

Geschwindigkeiten und Temperaturen im Formierungsbereich eines Auftriebsstrahls über horizontalen Wärmequellen

Velocity and Temperature Distribution in the forming layer of plume of horizontal surfaces

Christian Friebe*, Huang Yongle, Carsten Heinrich***

*Institut für Luft- und Kältetechnik, Bertolt-Brecht-Allee 20, 01309 Dresden

**Technische Universität Dresden, Elektrotechnik, Automatisierungs- und Regelungstechnik

Auftriebsstrahl, Konvektion, Temperatur, Geschwindigkeit

Plume, convection, buoyancy, temperature, velocity

Zusammenfassung

Diese Untersuchung befasst sich mit der Temperatur- und Geschwindigkeitsgrenzschicht im Formierungsbereich von Auftriebsstrahlen über horizontalen Flächen. Die Experimente werden an rechteckigen Flächen unterschiedlicher Aspektverhältnisse mit Übertemperaturen zwischen 5 K bis 100 K durchgeführt. Die Untersuchungen finden mit Luft ($Pr = 0,72$) statt. Die Heizfläche beträgt 200 mm x 50 mm. Im ersten Teil der Arbeiten wird die Bestimmung der Temperatur mit einem Hintergrund-Schlieren-Verfahren vorgestellt.

Einleitung

Die Ausbildung einer freien Konvektion über horizontalen, wärmeabgebenden Flächen spielt in vielen technischen Belangen eine wichtige Rolle. Aufgrund von Dichteunterschieden zwischen dem ruhenden Fluid der Umgebung und der sich über der Fläche erwärmenden Luft entsteht eine Bewegung in dem Fluid. Das Fluid bewegt sich entgegen der Gravitationskraft. An den Grenzen zwischen dem sich bewegenden Fluid und der ruhenden Umgebung verursachen die viskosen Kräfte der Scherschicht die Induktion von weiterem Fluidmassen in die Strömung. Abbildung 1 zeigt verschiedene Formen von Auftriebsstrahlen nach Chen & Rodi (1980). Die Betrachtungen in diesem Artikel konzentrieren sich auf den freien Auftriebsstrahl (Abb. 1 (b)).

Entlang der Ausbreitungsrichtung des Freistrahles werden die Bereiche Strahlformierung, Übergangsbereich und ausgebildeter Strahl unterschieden. Aufgrund der Zugänglichkeit mit Messtechnik wurde anfangs der Bereich des ausgebildeten Freistrahles untersucht (z.B. Schmidt, 1941, Yih, 1951). Die Analyse der Strömung über einem langen Zeitraum und theoretische Betrachtungen führten zu den bekannten mathematischen Beschreibungen des ausgebildeten Freistrahles. Kurzfristige auftretende instationäre und turbulente Ereignisse werden jedoch in diesen Formulierungen nicht berücksichtigt. Moderne, bildgebende Verfahren ermöglichen es, Temperaturen und Geschwindigkeiten auch in grenznahen Schichten zu untersuchen, ohne die Strömungsformierung zu beeinflussen.

In einem ersten Arbeitsschritt wird die Temperaturmessung untersucht.

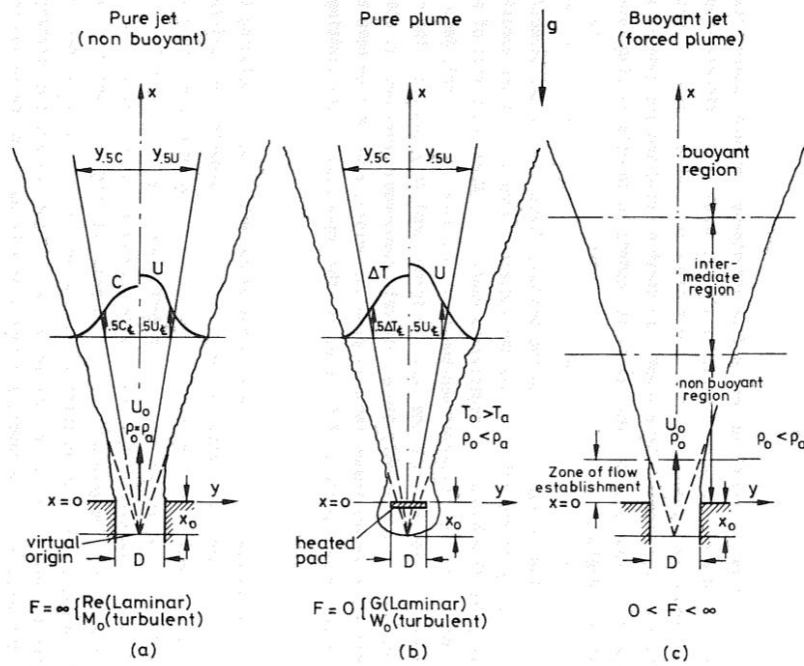


Abb. 1: Darstellung verschiedener Strahlformierungen (Chen & Rodi 1980) (a) Freistrahle (b) Auftriebsstrahl (c) Auftriebsstrahl mit Anfangsmoment

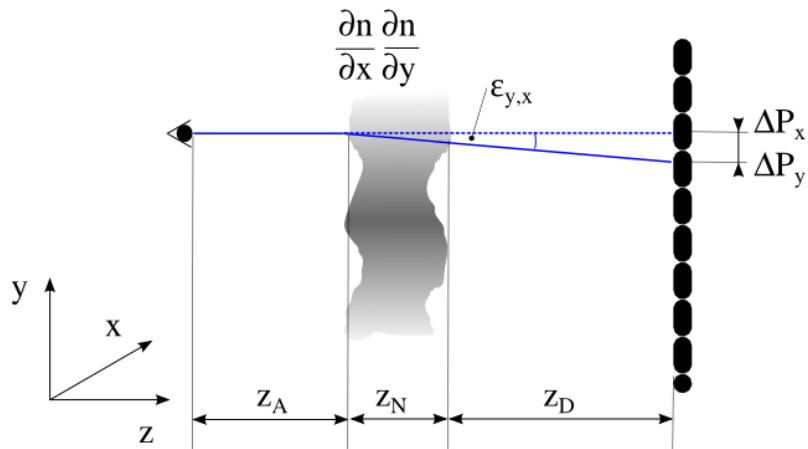


Abb. 2: Prinzipdarstellung der Verschiebung des Hintergrundes durch einen Gradienten des Brechungsindex in der optischen Achse

Verfahren und Versuchsstand

Die Bestimmung der Temperatur erfolgt mit einem Hintergrund-Schlieren-Verfahren (BOS). Abbildung 2 zeigt die Veränderung der optischen Achse, wenn sich ein Medium mit einem Gradienten des Brechungsindex (z.B. warme Luft über heißem Asphalt) in der optischen Achse befindet.

Die Verschiebung des Hintergrundes und die Veränderung des Brechungsindex im Medium haben nach Pedrotti et al. (1996) und Raffel et al. (2007) folgende formale Zusammenhänge.

$$\epsilon_x = \int \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial x} dz$$

Gradienten in der x-Richtung führen zu einer Veränderung in der x-Richtung. Gleiches gilt für Gradienten in der y-Richtung. Gradienten in der optischen Achse z haben keinen Einfluss. Die Verschiebung des Hintergrundes kann fotometrisch bestimmt werden. Wie aus der Gleichung des Weiteren ersichtlich ist, führt die Integration aller normal zu der Betrachtungsrichtung stehenden Gradienten zu der Gesamtverschiebung oder auch Verzerrung des Hintergrundes. Eine Auflösung von unterschiedlichen Brechungsindizes in der z-Richtung ist mit diesem dargestellten Verfahren nicht möglich. Nach Raffel et al. (2007) und Hugenschmidt (2007) kann die Verschiebung aus den optischen Eigenschaften berechnet werden, so dass die Gleichung

$$\Delta P_x = z_D M \epsilon_x$$

gilt. M ist die optische Vergrößerung. Das Zusammenführen der beiden Gleichungen führt zur Beziehung des Brechungsindex.

$$n = n_0 e^{\frac{1}{z_D z_N M} \int \Delta P_x \partial x}$$

Für die Berechnung des gesuchten Temperaturfeldes wird die Gladstone-Dale-Beziehung nach Gladstone & Dale (1863)

$$n - 1 = K \rho$$

und die allgemeine Gasgleichung angewendet.

$$p V = m R T$$

Somit kann aus der Verschiebung einzelner Pixel eines Hintergrundes und den optischen Eigenschaften des Systems die Temperatur berechnet werden.

Versuchsaufbau und -durchführung

Die Untersuchungen erfolgten an einer horizontalen Heizfläche (50x200 mm²) bei einer Oberflächentemperatur von ca. 60°C (siehe Abbildung 3). Aufgenommen wurden die Bilder mit einer Kamera mit 1600x1200 Pixel Auflösung.

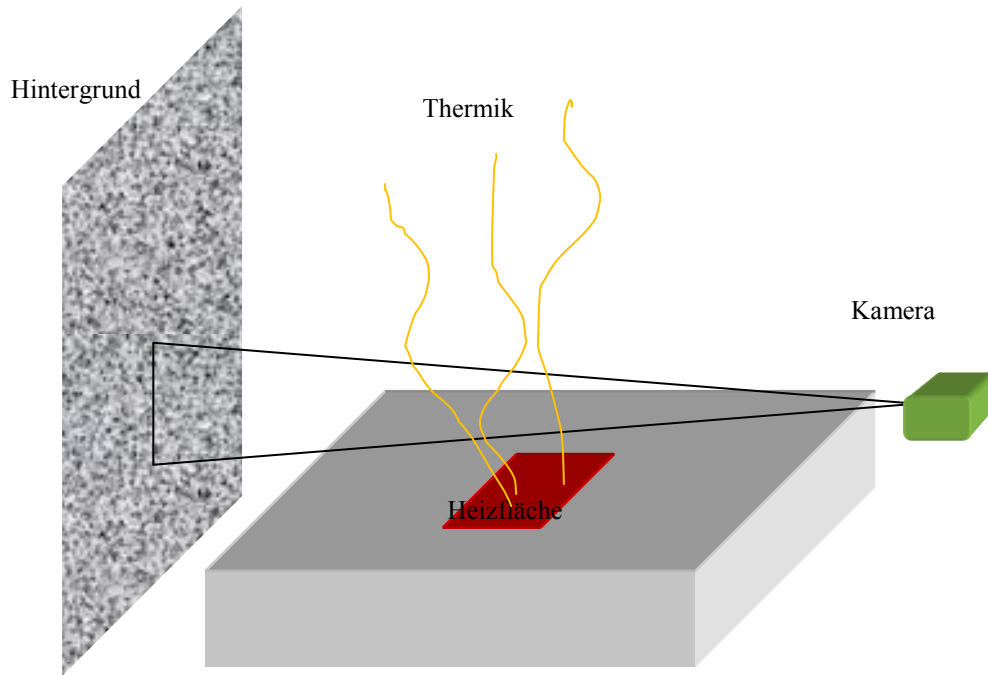


Abb. 3: schematische Darstellung des Versuchszustandes für das Hintergrund-Schlieren-Verfahren

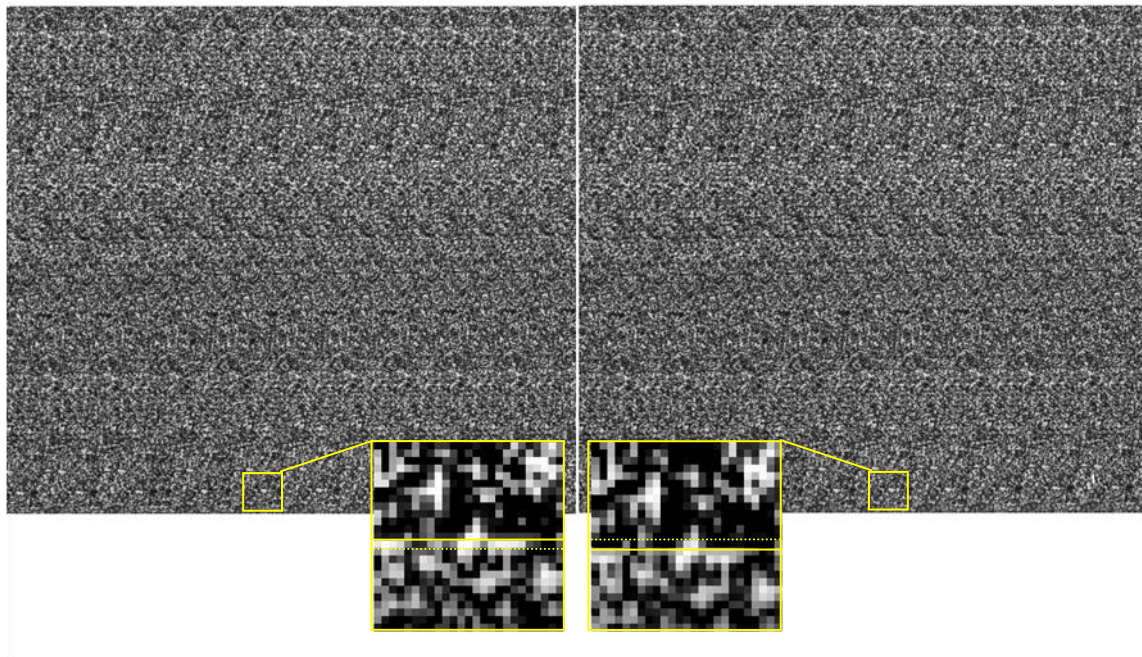


Abb. 4: Hintergrund für die Messungen mit dem Hintergrundschlieren-Verfahren(Ausschnitt) links: ungestörtes Bild, rechts: mit Temperaturschichtung, kleine Bilder zeigen den gleichen Ausschnitt vergrößert

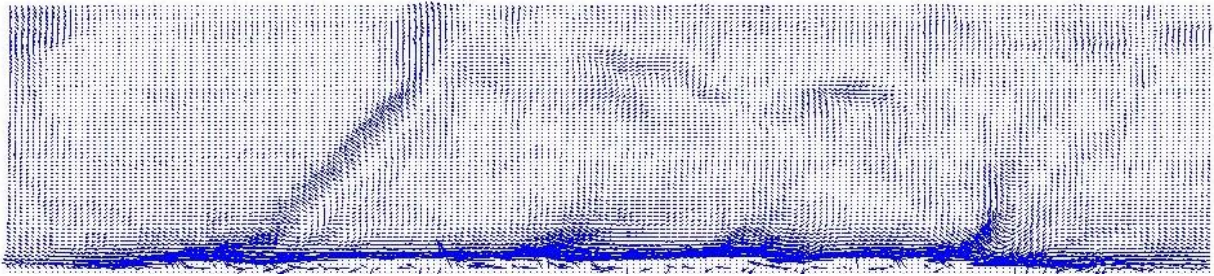


Abb. 5: korrelierte Pixelverschiebung aufgrund der Thermik zu einem Zeitpunkt

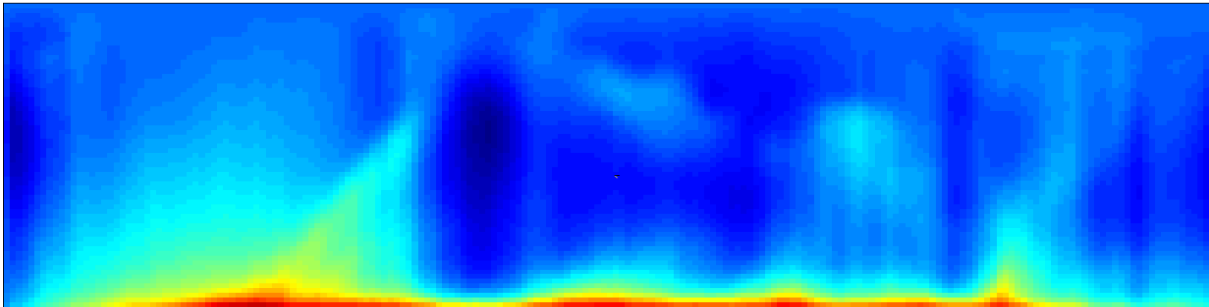


Abb. 6: resultierendes Temperaturfeld mit Linienintegralmethode

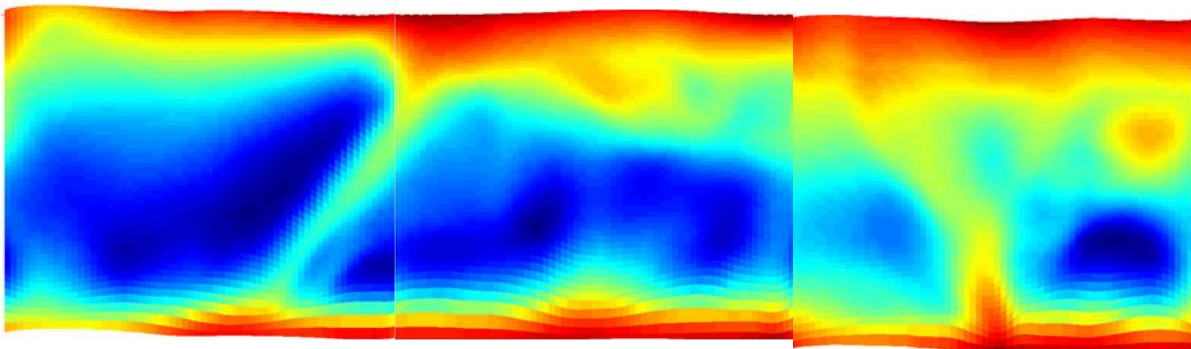


Abb. 7: resultierendes Temperaturfeld mit globalem Verfahren nach Frankot & Chellappa 1988

Die Abbildung 4 zeigt links das Hintergrundbild ohne einem Gradienten des Brechungsindex und rechts mit eingeschalteter Heizung (Gradienten des Brechungsindex in x-Richtung). Die beiden Vergrößerungen zeigen den gleichen Ausschnitt des Bildes. Es ist zu erkennen, dass der Gradient eine Verschiebung um ca. 1,5 Pixel nach unten verursacht.

Die Abbildung 5 zeigt die berechneten Verschiebungsvektoren im gesamten Betrachtungsbereich der Kamera. Dargestellt sind die Vektoren zu einem Zeitpunkt.

Abbildung 5 zeigt die berechneten Verschiebungsvektoren im gesamten Betrachtungsgebiet der Kamera. Dargestellt sind die Vektoren zu einem Zeitpunkt.

Aus diesem Vektorfeld der Hintergrundverzerrung kann das Skalarfeld für den Brechungsindex, die Dichte bzw. die Temperatur berechnet werden. Für die Berechnung sind unterschiedliche Ansätze möglich. Es werden dabei Linienintegralverfahren und globale Verfahren unterschieden. Die Abbildung 6 zeigt das sich ergebende Temperaturfeld nach Anwendung eines Linienintegralverfahrens. Zu Beginn wurde die unterste Reihe in x-Richtung berechnet, anschließend die y-Koordinaten.

Fehler in der Ermittlung der Verschiebungsvektoren sind aufgrund des Streifenmusters in y-Richtung ersichtlich.

Abbildung 7 zeigt die Anwendung eines globalen Verfahrens nach Frankot & Chellappa (1988). Fehlerhafte Berechnungen infolge einzelner fehlerhafter Vektoren zeigen keinen Einfluss. Jedoch entsteht aufgrund der Randbedingungen des Verfahrens eine Abweichung im Randbereich des Bildes. Insbesondere der obere Rand weist Fehler auf. Das Verfahren bedingt die Anwendung quadratischer Matrizen. Daher wurde das Vektorfeld in drei einzelne, quadratische Bilder zerlegt, einzeln berechnet und wieder zusammengesetzt.

Ausblick

Die instationären Strömungsverhältnisse erfordern die zeitliche Korrelation von Temperatur- und Geschwindigkeitsinformationen.

Die Abbildung 8 zeigt den zukünftigen Versuchsaufbau um diesen Anforderungen zu entsprechen. Geschwindigkeit und Temperatur werden mit zwei separaten Kameras erfasst. Dabei ist Kamera 1 für die Temperaturmessung auf den Hintergrund scharf gestellt. Kamera 2 ist für die Geschwindigkeitsmessung auf die Schnittebene des Lasers über der zu untersuchenden Fläche justiert. Die vorhandene Tiefenschärfe der beiden Objektive ermöglicht die getrennte Erfassung beider Signale. Für eine bessere Unterscheidung der beiden Signale wird die Wellenlänge des Lichtes für das BOS-Verfahren mittels Fluoreszenz verschoben (z.B. von 532 nm auf 590 nm). Die Bilder für die Temperaturmessung und die Geschwindigkeitsmessung werden durch Einsatz entsprechender Farbfilter unabhängig voneinander ausgewertet und anschließend wieder zusammengefasst.

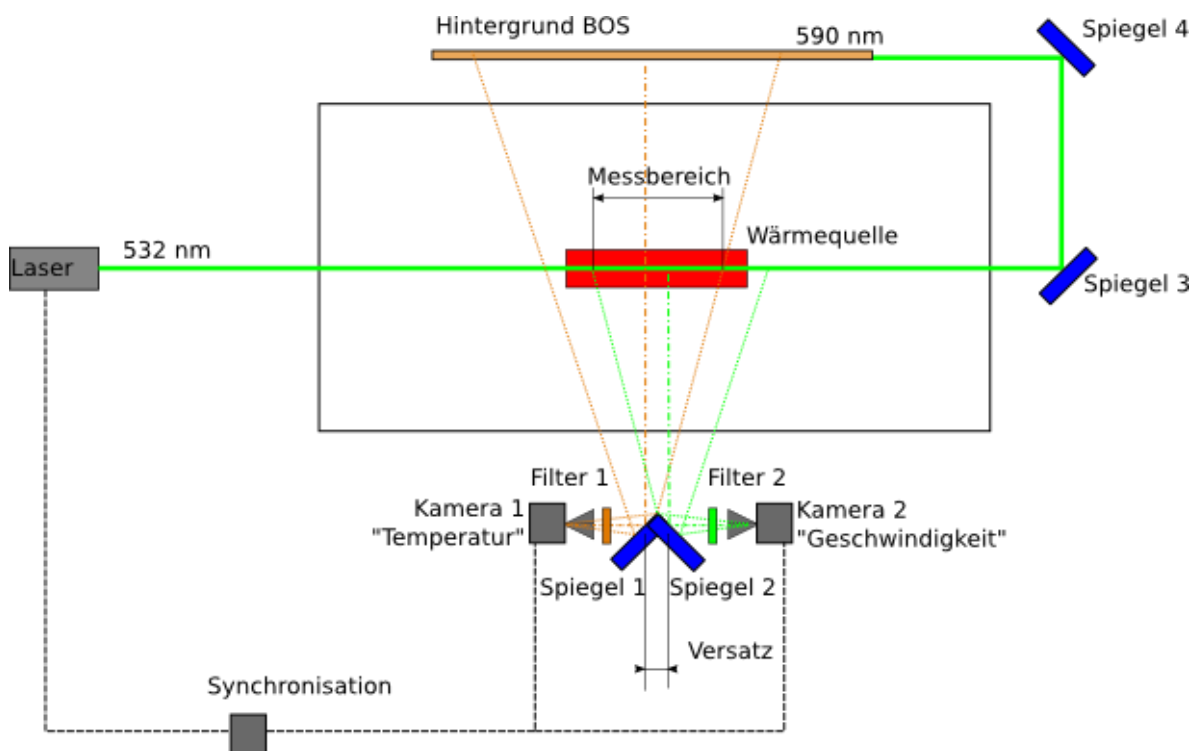


Abb. 8: schematische Darstellung des Versuchsaufbaus

Zusammenfassung

In einem ersten Arbeitsschritt wurde ein Versuchsstand für die Messungen der Temperatur errichtet. Die Temperaturen werden mit dem Hintergrund-Schlieren-Verfahren ermittelt. Die aus der Messung erhaltenen Verschiebungsvektoren wurden mit verschiedenen Verfahren für die Berechnung der Temperatur genutzt. Es zeigt sich, dass die Anwendung von Linienintegralverfahren und globalen Verfahren jeweils ihre Vor- und Nachteile besitzen. In den weiteren Messungen werden die Geschwindigkeiten und die Temperaturen gemeinsam in einem erweitertem Versuchsstand untersucht.

Dankesworte

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des *Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie* unter dem Förderkennzeichen 0327869A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Literatur

- Chen, C. J., Rodi, W., 1980: "Vertical turbulent buoyant jets", *The Science & Application of Heat and Mass Transfer*
- Frankot, R., T., Chellappa R., 1988: "A Method for Enforcing Integrability in Shape from Shading Algorithms", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 10, no 4
- Hugenschmidt, M., 2007: "Lasermesstechnik, Diagnostik der Kurzzeitphysik", Springer Berlin / Heidelberg / New York
- Gladstone, J. H., Dale, T. P., 1863: "Researches on the Refraction, Dispersion, and Sensitiveness of Liquids", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. 153, pp. 317-343,
- Pedrotti, F. L., Pedrotti, Leno S., Bausch, W., Schmidt, H., 1996: "Optik: Eine Einführung", p. 726
- Raffel, R., Willert, C. E., Wereley, S. T., Kompenhans, J., 2007: "Particle Image Velocimetry - A Practical Guide"
- Schmidt, W., 1941: "Turbulente Ausbreitung eines Stromes erhitzter Luft", Dissertation, Universität Göttingen
- Yih, C.-S., 1951: "Free convection due to a point source of heat", *Proceedings of the 1st U.S. National Congress of Applied Mechanics*, p. 941