

Hochgeschwindigkeitsfotografie



Von
Markus Bierau
Holger Mayer
Tobias Theiss

Inhalt

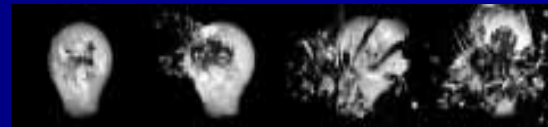


- Einführung
- Historie & Wichtige Begriffe
- Kamera-Arten
- Anwendungen

Prinzip der Hochgeschwindigkeitsfotografie



- Visualisierung schneller, dem menschlichen Auge nicht zugänglicher Phänomene
- extrem kurze Belichtungszeiten erlauben es, Bewegungen einzufrieren
- Foto- oder Videokameras
- Aufnahme-Zeitpunkt ermittelt über automatischen Auslösekontakt
→ Trigger (Lichtschranke, Mikrophon, elektrischer Kontakt, etc.) und Geduld
- Laserblitzer : Belichtungszeiten unterhalb Femto-Sekunden
(= 1/1 000 000 000 000 000 sek)
→ Stroboskop – Effekt!



Geschichte der Hochgeschwindigkeits-Photographie



Pioniere

- 1851: Henry Fox Talbot (1800-1877)
- 1872: Eadweard J. Muybridge (1830-1904)

Henry Fox Talbot

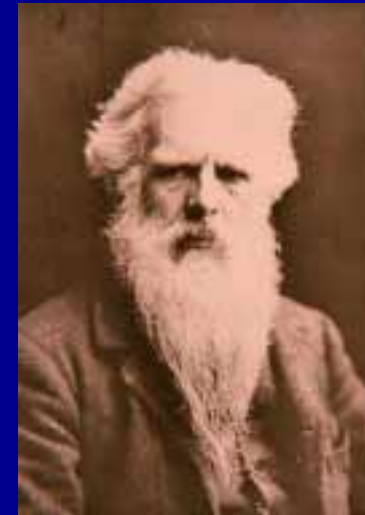


- 1851: Langsame Verschlüsse / Objektive mit kleiner Öffnung
→ Photos von bewegten Objekten erschwert!
- Pionier: Henry Fox Talbot (1800-1877)
 - Erstes Hochgeschwindigkeits-Photo-Experiment in Royal Society:
Zeitung auf schnell rotierendes Rad gespannt
 - Kamera Verschluss durchgehend offen → Raum abgedunkelt
 - Belichtung durch hochintensiven Licht-Funken für nur 1/2000 Sek.
→ Auf dem entwickelten Negativ konnte ein kleiner Ausschnitt der Zeitung
klar gelesen werden!
 - Bewegung des Objekts erfolgreich eingefroren

Eadweard James Muybridge



- 1872: Eadweard J. Muybridge (1830-1904) soll den fotografischen Beweis dafür erbringen, dass ein Pferd zu einem bestimmten Zeitpunkt während des Galopps mit keinem Huf mehr den Boden berührt
- Lösung: Anordnung von 12 Kameras in Reihe → durch „Stolperdrähte“ ausgelöst

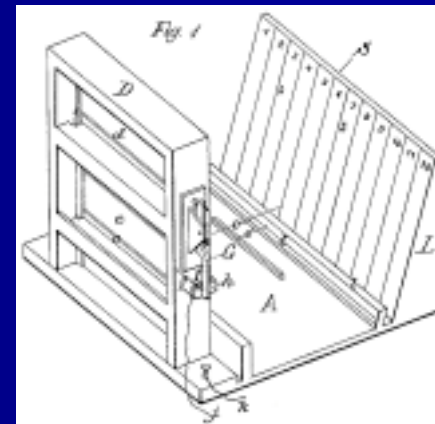


Eadweard James Muybridge



■ Aufbau

- 12 Stereoskopkameras (1877: 1/1000sec)
- Drähte → Elektromagneten → Hebel → Verschluss durch Gummizug geöffnet



Eadweard James Muybridge

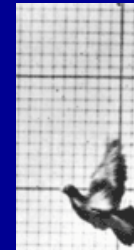


- 1880er an der Uni von Pennsylvania:
Bewegungsstudien vor 37m langer Bühne
- 24 Kameras parallel zur Bewegungsrichtung
- Aufnahmen auf 1" x 1.5" Glasplatten
- Exposure: 1/1000 Sek.
- Auslösung durch rotierende Scheibe mit Kerben in bestimmten abständen

Eadweard James Muybridge



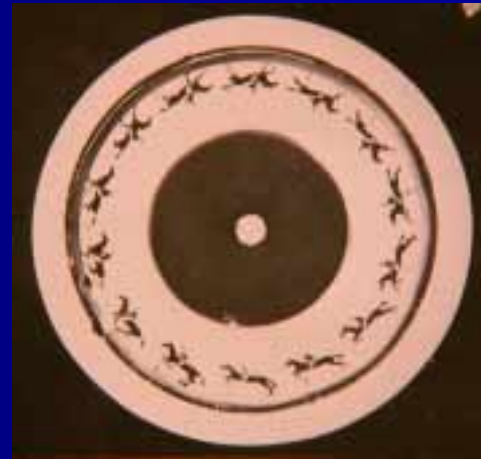
Eadweard James Muybridge



Eadweard James Muybridge



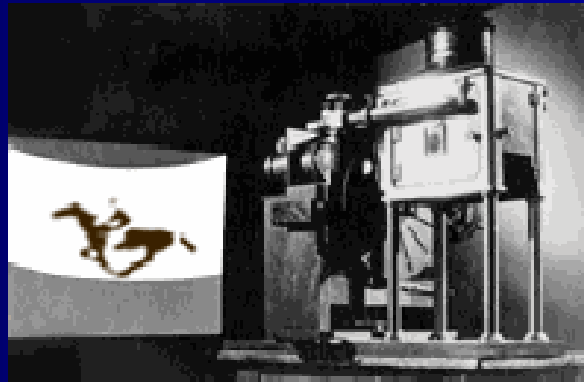
- Zoopraxiscope



Eadweard James Muybridge



- Zoopraxiscope



Stroboskopie



Prinzip

- Sehr kurze periodische Belichtungen eines bewegten Objektes bei geöffneter Kamera
- Raum abgedunkelt
- Mehrfachbelichtung
- Blitzfrequenz herkömmlicher Stroboskop-Blitze: bis zu 1000 Hz
- Industriell: bis 6000 Hz



Stroboskop-Mehrfachbelichtung eines Tennisspielers

Stroboskopie



Anwendung

1. Sichtbar machen von schnellen Bewegungen

Beispiele:

- Golfschwung (100 Hz) →
- ← Geschoss (6000 Hz mit Xenon Röhre) auf 35mm Film



Problem: unbewegliche Teile überbelichtet!



Stroboskopie



Stroboskopie



Anwendung

2. Einfrieren von schnellen zyklischen / kreisförmigen Bewegungen

- Blitzfrequenz synchron zu zyklischem Ereignis einstellen
- zB. Maschine mit 5000 rpm \rightarrow 5000 Hz
 - $f_{\text{Blitz}} = f_{\text{Objekt}} \rightarrow$ Bewegung erscheint stationär
- **Stroboskop-Effekt:** Sichtbar machen einer scheinbaren Bewegung
Beispiel : auf n Umdrehungen $+ x^\circ \rightarrow$ Blitzt man z.B. ein Zahnrad
jede Umdrehung plus x° an = scheinbare Auflösung von x
 - $f_{\text{Blitz}} < f_{\text{Objekt}} \rightarrow$ Vorwärtsbewegung
 - $f_{\text{Blitz}} > f_{\text{Objekt}} \rightarrow$ Rückwärtsbewegung

Trigger & Synch



Triggern

- einmaliges Auslösen → Aufnahme starten

Beispiele

- Crash-Test:
Trigger = Kontakt in Stoßstange
- sich Schnell bewegende Objekte (Tiere, etc.)
- Synchronisation von Aufnahme Frequenz an ein periodisches Ereignis anpassen
→ Trigger = Wiederkehrendes Steuersignal
löst pro Schwingung einen Bildeinzug aus



Hochgeschwindigkeit versus Zeitlupe



- Warum Hochgeschwindigkeitsfotografie → reicht denn die Zeitlupenfunktion des Camcorders nicht aus?
- 25 Bilder/Sekunde → Information dazwischen geht verloren
- **Beispiel** : Überwachung eines Schwingvorgangs
→ 3000 Umdrehungen/Minute = 50 Umdrehungen/Sekunde
→ nur jede zweite Schwingung erfasst!!!
- **Abtasttheorem** nicht vergessen: Um eine (schwingende) Bewegung rekonstruieren zu können, muss die Aufnahmefrequenz **mindestens** doppelt so hoch sein wie die Frequenz der Bewegung

Kamera-Arten



- Trommelkamera
- Drehspiegelkamera
- Zeilenkameran
- Streak-Kameran
- Sequenzkamera/Single-Shot-Kamera

Ultra-Hochgeschwindigkeitskameras



Trommelkamera

- Film ist auf einem rotierenden Zylinder aufgespannt und wird am Objektiv vorbeigeführt
- Aufnahmefrequenz $\gg 100\,000$ Bilder/sek
- Trommelumfang bis über 1 Meter
- Aber : nur eine Trommelumdrehung pro Aufnahme
- Kamera wird auf Sollgeschwindigkeit gebracht und - bei geöffnetem Verschluss im abgedunkelten Raum – eine Beleuchtungsblitzserie ausgelöst



Trommelkamera Strobodrum

| Eigenschaft | Wert | Einheit |
|---------------------|----------|---------|
| Trommelumfang | 150 | cm |
| Filmgeschwindigkeit | 5-90 | m/s |
| Filmbreite | 35 | mm |
| Bildhöhe | 0-24 | mm |
| Objektive | Standard | |
| Netzanschluss | 220 / 50 | V / Hz |
| Gewicht | 45 | kg |

Ultra-Hochgeschwindigkeitskameras



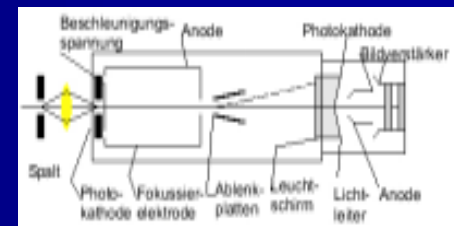
Drehspiegelkamera

- Bildaufnehmer ruhen → Film in Trommel arretiert
- Mechanik : über schnell rotierendem Spiegel werden die im Teilkreis angeordneten Bildaufnehmer belichtet → „separate Optiken“
- bis zu 5 000 Umdrehungen/Sekunde
- Aufnahmefrequenzen von über 1 Million Bilder/sek möglich
- Erste Umsetzung des *streak*-("Schmierstrich")-Verfahren
- Einsatz: Laborforschung!

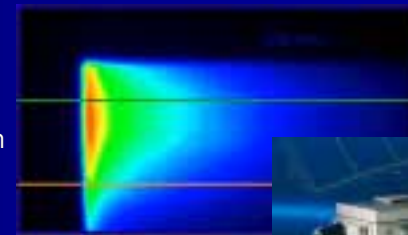
Streak-Kamera



- schnellsten optischen Detektorsysteme der Welt
→ Zeitauflösungen von weniger als einer Picosekunde
- Mechanik : Film läuft kontinuierlich (mit ca. 1 bis 75 m/sek) durch; kontinuierliche Belichtung
→ Abrollgeschwindigkeit konstant
- Nahtloser Übergang der Bilder ineinander
→ zeitliches Nacheinander als räumliches Nebeneinander Abbilden
- optische Phänomene direkt im Zeitbereich beobachten
- Andere Einsatzgebiete : Zeitaufgelöste Spektroskopie in Physik, Chemie und Biochemie; Analyse von schnellen optischen Pulsen in der Lasertechnik



Aufbau einer Streikkamera



Spektrum einer Verpuffung



Zeilenkameras



- kein flächiger Sensor
- nur eine einzige lichtempfindliche Zeile
- zeilenweisen Abtastungen wird elektronisch wieder ein flächiges Bild zusammensetzen
- Hohe Zeilen-Abtastfrequenz → Aber nicht bezogen auf zusammengesetzte Bilder!!
- Color-Line-Scanner : digitale Zeilenkamera mit hoher Auflösung, die für jeden Bildpunkt die Intensität der drei Grundfarben Rot, Grün und Blau mißt
- Einsatz: Qualitätsüberwachung an Förderbändern



Digitale Zeilenkamera
(Color-Line-Scanner)
Baujahr 1994

Sequenzkameras/Single-Shot-Kamera



- Kamera, die im kurzen zeitlichen Abstand (z.T. Mikro-Sekunden bis zu Nano-Sekunden) eine kurze Sequenz von Aufnahmen bei extrem kurzer Belichtungsdauer macht
- Aufbau aus mehrfach vorhandenen Videokamera-Sensoren oder Fotofilm oder durch Kaskadierung des Sensors bei Einzelbildkamera
- Einsatz: Zündvorgänge, militärische Forschung,

8-fach Sofortbild-Kamera
Sequence 8 von Acmel
Kürzeste Zeit zwischen
zwei Aufnahmen: 0,02 sek



Sequenzkamera ACMEL SQ-16
16 Sequenzbilder
2 Negative belichtet



Zeitrafferkameras



- Eigentlich keine Hochgeschwindigkeitskamera
- sondern 'umgekehrt betriebene' Zeitlupen-Kameras
- Einzelbilder in definiertem zeitlichen Abstand
- Bilder werden anschließend schneller abgespielt als aufgenommen → „Zeit raffen“
- Einsatz: Analyse von langsamen Wachstums- und Umwandlungsvorgängen (z.B. sprießender Keimling)

Roboteyepair by Analogic Computers Inc



- Roboteyepair CVM erfasst und verarbeitet Bilder mit 10000 fps
- zwei Ultra – Hochgeschwindigkeits-CVM-Sensoren → 10000 Stereo-Bild-Paare pro Sekunde mit zwei mal 128 x 128 Pixel
- Modell Roboteyepair COM-BI : 1,3 Megapixel-CMOS-Chip → 28 fps im Vollbild (1280 x 1024Pixel) oder bis zu 2000 fps in einer beliebigen 128-Pixel-Region
- CMV (Celular Visual Microprocessor) : „zelluläre neuronale nichtlineare (CNN) Netzwerkarchitektur mit Rechenleistung bis zu 10^{12} digitalen Operationen pro Sekunde
- Anwendungsgebiete : z.B. Objektverfolgung, Robotersteuerung, Inspektion, Online-Qualitätskontrolle (z.B. Textilanalyse), Sicherheitsüberwachung, Kollisionsvermeidung

CCD versus CMOS



CCD-Sensoren

- Auf siliziumbasis
- wie Belichtungsmesser, die Ladungen sammeln und in bestimmten Abständen ausgelesen werden
- FT (Full Frame Transfer), ILT (Interline Transfer) und FIT (Frame Interline Transfer)
- seit mehr als zwei Jahrzehnten im Einsatz bewährt
- auch im nahen Infrarot empfindlich
- überstrahlungsempfindlich → blooming = fackelartige Auslöschungen in benachbarten Bereichen

CCD versus CMOS



CMOS-Sensoren

- Auf siliziumbasis
- messen kontinuierlich den vom Licht induzierten Fotostrom
- PPS (Passive Pixel Sensor)
- APS (Active Pixel Sensor)
- als APS nahezu unempfindlich gegen Überstrahlung
- selbe spektrale Empfindlichkeit (d.h. Farbwahrnehmung) wie das menschliche Auge

Phantom Highspeed-Kameras (Photo-Sonics)



- CMOS-Sensortechnik : CSR-CMOS Sensor speziell für High-Speed-Bereich
- Einsatz : Automobilsicherheitsstudien, Fehlerdiagnose, Produktentwicklung, Entwicklung von Verteidigungssystemen
- Aufnahmegeschwindigkeit von 1000 Bildern pro Sekunde bei 512 x 512 bzw. 1024 x 1024 Pixeln
- variable Einstellung der Shuttergeschwindigkeit bis zu 10 μ Sekunden (1/100.000 Sekunde)



Anwendungen



- Impact-Vorgänge
- Kavitationsblasen
- Explosionsdynamik
- Gemischbildungs-, Zünd- und Verbrennungsvorgänge
- Video's

Anwendungen



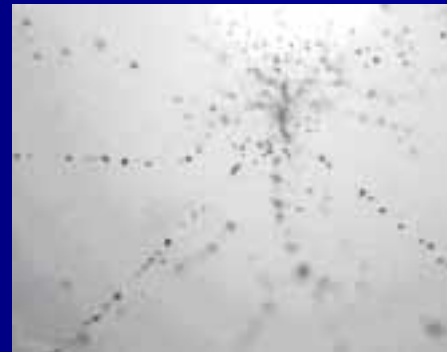
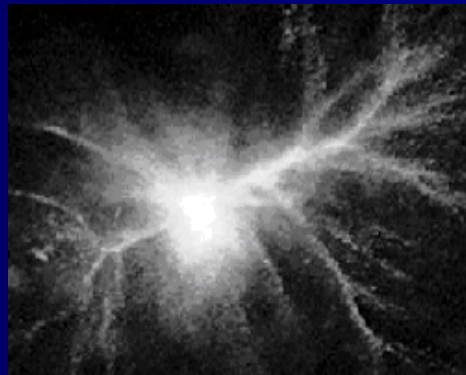
- Impact-Vorgänge (Crash-Tests)



Anwendungen



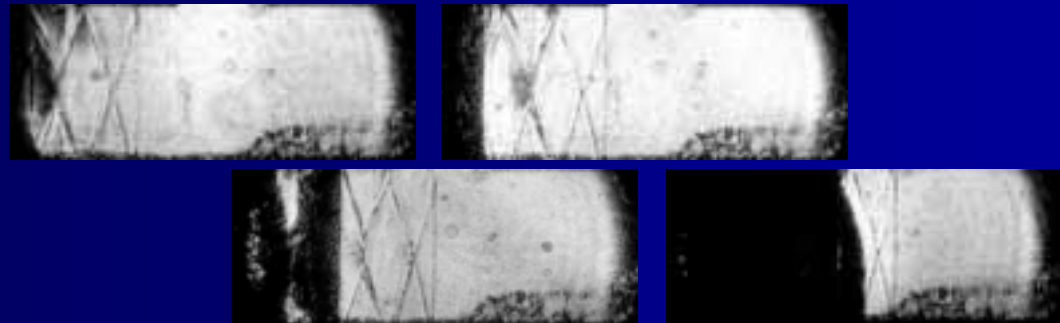
- Kavitationsblasen (Ultraschallanwendungen)



Anwendungen



- Explosionsdynamik (Stoßwellen rufen Dichte-gradienten hervor)
 - > 50.000 Bilder/sek ($280\mu\text{s}$ – $340\mu\text{s}$)
 - > Drehtrommelkamera
 - > Festkörperlaser (532nm , bis 100.000Hz)



Anwendungen



- Gemischbildungs-, Zünd- und Verbrennungsvorgänge



Anwendungen



- Hochgeschwindigkeitskamera systeme
SpeedCam +500, +2000, 512, PRO os (Firma Weinberger)



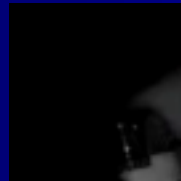
Anwendungen



Anwendungen



Anwendungen



Anwendungen



Anwendungen



Anwendungen



ENDE



Danke für Eure Aufmerksamkeit!!

Noch Fragen?

Quellen



- www.welfen.rv.bw.schule.de/projekt/99/photos.htm
- www.fe.n-net.de/walter_preiss/d/slomo.html
- www.sukhamburg.de/download/zk_k2_de.pdf
- www.landmaschinen.tu-dresden.de/Lehrstuhl/Leistungen/highspeed.html
- www.analogic-computers.com
- www.physik3.gwdg.de
- www.tu-chemnitz.de
- www.cle.de
- <http://www.rit.edu/~andpph/text-high-speed.html>

History

- <http://web.inter.nl.net/users/anima/chronoph/muybridge/index.htm>
- <http://www.precine.mahistory.net/1870.htm>

Stroboskopie

- <http://www.rit.edu/~andpph/articles.html>
- <http://www.wchi.com/slp/lcds.html>