV-Spektrometers, Modell VUVAS 2000, von McPherson, Inc. (USA) bestimmt.

Dann gilt:

$$N = \alpha / \sigma$$

mit

$N$  = Defektkonzentration [ $1/\text{cm}^3$ ]

$\alpha$  = Optische Absorption [ $1/\text{cm}$ , Basis e] der ODC(I) Bande

$\sigma$  = Wirkungsquerschnitt [ $\text{cm}^2$ ]

wobei als Wirkungsquerschnitt  $\sigma=7,5 \cdot 10^{-17} \text{cm}^2$  eingesetzt wird (aus L. Skuja, „Color Centers and Their Transformations in Glassy  $\text{SiO}_2$ “, Lectures of the summer school "Photosensitivity in optical Waveguides and glasses", Juli 13-18 1998, Vitznau, Switzerland).

d. Elementaranalyse

d-1) Massive Proben werden zertrümmert. Anschließend werden zur Reinigung ca. 20g der Probe in ein HF-beständiges Gefäß eingebracht, vollständig mit HF bedeckt und bei  $100^\circ\text{C}$  für eine Stunde thermisch behandelt. Nach dem Abkühlen wird die Säure verworfen und die Probe mehrmals mit Reinstwasser gespült. Anschließend wird das Gefäß mit der Probe im Trockenschrank getrocknet.

Anschließend werden ca. 2g der festen Probe (Bruchmaterial, gereinigt wie oben; Stäube etc. ohne Vorbehandlung direkt) in einen HF beständigen Aufschlussbehälter eingewogen und mit 15ml HF (50 Gew.-%) versetzt. Der Aufschlussbehälter wird verschlossen und bei  $100^\circ\text{C}$  solange thermisch behandelt, bis die feste Probe vollständig aufgelöst ist. Danach wird der Aufschlussbehälter geöffnet und thermisch weiter bei  $100^\circ\text{C}$  behandelt, bis die Lösung komplett eingedampft ist. Währenddessen wird der Aufschlussbehälter 3x mit 15ml Reinstwasser aufgefüllt. In den Aufschlussbehälter wird 1ml  $\text{HNO}_3$  gegeben, um abgeschiedene Verunreinigungen zu lösen und mit Reinstwasser auf 15ml aufgefüllt. Damit steht die Messlösung bereit.

d-2) Messung ICP-MS / ICP-OES

Ob OES oder MS verwendet wird, hängt von der erwarteten Elementkonzentration ab. Typische Bestimmungsgrenzen für die MS sind 1ppb, für die OES 10ppb (jeweils bezogen auf die eingewogene Probenmenge). Die Bestimmung der Elementkonzentration mit den Messgeräten erfolgt nach Maßgabe der Gerätehersteller (ICP-MS: Agilent 7500ce; ICP-OES: Perkin Elmer 7300 DV) und unter Verwendung von zertifizierten Referenzflüssigkeiten zur Kalibrierung. Die von den Geräten bestimmte Elementkonzentration in der Lösung (15ml) werden dann auf die ursprüngliche Einwaage der Probe (2g) umgerechnet.

Anmerkung: Es ist darauf zu achten, dass die Säure, die Gefäße, das Wasser, die Geräte eine ausreichende Reinheit aufweisen müssen, um die nachzuweisenden Elementkonzentrationen bestimmen zu können. Überprüft wird das mit dem Aufschluss einer Blindprobe ohne Quarzglas.

Folgende Elemente werden auf diese Weise bestimmt: Li, Na, Mg, K, Ca, Fe, Ni, Cr, Hf, Zr, Ti, (Ta), V, Nb, W, Mo, Al.

d-3) Die Bestimmung von flüssig vorliegenden Proben erfolgt wie zuvor beschrieben, wobei die Probenvorbereitung gemäß Schritt d-1) entfällt. Es werden 15ml der flüssigen Probe in das Aufschlussgefäß gegeben. Eine Umrechnung auf eine ursprüngliche Einwaage entfällt.

e. Dichtebestimmung einer Flüssigkeit

Zur Bestimmung der Dichte einer Flüssigkeit wird ein genau definiertes Volumen der Flüssigkeit in ein gegenüber der Flüssigkeit und ihren Bestandteilen inertes Messgefäß eingewogen, wobei das Leergewicht und das Gewicht des befüllten Gefäßes gemessen wird. Die Dichte ergibt sich aus der Differenz der beiden Gewichtsmessungen dividiert durch das eingebrachte Volumen der Flüssigkeit.

f. Nachweis von Fluorid

15g einer Quarzglasprobe werden zerkleinert und in Salpetersäure zum Reinigen bei einer Temperatur von 70°C behandelt. Anschließend wird die Probe mehrmals mit Reinstwasser gespült, anschließend getrocknet. Davon werden 2g der Probe in einen Nickeltiegel eingewogen und mit 10g Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> sowie 0,5g ZnO überschichtet. Der Tiegel wird mit einem Ni-Deckel verschlossen und bei 1000°C für eine Stunde geglüht. Anschließend wird der Nickeltiegel mit Wasser gefüllt und aufgekocht, bis sich der Schmelzkuchen ganz gelöst hat. Die Lösung wird in einen 200ml Messkolben überführt und mit Reinstwasser auf 200 ml aufgefüllt. Nach Absetzen ungelösten Bestandteile werden 30ml abgenommen und in einen Messkolben mit 100ml überführt, 0,75ml Eisessig und 60ml TISAB hinzugegeben und mit Reinstwasser aufgefüllt. Die Messlösung wird in ein Becherglas 150ml überführt.

Die Bestimmung des Fluoridgehalts aus der Messlösung erfolgt mittels einer ionensensitiven (Fluorid) Elektrode, geeignet für den erwarteten Konzentrationsbereich, und Anzeigegerät nach Vorgabe des Herstellers, hier eine Fluorid-Ionenselektive Elektrode und Bezugselektrode F-500 mit R503/D an einem pMX 3000/pH/ION der Firma Wissenschaftlich-Technische Werkstätten GmbH. Mit der Fluoridkonzentration in der Lösung, dem Verdünnungsfaktor und der Einwaage wird die Fluoridkonzentration im Quarzglas berechnet.

g. Nachweis von Chlor ( $\geq 50$  ppm)

15g einer Quarzglasprobe werden zerkleinert und in Salpetersäure zum Reinigen bei ca. 70°C behandelt. Anschließend wird die Probe mehrmals mit Reinstwasser gespült, anschließend getrocknet. Davon werden 2g der Probe in einen PTFE-Einsatz eines Druckbehälters gefüllt, mit 15ml NaOH (c=10mol/l) versetzt, mit einem PTFE Deckel verschlossen und in den Druckbehälter gesetzt. Dieser wird verschlossen und bei ca. 155°C für 24 Stunden thermisch behandelt. Nach dem Abkühlen wird der PTFE Einsatz entnommen und die Lösung vollständig in einen Messkolben 100ml überführt. Dort werden 10ml HNO<sub>3</sub> (65 Gew.-%) und 15ml Acetatt-puffer hinzugeben, abkühlen gelassen und mit Reinstwasser auf 100 ml aufgefüllt. Die Messlösung wird in ein Becherglas 150ml überführt. Die Messlösung hat einen pH-Wert im Bereich zwischen 5 und 7.

Die Bestimmung des Chloridgehalts aus der Messlösung erfolgt mittels Ionensensitiver (Chlorid) Elektrode, geeignet für den erwarteten Konzentrationsbereich, und Anzeigegerät nach Vorgabe des Herstellers hier einer Elektrode Typ Cl-500 und Bezugselektrode Typ R-503/D an einem pMX 3000/pH/ION der Firma Wissenschaftlich-Technische Werkstätten GmbH.

h. Chlorgehalt ( $< 50$  ppm)

Chlorgehalte  $< 50$  ppm bis zu 0,1 ppm in Quarzglas werden mittels Neutronenaktivierungsanalyse (NAA) bestimmt. Dazu werden aus dem zu untersuchenden Quarzglaskörper 3 Bohrlinge mit je 3 mm Durchmesser

und je 1 cm Länge gezogen. Diese werden zur Analyse an ein Forschungsinstitut abgegeben, in diesem Fall an das Institut für Kernchemie der Johannes-Gutenberg-Universität in Mainz. Um Kontamination der Proben mit Chlor auszuschließen wird mit dem Forschungsinstitut vereinbart, eine gründliche Reinigung der Proben in einem HF-Bad vor Ort und erst unmittelbar vor der Messung vorzunehmen. Jeder Bohrling wird mehrmals vermessen. Die Ergebnisse und die Bohrlinge werden anschließend von dem Forschungsinstitut zurückübermittelt.

i. Optische Eigenschaften

Die Transmission von Quarzglasproben wird mit kommerziellen Gitter- oder FTIR Spektrometern von Perkin Elmer bestimmt (Lambda 900 [190-3000nm] oder System 2000 [1000-5000nm]). Die Wahl richtet sich nach dem benötigten Messbereich.

Zur Bestimmung der Absoluttransmission werden die Probenkörper planparallel poliert (Oberflächenrauigkeit  $RMS < 0,5nm$ ) und die Oberfläche nach der Politur von allen Rückständen durch eine Ultraschallbehandlung befreit. Die Probendicke beträgt 1cm. Im Falle von erwartetem, starkem Transmissionsverlust durch Verunreinigung, Dotierung etc., kann auch eine dickere oder dünnere Probe ausgewählt werden, um im Messbereich des Geräts zu bleiben. Es wird eine Probendicke (Messlänge) gewählt, bei der aufgrund des Strahldurchgangs durch die Probe nur geringfügig Artefakte auftreten und zugleich ein hinreichend detektierbarer Effekt gemessen wird.

Für die Messung der Opazität wird die Probe vor einer Ulbrichkugel im Strahlengang platziert. Die Opazität errechnet sich anhand des so gemessenen Transmissionswertes  $T$  gemäß der Formel:  $O = 1/T = I_0/I$ .

j. Brechzahl und Brechzahlverteilung an einem Rohr oder Stab

Die Brechzahlverteilung von Rohren / Stäben kann mittels eines York Technology Ltd. Preform Profiler P102 oder P104 charakterisiert werden. Dazu wird der Stab liegend in die Messkammer eingelegt und diese dicht verschlossen. Danach wird die Messkammer mit einem Immersionsöl aufgefüllt, das eine Brechzahl bei der Prüfwellenlänge 633nm hat, die der äußersten Glasschicht bei 633nm sehr ähnlich ist. Der Laserstrahl geht dann durch die Messkammer. Hinter der Messkammer (in Strahlrichtung) ist ein Detektor montiert, der den Ablenkwinkel (Strahleintritt in gegenüber Strahlaustritt aus der Messkammer) bestimmt. Unter Annahme der Radialsymmetrie der Brechzahlverteilung des Stabes lässt sich der diametrale Brechzahlverlauf mittels einer inversen Abel-Transformation rekonstruieren. Diese Berechnungen werden von der Software des Geräteherstellers York durchgeführt.

Die Brechzahl einer Probe wird analog der vorstehenden Beschreibung mit dem York Technology Ltd. Preform Profiler P104 bestimmt. Bei isotropen Proben ergibt sich auch bei Messen der Brechzahlverteilung nur ein Wert, die Brechzahl.

k. Kohlenstoffgehalt

Die quantitative Bestimmung des Oberflächenkohlenstoffgehaltes Siliziumdioxidgranulat und Siliziumdioxidpulver wird an einem Kohlenstoffanalysator RC612 der Fa. Leco Corporation, USA, durch die vollständige Oxidation aller Oberflächenkohlenstoffkontaminationen (außer SiC) mit Sauerstoff zu Kohlendioxid durchgeführt. Hierzu werden 4,0 g einer Probe eingewogen und in einem Quarzglasschiffchen in den Kohlenstoffanalysator eingebracht. Die Probe wird mit reinem Sauerstoff umspült und für 180 Sekunden auf 900 °C erhitzt. Das dabei gebildete CO<sub>2</sub> wird durch den Infrarotdetektor des Kohlenstoffanalysators erfasst. Unter diesen Messbedingungen liegt die Nachweisgrenze bei  $\leq 1$  ppm (Gewichts-ppm) Kohlenstoff.

Ein für diese Analyse an dem oben genannten Kohlenstoffanalysator geeignetes Quarzglasschiffchen ist erhältlich als Verbrauchsmaterial für LECO-Analysator mit der LECO-Nummer 781-335 im Laborbedarfshandel, im vorliegenden Fall von Deslis Laborhandel, Flurstraße 21, D-40235 Düsseldorf (Deutschland), Deslis-Nr. LQ-130XL. Ein solches Schiffchen hat die Abmessungen von Breite/Länge/Höhe von ca. 25mm/60mm/15mm. Das Quarzglasschiffchen wird zu halber Höhe mit Probenmaterial befüllt. Für Siliziumdioxidpulver kann so eine Einwaage von 1,0 g Probenmaterial erreicht werden. Die untere Nachweisgrenze liegt dann bei  $<1$  Gewichts-ppm Kohlenstoff. In das gleiche Quarzglasschiffchen wird bei gleicher Füllhöhe eine Einwaage von 4 g eines Siliziumdioxidgranulats erreicht (mittlere Partikelgröße im Bereich von 100 bis 500  $\mu\text{m}$ ). Die untere Nachweisgrenze liegt dann bei etwa 0,1 Gewichts-ppm Kohlenstoff. Die untere Nachweisgrenze ist erreicht, wenn das Messflächenintegral der Probe nicht größer ist als das dreifache Messflächenintegral einer Leerprobe (Leerprobe = Verfahren wie oben, aber mit leerem Quarzglasschiffchen).

l. Curl-Parameter

Der Curl-Parameter (auch genannt: „Fibre Curl“) wird bestimmt gemäß der DIN EN 60793-1-34:2007-01 (deutsche Fassung der Norm IEC 60793-1-34:2006). Gemessen wird gemäß der in Annex A in den Abschnitten A.2.1, A.3.2 und A.4.1 beschriebenen Methode („extrema technique“).

m. Dämpfung

Die Dämpfung wird bestimmt gemäß der DIN EN 60793-1-40:2001 (deutsche Fassung der IEC 60793-1-40:2001). Gemessen wird gemäß der in Annex beschriebenen Methode („cut-back method“) bei einer Wellenlänge  $\lambda=1550$  nm.

n. Viskosität der Aufschlammung

Die Aufschlammung wird mit demineralisiertem Wasser (Direct-Q 3UV, Millipore, Wasserqualität: 18,2 M $\Omega\text{cm}$ ) auf eine Konzentration von 30 Gewichts-% Feststoffgehalt eingestellt. Anschließend wird die Viskosität an einem MCR102 der Fa. Anton-Paar gemessen. Dazu wird die Viskosität bei 5 Umdrehungen/Minute (rpm) gemessen. Es wird bei einer Temperatur von 23 °C und einem Luftdruck von 1013 hPa gemessen.



o. Thixotropie

Die Aufschlammung wird mit demineralisiertem Wasser (Direct-Q 3UV, Millipore, Wasserqualität: 18,2 MΩcm) auf eine Konzentration von 30 Gewichts -% Feststoffgehalt eingestellt. Anschließend wird die Thixotropie mit einem MCR102 der Fa. Anton-Paar mit einer Kegel-Platte-Anordnung bestimmt. Dazu wird die Viskosität bei 5 und bei 50 Umdrehungen/Minute (rpm) gemessen. Der Quotient aus dem ersten und dem zweiten Wert ergibt den Thixotropieindex. Die Messung wird bei einer Temperatur von 23 °C gemessen.

p. Zeta Potential der Aufschlammung

Für Zetapotentialmessungen wird eine Zetapotentialmesszelle (Flow Cell, Beckman Coulter) eingesetzt. Die Probe wird in demineralisiertem Wasser (Direct-Q 3UV, Millipore, Wasserqualität: 18,2 MΩcm) gelöst um eine 20 mL Lösung mit Konzentration von 1 g/L zu erhalten. Der pH wird auf 7 mittels Zugabe von HNO<sub>3</sub>-Lösungen mit den Konzentrationen von 0,1 mol/L und 1 mol/L und einer NaOH-Lösung mit der Konzentration von 0,1 mol/L gebracht. Es wird bei einer Temperatur von 23 °C gemessen.

q. Isoelektrischer Punkt der Aufschlammung

Für den isoelektrischen Punkt wird eine Zetapotentialmesszelle (Flow Cell, Beckman Coulter) und ein Autotitrator (DelsaNano AT, Beckman Coulter) eingesetzt. Die Probe wird in demineralisiertem Wasser (Direct-Q 3UV, Millipore, Wasserqualität: 18,2 MΩcm) gelöst um eine 20 mL Lösung mit Konzentration von 1 g/L zu erhalten. Der pH wird mittels Zugabe von HNO<sub>3</sub>-Lösungen mit den Konzentrationen von 0,1 mol/L und 1 mol/L und einer NaOH-Lösung mit der Konzentration von 0,1 mol/L variiert. Der isoelektrische Punkt ergibt sich als der pH Wert bei dem das Zeta-Potenzial gleich 0 ist. Es wird bei einer Temperatur von 23 °C gemessen.

r. pH Wert der Aufschlammung

Der pH Wert der Aufschlammung wird mittels eines WTW 3210 der Fa. Wissenschaftlich-Technische-Werkstätten GmbH gemessen. Als Elektrode wird die pH 3210 Set 3 der Fa. WTW eingesetzt. Es wird bei einer Temperatur von 23 °C gemessen.

s. Feststoffgehalt

Eine Einwaage  $m_1$  einer Probe wird für 4 Stunden auf 500 °C erhitzt und nach dem Abkühlen erneut gewogen ( $m_2$ ). Der Feststoffgehalt  $w$  ergibt sich aus  $m_2/m_1 \cdot 100$  [Gew. %].

t. Schüttdichte

Die Schüttdichte wird gemäß der Norm DIN ISO 697:1984-01 mit einem SMG 697 der Fa. Powtec bestimmt.

Das Schüttgut (Siliziumdioxidpulver bzw. -granulat) bildet keine Klumpen.

u. Stampfdichte (granulate)

Die Stampfdichte wird gemäß der Norm DIN ISO 787:1995-10 gemessen.

v. Bestimmung der Porengrößenverteilung

Die Bestimmung der Porengrößenverteilung erfolgt gemäß DIN 66133 (mit einer Oberflächenspannung 480 mN/m und einem Kontaktwinkel von 140°). Für die Messung von Porengrößen kleiner als 3,7 nm wird das Pascal 400 von der Fa. Porotec angewendet. Für die Messung von Porengrößen von 3,7 nm bis 100 µm wird das Pascal 140 von der Fa. Porotec angewendet. Die Probe wird vor der Messung einer Druckbehandlung unterzogen. Genutzt wird hierzu eine Manual Hydraulic Press (Bestell-Nr. 15011 der Fa. Specac Ltd., River House, 97 Cray Avenue, Orpington, Kent BR5 4HE, U.K.). Dabei werden in eine „Pellet Die“ mit 13 mm Innendurchmesser der Fa. Specac Ltd. 250 mg Probenmaterial eingewogen und laut Anzeige mit 1 t belastet. Diese Last wird 5 s gehalten und gegebenenfalls nachgeregelt. Anschließend wird die Probe entspannt und für 4 h bei 105 ± 2°C in einem Umlufttrockenschrank getrocknet.

Die Einwaage der Probe in das Penetrometer vom Typ 10 erfolgt auf 0,001 g genau und wird für eine gute Reproduzierbarkeit der Messung so gewählt, dass das „stem volume used“, also das prozentual verbrauchte Hg-Volumen zum Füllen des Penetrometers im Bereich zwischen 20% bis 40% des Gesamt-Hg-Volumens beträgt. Anschließend wird das Penetrometer langsam auf 50 µm Hg evakuiert und für 5 min bei diesem Druck belassen. Folgende Parameter werden direkt von der Software der Messgeräte angegeben: Gesamtporenvolumen, Gesamtporenoberfläche (Annahme Poren zylindrisch), Durchschnittlicher Porenradius, Modaler Porenradius (häufigster Porenradius), Peak n. 2 Porenradius (µm).

w. Primärpartikelgröße

Die Primärpartikelgröße wird mittels eines Rasterelektronenmikroskops (REM) Modell Zeiss Ultra 55 gemessen. Die Probe wird in demineralisiertem Wasser (Direct-Q 3UV, Millipore, Wasserqualität: 18,2 MΩcm) suspendiert, um eine extrem verdünnte Suspension zu erhalten. Die Suspension wird mit der Ultraschallsonde (UW 2070, Bandelin electronic, 70 W, 20 kHz) für 1 min behandelt und dann auf ein Kohlenstoff-Klebepad aufgetragen.

x. Mittlere Partikelgröße in Suspension

Die mittlere Partikelgröße in Suspension wird mittels eines Mastersizers 2000, erhältlich von Malvern Instruments Ltd., UK, gemäß deren Bedienungsanleitung unter Anwendung der Laserbeugungs-Methode gemessen. Die Probe wird in demineralisiertem Wasser (Direct-Q 3UV, Millipore, Wasserqualität: 18,2 MΩcm) suspendiert, um 20 mL Suspension mit einer Konzentration von 1 g/L zu erhalten. Die Suspension wird mit der Ultraschallsonde (UW 2070, Bandelin electronic, 70 W, 20 kHz) für 1 min behandelt.

y. Partikelgröße und Korngröße des Feststoffs

Die Partikelgröße und Korngröße des Feststoffs werden mittels eines Camsizers XT, erhältlich von Retsch Technology GmbH, Deutschland gemäß deren Bedienungsanleitung gemessen. Die Software gibt die D10, D50 und D90-Werte für eine Probe aus.

z. BET Messung

Für die Messung der spezifischen Oberfläche wird die statisch volumetrische BET-Methode gemäß DIN ISO 9277:2010 angewendet. Für die BET Messung wird ein „NOVA 3000“ bzw. ein „Quadrasorb“ (von der Firma

Quantachrome erhältlich), welche gemäß der SMART Methode („Sorption Method with Adaptive dosing Rate“) funktioniert, angewendet. Die Mikroporenanalyse wird mittels t-plot-Verfahren ( $p/p_0 = 0,1-0,3$ ) und die Mesoporenanalyse mittels MBET-Verfahren ( $p/p_0 = 0,0-0,3$ ) durchgeführt. Als Referenzmaterial, werden die Standards Alumina SARM-13 und SARM-214 verwendet, erhältlich bei Quantachrome. Das Tara-Gewicht der eingesetzten Messzellen (sauber und trocken) wird gewogen. Der Messzellentyp wird so gewählt, dass das zugeführte Probematerial und der Füllstab die Messzelle möglichst füllen und der tote Raum auf ein Minimum reduziert wird. Das Probematerial wird in die Messzelle gebracht. Die Menge des Probematerials wird so ausgewählt, dass der zu erwartende Messwert 10-20 m<sup>2</sup>/g entspricht. Die Messzellen werden in den Ausheizstationen des BET-Messgerätes fixiert (ohne Füllstab) und auf <200 mbar evakuiert. Die Geschwindigkeit des Evakuierens wird so eingestellt, dass kein Material aus der Messzelle entweicht. In diesem Zustand wird bei 200°C für 1h ausgeheizt. Nach dem Abkühlen, wird die mit Probe gefüllte Messzelle gewogen (Brutto). Anschließend wird das Tara-gewicht vom Brutto-Gewicht abgezogen = Nettogewicht = Gewicht der Probe. Nun wird der Füllstab in die Messzelle eingeführt und diese wiederum in der Messstation des BET-Messgerätes fixiert. Vor Messstart werden die Probenbezeichnung und das Probengewicht in die Software eingepflegt. Die Messung wird gestartet. Der Sättigungsdruck des Stickstoffgases (N<sub>2</sub> 4.0) wird gemessen. Die Messzelle wird evakuiert und wird mit Hilfe eines Stickstoffbads auf 77 K heruntergekühlt. Der tote Raum wird mittels Heliumgas (He 4.6) gemessen. Es wird erneut evakuiert. Eine Mehrpunktanalyse mit mindestens 5 Messpunkten wird ausgeführt. Als Adsorptiv, wird N<sub>2</sub> 4.0 angewendet. Die spezifische Oberfläche wird in m<sup>2</sup>/g angegeben.

#### za. Viskosität von Glaskörpern

Die Viskosität des Glases wird mit Hilfe des Balkenbiegeviskosimeter Typ 401 – Fa. TA Instruments mit der Herstellersoftware WinTA (aktuell Version 9.0) unter Windows 10 gemäß der Norm DIN ISO 7884-4:1998-02 gemessen. Die Stützweite zwischen den Auflagern beträgt 45mm. Probestäbchen mit rechteckigem Querschnitt werden aus Bereichen homogenen Materials geschnitten (Probenober- und -unterseite mit Feinschliff mindestens 1000-er Korn). Die Probenoberflächen nach Bearbeitung haben Korngröße = 9µm & RA = 0,15µm. Die Probestäbchen haben folgende Maße: Länge = 50mm, Breite = 5mm & Höhe = 3mm (Zuordnung Länge, Breit, Höhe wie in der Norm). Drei Proben werden gemessen und der Mittelwert errechnet. Die Proben temperatur wird durch ein Thermoelement dicht an der Probenoberfläche gemessen. Folgende parameter werden angewendet: Heizrate = 25 K auf maximal 1500 °C, Belastungsgewicht = 100 g, maximale Durchbiegung = 3000 µm (in Abweichung von der Norm).

#### zb. Taupunktmessung

Der Taupunkt wird mittels eines Taupunktspiegelhygrometers mit der Bezeichnung „Optidew“ der Firma Michell Instruments GmbH, D-61381 Friedrichsdorf bestimmt. Die Messzelle des Taupunktspiegelhygrometers ist in einem Abstand von 100 cm von dem Gasauslass des Ofens angeordnet. Das Messgerät mit der Messzelle ist dazu über ein T-Stück und einen Schlauch (Swagelok PFA, Außendurchmesser: 6mm) mit dem Gasauslass des Ofens gasleitend verbunden. An der Messzelle liegt ein Überdruck von 10±2 mbar an. Der Durchfluss des Gases durch die Messzelle beträgt 1-2 Normliter/min. Die Messzelle befindet sich in einem Raum mit einer Temperatur von 25°C, 30 % relativer Luftfeuchte und einem mittleren Luftdruck von 1013 hPa.

zc. Restfeuchte (Wassergehalt)

Die Bestimmung der Restfeuchte einer Probe Siliziumdioxidgranulat erfolgt mit Hilfe eines Moisture Analyzers HX204 der Firma Mettler Toledo. Das Gerät arbeitet nach dem Prinzip der Thermogravimetrie. Der HX204 ist mit einem Halogenstrahler als Heizelement ausgerüstet. Die Trocknungstemperatur beträgt 220°C. Das Startgewicht der Probe liegt bei  $10 \text{ g} \pm 10 \%$ . Es wird die Messmethode „Standard“ ausgewählt. Die Trocknung wird solange fortgesetzt bis die Gewichtsänderung nicht mehr als  $1 \text{ mg} / 140 \text{ s}$  erreicht. Die Restfeuchte ergibt sich aus der Differenz von Startgewicht der Probe zu Endgewicht der Probe, geteilt durch das Startgewicht der Probe.

Die Bestimmung der Restfeuchte von Siliziumdioxidpulver wird gemäß DIN EN ISO 787-2:1995 (2h, 105°C) durchgeführt.

**Beispiele**

Die Erfindung wird im folgenden durch Beispiele weiter beispielhaft illustriert. Die Erfindung ist nicht auf die  
5 Beispiele beschränkt.

**A. 1. Herstellen von Siliziumdioxidpulver (OMCTS-Route)**

Das aus der Verdüsung eines Siloxans mit Luft (A) gebildete Aerosol wird mit Druck in eine Flamme  
eingebracht, die durch Zündung eines Gemisches von mit Sauerstoff angereicherter Luft (B) und Was-  
10 serstoff gebildet wird. Weiterhin wird ein die Flamme umgebender Luftstrom (C) eingebracht und das  
Prozessgemisch nachfolgend mit Prozessgas abgekühlt. Das Produkt wird an einem Filter abgeschieden.  
Die Verfahrensparameter sind in Tabelle 1 und die Kenndaten der resultierenden Produkte in Tabelle 2  
angegeben. Experimentaldaten zu diesem Beispiel sind mit **A1-x** gekennzeichnet.

**2. Modifizierung 1: Erhöhter Kohlenstoffgehalt**

Es wurde wie unter A.1. beschrieben verfahren, das Verbrennen des Siloxans wurde aber so geführt, dass  
dabei auch eine Menge an Kohlenstoff gebildet wird. Experimentaldaten zu diesem Beispiel sind mit **A2-**  
15 **x** gekennzeichnet.

**Tabelle 1**

<b>Beispiel</b>		<b>A1-1</b>	<b>A2-1</b>	<b>A2-2</b>
<u>Aerosolbildung</u>				
Siloxan		OMCTS*	OMCTS*	OMCTS*
Zufuhr	Kg/h (kmol/h)	10 (0,0337)	10 (0,0337)	10 (0,0337)
Zufuhr Luft (A)	Nm <sup>3</sup> /h	14	10	12
Druck	barÜ	1,2	1,2	1,2
<u>Zufuhr Brenner</u>				
Sauerstoffangereicherte Luft (B)	Nm <sup>3</sup> /h	69	65	68
O <sub>2</sub> -Gehalt	Vol. %	32	30	32
Summe O <sub>2</sub> Zufuhr	Nm <sup>3</sup> /h	25,3	21,6	24,3
	Kmol/h	1,130	0,964	1,083
Zufuhr Wasserstoff	Nm <sup>3</sup> /h	27	27	12
	Kmol/h	1,205	1,205	0,536
Zufuhr Kohlenstoffverbindung		--	--	
Stoff				Methan
Menge	Nm <sup>3</sup> /h			5,5
Luftstrom (C)	Nm <sup>3</sup> /h	60	60	60
<u>Stöchiometrische Verhältnisse</u>				
V		2,099	1,789	2,011
X		0,938	0,80	2,023
Y		0,991	0,845	0,835

V = molares Verhältnis eingesetzter O<sub>2</sub>/Bedarf an O<sub>2</sub> zur vollständigen Oxidation des Siloxans; X = als molares Verhältnis O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>; Y = (mol. Verhältnis eingesetztes O<sub>2</sub>/ Bedarf an O<sub>2</sub> für stöchiometrische Umsetzung OMCTS+ Brenngase); barÜ=Überdruck;

\* OMCTS = Octamethylcyclotetrasiloxan.

Tabelle 2

Beispiel		A1-1	A2-1	A2-2
BET	m <sup>2</sup> /g	30	33	34
Schüttdichte	g/ml	0,114 +- 0,011	0,105 +- 0,011	0,103 +- 0,011
Stampfdichte	g/ml	0,192 +- 0,015	0,178 +- 0,015	0,175 +- 0,015
Primärpartikelgröße	nm	94	82	78
Partikelgrößenverteilung D10	µm	3,978±0,380	5,137±0,520	4,973±0,455
Partikelgrößenverteilung D50	µm	9,383±0,686	9,561±0,690	9,423±0,662
Partikelgrößenverteilung D90	µm	25,622±1,387	17,362±0,921	18,722±1,218
C-Gehalt	ppm	34±4	73±6	80±6
Cl-Gehalt	ppm	< 60	< 60	< 60
Al-Gehalt	ppb	20	20	20
Gesamtgehalt Metalle außer Al	ppb	< 700	< 700	< 700
Restfeuchte	Gew.- %	0,02-1,0	0,02-1,0	0,02-1,0
pH-Wert in Wasser 4% (IEP)	-	4,8	4,6	4,5
Viskosität bei 5 rpm, wässrige Suspension 30 Gew-%, 23 °C	mPas	753	1262	1380
Erdalkalimetallgehalt	ppb	538	487	472

## B. 1. Herstellen von Siliziumdioxidpulver (Siliziumquelle: SiCl<sub>4</sub>)

- 5 Eine Menge Siliziumtetrachlorid (SiCl<sub>4</sub>) wird bei einer Temperatur T verdampft und mit einem Druck P in eine Flamme eines Brenners eingebracht, die durch Zündung eines Gemisches von mit Sauerstoff angereicherter Luft und Wasserstoff gebildet wird. Der mittlere normalisierte Gasfluß an der Brennermündung wird festgehalten. Das Prozessgemisch wird nachfolgend mit Prozessgas abgekühlt. Das Produkt wurde an einem Filter abgeschieden. Die Verfahrensparameter sind in Tabelle 3 und die Kenndaten der resultierenden Produkte in der Tabelle 4 angegeben. Sie sind mit **B1-x** gekennzeichnet.

## 2. Modifizierung 1: Erhöhter Kohlenstoffgehalt

- 15 Es wurde wie unter B.1. beschrieben verfahren, das Verbrennen des Siliziumtetrachlorids wurde aber so geführt, dass dabei auch eine Menge an Kohlenstoff gebildet wird. Experimentaldaten zu diesem Beispiel sind mit **B2-x** gekennzeichnet.

**Tabelle 3**

Beispiel		B1-1	B2-1
<u>Aerosolbildung</u>			
Zufuhr Siliziumtetrachlorid	Kg/h (kmol)	50 (0,294)	50 (0,294)
Temperatur T	°C	90	90
Druck p	barÜ	1,2	1,2
<u>Zufuhr Brenner</u>			
Sauerstoffangereicherte Luft, darin O <sub>2</sub> -Gehalt	Nm <sup>3</sup> /h	145	115
	Vol. %	45	30
Zufuhr Kohlenstoffverbin- dung		--	
Stoff			Methan
Menge	Nm <sup>3</sup> /h		2,0
Zufuhr Wasserstoff	Nm <sup>3</sup> /h Kmol/h	115 5,13	60 2,678
<u>Stöchiometrische Verhältnisse</u>			
X		0,567	0,575
Y		0,946	0,85

X = als molares Verhältnis O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>; Y = mol. Verhältnis eingesetztes O<sub>2</sub>/ O<sub>2</sub>-Bedarf für stöchiometrische Reaktion mit SiCl<sub>4</sub>+ H<sub>2</sub> + CH<sub>4</sub>); barÜ = Überdruck.

**Tabelle 4**

Beispiel		B1-1	B2-1
BET	m <sup>2</sup> /g	49	47
Schüttdichte	g/ml	0,07 ± 0,01	0,06±0,01
Stampfdichte	g/ml	0,11 ± 0,01	0,10 ± 0,01
Primärpartikelgröße	nm	48	43
Partikelgrößenverteilung D10	µm	5,0±0,5	4,5±0,5
Partikelgrößenverteilung D50	µm	9,3±0,6	8,7±0,6
Partikelgrößenverteilung D90	µm	16,4±0,5	15,8±0,7
C-Gehalt	ppm	< 4	76
Cl-Gehalt	ppm	280	330
Al-Gehalt	ppb	20	20
Summe der Konzentrationen von Ca, Co, Cr, Cu, Fe, Ge, Hf, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Ni, Ti, V, W, Zn, Zr	ppb	< 1300	< 1300
Restfeuchte	Gew.-%	0,02-1,0	0,02-1,0
pH-Wert in Wasser 4% (IEP)	pH	3,8	3,8
Viskosität bei 5 rpm, wässrige Suspension 30 Gew.-%, 23 °C	mPas	5653	6012
Erdalkalimetallgehalt	ppb	550	342



**C. Wasserdampfbehandlung**

Ein Partikelstrom von Siliziumdioxidpulver wird über den Kopf einer stehenden Säule eingebracht. Über den Fuß der Säule werden Wasserdampf mit einer Temperatur (A) und Luft zugeführt. Die Säule wird durch eine innenliegende Heizung auf eine Temperatur (B) am Säulenkopf und eine zweite Temperatur (C) am Säulenfuß gehalten. Nach Verlassen der Säule (Verweilzeit (D)) weist das Siliziumdioxidpulver insbesondere die in Tabelle 6 gezeigten Eigenschaften auf. Die Verfahrensparameter sind in Tabelle 5 angegeben.

**Tabelle 5**

<b>Beispiel</b>		<b>C-1</b>	<b>C-2</b>
Edukt: Produkt aus		<b>B1-1</b>	<b>B2-1</b>
Zufuhr Edukt	kg/h	100	100
Zufuhr Wasserdampf	kg/h	5	5
Temperatur Wasserdampf (A)	°C	120	120
Zufuhr Luft	Nm <sup>3</sup> /h	4,5	4,5
Säule			
Höhe	m	2	2
Innendurchmesser	mm	600	600
T (B)	°C	260	260
T (C)	°C	425	425
Verweilzeit (D) Siliziumdioxidpulver	s	10	10

**Tabelle 6**

<b>Beispiel</b>		<b>C-1</b>	<b>C-2</b>
pH-Wert in Wasser 4% (IEP)	-	4,6	4,6
Cl-Gehalt	ppm	< 60	< 60
C-Gehalt	ppm	< 4	36
Viskosität bei 5 rpm, wässrige Suspension 30 Gew-%, 23 °C	mPas	1523	1478

Die in den Beispielen C-1 und C-2 erhaltenen Siliziumdioxidpulver weisen jeweils einen niedrigen Chlorgehalt, sowie in Suspension einen moderaten pH-Wert auf. Der Kohlenstoffgehalt von Beispiel C-2 ist höher als bei C-1.

**D. Behandlung mit Neutralisationsmittel**

Ein Partikelstrom von Siliziumdioxidpulver wird über den Kopf einer stehenden Säule eingebracht. Über den Fuß der Säule wird ein Neutralisationsmittel und Luft zugeführt. Die Säule wird durch eine innenliegende Heizung auf eine Temperatur (B) am Säulenkopf und eine zweite Temperatur (C) am Säulenfuß gehalten. Nach Verlassen der Säule (Verweilzeit (D)) weist das Siliziumdioxidpulver insbesondere die in Tabelle 8 gezeigten Eigenschaften auf. Die Verfahrensparameter sind in Tabelle 7 angegeben.

**Tabelle 7**

<b>Beispiel</b>		<b>D-1</b>
Edukt: Produkt aus		<b>B1-1</b>
Zufuhr Edukt	kg/h	100
Neutralisationsmittel		Ammoniak
Zufuhr Neutralisationsmittel	kg/h	1,5
Kenndaten Neutralisationsmittel		Erhältlich bei Air Liquide: Ammoniak N38, Reinheit $\geq$ 99,98 Vol.%
Zufuhr Luft	Nm <sup>3</sup> /h	4,5
Säule		
Höhe	m	2
Innendurchmesser	mm	600
T (B)	°C	200
T (C)	°C	250
Verweilzeit (D) Siliziumdi- oxidpulver	s	10

**Tabelle 8**

<b>Beispiel</b>		<b>D-1</b>
pH-Wert in Wasser 4% (IEP)	-	4,8
Cl-Gehalt	ppm	210
C-Gehalt	ppm	< 4
Viskosität bei 5 rpm, wässrige Suspension 30 Gew-%, 23 °C	mPas	821

### 5 E. 1. Herstellen von Siliziumdioxidgranulat aus Siliziumdioxidpulver

Ein Siliziumdioxidpulver wird in vollentsalztem Wasser dispergiert. Dabei wird ein Intensivmischer Typ R der Maschinenfabrik Gustav Eirich eingesetzt. Die entstehende Suspension wird durch eine Membranpumpe gefördert und dabei mit Druck beaufschlagt und durch eine Düse in Tröpfchen überführt. Diese werden in einem Sprühturm getrocknet und sammeln sich an dessen Boden. Die Verfahrensparameter sind in Tabelle 9 angegeben, die Eigenschaften der erhaltenen Granulate in Tabelle 10. Experimentaldaten zu diesem Beispiel sind mit **E1-x** gekennzeichnet.

### 2. Modifizierung 1: Erhöhter Kohlenstoffgehalt

Es wird analog der Beschreibung E.1. verfahren. Zusätzlich wird Kohlenstoffpulver in die Suspension eindispersiert. Experimentaldaten zu diesem Beispiel sind mit **E2-x** gekennzeichnet.

### 3. Modifizierung 2: Zugabe von Silizium

Es wird analog der Beschreibung E.1. verfahren. Zusätzlich wird eine Siliziumkomponente in die Suspension eindispersiert. Experimentaldaten zu diesem Beispiel sind mit **E3-1** gekennzeichnet.

Tabelle 9

Beispiel		E1-1	E1-2	E1-3	E1-4	E1-5	E2-1	E3-1	E3-2
Edukt = Produkt aus		A1-1	A2-1	B1-1	C-1	C-2	A1-1	A1-1	A2-1
Menge Edukt	Kg	10	10	10	10	10	10	10	10
<u>Kohlenstoffpulver</u> Material Max. Partikelgröße Menge		--	--	--	--	--	C** 75 µm 1 g	--	--
<u>Siliziumkomponente</u> Stoff		--	--	--	--	--	--	Siliziumpulver***	--
Korngröße (d50) Menge Kohlenstoffgehalt								8 µm 1000 ppm 0.5 ppm	
Summe der Konzentrationen von Ca, Co, Cr, Cu, Fe, Ge, Hf, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Ni, Ti, V, W, Zn, Zr								5 ppm	
Wasser	Güte* Liter	VE 5,4	VE 5,4	VE 5,4	VE 5,4	VE 5,4	VE 5,4	VE 5,4	VE 5,4
Dispersion Feststoffgehalt	Gew. %	65	65	65	65	65	65	65	65
Düse Durchmesser Temperatur Druck Einbauhöhe	mm °C Bar m	2,2 25 16 6,5	2,2 25 16 6,5	2,2 25 16 6,5	2,2 25 16 6,5	2,2 25 16 6,5	2,2 25 16 6,5	2,2 25 16 6,5	2,2 25 16 6,5
Sprühturm Höhe Innendurchmesser	m m	18,20 6,30	18,20 6,30	18,20 6,30	18,20 6,30	18,20 6,30	18,20 6,30	18,20 6,30	18,20 6,30
T (Zugeführtes Gas)	°C	380	380	380	380	380	380	380	380
T (Abluft)	°C	110	110	110	110	110	110	110	110
Luftstrom	m <sup>3</sup> /h	6500	6500	6500	6500	6500	6500	6500	6500

Einbauhöhe = Abstand zwischen Düse und tiefstem Punkt des Sprühturminneren in Richtung des Schwerkraftvektors.

\* VE = vollentsalzt, Leitwert  $\leq 0,1 \mu\text{S}$ ;

\*\* C 006011: Graphitpulver, max. Teilchengröße: 75 µm, hochrein (erhältlich bei Goodfellow GmbH, Bad Nauheim (Deutschland);

\*\*\* erhältlich bei der Wacker Chemie AG (München, Deutschland).

**Tabelle 10**

<b>Beispiel</b>		<b>E1-1</b>	<b>E1-2</b>	<b>E1-3</b>	<b>E1-4</b>	<b>E1-5</b>	<b>E2-1</b>	<b>E3-1</b>	<b>E3-2</b>
BET	m <sup>2</sup> /g	30	33	49	49	47	28	31	35
Schüttdichte	g/ml	0,8±0,1	0,8±0,1	0,8±0,1	0,8±0,1	0,8±0,1	0,8±0,1	0,8±0,1	0,8±0,1
Stampfdichte	g/ml	0,9±0,1	0,9±0,1	0,9±0,1	0,9±0,1	0,9±0,1	0,9±0,1	0,9±0,1	0,9±0,1
mittlere Partikelgröße	µm	255	255	255	255	255	255	255	255
Partikelgrößenverteilung g D10	µm	110	110	110	110	110	110	110	110
Partikelgrößenverteilung g D50	µm	222	222	222	222	222	222	222	222
Partikelgrößenverteilung g D90	µm	390	390	390	390	390	390	390	390
SPHT3	Dim-los	0,64-0,98	0,64-0,98	0,64-0,98	0,64-0,98	0,64-0,98	0,64-0,98	0,64-0,98	0,64-0,98
Aspektverhältnis B/L (Breite zu Länge)	Dim-los	0,64-0,94	0,64-0,94	0,64-0,94	0,64-0,94	0,64-0,94	0,64-0,94	0,64-0,94	0,64-0,94
C-Gehalt	ppm	< 4	39	< 4	< 4	32	100	< 4	39
Cl-Gehalt	ppm	< 60	< 60	280	<60	<60	<60	<60	< 60
Al-Gehalt	ppb	20	20	20	20	20	20	20	20
Summe der Konzentrationen von Ca, Co, Cr, Cu, Fe, Ge, Hf, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Ni, Ti, V, W, Zn, Zr	ppb	< 700	< 700	< 1300	< 1300	< 1300	< 700	< 700	< 700
Restfeuchte	Gew.-%	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3
Erdalkalimetallgehalt	ppb	538	487	550	550	342	538	538	487
Porenvolumen	ml/g	0,33	0,33	0,45	0,45	0,45	0,33	0,33	0,33
Schüttwinkel	°	26	26	26	26	26	26	26	26

Die Granulate sind allesamt offenporig, zeigen eine gleichmäßige und kugelförmige Gestalt (alles mikroskopische Untersuchung). Sie neigen nicht zum Verbacken oder Verkleben.

#### **F. Reinigen von Siliziumdioxidgranulat**

- 5 Siliziumdioxidgranulat wird in einem Drehrohrföfen zunächst gegebenenfalls bei einer Temperatur T1 mit Sauerstoff oder Stickstoff (siehe Tabelle 11) behandelt. Anschließend wird das Siliziumdioxidgranulat im Gleichstrom mit einer chlorhaltigen Komponente behandelt, wobei die Temperatur bis auf eine Temperatur T2 erhöht wird. Die Verfahrensparameter sind in Tabelle 11 angegeben, die Eigenschaften der erhaltenen behandelten Granulate in Tabelle 12.

Tabelle 11

Beispiel	F1-1	F1-2	F1-3	F1-4	F1-5	F2-1	F3-1	F3-2
Edukt = Produkt aus	E1-1	E1-2	E1-3	E1-4	E1-5	E2-1	E3-1	E3-2
<u>Drehrohrofen<sup>1)</sup></u>								
Länge	200		200	200	200		200	200
Innendurchmesser	10		10	10	10		10	10
Durchsatz	2		2	2	2		2	2
Rotationsgeschwindigkeit	2		2	2	2		2	2
it								
T1	1100		1100	1100	1100		1100	1100
<u>Atmosphäre</u>	O <sub>2</sub> pur	entfällt	O <sub>2</sub> pur	O <sub>2</sub> pur	O <sub>2</sub> pur	entfällt	N <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
<u>Reaktand</u>	O <sub>2</sub>	entfällt	O <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	entfällt	Keine	Keine
Zuführung	300 l/h	entfällt	300 l/h	300 l/h	300 l/h	entfällt		
Restfeuchte	<1	< 3	<1	<1	<1	< 3	<1	<1
	Gew.-							
	%							
T2	1100	1100	1100	1100	1100	1100	entfällt	entfällt
<u>Gleichstrom</u>								
Komponente 1: HCl	50	50	50	50	50	50	entfällt	entfällt
Komponente 2: Cl <sub>2</sub>	0	15	0	0	0	15	entfällt	entfällt
Komponente 3: N <sub>2</sub>	50	35	50	50	50	35	entfällt	entfällt
Gleichstrom gesamt	100	100	100	100	100	100	entfällt	entfällt

<sup>1)</sup> Bei den Drehrohrofen wurde der Durchsatz als Regelgröße gewählt. Das bedeutet, dass im Betrieb laufend der aus dem Drehrohrofen austretende Massenstrom gewogen wird und dann die Rotationsgeschwindigkeit und/oder die Neigung des Drehrohrofens entsprechend angepasst werden. Zum Beispiel kann eine Erhöhung des Durchsatzes erreicht werden durch a) Erhöhen der Rotationsgeschwindigkeit, oder b) Erhöhen der Neigung des Drehrohrs aus der Waagrechten, oder einer Kombination von a) und b).

Tabelle 12

Beispiel		F1-1	F1-2	F1-3	F1-4	F1-5	F2-1	F3-1	F3-2
BET	m <sup>2</sup> /g	25	27	43	45	40	23	25	26
C-Gehalt	ppm	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4
Cl-Gehalt	ppm	100-200	100-200	300-400	100-200	100-200	100-200	<60	<60
Al-Gehalt	ppb	20	20	20	20	20	20	20	20
Porenvolumen	mm <sup>3</sup> /g	650	650	650	650	650	650	650	650
Summe der Konzentrationen von Ca, Co, Cr, Cu, Fe, Ge, Hf, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Ni, Ti, V, W, Zn, Zr	ppb	<200	<200	<200	<200	<200	<200	<700	<700
Erdalkalimetallgehalt	ppb	115	55	95	115	40	35	136	33
Stampfdichte	g/cm <sup>3</sup>	0,95±0,05	0,95±0,05	0,95±0,05	0,95±0,05	0,95±0,05	0,95±0,05	0,95±0,05	0,95±0,05

Die Granulate nach dem Reinigungsschritt zeigen im Fall von F1-2, F2-1 und F3-2 einen erheblich verringerten Kohlenstoffgehalt (wie kohlenstoffarme Granulate, z.B. F1-1). Insbesondere F1-2, F1-5, F2-1 und F3-2 zeigen einen erheblich niedrigeren Gehalt an Erdalkalimetallen. SiC-Bildung wurde nicht beobachtet.

**G. Wärmebehandlung von Siliziumdioxidgranulat**

Siliziumdioxidgranulat wird in einer dem Schmelzofen vorgeschalteten und mit dieser über eine weitere Zwischenkammer stoffleitend verbundenen Vorkammer in Gestalt eines Drehrohrofens einer Temperaturbehandlung unterzogen. Der Drehrohrofen ist durch ein in Förderrichtung ansteigendes Temperaturprofil gekennzeichnet. Erhalten wurde ein weiter behandeltes Siliziumdioxidgranulat. In Beispiel G-4-2 wurde auf eine Wärmebehandlung beim Mischen im Drehrohrofen verzichtet. Die Verfahrensparameter sind in Tabelle 13 angegeben, die Eigenschaften der erhaltenen behandelten Granulate in Tabelle 14.

Tabelle 13

Beispiel	G1-1	G1-2	G1-3	G1-4	G1-5	G2-1	G3-1	G3-2	G4-1	G4-2
Edukt = Produkt aus	F1-1	F1-2	F1-3	F1-4	F1-5	F2-1	F3-1	F3-2	F1-1	F1-1
Siliziumkomponenten	--	--	--	--	--	--	--	---	Silizium pulver** *	Silizium pulver** *
Stoff									0,01%	0,1%
Menge										entfällt
<u>Drehrohren</u> <sup>1)</sup>										
Länge	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Innendurchmesser	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Durchsatz	8	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Rotationsgeschwindigkeit	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
T1 (Einlass Drehrohren)	RT	RT	RT	RT	RT	RT	RT	RT	RT	RT
T2 (Auslass Drehrohren)	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
<u>Atmosphäre</u>										
Gas, Strömungsrichtung	Luft, freie Konvek- tion	O <sub>2</sub> , im Gegenstr om	O <sub>2</sub> , im Gegenstr om	O <sub>2</sub> , im Gegenstr om	O <sub>2</sub> , im Gegenstr om	O <sub>2</sub> , im Gegenstr om	O <sub>2</sub> , im Gegenstr om	O <sub>2</sub> , im Gegenstr om	O <sub>2</sub> , im Gegenstr om	O <sub>2</sub> , im Gegenstr om
Durchsatz Gasstrom gesamt	Nm <sup>3</sup> /h	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6

\*\*\* Korngröße D<sub>50</sub>=8 µm; Kohlenstoffgehalt ≤ 5 ppm; Summe Fremdmetalle ≤ 5ppm; 0.5 ppm; erhältlich bei der Wacker Chemie AG (München, Deutschland); RT=Raumtemperatur.

- 5 <sup>1)</sup> Bei den Drehrohren wurde der Durchsatz als Regelgröße gewählt. Das bedeutet, dass im Betrieb laufend der aus dem Drehrohren austretende Massenstrom gewogen wird und dann die Rotationsgeschwindigkeit und/oder die Neigung des Drehrohrens entsprechend angepasst werden. Zum Beispiel kann eine Erhöhung des Durchsatzes erreicht werden durch a) Erhöhen der Rotationsgeschwindigkeit, oder b) Erhöhen der Neigung des Drehrohrs aus der Waagrechten, oder einer Kombination von a) und b).



Tabelle 14

Beispiel		G1-1	G1-2	G1-3	G1-4	G1-5	G2-1	G3-1	G3-2	G4-1	G4-2
BET	m <sup>2</sup> /g	22	23	38	42	37	22	22	21	22	24
Wassergehalt (Restfeuchte)	ppm	500	100	100	100	100	100	500	100	500	<10000
C-Gehalt	ppm	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4
Cl-Gehalt	ppm	100-200	100-200	300-400	100-200	100-200	100-200	<60	<60	100-200	100-200
Al-Gehalt	ppb	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Summe der Konzentrationen von Ca, Co, Cr, Cu, Fe, Ge, Hf, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Ni, Ti, V, W, Zn, Zr	ppb	≤ 200	≤ 200	≤ 200	≤ 200	≤ 200	≤ 200	≤ 200	≤ 200	≤ 200	≤ 200
Erdalkalimetallgehalt	ppb	115	55	95	115	40	35	136	33	115	115
Schüttwinkel	°	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26

G3-1 und G3-2 weisen infolge dieser Behandlung einen erheblich verringerten Erdalkalimetallgehalt im Vergleich zu davor (F3-1 beziehungsweise F3-2) auf.

## H. Schmelzen von Granulat zu Quarzglas

Siliziumdioxidgranulat gemäß Zeile 2 von Tabelle 15 wird zur Herstellung eines Quarzglasrohres in einem Vertikal-Tiegelziehverfahren eingesetzt. Der Aufbau des stehenden Ofens für Beispiel **H5-1** beinhaltend einen stehenden Schmelztiegel ist in Figur 9 schematisch gezeigt, für alle anderen Beispiele mit einem hängenden Schmelztiegel steht Figur 8 als schematische Abbildung. Das Siliziumdioxidgranulat wird über die Feststoffzuführung zugegeben und das Innere des Schmelztiegels mit einem Gasgemisch gespült. Im Schmelztiegel bildet sich eine Glasschmelze, auf welcher ein Schüttkegel aus Siliziumdioxidgranulat aufsitzt. Im unteren Bereich des Schmelztiegels wird geschmolzenes Glas aus der Glasschmelze über eine Ziehdüse (ggf. mit einem Dorn) entnommen und als Rohrstrang vertikal nach unten abgezogen. Aufgrund des Eigengewichts und der Viskosität der Glasschmelze über der Düse und der durch die Düse vorgegebenen Lochgröße ergibt sich der Durchsatz der Anlage. Durch Variieren der zugeführten Menge Siliziumdioxidgranulats und der Temperatur kann der Durchsatz auf die gewünschte Größe eingestellt werden. Die Verfahrensparameter sind in Tabelle 15 und Tabelle 17 und gegebenenfalls Tabelle 19 angegeben, die Eigenschaften der gebildeten Quarzglaskörper in Tabelle 16 und Tabelle 18.

In Beispiel H7-1 ist in dem Schmelztiegel ein Gasverteillerring angeordnet, mit dem das Spülgas nahe der Oberfläche der Glasschmelze zugeführt wird. Exemplarisch zeigt eine solche Anordnung die Figur 10.

In Beispiel H8-x wurde am Gasauslass der Taupunkt bestimmt. Das Messprinzip ist in Figur 14 gezeigt. Zwischen dem Auslass des Schmelztiegels und der Messstelle des Taupunkts legt der Gasstrom eine Strecke von 100 cm zurück.

Tabelle 15

Beispiel	H1-1	H1-2	H1-3	H1-4	H1-5	H3-1	H3-2	H4-1	H4-2
Edukt = Produkt aus	G1-1	G1-2	G1-3	G1-4	G1-5	G3-1	G3-2	G4-1	G4-2
<u>Schmelzriegel</u>									
Typ	Hängender Blechriegel Wolfram	Hängender Blechriegel Wolfram	Hängender Blechriegel Wolfram	Hängender Blechriegel Wolfram	Hängender Blechriegel Wolfram	Hängender Blechriegel Wolfram	Hängender Blechriegel Wolfram	Hängender Blechriegel Wolfram	Hängender Blechriegel Wolfram
Metallsorte									
Länge	200	150	150	150	150	200	150	200	200
Innendurchmesser	40	25	25	25	25	40	25	40	40
Durchsatz	30	20	20	20	20	30	20	30	30
T1 (Gasraum Schmelzriegel)	300	300	300	300	300	300	300	300	300
T2 (Glasschmelze)	2100	2100	2100	2100	2100	2100	2100	2100	2100
T3 (Düse)	1900	1900	1900	1900	1900	1900	1900	1900	1900
<u>Atmosphäre/Spülgas</u>									
He									
Konzentration	50	50	50	50	50	50	50	50	50
H <sub>2</sub>									
Konzentration	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Durchsatz Gasstrom gesamt	4	4	4	4	4	2	4	2	2
O <sub>2</sub>	≤100	≤100	≤100	≤100	≤100	≤100	≤100	≤100	≤100

Tabelle 16

Beispiel	H1-1	H1-2	H1-3	H1-4	H1-5	H3-1	H3-2	H4-1	H4-2
C-Gehalt	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4
Cl-Gehalt	100-200	100-200	300-400	100-200	100-200	<60	<60	100-200	100-200
Al-Gehalt	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Summe der Konzentrationen von Ca, Co, Cr, Cu, Fe, Ge, Hf, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Ni, Ti, V, W, Zn, Zr	<400	<400	<400	<400	<400	<400	<400	<400	<400
OH-Gehalt	400	400	400	400	400	80	400	80	80
Erdalkalimetallgehalt	115	55	95	115	40	136	33	115	115
ODC-Gehalt	$4 \cdot 10^{15}$	$2 \cdot 10^{16}$	$4 \cdot 10^{15}$	$4 \cdot 10^{15}$	$4 \cdot 10^{15}$	$5 \cdot 10^{18}$	$2 \cdot 10^{16}$	$5 \cdot 10^{18}$	$8 \cdot 10^{18}$
Porenvolumen	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Außendurchmesser Rohrstrang/Quarzglaskörper	19,7	3,0	19,7	19,7	19,7	19,7	3,0	19,7	19,7
Viskosität @1250°C @1300°C @1350°C	11,69±0,13 11,26±0,1 10,69±0,07	11,69±0,13 11,26±0,1 10,69±0,07	11,69±0,13 11,26±0,1 10,69±0,07	11,69±0,13 11,26±0,1 10,69±0,07	11,69±0,13 11,26±0,1 10,69±0,07	12,16±0,2 11,49±0,15 10,88±0,1	11,69±0,13 11,26±0,1 10,69±0,07	12,16±0,2 11,49±0,15 10,88±0,1	12,16±0,2 11,49±0,15 10,88±0,1

„±“-Angaben sind die Standardabweichung.

Tabelle 17

Beispiel		H5-1	H6-1	H7-1	H8-1	H8-2	H8-3	H8-4
Edukt = Produkt aus		G1-1	G1-1	G1-1	G1-1	G1-1	G1-1	G1-1
<u>Schmelzziegel</u>								
Type		Stehender Sinterziegel Wolfram	Hängender Sinterziegel Wolfram	Hängender Blechziegel Wolfram	Hängender Blechziegel Wolfram	Hängender Blechziegel Wolfram	Hängender Blechziegel Wolfram	Hängender Blechziegel Wolfram
Metallsorte		--	--	Gasverteilte r-Ring	Taupunkt messung	Taupunkt messung	Taupunkt messung	Taupunkt messung
Zusätzliche Ein- oder Anbaute(n)								
Länge		250	250	200	200	200	200	200
Innendurchmesser	cm	40	36	40	40	40	40	40
Durchsatz	kg/h	40	35	30	30	30	30	30
T1 (Gasraum Schmelzziegel)	°C	300	400	300	300	300	300	300
T2 (Glasschmelze)	°C	2100	2150	2100	2100	2100	2100	2100
T3 (Düse)	°C	1900	1900	1900	1900	1900	1900	1900
<u>Atmosphäre</u>								
He								
Konzentration	Vol.-%	30	50	50	50	50	50	50
H <sub>2</sub>								
Konzentration	Vol.-%	70	50	50	50	50	50	50
Durchsatz Gasstrom gesamt	Nm <sup>3</sup> /h	4	4	8	8	4	3	2
O <sub>2</sub>	ppm	<100	<100	≤10	≤100	≤100	≤100	≤100

Tabelle 18

Beispiel	H5-1	H6-1	H7-1	H8-1	H8-2	H8-3	H8-4
C-Gehalt	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4
Cl-Gehalt	100-200	100-200	100-200	100-200	100-200	100-200	100-200
Al-Gehalt	20	20	20	20	20	20	20
Summe der Konzentrationen von Ca, Co, Cr, Cu, Fe, Ge, Hf, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Ni, Ti, V, W, Zn, Zr	<400	<400	<400	<400	<400	<400	<400
OH-Gehalt	400	400	400	250	400	500	800
Erdalkalimetallgehalt	115	115	115	115	115	115	115
ODC-Gehalt	<4*10 <sup>1,5</sup>	<4*10 <sup>1,5</sup>	<4*10 <sup>1,5</sup>	<4*10 <sup>1,5</sup>	<4*10 <sup>1,5</sup>	<4*10 <sup>1,5</sup>	<4*10 <sup>1,5</sup>
Gehalt an W, Mo, Re, Ir, Os	<300ppb	<300ppb	<100ppb	<50ppb	<100ppb	<5ppm	100ppm
Außendurchmesser Rohrstrang/Quarzglaskörper	26,0	19,7	19,7	19,7	19,7	19,7	19,7
Viskosität							
@1250°C	11,69±0,13	11,69±0,13	11,69±0,13	12,06±0,15	11,69±0,13	11,69±0,13	11,63±0,13
@1300°C	11,26±0,1	11,26±0,1	11,26±0,1	11,38±0,1	11,26±0,1	11,26±0,1	11,22±0,1
@1350°C	10,69±0,07	10,69±0,07	10,69±0,07	10,75±0,08	10,69±0,07	10,69±0,07	10,65±0,07

Tabelle 19

Beispiel		H-7-1	H8-1	H8-2	H8-3	H8-4
Verteilerring (Gaseinlass im Schmelztiegel), Höhe über Glasschmelze	cm	2	--	--	--	--
Lage Gasauslass		In Schmelz tiegelde ckel	In Schmelzti egeldecke	In Schmelz tiegelde ckel	In Schme lztiege ldecke 1	In Schmelzti egeldecke 1
Taupunkt des Gasstroms Vor Zuführen zum Schmelztiegel		-90	-90	-90	-90	-90
Nach Abführen aus Schmelztiegel		-10	-30	-10	0	+10

**I. Nachbearbeiten eines Quarzglaskörpers**

- 5 Ein in Beispiel H1-1 erhaltener und bereits gezogener Quarzglaskörper (1000 kg, Oberfläche = 110 m<sup>2</sup>; Durchmesser= 1,65 cm, Gesamtlänge 2120m) wird zu Stücken mit einer Länge von 200 cm durch Anritzen und Abschlagen zerteilt. Die Endflächen wurden durch Sägen nachbearbeitet, um eine gerade Endfläche zu erhalten. Die so erhaltene Charge Quarzglaskörper (N-1) wurde durch Eintauchen in ein HF-Bad (V=2 m<sup>3</sup>) für 30 Minuten gereinigt und anschließend mit VE-Wasser abgespült (ergibt Quarzglaskörper (N-1')).

10

**J. „Altsäure“ (HF-Bad nach Gebrauch)**

Die in Beispiel I im Tauchbad vorliegende Flüssigkeit (V= 2m<sup>3</sup>) wird nach dem Behandeln des Quarzglaskörpers (I-1') ohne Aufbereitung direkt bestimmt. Die für die vorgenannte Behandlung eingesetzte Flüssigkeit ist vor und nach dem Behandeln durch die in der Tabelle 20 genannten Eigenschaften gekennzeichnet.

15

Tabelle 20

Element	Einheit	Vor Behandlung eines Quarzglaskörpers	Nach Behandlung eines Quarzglaskörpers der Masse m= 1000kg und der Oberfläche von 110m <sup>2</sup>
Al	ppm	0,04	0,8
Refrakärmetall (W, Mo, ...)	ppm	0	0,15
Weitere Metalle gemäß Liste* insgesamt, davon	ppm	0,15	1
Ca	ppm	0,01	0,3
Mg	ppm	0,04	0,09
Na	ppm	0,04	0,1
Cr	ppm	0,01	0,01
Ni	ppm	0,001	0,01
Fe	ppm	0,01	0,05
Zr	ppm	0,01	0,05
Ti	ppm	0,01	0,05
HF	Gew.-%	40	35
Gehalt Si-F- Verbindungen	Gew.-%	4	6
Dichte	g/cm <sup>3</sup>	1,14	1,123



**K. Herstellen von Quarzglaskörnung**

Quarzglaskörper mit den in Tabelle 21 angegebenen Merkmalen werden zu einer Quarzglaskörnung zerkleinert. Dazu werden 100 kg des Quarzglaskörpers einem sog. elektrodynamischen Zerkleinerungsprozess unterzogen. Dabei wird das Ausgangsglas in einem Wasserbecken durch elektrische Pulse auf die gewünschte Korngröße zerkleinert. Bedarfsweise wird das Material mit einem Rüttelsieb gesiebt, um störende Fein- und Grobanteile abzutrennen. Die Quarzglaskörnung wird gespült, mit HF gesäuert, mit Wasser erneut gespült und getrocknet. Die so gereinigte Quarzglaskörnung hat die in Tabelle 22 angegebenen Eigenschaften.

**Tabelle 21**

Beispiel		H1-1	H4-1	H3-1	H1-3
C-Gehalt	ppm	< 4	< 4	< 4	< 4
Cl-Gehalt	ppm	100-200	100-200	< 60	300-400
Al-Gehalt	ppb	20	20	20	20
Summe der Konzentrationen von Ca, Co, Cr, Cu, Fe, Ge, Hf, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Ni, Ti, V, W, Zn, Zr	ppb	< 400	< 400	< 400	< 400
OH-Gehalt	ppm	400	80	80	400
Viskosität	Lg( $\eta$ /dPas)				
@1250°C		11,69±0,13	12,16±0,2	12,16±0,2	11,69±0,13
@1300°C		11,26±0,1	11,49±0,15	11,49±0,15	11,26±0,1
@1350°C		10,69±0,07	10,88±0,1	10,88±0,1	10,69±0,07

**Tabelle 22**

Beispiel		I1-1	I4-1	I3-1	I1-3
Edukt = Produkt aus		H1-1	H4-1	H3-1	H1-3
C-Gehalt	ppm	< 4	< 4	< 4	< 4
Cl-Gehalt	ppm	100-200	100-200	100-200	300-400
Al-Gehalt	ppb	20	20	20	20
Summe der Konzentrationen von Ca, Co, Cr, Cu, Fe, Ge, Hf, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Ni, Ti, V, W, Zn, Zr	ppb	< 1000	< 1000	< 1000	< 1000
OH-Gehalt	ppb	400	80	80	400
BET	cm <sup>2</sup> /g	< 1	< 1	< 1	< 1
Schüttdichte	g/cm <sup>3</sup>	1,25	1,35	1,35	1,30
Partikelgröße					
D10	mm	0,85	0,09	0,08	0,1
D50	mm	2,21	0,18	0,19	0,18
D90	mm	3,20	0,27	0,26	0,25

**L. Herstellen eines opaken Körpers I**

Die zuvor hergestellte Quarzglaskörnung II-1 wird zu einer Aufschlämmung verarbeitet. Für einen Ansatz von 10 kg Aufschlämmung (auch: Siliziumdioxid-Wasser-Schlicker) werden in einer mit Quarzglas ausgekleideten Trommelmühle mit ca. 20 Liter Volumeninhalt, 8,2 kg der Quarzglaskörnung mit 1,8 kg deionisiertem Wasser mit einer Leitfähigkeit von weniger als 3  $\mu\text{S}$  vermischt.

Diese Mischung wird mittels Mahlkugeln aus Quarzglas auf einem Rollenbock bei 23 U/min während einer Dauer von 3 Tagen soweit weiter vermahlen, dass sich eine homogene Aufschlämmung mit einem Feststoffgehalt von 79 % bildet. Im Verlauf des Vermahlens sinkt der pH-Wert auf etwa 4 ab.

Die Aufschlämmung wurde dann blasenfrei in eine mit Entlüftungskanälen versehene, zuvor mit Staub- und ölfreier Druckluft und demineralisiertem Wasser (Leitfähigkeit < 0,05  $\mu\text{S}$ ) gereinigte Form mit den Abmessungen der Ausnehmung: Aussendurchmesser=315 mm; Innendurchmesser=218 mm, Höhe=17 mm aus handelsüblichem Hartgips (Pressformgips) über einen Zeitraum von 30 Sekunden einlaufen gelassen, wobei der sich verringernde Schlickerpegel während drei Stunden in regelmäßigen Intervallen aufgefüllt wurde. Nach einer weiteren dreistündigen Verweilzeit in der Form wurde der gebildete Formkörper-Rohling unter Zufuhr von gereinigter Druckluft in die Entlüftungskanäle der Form entnommen. Während des Einfüllens der Aufschlämmung in die Form sowie während der Verweilzeit in der Form wurde an der nicht mit Aufschlämmung benetzten Aussenoberfläche der Form ein Unterdruck von 0,1 bar aufrechterhalten, während der Flüssigkeitsspiegel der Aufschlämmung unter normalem Atmosphärendruck stand.

Der Formkörper-Rohling wurde im Anschluss während 4 Tagen bei einer Temperatur von 70 °C getrocknet und danach in einen Ofen eingebracht. Der Ofen wurde mit einer bestimmten Heizrate auf die sogenannte Sintertemperatur erwärmt. Der darin befindliche Formkörper-Rohling wurde dann für eine bestimmte Haltezeit bei dieser Temperatur in den Ofen eingebracht (Angaben vgl. Tabelle 23). Der Ofen wurde mit einer Heizrate von 5 K/min bis auf 1390 °C Ofentemperatur erwärmt. Der darin befindliche Formkörper-Rohling wurde dann für 3h bei 1390 °C gehalten. Anschließend wurde der Ofen ausgeschaltet und ohne weitere Kühlmaßnahmen abkühlen gelassen. Der Formkörper wurde abschließend aus dem Ofen entnommen. Der so gebildete opake Quarzglaskörper hat die in Tabelle 23 angegebenen Eigenschaften.

Tabelle 23

Beispiel		L1-1	L3-11	L3-12
Hergestellt aus Quarzglaskörnung		I1-1	I3-1	I3-1
Heizrate	K/Min	5	2	5
Sintertemperatur	°C	1390	1400	1400
Haltezeit	h	3	2,75	3
C-Gehalt	ppm	< 4	< 4	< 4
Cl-Gehalt	ppm	100-200	< 60	< 60
Al-Gehalt	ppb	20	20	20
Summe der Konzentrationen von Ca, Co, Cr, Cu, Fe, Ge, Hf, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Ni, Ti, V, W, Zn, Zr	ppb	< 1000	< 1000	< 1000
Viskosität @1250°C @1300°C @1350°C	Lg( $\eta$ /d Pas)	12,09±0,15 11,41±0,1 10,80±0,07	12,51±0,2 11,62±0,12 11,03±0,06	12,54±0,2 11,60±0,12 11,07±0,06
Mittlere Dichte	g/cm <sup>3</sup>	2,162	2,170	2,153
Hemisphärische Reflexion 350 – 2000 nm*	%	> 75	> 75	> 80
Direkte Transmission 350 – 2000 nm	%	< 0,5	< 0,5	< 0,3

\* gemessen mit Perkin Elmer Lambda 2000 Spektrometer mit Ulbrichtkugel-Aufsatz

**M. Herstellen eines opaken Körpers II**

Die zuvor hergestellte Quarzglaskörnung I4-1 wird in eine rotierende zylindrische Stahlform mit einer Schichtdicke von 30mm eingebracht. Anschließend wird ein Lichtbogen gezündet und die geschüttete Schicht auf eine Wandstärke von ca. 20mm glasig geschmolzen. Es entsteht eine verdichtete glasige Schicht, die immer noch einen Restblasengehalt von <10% enthält. Der so gebildete opake Quarzglaskörper hat die in Tabelle 24 angegebenen Eigenschaften.

**Tabelle 24**

Beispiel		M1-1	M1-22
Hergestellt aus Quarzglaskörnung		I1-3	I4-1
C-Gehalt	ppm	< 4	< 4
Cl-Gehalt	ppm	100-200	< 60
Al-Gehalt	ppb	20	20
Summe der Konzentrationen von Ca, Co, Cr, Cu, Fe, Ge, Hf, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Ni, Ti, V, W, Zn, Zr	ppb	< 1000	< 1000
Viskosität @1250°C @1300°C @1350°C	Lg( $\eta$ /dPas)	11,21±0,15 10,62±0,1 10,10±0,07	12,57±0,2 11,12±0,12 10,82±0,06
Mittlere Dichte	g/cm <sup>3</sup>	2,112	2,151
Hemisphärische Reflexion 350 – 2000 nm*	%	> 60	> 50
Direkte Transmission 350 – 2000 nm	%	< 3	< 8

\* gemessen mit Perkin Elmer Lambda 2000 Spektrometer mit Ulbrichtkugel-Aufsatz

### Ansprüche

- 5 1. Ein Verfahren zum Herstellen eines opaken Quarzglaskörpers beinhaltend die Verfahrensschritte:
  - i.) Bereitstellen eines Siliziumdioxidgranulats, wobei das Siliziumdioxidgranulat aus pyrogen erzeugtem Siliziumdioxidpulver hergestellt wurde;
  - ii.) Bilden einer Glasschmelze aus dem Siliziumdioxidgranulat in einem Schmelztiegel;
  - iii.) Bilden eines Quarzglaskörpers aus mindestens einem Teil der Glasschmelze;
  - 10 iv.) Zerkleinern des Quarzglaskörpers unter Erhalt einer Quarzglaskörnung;
  - v.) Verarbeiten der Quarzglaskörnung zu einer Vorform;
  - vi.) Bilden des opaken Quarzglaskörpers aus der Vorform.
2. Das Verfahren nach Anspruch 1, wobei der Schmelztiegel in Schritt ii.) mindestens einen Einlass und
 15 einen Auslass aufweist und wobei der Einlass über dem Auslass angeordnet ist.
3. Das Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das Zerkleinern in Schritt iv.) mittels Hochspannungsentladungspulsen erfolgt.
- 20 4. Das Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Quarzglaskörnung mindestens eines der folgenden Merkmale aufweist:
  - I/ einen OH-Gehalt von weniger als 500 ppm;
  - II/ einen Chlorgehalt von weniger als 60 ppm;
  - III/ einen Aluminiumgehalt von weniger als 200 ppb;
  - 25 IV/ eine BET-Oberfläche von weniger als 1 m<sup>2</sup>/g;
  - V/ eine Schüttdichte in einem Bereich von 1,1 bis 1,4 g/cm<sup>3</sup>;
  - VI/ eine Partikelgröße D<sub>50</sub> für Schmelzeinsatz in einem Bereich von 50 bis 500 µm;
  - VII/ eine Partikelgröße D<sub>50</sub> für Schlickereinsatz in einem Bereich von 0,5 bis 5 mm;
  - VIII/ einen Metallgehalt von Metallen, die von Aluminium verschieden sind, von weniger als 2 ppm;
  - 30 IX/ eine Viskosität (p=1013 hPa) in einem Bereich von log<sub>10</sub> (η (1250°C) / dPas) = 11,4 bis log<sub>10</sub> (η (1250°C) / dPas) = 12,9 oder log<sub>10</sub> (η (1300°C) / dPas) = 11,1 bis log<sub>10</sub> (η (1300°C) / dPas) = 12,2 oder log<sub>10</sub> (η (1350°C) / dPas) = 10,5 bis log<sub>10</sub> (η (1350°C) / dPas) = 11,5;
 wobei die ppm und ppb jeweils auf das Gesamtgewicht an Quarzglaskörnung bezogen sind.
- 35 5. Das Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Schmelzenergie in Verfahrensschritt ii.) über eine feste Oberfläche auf das Siliziumdioxidgranulat übertragen wird.
6. Das Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das Siliziumdioxidgranulat mindestens eines der folgenden Merkmale aufweist:
 40 A) eine BET-Oberfläche in einem Bereich von 20 bis 50 m<sup>2</sup>/g;

- B) eine mittlere Partikelgröße in einem Bereich von 50 bis 500  $\mu\text{m}$ ;  
 C) eine Schüttdichte in einem Bereich von 0,5 bis 1,2  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  
 D) einen Kohlenstoffgehalt von weniger als 50 ppm;  
 E) einen Aluminiumgehalt von weniger als 200 ppb;  
 5 F) eine Stampfdichte in einem Bereich von 0,7 bis 1,0  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  
 G) ein Porenvolumen in einem Bereich von 0,1 bis 2,5  $\text{mL}/\text{g}$ ;  
 H) einen Schüttwinkel in einem Bereich von 23 bis 26°;  
 I) eine Partikelgrößenverteilung  $D_{10}$  in einem Bereich von 50 bis 150  $\mu\text{m}$ ;  
 J) eine Partikelgrößenverteilung  $D_{50}$  in einem Bereich von 150 bis 300  $\mu\text{m}$ ;  
 10 K) eine Partikelgrößenverteilung  $D_{90}$  in einem Bereich von 250 bis 620  $\mu\text{m}$ ,  
 wobei die ppm jeweils auf das Gesamtgewicht des Siliziumdioxidgranulats bezogen sind.
7. Das Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das Siliziumdioxidpulver herstellbar ist  
 15 aus einer Verbindung ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus Siloxanen, Siliziumalkoxiden und  
 Siliziumhalogeniden.
8. Das Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei Schritt v.) folgende Einzelschritte  
 beinhaltet:  
 v.-1.) Erzeugen einer Aufschlämmung der Quarzglaskörnung mit einer Flüssigkeit; und  
 20 v.-2.) Formen einer Vorform aus der Aufschlämmung unter Verlust von Flüssigkeit.
9. Das Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, wobei Schritt v.) folgenden Schritt beinhaltet:  
 v.-a.) Einbringen der Quarzglaskörnung in eine rotierende Hohlform.
- 25 10. Das Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das Bilden des opaken  
 Quarzglaskörpers in Schritt vi.) ein Sintern beinhaltet.
11. Ein opaker Quarzglaskörper, erhältlich durch ein Verfahren gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche.
- 30 12. Ein opaker Quarzglaskörper nach Anspruch 11, gekennzeichnet durch folgende Merkmale:  
 [I] eine Opazität von mehr als 5;  
 [II] eine BET-Oberfläche von weniger als 1  $\text{m}^2/\text{g}$ .
13. Der opake Quarzglaskörper nach Anspruch 11 oder 12, wobei der opake Quarzglaskörper mindestens eines  
 35 der folgenden Merkmale aufweist:  
 [III] eine zylindrische Form;  
 [IV] eine Schicht;  
 [V] einen OH-Gehalt von weniger als 500 ppm;  
 [VI] einen Chlorgehalt von weniger als 60 ppm;

- [VII] einen Aluminiumgehalt von weniger als 200 ppb;
  - [VIII] einen ODC Anteil von weniger als  $5 \cdot 10^{18}/\text{cm}^3$ ;
  - [IX] einen Kohlenstoffgehalt von weniger als 5 ppm;
  - [X] einen Gesamtgehalt an von Aluminium verschiedenen Metallen von weniger als 2 ppm;
- 5 wobei die ppm und ppb jeweils auf das Gesamtgewicht des opaken Quarzglaskörpers bezogen sind.

14. Ein Reaktor, beinhaltend als Reaktorbestandteile:

- i] eine Lage aus opakem Quarzglas,  
wobei die Lage zumindest zum Teil aus einem opaken Quarzglaskörper gemäß einem der Ansprüche 11 bis 13 gebildet ist;
- 10 ii] einen Quarzglashohlkörper beinhaltend eine Öffnungsfläche,  
wobei die Öffnungsfläche auf die Lage aus opakem Quarzglas folgt.

15. Der Reaktor nach Anspruch 14, beinhaltend mindestens eines der folgenden Reaktorbestandteile:

- 15 iii] eine Dichtung aus einem von Quarzglas verschiedenen Material;
- iv] eine auf die Dichtung folgende Auflage;
- v] einen Gaseinlass;
- vi] einen Gasauslass;
- vii] einen Injektor;
- 20 viii] ein Thermoelementröhrchen;
- ix] eine Innenfläche, die feuerblank und mikrorissfrei ist.

16. Eine Anordnung, beinhaltend als Anordnungsbestandteile:

- i] einen Substrathalter;
  - 25 ii] ein Gestell;
- wobei der Substrathalter von dem Gestell getragen wird; und  
wobei das Gestell zumindest zum Teil aus einem opaken Quarzglaskörper gemäß einem der Ansprüche 11 bis 13 gebildet ist;

30 17. Die Anordnung gemäß Anspruch 16, gekennzeichnet durch folgendes Merkmal:

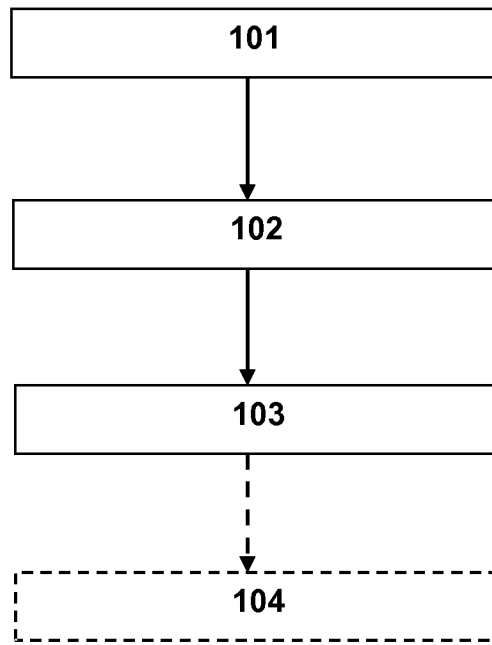
- iii] einen Quarzglashohlkörper mit mindestens einer Öffnung.

18. Eine Verwendung einer Quarzglaskörnung zur Herstellung opaker Reaktorbestandteile für die Halbleiterfertigung, wobei die Quarzglaskörnung folgende Merkmale aufweist:

- 35 I/ einen OH-Gehalt von weniger als 500 ppm;
  - II/ einen Chlorgehalt von weniger als 60 ppm;
  - III/ einen Aluminiumgehalt von weniger als 200 ppb,
- wobei die ppm und ppb jeweils auf das Gesamtgewicht der Quarzglaskörnung bezogen sind.

1/11

**100**

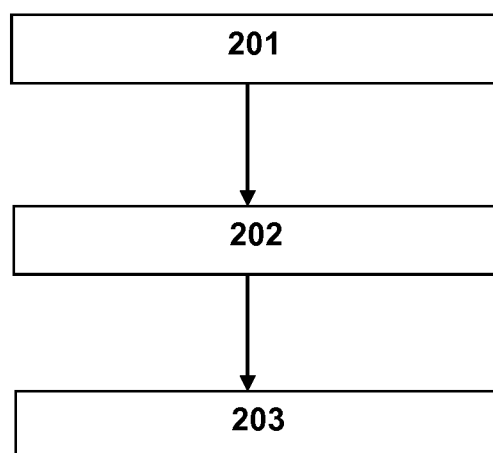


**Fig. 1**



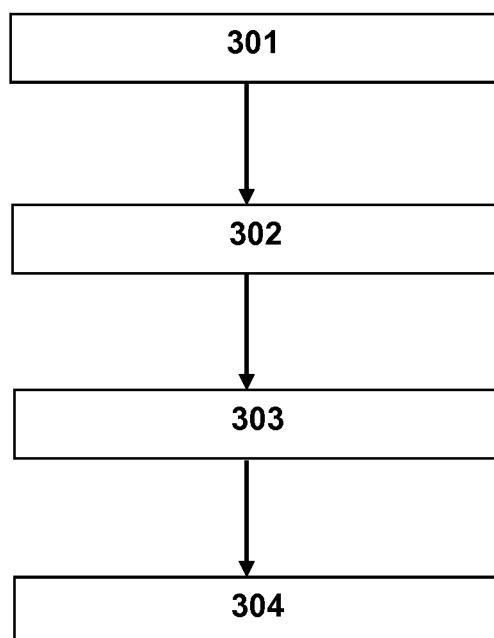
2/11

**200**

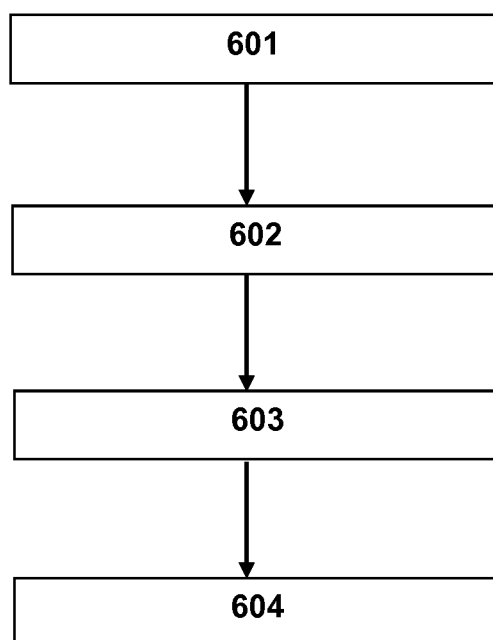


**Fig. 2**

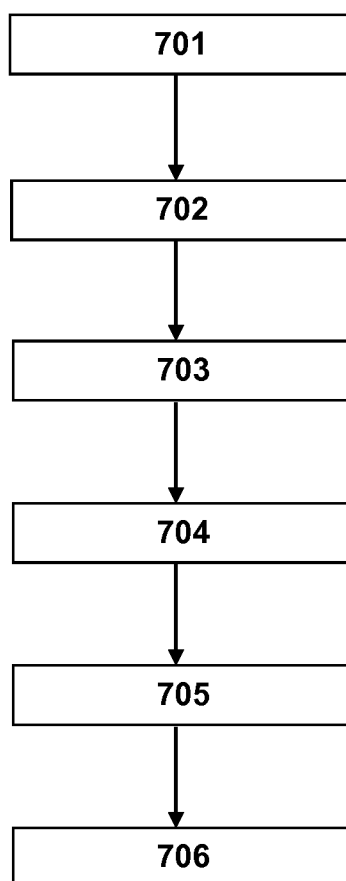
3/11

**300****Fig. 3**

4/11

**600****Fig. 6**

5/11

**700****Fig. 7**

6/11

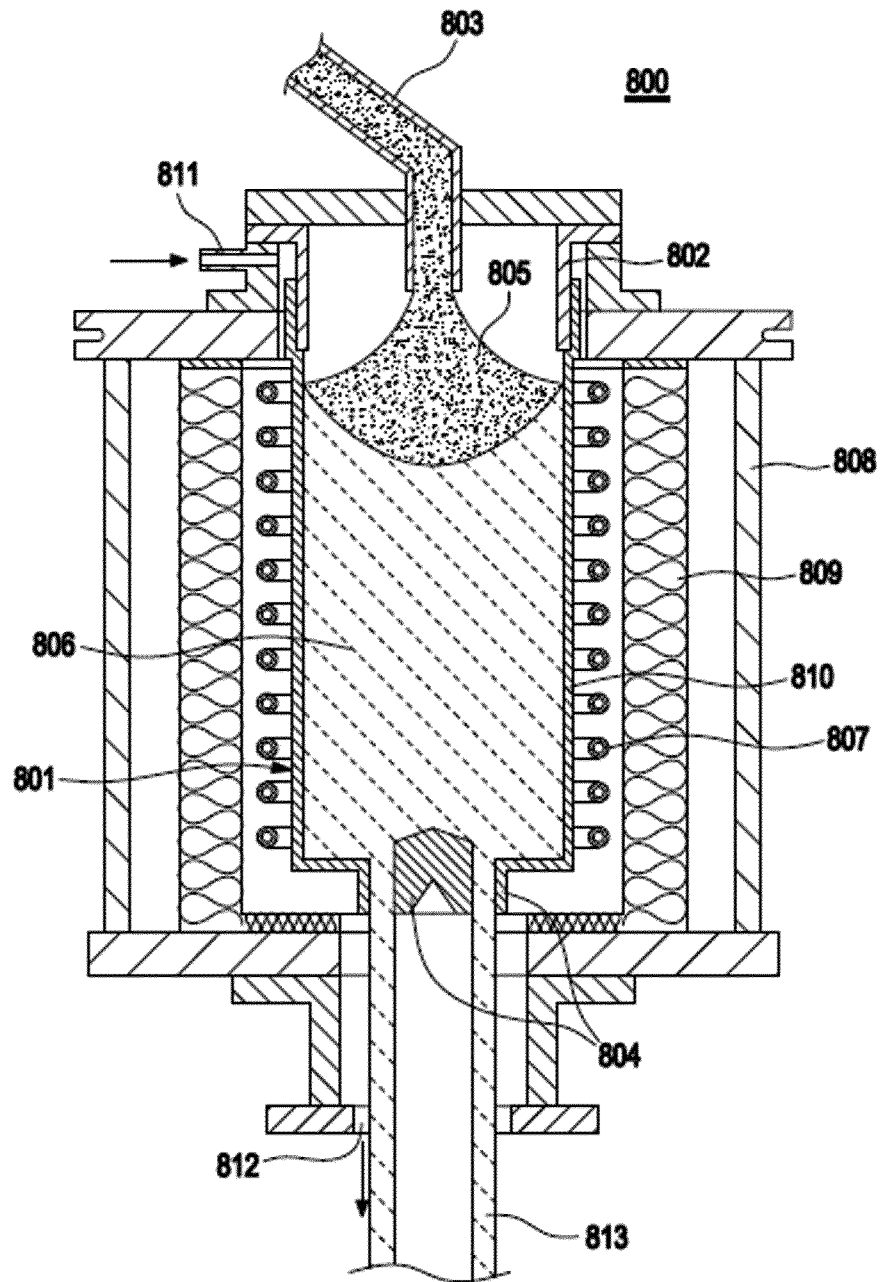


Fig. 8

7/11

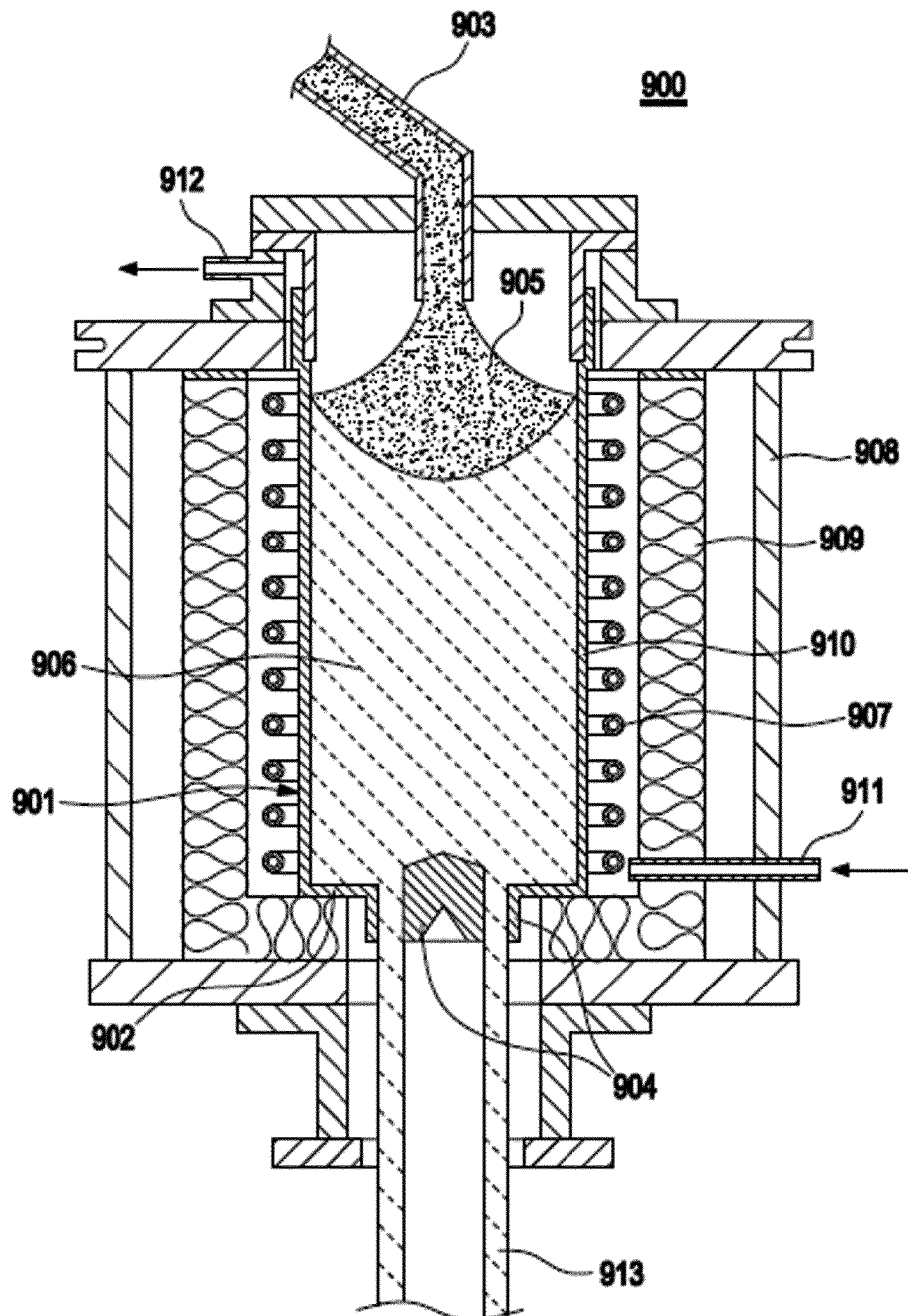


Fig. 9

8/11

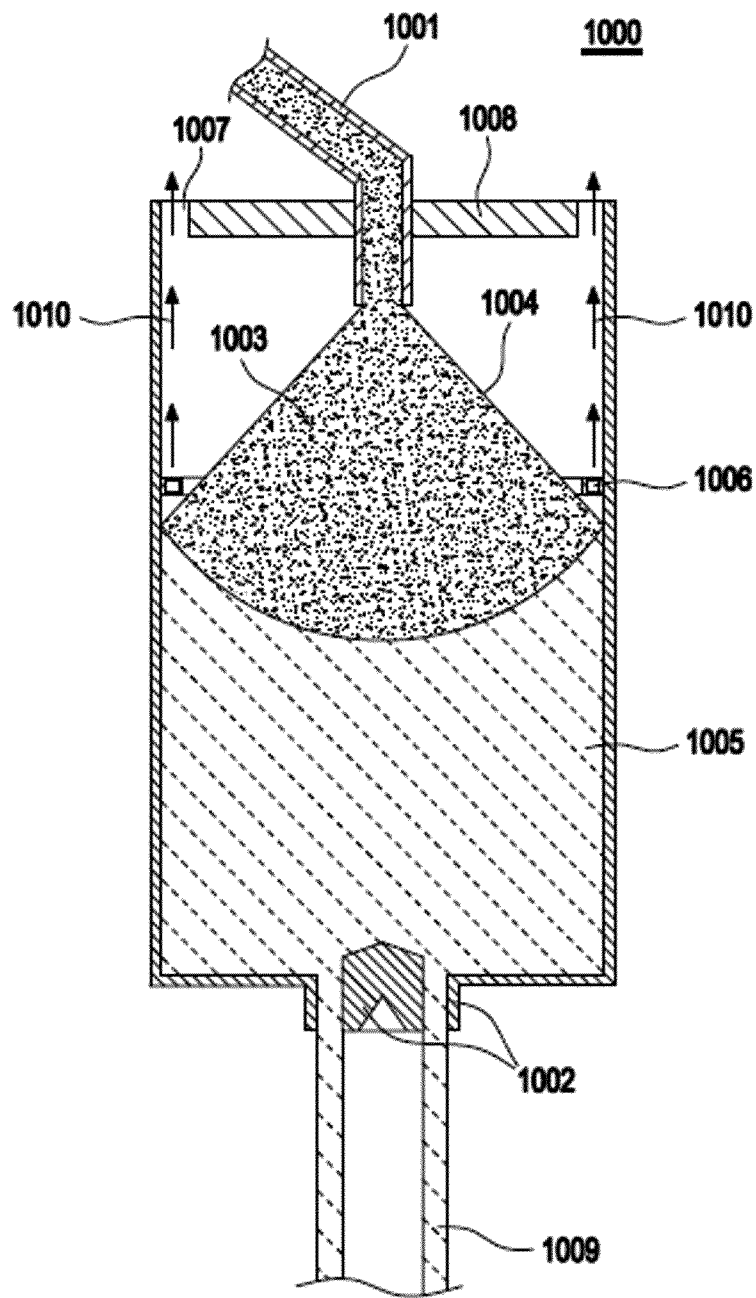


Fig. 10

9/11

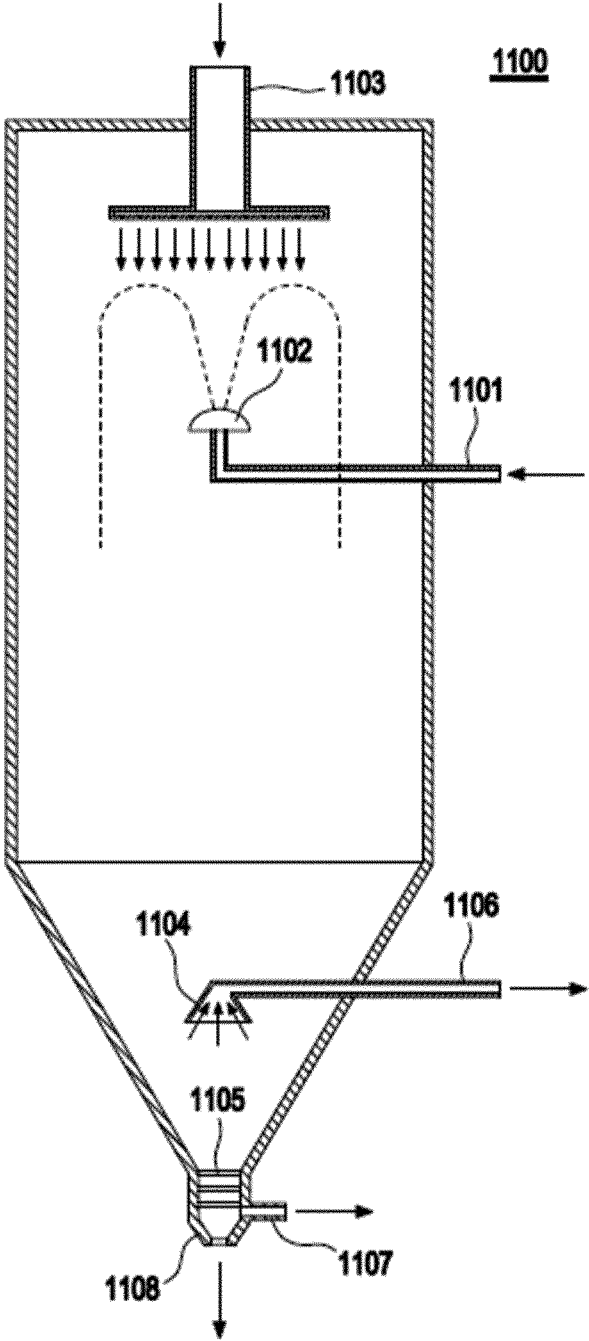


Fig. 11



10/11

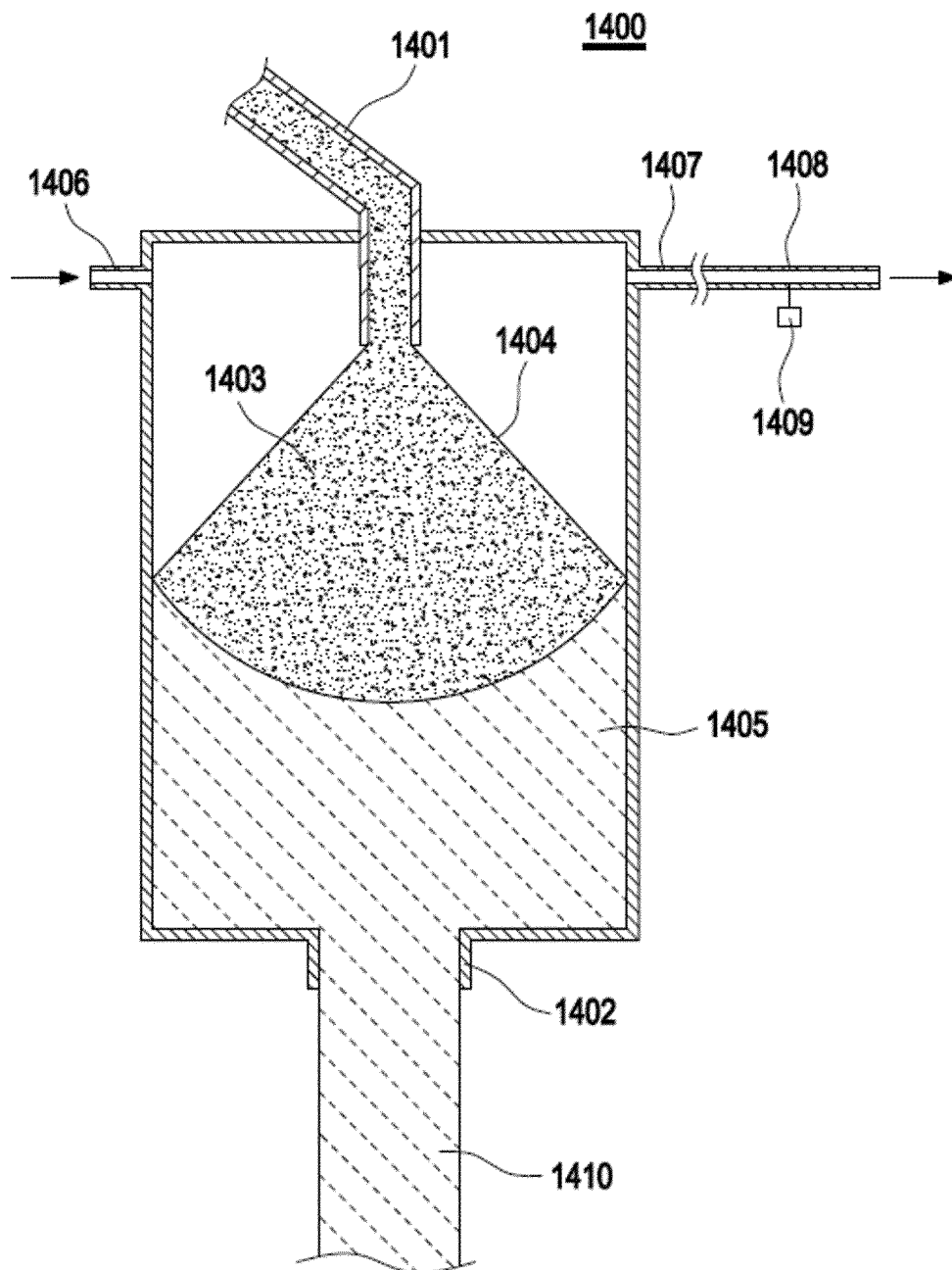
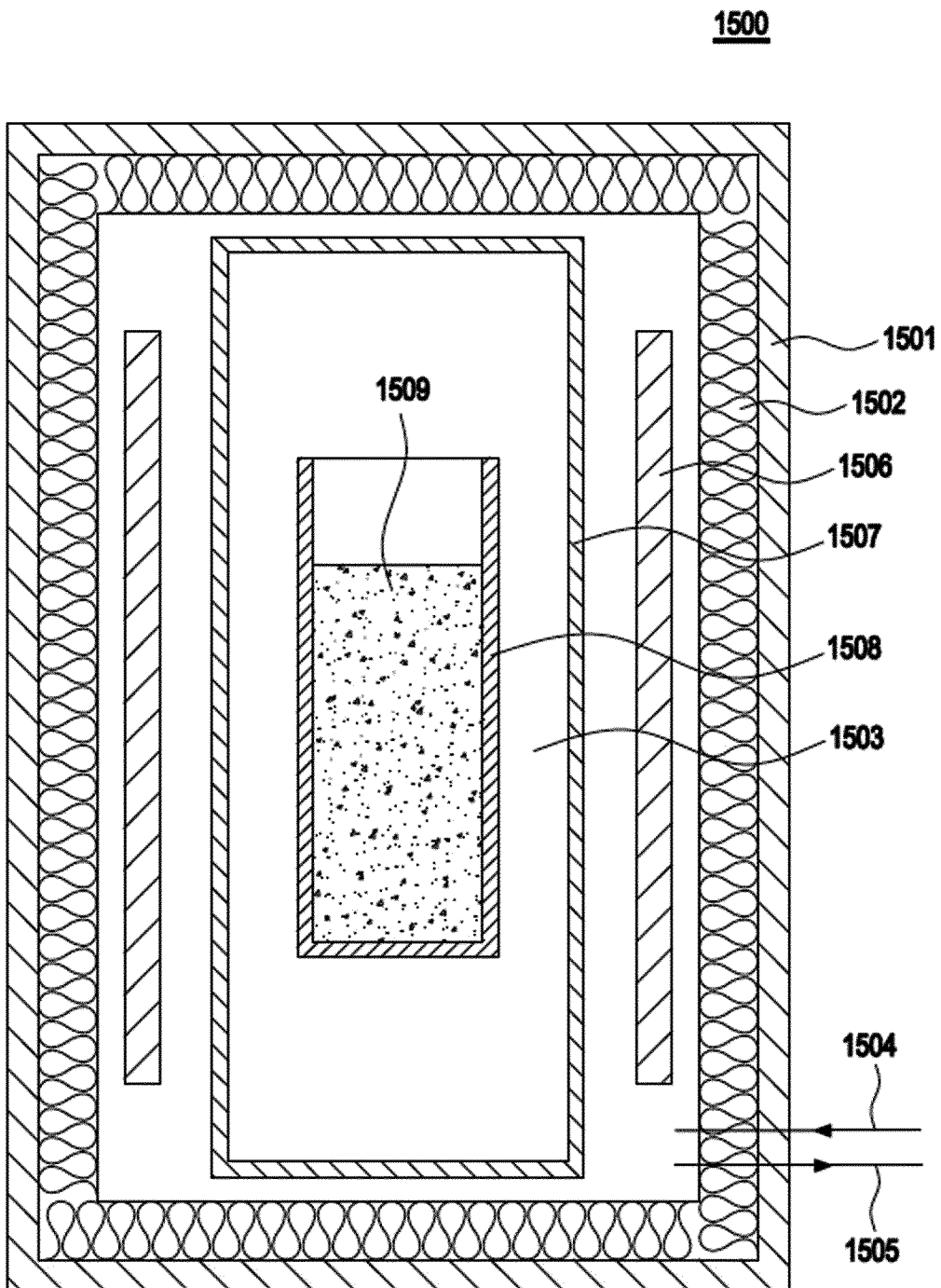


Fig. 14



**Fig. 15**