

Erzeugung definierter Referenzaerosole ultrafeiner Partikel mit einem Funkengenerator

Zielsetzung und Versuchsaufbau

A. Hellmann, K. Schmidt, S. Ripperger, J. Pelzer, K. W. Müller

Zusammenfassung Partikelgrößenverteilungen von Kohlenstoff, Titan und Kupfer wurden mit einem Funkengenerator erzeugt. Hierbei können generell am Ausgang des Generators Gesamtpartikelanzahlkonzentrationen von bis ca. 10^8 cm^{-3} erzielt werden. Der Medianwert der Verteilungen ist grundsätzlich variabel und belief sich bei den Versuchen auf 10 bis 100 nm. Für die Messungen wurden ein Scanning Mobility Particle Sizer sowie ein Nano Aerosol Sampler und ein Elektrometer eingesetzt. Insgesamt konnte die Aerosolkonzentration über die Versuchstage konstant (nach Anfahrphase, für unterschiedliche Materialien) gehalten werden, wenn die Randbedingungen für den Versuch dieselben waren. Eine Verschiebung der Partikelgrößenverteilungen ist wesentlich von den Randbedingungen bzw. Einstellmöglichkeiten des Versuchsaufbaus abhängig. Der Medianwert der Partikelgrößenverteilung wurde in den Versuchen von 30 bis 80 nm verändert. Weiterhin wurde die Verteilung anhand der unterschiedlichen Einstellungsmöglichkeiten von Funkenfrequenz, Argonvolumenstrom, Mischluftvolumenstrom, Druck der Verdünnungseinheit und des Elektrodenmaterials dargestellt. Die Ergebnisse verdeutlichen die Einsatzmöglichkeiten des verwendeten Funkengenerators mit unterschiedlichen Materialien.

Production of defined reference aerosols of ultrafine particles with a spark generator – objective and test set-up

Abstract Particle size distributions of carbon, titanium and copper have been produced with a spark generator. Using this method, total particle count concentrations of up to approximately 10^8 cm^{-3} at generator outlet can be generally achieved. The distributions' median value is always variable and ranged from 10 to 100 nm in the tests. For the measurements, a scanning mobility particle sizer was used as well as a nano-aerosol sampler and an electrometer. Overall, it was possible to keep the aerosol concentration constant (after a start-up phase and for different materials) for the days of testing as long as the accompanying conditions for the test remained unchanged. A shift in the particle size distributions depends essentially on the accompanying conditions and the scope for adjusting the experimental set-up. The median value for particle size distribution was changed from 30 to 80 nm in the tests. It was also possible to show the distribution obtained by exploiting the varying scope for adjusting spark frequency, argon flow rate, mixed air flow rate, pressure of the dilution unit and the electrode material. The results highlight the possible uses of the spark generator in question with different materials.

1 Einleitung

Einige Normen legen (Mindest-)Anforderungen an Filter zur Gasfiltration fest. Diese Normen dienen in erster Linie zum Nachweis der Effizienz der Abscheidung eines Filters, in zweiter Linie zur Sicherung der Produktqualität bei der Fertigung. Bei Filtern für eine bestimmte Anwendung ist mit der Normung oft auch eine Einteilung in verschiedene Filterklassen verbunden. Beispiele hierfür sind die Normen DIN EN 143 „Atenschutzgeräte – Partikelfilter“ sowie DIN EN 149 „Atenschutzgeräte – Filtrierende Halbmasken“. Hier bietet die Normung auch eine Orientierung bei der Filterauswahl.

Mit der Normung von Anforderungen ist in der Regel auch eine Normung von Testprozeduren verbunden, mit denen man die Erfüllung der Anforderungen überprüfen kann. Bei den Tests werden bei Filtern u. a. der Abscheidegrad, oftmals

auch in Form von Fraktionsabscheidegraden, und der zeitliche Verlauf des Druckabfalls bestimmt. Die ermittelten Werte beziehen sich auf das jeweils verwendete Testaerosol. Auch die Erzeugung der Teststäube und -aerosole und ihre Charakterisierung ist Gegenstand von Normen. Diese standardisierten Tests garantieren, dass Filter verschiedener Hersteller die Mindestanforderungen erfüllen.

Es ist bekannt, dass sich geringe Veränderungen von Aerosolparametern stark auf die Filtration, d. h. die Partikelabscheidung und den zeitlichen Druckverlustverlauf, auswirken können. Daher ist es nicht verwunderlich, dass die Bedingungen bei der Filterprüfung und die dabei ermittelten Ergebnisse oft sehr stark von denen im realen Einsatz abweichen.

Eine Möglichkeit, die Testbedingungen besser an die realen Bedingungen anzugleichen, besteht darin, das jeweilige Testaerosol möglichst nahe an das real vorliegende Aerosol anzugleichen. Diesen Weg geht man z. B. bei den sogenannten Partikelfiltern zur Reinigung von Abgasen aus Dieselmotoren [1]. Dabei interessiert besonders der Bereich des Ultrafeinstaubes.

Auch beim Übergang von Partikelmassen bewertenden Betrachtungen auf Partikelanzahl bewertende Betrachtungen kommt der Partikelgrößenverteilung eines Testaerosols zentrale Bedeutung zu. Die oft noch üblichen gravimetrischen Testmethoden weisen insbesondere mit Bezug auf den ultrafeinen Bereich eine sehr eingeschränkte Aussagekraft auf, da Partikel $< 0,1 \mu\text{m}$ nur mit erhöhtem Aufwand massenmäßig nachgewiesen werden können. Eine zeitnahe Identifizierung von möglichen Expositionen ist beispielsweise mit onlinefähigen Messgeräten wie dem

M. Sc. Albert Hellmann, Dr.-Ing. Kilian Schmidt,
Prof. Dr.-Ing. Siegfried Ripperger,

Lehrstuhl für Mechanische Verfahrenstechnik,
Technische Universität Kaiserslautern.

Dipl.-Ing. (FH) Johannes Pelzer,

Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen
Unfallversicherung (IFA), Sankt Augustin.

Dr. rer. nat. Klaus W. Müller,

Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und
Gastgewerbe, Mannheim.

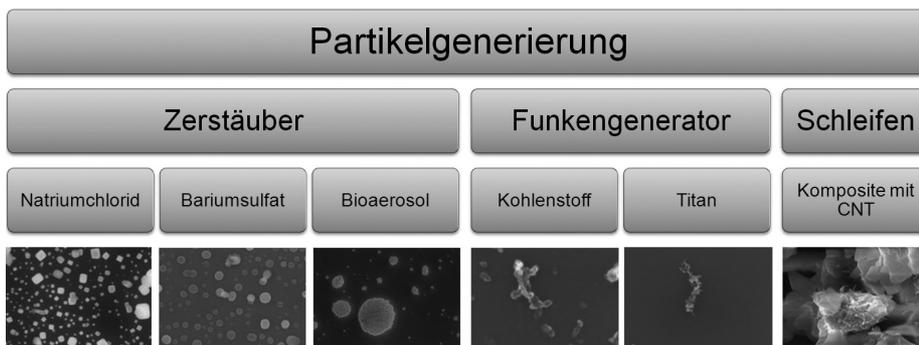


Bild 1. Verschiedene Methoden zur Generierung von Referenzaerosolen.

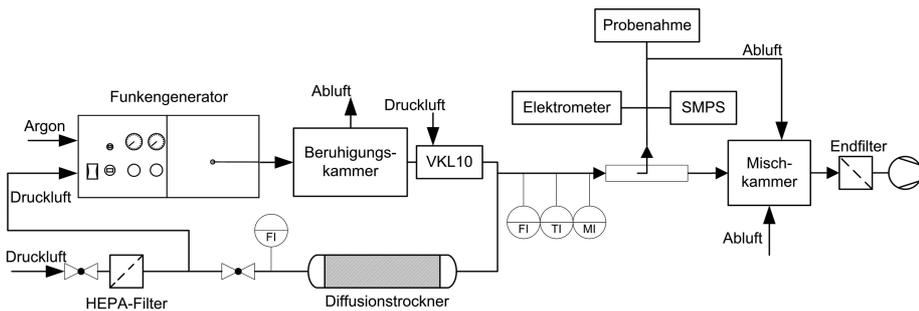


Bild 2. Schematischer Versuchsaufbau. FI: Volumstrommessung, MI: Luftfeuchtefühler, TI: Temperaturfühler

Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS) und dem Electrical Low Pressure Impactor (ELPI, Fa. Dekati) möglich.

Im Folgenden wird über Untersuchungen berichtet, bei denen Aerosole aus verschiedenen Werkstoffen mittels eines Funkengenerators erzeugt wurden. Dabei sollte auch die Variationsbreite der erzeugten Aerosole untersucht werden, um in einem späteren Schritt die Partikelgrößenverteilung an real vorliegenden Bedingungen an Arbeitsplätzen (z. B. Schweißarbeitsplätzen) anpassen zu können. In Bild 1 sind exemplarisch drei Methoden zur Generierung von Aerosolen und deren Form gegenübergestellt: Zerstäuber, Funkengenerator und Schleifmaschine.

Generiert man Partikel mit dem Zerstäuber aus Lösungen, haben diese eine sphärische bis kubische Morphologie. Durch den Funkengenerator erzeugte Partikel weisen eine weit verzweigte Agglomeratestruktur auf. Beim Schleifen unterschiedlicher Materialien ist die erzeugte Partikelform willkürlicher und hängt stark vom jeweiligen Material und der Bearbeitungsmethode ab.

2 Versuchsaufbau

Um in einem Versuchsaufbau ein Aerosol kontinuierlich zu erzeugen und zu charakterisieren, wird zunächst ein partikelfreier Gas- bzw. Druckluftstrom bereitgestellt. Hierzu wird das Gas aus dem bestehenden Druckluftnetz zuerst über einen Feinfilter, einen Ölfilter und einen Aktivkohle-Adsorber geleitet. Im Anschluss daran folgt eine Filtration in einem High Efficiency Particulate Airfilter (HEPA-Filter). Mit diesem partikelfreien Gas können alle verwendeten Geräte versorgt werden.

Zur Generierung des Aerosols wurde ein Funkengenerator (Model GFG 1000, Fa. Palas) verwendet. Der jeweilige Feststoff – Grafit C, Titan Ti und Kupfer Cu – wird als zylindrische Feststoffelektrode eingebracht. Bild 2 zeigt ein vereinfachtes Schema des Versuchsaufbaus. Die direkte Versorgung

des Generators mit dem Inertgas Argon (Reinheitsklasse 4.6) wird über eine 50-l-Gasflasche, die Versorgung mit Luft über das Druckluftnetz garantiert. Aerosole mit übermäßig vielen Partikeln können optional durch einen Luftstrom mittels Flowmeter (Model 4043, Fa. TSI) oder eine Verdünnungsstufe (VKL 10, Fa. Palas) verdünnt werden. Ein Diffusionstrockner stellt sicher, dass die relative Feuchtigkeit des Aerosols 20 % nicht überschreitet. In der nachfolgenden Messstrecke werden Feuchtigkeit, Temperatur und der Volumenstrom kontinuierlich gemessen sowie ein Probenahmestrom zur Partikelanalyse entnommen.

Die Messung der Partikelgrößenverteilung und -anzahlkonzentrationen erfolgt mit einem Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS, Model 3934, Fa. TSI). Die generierte Partikelgrößenverteilung (PGV) kann in Bereichen von ca. 14 bis 820 nm gemessen werden. Der Probenahmestrom des Messgerätes beträgt $0,5 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$

und entspricht dem „Low Flow Modus“ des Condensation Particle Counters (CPC, Model 3022A, Fa. TSI). Weiterhin wird für die Messung des elektrischen Stroms bzw. der Partikelladung ein Elektrometer (Model 3068B, Fa. TSI) verwendet. Im Anschluss an die Messstrecke ist ein Endfilter installiert.

Mögliche Modifikationen der Partikelgrößenverteilung oder der Anzahlkonzentration lassen sich durch folgende Änderungen der Versuchseinstellung erreichen:

- Veränderung der Verweilzeit durch Veränderung der Größe der Beruhigungskammer,
- Änderung der Parameter des Generators (z. B. Funkenfrequenz, Volumenstrom),
- Veränderung der Verdünnungseinheit und des Verdünnungsvolumenstroms,
- Veränderung des Ladungszustands des Aerosols (z. B. durch Einsatz eines Neutralisators oder Koronaaufladers).

3 Versuchsdurchführung

Der chronologische Versuchsablauf ist im Folgenden stichpunktartig aufgelistet:

- Einschalten der Messgeräte,
- Einbau der Elektroden,
- Kalibrierung der Messgeräte,
- Eingabe der gewünschten Parameter in der Software,
- Einstellen der Gasvolumenströme,
- Kontrolle der Anlage auf Dichtigkeit,
- Einschalten des Generators und Durchführung der Messungen.

Zu jedem Versuch wird eine Messreihe, bestehend aus mehreren Einzelmessungen, durchgeführt. Die Erfassung der Daten erfolgt über die Auswertungssoftware AIM (V. 8.0) der Fa. TSI am PC. In Tabelle 1 sind zusammenfassend die Randbedingungen der einzelnen Versuche dargestellt.

Tabelle 1. Randbedingungen der Messreihen zu dem Versuchsprogramm.

VKL 10 = Vordruck der Verdünnungsstufe

Versuch	Volumenstrom Generierung	VKL 10 in bar	Aerosol	Volumenstrom Messstrecke in l · min ⁻¹	Strom	Untersuchungsziel
1	Ar 2 bar Luft 2 bar	3	C	~ 96	600	Reproduzierbarkeit
2	Ar 2 bar Luft 0 bar	3	C	~ 96	100 bis 900	Funkenfrequenz
3	Ar 2 bar Luft 0 bis 1,5 bar	3	C	~ 96	600	Luftvolumenstrom
4	Ar 2 bar Luft 0 bar	3	Cu, Ti	~ 96	600	Partikelgrößenverteilung
5	Ar 2 bar Luft 0 bar	3	C, Cu, Ti	~ 96	600	Ladungszustand

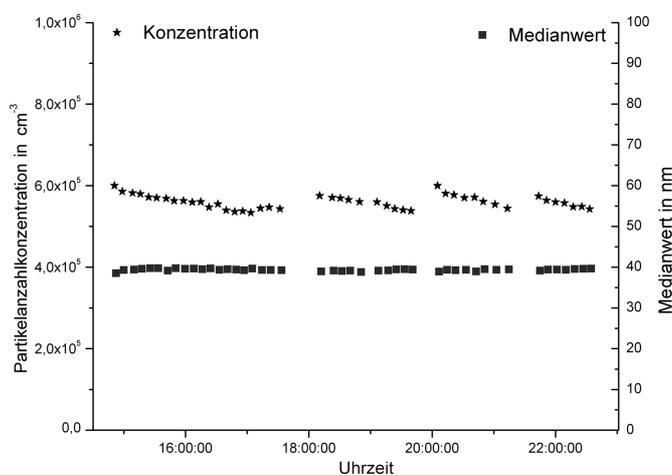


Bild 3. Zeitlicher Konzentrationsverlauf des Versuchs für Ruß.

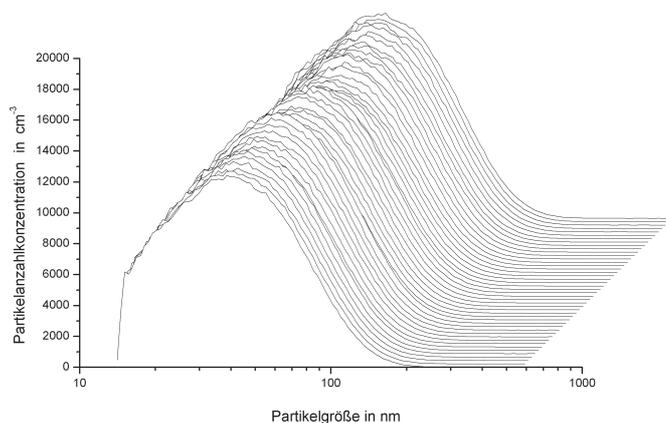


Bild 4. Zeitlicher Verlauf der Partikelkonzentration des Versuchs für Kohlenstoff.

4 Ergebnisse

4.1 Zeitlicher Verlauf der Gesamtanzahlkonzentration

Ein wichtiges Kriterium für die künstliche Generierung eines definierten Aerosols ist eine konstante Partikelanzahlkonzentration. Ist diese gewährleistet, können z. B. reproduzierbare Standzeitversuche mit Filtern oder Inhalationstests über entsprechend lange Zeiträume durchgeführt werden. Im Folgenden wird exemplarisch das Langzeitverhalten (Partikelgrößenverteilung und -konzentration) der Apparatur anhand der Ergebnisse mit Kohlenstoff dar-

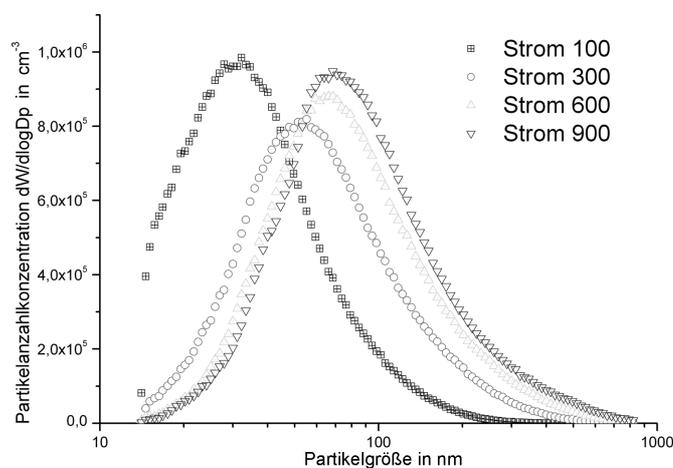


Bild 5. Vergleich der Partikelgrößenverteilungen von Kohlenstoff mit Variation des Stroms bzw. der Funkenfrequenz.

gestellt. Dabei wurden die Randbedingungen gemäß den Angaben in Tabelle 1 (Versuch 1, Reproduzierbarkeit) gewählt. Bild 5 zeigt den gemessenen zeitlichen Verlauf der Partikelanzahlkonzentrationen (Y1-Achse, links) und den Medianwert der Partikelgrößenverteilung (Y2-Achse, rechts). Man erkennt auch die drei bewussten Unterbrechungen während des Versuchs. Die Gesamtanzahlkonzentration der Partikel nimmt über den Zeitraum von ca. einer Stunde leicht (um ca. $2 \cdot 10^4$ bis $3 \cdot 10^4$ cm⁻³) ab. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich nach dem Start bzw. wiederholtem Start die einzelnen Drücke (z. B. Verdünnungsstufe, Generator, Verdünnungsluft) neu einstellen müssen. Der Medianwert der Partikelgrößenverteilung bleibt dagegen nahezu konstant. In Bild 4 sind die zugehörigen über den zeitlichen Verlauf gemessenen Partikelgrößenverteilungen dargestellt. In diesem Diagramm wird deutlich, dass sich die Lage der Verteilung nicht stark über den gezeigten Versuchszeitraum ändert.

4.2 Partikelgrößenverteilungen

In Bild 5 werden die Partikelgrößenverteilungen des generierten Kohlenstoffaerosols für die Einstellungen in Tabelle 1 (Versuch 2, Funkenfrequenz) gezeigt. Die Verteilungen werden dabei über die Veränderung des am Gerät einstellbaren Parameters „Strom“ beeinflusst, der die Funkenfrequenz variiert. Anzumerken ist, dass sich mit der Veränderung des Parameters „Strom“ die Funkenfrequenz und somit der Materialabtrag proportional ändern (z. B. Strom 800

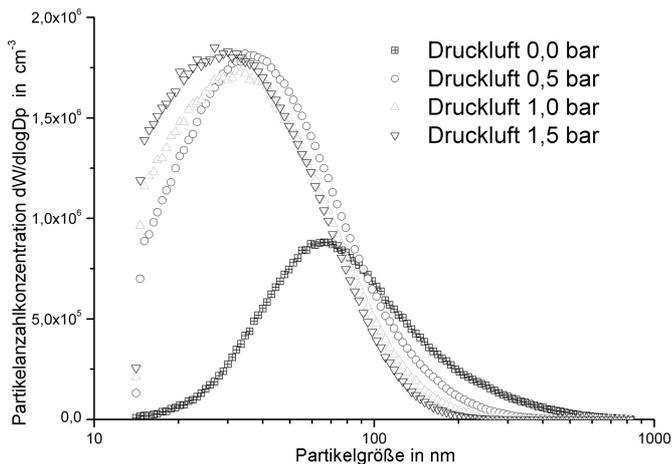


Bild 6. Vergleich der Partikelgrößenverteilungen von Kohlenstoff mit Variation des Luftvolumenstroms.

Frequenz von 240 s^{-1} Materialabtrag ca. 5 mg/h). Die Energie eines Funkens kann dabei nicht verändert werden. In Bild 5 wird auf der Abszisse der Partikel- bzw. Mobilitätswert dargestellt. Auf der Ordinate ist die Partikelanzahlkonzentration (Einheit: $dW / d\log D_p$ in cm^{-3}) des entsprechenden Größenintervalls an der Gesamtanzahl des Kollektivs aufgetragen (anzahlspezifische Verteilungsdichte). Aus Bild 5 ist ersichtlich, dass sich die Partikelgrößenverteilung des Aerosols bei einer Funkenfrequenzerhöhung zu größeren Partikelgrößen verschiebt. Bedingt durch einen erhöhten Massenabtrag werden mehr Primärpartikel erzeugt. Über die zunehmende Anzahlkonzentration und die damit verbundene Verringerung der mittleren freien Weglänge wird die Koagulation begünstigt und es bilden sich größere Agglomerate aus. Als Folge der gesetzten Randbedingungen, des verwendeten Versuchsaufbaus und der damit verbundenen Verweilzeit im System „wandert“ die Partikelgrößenverteilung in Richtung größerer Partikel. Begünstigt wird dies auch durch eine Erhöhung der Verweilzeit. Diese kann durch eine Vergrößerung des Volumens der Beruhigungskammer oder eine Reduzierung des am Generator einstellbaren Volumenstroms bzw. des Verdünnungsstroms erreicht werden,

Bild 6 zeigt die Partikelgrößenverteilungen des Kohlenstoffaerosols für die Einstellungen in Tabelle 1 (Versuch 3, Luftvolumenstrom). Hierbei wird nur der Volumenstrom der Druckluft direkt am Generator verändert. Bei einer Erhöhung des Vordrucks der Luft (Beispiel: Druck 1 bar ca. $25 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ auf Druck 2 bar ca. $40 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$) wird der Volumenstrom der Luft gegenüber Argon (Beispiel: Druck 1 bar ca. $4 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$) stark verändert. Dies hat zur Folge, dass die Verweilzeit äquivalent abnimmt. Demzufolge wird die Möglichkeit der Primärpartikel zu koagulieren verringert. Daher verschiebt sich gegenüber einer Strom- bzw. Funkenfrequenzerhöhung die Partikelgrößenverteilung zu kleineren Partikelgrößen bei einer Erhöhung der Verdünnungs- bzw. des Druckluftvolumenstroms, was gemäß der Theorie zur Koagulation zu erwarten ist.

Folglich zeigen Versuche bei der Veränderung des Argonvolumenstroms eine gleiche Tendenz (Beispiel: Druck 1 bar ca. $4 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ auf Druck 2 bar ca. $6,5 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$). Aufgrund der geringeren Volumenstromänderung tritt ein kleinerer Effekt ein.

Wird der Vordruck der Verdünnungsstufe (VKL 10) erhöht oder erniedrigt, verändert sich nur die Anzahlkonzentration.

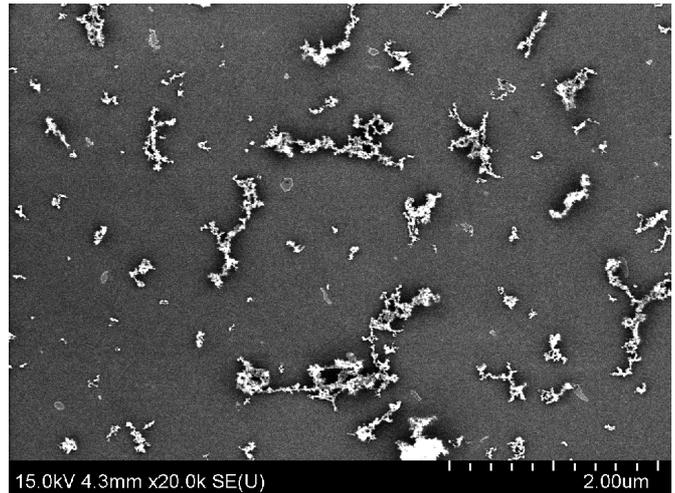


Bild 7. REM-Aufnahme von Kohlenstoffpartikeln, erzeugt mittels Funken-generator.

Der Medianwert bleibt konstant, wobei ausschließlich die Verdünnungsrate bzw. angesaugte Luftmenge variiert und somit nur die Konzentration beeinflusst.

4.3 Charakterisierung der Kohlenstoffpartikel

Zur Charakterisierung der erzeugten Partikelsysteme dient die Bilderfassung mit der Rasterelektronenmikroskopie (REM). Zuvor werden die generierten Kohlenstoffpartikel mittels Nano Aerosol Sampler (NAS, Model 3089, Fa. TSI) abgeschieden. Dies geschieht bei folgenden Einstellungen:

- Spannung: $9,3 \text{ kV}$ (NAS),
- Probenahmevolumenstrom: $1 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$,
- Probenahmezeit: 10 min ,
- Probenträger: Silicium-Wafer,
- Medianwert der generierten Partikelgrößenverteilung bei ca. 70 nm (SMPS).

Bild 7 zeigt exemplarisch eine REM-Aufnahme von Kohlenstoffpartikeln. Der Funkengenerator erzeugt durch sein Funktionsprinzip Primärpartikel, die sich im System aufgrund der Koagulation bevorzugt zu Agglomeraten zusammenschließen. Folgerichtig lassen sich durch die zuvor genannten Variationsmöglichkeiten die Größe und Verzweigungen der Agglomerate einstellen. Dies wird in Bild 7 deutlich: Je nach Depositionszeit können auf dem Sampler mehrere Agglomerate abgeschieden werden. Neben einer Partikelgrößenverteilung können mit einer geeigneten Bildverarbeitungssoftware die Primärpartikelgröße und Strukturparameter der Agglomerate aus dem REM-Bild ermittelt werden.

4.4 Ergebnisse mit weiteren Stoffsystemen

Zur Charakterisierung der Aerosole aus Titan und Kupfer wurden die Randbedingungen gemäß Tabelle 1 für Versuch 4 verwendet. Bei diesen Einstellungen konnte für die Kohlenstoff- bzw. Rußverteilung ein Medianwert von ca. 60 bis 70 nm generiert werden. Mit diesen Einstellungen wurden auch Versuche mit Titan und Kupfer durchgeführt.

4.4.1 Partikelgrößenverteilungen

In **Bild 8** sind die generierten Partikelgrößenverteilungen von Kohlenstoff, Titan und Kupfer vergleichend dargestellt. Trotz gleicher Versuchsparameter werden unterschiedliche Verteilungen erzeugt. Die Hauptursache der Veränderung in

der Anzahlkonzentration sowie im Medianwert sind auf das Material zurückzuführen. Durch die Veränderung des Materials verändert sich der Materialabtrag und damit die Anzahl und Art der Primärpartikeln bzw. Agglomerate.

Die Größenverteilung der Kohlenstoffpartikel hat einen Medianwert bei ca. 60 bis 70 nm, wohingegen bei Titan der Medianwert bei ca. 20 bis 30 nm liegt. Der Medianwert für Kupfer liegt augenscheinlich außerhalb des Messbereichs und kann im Bereich < 14 nm angenommen werden.

4.4.2 Charakterisierung

Bild 9 zeigt exemplarisch REM-Aufnahmen von Titan- und Kupferpartikeln. Zu erkennen ist, dass sich wie bei Kohlenstoff auch Agglomerate bilden. Bedingt durch die eingestellten Randbedingungen während der Partikelgenerierung entstanden unterschiedliche Partikelgrößen und -konzentrationen. Die Abscheidung der einzelnen Partikelsysteme erfolgt unter identischen Bedingungen mit dem NAS. Auf den Wafern befinden sich in Abhängigkeit vom Ausgangsmaterial und der dementsprechend unterschiedlichen generierten Anzahlkonzentration unterschiedlich viele Partikel. Der Ladungszustand nach der Generierung ist ein weiterer Faktor für den unterschiedlichen Grad der Belegung des Wafers. Hierbei ist zu erkennen, dass eine deutlich bessere Abscheidung von Titanpartikeln gegenüber Kupferpartikeln erfolgte.



Bild 9. REM-Aufnahme von Titan- (links) und Kupferpartikeln (rechts), erzeugt mittels Funkengenerator.

4.4.3 Ladungszustand

Zur Charakterisierung des Ladungszustandes der erzeugten Aerosole aus Kohlenstoff, Titan und Kupfer wurden die Randbedingungen gemäß den Angaben in Tabelle 1 (Versuch 5, Ladungszustand) verwendet.

In **Bild 10** ist der mit dem Elektrometer gemessene Strom über die Versuchsdauer dargestellt. Hierbei werden drei Ergebnisse für drei Zeiträume dargestellt, die durch den Elektrodenwechsel voneinander getrennt sind. Zur Bewertung des gemessenen Stroms wurde jeweils ein Mittelwert über einen Zeitraum von 30 min (Zeitraum zwischen den gestrichelten Linien) gebildet. Diese materialabhängig ermittelten Werte für den Strom, Standardabweichung und ausgegebene Elektrometerkonzentration sind in **Tabelle 2** aufgeführt.

Bei den Kohlenstoffpartikeln wurde der höchste positive Strom gemessen. Die Werte von Kupfer zeigten hingegen einen negativen Strom auf. Über die im Gerät verwendete Software wird zusätzlich eine Partikelanzahlkonzentration berechnet. Hierbei kann wiederum bei Kohlenstoff auf die größte Anzahl an geladenen Partikeln geschlossen werden.

5 Diskussion

Der verwendete Funkengenerator GFG 1000 kann für die eingesetzten Partikelsysteme bis zu 10^8 Partikel/cm³ erzeugen. Um gezielt eine bestimmte Partikelgrößenverteilung einzustellen, ist es notwendig, die Randbedingungen des Versuchs über die Haupteinflussgrößen zu konditionieren. Damit können die Partikelanzahlkonzentrationen nach ei-

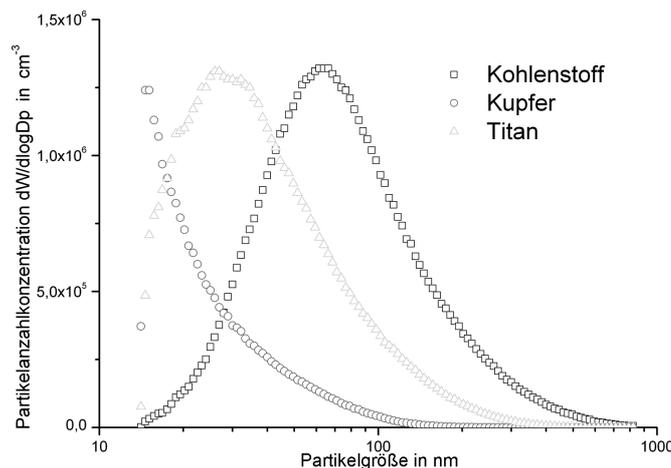


Bild 8. Vergleich der Partikelgrößenverteilungen von Kohlenstoff, Titan und Kupfer mit identischer Versuchseinstellung.

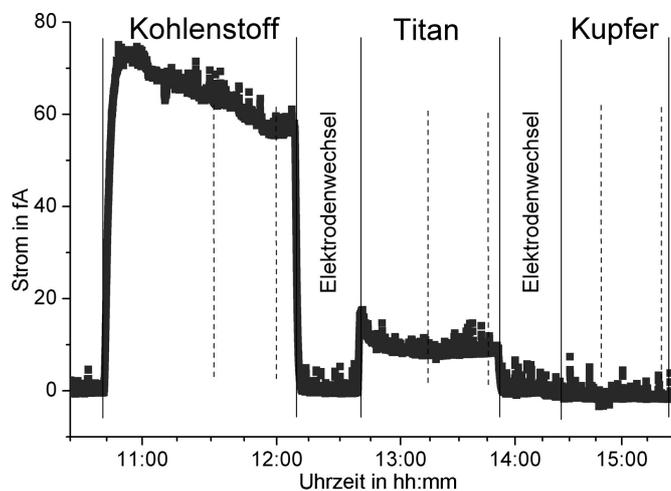


Bild 10. Vergleich der Elektrometerwerte von Kohlenstoff, Titan und Kupfer mit identischer Versuchseinstellung.

ner kurzen Einlaufphase über mehrere Stunden konstant gehalten werden.

Die Einstellmöglichkeiten zur Variation der PGV werden im Folgenden kurz erläutert:

- Soll die Anzahlkonzentration der Verteilung erhöht werden, kann aus dem ausgehenden Generatorvolumenstrom ein größerer Teil entnommen bzw. der Verdünnungsstrom reduziert werden.
- Soll der Medianwert der Verteilung erhöht werden, so kann die Funkenfrequenz erhöht werden. Zusätzlich kann die Verweilzeit erhöht werden, indem der ausgehende Generatorvolumenstrom verringert wird.

Tabelle 2. Mittelwerte der gemessenen Elektrometerwerte der verschiedenen Materialien.

Material	Strom in fA	Standardabweichung in fA	Elektrometerkonzentration in #/cm ³
Kohlenstoff	60,33	2,60	75 303,6
Titan	8,44	0,60	10 532,2
Kupfer	-1,24	0,38	1 584,5

Tabelle 3. Medianwerte der gemessenen Verteilungen bei unterschiedlichen Einstellungen.

Volumenstrom Generierung in bar	VKL in bar	Strom	Untersuchungsziel	Medianwert in nm
Ar 2 Luft 0	3	100	Funkenfrequenz	33,8
		300		58,2
		600		74,9
		900		79,9
Ar 2 Luft 0	3	600	Luftvolumenstrom	74,9
Ar 2 Luft 0,5				39,3
Ar 2 Luft 1,0				35,8
Ar2 Luft 1,5				33,5

Die optische Charakterisierung erfolgte über REM-Aufnahmen und zeigte, dass auch immer Agglomerate gebildet wurden. Wird jedoch ein geringer Materialabtrag gewählt und die Verweilzeit verkürzt, so können prinzipiell auch nur Primärpartikel bei einer niedrigen Partikelkonzentration generiert werden. **Tabelle 3** zeigt die Medianwerte in Abhängigkeit von den variierten Randbedingungen.

Es konnte gezeigt werden, dass sich der Medianwert bei Erhöhung der Funkenfrequenz vergrößert. Eine Erhöhung des Verdünnungsluftvolumenstroms wirkt entgegengesetzt und verringert den Medianwert.

Über die Funktionsweise des NAS (negative Elektrode) und den gemessenen im Mittel negativen Ladungszustand der Kupferpartikel kann die geringe Anzahl von abgeschiedenen Partikeln auf dem Wafer erklärt werden.

Nach *Mäkelä* [2] ergeben sich auch Unterschiede bei der generierten Anzahl und Größe der Primärpartikel mit der Verwendung eines anderen Inertgases, wie z. B. Stickstoff.

Literatur

- [1] *Schmidt, F.; Stahlmecke, B.; Kaminski, H.; Finger, H.:* Charakterisierung von Ruß als Teststaub für Luftfilter. F&S Filtrieren und Separieren 22 (2008) Nr. 6, S. 298-302.
- [2] *Mäkelä, M. J.; Aalto, P.; Gorbunov, B. Z.; Korhonen, P.:* Size distribution from aerosol spark generator. J. Aerosol Sci. 23 (1992), suppl. 1, S. 233-236.