



TOMOGRAPHISCHES BACKGROUND-ORIENTED SCHLIERN (BOS) ZUR VISUALISIERUNG VON LUFTSTRÖMUNGEN

Lia Benetas, Hayder Alsaad, Conrad Völker

Bauhaus-Universität Weimar, Deutschland, E-Mail: lia.benetas@uni-weimar.de

Kurzfassung

Mithilfe des Background-Oriented Schlieren (BOS) können Dichtegradienten (basierend auf Temperatur- oder Druckgradienten) in transparenten Medien (hier: Luft) visualisiert werden. Dichtegradienten verursachen eine Ablenkung des Lichts, welches mit BOS visualisiert werden kann. In der vorliegenden Arbeit werden die Grundlagen des BOS sowie die Sensitivität des Setups an der Bauhaus-Universität Weimar vorgestellt. Die Empfindlichkeit des BOS wird über die Visualisierung einer nahezu zweidimensionalen Luftströmung sowie die zeitgleiche Erfassung der Temperatur über Thermistoren auf 0,3 K ($\Delta y = 0,21 \mu\text{m}$) und darunter ermittelt. Im weiteren Verlauf werden die grundlegenden Überlegungen zum Aufbau eines tomographischen BOS zur dreidimensionalen Rekonstruktion der Dichtegradienten vorgestellt.

Abstract

Using background-oriented schlieren (BOS), density gradients in transparent media can be visualized. These density gradients are based on differences in temperature or pressure and cause reflections of the light rays which can be detected by BOS. In this article, the principles of BOS as well as the sensitivity of the current setup at the Bauhaus-University Weimar are presented. The sensitivity is determined by visualizing a nearly two-dimensional airflow and simultaneously measuring the temperature of the flow using thermistors. It was found that the BOS setup described is able to visualize temperature differences of 0,3 K ($\Delta y = 0,21 \mu\text{m}$) and less. Furthermore, fundamental considerations of a tomographic BOS setup for three-dimensional reconstruction are presented.

Grundlagen des BOS

Mit Background-Oriented Schlieren (BOS) ist es möglich, Strömungen, die auf Dichtegradienten in der Luft beruhen, zu visualisieren. Diese Dichtegradienten basieren auf Unterschieden in Temperatur oder Druck des Mediums und verursachen damit Brechungsindexgradienten (Gladstone-Dale-Beziehung). Das Licht, welches den Dichtegradienten passiert, wird in dem Maße des Brechungsindexgradienten abgelenkt (Snelliussches Brechungsgesetz). Diese Ablenkung kann nichtinvasiv über BOS dargestellt werden.

Der Aufbau des BOS an der Bauhaus-Universität Weimar besteht aus einem strukturierten Hintergrund (schwarze Pixel auf weißem Grund mit einer Kantenlänge $G = 0,22 \text{ mm}$ und $\rho = 25 \%$) und einer Kamera (Canon EOS 5DS R mit einer effektiven Auflösung von $8688 \times 5792 \text{ px}$ inkl. Objektiv ZEISS Milvus 2/135, $f = 135 \text{ mm}$) zur zweidimensionalen Aufnahme (Abbildung 1). Zusätzlich kommen Lichtquellen (Blitzlichter Elinchrom ELC Pro HD 1000) zum Einsatz, um die Hintergrundstruktur auszuleuchten. $\Delta\epsilon$ beschreibt den Ablenkungswinkel eines Lichtstrahls, der den Dichtegradienten passiert, was zu einem Integral der virtuellen Verschiebung Δy (Phasenverschiebung) auf dem Kamerasensor führt. Die Dimensionen des Aufbaus werden beschrieben durch Z_B : Abstand von Hintergrund zu Kameralinse, Z_A : Abstand von Kameralinse zu Dichtegradient, Z_D : Abstand von Dichtegradient zu Hintergrund sowie Z_i : Abstand von Kameralinse zu Bildsensor.

Die Luftströmungen, werden über den Vergleich zweier Aufnahmen (Referenz- und Messbild oder zwei Messbilder) als Verschiebungsvektoren dargestellt. Die Auswertung erfolgt über Kreuzkorrelationsalgorithmen.

Sensitivität

In anderen Studien wird BOS oftmals genutzt, um eher große Dichtegradienten zu visualisieren. Bspw. nutzte Bauknecht (2016) BOS, um großskalig die Verwirbelungen an den Rotorspitzen eines Helikopters zu visualisieren. BOS wurde ebenfalls genutzt, um Überschallgeschwindigkeiten (Cozzi und Göttlich 2019; Ota et al. 2015) oder auch Freiluftexplosionen (Mizukaki et al. 2014) abzubilden.

Um die Möglichkeiten des BOS zur Visualisierung kleiner Dichtegradienten auszuloten, wurde in der vorliegenden Studie ein steuerbarer keramischer Heizwiderstand (TE Connectivity) verwendet, um eine nahezu zweidimensionale konvektive Strömung mit sehr geringen Temperaturgradienten zu erzeugen. Die Oberflächentemperatur des Heizwiderstands wurde hierbei über die angelegte elektrische Spannung ($U = 10 - 15 \text{ V}$) geregelt. Zur Überprüfung des Temperaturgradienten wurden drei NTC- (Negative Temperature Coefficient) Thermistoren mit einer Grenzabweichung von $\pm 0,2 \text{ K}$ und einer Auflösung von $0,01 \text{ K}$ installiert, um die Temperatur direkt an der

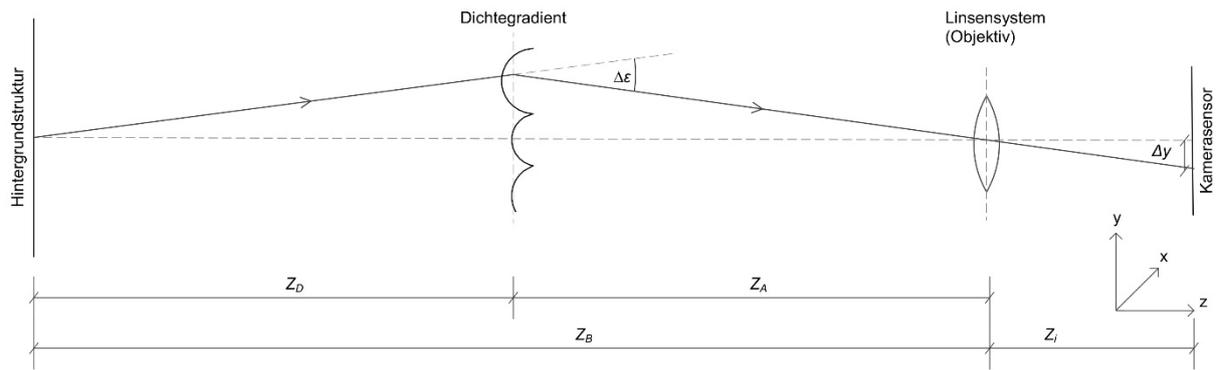


Abbildung 1: Schematisches Setup des BOS

Oberfläche des Heizwiderstands, 7 mm über dem Widerstand und die Temperatur der ungestörten Raumluft außerhalb des thermischen Plumes zu messen, siehe Abbildung 2.

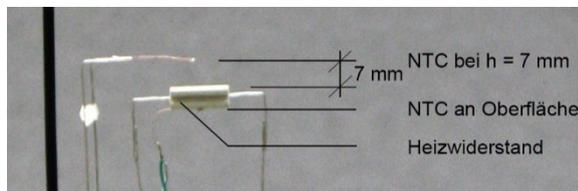


Abbildung 2: Heizwiderstand mit Position der NTCs

Die Sensoren wurden über Einzellitzen mit geringem Durchmesser angeschlossen, um kleine Messfehler zu vermeiden. Die Raumlufttemperatur betrug $\theta_{\text{room}} = 21,8 \text{ }^\circ\text{C}$. Belüftungssysteme, Heizung und Kühlung waren abgeschaltet, um störende Luftströmungen bzw. Gradienten zu vermeiden. Dies ist insbesondere bei der Visualisierung kleiner Temperaturgradienten notwendig. Für die Bildanalyse wurden Kreuzkorrelationsalgorithmen (PIVview2C) verwendet. Hierbei wird die Intensitätsverteilung der Helligkeitswerte der Mess- bzw. Referenzbilder analysiert, um die Pixelverschiebung zu bewerten (Raffel 2002). Der Verschiebungsvektor Δy zwischen Mess- und Referenzbild beschreibt den Ablenkungswinkel ϵ_y eines jeden, den Dichtegradienten passierenden Lichtstrahls. Um die Bildverschiebung zu berechnen, werden Bilddeformationsverfahren (Fensterdeformation) angewendet unter der Annahme, dass die Bewegung der Pixel innerhalb jedes Fensters etwa gleich ist (Raffel et al. 2018).

Als Beispiel zeigt Abbildung 3 eine Auswertung der konvektiven Wärmeabgabe über dem Heizwiderstand mit einer Oberflächentemperatur $\theta_{\text{surface}} = 27,1 \text{ }^\circ\text{C}$. Da der Auswertalgorithmus keine Korrelation zwischen dem Hintergrund sowie dem diesen verdeckenden Versuchsaufbau herstellen kann, erscheinen der Widerstand sowie dessen Befestigung auf dem Stativ in der Visualisierung als schwarze Bereiche mit $\Delta y > 1 \text{ px}$.

Während die Temperaturdifferenz zwischen der Oberfläche des Widerstands und der umgebenden Raumluft $\Delta\theta = 5,3 \text{ K}$ betrug, lag die Temperaturdifferenz

zwischen dem konvektiven Plume und der Raumluft in einer Höhe von 7 mm bei nur $\Delta\theta = 0,3 \text{ K}$. Abbildung 4 zeigt hierbei deutlich die zunehmende Phasenverschiebung der Pixel aufgrund des konvektiven Plumes. In einer Höhe $> 7 \text{ mm}$ ist der Temperaturgradient innerhalb des Plumes über dem Heizwiderstand wesentlich geringer und daher mit bloßem Auge nur noch schwach erkennbar.

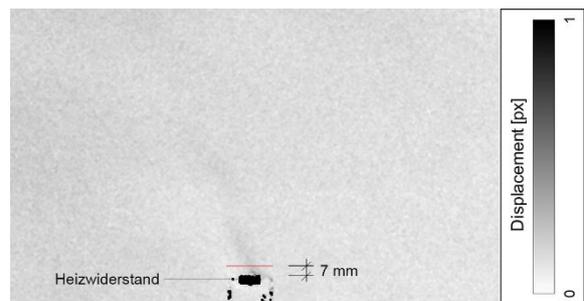


Abbildung 3: Konvektive Wärmeabgabe über dem Heizwiderstand bei $\Delta\theta = 0,3 \text{ K}$ ($h = 7 \text{ mm}$)

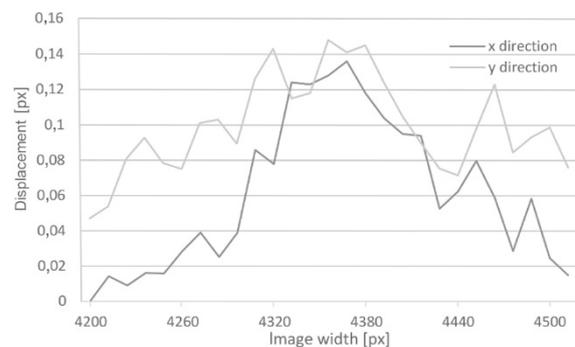


Abbildung 4: Pixelverschiebung bei $h = 7 \text{ mm}$ ($y = 4428 \text{ px}$ Bildhöhe) über dem Heizwiderstand

Die zweidimensionalen Histogramme (Abbildung 5) stellen die berechneten Verschiebungsdaten der in Abbildung 3 gezeigten Visualisierung dar, wobei die mittleren Vektoren für jedes Abfragefenster durch einen Punkt im zweidimensionalen Histogramm repräsentiert werden. Die horizontale Verschiebung liegt hauptsächlich zwischen 0,05–0,1 px, die vertikale Verschiebung hauptsächlich zwischen 0,05–0,15 px

sowie zwischen 0,5–0,6 px. Der Großteil der Verschiebungen, der in die positiv-vertikale Richtung verschoben ist, beschreibt die aufsteigende Konvektionsströmung über dem Heizwiderstand. Die Verschiebungen im negativ-vertikalen Bereich können auf kleinere Turbulenzen innerhalb der Strömung zurückzuführen sein. Die Tendenz der Verschiebung in negativ-horizontale Richtung gibt die in Abbildung 3 zu erkennende leichte Verschiebung der Strömung nach links wieder. Ausschlaggebend hierfür können kleinste Raumluftbewegungen (bspw. kalter Luftstrom am Fenster trotz Abdichtung, Luftschlitz unter der Tür, mögliche kleine Bewegungen der im Raum befindlichen Person etc.) sein.

Abbildung 5b zeigt das Rauschen der Auswertung. Es ist zu erkennen, dass das Hintergrundrauschen bei $\Delta x \ll 0,1$ px bzw. $\Delta y \ll 0,1$ px liegt und damit vernachlässigt werden kann.

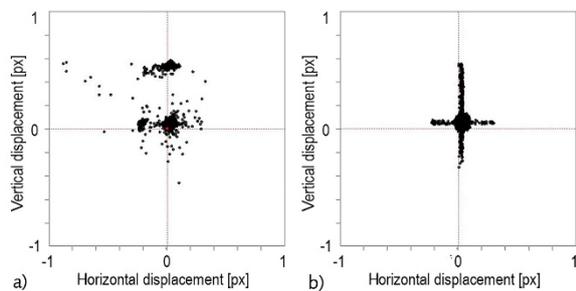


Abbildung 5: Horizontale und vertikale Verschiebung des Plumes über dem Heizwiderstand (a) und des Hintergrundrauschens (b) aus Abbildung 3

Die vorliegende Studie zeigt auf, dass BOS ebenso kleinste Dichtegradienten, die auf Temperaturunterschieden des Mediums basieren, visualisieren kann. Sobald der Dichtegradient einen bestimmten Grenzwert unterschreitet, ist BOS jedoch nicht mehr in der Lage, die Strömung darzustellen. Durch Referenzmessungen der Lufttemperatur wurde festgestellt, dass das hier beschriebene BOS in der Lage ist, Temperaturgradienten von $0,3 \text{ K} \triangleq < 0,1 \text{ px} (\triangleq 0,43 \text{ } \mu\text{m})$ Phasenverschiebung zu visualisieren. Da die räumliche Ausbreitung des Temperaturgradienten in der quantitativen Auswertung noch erkennbar ist, kann davon ausgegangen werden, dass auch Temperaturgradienten von weit weniger als $0,3 \text{ K}$ mit dem beschriebenen Aufbau dargestellt werden können. Dies macht BOS zuverlässig anwendbar für die Visualisierung von Raumluftströmungen mit sehr kleinen Temperaturgradienten.

Tomographisches BOS

Wird nur eine Kamera zur Aufzeichnung der Dichtegradienten genutzt, so kann das meist dreidimensionale Strömungsfeld sichtlinienintegrierend zweidimensional abgebildet werden. Um das aufgezeichnete Strömungsfeld dreidimensional rekonstruieren sowie

absolute Werte extrahieren zu können, ist die Entwicklung eines tomographischen BOS (TomoBOS) an der Bauhaus-Universität Weimar in Arbeit.

Atcheson et al. (2008) nutzen als erste TomoBOS, um die Dichte einer instabilen Gasströmung zu untersuchen. Weiterer Studien folgten, die TomoBOS nutzen, um bspw. kompressible Strömungen, natürliche Konvektionsströmungen oder turbulenten Flammen zu untersuchen (Cai et al. 2021; Goldhahn et al. 2009; Grauer et al. 2018; Liu et al. 2020; Nicolas et al. 2016). Die tomographische 3D-Rekonstruktion basiert auf mehreren BOS-Aufnahmen, die aus verschiedenen Blickwinkeln aufgenommen werden. Da zweidimensionale BOS-Aufnahmen die Strahlenintegrale des Brechungsindexgradienten darstellen, können diese im Prinzip tomographisch rekonstruiert werden, ähnlich den in der Medizin verwendeten Bildgebungsverfahren (Kak und Slaney 2001). Die Herausforderung beim TomoBOS besteht jedoch in der vergleichsweise geringen Anzahl von Kameras (bis zu 100 Kameras in herkömmlichen tomographischen Versuchsaufbauten vs. elf Kameras im hier gezeigten TomoBOS).

Zur fehlerfreien Erfassung des Messfelds muss vor jedem Versuch ein Kalibrierungsziel mit bekannten Geometrien und Maßen aufgezeichnet werden. Somit können mögliche Abweichungen in der Ausrichtung der Kameras vermieden sowie deren äußere Orientierung berechnet werden. Das Kalibrierungsziel muss von allen Kameras zeitgleich aufgenommen werden. Die Herausforderung besteht weiterhin darin, dass das Kalibrierungsziel von allen Kameras erfasst werden muss, weshalb sich planare Objekte als nicht geeignet erweisen. In diesem Setup wird deshalb ein unregelmäßiges Polyeder in Form einer geodätische Kugel als Kalibrierungsziel vorgesehen, siehe Abbildung 6.

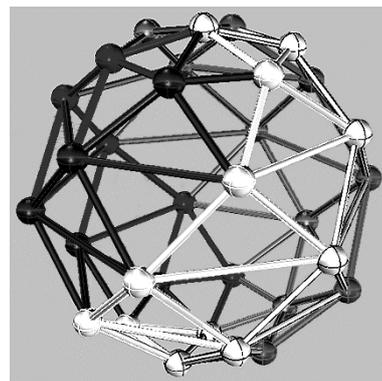


Abbildung 6: Modell der geodätischen Kugel als Kalibrierungsziel

Die Kameras werden in einem Winkel zum Phasenobjekt ausgerichtet, sodass dies mittig auf allen Kamerasensoren abgebildet wird. Daraufhin werden die Kameras mit einheitlichen Einstellungen ausgelöst. Dadurch ist es möglich, das Integral entlang des Strahlengangs aufzulösen. Wie auch beim BOS zur zweidimensionalen Auswertung werden ein Mess- und ein

Referenzbild benötigt. Für die tomographische Rekonstruktion soll insbesondere die algebraische Rekonstruktionstechnik (ART) implementiert werden. ART ist eine iterative Rekonstruktionstechnik, um die zweidimensionalen Strahldichteverteilungen zu rekonstruieren. Jede ermittelte Phasenverschiebung wird hierbei durch den Rekonstruktionsraum zurückgeworfen, in dem die Verschiebungen iterativ modifiziert werden, um jede rekonstruierte Projektion in Übereinstimmung mit der ermittelten Auswertung zu bringen (Herman und Singh 2009). Die Verknüpfung von aufeinanderfolgenden Einzelbildern führt weiterhin zu einer zeitlichen Verfolgung, die die Strömungsbahnen definiert.

Um auch im tomographischen BOS die hohe Empfindlichkeit des Systems zu gewährleisten, müssen die sensitivitätsbestimmenden Parameter neu definiert werden. Die räumlichen Abmessungen des BOS beeinflussen hierbei nicht die Empfindlichkeit der Ergebnisse. Jedoch müssen stets die veränderbaren Parameter des Setups (Auflösung Hintergrund und Kamerasensor, Brennweite des Objektivs, Abstände innerhalb des Setups) entsprechend angepasst werden, um die geforderte Darstellungsgenauigkeit zu erzielen (Becher et al. 2020).

Um ein ausgeglichenes Verhältnis von scharfer Abbildung zu Sensitivität (hohes Z_A vs. hohes Z_D) zu erzielen, wird der Dichtegradient in einem Verhältnis von $Z_A/Z_D = 1/1$ platziert. Da sich jedoch der Gesamtstand Z_B von den bisherigen 800 cm aufgrund der räumlichen Begrenzungen (Höhe und Breite des Raumes) auf 260 cm verringert, müssen die Brennweite des Objektivs (Bildausschnitt Field of View (FOV)) sowie die Auflösung der Hintergrundstruktur angepasst werden (Tabelle 1).

Tabelle 1: Parameter des 2D- und 3D-BOS

Variable	2D-BOS	3D-BOS
Abstand	$Z_B = 800$ cm $Z_D = Z_A = 400$ cm	$Z_B = 260$ cm $Z_D = Z_A = 130$ cm
Hintergrund	<u>Auflösung:</u> $G = 0,22$ mm <u>Dichte:</u> $\rho = 25$ %	<u>Auflösung:</u> $G = 0,11$ mm <u>Dichte:</u> $\rho = 25$ %
Kamera	Canon EOS 5Ds R <u>Auflösung:</u> 8688×5792 px <u>Brennweite:</u> 135 mm	Canon EOS R5 <u>Auflösung:</u> 8192×5464 px <u>Brennweite:</u> 105 mm
Belichtung	Blitzlichter Elinchrom ELC Pro HD 1000	LED-Panel (ähnlich PURPL LED Panel 33 W 3300 LM)

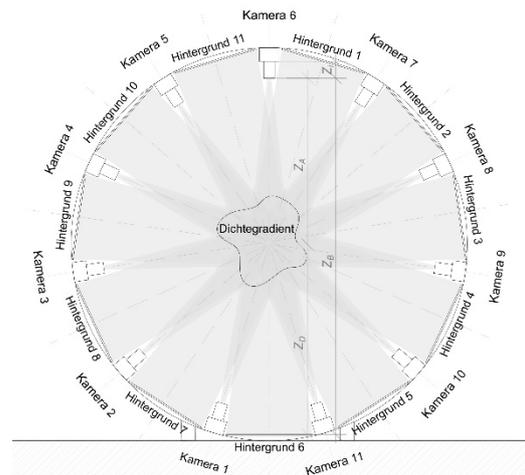


Abbildung 7: Schematische Skizze des geplanten tomographischen BOS

Abbildung 7 zeigt schematisch den Aufbau des TomoBOS. Das Setup ist in vertikaler Richtung orientiert, um freie Konvektionsströmungen, die sich in der Regel in vertikaler Richtung ausbreiten, zu erfassen. Elf Kameras sind in einem Winkel von je 33° zueinander angeordnet. Da ein möglichst großes FOV abgebildet werden soll, ist dies die maximale Anzahl an nutzbaren Kameras. Jede Kamera erfasst hierbei ein FOV von etwa 60×90 cm, was 30×45 cm in der Ebene des Dichtegradienten bei $Z_B/2 = 130$ cm entspricht.

Zusammenfassung und Ausblick

BOS ist aufgrund seiner wenigen Komponenten und des einfachen Aufbaus eine vergleichsweise simple Methode zur Visualisierung von Dichtegradienten. Auch zur Visualisierung von Raumlufströmungen, die auf kleinsten Temperaturunterschieden beruhen, eignet sich BOS bis zu einer Darstellungsgenauigkeit von 0,3 K und darunter.

Zur dreidimensionalen Auswertung der Luftströmungen soll das hier dargestellte tomographische Setup mit den beschriebenen Spezifikationen im Schlierenlabor der Professur Bauphysik der Bauhaus-Universität Weimar aufgebaut werden. Darauffolgend kann ein Algorithmus zur Rekonstruktion der einzelnen Strahlengänge entwickelt werden, um auch auf absolute Werte innerhalb des erfassten Strömungsfeldes schließen zu können.

Nach der erfolgreichen Installation des TomoBOS soll dieses an das optische Schlierenverfahren der Professur Bauphysik der Bauhaus-Universität Weimar (siehe Gena et al. (2020)) gekoppelt werden. Dabei soll sich mit dem Problem der Registrierung der 2D-Ergebnisse des Schlierenspiegels mit den 3D-Ergebnissen des BOS-Tomographie, die mit zeitlich synchronisierten und geometrisch kalibrierten Kameras erzeugt wurden, befassen werden. Die Berechnung zeitlich und räumlich veränderlicher 3D-Strömungsstrukturen soll validiert und verbessert werden. Ansatzpunkte sind dabei die räumliche Übereinstimmung der

aus mehreren Positionen erfassten Bildmerkmale sowie die Verknüpfung zeitlich aufeinander folgender Einzelbilder. Schwerpunkte können die Suche nach Korrespondenzen in den Bildern sowie die exakte geometrische Berechnung sein. Über diese Kopplung der beiden Verfahren können Dichtegradienten detailliert untersucht und rekonstruiert werden.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) (Förderkennzeichen 444059583) für die finanzielle Unterstützung der Arbeit.

Literatur

- Atcheson, B.; Ihrke, I.; Heidrich, W.; Tevs, A.; Bradley, D.; Magnor, M.; Seidel, H.-P. (2008): Time-resolved 3d capture of non-stationary gas flows. In: *ACM Trans. Graph.* 27 (5), S. 1. DOI: 10.1145/1409060.1409085.
- Bauknecht, A. (2016): Characterization of blade tip vortices on large-scale rotors. Dissertation. Leibniz Universität Hannover.
- Becher, L.; Voelker, C.; Rodehorst, V.; Kuhne, M. (2020): Background-oriented schlieren technique for two-dimensional visualization of convective indoor air flows. In: *Optics and Lasers in Engineering* 134,106282. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2020.106282.
- Cai, Shengze; Wang, Zhicheng; Fuest, Frederik; Jeon, Young Jin; Gray, Callum; Karniadakis, George Em (2021): Flow over an espresso cup: inferring 3-D velocity and pressure fields from tomographic background oriented Schlieren via physics-informed neural networks. In: *J. Fluid Mech.* 915. DOI: 10.1017/jfm.2021.135.
- Cozzi, F.; Göttlich, E. (2019): Enhanced Background Oriented Schlieren (EBOS). In: *J. Phys.: Conf. Ser.* 1249, S. 12017. DOI: 10.1088/1742-6596/1249/1/012017.
- Gena, A. W.; Voelker, C.; Settles, G. S. (2020): Qualitative and quantitative schlieren optical measurement of the human thermal plume. In: *Indoor Air*. DOI: 10.1111/ina.12674.
- Goldhahn, Erik; Alhaj, Olga; Herbst, Florian; Seume, Jörg (2009): Quantitative Measurements of Three-Dimensional Density Fields Using the Background Oriented Schlieren Technique. In: Wolfgang Nitsche und Christoph Döbriloff (Hg.): *Imaging measurement methods for flow analysis. Results of the DFG priority programme 1147 "Imaging measurement methods for flow analysis" 2003 - 2009, Bd. 106.* Berlin, Heidelberg: Springer (Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design, 106), S. 135–144.
- Grauer, S. J.; Unterberger, A.; Rittler, A.; Daun, K. J.; Kempf, A. M.; Mohri, K. (2018): Instantaneous 3D flame imaging by background-oriented schlieren tomography. In: *Combustion and Flame* 196, S. 284–299. DOI: 10.1016/j.combustflame.2018.06.022.
- Herman, Gabor T.; Singh, Sameer (Hg.) (2009): *Fundamentals of Computerized Tomography. Image Reconstruction from Projections.* 2. Aufl. London: Springer London (Springer eBook Collection Computer Science). Online verfügbar unter <http://dnb.info/997438681/34>.
- Kak, A. C.; Slaney, M. (2001): *Principles of computerized tomographic imaging.* Philadelphia, Pa.: Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM 3600 Market Street Floor 6 Philadelphia PA 19104) (Classics in applied mathematics, 33). Online verfügbar unter http://epubs.siam.org/ebooks/siam/classics_in_applied_mathematics/cl33.
- Liu, Hecong; Shui, Chongyuan; Cai, Weiwei (2020): Time-resolved three-dimensional imaging of flame refractive index via endoscopic background-oriented Schlieren tomography using one single camera. In: *Aerospace Science and Technology* 97, S. 105621. DOI: 10.1016/j.ast.2019.105621.
- Mizukaki, T.; Wakabayashi, K.; Matsumura, T.; Nakayama, K. (2014): Background-oriented schlieren with natural background for quantitative visualization of open-air explosions. In: *Shock Waves* 24 (1), S. 69–78. DOI: 10.1007/s00193-013-0465-4.
- Nicolas, F.; Todoroff, V.; Plyer, A.; Le Besnerais, G.; Donjat, D.; Micheli, F. et al. (2016): A direct approach for instantaneous 3D density field reconstruction from background-oriented schlieren (BOS) measurements. In: *Exp Fluids* 57 (1). DOI: 10.1007/s00348-015-2100-x.
- Ota, M.; Leopold, F.; Noda, R.; Maeno, K. (2015): Improvement in spatial resolution of background-oriented schlieren technique by introducing a telecentric optical system and its application to supersonic flow. In: *Experiments in Fluids* 56 (3), S. 201. DOI: 10.1007/s00348-015-1919-5.
- Raffel, M. (2002): *Optische Untersuchungen in technischen Strömungen unter besonderer Berücksichtigung eines Verfahrens zur Detektion von Dichtegradienten.* Zugl.: Clausthal, Techn. Univ., Habil.-Schr., 2001. 1. Aufl. Clausthal-Zellerfeld: Papierflieger.
- Raffel, M.; Willert, C. E.; Scarano, F.; Kähler, C. J.; Wereley, S. T.; Kompenhans, J. (2018): *Particle image velocimetry. A practical guide / by Markus Raffel, Christian E. Willert, Fulvio Scarano, Christian J. Kähler, Steve T. Wereley, Jürgen Kompenhans.* Cham: Springer.