

Zum Auflösungsvermögen von Kommutations- und Kompensationskameras für die Hochfrequenzkinematografie

EUGENIUSZ WNUCZAK

Institut für Physik, Technische Hochschule Wrocław, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, Poland.

Es wird der Einfluß einer restlichen Bewegung des Bildes relativ zum Film (kinematische Aberration) und der Lichtbeugung auf das Auflösungsvermögen in Hochfrequenzkinokameras, denen die Wirkungsprinzipien der Kommutation des Lichtbündels nacheinander in einer Reihe von Objektiven sowie der optischen Kompensation des Filmtransports zugrunde liegen, untersucht. Es wird bewiesen, daß in den Kommutationskameras überwiegend die Beugung — in den Kompensationskameras am häufigsten die kinematische Aberration das Auflösungsvermögen beschränken.

1. Einleitung

In den Arbeiten [1–6] wurden vom Autor die Wirkungsprinzipien und dabei Störeffekte in Hochfrequenzkinokameras, in denen eine Kommutation des Lichtbündels in einer Reihe von Objektiven (die nacheinander Bilder auf einem unbewegten Fotofilm entwerfen), bzw. eine optische Kompensation des Filmtransports stattfindet, untersucht. Alle Kameras dieser beiden Typen enthalten optische Elemente (Spiegel oder Prisma), die sich während der Belichtung in Bewegung (Rotation) befinden. Diese Bewegung verursacht (bzw. hebt nicht vollständig auf) eine Restbewegung des Bildes relativ zum Film, was eine Verminderung der Qualität des im Film registrierten Bildes zu Folge hat. Diese durch verschiedenartige Faktoren bedingten Unschärfen wurden in den zitierten Arbeiten eingehend analysiert und gemeinsam als kinematische Aberration (A_k) bezeichnet.

Ein optisches System ist u.a. durch sein Auflösungsvermögen gekennzeichnet. Es kann unter Annahme, daß die geometrischen Bildfehler in den beiden Kamertypen ausreichend klein sind, so daß ihr Einfluß vernachlässigt werden kann, festgestellt werden, daß das Auflösungsvermögen dieser Kameras durch die kinematische Aberration sowie durch die Lichtbeugung begrenzt ist. (Eine solche Vernachlässigung ist besonders bei den Kommutationskameras, die sich meist durch eine sehr kleine Apertur auszeichnen, leicht zu rechtfertigen).

Um den Einfluß der Beugung auf das Auflösungsvermögen zu untersuchen, muß bemerkt werden, daß der effektive, in der Regel rechteckförmige Querschnitt des Lichtbündels in beiden Kamerateypen während der Belichtung veränderlich ist. Bei der ersten Näherung kann die Austrittspupille (AP) als ein sich öffnender und sich nach einer gewissen Zeit wieder schließender Spalt von konstanter Höhe betrachtet werden (Abb. 1a: a – Querschnitt des kommutierenden Lichtbündels, b – AP, c – wirksame Fläche der AP; Abb. 1b:

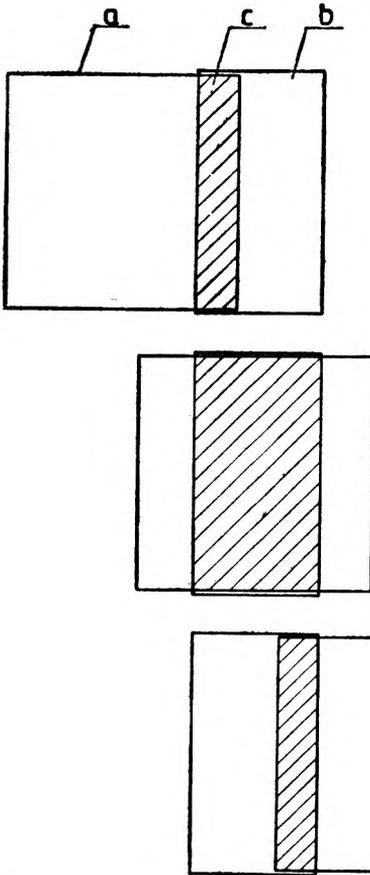


Abb. 1a

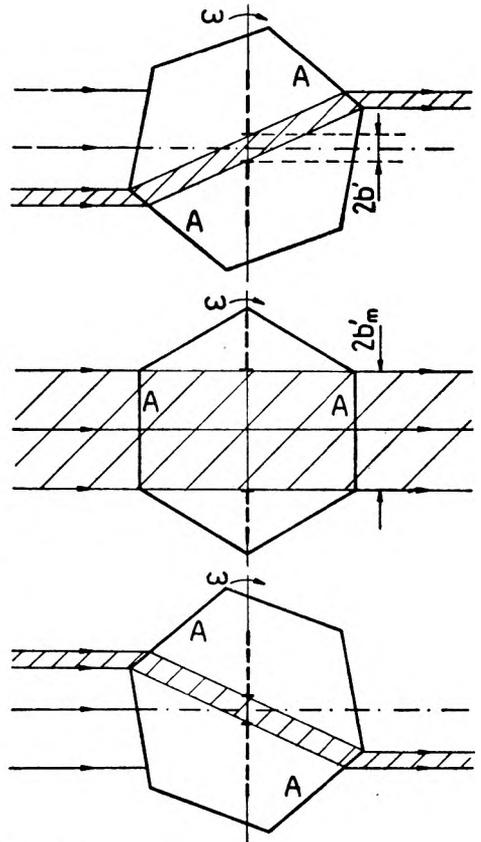


Abb. 1b

Rotationsprisma als Spaltblende in einer Kompensationskamera). Die Intensitätsverteilung im Beugungsbild ist im Zusammenhang damit zeitlich veränderlich, so daß zur Berechnung der Gestalt und der Ausmaße des im Film registrierten Beugungsbildes eines Punktobjekts, das zur Berechnung des Auflösungsvermögens führt, die Belichtungsverteilung ermittelt werden muß. Dieses Problem wurde vom Autor in einer früheren Arbeit [7] für ein aberrationsfreies optisches System mit einer kreis- bzw. rechteckförmigen AP gelöst.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit besteht in der Bestimmung des Auflösungsvermögens unter Berücksichtigung der Veränderlichkeit der AP, der kinematischen Aberration und der Beugung.

SCOTT [8], SHACK [9] u.a. haben den Einfluß einer AP-Veränderlichkeit sowie einer Bildbewegung auf die Übertragungsfunktion untersucht.

2. Belichtungsverteilung und Auflösungsvermögen

Die momentane Intensitätsverteilung in der Gaußschen Ebene in einer zur spaltartigen AP senkrechten Richtung (u' -Achse mit Nullpunkt im Mittelpunkt des Beugungsbildes) eines auf der optischen Achse eines aberrationsfreien Systems gelegenen Punktobjekts ist durch die Beziehung

$$G'(u', t') = G'_m(0, 0) b^2(t') \operatorname{sinc}^2 \frac{2b'_m b(t') u'}{r_0 \lambda} \quad (1)$$

mit

$$G'_m(0, 0) = \frac{16 M h'^2 b_m'^2}{r_0^2 \lambda^2} \quad (2)$$

gegeben [7] Hierbei ist: M — die Energiestromdichte in der AP, $2h'$ — die Höhe, $2b'_m$ — die maximale, $2b'_m b(t')$ — die momentane Breite der AP, r_0 — der Radius der Gaußschen Kugelfläche, λ — die Lichtwellenlänge.

Im Fall einer Bewegung des Bildes um die Strecke A_k während der Belichtungszeit $2T$ mit der Geschwindigkeit c liegt es nahe anzunehmen, daß die u' -Achse mit dem Film verbunden ist und daß der Mittelpunkt des Beugungsbildes zum Zeitpunkt $t' = 0$ mit dem in der Mitte der Strecke A_k gelegenen Nullpunkt der u' -Achse zusammenfällt. In einem solchen Fall muß in (1) $u' - ct'$ statt u' geschrieben werden. Führt man außerdem noch eine relative Zeitskala $t = t'/T$ sowie eine relative Skala der u' -Achse $u = u'/(A_k/2) = 2u'/A_k$, ein, so gelangt man mit $c = A_k/2T$ anstelle (1) zum Ausdruck

$$G'(u, t) = G'_m(0, 0) b^2(t) \operatorname{sinc}^2 [ab(t)(u - t)] \quad (3)$$

mit der Bezeichnung

$$a = \frac{\pi b'_m A_k}{r_0 \lambda} \quad (4)$$

Die relative Belichtungsverteilung entlang der u -Achse

$$H(u) = \frac{\int_{-1}^1 G'(u, t) dt}{\int_{-1}^1 G'(0, t) dt} \quad (5)$$

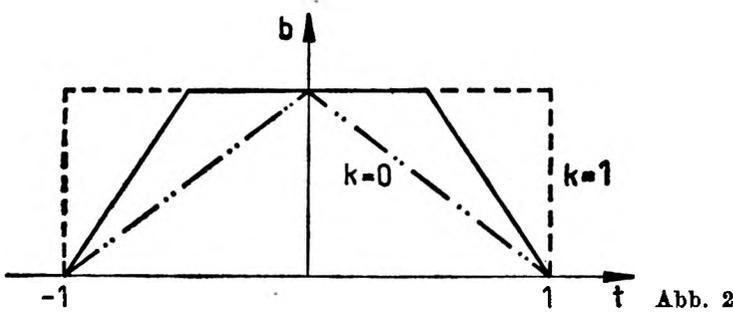
wird somit durch Einsetzen von (3) durch

$$H(u) = \frac{\int_{-1}^1 b^2(t) \operatorname{sinc}^2[ab(t)(u-t)] dt}{\int_{-1}^1 b^2(t) \operatorname{sinc}^2[-ab(t)t] dt} \quad (6)$$

dargestellt.

Das Auflösungsvermögen kann als der Kehrwert des Abstandes der Maxima zweier Belichtungsverteilungskurven berechnet werden, die so gegeneinander verschoben sind, daß das Verhältnis der Ordinate im Minimum zu den in den Maxima der resultierenden Kurve einen bestimmten, dem angenommenen Auflösungskriterium – z.B. von Rayleigh – entsprechenden Wert P annimmt.

Die Pupillenfunktion $b(t)$ wird im Fall einer linearen Änderung der Breite der AP (was besonders bei den Kommutationskameras vorkommt), durch folgende Formeln beschrieben (Abb. 2):



$$\begin{aligned} b(t) &= \frac{1+t}{1-k}, & -1 \leq t \leq -k, & \quad k \neq 1, \\ b(t) &= 1, & -k \leq t \leq k, & \\ b(t) &= \frac{1-t}{1-k}, & k \leq t \leq 1, & \quad k \neq 1. \end{aligned} \quad (7)$$

Mit k wird hier das Verhältnis der Zeit, während welcher die AP die volle Breite ($2b'_m$) zur ganzen Belichtungsperiode ($2T$) hat bezeichnet.

Für die Kompensationskameras stellt eine harmonische Pupillenfunktion

$$b(t) = \cos\left(\frac{\pi}{2} t\right) \quad (8)$$

oft eine bessere Näherung als die lineare (7) dar.

3. Numerische Berechnungen und Folgerungen

Numerische Berechnungen nach (6)–(8) wurden beispielsweise für die Kommutationskamera W-1 des Autors [10, 11] ($r_0 = 1000$ mm, $2b'_m = 12,5$ mm) sowie für typische Parameter einer Kompensationskamera mit einem Rotationsprisma ($r_0 = 35$ mm, $2b'_m = 12,5$ mm), für $\lambda = 0,5$ μ m und $A_k = 0,03$ mm sowie für mehrere Werte von k durchgeführt. (Der in W-1 realisierte Werte von k betrug $1/3$, für die Kompensationskamera sollten die Ergebnisse für $k = 0$ bzw. für das harmonische Pupillenmodell nach (10) als repräsentativ betrachtet werden).

Die Berechnungen des Auflösungsvermögens wurden für den Wert des oben erwähnten Parameters: $P = 0,811$, was dem Kriterium von Rayleigh für eine rechteck förmige AP und einem unbeweglichen Bild entspricht durchgeführt.

Die Ergebnisse sind in Tabelle und Abb. 3 und 4 dargestellt worden. r_r bedeutet relatives Auflösungsvermögen in Bezug zum Wert r_1 für $k = 1$; $r_r = r_k/r_1$. Mit d ist die kleinste aufgelöste Strecke bezeichnet, ausgedrückt als vielfaches von A_k ; $d = 2u'_r/A_k$. Die in der untersten Zeile angeführten Werte entsprechen dem harmonischen AP-Modell.

Aus den in der Tabelle angeführten Zahlenwerten geht deutlich hervor, daß das Auflösungsvermögen der Kamera W-1 überwiegend durch die Licht-

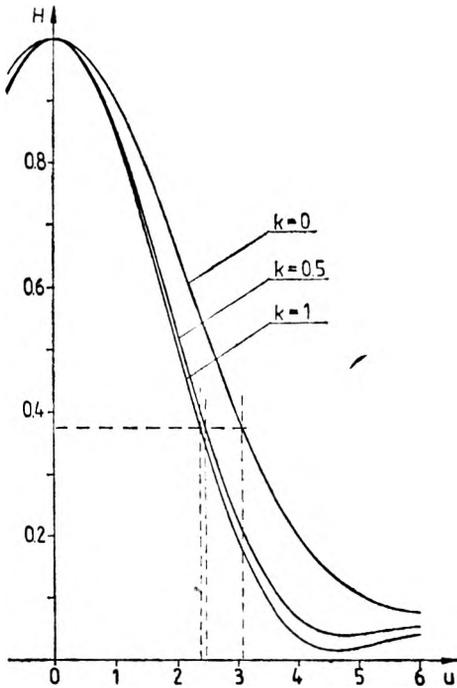


Abb. 3

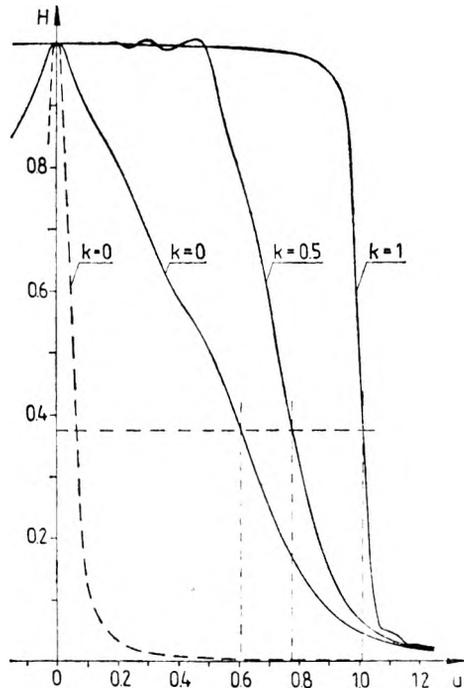


Abb. 4

beugung begrenzt wird. Zum Beispiel: für $k = 0,3$ ist $d = 2,36$. Das bedeutet, daß die kleinste auflösbare strecke 2,36 mal größer als die kinematische Aberration $A_k = 0,03$ ist.

k	r_r	d	Wirkungsprinzip
1	100,00 %	2,250	Kommutation (Kamera W-1)
0,9	100,00	2,250	
0,8	99,97	2,251	
0,7	99,73	2,256	
0,6	99,29	2,266	
0,5	98,56	2,283	
0,4	97,57	2,306	
0,3	95,53	2,355	
0,2	92,57	2,431	
0,1	88,17	2,552	
0,0	81,53	2,760	
<hr/>			
1,0	100,00 %	1,009	Kompensation (mittels Prismenrotation)
0,9	106,7	0,946	
0,8	112,8	0,894	
0,7	118,7	0,850	
0,6	124,8	0,809	
0,5	131,2	0,769	
0,4	138,3	0,730	
0,3	145,7	0,693	
0,2	153,9	0,656	
0,1	162,8	0,620	
0,0	173,3	0,582	
<hr/>			
—	142,2	0,709	

Mit zu Null fallendem k -Wert sinkt das Auflösungsvermögen um ca. 19% — ein Effekt, über den schon in [7] berichtet wurde ($k = 1$ bedeutet, daß die AP während der ganzen Belichtungszeit ihre volle Breite hat; sich also unendlich schnell öffnet und schließt, $k = 0$ — daß sich die AP, nachdem sie die volle Breite erreicht hat, sofort wieder zu schließen beginnt).

Im Fall der Kompensationskamera dagegen wird das Auflösungsvermögen fast ausschließlich durch die kinematische Aberration bestimmt. Für $k = 1$ ist $d = 1$, für $k = 0$ ist $d = 0,58$. Das bedeutet, daß in diesem letzten Fall die kleinste auflösbare Strecke um ca. 42% kleiner (!) als A_k ist. (In diesem Fall wurde d wegen des überwiegenden Einflusses der kinematischen Aberration als der Abstand der Mittelpunkte der beiden Belichtungsverteilungskurven berechnet).

Weitere ergänzende Berechnungen für die Kompensationskamera haben erwiesen, daß bei unbewegtem Bild, also in Abwesenheit der kinematischen Aberration, für $k=0$ $d=0,064$ wäre. (Die entsprechenden Werte von d für das harmonische AP-Modell betragen ca. 0,71 bei bewegtem und ca. 0,05 bei unbewegtem Bild). Das rechtfertigt den Satz, daß in dem Kompensationskamertyp das Auflösungsvermögen praktisch ausschließlich durch die kinematische Aberration bestimmt ist, obwohl die Auflösung d dabei kleiner als A_k sein kann. Das Auflösungsvermögen steigt in dem Rechenbeispiel mit zu Null fallendem k -Wert um ca. 73 %.

Die Tatsache, daß die reelle Auflösung d in dieser Kamera kleiner als die kinematische Aberration ist, hat ihre Ursache darin, daß die Scheitelwerte der Intensitätsverteilungskurven in den Punkten der A_k -strecke, bei $k \neq 1$, mit Null beginnen und stetig bis zu einem Höchstwert anwachsen, um dann gegen das andere Ende der Strecke wieder zu Null abzufallen.

Die Verbesserung des Auflösungsvermögens mit fallendem k -Wert bestätigen die Belichtungverteilungskurven. In Abb. 3 sind diese Kurven nach (6) für die Kommutationskamera W-1, in Abb. 4 — für die Kompensationskamera dargestellt. Die gestrichelte Linie in Abb. 4 entspricht dem Fall einer abwesenden kinematischen Aberration. Die Abszissen der Punkte, die auf allen Kurven denselben Ordinatenwert $H = 0,811/2 = 0,4055$ haben, entsprechen annähernd der Auflösung d (relativ zu A_k ; die Einheit der u -Achsenkala beträgt $A_k/2$) nach dem — in oben erwähntem Sinne — Kriterium von Rayleigh.

Weitere Berechnungen zeigen, daß der Wert $d=1$, also Auflösung gleich der kinematischen Aberration, bei $k=0,5$ mit $a=1,92157$ (nach (4)) und bei $k=0$ mit $a=2,18422$ (was den Werten der numerischen Apertur des bildseitigen Lichtbündels 0,0204 und 0,0240 entspricht) erreicht werden kann. Einerseits sind so große Werte für die Kommutationskameras, wenn sie ihre großen Vorteile, darunter die Möglichkeit, hohe Bilderfrequenzen zu erreichen, nicht verlieren sollen, unerreichbar (für W-1 ist $a=0,71871$), andererseits sind in den Kompensationskameras meistens merklich höhere Werte der numerischen Apertur als 0,024 mühelos erreichbar (im Rechenbeispiel beträgt sie 0,357 mit $a=33,59992$).

Das berechtigt dazu, die hier anhand der beiden konkreten Beispiele gewonnenen Folgerungen, daß das Auflösungsvermögen in der Kommutationskamera überwiegend durch die Beugung und in der Kompensationskamera fast ausschließlich durch die kinematische Aberration beschränkt ist (und daß die Auflösung dabei kleiner als A_k sein kann), als für beide Kamertypen allgemeingültig anzusehen. In den Kommutationskameras mit Linsenobjektiven sind Werte der bildseitigen Apertur von 0,024, wegen der meist viel kleineren Entfernung r_0 auch ohne größere Mühe erreichbar, deshalb kann ihr Auflösungsvermögen im gleichen Maße sowohl durch die Beugung als auch durch die kinematische Aberration bestimmt sein.

Literatur

- [1] WNUCZAK E., [in] Zeszyty Naukowe Politechniki Wrocławskiej, Fizyka I, 35 (1960), 49 (polnisch).

- [2] WNUCZAK E., *Optica Applicata* **3** (1973), 57.
- [3] WNUCZAK E., *Optica Applicata* **4** (1974), 49.
- [4] WNUCZAK E., *Optica Applicata* **9** (1979), 185.
- [5] WNUCZAK E., *Optica Applicata* **11** (1981), 493.
- [6] WNUCZAK E., *Kinematische Aberration in Hochfrequenz-Kinokameras*, Scientific Papers of the Institute of Physics of Wrocław Technical University No. 17, Ser. Monographs No. 8, Wrocław 1983.
- [7] WNUCZAK E., *Optica Applicata* **15** (1985), 97.
- [8] SCOTT R. M., *Phot. Sci. Eng.* **5** (1959), 201.
- [9] SHACK R. V., *Appl. Opt.* **3** (1964), 1171.
- [10] WNUCZAK E., KRZECZKOWSKI S., *Optica Applicata* **3** (1973), 29.
- [11] KRZECZKOWSKI S., WNUCZAK E., *Prace Inst. Maszyn Przepływowych PAN* **64** (1974), 135 (pölnisch).

Received December 13, 1984.

К вопросу о разрешающей способности коммутационных и компенсационных камер для скоростной кинематографии

Изучалось влияние остаточного движения изображения относительно пленки (кинематической aberrации) и дифракции света на разрешающую способность камер для скоростной кинематографии, работающих по принципу коммутации пучка света, направленного последовательно к нескольким объективам, а также оптической компенсации движения пленки. Было доказано, что разрешающая способность коммутационных камер обусловлена, главным образом, дифракцией света, зато в компенсационных камерах решающее влияние на разрешающую способность имеет кинематическая aberrация.