

DISS. ETH NO. 20913

# **Experimental Analysis of Aggregate Breakup in Flows Observed by Three Dimensional Particle Tracking Velocimetry**

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

DEBASHISH SAHA

M. Sc. Chem. Eng., Technische Universität Dortmund

Date of birth

February 18, 1982

citizen of

Bangladesh

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. W. Kinzelbach, examiner

Prof. Dr. M. Morbidelli, co-examiner

Dr. B. Lüthi, co-examiner

Dr. M. Holzner, co-examiner

2013

# Abstract

Breakup of fractal aggregates in laminar and turbulent flow has been investigated experimentally by three dimensional particle tracking velocimetry (3D-PTV). The motivation of the thesis is to understand the breakup mechanism in Lagrangian frame so that the entire history of the flow dynamics around the aggregate can be unveiled. This will render access to the intriguing evolution of the "character" of the key parameters responsible for breakup. Our current understanding on aggregate breakup within the scope of experiment and numerics is limited to measuring the average size distribution and proposing the so called breakage kernels accordingly. This is where we bring forward the essential question which is: What is the Lagrangian contribution of the flow field to which an aggregate is exposed to for a certain time before it breaks apart?

Our intention to investigate breakup aligns with this question throughout this work which involves some stand alone features worth mentioning. We take the advantage of the capability of 3D-PTV to simultaneously measure the full tensor of the velocity gradient,  $\frac{\partial u_i}{\partial x_j}$ , around the aggregate and track it in a Lagrangian way while looking at the breakage phenomena as it happens. That means we come to know how an aggregate along its life time is experiencing the instantaneous velocity gradients which in turn will complement our present knowledge on breakup mechanism. Finite size non inertial aggregates are injected into the flow individually which ensures that the carrier fluid property is not subject to change due to high concentrations of the particle phase and technically it is easier to track a single breakage event once at a time. First we analyze the breakup in laminar flow condition, i.e., axisymmetric elongational flow generated in an orifice where the rate of strain increases monotonically towards the orifice. Because of the steady nature of the flow, we measure the flow field separately and analyze the aggregate breakup based on the averaged flow field using an Eulerian grid with a spacing of  $\Delta = 0.5mm$ . The domain symmetry provides a useful means to determine the accuracy of the measured velocity field. The accuracy is sufficient to take spatial derivatives and thus to obtain the complete field of velocity gradients,  $\frac{\partial u_i}{\partial x_j}$ . Before the orifice entrance, the intermediate eigen vector  $\lambda_2$  together with the equally strong  $\lambda_3$  of the rate of strain tensor  $s_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$  play an effective role by compressing the aggregates with the stretching exerted by  $\lambda_1$ , whereas the most extensional eigen vector  $\lambda_1$  and the ratio of the intermediate to the most compressive eigen value, i.e.,  $|\frac{\lambda_2}{\lambda_3}| \rightarrow 0$  past the orifice acts as a demarcation for the transition from elongation to simple shear. We found most of the breakage taking place within  $\sim 2-3$  mm on either side of the contraction where  $s^2$  reaches its maximum value.

In the second part of the experiment, we analyze breakup in fully turbulent flow. To study the structure of the homogeneous quasi isotropic turbulence at a Taylor based Reynolds number  $Re_\lambda = 90$  around the aggregate we compute the coarse grained velocity derivative,  $\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j}$  which exhibits roughly the same characteristic properties like their small scale counterpart. Probably one of the most important properties we have observed is  $\langle \Lambda_2 \rangle > 0$  which indicates that  $\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j}$  also feels self amplification at our scale of

measurement, which is just at the upper end of the viscous scale. More generally, the effect of the small scale dynamics on the aggregates can be reflected appropriately through the measured coarse grained velocity derivative. We measure the coarse grained strain  $\tilde{s}^2$  and enstrophy  $\tilde{\omega}^2$  along the Lagrangian trajectories of the aggregate which are on an average  $\sim 10\tau_\eta$  long where  $\tau_\eta$  is the Kolmogorov time scale of the flow. That means we are capable of looking into the history of the instantaneous flow dynamics in the proximity of the aggregates as long as  $10\tau_\eta$  which is supposed to be sufficient for understanding the Lagrangian influence on breakup because the characteristic time scale of vorticity and strain is of order  $\mathcal{O}(\tau_\eta)$ . While  $s^2$  is the key agent for the structural deformation,  $\omega^2$  governs the rotation of the aggregates along its trajectory. Hence in the region of high  $\omega^2$  an aggregate is expected to experience less deformation but to tumble whereas in  $s^2$  dominated regions of the flow an aggregate is subject to larger deformation. Besides studying how the strain  $\tilde{s}^2$  and enstrophy  $\tilde{\omega}^2$  evolve over time along the aggregate trajectory, we also study the role of the competing mechanism of  $\tilde{s}^2$  and  $\tilde{\omega}^2$  on the breakup. Therefore, we examine the orientation of the aggregate with respect to the eigen frame of the rate of strain tensor, i.e.,  $\lambda_i$ 's. That sheds light on how the aggregate responds to the rapid evolution of the strain eigen frame that continuously exerts stretching and compression. We measure the separation vector  $\mathbf{r}$ , a vector between the fragments at the time of breakage. It is interesting to observe how consistently  $\mathbf{r}$  aligns itself with  $\lambda_1$ , the most extensional eigen vector along its Lagrangian trajectory. For inconsistent alignment, this will also show how frequently  $\omega^2$  interferes with  $s^2$  to deflect the aggregate from  $\lambda_i$ 's. To address the situations where an aggregate might sustain higher  $s^2$  but undergoes fragmentation at somewhat lower  $s^2$ , we investigate if strain is directionally biased towards the separation direction between the fragments. If we assume the plane across which an aggregate breaks apart is the weakest plane, i.e., mechanical anisotropy is more pronounced there than anywhere inside the aggregate, then before the breakage, stretching along  $\mathbf{r}$  should exhibit a smaller value than the one at breakage. In principle, we want to explore if there exists a critical behavior between the strain and the direction along which breakup occurs. This is informative to understand, at least on a qualitative level, the effect of  $s_{ij}$  on the aggregate's mechanical property. Finally, to study the cumulative effect of  $\frac{\partial \tilde{u}}{\partial x_j}$  on the aggregate, we use the Cauchy-Green deformation tensor  $\mathbb{W}$ . The aggregates are soft matter and fractal in morphology. Therefore they are susceptible to deform considerably over a certain time scale and that is why the pointwise measure of  $s^2$  or  $\omega^2$  might prove inadequate to explain the underlying breakup mechanics simply due to the reason that the instantaneous estimate does not acknowledge the preceding history. If the aggregates experience finite deformation over a finite length of time and thereafter fail to sustain their unbroken state then we stress on the importance to investigate critical deformation and the time that yields that state. The ratio of the intermediate eigen value of  $\mathbb{W}$  to the most extensional one allows to estimate the "shape" of the deformed aggregate and consequently the dominant role between the two. We found that, indeed the direction along which breakage takes place is the most stretching direction of the Cauchy-Green eigen vector. That means an aggregate breaks into two parts in the direction along which it experiences the maximum integrated stretching. The appropriate time scale for which we found this result most pronounced is about twice the Batchelor time scale which is equivalent to four Kolmogorov time scales in our experiment.

# Zusammenfassung

In dieser Doktorarbeit wurde das Brechverhalten von fraktalen, kolloiden Polymer-Aggregaten experimentell mittels drei-dimensionaler Particle Tracking Velocimetry (3D-PTV) unter laminaren sowie turbulenten Strömungsbedingungen untersucht. Die Zielsetzung war ein tieferes Verständnis der Brechmechanismen in einem Lagrange'schen Bezugssystem, das Zugang zum zeitlichen Ablauf der Strömungsdynamik in der direkten Umgebung und entlang der Bahnlinien von Aggregaten ermöglicht. Dies brachte neue Einblicke in die Eigenschaften von Brechmechanismen und deren Schlüsselparameter. Unser bisheriges Verständnis von Brechverhalten von kolloiden Aggregaten stützte sich vor allem auf experimentell und numerisch erfasste mittlere Grössenverteilungen und damit verbundene Bruchkriterien. Letztere basieren im Wesentlichen auf unmittelbar wirkende Kräfte und lassen ihre zeitliche Entwicklung und kumulierten Effekt ausser Acht. Hier setzt unsere Kernfrage an, die lautet: was ist der Lagrange'sche Beitrag des Strömungsfeldes, welchem ein Aggregat für eine bestimmte Zeit ausgesetzt ist bevor es letztendlich bricht?

Unsere Vorhaben, das Brechverhalten zu untersuchen ist auf diese Frage ausgerichtet und basiert auf folgenden Eckpunkten. In erster Linie wurde die Fähigkeit der Messmethode 3D-PTV, den vollen Geschwindigkeitsgradienten Tensor entlang der Bahnkurven von Aggregaten während des Brechens ermitteln zu können, ausgeschöpft. Das heisst, es konnten Informationen darüber ermittelt werden, wie Aggregate über ihrer Lebenszeit durch Geschwindigkeitsgradienten beeinflusst werden, was direkte Auskunft über Bruchmechanismen gab. Aggregate finiter Grösse wurden einzeln in die Strömung eingebracht, sodass die Strömung selbst nicht durch die Aggregate beeinflusst wurde, und damit nur jeweils ein Brechereignis stattfinden konnte, was die Detektion vereinfachte. Als erstes wurde das Brechverhalten unter laminaren Bedingungen, und zwar unter einer achsensymmetrischen Dehnströmung untersucht. Diese wurde durch einen Fluss durch eine kleine Mündung realisiert, gegen welche die Dehnung monoton zunimmt. Wegen der stationären Natur der Strömung wurden Brechverhalten und Geschwindigkeitsmessungen separat untersucht und nicht simultan erfasst. Die Symmetrie der Strömung ermöglicht eine Abschätzung der Messgenauigkeit, die ausreichte, um den Geschwindigkeitsgradienten Tensor  $\frac{\partial u_i}{\partial x_j}$  zu berechnen. Vor der Mündung spielt der zweite Eigenvektor  $\lambda_2$  des Dehnungstensors  $s_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$  zusammen mit dem gleichstarken dritten Eigenvektor  $\lambda_3$  eine effektive Rolle, indem sie eine Kompression ausüben, während  $\lambda_1$  für starke Dehnung verantwortlich ist. Das Verhältnis der Eigenwerte des Dehntensors  $|\frac{\lambda_2}{\lambda_3}| \rightarrow 0$  nach der Mündung markiert den Übergang von der Dehn- zu einer Scherströmung. Die Messungen ergaben, dass die meisten Brüche an einem Abstand von etwa 2-3 mm vor und nach der Mündung auftraten, wo  $s_{ij}^2$  maximal war.

Im zweiten Experiment wurde das Brechen von Aggregaten in einer voll entwickelten turbulenten Strömung untersucht. Um die Struktur der homogenen, quasi isotropen Turbulenz mit einer Taylor Reynoldszahl von  $Re_\lambda = 90$  zu erfassen, wurde der gefilterte Geschwindigkeitsgradienten Tensor  $\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j}$  gemessen, welcher

im Wesentlichen dieselben Eigenschaften seines fein-skalierten Gegenübers erfüllt. Möglicherweise die wichtigste Eigenschaft, die beobachtet wurde war  $\Lambda_2 > 0$ , welche besagt, dass  $\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}$  Selbstverstärkung auf unserer Messskala, welche am oberen Ende des viskosen Bereichs liegt, spürt. Im Allgemeinen konnte der Effekt von fein-skalierten Dynamik auf Aggregaten angemessen durch den gefilterten Geschwindigkeitsgradienten Tensors wiedergegeben werden. Die gefilterte Dehnung  $s_{ij}^2$  und Wirbelstärke  $\omega^2$  wurde entlang Aggregatsbahnen gemessen, die im Mittel etwa  $10\tau_\eta$  lang waren, wo  $\tau_\eta$  die Kolmogorov Zeit der Strömung ist. Das heisst, die instantane Strömungsdynamik konnte über eine Zeitspanne von  $10\tau_\eta$  bevor dem Brechen ermittelt werden. Diese Zeitspanne ist ausreichend um den Lagrange'schen Einfluss auf das Brechverhalten zu untersuchen, da die charakteristische Zeitskala von Dehnung und Wirbelstärke  $\mathcal{O}(\tau_\eta)$  ist. Während  $s_{ij}^2$  strukturelle Deformation verursacht, ist  $\omega^2$  verantwortlich für die Rotation von Aggregaten entlang ihrer Bahnkurven. In Regionen, wo  $\omega^2$  dominant ist, rotiert ein Aggregat stark und wird nur schwach deformiert, während in Regionen, wo  $s_{ij}^2$  dominiert, das Gegenteil der Fall ist. Neben der Studie von  $s_{ij}^2$  und  $\omega^2$  entlang Partikelbahnen, wurde auch die konkurrierende Rolle von  $s_{ij}^2$  und  $\omega^2$  für das Brechverhalten untersucht, das sich in der Ausrichtung zwischen Aggregat und den Eigenvektoren des Dehntensors manifestiert. Dies brachte Einblicke wie ein Aggregat auf die schnelle Dynamik des Dehntensors und abwechselnde Kompression und Dehnung reagiert. Der Abstandsvektor zwischen den Fragmenten zeigte eine präferentielle Ausrichtung mit dem Dehneigenvektor  $\lambda_1$  entlang ihrer Bahnkurven. Bei schwacher Ausrichtung kann ein Einfluss von  $\omega^2$  festgestellt werden, der Aggregate von einer bestimmten Ausgangskonfiguration wegdreht. Um Situationen zu verstehen, in denen ein Aggregat starke Dehnung überlebt, um dann an einem späteren Zeitpunkt bei relativ schwacher Dehnung zu brechen, wurde die Dehnung entlang  $\mathbf{r}$  untersucht. Unter der Annahme, dass die Ebene entlang der ein Aggregat bricht, die mechanisch schwächste Ebene sei, d.h. die mechanische Anisotropie ist am stärksten entlang dieser Ebene, sollte die Dehnung entlang  $\mathbf{r}$  bevor dem Brechen kleiner sein, als zum Brechzeitpunkt selbst. Das heisst, die Dehnkomponente entlang  $\mathbf{r}$  sollte ein kritisches Verhalten zeigen und gleichzeitig Aufschluss auf die mechanische Anisotropie der Aggregate geben. Letztlich wurde der Cauchy-Green Tensor  $\mathbb{W}$  berechnet, um den kumulativen Effekt von  $\frac{\partial u_i}{\partial x_j}$  zu erfassen. Aggregate sind aus flexiblem Material und haben eine fraktale Form, deshalb können sie über eine bestimmte Zeit erheblich deformiert werden. Das heisst auch, dass das momentane  $s_{ij}^2$  und  $\omega^2$  wohl nicht ausreichend sind, um Brechmechanismen vollständig zu erklären, da der zeitliche Ablauf eine wichtige Rolle spielt. Wenn ein Aggregat eine endliche Deformierung über eine bestimmte Zeitdauer erfährt, und folglich dem Brechen nicht standhalten kann, weist das auf die Wichtigkeit von kritischer Deformierung sowie der Zeitdauer, um diese zu erreichen, hin. Das Verhältnis zwischen mittlerem und grösstem Eigenwert von  $\mathbb{W}$  erlaubt Rückschlüsse auf die Form der Deformierung des Aggregats. Es hat sich herausgestellt, dass die Brechrichtung mit dem Eigenvektor des grössten Eigenwertes von  $\mathbb{W}$  ausgerichtet ist. Das heisst, ein Aggregat bricht in zwei Teile in der Richtung entlang der es die grösste integrierte Dehnung erfährt. Die passende Zeitskala, für die dieses Resultat am ausgeprägtesten war, ist etwa zwei Batchelor Zeiten, was ungefähr vier Kolmogorov Zeiten in unserer Strömung entspricht.