

# Analyse des Flug- und Abbrandverhaltens von Ersatzbrennstoffen auf Basis eines Lichtfeldkamarasystems

Miao Zhang<sup>1</sup>, Markus Vogelbacher<sup>1</sup>, Krasimir Aleksandrov<sup>2</sup>,  
Hans-Joachim Gehrmann<sup>2</sup> und Jörg Matthes<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Automation und  
angewandte Informatik,

Herrmann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen

<sup>2</sup> Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Technische Chemie,  
Herrmann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen

**Zusammenfassung** Heutzutage finden die aus Abfällen gewonnenen Brennstoffe eine zunehmende Verwendung bei industriellen Verbrennungsprozessen, wie beispielsweise zur Erzeugung von Wärme bei der Verbrennung in Zement-Drehrohröfen. Um eine kontrollierbare und sichere Verbrennung dieses alternativen Brennstoffs zu gewährleisten, ist eine Analyse des Flug- und Verbrennungsverhaltens unerlässlich. In diesem Beitrag stellen wir Methoden zur Analyse von Bild-daten vor, die von einer Lichtfeldkamera während der Verbrennung von den aus Abfällen gewonnenen Brennstoffen in einem Drehrohr aufgenommen wurden. Das Kamerasystem liefert 3D-Informationen sowohl zu den Brennstoffpartikeln als auch zur inneren Form des Drehrohrrofens. Die Analyse beinhaltet Verfahren zur Partikeldetektion unter Verwendung von 3D-Clustering-Algorithmen und Verfahren zur Partikelverfolgung unter Verwendung von Multi-Objekt-Tracking-Algorithmen.

**Keywords** Partikeldetektion, 3D-Clustering, Lichtfeldkamera, Multiple-Target-Tracking

DOI: 10.58895/ksp/1000124383-9 erschienen in:

**Forum Bildverarbeitung 2020**

DOI: 10.5445/KSP/1000124383 | <https://www.ksp.kit.edu/site/books/m/10.58895/ksp/1000124383/>

## 1 Einleitung

Die Nutzung von Ersatzbrennstoffen (EBS) hat sich bei industriellen Verbrennungsprozessen, wie etwa der Zementherstellung, etabliert. Dabei ist neben der Kostenreduktion der große Vorteil, dass sich der biogene Anteil des EBS positiv auf die CO<sub>2</sub>-Bilanz des Verbrennungsprozesses auswirkt. Die massenmäßig meistverwendeten EBS stellen die aufbereiteten, festen, flugfähigen Brennstoffe dar, die als FLUFF bezeichnet werden. Der FLUFF setzt sich aus einer Mischung unterschiedlicher Fraktionen, wie z.B. Papier und Pappe, Holz, Plastikfolien und 3D- Plastikpartikeln zusammen. Auf Grund der komplexen Zusammensetzung und der sich zeitlich und örtlich ändernden Partikelgrößen resultiert ein instationäres Flug- und Abbrandverhalten, was den FLUFF-Einsatz erschwert.

Um das Flug- und Verbrennungsverhalten des FLUFF besser vorhersagen und damit dessen Einsatz optimieren zu können, werden im gleichnamigen AiF-Projekt "FLUFF" 3D-Verbrennungssimulationsmodelle (CFD) erarbeitet. Zur Validierung der Modelle anhand realer Messdaten werden neue kamerabasierte Verfahren zur Ermittlung der Statistik der 3D-Flugbahnen und der Zündzeitpunkte von Brennstoffpartikeln anhand von Messungen an der am Campus Nord des KIT befindlichen Versuchsanlage BRENDA entwickelt. Dazu werden die Brennstoffpartikel durch ein plenoptisches, metrisch kalibriertes Hochgeschwindigkeitskamarasystem erfasst. Darauf aufbauend werden Verfahren zur automatischen Detektion der Partikel und ein 3D-Tracking der dazugehörigen Trajektorien entwickelt.

In der Literatur sind zahlreiche Verfahren und Anwendungen zur Detektion und zum Tracking von Partikeln zu finden. Die Partikel-Detektion erfolgt meist aus den 2D-Bildinformationen beispielsweise mittels SIFT [1] oder mittels Neuronaler Netze [2]. Sind 3D-Informationen in Form von Punktwolken verfügbar (Stereokamera), kann die Detektion auch über Clustering-basierte Ansätze erfolgen [3]. Verfahren für das Brennstoffpartikel-Tracking auf Basis von 2D-Hochgeschwindigkeitskamaras werden in [4, 5] vorgestellt. Ein Verfahren für das 3D-Tracking von Tracer Partikeln in Fluiden auf Basis von Stereokamaras wird in [6] beschrieben. Der Einsatz

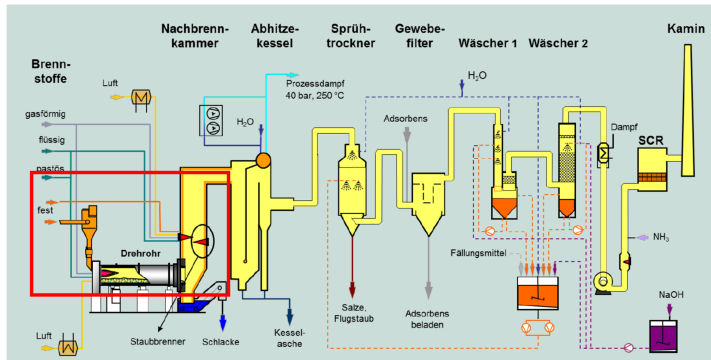
eines Lichtfeldkamarasystems zur Realisierung einer 3D-Particle-Tracking-Velocimetry (PTV) wird in [7] vorgestellt.

Aufgrund konstruktiver Randbedingungen bei Drehrohröfen und Brennkammern ist die Nutzung von Stereokamarasystemen i. d. R. nicht möglich. Daher wird in diesem Paper der Einsatz eines Lichtfeldkamarasystems für die Detektion und das Tracking von Brennstoffpartikeln untersucht. Durch die Lichtfeldkamera stehen sowohl 2D-Bildinformationen also auch 3D-Punktwolken zur Verfügung. Daher werden für den Partikel-Detektionsschritt drei Methoden verwendet: 2D SIFT, 3D DBSCAN Clustering und die Kombination von 2D- und 3D-Informationen. Das Tracking erfolgt zunächst 2D.

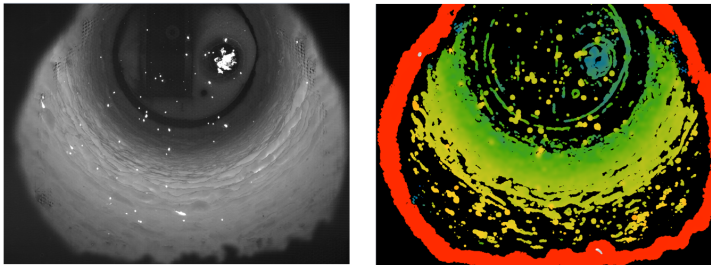
## 2 Versuchsaufbau und Bildaufnahmesystem

Der Aufbau der Anlage ist in Abbildung 2.1 dargestellt. Das enthaltene Drehrohr ist Hauptbestandteil der Versuche. Es hat eine Länge von 8.4 m und einen Innendurchmesser von 1.4 m. Über eine Lanze am Einlauf des Drehrohres können EBS-Partikel mit einem Durchmesser von 5 bis 40 mm mit Förderluftdrücken von 4 bis 5 bar eingeblasen werden. Hierbei beheizt ein ebenfalls am Einlauf befindlicher Ölbrenner das Drehrohr auf eine Innentemperatur von etwa 1240 °C. Aufgrund der hohen Temperaturen zünden die meisten EBS-Partikel auf ihrer Flugbahn durch das Drehrohr. Am Auslauf des Drehrohres kann über ein Beobachtungsfenster aus Quarzglas das Drehrohrinnere z. B. über ein Kamerasystem betrachtet werden. Dabei sind neben dem heißen Drehrohr und der Ölbrennerflamme die interessierenden gezündeten Partikel und teilweise auch nicht gezündete Partikel sichtbar (Abbildung 2.2, links).

Eine Lichtfeldkamera, auch plenoptische Kamera genannt, erfasst neben den üblichen zwei Bilddimensionen noch die Tiefeninformationen. Dadurch wird eine 3D-Punktwolke ( $x$ -,  $y$ -,  $z$ -Positionen) erhalten. Im Vergleich zu einer konventionellen Kamera verfügt die Lichtfeldkamera über ein Mikrolinsen-Array (MLA) vor dem Bildsensor, wodurch die selbe Szene aus verschiedenen Blickwinkeln aufgenommen werden kann. Durch Verwendung von Mikrolinsen mit unterschiedlicher Brennweiten (multi-focus plenoptic camera) wird sowohl ein großer Tiefenschärfebereich als auch eine hohe maximale



**Abbildung 2.1:** Aufbau der BRENDA Versuchsanlage. FLUFF Versuche werden im Drehrohr durchgeführt (rot markiert).



**Abbildung 2.2:** Beispiel einer Lichtfeldkameraaufnahme von brennenden EBS-Partikeln in einem Drehrohr. Links: Basic-Focus-Bild. Rechts: Tiefenkarte in Falschfarbendarstellung.

laterale Auflösung erreicht [8]. Durch eine vorab erfolgte Kalibrierung kann eine metrische Tiefeninformation ausgegeben werden [9]. Die eingesetzte Lichtfeldkamera der Firma Raytrix hat eine Frame-rate von 330 Frames pro Sekunde, eine Auflösung von 2048x1536 Pixeln und Mikrolinsen mit drei unterschiedlichen Brennweiten. Abbildung 2.2 zeigt eine Beispielaufnahme der Lichtfeldkamera unter den oben genannten Versuchsbedingungen. Zum einen das so genannte Basic-Focus-Bild (Abbildung 2.2, links), das der Aufnahme einer konventionellen 2D-Kamera entspricht, und zum anderen die

errechnete Tiefenkarte (Abbildung 2.2, rechts), die die Tiefeninformation in Falschfarben kodiert darstellt.

### 3 Detektion und Tracking der Brennstoffpartikel

Um das Flug- und Verbrennungsverhalten automatisch auswerten zu können, ist es zunächst notwendig, die einzelnen Brennstoffpartikel in den Lichtfeldkameraaufnahmen zu detektieren. Dabei sollen sowohl gezündete (brennende) als auch nicht gezündete bzw. ausgebrannte Partikel berücksichtigt werden. Als Datengrundlage stehen die 2D- und 3D-Informationen der Lichtfeldkamera zur Verfügung. Entsprechend können Verfahren zur Partikeldetektion in 2D und 3D genutzt werden, um eine vollständige Detektion aller Brennstoffpartikel zu erreichen.

#### 3.1 Partikeldetektion

##### 2D Partikeldetektion: Scale-invariant Feature Transform (SIFT)

Basierend auf dem 2D Grauwertbild der Lichtfeldkamera kann eine Partikeldetektion mittels Scale-Invariant Feature Transform (SIFT) [10] durchgeführt werden. Der Merkmalsraum des SIFT wird durch Faltung mit einem Difference of Gaussian Filter berechnet. Eine Maximasuche über die Ebenen der Difference of Gaussian Merkmalspyramide führt zu Keypoints, die in unserem Anwendungsfall als Partikeldetektionen behandelt werden. Auf Grund der Skalierungsinvarianz des SIFT können Partikel verschiedener Größen detektiert werden.

##### 3D-Partikeldetektion: Clustering Algorithmus DBSCAN

Die 3D-Punktewolke der Lichtfeldkamera kann mit Hilfe des DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) Clustering Algorithmus [3] analysiert werden. Der Algorithmus definiert Kernpunkte, die innerhalb von einem bestimmten Radius  $\epsilon$  eine Mindestanzahl von Nachbarpunkten  $\text{minPts}$  besitzen. Ein Punkt, der kein Kernpunkt ist, aber dessen Abstand zu einem Kernpunkt kleiner als  $\epsilon$  ist, ist vom Kernpunkt dichte-erreichbar. Ein Punkt, der we-

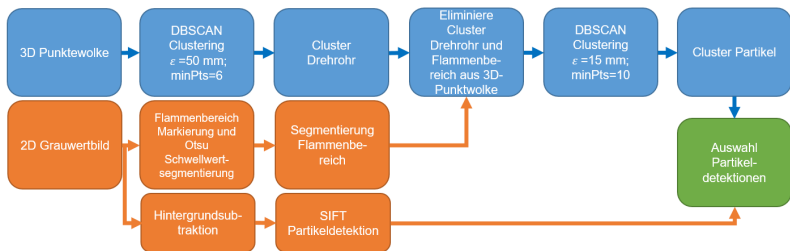
der ein Kernpunkt noch von einem Kernpunkt dichte-erreichbar ist, wird als Rauschen definiert. Zwei Punkte, die durch eine Kette von Kernobjekten, die untereinander dichte-erreichbar sind, miteinander verbunden werden können, gelten als dichte-verbunden und bilden mit Punkten, die mit denselben Kernpunkten dichte-verbunden werden können, ein Cluster. Zum Cluster werden auch die zur Verbindung benötigten dichte-erreichbaren Kernpunkte gezählt. Dichte-erreichbare Punkte, die von mehr als einem Cluster dichte-erreichbar sind, werden zufällig dem ersten möglichen Cluster zugeordnet.

### **Kombination von SIFT und DBSCAN Clustering**

Die beiden zuvor vorgestellten Verfahren der SIFT Partikeldetektion und des DBSCAN Clustering Algorithmus werden im Folgenden für ein besseres Detektionsergebnis miteinander kombiniert. Dabei wird ausgenutzt, dass beide Verfahren unterschiedliche Informationen der Lichtfeldkamera nutzen. Partikel mit niedriger Helligkeit werden z.B. durch das grauwertbasierte SIFT Verfahren nicht erkannt, sind aber durch das auf geometrische Zusammenhänge achtende DBSCAN Clustering detektierbar. Im Gegenzug sorgen dunkle hervorstehende Kanten des Drehrohres beim Clustering für Cluster, die keine Partikel und damit falsche Detektionen darstellen. Diese werden beim SIFT nicht berücksichtigt und können durch eine entsprechende Kombination mit dem Clustering herausgerechnet werden. Die zur Kombination von 2D-SIFT und 3D-Clustering notwendige Umrechnung von 2D- in 3D-Koordinaten und umgekehrt, ist durch eine Lookup Tabelle von der Kamera gegeben.

Abbildung 3.1 zeigt eine schematische Darstellung der Vorgehensweise der aus SIFT und Clustering kombinierten Partikeldetektion. Im ersten Schritt werden mögliche Problemfälle beim Clustering identifiziert. Dies ist zum einen die Drehrohrwand, die fehlerhafte Cluster erzeugen kann bzw. an der auf Grund der in diesem Bereich dicht liegenden 3D-Informationen immer ein großes Cluster entsteht, und zum anderen die Ölbrennerflamme am Einlauf des Drehrohres, die nicht zur Auswertung herangezogen werden soll. Zur Detektion der Drehrohrwand wird der Clustering Algorithmus mit vergleichsweise großem  $\varepsilon=50\text{ mm}$  und kleinem  $\text{minPts}=6$  auf die komplette 3D-Punktewolke angewandt. Das größte erkannte Cluster wird als

Drehrohrwand gewählt und im Folgenden aus der 3D-Punktwolke entfernt. Der Flammenbereich kann auf Grund seiner hohen Helligkeit durch Anwendung des Otsu-Schwellwertverfahrens auf das Grauwertbild segmentiert werden und nach Umrechnung in 3D-Koordinaten ebenfalls aus der 3D-Punktwolke entfernt werden. Nach Entfernung der möglichen Fehlerquellen wird das Clustering auf die bereinigte 3D-Punktwolke mit einem vergleichsweise kleinem  $\varepsilon=15$  mm und einen großem  $\text{minPts}=10$  zur Partikeldetektion angewandt. Alle Punkte eines detektierten Clusters bilden ein Partikel, dadurch ist neben der 3D-Position auch die Geometrie des Partikels näherungsweise bekannt.



**Abbildung 3.1:** Schematische Darstellung des Ablaufes der kombinierten Partikeldetektion

Vor der Anwendung des SIFT auf das Grauwertbild wird zunächst eine Hintergrundsubtraktion durchgeführt. Hierzu wird vom aktuellen Grauwertbild ein über mehrere Bilder zeitlich gemitteltes Grauwertbild abgezogen, dadurch werden konstante Strukturen der Umgebung und vor allem der Drehrohrwand entfernt. Die anschließend vom SIFT gelieferten Keypoints werden als Partikelpositionen übernommen und liefern damit die 2D-Koordinaten der Partikelschwerpunkte.

Für die Kombination beider Verfahren werden die Ergebnisse aus dem Clustering in 2D-Koordinaten transformiert. Anschließend wird überprüft, ob und wie viele Keypoints der SIFT Partikeldetektion innerhalb eines detektierten Clusters liegen. Beim Vergleich können insgesamt vier Fälle eintreten:

1. Ein einzelner Keypoint liegt innerhalb eines Clusters.

2. Mehrere Keypoints liegen innerhalb eines Clusters.
3. Kein Keypoint liegt in einem Cluster.
4. Es existiert ein Keypoint, der keinem Cluster zugeordnet werden kann.

Für den Fall 1, dass nur ein Keypoint in einem Cluster liegt, wird dieses Cluster direkt als Partikeldetektion übernommen. Fall 2 mit mehreren Keypoints innerhalb eines Clusters kann verschiedene Gründe haben. Liegen mehrere Partikel räumlich nah nebeneinander, werden diese beim Clustering zu einem großen Partikel zusammengefasst, während das SIFT mehrere Partikeldetektionen liefert. Außerdem treten bei großen Partikeln, die ein Cluster darstellen, beim SIFT meistens mehrere Keypoints auf. Um unterscheiden zu können, ob in diesen Fällen ein oder mehrere Partikel vorliegen, wird der Grauwertverlauf innerhalb des Clusters betrachtet. Sind mehrere lokale Intensitätsmaxima vorhanden wird das Cluster in mehrere Partikel aufgeteilt. Ist dies nicht der Fall wird das Cluster als ein Partikel übernommen. Für Fall 3 und 4, in denen nur eines der beiden Verfahren ein Partikel detektiert hat, werden ebenfalls die Grauwerte innerhalb des Clusters bzw. in der Umgebung des Keypoints herangezogen. Durch Abgleich des Grauwertverlaufes mit einer Gauß-Verteilung wird entschieden, ob es sich tatsächlich um ein Partikel oder nur um eine Fehldetektion (z. B. durch Rauschen) handelt.

### 3.2 Partikel-Tracking

Für die detektierten Brennstoffpartikel wird ein Tracking durchgeführt. Für die Aufgabenstellung des Multiple-Target-Tracking (MTT) wird der in der Literatur häufig verwendete Global Nearest Neighbor (GNN) Algorithmus verwendet [11]. Der GNN enthält die Schritte Prediction, Gating, Assignment und Update. Für die Prädiktion und das Update der Position eines Partikels (Tracks) wird ein lineares Kalman-Filter verwendet. Vereinfacht wird dabei für jeden Zeitschritt eine gleichförmige Bewegung eines Partikels mit konstanter Geschwindigkeit angenommen. Bei einer großen Anzahl an Partikeln im MTT, verfügen die meisten Tracks über mehr als eine Messung im Gating-Bereich bzw. eine Messung liegt im

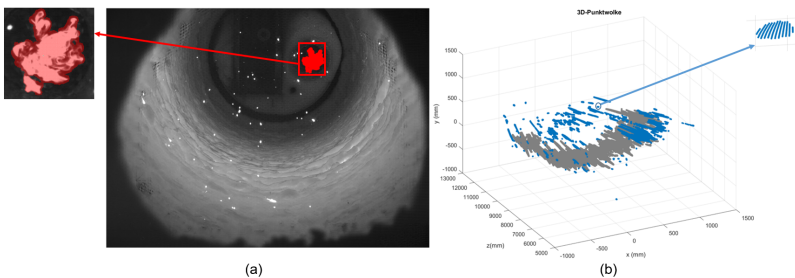


Gating-Bereich mehrerer Tracks. Zur Lösung des Zuordnungsproblems wird der Kuhn-Munkres-Algorithmus genutzt. Durch Minimierung einer Kostenmatrix, die den Mahalanobis-Abstand zwischen allen möglichen Messungen und Tracks berücksichtigt, wird die optimale Zuordnung zwischen Messungen und Tracks durchgeführt. Dabei werden auch vorgebbare Kosten für nicht fortgeführte Tracks berücksichtigt.

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Ergebnis der Partikeldetektion

Abbildung 4.1 zeigt ein Beispiel der 2D- (Basic-Focus, Grauwertbild) und 3D-Kamerainformation (3D-Punktwolke), auf dessen Basis die Partikeldetektion durchgeführt wird. Zur Bewertung der Verfahren steht eine manuell gelabelte Ground Truth zur Verfügung, die für das ausgewählte Bild 126 Partikel enthält. Wie in Abschnitt 3.1 erläutert, werden vor dem Clustering zur Partikeldetektion die Drehrohrwand und der Flammenbereich der Ölbrennerflamme detektiert. Der Flammenbereich wird mit Hilfe des Otsu-Schwelldwertverfahrens innerhalb des in Abbildung 4.1(a) rot markierten Rechtecks segmentiert. Durch einen ersten Clustering-Prozess kann aus der 3D-Punktwolke in Abbildung 4.1(b) ein Cluster für die Drehrohrwand gewonnen werden.



**Abbildung 4.1:** Datengrundlage der Lichtfeldkamera. (a) Basic-Focus-Bild (Grauwertbild) und (b) die entsprechende 3D-Punktwolke.

Punkte der Drehrohrwand und des Flammenbereichs werden aus der 3D Punktwolke entfernt. Insgesamt werden 255 Cluster erkannt, wobei nur 88 Cluster korrekt detektierte Partikel darstellen. Das SIFT Verfahren liefert 118 Keypoints von denen 95 korrekt detektierten Partikeln entsprechen. Die Kombination von Clustering und SIFT führt zu einer Detektion von 120 Partikeln, davon 116 korrekt detektierte Partikel. Tabelle 1 fasst die Ergebnisse der einzelnen Verfahren noch einmal zusammen.

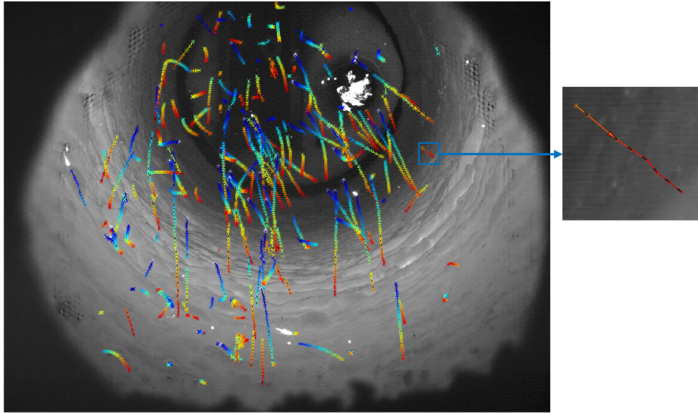
**Tabelle 1:** Vergleich zwischen DBSCAN Clustering, SIFT Partikeldetektion und deren Kombination.

Methode	Anzahl detektierter Partikel	Anzahl korrekt detektierter Partikel	Anzahl von Fehl- detektionen	Recall	Precision	F-score
DBSCAN	255	88	167	69.84%	34.51%	0.4619
SIFT	118	95	23	75.40%	80.51%	0.7787
DBSCAN+SIFT	120	116	4	92.06%	96.67%	0.9431

## 4.2 Ergebnis des Partikel-Trackings

Zur Beurteilung des Trackingverfahrens wird eine qualitative Auswertung anhand einer Beispielaufnahme durchgeführt. Aufgrund großer Ungenauigkeit in der Tiefeninformation der aktuell vorliegenden Messdaten wird das Partikel-Tracking zunächst in 2D durchgeführt. Grundlage bilden die Partikeldetektionen aus dem kombinierten Clustering/SIFT Verfahren für alle Bilder der Beispielaufnahme. Die Beispielaufnahme enthält 50 Bilder. Das entspricht bei einer Framerate der Kamera von 330 fps einem Zeitraum von 0.149 s. Das Ergebnis des GNN Algorithmus ist in Abbildung 4.2 dargestellt. Partikel aus einem Zeitschritt sind mit der gleichen Farbe markiert. Zugeordnete Partikel aus aufeinander folgenden Zeitschritten sind mit Pfeilen verbunden.

Mit Hilfe des Tracking Verfahrens wird eine Verfolgung der meisten Partikel über die komplette Beispielaufnahme ermöglicht. Probleme entstehen bei der Zuordnung von sehr dicht liegenden Partikeln.



**Abbildung 4.2:** Ergebnis der Partikeldetektion mittels Kombination von DBSCAN Clustering und SIFT Partikeldetektion.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Anwendung einer Lichtfeldkamera in einer Drehrohrumgebung ermöglicht es, die Bewegungen von im Drehrohr fliegenden EBS-Partikeln zu beobachten und detailliert zu beschreiben. Im vorliegenden Beitrag werden die Schritte Partikeldetektion und Partikel-Tracking vorgestellt, die für eine Analyse des Flugverhaltens einzelner Partikel notwendig sind. Zur Partikeldetektion wird hierzu sowohl die 2D- als auch 3D-Information der Lichtfeldkamera genutzt. Durch Kombination von 2D-SIFT und 3D-DBSCAN-Clustering wird eine effektive Detektion der EBS-Partikel erreicht. Probleme der einzelnen Verfahren, wie das Nichterkennen kleiner, dunkler Partikel durch das SIFT oder Fehldetektionen an der Drehrohrwand beim Clustering Verfahren, werden durch die Kombination beider Verfahren gelöst. Im Anschluss wird basierend auf den Partikeldetektionen durch einen GNN Algorithmus unter Nutzung eines Kalman-Filters für jeden Partikel ein Tracking durchgeführt. Das Flugverhalten der Partikel kann anhand der Partikel-Tracks analysiert werden. Durch zusätzliche Beobachtung des Helligkeitsverlaufes eines Tracks ent-

lang seiner Trajektorie kann außerdem das Abbrandverhalten zeitlich und örtlich beurteilt werden.

In folgenden Arbeiten wird untersucht, inwieweit andere Tracking-Verfahren, wie etwa Probabilistic Data Association Filter (PDAF) oder Joint Probabilistic Data Association Filter (JPDAF) die Schwierigkeiten des GNN Algorithmus vor allem bei dicht liegenden Partikeln beheben können. Des Weiteren werden zusammen mit dem Kamerahersteller Versuche zur Reduktion der Ungenauigkeit der Tiefeninformation der Lichtfeldkamera durchgeführt, um ein korrektes Tracking der Partikelflugbahnen auch in 3D-Koordinaten umzusetzen.

## Literatur

1. D.-G. Lowe, "Distinctive image features from scale-invariant keypoints," in *International Journal of Computer Vision*. Band 60, Nr. 2, pp. 91–110, 2004.
2. J. M. Newby, A. M. Schaefer, P. T. Lee, M. G. Forest, and S. K. Lai, "Convolutional neural networks automate detection for tracking of submicron-scale particles in 2d and 3d," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 115, no. 36, pp. 9026–9031, 2018. [Online]. Available: <https://www.pnas.org/content/115/36/9026>
3. M. Ester, J. Sander, H.-P. Kriegel, and X. Xu, "Dbscan revisited, revisited: why and how you should (still) use dbscan," in *ACM Transactions on Database Systems*, Vol. 42, No. 3, Article 19, July 2017.
4. J. Matthes, J. Hock, P. Waibel, A. Scherrmann, H.-J. Gehrmann, and H. Keller, "A high-speed camera based approach for the on-line analysis of particles in multi-fuel burner flames," in *Experimental Thermal and Fluid Science* 73 (2016), pp. 10-17, 2016.
5. Y. Xuan, J. Pei, and Y. Wanhai, "Firing particle flow detection and tracking in sequence images," in *Proceedings of the 3rd World Congress on Intelligent Control and Automation*, 2000, pp. 2666–2670, 2000.
6. Y.-G. Guezennec, R.-S. Brodkey, N. Trigui, and J.-C. Kent, "Algorithms for fully automated three-dimensional particle tracking velocimetry," in *Experiments in Fluids* 17(1994), no. 4, pp. 209–219, 1994.
7. K. Ohmi, S. Tuladhar, and J. Hao, "Light field camera based particle tracking velocimetry," in *18th International Symposium on the Application of Laser and Imaging Techniques to Fluid Mechanics*, Lisbon, Portugal, July 2016.

8. C. Perwaß and L. Wietzke, "Single lens 3d-camera with extended depth-of-field."
9. C. Heinze, S. Spyropoulos, S. Hussmann, and L. Wietzke, "Automated robust metric calibration algorithm for 3d camera systems."
10. D.-G. Lowe, "Object recognition from local scale-invariant features," in *ICCV '99 Proceedings of the International Conference on Computer Vision. Band 2*, pp. 1150–1157, 1999.
11. P. Konstantinova, A. Udwarev, and T. Semerdjiev, "A study of a target tracking algorithm using global nearest neighbor approach," in *International Conference on Computer Systems and Technologies - CompSysTech'2003*, 2003.