



RESEARCH ARTICLE

# Elektronische Hochgeschwindigkeits- Bildsequenzkameras

**UK (Head Office / Factory)**

6 Harvington Park,  
Pitstone Green Business Park  
Pitstone. LU7 9GX England

**Tel +44 (0) 1442 827728**

**USA**

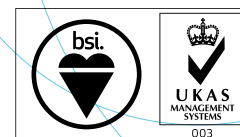
Specialised Imaging Inc.  
40935 County Center Dr. Suite D  
Temecula, CA 92591, USA

**Tel +1 951-296-6406**

**GERMANY**

Hauptstr. 10,  
82275 Emmering  
Germany

**Tel +49 8141 666 89 50**



FM 87429 ISO9001:2015



[specialised-imaging.com](http://specialised-imaging.com)

[info@specialised-imaging.com](mailto:info@specialised-imaging.com)

# Elektronische Hochgeschwindigkeits-Bildsequenzkameras

Jo Honour,  
Specialised Imaging Ltd., Tring, UK

**Siliziumbasierte Sensoren eröffneten den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen neue Möglichkeiten, Computer helfen beim Design wichtiger Komponenten und beim Auswerten und Verbessern der aufgenommenen Bilder. Aber noch immer sind weitere Innovationen gefragt, unter dem Druck immer anspruchsvollerer Anwendungen.**

Für die präzise Aufgliederung der Abläufe schneller Phänomene hilft häufig eine Folge von hochauflösenden Bildern, die zeitlich programmiert werden können. Sie visualisieren den Verlauf und unterstützen so die kritische Untersuchung. In den paar zehn Mikrosekunden Dauer vieler solcher rasanter Ereignisse können unvorhersehbare Veränderungen auftreten. Um beispielsweise die dynamischen Belastungen zu untersuchen, die in harten Materialien wie Keramik oder Glas von einem Einwirkungspunkt ausgehen, wird ein Bildaufnahmesystem benötigt, das die ultraschnelle Ausbreitung der Risse nanosekundengenau analysiert (**Bild 1**).

### Hochgeschwindigkeitsaufnahmen heute

Die inzwischen weitgehend überflüssigen mechanischen Filmkameras brachten durch die zu überwindende Reibung und Trägheit so viele Einschränkungen mit sich, dass sie für die Aufnahme zufälliger Ereignisse nicht ideal geeignet waren, da ihre minimalen Belichtungszeiten zu lang waren, um schnelle Objektbewegungen abzubilden. Das Aufkommen von siliziumbasierten Sensoren, die elektronisch statt mechanisch gesteuert wurden, brachte eine vollständig neue Generation von Ultrahochgeschwindigkeitskameras mit sich. Auch diese waren nicht ohne Begrenzungen, allerdings hat sich die Rate, mit der Bilder von schnellen Ereignissen aufgenommen werden können, um Größenordnungen erhöht, mit Auflösungen,

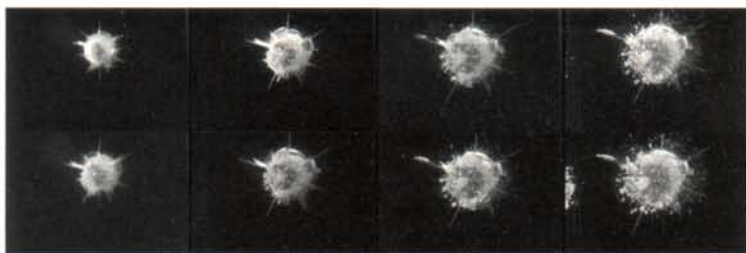
die eine genaue Untersuchung erlauben. Eine Vielzahl von Neuerungen mit dem Ziel, die Einschränkungen bei der Aufnahme von ultraschnellen Abläufen zu überwinden, führten zu Kamerasystemen, die pro Sekunde über 200 Mio. qualitativ hochwertige Bilder aufnehmen können (**Bild 2**). Darüber hinaus ist es inzwischen möglich, unterschiedliche Kameratypen zu verbinden und so von einem gemeinsamen Blickwinkel Aufnahmen in sehr unterschiedlichen Formaten zu bekommen, was die anschließende Analyse effektiver macht.

### Optische Strahlteiler

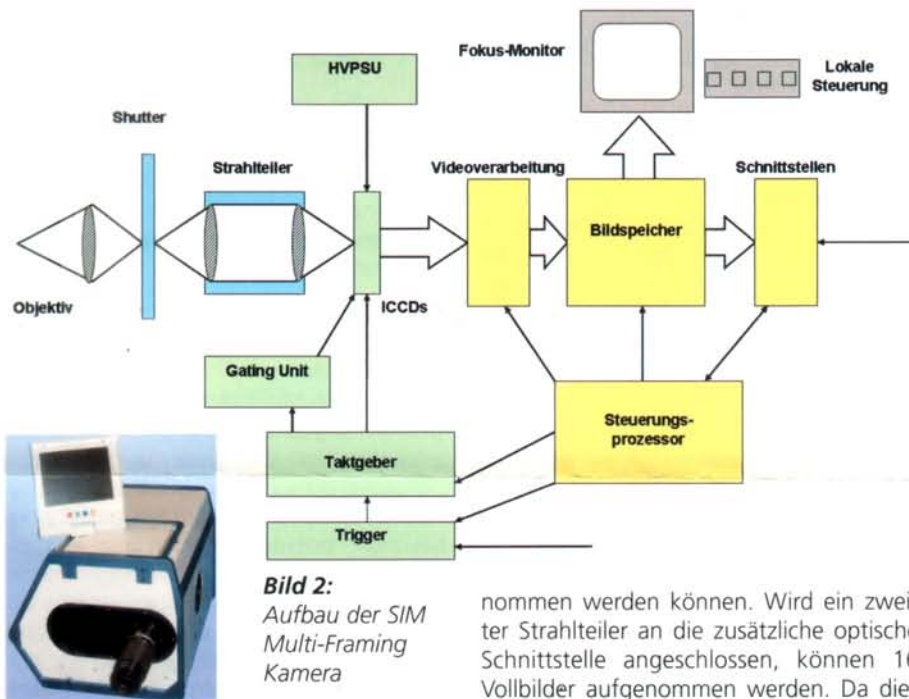
Der optische Strahlteiler ist der zentrale Baustein einer ultraschnellen Multiple Framing Kamera, die verstärkte Siliziumbasierte Sensoren für die Aufnahme der Bildfolgen verwendet. Viele Konzepte wurden ausprobiert, aber häufig zeigten die Ergebnisse in der Computerauswertung kleinere Fehler in den aufgenommenen Bildern. Gute Ergebnisse lieferte bislang das gängige Prinzip des pyramidenförmigen Strahlteilers, das in den 1950er Jahren von Courtney-Pratt vorgeschlagen, aber aus technischen Gründen erst später

realisiert wurde. Nachdem in den 90er Jahren computergestütztes optisches Design eingesetzt werden konnte, wurden die inhärenten Probleme gelöst. Aber zwei weniger offensichtliche Probleme zeigten sich, als die Bildfolgen mit Computern überprüft wurden. Ein Problem war, dass die Bilder unterschiedlicher Prismenflächen Parallaxenfehler aufwiesen. Das stört beim Betrachten von animierten Bildfolgen; der Einfluss auf Messungen anhand der Bilder kann jedoch per Softwarekorrektur reduziert werden. Das zweite Problem war der Astigmatismus, der durch die geteilte Pupille entstand und so Unterschiede in der horizontalen und vertikalen Auflösung in Abhängigkeit von der Position der Bilder relativ zur optischen Achse der primären Linse bewirkte. Dies beeinträchtigte jedoch die erreichbare Bildqualität und flexible Betriebsweise des Konzepts nur geringfügig. Auch durch den sinnvollen Einsatz von Computern bleibt das Hauptproblem, dass geringfügige verbleibende optische Unstimmigkeiten die Datenanalyse schwieriger und zeitaufwändiger machen, bestehen.

Der Strahlteiler in der SIM Multiple Framing Kamera verwendet ein anderes Prinzip: er beseitigt den Parallaxenfehler, der früher durch die Pupillenteilung entstand, durch den Einsatz teiltransparenter Würfel anstelle der Pyramide (**Bild 3**). Auf diese Weise wird die gesamte Pupillenfläche übertragen, obwohl nur ein prozentualer Teil des verfügbaren Lichts das Bild formt. Darüber hinaus wurde der Strahlteiler dafür ausgelegt,



*Bild 1: Rissausbreitung in PMMA, ausgehend von einem Punkt mit hoher Belastung (Belichtungszeit ca. 200 ns)*



**Bild 2:**  
Aufbau der SIM  
Multi-Framing  
Kamera

eine zweite optische Schnittstelle zu bieten, an die zusätzliche abbildende Geräte wie zeitauflösende Spektrometer, Hochgeschwindigkeits- Video- und Streak-Kameras angeschlossen werden können. Das ermöglicht die Aufnahme der Bilddaten in verschiedenen Formaten aus einem gemeinsamen Blickwinkel und damit die detailliertere und umfassendere Analyse. Eine weitere Verbesserung ist, dass der Strahlteiler auch das Einbringen von Filtern in die einzelnen Abbildungspfade erlaubt. Entsprechend den Anforderungen der Forschung nach spektralen Informationen können Filter mit jeweils vorbestimmter Durchlasscharakteristik in den einzelnen optischen Pfaden positioniert werden um die sichtbaren Daten für jeden einzelnen Sensor selektiv zu steuern. Das erweitert beispielsweise in der Forschung der Verbrennungsmotoren die Möglichkeiten, Radikale zu isolieren, die die Grenze zwischen verbranntem und unverbranntem Treibstoff bilden.

Verbesserte Verbindungstechniken ermöglichen es, Bildverstärker direkt an siliziumbasierte Sensoren anzukoppeln um so die Belichtungszeiten zu verringern und die Empfindlichkeit zu erhöhen. Um diese beiden Einschränkungen zu überwinden, wurden einige innovative Methoden für die Sequenzierung mehrerer verstärkter Sensoren (ICCD) an optischen Strahlteilern entwickelt.

Die kompakte Bauweise der hochauflösenden ICCDs ermöglicht es, ein komplettes Set von Sensoren einfacher an den Strahlteiler mit acht Ausgängen anzuschließen, so dass acht vollaufgelöste Bilder aufge-

nommen werden können. Wird ein zweiter Strahlteiler an die zusätzliche optische Schnittstelle angeschlossen, können 16 Vollbilder aufgenommen werden. Da dies eine echte 16-Kanal-Kamera ist, zeigen die Bilder keine Bildverstärkerartefakte wie Restbilder durch die Abklingcharakteristik des Phosphors oder „Geisterbilder“, die durch die Elektronenverarmung der Mikrokanalplatte entstehen. Beides verringert die Bildqualität und kann die Datenerfassung erschweren.

## Höhere Auflösung, kürzere Belichtung

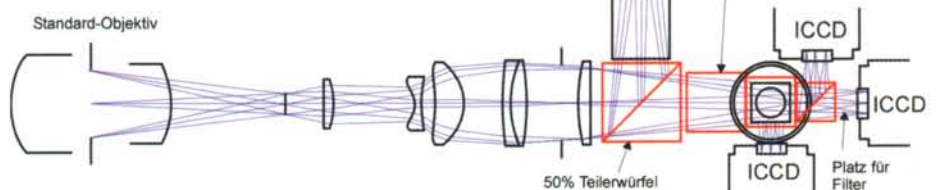
Die Technik entwickelte sich schnell weiter und die Auflösung sowohl des Bildverstärkers als auch des CCD hat sich verbessert. Durch die Reduzierung der Lochgröße der Mikrokanalplatte im 18mm-Verstärker auf  $4 \mu\text{m}$  überschreitet deren Auflösung nun

70 lp/mm. Wird diese Mikrokanalplatte mit einem hochauflösenden mittelgroßen CCD-Sensor (1360 x 1024 Pixel) verbunden, kann eine gesamte Auflösung von über 50 lp/mm realisiert werden. In Verbindung mit der Steigerung des Dynamikbereichs des CCD-Sensors bietet dies eine Basis zur Aufnahme sehr guter Bildfolgen von schnellen Ereignissen. Die höhere Auflösung und größere Dynamik der ICCDs erzwingen eine deutlich höhere Kapazität des Zwischenspeichers, in dem die Rohbilder abgelegt werden, bevor sie auf den Festplattenspeicher geladen werden. Die immer stärker zunehmenden Forderungen nach kürzeren Belichtungszeiten bedeuten, dass die Frequenz des Systemtakts, auf dem alle Betriebsfunktionen basieren, auf 200 MHz gestiegen ist und minimale Zeitschritte von 5 ns bietet. Mit verbesserter Taktung können Bildfolgen jetzt mit Bildraten von 100 bis 1 000 000 000 fps aufgenommen werden, so dass detaillierte Erscheinungen der meisten ultraschnellen Ereignisse aufgenommen werden können. Zur Erweiterung der allgemeinen und der spektralen Empfindlichkeit kann ein zusätzlicher hochverstärkender UV-empfindlicher Verstärker in den primären optischen Pfad integriert werden. Wird dieser Verstärker mit einem UV-durchlässigen Primärobjektiv eingesetzt, werden die Aufnahmemöglichkeiten für Ereignisse erweitert, die bei diesen kürzeren Wellenlängen emittieren.

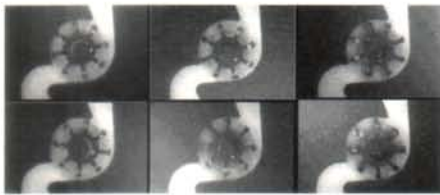
## Typische Anwendungen

Für viele Anwendungen ist das Verständnis der stattfindenden ultraschnellen Prozesse wichtig, und jede Anwendung stellt eigene Herausforderungen.

Ultraschnelle selbstleuchtende Erscheinungen wie Hochspannungsentladungen und Explosionen zum Beispiel steigern die Helligkeit im Laufe des Prozesses. Die Dynamik eines solchen Ereignisses über-



**Bild 3:** Typisches optisches Diagramm des SIM-Strahlteilers. Der 50%-Strahlteiler im Bild dient zur Ankoppelung des Streak-Kanals an das 8-Kanal-System, er kann ersetzt werden durch einen Teilerwürfel für ein 16-Kanal-System oder durch einen leeren Block zur Verwendung als 8-Kanal-System



**Bild 4:** Mikroturbine mit 300 µm Durchmesser (MRN Universität Ulm, aufgenommen mit Imacon, Belichtungszeit ca. 100 ns)

steigt die des Sensors bei weitem, so dass entsprechende Anpassungen in die Aufnahmeparameter programmiert werden müssen, damit die Prozesse aufgenommen werden können. Das Aufnahmesystem muss in der Lage sein, sehr geringe anfängliche Strahlung aufzuzeichnen und außerdem die hellsten Intensitäten detektieren ohne die Dynamik des Sensors zu überschreiten. Beispielsweise haben die unsichtbaren Streamer (Vorentladungen), die vor dem elektrischen Durchbruch durch die Ionisation der Luft entstehen, Geschwindigkeiten bis zu 50 km/s und verlangen extrem kurze Belichtungszeiten und UV-Empfindlichkeit.

Motorenhersteller investieren stark in die Untersuchung der Reduzierung des Treibstoffverbrauchs und des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes. Das flexible digitale Bildaufnahmesystem SIM kann zur Analyse der ersten Stadien der Flammenausbreitung in den Motoren eingesetzt werden und damit zum Verständnis sowohl der Flammendynamik als auch der Chemie des Verbrennungsprozesses beitragen.

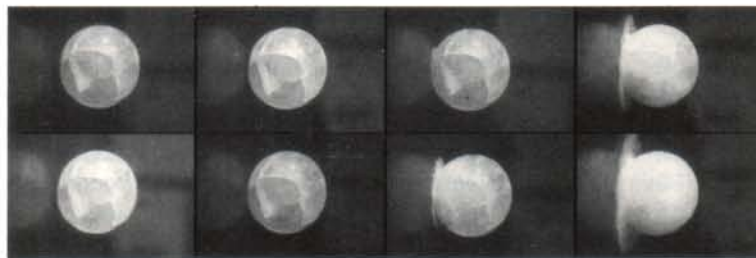
Die digitale Multiple Framing Kamera SIM kann auch mit einem Lasersystem gekoppelt werden um das Verhalten chemischer Radikale zu untersuchen, welche die Grenzen innerhalb der Brennkammer definieren. Die zeitliche Auflösung des Zeitraums nach der Funkenzündung ist von besonderem Interesse für die Ingenieure, da sie den effizienten Einsatz des Brennstoffs beeinflusst. Hochaufgelöste Bilder ermöglichen die quantitative Analyse der Größe von Tropfen, ihrer Geschwindigkeit und Verteilung im Einspritzsystem.

Mikroelektromechanische Systeme (MEMS) erfahren derzeit bedeutende Aufmerksamkeit und Anstrengungen. Sehr kleine Bauteile werden entwickelt und zunehmend in alltäglichen Anwendungen eingesetzt, z.B. in Tintenstrahldruckern. Da diese Bauteile oft nur ein paar zehn Mikrometer groß sind, werden sie mit Hilfe optischer Mikroskope bei Vergrößerungen zwischen 50 und 100fach untersucht (**Bild 4**). Durch

die optische Vergrößerung werden auch die Bewegungen schneller dargestellt (z.B. wird eine Bewegung von 1 µm/s unter 50facher Vergrößerung zu 50 µm/s), was extrem kurze Belichtungszeiten bedingt um die Bewegungen für die kritische Analyse einzufangen.

Ein weiteres aktuelles Interessensgebiet ist der Einsatz von Mikro-Abbildung für die Kapselung von Medikamenten in Mikrobblasen, so dass die kontrollierte Abgabe z.B. direkt an einem Tumor stattfinden kann. Das mechanische Zerreißen dieser Blasen durch lokalen Ultraschall ist für den Erfolg dieser Behandlung wichtig. Um diese Zerreißprozesse aufzunehmen, werden sowohl hohe Bildraten als auch kurze Belichtungszeiten benötigt.

Schockwellen in transparenten Materialien und Flüssigkeiten werden mit Schlieren-Techniken untersucht. In einer Reihe von Forschungsdisziplinen gibt die Aufnahme von Dichtegraden in transparenten Mate-



**Bild 6:** Simulierter Hagelaufschlag auf ein Flugzeug (Cavendish Laboratory, Cambridge, UK, aufgenommen mit Imacon, Belichtungszeit ca. 250 ns)

rialien einen guten Einblick in die begleitenden mechanischen Prozesse. Sowohl die Luftfahrt- als auch die Automobilindustrie verwendet solche Abbildungssysteme zur detaillierten Visualisierung von Luftströmungen über Oberflächen an denen starker Druck das Verhalten oder die Sicherheit beeinflusst. Maßstabsgetreue Modelle werden in das Schlierenfeld zwischen zwei Spiegeln positioniert, die die optische Komponente der Windkanal-diagnostik darstellt, und die Änderungen in den Fließmustern werden aufgenommen. Für Überschall-Simulation, mit Geschwindigkeiten von Mach 5 oder höher, ist eine digitale Ultrahochgeschwindigkeitskamera notwendig um die extrem schnellen Wechsel aufzunehmen, die im Gasfluss innerhalb von Nanosekunden auftreten.

Auch in der Fluidodynamik wird das Schlieren-Verfahren verwendet um Schockwellen aufzunehmen, die kleine Blasen in Flüssigkeiten begleiten. Eine kleine Blase wird in eine Flüssigkeit eingebracht und dann einem hochenergetischen Laserpuls ausgesetzt. Die Mechanismen des schnellen Platzens der Blase werden dann aufgenommen und ermöglichen besseres Verständnis der ablaufenden physikalischen Prozesse.



**Bild 5:** Schlieren-Folge des Heliumausstoßes einer Druckgaspistole (GASL, USA, aufgenommen mit einer Imacon, Belichtungszeit ca. 150 ns)

### Zusammenfassung

Eine digitale Multiple Framing Ultrahochgeschwindigkeitskamera kann zur Aufzeichnung von Ereignissen dienen, deren Zeitskalen oft schwer vorstellbar sind. Eine Nanosekunde, ein Tausend-Millionstel einer Sekunde; trotzdem reagiert die elektronische Kamera und fängt Bilder ein, die die schnellen Prozesse beschreiben, welche ein besseres Verständnis von Materialien und ihren Belastungsgrenzen ermöglichen.

Viele Forschungsprojekte mit Hochgeschwindigkeitskameras dienen dem Verständnis grundlegender wissenschaftlicher Prinzipien. Oft scheinen sie unbedeutend, aber der Wissensdurst der Menschen kennt keine Grenzen.

Übersetzung: E. Rosenthal

### Ansprechpartner

Jo Honour  
Leiter Vertrieb  
und Marketing  
Specialised  
Imaging Ltd.  
Unit 1,  
Silk Mill Industrial Estate  
Brook Street  
Tring  
UK-HP23 5EF  
Tel. +44/1442/82-7728  
Fax +44/1442/82-2830  
jo@specialised-imaging.com  
www.specialised-imaging.com



Peter Berkenberg  
Bowas Consulting &  
Universal Trading GmbH  
Nussbaumstr. 10  
D-80336 München  
Tel. 089/51700-72  
Fax: 089/51700-76  
peter@berkenberg.com  
www.berkenberg.com

