PHANTOM

ENTWICKELT VON: VISION RESEARCH / AMETEK MATERIALS ANALYSIS DIVISION



Hochgeschwindigkeits-Abbildungsverfahren enthüllen mit Schlierenfotografie das Unsichtbare

Von Phil Taylor, Field Application Engineer, Vision Research

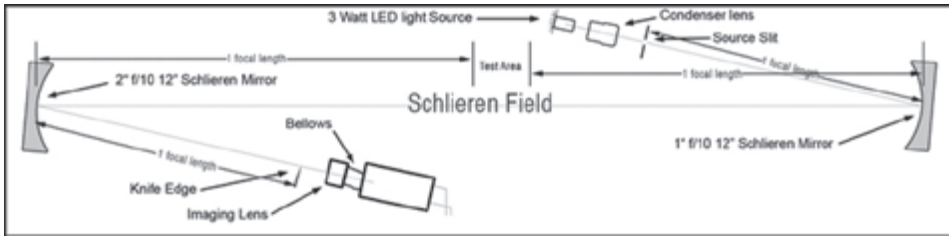
Wissenschaftler verwenden Schlierenfotografie, eine nicht-invasive Prüfmethode, um Dichtegradienten in ansonsten unsichtbaren Strömungen sichtbar zu machen. Schlierenfotografie ist eine praktische Methode zur Visualisierung der Luftbewegung um ein Schaufelblatt in einem Windkanal oder der Gaswechselwirkungen innerhalb einer Brennkammer. Innerhalb der letzten Dekade haben signifikante Verbesserungen der Geschwindigkeit und Empfindlichkeit von Kameras die Qualität von Schlierenbildern und die Geschwindigkeit, mit der Bilder aufgenommen werden können, stark verbessert. Obwohl diese fortschrittliche Abbildungstechnik nun detaillierte Bilder von hochdynamischen Prozessen liefern kann, erfordert die Gewinnung von qualitativ hochwertigen Daten die Auswahl der besten Hochgeschwindigkeitskamera für die Anwendung und eine sorgfältige Optimierung des optischen Setups.

AUFNAHME VON VERÄNDERUNGEN IN TRANSPARENTEN MEDIEN

Es gibt verschiedene Verfahren der Schlierenfotografie, die alle normalerweise unsichtbare Dichtegradienten (‚Schlieren') in transparenten Medien wie Luft, Wasser und Glas erfassen können. Schlierenfotografie wird normalerweise für Tiefenstudien in Labors verwendet, während eine verwandte Technik, die Schattenfotografie, häufiger für Feldstudien verwendet wird, da ihr einfacheres optisches Setup leichter zu transportieren und weniger anfällig für Beschädigungen ist.

Der Dichtegradient, oder die räumliche Änderung der Flächendichte eines Mediums wie Luft oder Gas, wird durch Umgebungsfaktoren wie Druck oder Temperatur bestimmt. Wenn Lichtstrahlen auf das Medium treffen, bewirken Veränderungen in diesem Dichtegradienten, dass das Licht die Richtung auf eine Weise ändert, die abgebildet werden kann. Das verbreitetste Setup für Schlierenfotografie ist das Z-System. Dieses Setup besteht aus zwei Parabolspiegeln, einer Punktlichtquelle, einer Kamera und einer Messerkante (Abbildung 1). Es bietet die höchste Bildqualität und kann schnell in ein Schattenfotografie-System oder ein hybrides Schatten-/Schlieren-System umgewandelt werden.

Abbildung 1: In einem Schlierenfotografiesystem vom Typ Z richtet der erste Spiegel (rechts) die Lichtstrahlen auf den zweiten Spiegel (links), der seinerseits das Licht auf die Kamera leitet. An der Kamera wird das Sichtfeld gleichmäßig beleuchtet und Änderungen des Dichtegradienten des Objekts zwischen den beiden Spiegeln ändern den Brechungsindex des Lichts und erscheinen im Bild. Eine Messerkante im Brennpunkt des zweiten Spiegels blockiert gleichmäßig einen Teil des Lichts, das zur Kamera gelangt. Dies erzeugt ein kontrastreiches Bild, das die Veränderungen im Dichtegradienten besser sichtbar macht. Zur Änderung verschiedener Eigenschaften im Bild, wie z.B. der Farbe, können Komponenten an der Lichtquelle oder an der Messerkante verändert werden.



Hochgeschwindigkeits-Abbildungsverfahren enthüllen mit Schlierenfotografie das Unsichtbare

Schlierenfotografie kann zur Untersuchung von Aerodynamik-, strömungsmechanischen, Wärmeaustausch- und anderen Prozessen verwendet werden. Zum Beispiel kann die Schlierenfotografie eingesetzt werden, um eine thermische Wolke von einer Kerze (Abbildung 2), Heliumgasströmung (Abbildung 3) oder Stoßwellenformationen (Abbildung 4) zu untersuchen.

AUFNAHME HOCHWERTIGER DATEN

Da die Schlierenfotografie extrem schnell ablaufende Prozesse mit einem Ansatz erfasst, der eine kleine Lichtquelle erfordert, ist der Einsatz von sehr empfindlichen Hochgeschwindigkeitskameras wichtig. Ein hoher Dynamikumfang ist jedoch nicht notwendig, da Schlierenbilder von Natur aus kontrastreich sind. Der Einsatz einer Kamera mit Tonwertkurvenanpassung lässt die Extraktion der besten Graustufendaten zu und kann für die Erstellung von hochwertigen Aufnahmen entscheidend sein. Zusätzlich verhindert eine optionale Abschaltung des Lüfters der Kamera während der Aufnahmen, dass die vom Sensor der Kamera abgegebene Wärme in das Schlierenfeld gelangt und die Integrität der Daten zerstört.

Das optische Setup zur Aufnahme von Schlierenbildern reagiert auch auf kleinste Änderungen sehr empfindlich. Zum Beispiel könnte eine Positionsänderung der Messerkante um einige Mikrometer oder eine Änderung der Umgebungstemperatur um einige Grad die Helligkeit des Bildes dramatisch beeinflussen, wodurch das System weniger empfindlich wird und die Qualität der gesammelten Daten letztendlich abnimmt. Diese Empfindlichkeit gegenüber Veränderungen macht ein Schlierensystem zu einem ungünstigen Szenario für den Einsatz von Hochgeschwindigkeitskameras. Der einfache Vorgang des Kamerawechsels verändert das Setup genug, um das resultierende Bild zu verändern. Aufgrund dieser Empfindlichkeit ist es ebenfalls wichtig, vor der Entscheidung über Änderungen am Setup für eine bestimmte Anwendung eine Reihe von Schlieren-Tests durchzuführen.

Da Konsistenz der Schlüssel zu Schlieren-Tests ist, sollte die Hochgeschwindigkeitskamera in der Lage sein, Bilddaten schnell zu speichern, so dass mehrere Tests in einer Laborsitzung durchgeführt und so die Einflüsse von Temperaturänderungen, Veränderungen am Testobjekt oder Bewegungen innerhalb der optischen Komponenten reduziert werden können. Datenmanagementlösungen wie Flash-Speicher oder 10Gb-Ethernet helfen, die Datenintegrität zu gewährleisten, indem diese Variablen eliminiert werden.

VISUALISIERUNG VON STOSSBEWEGUNGEN AN FLUGZEUGTRAGFLÄCHEN

Variationen des herkömmlichen Z-Systems können eingesetzt werden, um bestimmte Arten von Informationen zu erfassen oder bestimmte Phänomene zu untersuchen. Beispielsweise erwies sich ein spezielles Schlierenfotografiesystem mit einer geringen Tiefenschärfe als ideal zur Untersuchung einer Art von Flugzeuginstabilität, dem sogenannten Buffeting.[1] Diese strukturellen Schwingungen verstärken sich, wenn Fluggeschwindigkeit oder Anstellwinkel vergrößert werden, wirken sich auf das aerodynamische Verhalten und begrenzen die Flugenveloppe.

Um die Stoßbewegungen zu untersuchen, die das Buffeting an einer Flugzeugtragfläche verursacht, mussten die Forscher nicht nur Stoßwellen, sondern auch die Ausbreitung von Druckwellen erfassen, die die Stoßschwingungen aufrechterhalten. Ein herkömmliches Schlieren-Setup wäre in diesem Fall ungeeignet, da

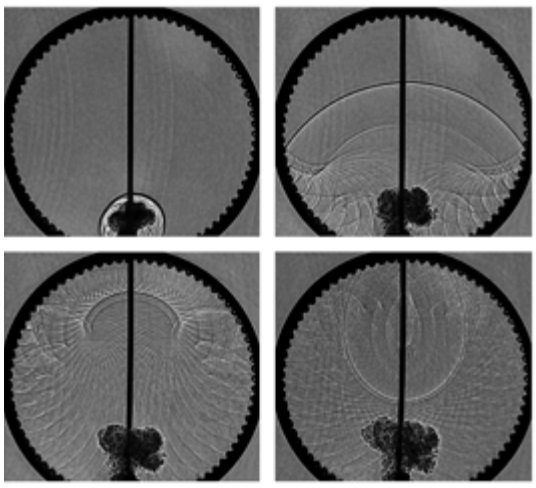
Abbildung 2: Thermische Wolke. *Bild mit freundlicher Genehmigung von Phil Taylor.*



Abbildung 3: Heliumgasströmung. *Bild mit freundlicher Genehmigung von Gavan Mitchell und Phil Taylor.*



Abbildung 4: Stoßwellenformationen. *Bild mit freundlicher Genehmigung von Phred Petersen.*



Alle obigen Bilder hergestellt im RMIT University Schlieren-System.

Hochgeschwindigkeits-Abbildungsverfahren enthüllen mit Schlierenfotografie das Unsichtbare

seine Empfindlichkeit über die gesamte Länge des Lichtweges die Dreidimensionalität des Luftstroms dazu veranlasst, die Bewegung der Stoß- und Druckwellen zu verwischen. Um die Erfassung unerwünschter dreidimensionaler Strömungsstrukturen zu reduzieren, haben die Forscher ein System mit einer geringeren Tiefenschärfe entwickelt.

In diesem Versuchsaufbau wurde kontinuierliches Licht zerstreut, um ein Quellengitter aus mehreren abwechselnd dunklen Bändern und klaren Blenden zu beleuchten und so ein zweidimensionales Lichtquellfeld zu erzeugen. Eine Fresnelsche Stufenlinse, eine spezielle Linse mit einer großen Öffnung und kurzer Brennweite, wurde vor dem Quellengitter angeordnet, um die Lichtsammeleffizienz zu erhöhen. Eine Phantom v710 CMOS-Kamera mit einer Bildgebungslinse mit großer Öffnung erfasste die Stoßschwingungen mit 7.000 Bildern pro Sekunde und zeichnete 8.345 Bilder in einem einzigen Experiment mit einer Belichtungszeit von 20 µs auf.

Die Forscher nutzen dieses Setup, um die Beeinflussung von Buffets durch passive Vorrichtungen (sogenannte Turbulatoren) sichtbar zu machen, die häufig zur Steuerung von Schock Buffets verwendet werden (Abbildung 5). Sie beobachteten eine erhöhte Dreidimensionalität in der Strömung um die Tragfläche, wenn Turbulatoren installiert waren, was nahe legt, dass die geringe Tiefenschärfe der Schlüssel zum genauen Erfassen der Eigenschaften der Stoßbewegung in diesen Fällen war. Die fokussierten Schlierenbilder zeigten, dass das Schock Buffet ohne Turbulatoren bei Anstellwinkeln größer oder gleich 5 Grad auftrat. Nachdem Turbulatoren installiert wurden, verschwanden die durch Buffets verursachte Stoßschwingungen jedoch, selbst bei Anstellwinkeln von mehr als 6 Grad. Die neuen Erkenntnisse geben Einblicke in die Physik von Buffets und wie sie gesteuert werden können, um damit die Aerodynamik von Flugzeugen zu verbessern.

HINTERGRUNDORIENTIERTE SCHLIEREN-MESSUNGEN IN EINER ÜBERSCHALLSTRÖMUNG

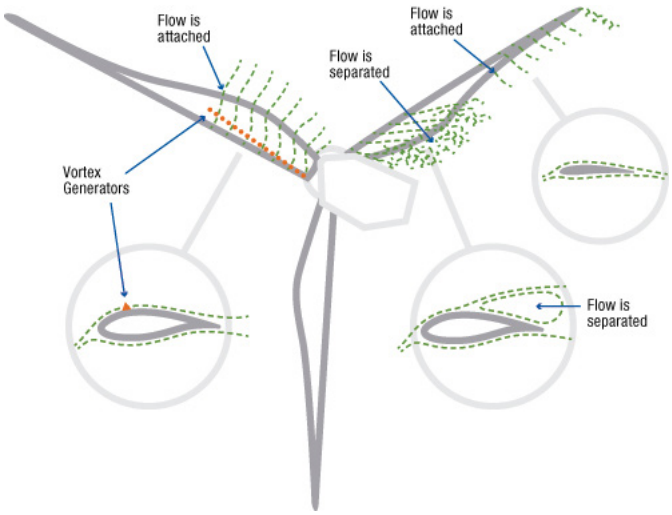
Obwohl herkömmliche Schlierenfotografie sehr detaillierte Bilder liefern kann, ist es nicht immer einfach, diese Bilder für quantitative Messungen zu nutzen. Eine der neuesten Varianten der Schlierenfotografie, die sogenannte hintergrundorientierte Schlierenfotografie (BOS), kann diesen Bedarf decken. Als neue Kinokameras mit 4K-Auflösung (4.096 x 2.160 Pixel) auf den Markt kamen, testeten die Forscher, ob damit und mit BOS präzise quantitative Dichtemessungen mit höherer Auflösung als bisher möglich wären.[2] Diese Auflösungsanforderungen sind mittlerweile in wissenschaftlichen Kameras verfügbar.

So wie auch herkömmliche Schlierenfotografie bildet auch BOS die Beugung von Lichtstrahlen ab, die mit einer Änderung im Dichtegradienten auftritt. Für BOS ist jedoch ein viel einfacherer Versuchsaufbau mit nur einem Hintergrund und einer Digitalkamera notwendig. Statt die Empfindlichkeit mittels einer Messerkante zu verändern, nutzt BOS Vergleichsbilder mit leichten, kaum wahrnehmbaren Brechungsunterschieden im Vergleich zu einem Kalibrierbild derselben exakten Szene vor oder nach dem Auftreten der Streifen.

Für die experimentellen Tests verwendeten die Forscher eine Phantom Flex4K-Hochgeschwindigkeitskamera, um BOS-Messungen von Wechselwirkungen und Dynamiken aufzunehmen, die durch einen Strahl erzeugt wurden. Diese Art Strömungsfeld findet sich oft in Industrieumgebungen wie Schornsteinen oder bei natürlichen Prozessen wie Vulkanausbrüchen. Ein solches Strömungsszenario kann jedoch wegen der einzelnen Strömungen, Rotationsbewegungen, Turbulenzen und Überschallstöße schwierig zu analysieren sein.

Bei laufendem Windkanal öffneten die Forscher ein Ventil und versuchten dann, die Zunahme des Wechselwirkungsfeldes zu erfassen, wobei die Kamera die Aufnahmen mit 1.000 Bildern pro Sekunde bei einer Auflösung von 4.096 mal 2.160 Pixeln ausführte. Bevor das Ventil geöffnet wurde, wurde ein Referenzbild in freier Strömung aufgenommen. Der Hintergrund wurde mit einem 640-nm-Laser mit einer Pulsdauer von 50 ns beleuchtet. Die Experimente zeigten, dass eine 4K-Hochgeschwindigkeitskamera eingesetzt werden kann, um die Zunahme des Wechselwirkungsfeldes, das von einem in eine Querströmung ausströmenden Strahl erzeugt wird, quantitativ zu messen; ein Strömungsszenario, das wissenschaftlich untersucht wird, um eine Vielzahl natürlicher und industrieller Prozesse besser zu verstehen (Abbildung 6).

Abbildung 5: Schlierenfotografie kann eingesetzt werden, um zu untersuchen, wie Turbulatoren eine Art von Flugzeuginstabilität (das Buffeting) beeinflussen.
Von Robert Bergqvist CC BY-SA 3.0 über Wikimedia Commons.



Die Fortschritte in der Schlierenfotografie haben den Forschern neue Techniken zur Datenerfassung an die Hand gegeben. Der stets größer werdende Bedarf an detaillierteren und genaueren Daten wird durch Auswahl der richtigen Aufnahmetechnik und Kombination mit der entsprechenden Hochgeschwindigkeitskamera erfüllt. Die Optimierung von Setup und Ausführung hilft bei der Aufnahme von hochwertigen Bildern und Daten.

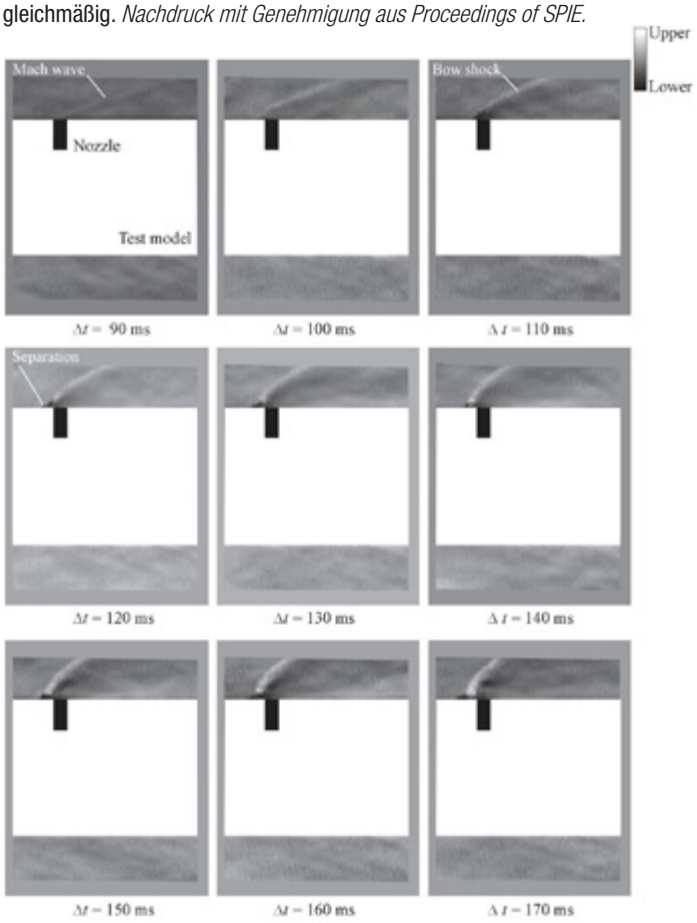
Referenzen

1. T. Kouchi, S. Yamaguchi, S. Koike, et al. „Wavelet-Analyse von schallnahen Buffets an einer zweidimensionalen Tragfläche mit Turbulatoren." Exp Fluids (2016) 57: 166. doi:10.1007/s00348-016-2261-2

2. M. Ota, K. Kurihara, H. Arimoto, et al. „Hintergrundorientierte Schlieren-Messung (BOS) im Überschallstrom mit 4K-Hochgeschwindigkeitskamera," Proc. SPIE 10328, Selected Papers from the 31st International Congress on High-Speed Imaging and Photonics, 103281E (20. Februar 2017); doi:10.1117/12.2271019; http://dx.doi.org/10.1117/12.2271019

Titelbild mit freundlicher Genehmigung von Phred Petersen und Phil Taylor, aufgenommen auf Phantom v2511.

Abbildung 6: Als der seitliche Strahl geöffnet wurde, wurde am Ausgang der Düse eine schwache Mach-Welle (eine Druckwelle, die sich mit Schallgeschwindigkeit fortbewegt) erzeugt. Zehn Sekunden später wurde stromaufwärts der Strahlströmung eine schwache Stoßwelle beobachtet, dann entwickelte sich das Wechselwirkungsfeld und der Trennungsstoß wurde beobachtet. Schließlich wurde der Bogenstoß (eine gekrümmte, stationäre Stoßwelle, die sich in einer Überschallströmung durch einen endlichen Körper bildet) stärker und das Wechselwirkungsfeld entwickelte sich gleichmäßig. *Nachdruck mit Genehmigung aus Proceedings of SPIE.*



VISION RESEARCH

AMETEK®
MATERIALS ANALYSIS DIVISION

PHANTOM

INFORMATIONEN ÜBER VISION RESEARCH

Vision Research entwickelt und produziert digitale Hochgeschwindigkeitskameras, die für eine Vielzahl von Schlierenfotografie-Techniken eingesetzt werden können. Vision Research ist eine Geschäftseinheit der Materials Analysis Division von AMETEK Inc.

Einige Phantom-Kameras der Marke AMETEK Vision Research unterliegen Exportlizenzen. Weitere Informationen hierzu finden Sie unter: www.phantomhighspeed.com/export