

Eine einfache Drehspiegelkamera mit auswechselbarer Optik

D. ELLE, Institut für den Wissenschaftlichen Film, Göttingen

A Simple Rotating Mirror Camera with Interchangeable Lenses. A rotating mirror camera constructed from simple components is described, which can be adapted to the dimensions of the process to be filmed by interchanging the optical equipment in front of the rotating mirror. Frequency range: 20,000—300,000 i/s., image scale between 1:10 and 5:1.

Caméra à Miroir Giratoire muni d'une Optique Interchangeable. On décrit ici une caméra à miroir giratoire, construite à partir d'éléments simples, et susceptible de s'adapter à l'ordre de grandeur du phénomène à photographier; il suffit de changer la partie de l'optique placée devant le miroir giratoire. Domaine de fréquences: de 20000 à 300000 i/s; échelle de reproduction située entre 1:10 et 5:1.

Mit den heute erprobten Zeitdehnerkameras können Vorgänge in Zeitabständen bis etwa 10^{-4} s aufgenommen werden [1]. Noch kürzere Bildwechselzeiten lassen sich u. a. mit einer Drehspiegelkamera erreichen [5]. Die Bildtrennung besorgt hier ein rotierender Spiegel, dessen bewegte Masse erheblich geringer ist als die in einer Zeitdehnerkamera oder die einer Trommel in einer Trommelkamera. Es ist deshalb erklärlich, wenn mit einer Drehspiegelkamera kürzere Bildwechselzeiten bzw. höhere Bildfrequenzen möglich sind. Die grundsätzliche Anordnung zeigt Abb. 1.

Das Hauptobjektiv O entwirft von dem Aufnahmegegenstand G ein Zwischenbild auf dem Drehspiegel DSp . Die im Kreise um dessen Achse angeordneten Kameras sind sämtlich auf dieses Zwischenbild eingerichtet. Durch den umlaufenden Drehspiegel wird das von dem Objektiv O kommende Lichtstrahlenbündel mit großer Geschwindigkeit über die einzelnen Kameras hinweggeführt. Diese werden dadurch zeitlich nacheinander belichtet. Die Bildwechselzeit bzw. die Bildfrequenz berechnet sich aus der Umlaufzahl des Drehspiegels und dem Winkelabstand zweier im Kreise benachbarter Kameras.

Von amerikanischen und englischen Firmen werden solche Drehspiegelkameras bereits hergestellt. Sie erreichen Bildfrequenzen bis 8×10^6 /s, sind aber verhältnismäßig teuer und für Aufnahmen im Abbildungsverhältnis von etwa 1:10 eingerichtet. Für unsere Zwecke sollte eine Kamera aufgebaut werden, die im Bereich von 2×10^4 B/s bis etwa 2×10^5 B/s arbeitet. Außerdem ist es wünschenswert, das Abbildungsverhältnis bei der Aufnahme um den mittleren Bereich $\alpha = 1:1$ beliebig wählbar zu machen. Denn es hat sich immer wieder gezeigt, daß die Aufnahmeobjekte, die in dem genannten Bildfrequenzbereich untersucht werden sollten, verhältnis-

mäßig kleine Abmessungen haben. Da für den Aufbau lediglich die Mittel einer Institutswerkstatt zur Verfügung standen, mußte auf Vorrichtungen verzichtet werden, die sonst bei der Prüfung und Justierung zur Einhaltung einer hohen mechanischen und optischen Genauigkeit notwendig sind. Die Abmessungen der Kamera sollten deshalb so groß gewählt werden, daß man ohne solche Hilfen auskommen konnte. Die Öffnung einer derartigen Kamera kann nur verhältnismäßig klein sein. Weiterhin ist zu berücksichtigen, daß die Tiefe, in der der Gegenstand bei einem Abbildungsverhältnis $\alpha = 1 : 1$ scharf abgebildet werden kann, begrenzt ist.

Um die Bildtrennung zu verwirklichen und das durch das Hauptobjektiv O hindurchgehende Licht auszunutzen, muß man eine Feldlinse einbauen, welche die Öffnung von O auf eines der Kameraobjektive HO (s. Abb. 1) abbildet. Eine solche Feldlinse unmittelbar vor dem Drehspiegel ist sehr hinderlich. Man hat deshalb in einigen Konstruktionen den Drehspiegel als Hohlspiegel ausgebildet [2]. Wir versuchten statt dessen, zwei Plan-konvexlinsen, deren ebene Flächen verspiegelt worden sind, mit diesen

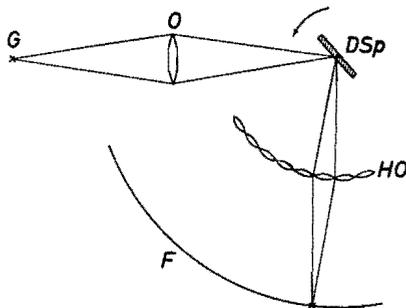


Abb. 1. Grundsätzliche Anordnung einer Drehspiegelkamera

Flächen aneinandertzulegen und so als Drehspiegel und als Feldlinse in den Rahmen des Drehspiegelkörpers einzubauen. Das hat den Vorteil, daß die Spiegelebene genau in die Drehachse gebracht werden kann und damit Fehler durch die Verschwenkung des Spiegels kaum in Betracht kommen. Dafür sind aber astigmatische Fehler durch schiefe Bündel nicht zu vermeiden. In einigen Fällen hat sich diese Art Feldlinse aber als brauchbar erwiesen. Ein weiterer Nachteil liegt darin, daß die Daten dieser Linse und damit auch die Abstände zu den Objektiven festgelegt sind.

Um die Kamera dem Aufnahmegegenstand besser anpassen zu können und die Optik auswechselbar zu machen, wurde, ähnlich wie in einigen amerikanischen Konstruktionen [3], [4], weiter vorn an der Stelle G (Abb. 1) ein

erstes Zwischenbild des Gegenstands erzeugt. Hier lassen sich dann gewisse Änderungen anbringen. Die optische Anordnung ergibt sich aus dem Schema der Abb. 2. Eine Feldlinse L_F (Brennweite f_F) kommt in die Nähe des vom Gegenstand G entworfenen ersten Zwischenbildes.

Das zweite Zwischenbild B_2 liegt an der Stelle des Drehspiegels und O_3 ist das jeweilige Kameraobjektiv. Für eine Übersichtsrechnung können wir die Abstände s_i des Gegenstandes bzw. des Zwischenbildes und die der zugehörigen Bilder s'_i durch die Brennweiten f_i der Objektive O_i und durch die Abbildungsverhältnisse β_i ausdrücken ($i = 1, 2, 3$).

$$s_i = f_i \left(1 + \frac{1}{\beta_i} \right), \quad s'_i = f_i (1 + \beta_i).$$

Außerdem ist aus Abbildung 2 abzulesen:

$$\begin{aligned} a &= f_F \left(1 + \frac{d_1}{d'_1} \right), & a' &= f_F \left(1 + \frac{d'_1}{d_1} \right), \\ b &= f_2 \left(1 + \frac{d'_1}{d_3} \right), & b' &= f_2 \left(1 + \frac{d_3}{d'_1} \right). \end{aligned}$$

Das Objektiv O_2 hat zwei Aufgaben zu erfüllen: Einmal die Abbildung des ersten Zwischenbildes B_1 auf den Drehspiegel als Zwischenbild B_2 zu besorgen und andererseits das von der Feldlinse L_F entworfene Bild O_1' der Öffnung O_1 auf O_3 abzubilden. O_2 dient damit als zweite Feldlinse, die nicht unmittelbar vor dem Drehspiegel stehen muß. Der gesamte durch das Hauptobjektiv O_1 tretende Lichtstrom wird dann unter bestimmten Bedingungen, abgesehen von den vernachlässigbaren Reflexions- und Absorptionsverlusten, auch durch das Objektiv O_3 einer der im Kreise angeordneten Kameras hindurchgehen. An Hand der Abb. 2 lassen sich Abstandsbeziehungen aufstellen, aus denen nach einigen Rechnungen folgende Formel für die Brennweite der ersten Feldlinse L_F hervorgeht:

$$f_F = \frac{1}{\frac{\beta_2^2 \beta_3}{f_3 (1 + \beta_3)} + \frac{\beta_2}{f_2} + \frac{1}{f_1 (1 + \beta_1)}}.$$

Werden die Daten der Objektive O_2 und O_3 , also deren Brennweiten f_2 , f_3 und auch die Abbildungsverhältnisse β_2 und β_3 konstant gehalten und berücksichtigt man weiterhin, daß das Gesamtabbildungsverhältnis vom Gegenstand G auf das Filmbild B_3 $\alpha = \beta_1 \beta_2 \beta_3$ ist, dann wird ($\beta_2 \beta_3 = c$):

$$f_F = \frac{1}{C + \frac{1}{f_1 \left(1 + \frac{\alpha}{c} \right)}}; \quad C = \frac{\beta_2^2 \beta_3}{f_3 (1 + \beta_3)} + \frac{\beta_2}{f_2}.$$

Die Abhängigkeit $f_F = F(f_1, \alpha)$ kann in einem Kurvenblatt aufgetragen werden, aus dem bei vorgegebenem Abbildungsverhältnis α die günstigste

Auswahl des Hauptobjektivs O_1 (Brennweite f_1) und der Feldlinse (f_F) bestimmbar ist. Das heißt, der Abbildungsmaßstab der Kamera läßt sich auf diese Weise dem Aufnahmeobjekt in gewissen Grenzen anpassen.

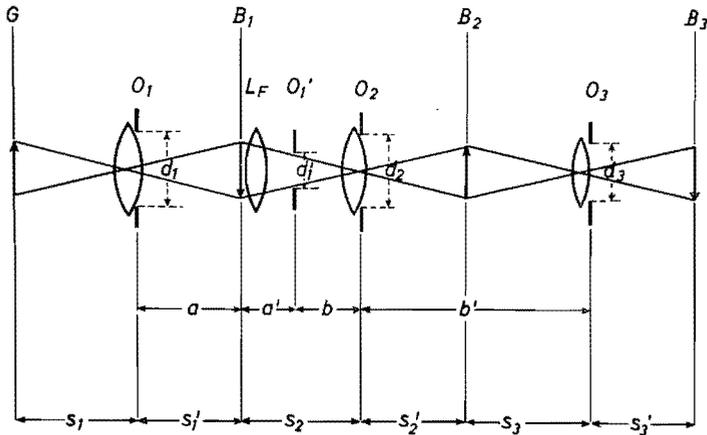


Abb. 2. Schema der optischen Anordnung

Für die Beleuchtungsstärke in der Bildebene einer Kamera kann allgemein geschrieben werden:

$$E = \frac{B_m \pi 10^4}{4} \left(\frac{d}{f} \right)^2 \frac{1}{(1 + \beta)^2}.$$

Dabei ist

B_m = mittlere Leuchtdichte des Aufnahmegegenstands

β = lineares Abbildungsverhältnis

$\frac{d}{f}$ = Öffnungsverhältnis des Objektivs.

Die Beleuchtungsstärke E_3 im Bild B_3 , also an der Stelle des Films, ist dann

$$E_3 = \frac{B_m \pi 10^4}{4} \left(\frac{d_3}{f_3} \right)^2 \frac{1}{(1 + \beta_3)^2}.$$

Das gilt unter der Voraussetzung, daß die Öffnung des Objektivs O_3 voll ausgeleuchtet ist und die Leuchtdichte dort ebenfalls B_m ist. Das hängt von den Öffnungsdaten der vorhergehenden Objektivs O_1 und O_2 ab und ist in bestimmten Grenzen erfüllbar.

Wie schon erwähnt, muß außerdem die Schärfentiefe t im Gegenstandsraum berücksichtigt werden. Dafür gilt:

$$t = 2 \frac{f_1 \left(1 + \frac{1}{\beta_1}\right)}{d_1 \beta_1} e_1',$$

wenn $d_1 \beta_1 \gg e_1'$

(e_i' = Durchmesser des Unschärfestreckkreises im i -ten Bild).

Es darf angenommen werden; daß im Zwischenbild B_1 der Unschärfestreckkreis infolge von Fehlern des Hauptobjektivs O_1 vernachlässigbar klein ist gegenüber dem Streckkreis, der sich durch Rückprojektion aus dem Filmbild B_3 ergibt. Danach wäre zu setzen:

$$e_1' = \frac{e_3'}{\beta_2 \cdot \beta_3} \quad \text{und}$$

$$t = 2 \frac{s_1}{d_1 \cdot \alpha} e_3'.$$

Im Hinblick auf die Schärfentiefe ist es deshalb günstig, die Öffnung des Objektivs O_1 soweit abzublenden, daß die Fläche eines der Objektivs O_3 gerade ausgeleuchtet wird.

Diese in einem Kreisbogen von 130° angeordneten 60 Objektivs O_3 sind Achromate, deren Brennweiten ($f_3 = 18$ cm) gut gegeneinander abgeglichen sind. Diese Brennweiten und damit die Abstände sind hier also so groß gewählt, daß kleine Justierfehler bei der Montage der Achromate und bei der Einstellung des Filmhalters relativ wenig ins Gewicht fallen. Allerdings muß berücksichtigt werden, daß bei einem Abbildungsverhältnis $\beta_3 = 1:1$ ein kleiner Abstandsfehler einen schon merklichen Fehler des Abbildungsverhältnisses bewirken kann. Für die Kontrolle bei der Bildauswertung muß möglichst ein Vergleichsmaßstab mit aufgenommen werden. Die Öffnung der Kamera ist günstigstenfalls $1:10$. Für die Bemessung der Beleuchtung des Aufnahmeobjekts muß praktisch aber mit einer Öffnung $1:20$ gerechnet werden, wenn man das Abbildungsverhältnis $\beta_3 = 1:1$ berücksichtigt.

Der für die Bildtrennung wichtigste Bestandteil der Kamera ist der Drehspiegel und sein Antrieb. Für Bildwechselzeiten von etwa 10^{-5} s genügen Umlaufzahlen des Spiegels von etwa 300/s. Diese lassen sich mit einem schnellaufenden elektrischen Motor (Schleifmotor) über ein passendes Getriebe erreichen.

Um Fehler durch die Verschwenkung des Spiegels zu vermeiden, ist es wünschenswert, die Spiegelebene möglichst nahe an die Spiegeldrehachse heranzubringen. Wir haben deshalb einen beidseitig bedampften Glaspiegel von nur 2 mm Dicke und 25 mm \times 35 mm Fläche in einen geeigneten Rahmen eingebaut (Abb. 3).



Abb. 3. Drehspiegel

Dieser Rahmen ist aus einem zylindrischen Bondurstück von 35 mm \varnothing ausgefräst worden. Oben und unten sind in Richtung der Zylinderachse die Lagerzapfen angedreht. Der Glasspiegel läßt sich in den Rahmen so einsetzen, daß die Massenverteilung von Spiegel und Rahmen symmetrisch zur Drehachse liegt. Der so hergerichtete Drehspiegelkörper läuft zwischen zwei Pendelkugellagern um eine senkrechte Drehachse. Der Antrieb mit dem genannten Motor geschieht von oben über ein Zahnradgetriebe (s. Abb. 4). Es hat sich gezeigt, daß hiermit eine Umlaufzahl von 900/s erreicht werden konnte, ohne daß Unregelmäßigkeiten wegen mangelhafter Auswuchtung des Drehspiegelkörpers feststellbar sind. Damit ist es möglich, Aufnahmen in Zeitabständen von $\frac{1}{3} \cdot 10^{-5}$ s, d. h. bis zu Bildfrequenzen von 300 000/s durchzuführen. Die Einzelbildbelichtungszeit ist

etwa $t_B = \frac{t_w}{2}$, d. h. die Hälfte der Bildwechselzeit. Durch geeignete Blenden bei O_1 und O_3 kann hierfür auch ein geringerer Bruchteil der Bildwechselzeit gewählt werden, wenn genügend Licht zur Verfügung steht und soweit das im Hinblick auf die Beugungseffekte zulässig ist.

Quer zur unteren Achse des Spiegelrahmens ist in Abb. 3 ein Eisenstift sichtbar. Bei der Drehung des Spiegels läuft dieser Stift zwischen den Polen eines Magneten um. Die dadurch in kleinen Spulen je Umlauf erzeugten zwei Impulse dienen einmal zur Drehzahlmessung des Spiegels mittels Oszillographen und ferner zur Auslösung der Beleuchtungseinstellung.

Wegen der doppelseitigen Verspiegelung des Drehspiegels werden die 60 Objektive O_3 bei jeder Umdrehung zweimal überschrieben. Um mehrfache Belichtung zu verhindern, darf das Licht der das Aufnahmeobjekt beleuchtenden Blitzlampe höchstens während der halben Umdrehungszeit wirksam sein. Sie muß mindestens 18% der Umdrehungszeit leuchten, wenn sämtliche Objektive O_3 belichtet werden sollen. Die Kamera ist während 36% ($2 \times$ je 18%) der Drehspiegelumlaufzeit aufnahmebereit. Die Leuchtdichte einer Xenon-Blitzlampe steigt zeitlich zuerst steil an, geht über ein Maximum hinweg und fällt dann langsamer ab. Die größte Leuchtdichte in der Umgebung des Maximums soll in die Zeit gelegt werden, in der der Spiegel über die 60 Objektive O_3 hinwegschreibt, während der Abfall des Leuchtens in die nächsten 32% der Drehspiegelumlaufzeit kommen soll, in der die Kamera nicht aufnahmebereit ist. Dazu muß die Blitzlampe bei einer bestimmten Spiegelstellung während des Umlaufs ausgelöst werden, was durch eine geeignete Einstellung der Pole des obengenannten magnetischen Impulsgebers geschieht. Der Impuls kann außerdem dazu dienen, den aufzunehmenden Vorgang im geeigneten Zeitpunkt auszulösen. Wirksam wird dieser magnetische Impulsgeber aber erst dann, wenn beim Öffnen eines mechanischen Kameraverschlusses bei O_2 (Abb. 4) ein Kontakt betätigt wird.

Ist die für die Aufnahme erwünschte Bildwechselzeit t_w , dann soll die Leuchtdauer der Blitzlampe etwa $100 t_w$ betragen. Durch geeignete Kombination von Kapazitäten, Induktivitäten und Widerständen im Entladungskreis der Blitzlampe erreicht man, daß deren Leuchtdauer zwischen 4×10^{-3} s und 3×10^{-4} s veränderlich ist. Somit läßt sich diese Leuchtdauer den gewünschten Bildwechselzeiten anpassen.

Zur Synchronisierung des aufzunehmenden Vorgangs kann auch eine Photodiode oder ein Photowiderstand benutzt werden, der an einer beliebigen Stelle des Linsenkranzes HO (s. Abb. 1) angeordnet wird. Wenn durch die Drehung des Spiegels das Lichtstrahlenbündel über diesen Photowiderstand hinweggeht, ist seine Widerstandsänderung so groß, daß ohne Verstärker ein Thyatrongerät mit einer Verzögerung von einigen 10^{-5} s gezündet werden kann.

Abb. 4 bietet eine Ansicht der Drehspiegelkamera. Auf der optischen Bank ist rechts eine Blitzlampe *BL* von 500 Ws Entladungsenergie für die Beleuchtung im Gegenlicht angebracht. Durch einen weiter links stehenden Kondensator *K* wird das Licht in das Hauptobjektiv O_1 konzentriert. Der Aufnahmegegenstand steht unmittelbar hinter dem Kondensator. Zwei weitere Xenon-Blitzlampen (nicht im Bild) von insgesamt 1000 Ws Entladungsenergie können unmittelbar an das Aufnahmeobjekt zur Vorderlichtbeleuchtung herangebracht werden. Durch eine geeignete Blendenanordnung wird dabei verhindert, daß direktes Licht in die Kamera einfällt. Je nach dem Aufnahmeobjekt kann mit Gegenlicht, Vorderlicht oder mit beiden gearbeitet werden. Im letzten Falle müssen die drei Blitzlampen synchron ausgelöst werden. Hinter dem Hauptobjektiv ist unter der Kamera die Feldlinse L_F sichtbar. Der Spiegel *Sp* dahinter wirft das Licht dann senkrecht nach oben in das Zwischenobjektiv O_2 der Kamera. Die optische Bank kann nach rechts noch verlängert werden. Die Beleuchtungseinrichtung und die Optiken sind nach Belieben auswechselbar und verschiebbar. Die eigentliche Kamera ist eine halbkreisförmige, waagrecht liegende Dose, an deren Unterseite das Licht vom Umlenkspiegel *Sp* durch das Objektiv O_2 und den mechanischen Photoversehluß eintritt. In der Kamera sitzt hinter diesem Verschlus ein Prisma, welches das Licht auf den Drehspiegel lenkt. Oberhalb der Kamera ist der senkrecht stehende Antriebsmotor des Drehspiegels sichtbar, dessen Achse genau im Zentrum der Dose sitzt.

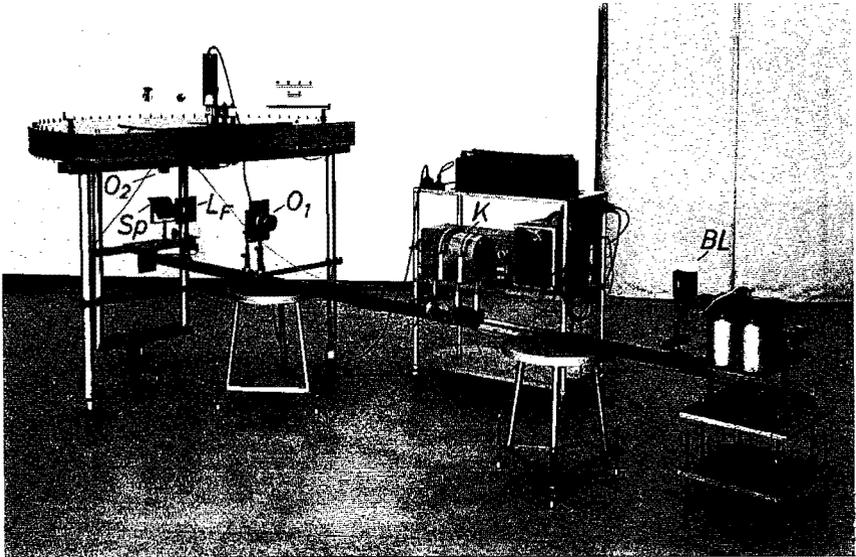


Abb. 4. Drehspiegelkamera

Die Objektiv O_3 (HO der Abb. 1) und der Film sind in der Dose im Halbkreis um dieses Zentrum angeordnet. Hinter dem Filmlager, also an der Rückseite der Dose, ist die Kamera durch breite, biegsame Stahlbänder verschlossen, die in Nuten wie Schiebetüren übereinandergeschoben werden können. Auf diese Weise läßt sich die Kamera zur Justierung und Beobachtung der Filmbilder und zur Belichtungsmessung an beliebigen Stellen öffnen und schließen. An den Enden des Filmlagers befindet sich je eine Filmkassette mit drehbarem Kern. Der zu belichtende Film wird mit der Kassette auf der einen Seite eingesetzt und mit einem Transportfilm gekuppelt, der aus der anderen Kassette über das Filmlager herausgezogen ist. Nach Verschuß der Kamera geschieht dann das Abspulen und Aufspulen von außen durch je eine oben sichtbare Kurbel.

Im Hintergrund der Abb. 4 sind einige Zusatzgeräte zu sehen: Das Auslösegerät für die Blitzlampen und für den aufzunehmenden Vorgang und der Oszillograph für die Einstellung der Bildfrequenz. Das Hochspannungsgerät für die Ladung der Lampencondensatoren ist nicht abgebildet.

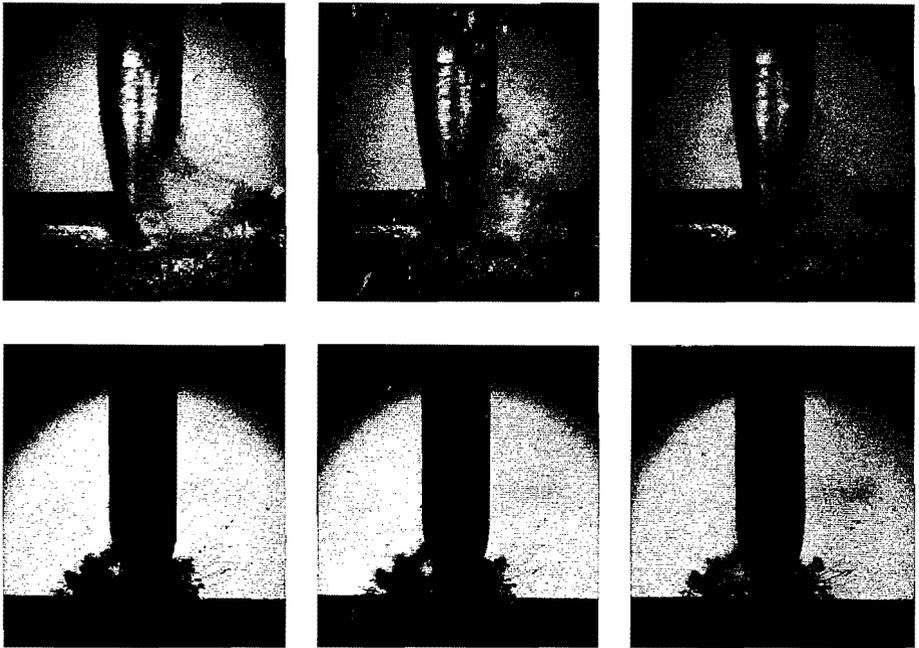


Abb. 5. Funken-Erosion

Obere Reihe: Aufnahme im Vorderlicht, untere Reihe im Gegenlicht
(Die Vergrößerungsmaßstäbe der beiden Reihen sind verschieden)

Die folgenden Beispiele (Abb. 5) zeigen Bilder von der Funken-Erosion, wie sie technisch zum Bohren harter Materialien benutzt wird, aufgenommen kurz nach einer Entladung zwischen Wolframelektroden in Petroleum bei einer Bildfrequenz von 10^5 /s.

Die die Entladung begleitende Leuchterscheinung ist vorüber. Man sieht lediglich den Auswurf einer Materialwolke aus dem bereits vorher gebohrten Krater des Werkstückes. Die oberen drei Bilder sind im Vorderlicht mit einem Abbildungsverhältnis $\alpha = 3 : 1$ und die unteren im Gegenlicht mit $\alpha = 2 : 1$ aufgenommen. Es sind keine einzelnen Teilchen aufzulösen.

Bei der Entwicklung und dem Aufbau dieser Kamera leisteten mir Herr E. MEISSNER und Herr G. SCHMIDT sehr wertvolle Hilfe. Ihnen möchte ich an dieser Stelle bestens dafür danken.

Literatur

- [1] STRUTH, W., Neuere Verfahren der Kurzzeitphotographie und Hochfrequenzkinematographie. *Kinotechnik* **12** (1958), S. 240.
- [2] RIETJENS, L. H. TH., A High-Speed Camera. Proc. VI. Intern. Congress on High-Speed Phot., Den Haag/Scheveningen (Niederlande) 1962, S. 101. H. D. Tjeenk Willink & Zoon N. V. — Haarlem 1963.
- [3] BRIXNER, B., A High-Speed Rotating-Mirror Frame Camera. *J. SMPTE* **59** (1952), S. 503.
- [4] GREER, J. R., Application of rotating mirror principle to a new medium framing rate camera. *Kurzzeitphotographie, IV. Intern. Congress, Köln 1958*, S. 170. Verl. Dr. Othmar Helwich, Darmstadt 1959.
- [5] ELLE, D., Über eine Drehspiegelkamera für Aufnahmen im Bildfrequenzbereich von 10000 B/s bis 300000 B/s. In: *Der Film im Dienste der Wissenschaft. Festschr. zur Einweihung des Neubaus des Instituts f. d. Wissenschaftl. Film*, S. 98. Göttingen 1961.