

# **REVIEW VISUALISASI SCHLIEREN PADA TEROWONGAN ANGIN SUPERSONIK (REVIEW of SCHLIEREN VISUALIZATION in SUPERSONIK WIND TUNNEL)**

**Jefri Abner Hamonangan**  
Pusat Teknologi Penerbangan  
Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN)  
e-mail: jefri.abner@lapan.go.id

Diterima: 27 Juli 2018; Direvisi: 07 Februari 2019; Disetujui: 5 Maret 2019

## **ABSTRACT**

Wind tunnel is a facility that simulates an airflow with a variety of speed through an object. Researchers and engineers use wind tunnel to observe and to evaluate the object behavior in a certain speed of air. There are two methods to observe the object behavior in wind tunnel, with balance and with visualization by Schlieren method. This paper will present the visualization method and the Schlieren apparatus as the instrument in use for visualization in a wind tunnel.

Keyword: *Visualization, Schlieren, Wind Tunnel, Supersonik,*

## **ABSTRAK**

Terowongan angin merupakan sebuah fasilitas yang mensimulasikan aliran udara dengan berbagai variasi kecepatan pada sebuah benda. Peneliti dan perekayasa menggunakan terowongan angin untuk mengamati dan mengevaluasi perilaku sebuah benda pada kecepatan udara tertentu. Terdapat dua metode dalam proses pengamatan perilaku benda pada pengujian terowongan angin, yaitu dengan menggunakan *balance* dan visualisasi dengan menggunakan Schlieren.

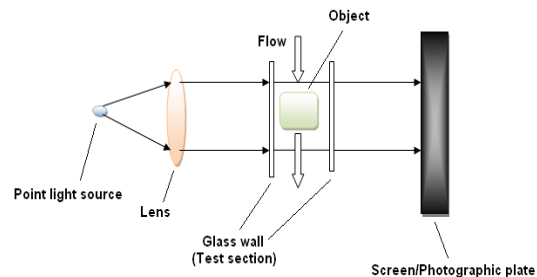
Kata kunci: *Visualisasi, Schlieren, Terowongan Angin, Supersonik*

## 1 PENDAHULUAN

Ada beberapa metode yang biasa digunakan untuk memvisualisasikan densitas atau perubahan indeks bias cairan, gas, dan benda padat seperti: *shadowgraph*, Schlieren dan interferometri. Metode-metode tersebut berguna untuk memvisualisasikan perubahan suhu, gelombang kejut di terowongan angin, area *non-homogen* pada lembar kaca, dan lain-lain. Pola konveksi. Dalam makalah ini, kita akan membahas metode Schlieren dan aplikasi sebagai visualisasi dalam terowongan angin supersonik. Kata "Schlieren" itu sendiri berasal dari bahasa Jerman "Schliere" yang berarti pola seperti garis (Bunjong, Pussadee, & Wattanakasiwich, 2018).

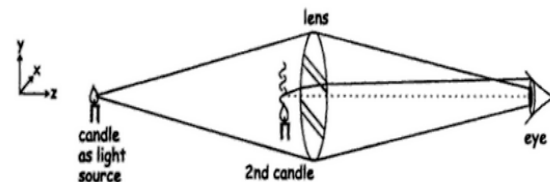
Metode Schlieren dan *shadowgraph* merupakan metode yang hampir mirip, yaitu bahwa perbedaan indeks bias pada media transparan seperti fluida, udara dan air dapat membiaskan atau membelokkan cahaya (Settles, 2018; Settles & Hargather, 2017). Tetapi ada beberapa perbedaan dari kedua teknik tersebut. Pada metode *shadowgraph*, gambar yang dihasilkan bukanlah gambar optik yang difokuskan; itu merupakan sebuah bayangan (Imano, 2014; Kudo, 2015). Metode Schlieren dan *shadowgraph* terkait erat tetapi ada beberapa perbedaan. Schlieren sering digunakan untuk memvisualisasikan dua distribusi gradien indeks bias dimensi dalam media transparan yang homogen (Ting & Chen, 2013). Gambaran Schlieren, merupakan gambar optik yang dibentuk oleh lensa. Kedua, metode Schlieren memerlukan ujung pisau (*knife edge*) untuk memotong cahaya yang dibiaskan, hal ini tidak diperlukan pada metode *shadowgraph*. Yang terakhir, tingkat iluminasi Schlieren mengacu pada turunan spasial pertama dari indeks bias pada Schlieren  $\frac{\partial n}{\partial x}$  (Mier & Hargather, 2016) sedangkan pada

*shadowgraph* mengacu pada turunan spasial kedua atau laplace  $\frac{\partial^2 n}{\partial^2 x}$  (Mier & Hargather, 2016) (Settles, 2001b). Pengaturan formasi untuk teknik *shadowgraph* dapat dilihat di Gambar 1-1.



Gambar 1-1: Skematik teknik *shadowgraph*

Robert Hooke menemukan metode Schlieren pada 1665 dengan menggunakan lensa cembung besar dan dua lilin. Satu lilin berfungsi sebagai sumber cahaya, cahaya dari lilin kedua ditempatkan di dekat lensa, membiaskan beberapa sinar cahaya dengan sangat kuat sehingga jatuh di luar pupil dan terhalang, sehingga menampilkan gumpalan konvektif transparan dari lilin melalui perubahan intensitas cahaya yang dapat dilihat oleh mata. Metode ini kemudian digunakan oleh fisikawan Prancis Léon Foucault (1858) untuk menguji permukaan optik cermin untuk digunakan dalam teleskop. Skematik sistem schliern Hooke ditunjukkan pada Gambar 1-2.



Gambar 1-2 Sistem Schlieren Hooke

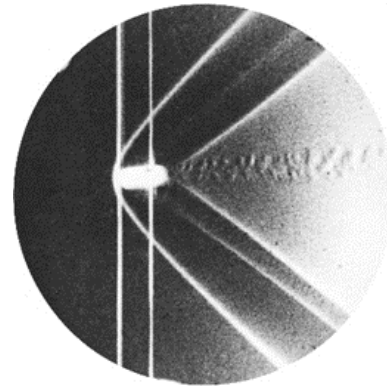
Namun August Toepler (1864), seorang dosen fisika dan kimia di Royal Agricultural College di Bonn -

Poppelsdorf, Jerman, merancang modifikasi metode Schlieren yang disebut "metode Schlieren Toepler", yang terbukti paling berguna dalam dinamika fluida (Krehl, 2009). Menggunakan metode Hooke Toepler mengamati gelombang berbentuk bola di udara yang disebabkan oleh pelepasan hentakan keras, dia pikir dia melihat suara ketika yang sebenarnya dia lihat adalah gelombang kejut. Dia menamai teknik ini "Metode Schlieren" dan meskipun teknologi telah berkembang secara signifikan, namanya metode ini tetap tidak berubah. Menurut (Heineck, Banks, Schairer, Haering, & Bean, 2016; Ravas & Syrova, 2014), metode Schlieren sebagai salah satu metode visualisasi optik didasarkan pada perubahan yang terjadi dalam penyerapan foton yang ditransmisikan melalui bahan yang transparan. Metode Schlieren dapat membuat pengukuran besarnya defleksi cahaya yang melalui objek yang transparan menjadi mungkin (Harvey, Smithson, & Siviour, 2018; Kleine, 2013; Smits & Lim, 2000; Srivastava, 2013).

Pada 1880-an, Ernst Mach dan rekan-rekannya menggunakan metode Schlieren untuk mengamati tembakan. Pengamatan ini menjadi penting untuk bidang-bidang baru balistik dan akhirnya nama Mach dikaitkan dengan rasio kecepatan non dimensional dari sebuah benda ( $V$ ) terhadap kecepatan suara (Heineck et al., 2016).

Metode Schlieren memberikan sudut defleksi dari cahaya datang dan sangat sensitive terhadap turunan pertama densitas.

Selain itu, sistem ini lebih disukai ketika indeks bias bervariasi secara bertahap. Ini digunakan untuk mempelajari aliran berkecepatan tinggi dalam rentang kecepatan transonik dan supersonik.



Gambar 1-3 : Foto hasil percobaan Ernst Mach busur gelombang kejut pada peluru supersonik (Steinhauser, 2018).

## 2 DASAR TEORI

Teori yang mendasari metode Schlieren adalah refraksi. Indeks refraksi menggambarkan bagaimana kecepatan cahaya berubah ketika berinteraksi dengan benda (Bachmann, Martyanov, Moody, Pukhov, & Muggli, 2017; Zhang, Su, Yang, & Mi, 2013).

$$n = \frac{c_0}{c} \quad (2-1)$$

$n$  = indeks refraksi  $> 1$

$c_0$  = kecepatan cahaya pada ruang vakum ( $3 \times 10^8$  m/s)

$c$  = Kecepatan cahaya pada medium tertentu.

Untuk menunjukkan korelasi antara  $n$  dengan densitas gas dapat dilihat dari persamaan (2-2).

$$n - 1 = k_p \quad (2-2)$$

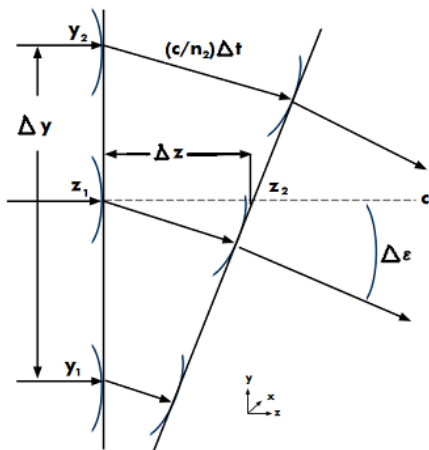
$n - 1$  = refraktifitas

$\rho$  = densitas gas

$k_p$  = Koefisien Gladstone – Dale

• **Refraksi Cahaya Saat Melewati Sebuah Benda**

Persamaan yang ditampilkan di sini adalah penyederhanaan teori propagasi gelombang kompleks karena teori tersebut hanya menggambarkan jejak sinar cahaya dibiaskan (Bui & Hauser, 2015).



Gambar 2-1 : Defleksi cahaya dengan gradien indeks refraksi  $\partial n/\partial y$  (Mayinger, 2014).

Untuk menyajikan dekonstruksi yang lebih sederhana dari refraksi cahaya Schlieren, kita mengasumsikan gradien bias-indeks negatif vertikal  $\partial n / \partial y < 0$ , dan tidak ada gradien dalam arah x atau z (Mayinger, 2014).

Sebuah gelombang cahaya yang awalnya vertikal menjadi tergeser setelah melintas melalui objek Schlieren. Jika mencakup jarak diferensial dalam waktu diferensial,  $\Delta z/\Delta t$ , itu dibiaskan melalui sudut pembiasan  $\Delta \epsilon$ . Berdasarkan Gambar 2-1 maka di dapat persamaan (2-3):

$$\Delta \epsilon = \frac{\frac{c}{n_2} - \frac{c}{n_1}}{\Delta y} \Delta t \tag{2-3}$$

Jika persamaan ini digabungkan dengan persamaan untuk turunan terhadap waktu:

$$\Delta t = \Delta z \cdot \frac{n}{c} \tag{2-4}$$

Setelah di sederhanakan didapat persamaan:

$$\Delta \epsilon = \frac{n}{n_1 n_2} \frac{n_1 - n_2}{\Delta y} \Delta z \tag{2-5}$$

Persamaan (2-5) dapat disederhanakan dengan membiarkan nilai yang diketahui mendekati nol dan menyederhanakan  $\frac{n}{n_1 n_2}$  menjadi  $\frac{1}{n}$  sehingga didapat:

$$\frac{d\epsilon}{dz} = \frac{1}{n} \frac{dn}{dy} \tag{2-6}$$

Karena  $\epsilon$  merupakan sudut yang sangat kecil dan dapat dianggap setara dengan  $dy/dz$  slope dari cahaya yang dibiaskan adalah:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial z^2} = \frac{1}{n} \frac{dn}{dy} \tag{2-7}$$

Menghubungkan pergeseran cahaya yang dibiaskan ( $\partial z^2$ ) terhadap besaran gradien indeks bias maka defleksi angular dari cahaya pada arah x dan ya adalah (Mayinger, 2014):

$$\epsilon_y = \frac{1}{n} \int \frac{\partial n}{\partial y} \partial z \text{ dan } \epsilon_x = \frac{1}{n} \int \frac{\partial n}{\partial x} \partial z \tag{2-8}$$

$$\epsilon_y = \frac{L}{n} \frac{\partial n}{\partial y} \text{ dan } \epsilon_x = \frac{L}{n} \frac{\partial n}{\partial x} \tag{2-9}$$

**3 PERANGKAT SCHLIEREN PADA TEROWONGAN TEROWONGAN ANGIN SUPERSONIK**

Pada bagian ini akan dibahas mengenai terowongan angin supersonik dan penggunaan perangkat Schlieren dalam pengujian di terowongan angin.

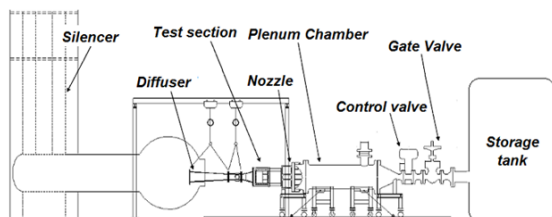
**3.1 Terowongan Angin Supersonik**

Terowongan angin adalah alat/fasilitas yang digunakan oleh peneliti untuk mengukur atau memantau perilaku suatu objek dalam

aliran udara. Pengoperasian terowongan angin didasarkan pada pengujian model skala - dari objek yang akan di uji (Ilić, Miloš, Milosavljević, & Isaković, 2016) Dalam pengujian terowongan angin, kecepatan udara, gaya dan momen pengukuran benda uji adalah beberapa variabel yang perlu diketahui peneliti. Perangkat Schlieren juga memainkan peran penting dalam uji terowongan angin, visualisasi dapat membantu peneliti mengidentifikasi perilaku desain mereka pada kecepatan angin tertentu. Berdasarkan kecepatan operasinya, terowongan angin dibagi menjadi beberapa klasifikasi (Krause, 2005) :

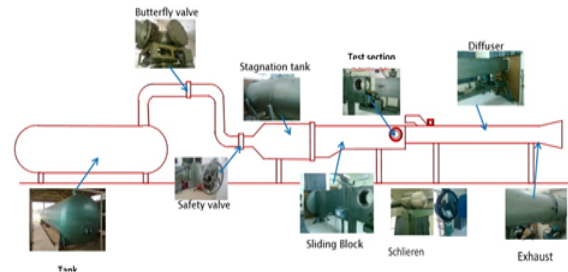
- *Subsonic tunnel (incompressible)*  $0 < Ma < 0.25$
- *Subsonic tunnel (compressible)*  $0.25 < Ma < 0.8$
- *Transonic tunnel*  $0.8 < Ma < 1.2$
- *Supersonic tunnel*  $1.2 < Ma < 5$
- *Hypersonic tunnel*  $5 < Ma$

Ma di sini merupakan bilangan Mach/ Mach number yang bukan merupakan sebuah satuan. Bilangan Mach adalah perbandingan antara kecepatan relatif sebuah objek dengan kecepatan suara (Balachandran, 2006). Terowongan angin supersonik dirancang untuk menghasilkan kecepatan udara supersonik untuk analisis aerodinamik dan pengujian pada model skala dalam kondisi pengujian yang terkendali (Nazarian Shahrababaki, Bazazzadeh, Dehghan Manshadi, & Shahriari, 2014).



Gambar 3-1 : Skematik terowongan angin supersonik (Nazarian Shahrababaki et al., 2014).

Pada Gambar 3-1 ditunjukkan desain skematik terowongan angin supersonik. Desain tersebut berlaku secara umum. Pada Gambar 3-2 ditunjukkan desain terowongan angin supersonik milik LAPAN.



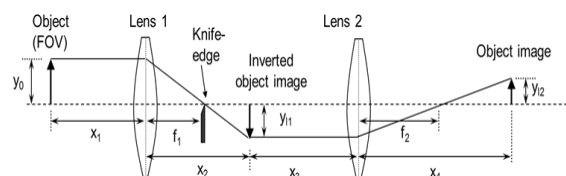
Gambar 3-2 : Skematik terowongan angin supersonik LAPAN.

### 3.2 Perangkat Schlieren

Pengaturan aparat Schlieren menggunakan persamaan lensa Gaussian:

$$\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_2} = \frac{1}{f_1} \text{ dan } \frac{1}{x_3} + \frac{1}{x_4} = \frac{1}{f_2} \quad (3-1)$$

Pada Gambar 3-3 ditampilkan susunan perangkat Schlieren.



Gambar 3-3 : Skematik pemasangan perangkat Schlieren.

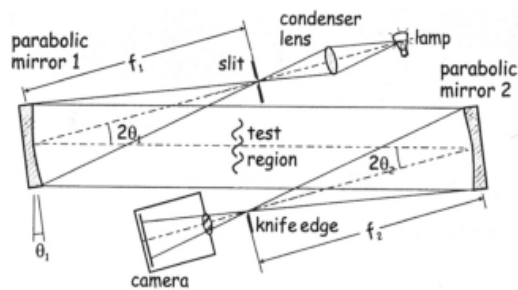
Dengan penggunaan lensa atau cermin parabola, kita dapat membuat objek gambar lebih besar dari yang nyata dengan pembesaran ( $y_0 > y_{11}$ ). Rasio perbesaran objek didapatkan melalui persamaan (3-2).

$$M = \frac{y_{12}}{y_0} = \frac{x_4 x_2}{x_3 x_1} \quad (3-2)$$

Dengan batasan:

$$\begin{aligned} x_1 &> f_1 \\ x_3 &> f_2 \\ \sum_{i=1}^4 x_i &< L \end{aligned}$$

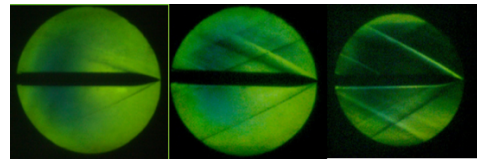
Dengan menggunakan persamaan tersebut, formasi peletakan perangkat Schlieren dibagi menjadi 2 formasi yaitu formasi I dan formasi Z. Dengan formasi I kita akan membutuhkan lebih banyak ruang untuk mengatur Schlieren, tergantung pada panjang fokus. Jika kita tidak memiliki cukup ruang, pengaturan formasi Z akan menjadi solusi yang baik.



Gambar 3-4 : Skematik pemasangan perangkat Schlieren formasi Z (Cristofolini, Neretti, Roveda, & Borghi, 2012).

Formasi I sudah ditampilkan pada Gambar 3-3. Sedangkan untuk formasi Z ditampilkan pada Gambar 3-3. Dengan bantuan perangkat Schlieren dalam pengujian di terowongan supersonik, kita dapat mengamati gelombang kejut yang tidak dapat dilihat oleh mata manusia.

Gambar 3-6 menunjukkan pengamatan gelombang kejut yang dihasilkan dengan menggunakan perangkat Schlieren. Pengujian dilakukan di terowongan angin supersonik milik LAPAN. Tetapi gelombang kejut dapat menimbulkan efek yang dapat diamati oleh mata manusia tanpa alat bantu apapun. Hal ini dapat berupa uap air, gangguan pada debu, gelombang pada air, atau gangguan optik dan bayangan seperti contoh pada Gambar 3-7.



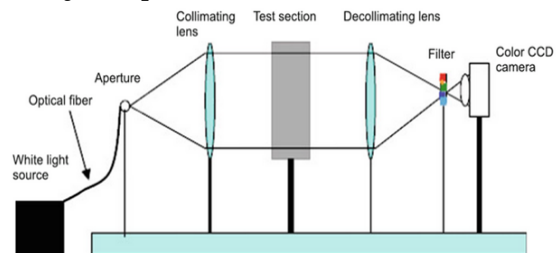
Gambar 3-6: Gelombang kejut yang tampak dengan menggunakan perangkat Schlieren.



Gambar 3-7: Gelombang kejut yang dihasilkan pesawat temur pada permukaan air (Amann, 2007).

### 3.3 Rainbow Schlieren.

Metode *rainbow* Schlieren pertama kali dikembangkan oleh Holder dan North (1952), saat mereka menggunakan prisma yang lemah untuk menguraikan atau memecah sinar menjadi spektrum.

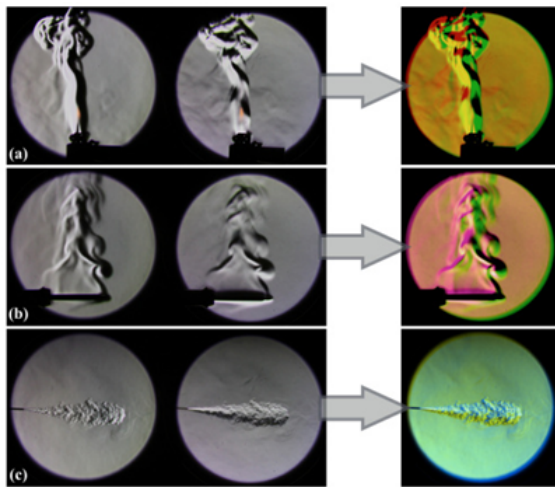


Gambar 3-8 : Skematik pengaturan perangkat *rainbow* Schlieren (Panigrahi & Muralidhar, 2012).

*Rainbow* Schlieren menyediakan kuantifikasi pembiasan cahaya melalui penggunaan filter *cutoff* warna sebagai pengganti *knife edge* yang biasa digunakan pada Schlieren monokrom (Hargather & Settles, 2012). Kelebihan dari metode ini adalah variasi warna yang



dihasilkan berdasarkan perbedaan tekanan. Mata manusia lebih bisa membedakan berdasarkan variasi warna.



Gambar 3-9 : Contoh perbandingan Schlieren monokrom dan *rainbow* Schlieren: a) nyala dari pemantik, b) solder panas, c) semburan dari aerosol (Chaloupka, Woods, Aas, Hutchins, & Thistle, 2014).

#### 4 KESIMPULAN

Metode Schlieren tampaknya sederhana, tetapi sistem pencitraan Schlieren memberikan teknik yang kuat untuk memvisualisasikan perubahan atau ketidakseragaman dalam indeks bias udara atau media transparan lainnya. Dalam uji terowongan angin, pencitraan Schlieren baik monokrom maupun *rainbow* Schlieren dapat membantu peneliti untuk menganalisis objek desain mereka dan menggunakannya untuk pengembangan lebih lanjut.

#### UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terima kasih saya ucapkan kepada Kepala Pusat Teknologi Penerbangan yang telah memberikan fasilitas uji terowongan angin supersonik untuk melakukan eksperimen yang dipakai dalam penulisan KTI ini. Juga kepada bapak Agus Aribowo yang telah

memberi masukan dalam melakukan eksperimen di terowongan angin supersonik begitu juga teman-teman yang berada di lab Aerodinamika yang membantu dalam kegiatan pengujian. Kemudian kepada bapak Atik Bintoro yang telah memberikan semangat dan bimbingan dalam metode penulisan KTI yang baik. Juga kepada tim redaksi Jurnal Teknologi Dirgantara yang telah membolehkan penulis untuk memasukkan KTI yang telah dibuat.

#### DAFTAR RUJUKAN

- Amann, J. (Producer). (2007, 26/07/2018). McDonnell Douglas F/A-18A Hornet Shockwave. Retrieved from <http://www.airliners.net/photo/USA-Navy/McDonnell-Douglas-F-A-18A-Hornet/1286859/L>
- Bachmann, A. M., Martyanov, M., Moody, J., Pukhov, A., & Muggli, P. (2017). Schlieren imaging for the determination of the radius of an excited rubidium column. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.12.062>
- Balachandran, P. (2006). *Fundamentals of Compressible Fluid Dynamics*: PHI Learning.
- Bui, D. A., & Hauser, P. C. (2015). Analytical devices based on light-emitting diodes – a review of the state-of-the-art. *Analytica Chimica Acta*, 853, 46-58. doi:<https://doi.org/10.1016/j.aca.2014.09.044>
- Bunjong, D., Pussadee, N., & Wattanakasiwich, P. (2018). *Optimized conditions of Schlieren photography*. Paper presented at the Journal of Physics: Conference Series.
- Chaloupka, J. L., Woods, M., Aas, J., Hutchins, J., & Thistle, J. D. (2014). Color Schlieren imaging with a two-path, double knife edge system. *Optiks*

- Express*, 22(7), 8041-8046.  
doi:10.1364/OE.22.008041
- Cristofolini, A., Neretti, G., Roveda, F., & Borghi, C. (2012). Schlieren imaging in a dielectric barrier discharge actuator for airflow control. *Journal of Applied Physics*, 111. doi:10.1063/1.3682488
- Hargather, M. J., & Settles, G. S. (2012). A comparison of three quantitative Schlieren techniques. *Optiks and Lasers in Engineering*, 50(1), 8-17. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.optlaseng.2011.05.012>
- Harvey, J. S., Smithson, H. E., & Siviour, C. R. (2018). Visualization of acoustic waves in air and subsequent audio recovery with a high-speed Schlieren imaging system: Experimental and computational development of a Schlieren microphone. *Optiks and Lasers in Engineering*, 107, 182-193. doi:<https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2018.03.015>
- Heineck, J. T., Banks, D., Schairer, E. T., Haering, E. A., & Bean, P. (2016). Background Oriented Schlieren (BOS) of a Supersonic Aircraft in Flight. In *AIAA Flight Testing Conference: American Institute of Aeronautics and Astronautics*.
- Ilić, B., Miloš, M., Milosavljević, M., & Isaković, J. (2016). Model-based stagnation pressure control in a supersonic wind tunnel. *FME Transaction*, 44(1), 1-9. doi:10.5937/fmet16010011
- Imano, K. (2014). Optical observation method for ultrasonic field using the *shadowgraph* introducing pulse inversion averaging. *IEICE Electronics Express*, 11(17). doi:10.1587/elex.11.20140510
- Kleine, H. (2013). Schlieren Imaging and the Real World. *Journal of Visualization*, 16(3).
- Krause, E. (2005). *Fluid Mechanics: With Problems and Solutions, and an Aerodynamics Laboratory*: Springer.
- Krehl, P. O. K. (2009). *History of Shock Waves, Explosions and Impact*: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Kudo, N. (2015). Optical methods for visualization of ultrasound fields. *Japanese Journal of Applied Physics*, 54(7). doi:10.7567/JJAP.54.07HA01
- Mariani, R., Zang, B., Lim, H. D., Vevek, U. S., New, T. H., & Cui, Y. D. (2019). A comparative study on the use of Calibrated and *Rainbow* Schlieren techniques in axisymmetric supersonic jets. *Flow Measurement and Instrumentation*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2019.01.007>
- Mayinger, F. (2014). *Optikal Measurements: Techniques and Applications*: Springer Berlin Heidelberg.
- Mier, F. A., & Hargather, M. J. (2016). Color gradient background-oriented Schlieren imaging. *Experiments in Fluids*, 57(6), 95. doi:10.1007/s00348-016-2183-z
- Nazarian Shahrabaki, A., Bazazzadeh, M., Dehghan Manshadi, M., & Shahriari, A. (2014). Intelligent Controller Design for a Blowdown Supersonic Wind Tunnel. *International Journal of Control and Automation*, 7, 409-426. doi:10.14257/ijca.2014.7.1.37
- Panigrahi, P. K., & Muralidhar, K. (2012). *Rainbow* Schlieren. In *Schlieren and Shadowgraph Methods in Heat and Mass Transfer* (pp. 47-61). New York, NY: Springer New York.
- Ravas, R., & Syrova, L. (2014). The Analysis of Properties of Schlieren Color Images. *Procedia Engineering*, 69, 57-62. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2014.02.203>
- Settles, G. S. (2001a). *Schlieren and Shadowgraph Techniques : Visualizing Phenomena in Transparent Media*: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Settles, G. S. (2001b). *Schlieren and Shadowgraph Techniques: Visualizing Phenomena in Transparent Media*: Springer Berlin Heidelberg.



- Settles, G. S. (2018). Smartphone Schlieren and *shadowgraph* imaging. *Optiks and Lasers in Engineering*, 104, 9-21. doi:<https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2017.07.002>
- Settles, G. S., & Hargather, M. J. (2017). A review of recent developments in Schlieren and *shadowgraph* techniques. *Measurement Science and Technology*, 28(4), 042001. doi:10.1088/1361-6501/aa5748
- Smits, A. J., & Lim, T. T. (Eds.). (2000). *Flow Visualization*: IMPERIAL COLLEGE PRESS
- Srivastava, A. (2013). Development and application of color Schlieren technique for investigation of three-dimensional concentration field. *Journal of Crystal Growth*, 383, 131-139. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2013.09.001>
- Steinhauser, M. O. (2018). *Multiscale Modeling and Simulation of Shock Wave-Induced Failure in Materials Science*: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Ting, C.-C., & Chen, C.-C. (2013). Detection of gas leakage using microcolor Schlieren technique. *Measurement*, 46(8), 2467-2472. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2013.04.073>
- Zhang, W., Su, X.-y., Yang, Y., & Mi, C. (2013). *A new method for measuring the refractive index of glass*. Paper presented at the International Conference on Optikal Instruments and Technology: Optikal Systems and Modern Optoelectronic Instruments, Beijing, China.

