

KI-gestützte, Tensor basierte Charakterisierung von Tropfen und Partikeln aus kontinuierlichen Lichtstreusignalen

Walter Schäfer 1, ai-quanton, Laudenbach / Germany

Tobias Jakobs 2, KIT, Karlsruhe / Germany

Patrick Stegmann 3, UMD & NASA GSFC, Greenbelt MD / USA

Die Charakterisierung von Tropfen und Partikeln mit dem Time-Shift-Time-of-Flight (TSTOF) Verfahren [1] erlaubt die Bestimmung von Tropfengröße und Geschwindigkeit durch die Analyse einzelner Streusignale im Zählmodus. Für weiterführende physikalische und chemische Eigenschaften, wie den Brechungsindex von Flüssigkeitsgemischen, die Konzentration von Feststoffen in Slurry-Tropfen oder die Pigmentbeladung in Lacken, stößt TSTOF jedoch an Grenzen. Um diese Informationen vollständig zu erfassen, wurde ein triggerfreier, KI-gestützter Ansatz entwickelt. Das Konzept basiert auf der Darstellung kontinuierlicher Lichtstreusignale in Form von Tensoren, die als Particle-Tensor-AI (PTA) bezeichnet werden. PTAs können in unterschiedlichen Formaten erzeugt werden. Eine naheliegende Implementierung ist die Abbildung der Detektorsignale in RGB-Bilder, wobei jeder Farbkanal einem Detektor zugeordnet wird. So können Bildverarbeitungsmethoden, insbesondere Convolutional Neural Networks (CNNs), direkt eingesetzt werden. Gleichzeitig bleibt die Möglichkeit erhalten, alternative Tensor Formate für spezifische Anwendungen zu entwickeln.

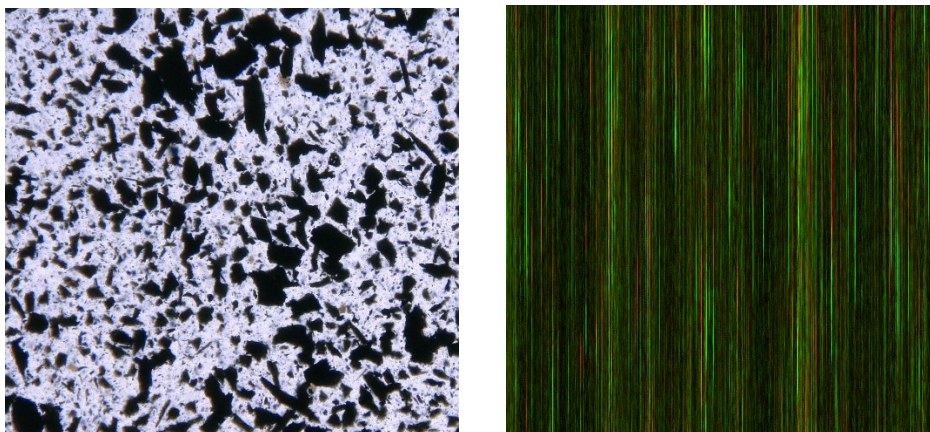


Abbildung 1: (rechts) Mikroskopische Aufnahme vom Slurry, (links) Beispiel eines PTA

Der experimentelle Aufbau wurde in [1] beschrieben, wo zusätzlich kontinuierliche Lichtstreusignale von Tropfen in einem Slurry-Spray erfasst wurden. Die gepufferten Signale spiegeln einen kontinuierlichen Tropfenstrom wider. Die Signale von vier Detektoren wurden segmentiert und zu PTAs kombiniert. Die Dimensionen ergeben

sich aus der Anzahl der Detektoren, der Segmentlänge und der Segmentanzahl. Für die Visualisierung wurden die Detektoren exemplarisch den RGB-Kanälen zugeordnet (Abb. 1), wodurch bildähnliche Strukturen entstehen, die für CNN-Analysen geeignet sind.

Zur Vorhersage von Massenkonzentration und mittlerer Partikelgröße in Slurry-Tropfen wurden PTAs mit CNNs sowohl im Klassifikations- als auch im Regressionsmodus verarbeitet. PTAs mit den Dimensionen $3 \times 256 \times 256$ bei 8-Bit-Auflösung wurden erstellt, womit eine PTA-Dauer von $419 \mu\text{s}$ erreicht wurde. Zur Erweiterung der zeitlichen Abdeckung wurden Downsampling-Faktoren von 2, 4, 8, 16 und 32 eingesetzt. Untersucht wurden verschiedene Kombinationen der vier Detektoren, von Einzelkanälen bis zu Dreiergruppen (z. B. B–C–D). Insgesamt wurden 168 Konfigurationen analysiert.

Durch die Transformation von Multi-Detektor-Signalen in PTAs und die Anwendung von CNN-Modellen konnten Massenkonzentration und mittlere Partikelgröße mit einer Genauigkeit von bis zu 95 % vorhergesagt werden. Die Methode kombiniert die Vorteile von Zähl- und Integrationsverfahren, ohne Informationsverluste durch Triggerung. Die Experimente zeigten zudem, dass Downsampling die Genauigkeit kaum beeinträchtigt und somit eine erhebliche Reduzierung der Datenrate möglich ist. Weiterhin konnte nachgewiesen werden, dass bestimmte Detektorkombinationen stabilere Vorhersagen liefern, was vermutlich auf deren geometrische Ausrichtung zurückzuführen ist.

Mit der vorgestellten Methode wurde ein triggerfreier, KI-basierter Ansatz zur Charakterisierung von Tropfen und Partikeln demonstriert. Durch die Umwandlung von Multi-Detektor-Signalen in PTAs und die Analyse mit CNN-Modellen konnten Massenkonzentration und mittlere Partikelgröße zuverlässig bestimmt werden. Das Konzept eröffnet neue Perspektiven für die Spraydiagnostik und bildet die Grundlage für zukünftige Arbeiten, beispielsweise zur Pigmenttonbestimmung, zur Untersuchung von Kristallisationsprozessen und zur Analyse von Mehrphasenströmungen.

Literaturverzeichnis

[1] W. Schaefer, S. Fleck, M. Haas, and T. Jakobs, "Optical Measurement Method for Monitoring High-Mass-Concentration Slurry Sprays: An Experimental Study," *Photonics*, vol. 12, no. 7, p. 673, Jul. 2025, doi: 10.3390/photonics12070673.