

# EINFLUSS VON ROHSTOFFMODIFIZIERUNGEN AUF DIE WIRKUNG VON ORGANISCHEN ADDITIVEN IN ALUMINIUMOXIDSUSPENSIONEN

Conny Rödel<sup>1</sup>, Alexander Michaelis<sup>1,2</sup>, Manfred Fries<sup>2</sup>, Annegret Potthoff<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institut für Werkstoffwissenschaft, TU Dresden, Helmholtzstr. 7, 01062 Dresden, e-mail: [conny.roedel@tu-dresden.de](mailto:conny.roedel@tu-dresden.de)

<sup>2</sup> Fraunhofer IKTS, Winterbergstr. 28; 01277 Dresden, e-mail: [annegret.potthoff@ikts.fraunhofer.de](mailto:annegret.potthoff@ikts.fraunhofer.de)

## 1 Einleitung

Der Einsatz disperser Systeme spielt in den verschiedensten Bereichen von Industrie und Wissenschaft eine entscheidende Rolle. Dabei durchziehen die Anwendungen z.B. in Form von Lacken, Farben, Chemikalien, Kosmetika, Medikamenten und Nahrungsmitteln nahezu alle Bereiche des täglichen Lebens. Um eine optimale Stabilisierung der Dispersionen (Suspensionen, Emulsionen) zu gewährleisten, sind eine homogene Verteilung der dispersen Phase in der umgebenden Matrix und die Kontrolle der auftretenden attraktiven interpartikulären Wechselwirkungen unerlässlich. Die maßgeblichen physikalisch-chemischen Effekte werden durch die DLVO-Theorie beschrieben [1, 2]. Die Stabilität der feindispersen Phase gegen Agglomeration, Sedimentation oder Flotation kann entweder durch eine gezielte Einstellung des Oberflächenpotentials oder durch den Einsatz von ungeladenen Polymeren erfolgen, die an der Phasengrenzfläche adsorbieren. Folglich wird in eine elektrostatische [3] und eine sterische Stabilisierung [4] unterschieden.

Bei der Herstellung technischer Keramiken ist die Masseaufbereitung der pulverförmigen Rohstoffe in verarbeitungsfähige Suspensionen nur ein Zwischenschritt innerhalb einer vielschichtigen Prozesskette. Trotzdem beinhaltet die Erzeugung einer hochkonzentrierten und fließfähigen Suspension zahlreiche Parameter, die für die weitere Verarbeitung und schließlich für die Qualität des Produktes von entscheidender Bedeutung sind. Für eine optimale Homogenisierung und Stabilisierung der Partikel kommen neben der elektrostatischen und sterischen auch elektrostatisch wirkende Hilfsmittel zum Einsatz [5]. Bei Substanzen, die für eine elektrosterische Stabilisierung in Frage kommen, handelt es sich um funktionelle geladene Polymere, die an der Phasengrenzfläche adsorbieren. Die auftretenden attraktiven Wechselwirkungen der Partikel werden demnach nicht nur durch die räumliche Ausdehnung des Hilfsmittels, sondern ebenfalls durch die elektrostatischen Abstoßungskräfte der gleichsinnig geladenen Moleküle minimiert. Im Falle

von Keramiksuspensionen mit oxidischen Materialien haben sich Derivate der Polyacrylsäure bewährt [6-9].

Neben dem Einsatz stabilisierender Hilfsmittel werden bei der Aufbereitung keramischer Massen eine Reihe weiterer Zusatzstoffe eingesetzt, die nicht der Optimierung der Suspensionseigenschaften dienen. Jedes dieser Additive erfüllt erst im Laufe der Weiterverarbeitung eine spezifische Funktion, um die Verarbeitungseigenschaften des Rohstoffes zu verbessern. Zu diesen Substanzen gehören u.a. Binder und Gleitmittel sowie für die nachfolgende thermische Behandlung notwendige Sinterhilfsmittel. Durch die Verwendung unterschiedlicher Additive bei der Herstellung keramischer Suspensionen steigt jedoch die Wahrscheinlichkeit unvorhersehbarer Wechselwirkungen der Einzelkomponenten untereinander, wodurch die Qualität des Produktes beeinflusst werden kann [10].

Im Rahmen dieser Arbeit werden am Beispiel von wässrigen Aluminiumoxid-Suspensionen die komplexen Wechselwirkungen von kommerziell erhältlichen Additiven analysiert, die als Dispergator, Binder oder Gleitmittel wirken. Im Hinblick auf die Erzeugung eines fließfähigen und gut pressbaren Granulates steht die Optimierung der Suspensionsparameter im Fokus der experimentellen Arbeiten. Für ein kommerziell erhältliches Aluminiumoxid-Pulver werden Ergebnisse präsentiert und diskutiert, die mit Hilfe der Korrelation von Oberflächenladungsverhältnissen, der Suspensionsviskosität und -stabilität qualitative sowie quantitative Aussagen über die Wirkung von Additiven in verschiedenen Aufbereitungszuständen ermöglichen.

## **2 Materialien und Methoden**

### **2.1 Materialien**

Für die Untersuchungen wurde ein kommerzielles Aluminiumoxid-Pulver der Firma Nabaltec (Nabalox NO 625-10, im Folgenden als A bezeichnet) verwendet. Die physikalischen Parameter des Rohstoffs sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Die Reinheit betrug laut Datenblatt des Herstellers min. 99,8 % mit einem  $\alpha$ -Anteil von mehr als 95 %. Als funktionelle Additive wurden ein Dispergator (Natrium-Polyacrylat, 8000 g/mol, Sigma-Aldrich), ein Binder (Polyvinylalkohol, 27000 g/mol, Clariant) und ein Gleitmittel (Polyethylenglykol, 400 g/mol, Merck) eingesetzt. Zur Modifizierung wurde der Rohstoff mit Hilfe einer Rührwerkskugelmühle (LME 4T, Netzsch) und Zirkondioxid-Mahlkugeln (5-YSZ, 1 mm, Tosoh/Nikkato) zerkleinert. Die Zerkleinerung erfolgte einmal ohne (bezeichnet als B) und einmal mit dem Zusatz von 0,1 % Magnesiumoxid als Sinterhilfsmittel (bezeichnet als C, s. Tabelle 1).

*Tabelle 1: Übersicht zur Partikelgröße (Mastersizer 2000, Malvern), Dichte (Pentapycnometer, Quantachrome) und spezifischen Oberfläche (BET ASAP 2010, Micromeritics) der eingesetzten Pulver.*

<b>Pulver</b>	<b>d<sub>50;3</sub> in µm</b>	<b>Dichte in g/cm<sup>3</sup></b>	<b>spez. Oberfläche (BET) in m<sup>2</sup>/g</b>
A	2,57	3,98	1,9
B	0,55	3,82	20,1
C	0,53	3,83	21,4

Für die Herstellung der Suspensionen wurde entionisiertes Wasser verwendet. Die Homogenisierung der Proben wurde mit einem Dissolver-Rührer (Ultra Turrax T50, IKA) durchgeführt. Die Feststoffkonzentration aller untersuchten Proben betrug 40 Ma.%. Die angegebenen Massenanteile der eingesetzten Additive beziehen sich auf die Trockenmasse des verwendeten Rohstoffs.

## **2.2 Methoden**

Der Einfluss der organischen Additive auf die elektrokinetischen Eigenschaften der suspendierten Partikel wurde mit Hilfe elektroakustischer Messungen (Zetaprobe, Colloidal Dynamics) bestimmt. Das ermittelte ESA-Signal (Elektrokinetische Schall-Amplitude) ist direkt proportional zur elektrophoretischen bzw. dynamischen Mobilität der Partikel und kann unter der Annahme spherischer Partikel für die Berechnung des Zetapotentials genutzt werden [14-16]. Die Auswirkungen der Additive auf die Fließeigenschaften der hergestellten Suspensionen wurden durch die Aufnahme von Fließkurven (MCR 101, Anton Paar) in einem Scherratenbereich von 10 bis 1000 s<sup>-1</sup> untersucht. Die Charakterisierung der Suspensionsstabilität erfolgte durch die Aufnahme von zeitaufgelösten Entmischungsprofilen (LUMiSizer, L.U.M.) [17-20]. Alle Messungen erfolgten bei einer Temperatur von 25 °C. Zur Überprüfung der qualitativen Zusammensetzung und der röntgenographischen Phasenreinheit wurden alle pulverförmigen keramischen Komponenten mit Hilfe der Röntgenpulverdiffraktometrie charakterisiert.

## **3 Ergebnisse und Diskussion**

Ausgehend vom unbehandelten Rohstoff sind in den Abbildungen 1 und 3 die Abhängigkeiten der dynamischen Mobilität und der Viskosität vom relativen Anteil sowie vom Typus des eingesetzten Additivs dargestellt. Es ist erkennbar, dass das eingesetzte Natrium-Polyacrylat (NaPA) schon in geringsten Mengen einen signifikanten Einfluss auf die dynamische Mobilität und die Viskosität ausübt. Die verflüssigende Wirkung und der gesteigerte Betrag der dynamischen Mobilität sind ein eindeutiges Indiz für die Grenzflächenaktivität eines Dispergators. Die adsorbier-ten geladenen Molekülketten verringern die attraktiven Partikel-Partikel-Wechselwirkungen im

Sinne einer elektrosterischen Stabilisierung. Es wird außerdem deutlich, dass die Viskosität und die dynamische Mobilität bereits beim Zusatz von 0,2 Ma.% NaPA ein Minimum erreichen. Aus jeder weiteren Dispergatorzugabe resultieren eine Steigerung der Viskosität sowie eine Verringerung des Betrages der dynamischen Mobilität, was mit einer Verschlechterung der Suspensions-eigenschaften einhergeht. Im Gegensatz dazu hat die Anwesenheit von Polyethylenglykol (PEG) und Polyvinylalkohol (PVA) keinen Einfluss auf die dynamische Mobilität der Partikel. Demzufolge ist die Affinität dieser beiden Additive zur Adsorption an der Partikeloberfläche als sehr gering einzuschätzen. Bei den entsprechenden Fließeigenschaften zeigen sich jedoch Unterschiede. Während das langkettige PVA die Viskosität mit steigendem Anteil sukzessive erhöht, hat das kurz-kettige PEG auch hier keinen eindeutigen Einfluss auf die Messgröße.

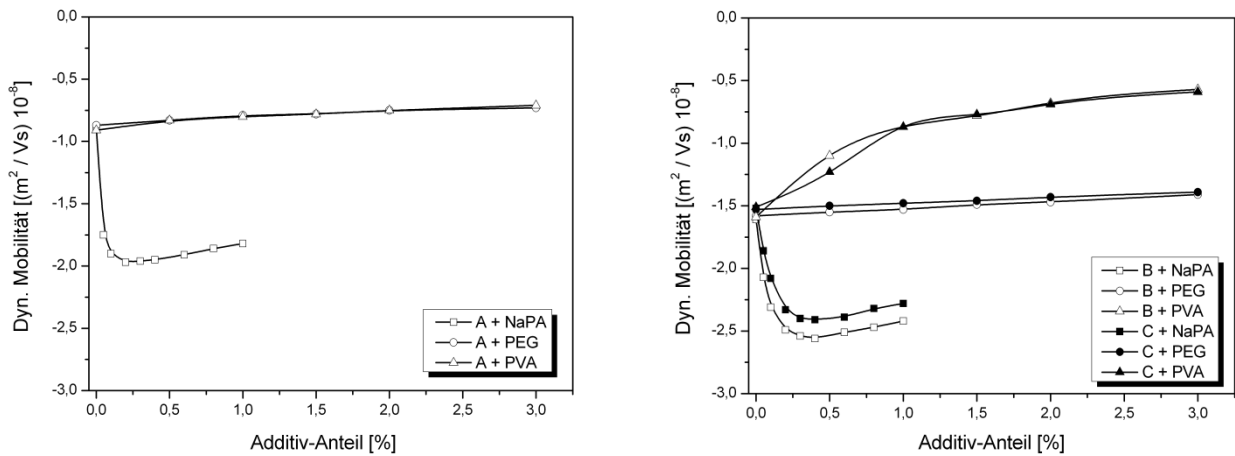


Abb. 1+2: Abhängigkeit der dynamischen Mobilität von Anteil und Typus des Additivs (unbehandelter Rohstoff links, modifizierte Pulver rechts).

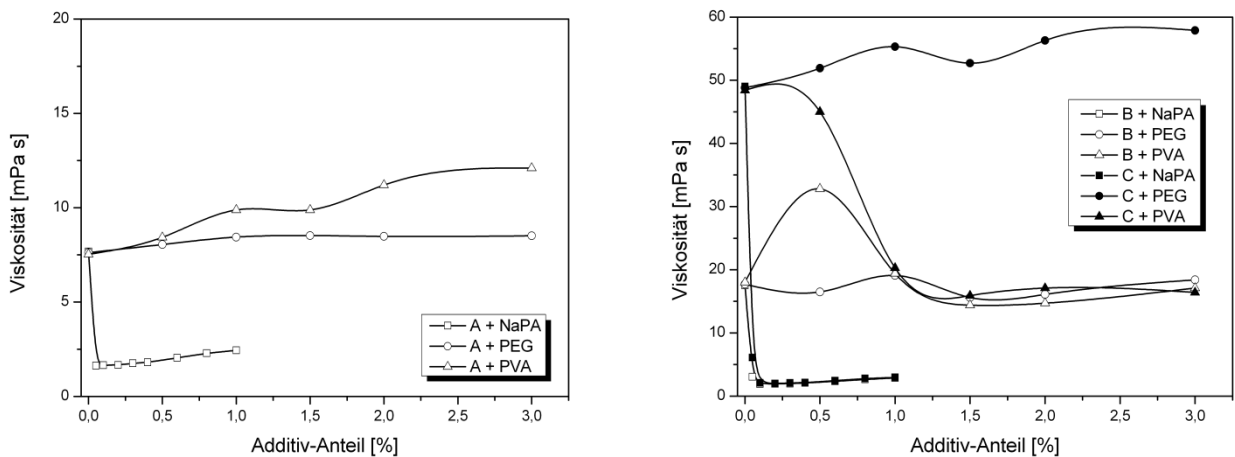


Abb. 3+4: Abhängigkeit der Viskosität (bei  $100 s^{-1}$ ) von Anteil und Typus des Additivs (unbehandelter Rohstoff links, modifizierte Pulver rechts).

Ergänzend zu den genannten Ergebnissen sind in Abbildung 5 die Sedimentationsprofile ausgewählter Suspensionszusammensetzungen zu sehen. Für die Untersuchungen ist ein NaPA-Gehalt von 0,2 Ma.% und ein PEG- bzw. PVA-Gehalt von 3 Ma.% festgelegt worden, um das Sedimen-

tationsverhalten bei optimaler Stabilisierung (NaPA) einerseits und andererseits unter Benutzung anwendungsrelevanter Binder- bzw. Gleitmittel- Konzentrationen abzubilden. Aus den Diagrammen lassen sich grundsätzlich zwei Informationen ableiten: Der lineare Anstieg der Sedimentationskurven zu Beginn der Messung kann zur Berechnung der Sedimentationsgeschwindigkeit genutzt werden und ist ein Maß für die Stabilität einer Suspension. Am Beispiel der NaPA-stabilisierten Probe wird dies besonders deutlich. Die Sedimentationskurve besitzt einen flachen Anstieg, was einer geringen Sedimentationsgeschwindigkeit entspricht. Im Gegensatz dazu zeigt die Anwesenheit von PEG nahezu keine Auswirkungen. Die PVA-haltige Probe ordnet sich hier zwischen den genannten Profilen ein. Der flachere Anstieg im Vergleich zur additivfreien Suspension ist hier allerdings nicht auf einen stabilisierenden Effekt des Polymers zurückzuführen. Vielmehr wirkt sich der sterische Einfluss des Polymers auf die Geschwindigkeit der Partikelmigration während der Sedimentation aus.

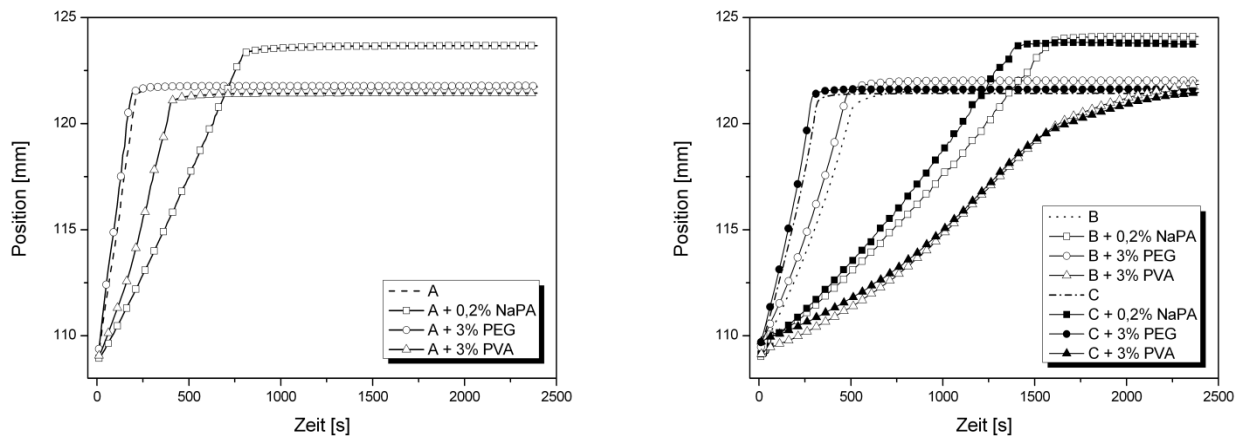


Abb. 5+6: Sedimentationsverhalten (Position der Phasengrenze) bei definierten Anteilen von NaPA, PEG und PVA (unbehandelter Rohstoff bei 110 g links, modifizierte Pulver 800 g rechts).

Eine weitere Kenngröße, die aus dem Diagramm (Abb. 5) abgelesen werden kann, ist die Sedimenthöhe. Dafür werden die Höhen der gebildeten Plateaus der verschiedenen Proben miteinander verglichen. Die Ausbildung eines Plateaus erfolgt nach dem Ende der Sedimentation d.h. es kommt im zeitlichen Verlauf der Messung zu keiner weiteren Verschiebung der Phasengrenze zwischen überstehendem Fluid und Sediment. Im Allgemeinen bilden stabilisierte Suspensionen bei der Entmischung dicht gepackte Sedimente, was in dieser Darstellung einem höheren Niveau im Vergleich zur additivfreien Suspension entspricht, während schlecht stabilisierte Systeme ein voluminöses Sediment formen [7, 8]. Demzufolge zeigt das Natrium-Polyacrylat durch die Ausbildung eines kompakten Sediments hier eindeutig das Verhalten eines Dispergators. Die Auswirkungen von PEG und PVA sind im Vergleich dazu sehr gering. Die Sedimenthöhe der PEG-haltigen Probe entspricht dem Niveau der additivfreien Probe A. Die leichte Verschiebung in

Anwesenheit von PVA ist durch den Einschluss des Polymers in die Sedimentstruktur zu erklären.

In den Abbildungen 2 und 4 sind die Abhängigkeiten der dynamischen Mobilität und der Viskosität vom relativen Anteil sowie vom Typus des eingesetzten Additivs in Bezug auf die modifizierten Pulver dargestellt. Es wird deutlich, dass die Rohstoffmodifizierungen bereits einen deutlichen Einfluss auf die Eigenschaften der Suspensionen ausüben, die noch keine Additive enthalten. So ist im Vergleich zu Abbildung 1 eine Verschiebung der dynamischen Mobilität hin zu höheren Beträgen zu verzeichnen. Ferner kommt es zu einem deutlichen Anstieg der Viskosität von 7,5 mPa s (s. Abb. 2) auf 18 mPa s für das Pulver B bzw. 49 mPa s für das Pulver C (s. Abb. 4). Die unterschiedlichen Ausgangsniveaus von B und C zeigen den Einfluss kleinster Mengen Magnesiumoxid. Die negativen Effekte wie die Viskositätserhöhung sind dabei auf die Kompression der elektrochemischen Doppelschicht aufgrund der anwesenden zweiwertigen Magnesiumionen zurückzuführen [18, 19].

Bei der Gegenüberstellung der gemessenen dynamischen Mobilitäten zeigt sich, dass PEG auch bei den modifizierten Pulvern keine nennenswerte Auswirkung auf die elektrokinetischen Eigenschaften der suspendierten Partikel hat, was sich im Falle der Charge B auch im rheologischen Verhalten der Suspensionen widerspiegelt. Bei den Suspensionen mit dem Pulver C ist ein Anstieg der Viskosität mit steigendem PEG-Gehalt zu verzeichnen, was auf eine Wechselwirkung zwischen Polymer und Sinterhilfsmittel hindeutet. Die Zugabe von NaPA bewirkt auch bei den aufbereiteten Pulvern eine sprunghafte Verbesserung der Suspensionseigenschaften. Aufgrund der höheren spezifischen Oberfläche kann jedoch mehr Dispergator an der Phasengrenzfläche gebunden werden und das Minimum der Titrationskurve verschiebt sich auf 0,4 Ma.%. Das verwendete Magnesiumoxid wirkt sich negativ auf die elektrokinetischen Eigenschaften aus. Neben der Kompression der elektrochemischen Doppelschicht durch freie Magnesiumionen kommt es außerdem zu Komplektierungsreaktionen mit freien Carboxylat-Gruppen des adsorbierten Polymers, was ebenfalls zur Ladungskompensation an der Partikeloberfläche führt. Bei der Betrachtung der Fließeigenschaften wird dieser Unterschied hingegen nicht abgebildet. Die Viskosität wird durch den Zusatz von NaPA in beiden Fällen auf ein sehr niedriges Niveau reduziert.

Am interessantesten sind in diesem Zusammenhang die Ergebnisse der PVA-Titrations. In Abbildung 2 ist zu sehen, dass es durch die PVA-Zugabe zu einer kontinuierlichen Verringerung des Betrages der dynamischen Mobilität kommt. Aus der Sicht der Elektrokinetik ist dieses Ergebnis als fortschreitende Destabilisierung mit steigendem PVA-Anteil zu interpretieren. Die Folge wäre eine stetig steigende Viskosität bei zunehmendem PVA-Anteil aufgrund von Agglomerationsprozessen. Die gemessenen Fließeigenschaften (s. Abb. 4) zeigen hingegen einen völ-

lig anderen Trend. Bis auf das Maximum bei einem PVA-Gehalt von 0,5 Ma.% zeigt der Viskositätsverlauf bei der Verwendung von Pulver B keinen eindeutigen Trend und endet beim maximalen Anteil von 3 Ma.% auf dem Niveau der Ausgangsmessung. Das ermittelte Maximum der Viskosität kann experimentell reproduziert und mit einer Verarmungsdestabilisierung erklärt werden. In Verbindung mit dem Pulver C ist bei der Zugabe von PVA sogar eine verflüssigende Wirkung zu beobachten.

Die Sedimentationseigenschaften (s. Abb. 6) bestätigen die gezeigten Ergebnisse der elektrokinetischen und rheologischen Messungen für die Verwendung von NaPA und PEG. Die Sedimentationsgeschwindigkeiten und Sedimenthöhen der PEG-haltigen Proben entsprechen in guter Näherung den Werten der additivfreien Suspensionen B und C. Die Wechselwirkungen von PEG sind demnach als sehr gering einzustufen. Die stabilisierende Wirkung der NaPA lässt sich an den Sedimentationsprofilen wieder sehr gut anhand des flachen Anstieges, also einer geringen Sedimentationsgeschwindigkeit, und dem Niveauunterschied der Sedimenthöhen charakterisieren. Beim Vergleich der Sedimentationseigenschaften lässt sich ebenfalls der Einfluss des Magnesiumoxids sehr gut ableiten. Alle Suspensionen, die das Pulver C enthalten, weisen eine höhere Sedimentationsgeschwindigkeit und ein niedrigeres Plateau auf als die Suspensionen mit dem Pulver B, was die destabilisierende Wirkung der anwesenden Magnesiumionen nochmals belegt. Die Ergebnisse der PVA-haltigen Proben B und C nehmen auch bei der Analyse der Sedimentationseigenschaften eine Sonderposition ein. So weisen diese Proben eine geringere Sedimentationsneigung auf als die stabilisierten Suspensionen, zeigen einen zeitabhängigen nichtlinearen Verlauf des Sedimentationsprofils und es sind keine nennenswerten Änderungen im Profilverlauf durch Anwesenheit des Magnesiumoxids erkennbar.

*Tabelle 2: Übersicht zur Partikelgröße (Mastersizer 2000, Malvern), Dichte (Pentapycnometer, Quantachrome) und spezifischen Oberfläche (BET ASAP 2010, Micromeritics) der ausgelagerten Pulver.*

<b>Pulver</b>	<b>d<sub>50,3</sub> in µm</b>	<b>Dichte in g/cm<sup>3</sup></b>	<b>spez. Oberfläche (BET) in m<sup>2</sup>/g</b>
B	0,55	3,82	20,1
B – 750 °C	0,55	3,98	15,4
B – 1200 °C	1,47	4,10	5,8

Für eine genauere Einordnung der Messergebnisse und zur Analyse der unerwarteten Wechselwirkungen in den PVA-haltigen Suspensionen wurden alle Pulver hinsichtlich ihrer Phasenreinheit und -zusammensetzung quantitativ sowie qualitativ untersucht. Ausschlaggebend für diese Untersuchungen waren die ermittelten Dichten und spezifischen Oberflächen der modifizierten Pulver (s. Tabelle 1). Die Dichten im modifizierten Zustand betragen 3,82 respektive 3,83 g/cm<sup>3</sup>.

Damit unterschreiten sie den Ausgangswert des eingesetzten Rohstoffes deutlich, obwohl die Dichten der modifizierten Pulver durch den Eintrag von Mahlkugelabrieb (5-YSZ, Dichte:  $6,1 \text{ g/cm}^3$ ) über dem Ausgangswert liegen sollten. Auch die spezifischen Oberflächen mit Werten über  $20 \text{ m}^2/\text{g}$  sind größer als der Erwartungswert für Aluminiumoxidpulver in dieser Größenordnung.

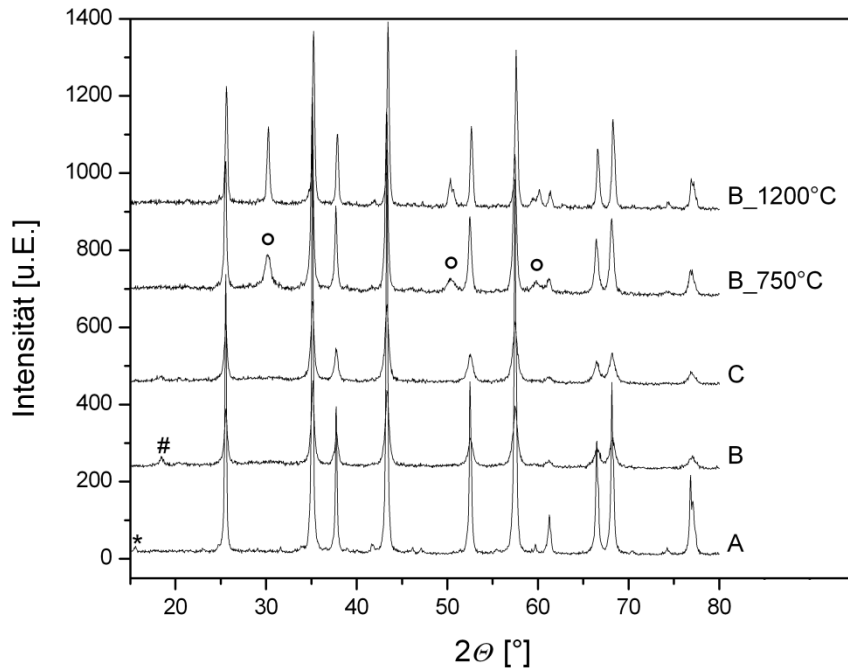


Abb. 7: Röntgenpulverdiffraktogramme des verwendeten Rohstoffs (A), der modifizierten Pulver (B, C) und der ausgelagerten Pulver (B\_750°C, B\_1200°C); \*  $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$ , #  $\text{Al}(\text{OH})_3$  (Nordstrandit), ° tetragonales  $\text{ZrO}_2$ .

Die Ursache ist Nordstrandit (s. Abb. 7), das bei der Mahlung entstanden ist und zu einem Massenanteil von 10 % im modifizierten Pulver vorliegt. Diese trikline Modifikation des Aluminiumhydroxids besitzt eine Dichte von  $2,44 \text{ g/cm}^3$  und ein sehr großes Verhältnis von Oberfläche zu Volumen. Einen Hinweis auf Mahlkugelabrieb enthalten die Diffraktogramme B und C (s. Abb. 7) hingegen nicht.

Ein Teil des Pulvers B wurde bei  $750 \text{ }^\circ\text{C}$  ausgelagert, um den Anteil an Nordstrandit durch Kalzination zu minimieren. Die röntgenographische Untersuchung der Probe B\_750°C zeigt keine Reflexe, die dem Nordstrandit zugeordnet werden können. Allerdings sind nach dieser Temperaturbehandlung eindeutige Reflexe des tetragonalen Zirkondioxids zu erkennen. Die gemessene Dichte von  $3,98 \text{ g/cm}^3$  spricht in diesem Zusammenhang jedoch für eine unvollständige Phasenumwandlung des Nordstrandits und eine unvollkommene Rekristallisation des Zirkondioxids. Nach einer weiteren Temperaturbehandlung bei  $1200 \text{ }^\circ\text{C}$  beträgt die Dichte schließlich  $4,10 \text{ g/cm}^3$  und der berechnete quantitative Phasenanteil von 5 Ma.% Zirkondioxid korreliert mit der Menge des Abriebs, der während der Partikelzerkleinerung eingetragen wurde.



## 4 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die komplexen Wechselwirkungen von kommerziell erhältlichen Additiven in wässrigen Aluminiumoxid-Suspensionen untersucht, die entweder als Dispergator, Binder oder Gleitmittel wirken. Entscheidend für die industrienaher Anwendung war in diesem Zusammenhang die Darstellung zwei modifizierter Pulver, um den Einfluss der Partikelgröße, der spezifischen Oberfläche, der Dotierung (MgO) und der verschiedenen Additive auf die Suspensionseigenschaften zu charakterisieren.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das Gleitmittel (PEG) den geringsten Einfluss auf die dynamische Mobilität, die Fließ- und Sedimentationseigenschaften aller untersuchten Suspensionen ausübt. Die Zugabe des Dispergators (NaPA) bewirkt unabhängig vom Aufbereitungszustand und dem damit zusammenhängendem Eintrag von Fremdphasen eine deutliche Verbesserung der Suspensionseigenschaften, die sich in der Steigerung des Betrages der dynamischen Mobilität, der Reduzierung der Viskosität und einer Erhöhung der Sedimentationsstabilität widerspiegelt. Die Vergrößerung der spezifischen Oberfläche wirkt sich direkt auf die benötigte Dispergatormenge aus. Die Dotierung verursacht im Allgemeinen eine Verschlechterung der Suspensionseigenschaften und verringert die Wirksamkeit des Dispergators. Die Wechselwirkungen des Binders (PVA) werden deutlich durch den Aufbereitungszustand des Rohstoffs beeinflusst. Anhand der Ergebnisse kann zwar keine Verschlechterung der makroskopischen Eigenschaften (Viskosität, Sedimentationsstabilität) nachgewiesen werden. In wie weit die Partikelgrößenverteilung, die spezifische Oberfläche oder die Anwesenheit der anorganischen Fremdphasen eine Rolle spielen, ist Gegenstand aktueller Untersuchungen.

## 5 Danksagung

Wir danken der AiF für die finanzielle Unterstützung des Projektes *PolyGran*.

## 6 Literatur

- [1] B. V. Derjaguin, L. D. Landau, „Theory of Stability of Highly Charged Lyophobic Sols and Adhesion of Highly Charged Particles in Solutions of Electrolytes“, *Acta Physicochimica URSS*, vol. 14, pp. 633–652, 1941.
- [2] E. J. W. Verwey, J. Th. G. Overbeek, *Theory of Stability of Lyophobic Colloids*, Amsterdam: Elsevier, 1948.

- [3] P. C. Hidber, T. J. Graule, L. J. Gauckler, „Influence of the Dispersant Structure on Properties of Electrostatically Stabilized Aqueous Alumina Suspensions”, *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 17, pp. 239–249, 1997.
- [4] D. H. Napper, *Polymeric Stabilization of Colloidal Dispersions*, London: Academic Press, 1983.
- [5] J. A. Lewis, „Colloidal processing of ceramics”, *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 83, pp. 2341–2359, 2000.
- [6] J. Cesarano III, I. A. Aksay, „Processing of Highly Concentrated Aqueous  $\alpha$ -Alumina Suspensions Stabilized with Polyelectrolytes”, *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 71, pp. 1062–1067, 1988.
- [7] J. Cesarano III, I. A. Aksay, A. Bleier, „Stability of aqueous  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> suspensions with poly(methacrylic acid) polyelectrolyte”, *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 71, pp. 250–255, 1988.
- [8] B. J. Briscoe, A. U. Khan, P. F. Luckham, „Optimising the dispersion on an alumina suspension using commercial polyvalent electrolyte dispersant”, *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 18, pp. 2141–2147, 1998.
- [9] J. Davies, J. G. P. Binner, „The role of ammonium polyacrylate in dispersing concentrated alumina suspensions”, *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 20, pp. 1539–1553, 2000.
- [10] F. Aldinger, H. J. Kalz, „Die Bedeutung der Chemie für die Entwicklung von Hochleistungskeramiken“, *Angewandte Chemie*, vol. 99, pp. 381–391, 1987.
- [11] R. W. O’Brien, „Electroacoustic Effects in a Dilute Suspension of Spherical Particles”, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 190, pp. 71–86, 1988.
- [12] R. W. O’Brien, D. W. Cannon, W. N. Rowlands, „Electroacoustic Determination of Particle Size and Zeta Potential”, *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 173, pp. 406–418, 1995.
- [13] R. Greenwood, „Review of the measurement of zeta potentials in concentrated aqueous suspensions using electroacoustics”, *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 106, pp. 55–81, 2003.
- [14] T. Sobisch, D. Lerche, „Application of a new separation analyzer for the characterisation of dispersions stabilized with clay derivatives”, *Colloid and Polymer Science*, vol. 278, pp. 369–374, 2000.

- [15] D. Frömer, D. Lerche, „An experimental approach to the study of the sedimentation of dispersed particles in a centrifugal field”, *Archive of Applied Mechanics*, vol. 72, pp. 85-95, 2002.
- [16] D. Lerche, „Dispersion stability and particle characterization by sedimentation kinetics in a centrifugal field”, *Journal of Dispersion Science and Technology*, vol. 23, pp. 699-709, 2002.
- [17] D. Lerche, T. Sobisch, „Consolidation of concentrated dispersions of nano- and microparticles determined by analytical centrifugation”, *Powder Technology*, vol. 174, pp. 46–49, 2007.
- [18] G. Tari, J. M. F. Ferreira, O. Lyckfeldt, „Influence of Magnesia on Colloidal Processing of Alumina”, *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 17, pp. 1341–1350, 1997.
- [19] J. Sun, L. Bergström, L. Gao, „Effect of Magnesium Ions on the Adsorption of Poly(acrylic acid) onto Alumina”, *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 84, pp. 2710–2712, 2001.