

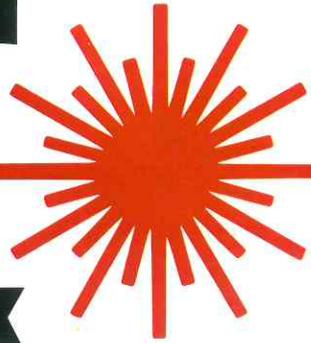
1

21. Jahrgang

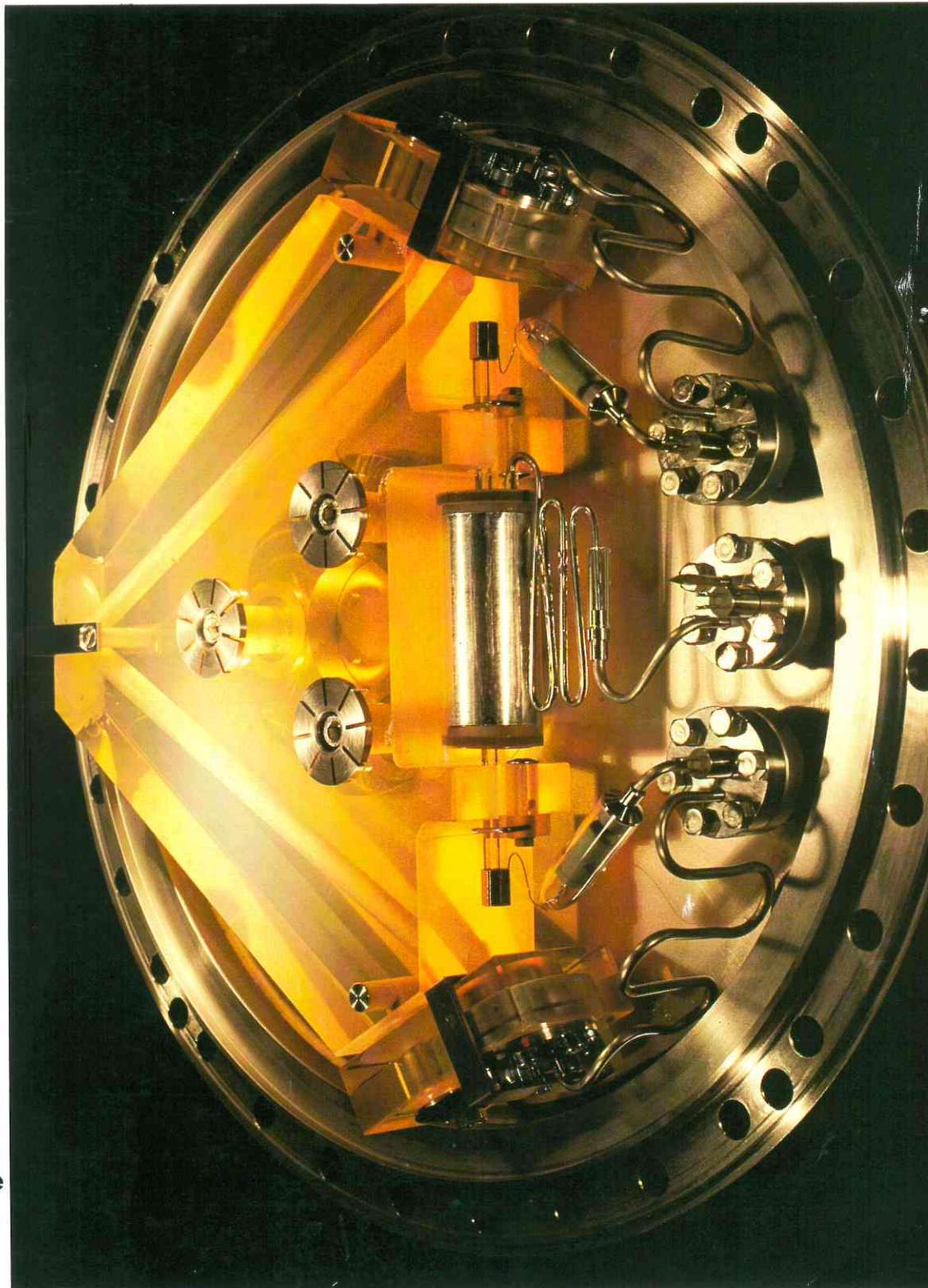
Febr. 1989
DM 23,-

Laser

und Optoelektronik



- **LWL-Wegsensor**
A. Bucher et al.
- **Glasdekoration mit Laser**
Geiger et al.
- **Ringlaserkreisell**
R. Rodloff
- **Integrierte Optik für LWL-Sensor**
Wulf-Mathies
- **Schnelle Bildaufzeichnung**
Hiller, Rupp, Greve
- **American Laser Scene**
- **Tagungskalender**
- **Nachrichten**
- **Neuerscheinungen**
- **Für Sie gelesen**
- **140 neue Produkte**



Ringlaserkreisell
(90° gedreht)

Schnelle Bildaufzeichnung mit CCD-Kameras und gepulsten LEDs – High Speed Image Recording

W. J. Hiller, T. A. Kowalewski, B. Stasicki, Max-Planck-Institut für Strömungsforschung, D-3400 Göttingen

Eingegangen 24. Dezember 1988

Key words

High speed imaging, charged coupled device, pulsed light generator, LED, stroboscopic observation, phase scanner

Abstract

In certain circumstances CCD-cameras can be applied conveniently as high speed imagers. In addition, the use of a specially designed light pulser equipped with high power LEDs gives a very simple and effective set-up for optical recording of transient processes. Details of the recording method and some sample applications are given. The possibilities of future improvements of the method are discussed.

Übersicht

Halbleiterbildaufnehmer vom CCD-Typ sind aufgrund ihrer internen Struktur und Organisation unter gewissen Vorbedingungen zur Aufzeichnung rasch ablaufender Vorgänge geeignet. In Verbindung mit einem speziell entwickelten Lichtpulsgenerator, der als Lichtquelle Leuchtdioden verwendet, steht damit eine sehr einfache und effektive Einrichtung zur Untersuchung transienter Prozesse zur Verfügung. Im folgenden wird dieses Verfahren kurz beschrieben und an einem Beispiel erläutert. Vorschläge für eine Weiterentwicklung dieser Methode werden diskutiert.

Inhalt

1. Einführung
2. Methode
3. Kamera, Lichtquelle, Trigger und digitaler Phasenscanner
4. Der Zerfall dünner Flüssigkeitsstrahlen – ein Anwendungsbeispiel
5. Ausblick

1. Einführung

Die Registrierung schnell bewegter Objekte oder transienter Zustände mit fotografischen Methoden ist meistens ein mühsames und umständliches Unterfangen - nicht zuletzt dadurch, dass bis zur Entwicklung des Filmes und Extraktion der darauf enthaltenen Information soviel Zeit verstrichen ist, dass eine Einwirkung auf den Versuchsablauf nicht mehr möglich ist. Unter diesem Gesichtspunkt erscheint es lohnend, nach einfacheren Methoden zu suchen, auch wenn diese nur für beschränkte Anwendungsbereiche einsetzbar sind. Im folgenden wird über Erfahrungen mit CCD-Kameras berichtet, die für die Untersuchung von Strömungsvorgängen, aber auch für die Sichtbarmachung mechanischer Schwingungen eingesetzt wurden. Eine wichtige Aufgabe kommt dabei der benutzten Lichtquelle und den speziell für die Kameras entwickelten Trigger- und Verzögerungseinrichtungen zu.

2. Methode

Im Gegensatz zu einer herkömmlichen Röhrenkamera, bei der ein Elektronenstrahl praktisch im Dauerbetrieb die Photoanode zeilenweise abtastet, wird bei den hier verwendeten Halbleitersensoren vom CCD-Typ die von den einfallenden Photonen erzeugte Ladung über einen längeren Zeitraum simultan auf dem gesamten Sensor integriert und dann innerhalb sehr kurzer Zeit in einen Speicher umgeladen. Aus dem Speicher, der ebenfalls wie der Sensor als Matrix aufgebaut ist, wird dann die in Form einer Ladungsverteilung gespeicherte Bildinformation zeilenweise aufbereitet und nach der CCIR-Fernsehnorm ausgelesen. Besonders interessant für die schnelle Bildaufzeichnung sind die nach dem Frame-Transfer-Prinzip arbeitenden Sensoren. Diese integrieren während nahezu 20 ms (bei 50 Hz Bildfolgefrequenz) die in den Pixeln des Sensorbereiches von den auffallenden Photonen erzeugten Ladungen und schieben diese dann nach Ablauf der Integrationszeit simultan längs der Spalten der Pixelmatrix in den Speicherbereich. Die dafür benötigte Transportzeit ist abhängig von dem jeweiligen Sensormodell und liegt typisch zwischen 150 und 500 μ s. Diese beiden Eigenschaften eines Frame-Transfer-Sensors, i.e. simultane Integration der in den Pixeln erzeugten Ladungen während einer Zeitdauer von fast 20 ms und der sich an die Integrationsperiode anschließende simultane Transfer der Ladungsverteilung in den Speicherbereich werden auf folgende zwei Methoden zur Bildaufzeichnung benutzt.

- 1) Mehrfachbelichtung während der Integrationsperiode. Hier wird das zu untersuchende Objekt mehrfach auf den Sensor abgebildet. Im allgemeinen ist dabei mit Überlappungen der Einzelbilder auf dem Sensor zu rechnen. Das Verfahren ist deshalb nur für spezielle Objekte mit einfacher Struktur geeignet.
- 2) Mehrfachbelichtung während der Transferphase. In diesem Fall werden zeitlich aufeinanderfolgende Zustände eines Objektes räumlich gegeneinander verschoben aufgezeichnet. Bei geeigneter Wahl der Versuchsparameter kann Mehrfachüberlappung der Bilder verhindert werden. Eine detaillierte Darstellung dieses Verfahrens findet man in [1].

3. Kamera, Lichtquelle, Triggereinrichtung und digitaler Phasenscanner

3.1 Kamera

Für die Bildaufzeichnung wurden fünf verschiedene kommerziell erhältliche CCD-Kameras eingesetzt:

- 1) Innovationstechnik CCD-K1 mit Sensor NXA 1011 (Valvo). Die Sensorfläche ist 6 mm breit und 4,5 mm hoch. Die Pixel sind in einer Matrix von 294 Zeilen und 604 Spalten angeordnet. Ein einzelnes Pixel ist 10 μ m breit und 15 μ m hoch. Der Frame-Transfer benötigt etwa 470 μ s.
- 2) Philips LDH 0600 mit Sensor NXA 1011 (Valvo). Die Sensorfläche ist 6 mm breit und 4,5 mm hoch. Die Pixel sind in einer Matrix von 294 Zeilen und 604 Spalten angeordnet. Ein einzelnes Pixel ist 10 μ m breit und 15 μ m hoch. Der Frame-Transfer benötigt etwa 470 μ s.
- 3) Theta System HTMC-87 mit Sensor TH 7863 CDA (Thom-

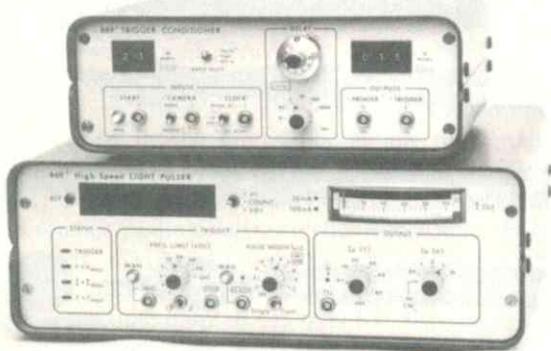


Abb. 1. Lichtpulsgenerator (unten) and Trigger-Conditioner (oben)

son). Die Sensorfläche ist 8,83 mm breit und 6,62 mm hoch. Die Pixel sind in einer Matrix von 282 Zeilen und 384 Spalten angeordnet. Ein einzelnes Pixel ist 25 μm breit und 25 μm hoch. Der Frame-Transfer benötigt etwa 200 μs .

4) Kappa Messtechnik CF6 mit Sensor LC 9913 (Sanyo). Die Pixel sind in einer Matrix von 590 Zeilen und 590 Spalten angeordnet. Ein einzelnes Pixel ist 15 μm breit und 11 μm hoch. Der Frame-Transfer benötigt etwa 140 μs .

5) Sony XC 77 CE. Die Sensorfläche ist 8,8 mm breit und 6,6 mm hoch. Die Pixel sind in einer Matrix von 581 Zeilen und 756 Spalten angeordnet. Ein einzelnes Pixel ist 11 μm hoch und 11 μm breit. Diese Kamera arbeitet nicht nach der Frame-Transfer-Methode, sondern nach dem Interline-Verfahren. Aus diesem Grund ist sie auch nur für die Mehrfachbelichtung während der Integrationsperiode einsetzbar, bietet dann aber den Vorteil einer hohen räumlichen Auflösung.

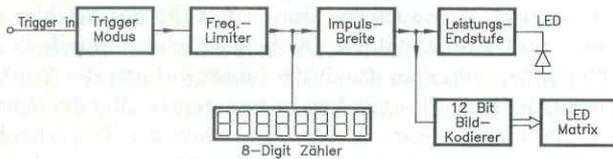


Abb. 2. Blockschaltbild des Lichtpulsgenerators

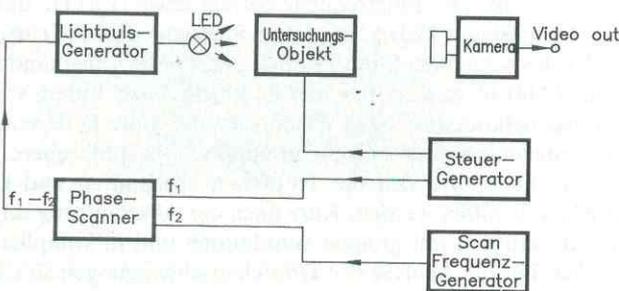


Abb. 3. Schematische Darstellung zum Einsatz des Phase-Scanner für die stroboskopische Beobachtung periodischer Vorgänge

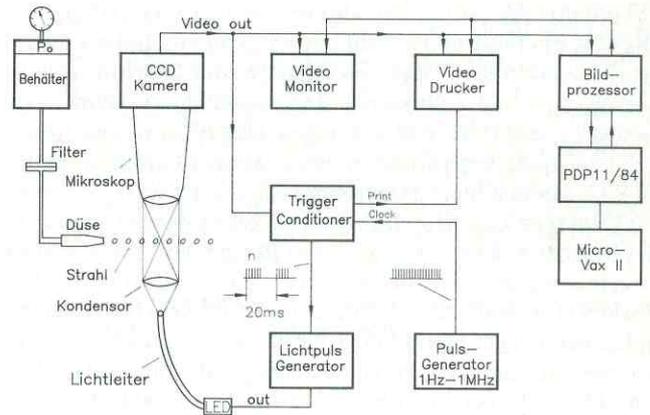


Abb. 4. Schema der Versuchseinrichtung zur Beobachtung zerfallender Flüssigkeitsstrahlen

Alle Kameras sind zur Montage von Objektiven mit C-Mount-Anschlüssen versehen, die auch zur Befestigung der Kamera an entsprechend ausgerüsteten Mikroskopen verwendet werden können.

3.2 Lichtquelle

Als Lichtquelle werden sehr lichtstarke GaAlAs-Leuchtdioden eingesetzt, die rotes Licht von 660 nm abstrahlen. Als besonders geeignet hat sich die Leuchtdiode vom Typ H 3000 (Stanley) herausgestellt, die Lichtimpulse mit Leistungen bis zu 1 W erzeugt. Die Dioden sind in einem durchsichtigen Plastikgehäuse mit integrierter Frontlinse untergebracht. Der Öffnungswinkel des austretenden Lichtbündels beträgt etwa 10°. Da seine räumliche Intensitätsverteilung für die Beobachtung im Hellfeldverfahren meistens zu inhomogen ist, empfiehlt es sich, das Licht über einen Lichtleiter aus der Diode auszukoppeln [2]. Die zur Verfügung stehende Lichtleistung reduziert sich dadurch um 30–50 %.

3.3 Lichtpulsgenerator

Die Leuchtdioden werden von einem am MPI für Strömungsforschung speziell entwickelten Generator mit Konstantstromimpulsen bis zu 10 A angesteuert. Abb. 1,2 zeigen ein Foto und ein Blockschaltbild des Gerätes. Die Breite der Impulse ist von 50 ns bis 10 μs einstellbar, und die maximale Impulsfrequenz ist größer als 1 MHz. Für Justierzwecke können die Leuchtdioden im Gleichstrommodus angesteuert werden. Der Generator wird durch externe TTL-Impulse getriggert. Er verfügt über die Möglichkeit einer Doppelsynchronisation, d.h. eine Blitzserie bzw. ein Einzelblitz werden erst dann ausgelöst, wenn von einem zusätzlichen Gerät (z.B. von der Kamera) Aufnahmebereitschaft signalisiert wird. Eine ausführliche Beschreibung dieses Gerätes* mit vielen Anwendungsbeispielen findet sich in [3,4].

3.4 Triggereinrichtung

Insbesondere bei Benutzung herkömmlicher Videokameras benötigt man eine Triggereinrichtung, die im Takt der von der Kamera gelieferten Synchronsignale den Lichtpulsgenerator und eventuell auch andere Geräte triggert. Für diesen Zweck steht ein sogenannter Trigger-Conditioner* (Abb. 1) zur Verfügung, der

* Hersteller jetzt Fa. Dr. Sjuts Optotechnik GmbH, 3411 Lindau/Harz

aus dem Video-Signal die V-Sync-Signale herauszieht und als TTL-kompatible Triggersignalfolgen an den Lichtpulsgenerator liefern kann. Sowohl die Zahl der pro Synchronimpuls ausgelösten Blitze und ihre Phasenlage relativ zum Synchronsignal als auch die Anzahl der Blitzserien sind einstellbar. Ausserdem kann wahlweise eines der den jeweiligen Halbbildern zugeordneten V-Sync-Signale unterdrückt werden, während aus dem anderen ein TTL-kompatibler Triggerimpuls abgeleitet wird. Mit diesem Triggerimpuls kann eine Blitzserie ausgelöst werden, die bei Frame-Transfer-Kameras z.B. genau zu Beginn des Frame-Transfers ausgelöst werden und bei Kameras, die im Interlaced-Modus arbeiten (z.B. Sony XC 77 CE), ein Vollbild belichtet. Gleichzeitig hat der Trigger-Conditioner die Aufgabe, Geräte zu synchronisieren, die eine nicht zu vernachlässigende interne Totzeit haben. Der Bildspeicher des Video-Druckers (Abb. 4) benötigt nach Aktivierung mit einem Print-Befehl noch sieben Bildperioden Wartezeit, bis er ein neues Videobild einlesen kann. Soll also ein bestimmtes Ereignis, das mit der CCD-Kamera aufgenommen wurde, auch auf dem Video-Drucker ausgegeben werden, so sendet der Trigger-Conditioner rechtzeitig einen voreilenden Print-Befehl aus.

3.5 Digitaler Phasenscanner für stroboskopische Beleuchtung

Die stroboskopische Beleuchtung ist ein wichtiges Hilfsmittel für die Aufzeichnung und Analyse hochfrequenter periodischer Vorgänge. Diese altbekannte Methode beruht darauf, dass das zu untersuchende Objekt mit einer um einige Zehntel Hz niedrigeren Frequenz als der eigenen Schwingungsfrequenz beleuchtet wird. Dadurch erscheint der Vorgang stark verlangsamt und kann mit blossen Auge beobachtet oder auf Video-Band aufgenommen werden. Mit einem freilaufenden Frequenzgenerator ist es jedoch nicht einfach, einen kleinen Frequenzabstand einzustellen und stabil zu halten. Für diese Beobachtungsart wurde ein Phasen-Scanner entwickelt, der die Differenzfrequenz $f_1 - f_2$ digital bildet (Abb. 3). Die Schwingungen des Objektes werden mit hoher Genauigkeit in 256 äquidistanten Zeitschritten abgetastet. Bei jedem Schritt liefert der Scanner an den Lichtpulsgenerator Triggersignale zum Auslösen der Lichtblitze. Die Verschiebung der Beobachtungsphase kann jederzeit an einer der 256 Stufen unterbrochen werden. Von diesem Zeitpunkt ab werden die Triggerimpulse mit fester Phasenlage relativ zur Objektschwingung erzeugt.

4. Der Zerfall dünner Flüssigkeitsstrahlen – ein Anwendungsbeispiel

Der Zerfall von Flüssigkeitsstrahlen und das dynamische Verhalten der dabei erzeugten Tröpfchen, z. B. bei Tintenstrahldruck-

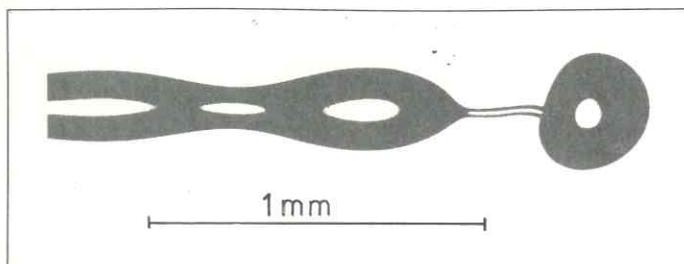


Abb. 5. Momentaufnahme eines Flüssigkeitsstrahles. Düsendurchmesser 0,2 mm. Strahlgeschwindigkeit ca. 1,5 m/s. Aufgenommen mit Sony XC 77 CE. Belichtungszeit 250 ns

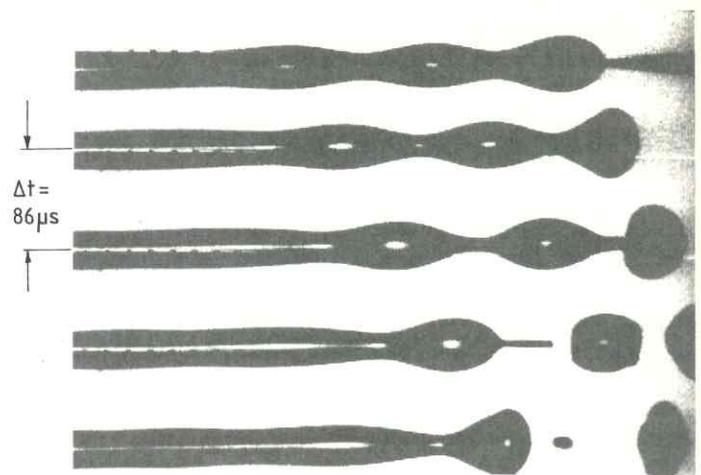


Abb. 6. Zerfallender Wasserstrahl. Düsendurchmesser 0,1 mm. Aufgenommen mit Philips LDH 0600 während des Frame-Transfer-Prozesses. Bild 5-fach belichtet. Blitzdauer 200 ns, Blitzfrequenz 11,6 kHz

kern, Zerstäubern, Einspritzdüsen, ist nicht nur von praktischem Interesse, sondern auch ein wichtiges Hilfsmittel, um die Oberflächenspannung von Flüssigkeiten zu bestimmen [5]. Am Beispiel zerfallender Wasserstrahlen soll dieses schnelle Bildaufzeichnungsverfahren veranschaulicht werden.

Der Versuchsaufbau ist in Abb. 4 skizziert. Er besteht aus einer gepulsten Düse, die einen dünnen Flüssigkeitsstrahl ($\varnothing = 0,1 \text{ mm}$) erzeugt, einem Stereomikroskop mit CCD-Kamera zur Beobachtung des Strahles, der Pulslichtquelle mit Trigger-einrichtung zur Auslösung der Blitzserien und einem Bildprozessor mit Rechner zur Speicherung und Auswertung der Bilder. Die Beobachtung des Strahles und der Tröpfchen erfolgt im Gegenlicht (Hellfeldbeleuchtung), d.h. die Objekte erscheinen dunkel vor hellem Hintergrund. Abb. 5 zeigt eine Momentaufnahme des Strahlendes. Die Schwingungsamplituden sind dort bereits so stark angewachsen, dass sich Teile des Strahles abschnüren und Tropfen bilden. Die hellen Gebiete innerhalb der Schattenbilder entstehen durch die Linsenwirkung des Strahles und der Tröpfchen. Sie enthalten Informationen über die räumliche Struktur der Objekte. Um die Dynamik der Tröpfchenbildung sichtbar zu machen, benötigt man Bildserien mit hinreichend hoher Zeitauflösung. Im vorliegenden Fall gelingt das am einfachsten durch Mehrfachbelichtung während der Transferphase, die bei der hier verwendeten Kamera LDH 0600 etwa $470 \mu\text{s}$ dauert. Die Blitzfrequenz beträgt etwa 11,6 kHz und die Belichtungsdauer 200 ns. Bei dieser Frequenz sind die einzelnen Bilder des schlanken Strahles noch vollständig voneinander getrennt (Abb. 6), so dass man hier im Prinzip auch andere Visualisierungsmethoden wie etwa Mach-Zehnder- oder Differentialinterferometerverfahren anwenden könnte. Die Bildsequenz zeigt ganz deutlich, wie sich die Tröpfchen abschnüren und kleine Satelliten gebildet werden. Kurz nach der Abschnürung schwingen die Tropfen mit grossen Amplituden und in komplizierten Moden. Für die Analyse der Tröpfchenschwingungen sind diese Aufnahmesequenzen allerdings noch zu kurz, da der Frame-Transport bereits nach ca. 0,5 ms beendet ist. In diesem Fall empfiehlt sich die Mehrfachbelichtung während der Integrationsphase des Sensors, die ca. 20 ms dauert. Abb. 7 zeigt ein

vorbeifliegendes Tröpfchen, das 16-fach belichtet wurde. Seine Schwingungsamplitude ist durch Zähigkeitseinflüsse bereits so stark abgeklungen, dass es wie ein Rotationsellipsoid in der Grundmode schwingt. In der Abb. 7, die direkt mit einem Videoprinter ausgelesen wurde, kann man mit blossen Auge nur undeutlich die sich mehrfach überdeckenden Konturen des Teilchens erkennen, da der Graustufenumfang des Druckers sehr eingeschränkt ist. Für die computergestützte Auswertung, die bei dem hier verwendeten Bildprozessor eine Dynamik von 200 Graustufen hat, ist die Analyse solcher Bilder nicht schwierig. Es gelingt sogar, die Berandungen der schwingenden Tröpfchen nahezu vollautomatisch zu analysieren [6]. Abb. 8 zeigt den zugehörigen Verlauf der ellipsenförmigen Randkurven des in Abb. 7 dargestellten Tröpfchens. Aus der Länge der Halbachsen und ihrer zeitlichen Änderung lassen sich Volumen und Schwingungsfrequenz der Tröpfchen bestimmen. Diese Daten bilden den Ausgangspunkt zur Berechnung der Oberflächenspannung der Flüssigkeit [7,8]. Dieses berührungslose Messverfahren ist deshalb so interessant, da es Momentanwerte der Oberflächenspannung an frisch erzeugten Oberflächen liefert und auch für Flüssigkeitsstrahlen hoher Temperatur einsetzbar sein sollte. Neben dieser Anwendung, für die das Verfahren ursprünglich entwickelt wurde, haben wir auch schwingende Wurzelkanalinstrumente [9], Kavitationsvorgänge in Strömungen [10] und den Bewegungsablauf beim Öffnen und Schliessen schneller Einspritzventile mit dieser einfachen Hochgeschwindigkeitskamera untersucht.

Von den fünf in Abschnitt 3.1 erwähnten Kameras haben wir bis jetzt hauptsächlich mit der CCD K-1 und der LDH 0600 gearbeitet, da wir diese schon seit längerer Zeit besitzen. Beide Kameras verwenden denselben Sensortyp, der von der Fläche her halb so gross wie der der übrigen Kameras ist. Dadurch ergeben sich bei der Beobachtung mit dem Mikroskop wegen der entsprechend niedrigeren Vergrösserungseinstellung geringfügige Vorteile bezüglich Schärfentiefe und Ausleuchtung des Gesichtsfeldes. Mit den Kameras 3 und 4 liegen noch keine umfangreichen Erfahrungen vor. Die HTMC-87 zeichnet sich durch besonders hohe Lichtempfindlichkeit bei einem Signal-Rauschabstand von 74 dB und sehr kurzer Frame-Transfer-Zeit aus. Die Pixel sind quadratisch, die Kamera verfügt serienmässig über einen Pixeltakt-Ausgang. Von den getesteten Kameras hat die CF 6 mit 140 μ s die kürzeste Transfer-Zeit. Teilt man die Sensorfläche in 10 Streifen auf, so lassen sich Aufnahmefrequenzen bis 71 kHz

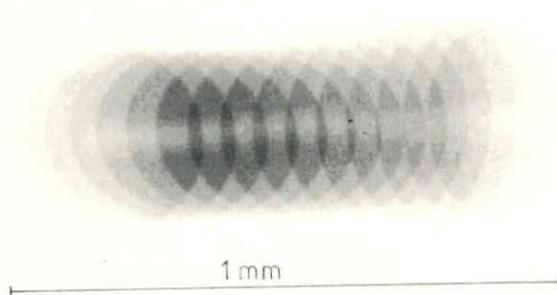


Abb. 7. Oszillierender Wassertropfen. Aufgenommen während der Integrationsphase der Kamera mit Philips LDH 0600. Bild 16-fach belichtet. Blitzfrequenz 30 kHz, Blitzdauer 200 ns

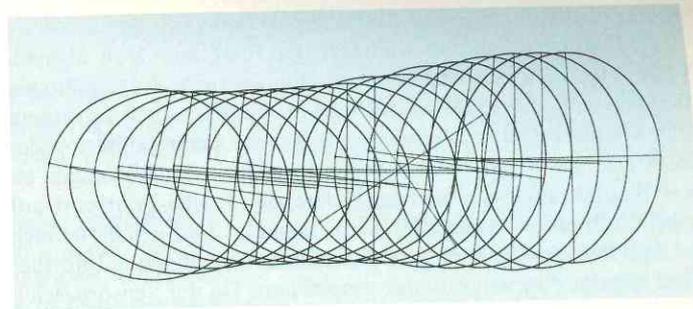


Abb. 8. Computergestützte Auswertung von Abb. 7. Randkurven der Tröpfchen durch Ellipsen angenähert

realisieren. Für Einzelbilder und Mehrfachbelichtung während der Integrationszeit verwenden wir vorwiegend die XC 77 CE. Wegen der hohen räumlichen Auflösung (die Kamera kann auch im Einzelblitzbetrieb Vollbilder erzeugen) und der quadratischen Pixel ist sie für die rechnergestützte Auswertung gut geeignet.

5. Ausblick

Für Spezialanwendungen der hier geschilderten Art ist die Registrierung schnell ablaufender Vorgänge mit kommerziellen CCD-Kameras bereits jetzt eine effektive und preisgünstige Alternative zu fotografischen Verfahren. Da alle für die Versuchsdurchführung notwendigen Komponenten, i.e. Kamera, Pulsgenerator, und PC mit Bildprozessor, robust und leicht transportierbar sind, ist die Anlage auch für Feldversuche brauchbar. Es ist natürlich auch klar, dass dieses Verfahren in der jetzigen Ausbaustufe noch verbesserungsfähig ist. Besonders unangenehm bei der Untersuchung seltener Ereignisse mit einfachen Video-Kameras und Bildprozessoren wirkt sich die Festlegung auf die Fernseh-Norm aus. Dadurch ist man gezwungen, das Experiment relativ zum Synchrontakt der Kamera zu triggern, was häufig nicht mit der nötigen Zeitauflösung möglich ist. Ir letzter Zeit sind jedoch preiswerte Bildprozessoren und Kameras auf dem Markt, die relativ zum Experiment getriggert werden können. Da hier der Bildinhalt pixelweise ausgelesen wird, kann man ausserdem die volle räumliche Auflösung der Kameras ausnutzen. Zusätzlich bieten diese Bildprozessoren meistens noch die Möglichkeit, dass sich das von der Kamera gelieferte Analogsignal vor dem Digitalisieren durch Verstärken und Überlagern einer Offsetspannung optimal an den Bereich des A/D Wandlers anpassen lässt. Dies ist für die Auswertung mehrfach belichteter Bilder von allergrösster Bedeutung, da der Grauwertbereich bei Mehrfachbelichtung von Natur aus abnimmt und nach dem Digitalisieren nicht mehr erhöht werden kann. Ein anderes Problem betrifft die Geschwindigkeit des Frame Transfer-Prozesses. Die hier verwendeten Video-Kameras sind da sie im allgemeinen mit Gleichlicht arbeiten, so ausgelegt, dass der Frame-Transfer möglichst schnell abläuft, um den Einfluss heller Lichter auf den Bildern, die beim Transfer längs der Spalten linienartig verschmierte Streifen erzeugen, klein zu halten. Bei unserer Verwendung als Hochgeschwindigkeitskamera wäre eine variable Transferzeit, mit der man sich dem jeweils zu untersuchenden Objekt anpassen könnte, viel sinnvoller. Dies lässt sich im Prinzip durch einen nachträglichen Eingriff in die Kamera bewerkstelligen.

Das Haupthindernis für eine weitere Verbreitung als Hochgeschwindigkeitskamera liegt jedoch in der geringen Anzahl d

Bilder pro Aufnahmeserie, wenn man einmal von der Methode der Mehrfachbelichtung während der Integrationszeit absieht. Diese ist, wie oben erläutert, nur für spezielle Anwendungen möglich und soll nicht weiter vertieft werden. Auch in diesem Fall könnte man bereits durch eine interne Umorganisation des Frame-Transfer-Prozesses eine Verdoppelung der Bildanzahl einer Aufnahmeserie erreichen, indem der Frame-Transport auf zwei Halbbilder ausgedehnt wird. Dann ist im Speicherbereich und im Sensorbereich eine zeitlich zusammenhängende Information mit der doppelten Länge gespeichert. Da der Sensorbereich nach Ablauf des Versuches nicht mehr beleuchtet wird, bleibt die Information unverändert erhalten und kann nacheinander ausgelesen werden.

Der wichtigste Verbesserungswunsch betrifft die Sensoren selbst. Hier würden Sensoren mit grosser Pixelzahl, etwa in einer Matrix von 512 Spalten und 2024 Zeilen, schon in vielen Fällen den Einsatz von Fotokameras überflüssig machen.

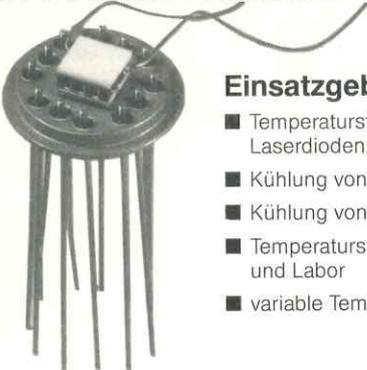
6. Literatur

- [1] W. J. Hiller and T. A. Kowalewski, «Application of the Frame Transfer Charge-Coupled Device for high speed imaging», erscheint in Opt. Eng. vol. 28 (2), 1989
- [2] W. Hiller, H.-M. Lent, G. E. A. Meier, B. Stasicki «A pulsed light generator for high speed photography» Exp. in Fluids vol. 5, 141-144, 1987
- [3] B. Stasicki, W. Hiller, G. E. A. Meier, «Der Lichtimpulsgenerator 869 für Hochgeschwindigkeits-Untersuchungen», Max-Planck-Institut für Strömungsforschung, Bericht 9/1987, Göttingen 1987
- [4] B. Stasicki, W. Hiller, G. E. A. Meier, «A light pulse generator for high speed photography using semiconductor devices as a light source», erscheint in Proceedings of 18th International Congress on High-Speed Photography and Photonics, 28 Aug.-2 Sept. 1988, Xi An, Shaanxi, China
- [5] W. J. Hiller, T. A. Kowalewski, «An optical method for surface tension measurements of dispersed liquid droplets», Proceedings of the ICALEO San Diego 1987, vol. 63 (ed. W. H. Stevenson), pp. 106-110, Laser Inst. of America 1988
- [6] M. Meier, «Bildanalyse räumlicher Strukturen eines Tropfenstrahles», Diplomarbeit an der Technischen Universität Berlin, 1988
- [7] W. J. Hiller and T. A. Kowalewski, «Optical investigation of oscillating liquid droplets», erscheint in ZAMM 69 (4/5), 1989
- [8] W. J. Hiller and T. A. Kowalewski, «Surface tension measurements by the oscillating droplet method», erscheint in Phys. Chem. Hydrodyn. vol. 11 (1), 1989
- [9] H. R. Griesinger, W. J. Hiller, T. A. Kowalewski, F. Kreter, «Hydrodynamische Phänomene induziert durch schwingende Instrumente in Modellversuch», Vortrag, 2. Jahrestagung der DGZ, Frankfurt 1988
- [10] H. R. Griesinger, W. J. Hiller, T. A. Kowalewski, F. Kreter, «Bewegungsformen freischwingender Wurzelkanalinstrumente», Vortrag, 2. Jahrestagung der DGZ, Frankfurt 1988

MÜNCHEN
HAMBURG
NEW YORK

NUCLETRON
Geräte + Systeme

Thermoelektrische Temperaturkontrolle mit PELTIER-Elementen



Einsatzgebiete:

- Temperaturstabilisierung von Laserdioden/-arrays
- Kühlung von Sensoren (CCD-, IR-,...)
- Kühlung von Leistungshalbleitern
- Temperatursteuerung in Diagnostik und Labor
- variable Temperatur-Referenz

Haben sie Fragen dazu?
Rufen Sie uns an:
Tel. 0 89 / 14 90 02-78



Weitere Informationen erhalten Sie über das Kennwort: **PELTIER**

NUCLETRON Vertriebs-GmbH
Geräte + Systeme

Gärtnerstraße 60, 8000 München 50
Tel. 0 89 / 14 90 02-78, Telex 5215 297

The Swiss Federal Institute of Technology in Lausanne

announces the availability
of a tenured position as

Professor of Applied Optics

Applications deadline:
March 31th, 1989

Beginning of activity:
Open

Additional information may be
obtained from:

**Secrétariat général de l'Ecole
Polytechnique Fédérale de
Lausanne – CE – Ecublens –
1015 Lausanne/Suisse**