

## Neuartige Partikel biologischer Herkunft mit adaptierbaren optischen und mechanischen Eigenschaften zur optischen Diagnose von Mehrphasenströmungen

### Novel particles of biological origin with adaptable optical and mechanical properties for the optical diagnosis of multi-phase-flows

Irene Mansberger<sup>1</sup>, Martin Nagel<sup>1</sup>, Sooyeon Park<sup>1,3</sup>, Suja Lee<sup>1,3</sup>, Yoonjin Kim<sup>1,3</sup>,  
Julie Seok<sup>1,3</sup>, Cornelia Rauh<sup>1,2,3</sup>, Antonio Delgado<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Lehrstuhl für Strömungsmechanik, Friedrich-Alexander Universität (FAU) Erlangen-Nürnberg, Cauerstraße 4, D-91058 Erlangen, Deutschland

<sup>2</sup>Fachgebiet Lebensmittelbiotechnologie und –prozesstechnik, TU Berlin, Königin-Luise-Strasse 22, D-14195 Berlin, Deutschland

<sup>3</sup>Institute of Fluid Mechanics, FAU Campus Busan, 1276 Jisa-Dong, Gangseo-Gu, Busan 618-230 Republic of Korea

Email: irene.mansberger@lstm.uni-erlangen.de

Strömungsdiagnose, neuartige Partikel, adaptierbare optische/mechanische Eigenschaften  
Flow diagnosis, novel particles, adaptable optical/mechanical properties

#### Zusammenfassung

Die optische Diagnose von partikelbeladenen Strömungen stellt große Herausforderungen. Dies gilt insbesondere bei hohen Konzentrationen und Abmessungen der Partikel. Für gewöhnlich erschweren in beiden Fällen die Partikel den notwendigen optischen Zugang oder machen diesen gar unmöglich. Als Lösungsansatz schlägt die Literatur den Einsatz von Partikeln vor, deren Brechungsindex für eine vorgegebene Versuchstemperatur mit dem der fluiden Phase übereinstimmt. Allerdings gibt es nur wenige materielle Systeme, welche diese Anforderung erfüllen. Dabei bleibt aber weitestgehend außer Betrachtung, dass auch die mechanischen Eigenschaften der Partikel eine entscheidende Rolle hinsichtlich der Strömungsverhältnisse spielen. So hängt das Strömungsregime bei hohen Konzentrationen stark von den Massenkräften sowie Stoßwechselwirkungen und daher von ebendiesen Eigenschaften ab. Bei Stößen untereinander oder mit Berandungen beeinflussen Elastizität und Plastizität der Partikel – zusätzlich zu deren Dichte und Geometrie - den Impuls- und Energietransport. Die vorliegende Arbeit geht sogar soweit zu hypothesieren, dass in einem solchen Fall die klassische Einteilung des Strömungsregimes in laminar, transitional und turbulent fragwürdig erscheint. Vielmehr dürften neuartige Strömungsregimes auf charakteristischen Impuls- und Energieniveaus auftreten. Um diese Hypothese zu validieren, bedarf es der Verfügbarkeit von neuartigen Partikeln, welche die volle Leistungsfähigkeit der modernen Strömungsdiagnose ausschöpfen und zugleich Stoßprozesse möglichst realistisch wieder spiegeln. Die hier vorgestellten Untersuchungen belegen die diesbezüglich besondere Eignung von neuartigen Partikeln biologischer Herkunft. Insbesondere  $\kappa$ -Carrageen sowie Mischungen mit Tarakernmehl und Agar Agar zeigen eine exzellente Eignung.

## 1. Einleitung

In zahlreichen Bereichen der Natur und Technik liegen Transportprozesse vor, bei welchen die beteiligte Materie aus einer fließfähigen Dispersion von Partikeln in einer fluiden Matrix besteht. Transportbegleitend ergeben sich zuweilen Teilprozesse mit Akkumulation (Lagerung) und physico-chemischer sowie biologischer Transformation der Dispersion.

Die Fließfähigkeit ermöglicht einen strömungsmechanischen Transport in Regimes, die bisher die Literatur - in Anlehnung an die klassische Einteilung von Strömungen reiner, einphasiger Fluide - ohne weitere Differenzierung als laminare, turbulente oder transitionale Partikelströmungen bezeichnet. Der vorliegende Beitrag thematisiert die Fragestellung nach der strömungsmechanisch fundierten Kategorisierung von hochbeladenen Dispersionen in Regimes.

Dies führt zur Fragestellung, ob und in welcher Form sich in den Dispersionen bei hohen Partikelkonzentrationen neuartige Massen-, Impuls- und Energietransportniveaus einstellen. Im Allgemeinen erweist sich die materielle Konstitution und Topologie der Partikel und daher auch ihr physico-chemisches Verhalten als äußerst vielfältig. Sie kommen im festen, flüssigen und gasförmigen Aggregatzustand vor, zeigen ein breitgefächertes Topologiespektrum und umspannen einen großen Bereich physico-chemischer Phänomene, Mechanismen und Strukturen. Das Verhalten der fluiden Matrix variiert in technischen Anwendungen zwischen demjenigen eines inerten, hochverdünnten Gases bis hin zu kondensierter, (bio-)reaktiver Materie an der Grenze der Fließfähigkeit.

Angesichts dieser Vielfalt fokussiert sich die vorliegende Initiative auf Dispersionen fester Partikel mit hohen Volumenkonzentrationen

$$\phi_v = \frac{\text{Volumen der dispergierten Phase}}{\text{Gesamtvolumen der Dispersion}}$$

Dabei bewegen sich die zu studierenden charakteristischen Partikelabmessungen in Längenskalenbereichen deutlich größer als die typischen Abmessungen von Kolloiden (1 – 1000 nm gemäß Definition der International Union for Pure and Applied Chemistry (IUPAC)) bis hin in den Bereich von Zentimetern. Diesem Bereich der Partikelabmessungen gehören überaus wichtige natürliche und technische Strömungsprozesse an. Mit unterschiedlicher, typischer Partikelbeladung stellen die Transport-, Lagerungs- und Transformationsvorgänge in den folgenden Prozessen besonders prominente technische Beispiele dar:

- Mischer, Sortierer, Trennapparate, Strömungsmaschinen und Partikelmühlen,
- Wirbelschichten zur Trocknung granularer Medien,
- Feuerungsanlagen von Kohle und Klärschlämmen,
- Apparate zum Rühren von Fruchtzubereitungen und gerührte Fermenter,
- katalytische Reaktoren und galvanische Beschichtungsanlagen,
- Deponien, Ölsand- und Wertmetallgewinnungsanlagen sowie
- Multi-Wire-Cutting-Maschinen zur Herstellung von Silizium-Wafern und Wasserstrahl-schneidgeräten mit erosiven Partikeln.

Aufgrund derer hohen Komplexität liegen in diesen Feldern zuweilen feldumfassende Wissenslücken vor. Dem gezielten Transport von Dispersionen dienen zunächst diffusive oder konvektive Mechanismen. Hinzu kommen noch Druck- und Massenkräfte. Deren Wirkung auf die fluide Matrix und die Partikel der Dispersion fällt in der Regel unterschiedlich aus. Dadurch weicht die Kinematik der Partikel in unterschiedlichem Ausmaß von derjenigen der Matrix ab. Dies führt zu mechanischen Kopplungen beim fluidmechanischen Transport von Masse, Impuls und Energie mit starker Auswirkung der Partikelkonzentration. So hängen sie von zahlreichen Einflussgrößen bzw. von aus diesen ableitbaren dimensionslosen Ähnlichkeitsgruppen ab, wie etwa die Reynolds-, Stokes-, Euler-, Archimedes-, Froude-, Drall-, Wi-

derstands-, Auftriebs- und Drehmomentzahl. Um diese Abhängigkeiten systematisch zu untersuchen, fehlt es bisher vielfach an geeigneten Strömungsdiagnosesystemen.

## 2. Kurzer Überblick über die Strömungsdiagnosemethoden für mehrphasige Systeme

Für verdünnte Dispersionen (Volumenkonzentration  $\phi_V = \frac{V_P}{V_{Dis}} \leq 10^{-4}$ , siehe auch Elgobashi (2006)) gibt es im Experiment in den letzten Jahrzehnten rasche Entwicklungen, die zu sehr leistungsfähigen Partikel- und Strömungsdiagnoseverfahren geführt haben. Hierunter spielen laseroptische Methoden in Ausgestaltung als lokales oder (Ganzfeld) bildgebendes Verfahren eine wichtige Rolle. Hierzu gehören etwa die Particle-Doppler Anemometry, Particle-Tracking-Velocimetry und Particle-Image-Velocimetry, siehe z.B. Hassan & Dominguez-Ontiveros (2012).

Demgegenüber gibt es in der Literatur für hochkonzentrierte Dispersionen fester Partikel nur vereinzelte Strömungsmesssysteme, die überdies großen Einschränkungen unterliegen. Diese Aussage betrifft sowohl invasive als auch nichtinvasive Diagnosesysteme. Es liegt im Wesen der invasiven Messmethoden, dass die Sonde mit der Dispersion wechselwirkt und somit potentiell die Informationsgewinnung verfälscht. Dessen ungeachtet existieren in technischen Applikationen keine messtechnischen Alternativen. Beispiele hierfür stellen die lokale Messung der Temperatur mit einem Thermoelement oder der Strömungsgeschwindigkeit mit einem Hitzdrahtanemometer dar.

Zu den nichtinvasiven Verfahren gehören solche Methoden, welche radioaktive Strahlung, Röntgenstrahlung oder elektromagnetische Wellen im sichtbaren Bereich einsetzen. Beim Radioactive Particle Tracking (RPT, auch Computer-Automated (CA-)RPT) dienen auftriebsneutrale radioaktive Partikel der Bestimmung von Partikeltrajektorien, aus welchen sich die Momentangeschwindigkeit und zeitlich gemittelte Strömungsmuster sowie die turbulente Schubspannung und die kinetische Turbulenzenergie ermitteln lassen. Zusätzlich zu den Sicherheitsfragen erweist sich bei diesem Verfahren die Notwendigkeit zur aufwändigen Kalibrierung der Detektoren, wodurch sie sich weitestgehend für zylindrische Strömungsgeometrien eignet. Auch die Positron Emission Particle Tracking (PEPT)-Methode eignet sich, um die Bewegung einzelner Partikel in einer hochkonzentrierten fluid-fest Dispersion zu analysieren (Yang et al. (1992)). Durch radioaktive Markierung verhält sich das Partikel wie ein Beta-Strahler, welcher mit hoher Frequenz jeweils zwei Gamma-Quanten in entgegengesetzter Richtung abgibt. Diese Messtechnik ist in der Medizintechnik weit verbreitet, für strömungsmechanische Fragestellungen gibt es in Deutschland kein PEPT-Messgerät. Energiereiche Röntgenstrahlung dient beispielsweise der Aufnahme der Konzentration der Feststoffphase und deren Geschwindigkeit. Mit Hilfe der Computer Tomographie ist eine räumliche Auflösung  $< 1\mu\text{m}$  und eine zeitliche Auflösung im Bereich von 1 s für das komplette 3-D-Volumen möglich, jedoch nicht gleichzeitig. Als gut etablierte Lösung zur Vermeidung optischer Probleme mit lichtoptischen Strömungsdiagnoseverfahren gilt die Brechungsindexanpassung, vgl. etwa Genç et al. (2009). Bezüglich Dispersionen gelingt es durch Anpassung des Brechungsindex von Fluid und Partikeln, die aus der einphasigen Fluidströmung bekannten optischen Messsysteme auch im Bereich hochkonzentrierter Dispersionen zu verwenden. Die Literatur behandelt Systeme mit zusätzlich angepasster Dichte. Die Anforderungen durch Brechungsindex- und Dichteanpassung setzen allerdings der Vielfalt der zu untersuchenden Dispersionen enge Grenzen. So bleiben nicht nur opake Flüssigkeiten ausgeschlossen. Es kommt zugleich zu starken Einschränkungen der Materialeigenschaften der fluiden Phase (etwa bezüglich des rheologischen Verhaltens) und der festdispersen Phase (etwa Elastizität und Plastizität). Dabei lässt sich erwarten, dass die in diesem Beitrag hypothetisch angenommene Existenz von neuen Flowregimes nicht nur von der Partikelgröße und -konzentration, sondern auch von den materiellen Eigenschaften des dispergierten Festkörpers abhängt.

Um diese methodische Lücke in der Literatur zu schließen, stellt der vorliegende Beitrag systematische Untersuchungen zu Partikeln vor, die sich nicht nur optisch, sondern auch mechanisch an das zu simulierende System anpassen. Als Referenzprozess dient die Prozessierung von Früchten in der Lebensmittelverfahrenstechnik. Für diesen Prozess belegen die erarbeiteten Ergebnisse neuartiger Partikel biologischer Herkunft, dass sie sich in einem weiten Bereich der mechanischen und optischen Eigenschaften einstellen lassen. Auf diese Ergebnisse fokussiert der vorliegende Beitrag.

### 3. Neuartige biologische Partikel

Mit direktem Bezug zur Prozessierung von Früchten kommen transparente, biologische Partikel - in erste Linie Gelbildner - in Frage. Die Wahl fiel auf die Verdickungsmittel  $\kappa$ -Carrageen (E 407), Tarakernmehl (E 417) und Agar Agar (E 406). Diese Lebensmittelzusatzstoffe weisen je nach Zusammensetzung unterschiedliche physikalische Eigenschaften auf. Das langkettige anionische Hydrokollodid  $\kappa$ -Carrageen lässt sich genau so wie Agar Agar aus Rotalgen (Rhodophyceae) herstellen. Die Samen des Tarakernstrauches (*Caesalpinaspinosa*) liefern den Rohstoff für Tarakernmehl.

Je nach Anzahl und Stellung der Sulfatestergruppen und der 3,6-Anhydrogalaktose Einheiten unterscheiden sich die Eigenschaften der  $\kappa$ -,  $\lambda$ - und  $\iota$ -Carrageene. Das kommerziell wichtige  $\kappa$ -Carrageen (siehe Abbildung 1) besteht aus alternierenden 1,3-verknüpften  $\alpha$ -D-Galactose-4-sulfat und 1,4-verknüpften 3,6-Anhydro- $\beta$ -D-Galactose Einheiten. Eine regelmäßige Folge dieser Disaccharid-Sequenzen führt zur Ausbildung von Helix- und Doppelhelixstrukturen. Die Wasserlöslichkeit der Carrageene steigt mit dem Gehalt an Sulfatresten und verringert sich mit dem Gehalt an Anhydrozuckern. Die Viskosität der Lösung hängt vom vorliegenden Carrageen, vom Molekulargewicht, von der Temperatur, vom Ionenmilieu und von der Konzentration ab. Die Gelbildung hängt offensichtlich stark vom Radius der hydratisierten Gegenionen ab. Er liegt bei Ionen der ersten Hauptgruppe im Bereich von 0,23 nm, während hydratisierte Lithium- (0,34 nm) und Natriumionen (0,28 nm) deutlich größere Werte annehmen. In Pulverform erweist sich  $\kappa$ -Carrageen als transparent bis leicht gelblich und geruchlos. In Gegenwart von Kaliumchlorid bildet es ein festes und sprödes Gel. Dabei liegen zunächst einzelne Knäuel vor, welche sich durch intermolekulare Zusammenlagerungen zu Doppelhelices zusammenfügen und sich letztendlich nach dem Erhitzen und Abkühlen der Suspension zu einem Gel zusammenschließen.

Beim Tarakernmehl handelt es sich um ein Galaktomannan, welches aus Galaktose und Mannose besteht. Galaktomannan tritt als lineare Hauptkette aus  $\beta$ -(1-4)-verknüpften D-Mannoseeinheiten mit einer  $\alpha$ -(1-6)-Bindung der Galactoseeinheiten auf. Mit Agar Agar und Carrageen ergeben sich synergistische Effekte. Dieser Synergismus verstärkt die Gelstruktur und erhöht den Schmelz- und Gelpunkt.

Agar Agar zeigt einen heterogenen Aufbau aus einem nicht ganz abgegrenzt definierten Material. Als Hauptbausteine treten  $\beta$ -D-Galactopyranose und 3,6-Anhydro- $\alpha$ -L-galactopyranose auf. Eigenschaften und Stabilität des Gels hängen von der Konzentration an Agar Agar und vom Molekulargewicht ab. Eine 1,5%ige Lösung geliert zum Beispiel im Bereich von 32 – 39 °C und schmilzt erst im Bereich von 60–97 °C wieder auf.

Eine entscheidende Eigenschaft für die Eignung dieser Geliermedien in der Strömungsmechanik zur möglichst realitätsnahen experimentellen Simulation von fluidischen Transportprozessen in Mehrphasenströmungen besteht darin, dass sich die mechanischen Eigenschaften durch einfache Zugabe von Salzen einstellen lassen. Die von Kaliumionen führen zu festen, starren Gelen, während Kalziumionen zu elastischen, flexiblen Gelen führen.

#### 4. Material und Methoden

Für die Versuche fand raffiniertes  $\kappa$ -Carrageen mit einer Mindestgelstärke von 1200 cps und der Lebensmittelzusatzstoff Tarakernmehl von der Firma BaccaraRosa Verwendung. Das Agar Agar lieferte die Firma Merck.

Der Gelherstellung dienten Gemengeverteilungen aus

- $\kappa$ -Carrageen mit KCl,
- $\kappa$ -Carrageen mit Agar Agar,
- $\kappa$ -Carrageen mit KCl und Agar Agar und
- $\kappa$ -Carrageen mit Agar Agar, Tarakernmehl und KCl.

Tabelle 1 gibt Auskunft über die bei der Herstellung der transparenten Gele verwendeten Stoffgemenge.

Tabelle 1: Zusammensetzung der transparenten Gele.

Gel-Bezeichnung	K-Carrageen [%]	KCl [%]	Tarakernmehl [%]	Agar Agar [%]
A	0,5	-	-	0,5
B	0,7	-	-	0,5
C	0,8	-	-	0,9
D	1,5	0,3	-	-
E	0,7	0,2	-	0,5
F	1	0,3	-	0,4
G	1,3	0,3	-	-
H	1	0,3	0,3	-
I	1,3	0,2	0,2	-

Die einzelnen Gemengeverteilungen weisen Unterschiede in der Elastizität, dem Brechungsindex, dem Synäreseverhalten, der Konsistenz, dem Bruchverhalten und der Adhäsionskraft auf.

K-Carrageen bildete aufgrund seiner Transparenz und Festigkeit bei allen Stoffmischungen den Hauptbestandteil. Die Beigabe von Tarakernmehl bezweckte eine Erhöhung der elastischen Eigenschaften, führte jedoch zu einer leichten Trübung der Gele. Die Zugabe von Kaliumchlorid führte bei  $\kappa$ -Carrageen zu einer Steigerung der Festigkeit.

Die Gel-Herstellung geschah durch Einwaage und vollständige Auflösung in vollentsalztem Wasser durch Erhitzung in einem verschlossenen Behälter. Die heißen Gele wurden auf ca. 55 °C abgekühlt und in Formen gegossen. Die Messungen erfolgten nach der vollständigen Abkühlung und dem Festwerden der Gele.

Der Bestimmung der Brechungsindizes diente das automatische, digitale Refraktometer DR 5000 von der Firma A. Krüss Optronic GmbH verwendet. Die Messtemperatur betrug 20 °C. Der Brechungsindex ergab sich durch Mittelung von Mehrfachbestimmungen.

Die Bestimmung der Härte, Festigkeit, Elastizität, Klebrigkeit, Relaxation geschah mit einem Texture Analyser XT2 von Stable Micro Systems. Als Prüfwerkzeuge fungierten zwei Stempel folgender Daten:

- Stempel A:  $\varnothing$  10 mm, Edelstahl, Stempelfläche: 0,79 cm<sup>2</sup>
- Stempel B:  $\varnothing$  35 mm, Kunststoff, Stempelfläche: 9,62 cm<sup>2</sup>

Bei der Aufnahme der Bruchfestigkeit kamen beide Stempel zum Einsatz. Für den Relaxationstest und die Messung der Adhäsionskräfte fand Stempel B Verwendung. Bei allen Versuchen blieb das Gel in der Petrischale ( $\varnothing$  8,7 cm). Die Gele wiesen eine Fläche von 59,4 cm<sup>2</sup>

auf. Tabelle 2 gibt Auskunft über die beim Härte-Test am Texture-Analyser vorgenommenen Einstellungen.

Tabelle 2: Parametereinstellung für den Härte-Test.

Parametereinstellungen	Bruchfestigkeit/Härtebestimmung
Vor-Geschwindigkeit	2 [mm/s]
Test-Rückgeschwindigkeit	1 [mm/s]
Rück-Geschwindigkeit	2 [mm/s]
Weg	5 [mm]
Kraft	0,29 [N]

Der Klebrigkeitstest beruht darauf, die Adhäsionskraft ( $F_A$ ) des Gels auf dem Stempel B nach einer Haltezeit von 5 s mittels einer Kraft-Zeit(Weg)-Messung zu bestimmen. Tabelle 3 listet die voreingestellten Parameter auf.

Tabelle 3: Parametereinstellung für den Klebrigkeitstest.

Parametereinstellung	Klebrigkeitstest
Vor-Geschwindigkeit	2 [mm/s]
Test-Geschwindigkeit	1 [mm/s]
Rück-Geschwindigkeit	2 [mm/s]
Weg	2 [mm]
Kraft	1,25 [N]
Haltezeit	5 [s]

Die Relaxationszeit liefert ein Maß für die Elastizität. Deren Bestimmung erfordert zunächst die Kompression der Gele bis zu einer vorgegebenen Kraft, bei welcher der Belastungsstempel (B) für 5 s verharrt. Bei der anschließenden Entspannungsphase tritt Hysterese in den Kraft-Weg-Kennlinien auf, aus welcher sich auf die Relaxationseigenschaften der Gele und somit auf deren Elastizität schließen lässt. Tabelle 4 dokumentiert die beim Relaxationstest eingestellten Parameter.

Tabelle 4: Parametereinstellung für den Relaxationstest.

Parametereinstellung	Relaxationstest
Vor-Geschwindigkeit	2 [mm/s]
Test-Geschwindigkeit	1 [mm/s]
Rück-Geschwindigkeit	2 [mm/s]
Kraft	1,25 [N]
Zeit	5 [s]
Auslösewert	0,29 [N]

## 5. Vorstellung und Diskussion der Ergebnisse

Die erhaltenen Resultate belegen, dass die neuartigen Gele ein breites Spektrum an optischen und mechanischen Eigenschaften abdecken. Sie eignen sich besonders zur experimentellen Simulation von Strömungsvorgängen bei der Prozessierung von Obststücken (Referenzprozess) in vollentsalztem (VE) Wasser.

Für den Einsatz optischer Diagnosemethoden spielt zunächst die Anpassung eines Gels an den Brechungsindex des fluiden Mediums und damit der Brechungsindex der Gele eine wichtige Rolle. Abbildung 1 veranschaulicht die Brechungsindizes der jeweiligen Gele und von VE Wasser.

Die Gele weisen aufgrund ihrer Zusammensetzung leichte Unterschiede auf. Die Brechungsindizes zwischen den Proben D und I ähneln sich und liegen im Vergleich zu VE-Wasser nur minimal höher. Die Gele D und G, welche nur aus  $\kappa$ -Carrageen und KCl bestehen, weisen neben den guten Brechungsindizes auch eine sehr gute Transparenz auf. Eine weitere Variation der Konzentration beider Substanzen führt zu einer noch besseren Brechungsindexan-

passung. Dies bildet aber nicht den Schwerpunkt dieser Diskussion. Die Ergebnisse des Klebrigkeitstest bleiben hier gar völlig außer Betracht.

Vielmehr fokussiert sich die nachfolgende Diskussion zweckmäßig auf die strukturmechanischen Eigenschaften der Partikel. Je nach Zusammensetzung der Gele erweisen sich die Elastizität und die Bruchkraft ( $F_{max}$ ) als sehr unterschiedlich. Solche Gele mit geringen Konzentrationen an Verdickungsmitteln (Gele A, B) brechen leichter

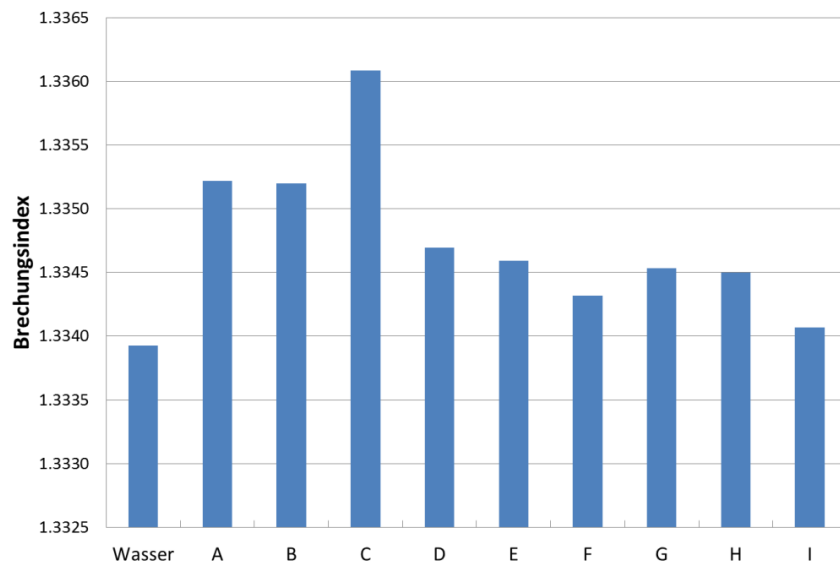


Abbildung 1: Brechungsindizes von VE Wasser und allen hergestellten Gelen

aufgrund des geringen Gehaltes an vernetzenden Substanzen. Demgegenüber besitzen die Gele D und G eine deutlich höhere Bruchfestigkeit. Durch die Zugabe von  $K^+$ -Ionen zu  $\kappa$ -Carrageen entsteht ein sehr festes Gel. Die Festigkeit der Gele steigt mit der beigemengten Menge von KCl.

Abbildung 2 illustriert die Kraft-Weg Kennlinien der Gele. Der Stempel verfährt mit konstanter Geschwindigkeit und übt somit eine Kraft auf die Oberfläche des Gels aus. Beim Bruch des Gels sinkt diese Kraft schlagartig ab. Die Bruchkraft entspricht somit dem Maximum der Kurve. Dabei variiert auch der vom Stempel zurückgelegte Weg bis zum Bruch. Dies verdeutlicht, dass die Gele verschiedene Elastizitäten und somit verschiedene Normalverformungen durch Kompression aufweisen. Wie Abbildung 2 demonstriert verfügt das Gel D über eine sehr hohe Bruchfestigkeit.

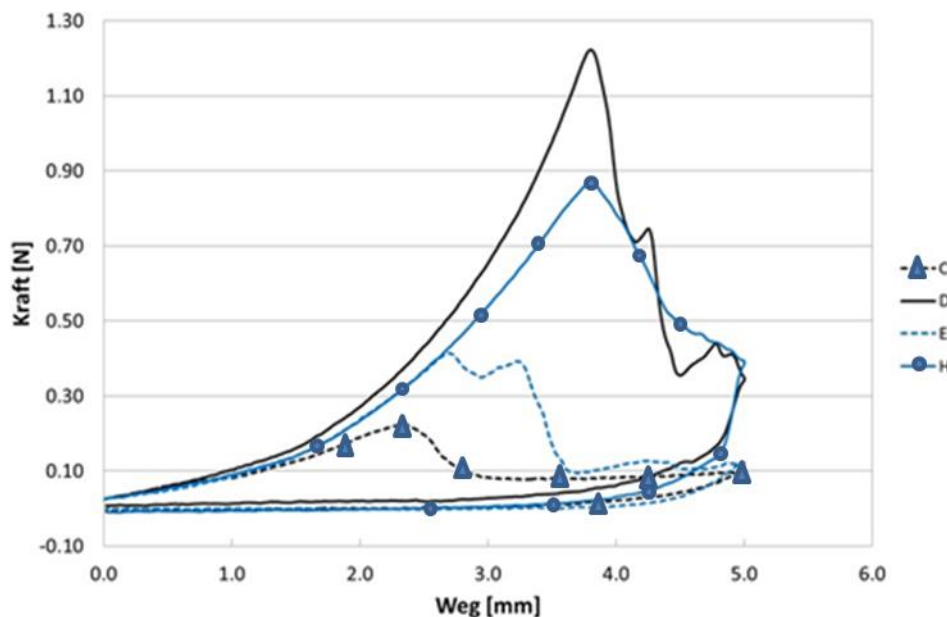


Abbildung 2: Kraft-Weg Kennlinien mit dem Prüfwerkzeug A.



Für die hier interessierenden Stoßprozesse liefert Abbildung 2 die sehr wichtigen Erkenntnisse, dass sich die mechanischen Eigenschaften definiert variieren lassen. Dies behebt die großen Einschränkungen bisheriger brechungsindexangepasster Systeme bezüglich der Elastizität bzw. Plastizität der Partikel. Bisherige Systeme nutzen in der Regel Glas mit hoher Sprödigkeit als Partikel. Das Gel A (in Abbildung 2 nicht dargestellt) zeigte demgegenüber so ausgeprägte Plastizität, dass das Prüfwerkzeug keinen Bruch erkannte. Die Gele D, H, F, G und I besitzen indessen eine hohe Stabilität, worauf die benötigte maximale Kraft mit dem Stempel A hinweist. Je weiter der Weg bzw. der Stempel in ein Gel ohne Bruch eindringen, desto elastischer ist es. Tabelle 5 fasst die gemessenen Daten für die Stempel A und B zusammen.

Tabelle 5: Gelhärten geordnet nach absteigendem Wert von  $F_{\max}$ .

Stempel A			Stempel B		
Gel	$F_{\max}$ [N]	Weg [mm]	Gel	$F_{\max}$ [N]	Weg [mm]
D	1,223	3,80	D	39,058	5,52
H	0,866	3,82	H	27,055	5,85
F	0,835	3,83	F	23,807	5,03
G	0,754	3,89	I	21,654	5,46
I	0,723	3,38	G	20,342	5,18
E	0,415	2,69	E	12.210	7.83
C	0,222	2,36	C	2.850	3.07
B	0,068	1,65	B	0.662	3.24
A	-	-	A	0.113	1.27

Mit den neuartigen Gelpartikeln besteht erstmalig die Möglichkeit, systematische Untersuchungen zu hochkonzentrierten Partikeln unterschiedlicher Größen durchzuführen, welche die Leistungsfähigkeit von optischen Diagnosemethoden wie PIV, PTV, PDA und LDA vollständig ausschöpfen. Dabei lassen sich die strukturmechanischen Eigenschaften wie die Bruchkraft um einen Faktor von mehr als zwei Zehnerpotenzen variieren. Überdies besteht die Möglichkeit, die Partikelgröße und -topologie in weitem Rahmen zu gestalten, da die Gelpartikel aus der geschmolzenen Phase abgegossen werden.

## 6. Schlussbemerkungen

Die an sich dringend notwendige intensive Erforschung von Mehrphasensystemen stößt an solchen Stellen auf Grenzen, an welchen geeignete Diagnosemethoden fehlen. Dies gilt insbesondere bei partikelbeladenen Strömungen großer Konzentration und Partikelgröße, welche den Einsatz leistungsfähiger, nichtinvasiver, optischer Diagnoseverfahren erschweren oder gar unmöglich machen. Der in der Literatur vorgeschlagene Weg brechungsindexangepasster Partikel führt zumeist zu der stofflichen Paarung Glaspartikel-Öl. Hiermit lassen sich nur sehr bedingt die erhaltenen Ergebnisse verallgemeinern. Insbesondere verschafft diese Paarung nur sehr unzulänglich Zugang zu der zentralen Fragestellung, inwieweit bei hochbeladenen Partikelströmungen die Partikel-Partikel- und Partikel-Wand-Wechselwirkungen die Umverteilung von Impuls und Energie dominieren. Dies entspricht auch der tragenden Hypothese dieses Beitrages. Sollte sie zutreffen, ergäbe sich die Notwendigkeit eines Paradigmenwechsels. In diesem Fall entstünden neue Niveaus der Impuls- und Energieübertragung, welche gegen die Charakteristika der klassischen Regimes der laminaren, transitionalen und turbulenten Strömung verstießen. Die in diesem Beitrag vorgestellten neuartigen Partikel ebnen den Weg zu der Validierung der aufgestellten Arbeitshypothese.



## Literatur

- Elgobashi, S. 2006: "An Updated Classification Map of Particle-Laden Turbulent Flows", *Fluid Mechanics and Its Applications*, 86, pp.3-10.
- Genc, B. Z., Ertunc, Ö. , Jovanovic, J. , Delgado, A., 2009, "LDA Measurements of Reynolds stresses in a swirling turbulent pipe flow", *Springer Proceedings in Physics*, 132, pp. 617-620
- Hassan, Y. A., Dominguez-Ontiveros, E. E., 2008. "Flow visualization in a pebble bed reactor experiment using PIV and refractive index matching techniques". *Nuclear Engineering and Design*, 238(11), pp. 3080-3085.
- Yang, Y. B., Devanathan, N., Dudukovic, M. P., 1992, "Liquid Backmixing in Bubble Columns," *Chem. Eng. Sci.*, 47, (9,11), pp. 2859 – 2864.