

INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK

GARCHING BEI MÜNCHEN

Zum Bau von Drehspiegelkamas
grosser Lichtstärke

H. Muntenbruch

IPP 3/ 14

April 1963

Das Manuskript gibt in erweiterter Form
den Inhalt eines Vortrages wieder:
"Über eine Drehspiegelkamera grosser Licht-
stärke" gehalten auf der
Frühjahrstagung in Bad Nauheim der physika-
lischen Gesellschaft Hessen-Mittelrhein-Saar
und der
Fachausschüsse "Plasma- und Gasentladungs-
physik" sowie "Kurzzeitphysik"
am 4.4.1963

Die nachstehende Arbeit wurde im Rahmen des Vertrages zwischen dem Institut für Plasmaphysik GmbH und der Europäischen Atomgemeinschaft über die Zusammenarbeit auf dem Gebiete der Plasmaphysik durchgeführt.

Inhaltsübersicht

Seite	
	Zusammenfassung
2	<u>I. Einleitung</u>
3	<u>II. Problemstellung</u>
6	<u>III. Diskussion von Einzelfragen</u>
6	1.) Wahl der Optiken
9	2.) Einfluß des Filmmaterials
10	3.) Vignettierungseffekte
14	4.) Schreibgeschwindigkeit
18	5.) Räumliches Auflösungsvermögen
	a) Zylinderfläche des Films
	b) Vibration der Spiegelachse
	c) "Dicker" Spiegel
	d) Zweilinser
	e) Listenobjektive
	f) Hohlspiegel
21	6.) Zeitauflösung
23	7.) Lichtstärke
26	8.) Drehspiegelantrieb
30	9.) Festigkeit des Drehspiegels
32	10.) Triggerung und Drehzahlmessung
33	<u>IV. Einige spezielle Ausführungen von Drehspiegelkameras</u>
33	1.) Kamerateil und optisches System
	a) Abbildung des Gegenstandes auf den Spalt
	b) Spalt
	c) Kameraoptik
	d) Filmkassette
	e) Optische Triggeranordnung
	f) Verbesserter Kamerateil
37	2.) Drehspiegelaggregat
	a) Motoren
	b) Drehspiegelgehäuse
	c) Lagerböcke
	d) Kupplung
	e) Spiegel

- f) Leistungsaufnahme
- g) Triggerung und Frequenzmessung
- h) Optische Triggeranordnung
- i) "Precisespiegel"
- k) Einfachheit, Sicherheit, Kosten

V. Zusammenstellungen

- 1.) Literatur
- 2.) Figuren
- 3.) Tabellen

58

Anhang

- A Zur Schreibgeschwindigkeit
- 61 B Zur Festigkeit von Drehspiegeln
- 66 C Bilder einiger Drehspiegelanordnungen

Zusammenfassung

Im ersten Teil wird über verschiedene Einzelprobleme berichtet, die beim Bau von Drehspiegelkamas eine Rolle spielen, z.B. über Vignettierungseffekte, Leistungsbedarf, Zeitauflösung, räumliches Auflösungsvermögen, etc.

Im zweiten Teil wird dann eine Autokollimationskamera beschrieben, die in verschiedenen Ausführungen den gestellten Forderungen weitgehend genügt.

I. Einleitung

Drehspiegelkamas sind für zeitlich aufgelöste Beobachtung schneller Vorgänge in Gasentladungen ein unentbehrliches Hilfsmittel. Natürlich kann man sie in verschiedenen Typen kaufen, aber einerseits gibt es vom Experiment her oft Gründe, die ganz spezielle Lösungen des Problems erfordern, andererseits kann der oft recht bemerkenswerte Preis zur Suche nach einer billigen Lösung zwingen oder es in einem grossen Institut mit entsprechendem Bedarf ratsam erscheinen lassen, selbst Drehspiegelkamas zu entwickeln.

Im vorliegenden Fall war vorauszusehen, dass mehrere Kamas benötigt würden. Sie sollten zur Untersuchung von Stosswellenphänomenen benutzt werden, die nicht immer besonders hell sind. Es sollten also Schmieraufnahmen vom Entladungsvorgang gemacht werden, der Drehspiegel aber auch zur Erzeugung von Schmier-spektren und evtl. als Kurzzeitverschluss benutzt werden können.

Aufgrund dieser Aufgabenstellung musste ein Kompromiss zwischen Zeitauflösung und Lichtstärke gefunden werden. Die Suche nach einem vielseitig verwendbaren Aggregat liess darüberhinaus auch die Klärung von Randproblemen nützlich erscheinen.

II. Problemstellung

Versucht man, sich eine Vorstellung davon zu machen, wie eine optimale Schmierkamera gebaut sein sollte, so sieht man bald, dass das auf den ersten Blick einfach erscheinende Problem doch recht unübersichtlich ist.

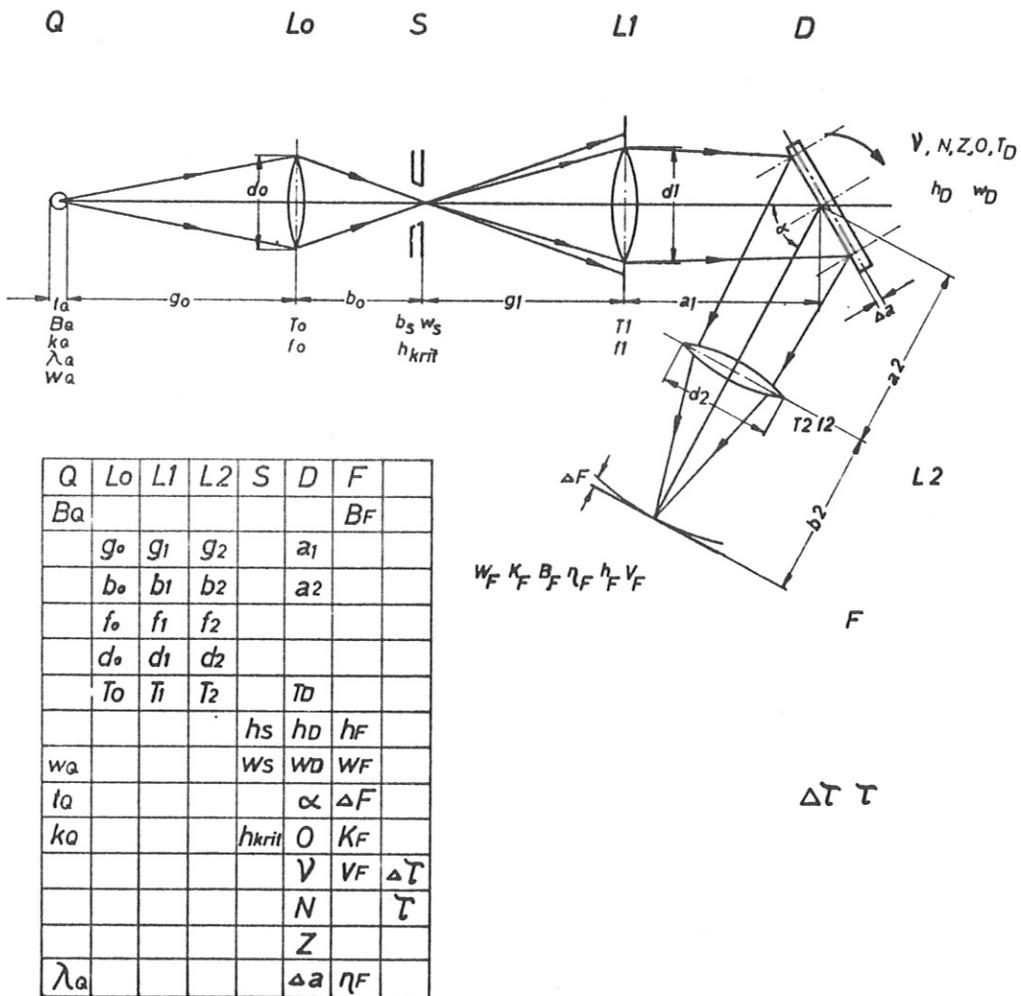


Fig. 1 Prinzipieller Aufbau einer Drehspiegelkamera

In Fig.1 ist das Prinzipbild einer solchen Schmierkamera dargestellt. Die Optik L_0 bildet den Gegenstand Q auf einen Hilfspalt S ab, der von L_1 und L_2 auf den Film abgebildet wird. Der Drehspiegel D wischt dabei das Spaltbild über den Film.

Die Vielzahl der Parameter, die das System bestimmen können, ist in der Tabelle zusammengestellt. Teilweise sind sie durch einfache Beziehungen miteinander verknüpft, teilweise sind aber die Zusammenhänge nur schwer oder unvollkommen mathematisch zu fassen.

In Fig.1 bedeuten

B_Q, B_F	Strahlungsstärke der Quelle Q bzw. Leuchtdichte auf dem Film F
g_0, g_1, g_2	Gegenstandsweiten der Optiken L_0, L_1, L_2
b_0, b_1, b_2	Bildweiten der Optiken
f_0, f_1, f_2	Brennweiten der Optiken
d_0, d_1, d_2	Durchmesser der Optiken
T_0, T_1, T_2	Transmissionsgrade der Optiken
T_D	Reflexionsvermögen des Spiegels
a_1, a_2	Abstand der Spiegelachse von L_1 bzw. L_2
h_S, h_D, h_F	Höhe des Spaltes S, des Bündels auf dem Spiegel D, des Spaltbildes auf dem Film F
W_Q, W_S, W_D, W_F	Breite (Weite) der interessierenden Entladungszone Q, des Spaltes S, des Drehspiegels D und des Filmes F
t_Q	Schichtdicke der Quelle
α	Winkel zwischen einfallendem und reflektiertem Strahl am Spiegel
Δa	Abstand zwischen spiegelnder Fläche und Drehachse
ΔF	Abstand zwischen Bildfläche und Filmebene bzw.-fläche
k_Q, k_F	Grösse des Elements der Entladung, das noch aufgelöst werden soll bzw. Korngrösse des Films
η	Empfindlichkeit des Filmes
λ	Wellenlänge des von der Quelle emittierten Lichtes
h_{krit}	Kritische Höhe des Spaltes
v_F	Geschwindigkeit des Spaltbildes auf den Film
$\Delta \tau$	Auflösbare Zeit
τ	Schreibzeit
ν	Frequenz des Drehspiegels
N	Leistungsbedarf des Drehspiegelmotors
Z	Zerreissfestigkeit des Spiegelmaterials
O	Oberflächengüte des Spiegels

Es gibt eine Anzahl von Arbeiten, die versuchen, allgemeine Prinzipien für den Bau solcher Kameras herzuleiten [1] [2] [3] [39] [44], aber immer werden doch nur spezielle Fälle behandelt.

In Fig. 1 sind übrigens drei Kameratypen leicht zu erkennen: Fehlt die Optik L_1 , so lässt sich eine Kamera extrem grosser Beleuchtungsstärke mit der Optik zwischen Drehspiegel und Film realisieren. Schreibzeit und -geschwindigkeit werden klein sein. - Fehlt L_2 , liegt die "übliche" Bauart mit evtl. sehr langem Schreibarm und grosser Schreibzeit vor. - Sind L_1 und L_2 identisch, so handelt es sich um eine "Autokollimationskamera". Kameras mit zwei Optiken, die nicht identisch sind, können im wesentlichen nach demselben Prinzip behandelt werden wie Autokollimationskameras. Dem Fall parallelen Strahlenganges zwischen den Optiken soll dabei besondere Beachtung geschenkt werden.

Nicht durch Fig. 1 erfasst wird ein Kameratyp, in dem als rotierender Spiegel ein Hohlspiegel benutzt wird, der gleichzeitig die Funktionen der Optiken L_1 und L_2 übernehmen könnte.

In [25] , [26] , [27] , [28] , [29] , [30] , [31] , [41] , [42] , [45] , [46] werden einige Kameras, vorwiegend von der "üblichen" Bauart beschrieben.

III. Diskussion von Einzelfragen

1. Wahl der Optiken

Da es die Aufgabe einer Schmierkamera nur ist, einen Strich abzubilden, genügt im allgemeinen die Benutzung zweilinsiger Achromate. Störungen durch den Astigmatismus schiefer Büschel können dabei leicht vermieden werden. Auf diese Weise ist eine verhältnismässig billige Lösung möglich. Beim heutigen Stand der Rechen-technik ist auch das Durchrechnen ganz spezieller (nicht listenmässiger) Achromate kein Problem mehr, so dass selbst Sonderanfertigungen relativ preiswert erhältlich sind. Es sind z.B. Zweilinser, mit $f=500$ mm und $F=1:5$ lieferbar. [25] .

Genügen Achromate den gestellten Anforderungen nicht, so stehen eine ganze Reihe handelsüblicher mehrlinsiger Optiken zur Verfügung. Eine Auswahl davon ist in Tabelle 1 zusammengestellt. Fig.2 veranschaulicht den Bereich der Brennweiten und Öffnungen, der von diesen Optiken überdeckt wird.

Dabei ist immer zu bedenken, dass die Objektive in ganz spezieller Weise korrigiert sind, die Röntgenobjektive z.B. für einen ganz bestimmten Abbildungsmaßstab, und ihre Schärfentiefe ist so gering, dass der Film an die Feldlinse gepresst werden muss. Die meisten anderen Objektive sind für $\infty :1$ korrigiert, und auch die angegebene Öffnung gilt nur für diesen Fall.

Diesen Gegebenheiten muss man bei der Benutzung handelsüblicher Optiken in Schmierkameras Rechnung tragen, häufig darf man keine grössere Qualität des Bildes als 20 Striche/mm selbst für erstklassige Objektive erwarten.

Eine Reihe von Autoren haben Anwendbarkeit und Konstruktionsprinzipien spezieller Optiken für Schmierkameras diskutiert [4] [5] [45] .

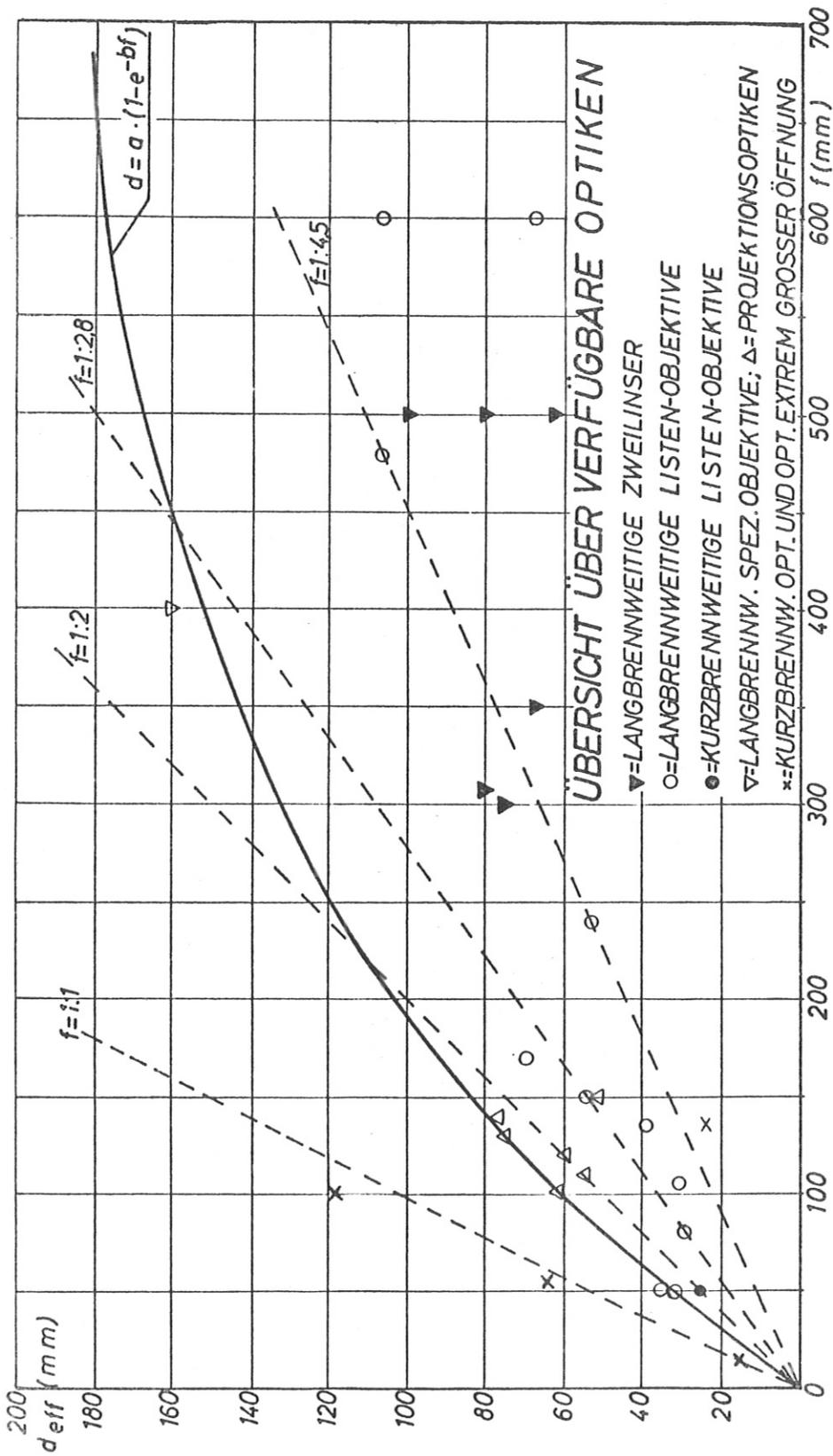


Fig. 2 Brennweiten und Öffnungen von Optiken

Tabelle 1

f	F	d _{eff}	Name	Bemerkungen
480	4,5	106,7	Xenar	Langbrennweitige Listenobjektive
240	4,5	53,3	Xenar	
150	2,8	53,5	Xenotar	
135	3,5	38,6	Tele-Xenar	
80	2,8	28,6	Xenotar	
600	5,6	107	Tele-Ennalyt	
178	2,5	71	Aero-Ektar(Kodak)	
150	2,8	53,5	Dimaron	
50	1,9	26,3	Xenon	Kurzbreitenweitige Listenobjektive
50	1,9	26,3	Westagon	
50	1,9	26,3	Iloca Quinon	
50	1,5	33,3	Summitar	
50	1,4	35,6	Summilux	
140	1,8	77	Kiptar	Projektions- optiken
130	1,7	76,4	Kiptar	
120	2,0	60,0	Kiptar	
110	2,0	55,0	Kiptar	
100	1,6	62,5	Kinoprojektar	
200	3,6	55,5	Splendar	
200	3,0	67,0	Splendon	
150	3,0	50,0	Splendon	
600	9	66,7	Apo Skopar	Langbrennweitige Speziellobjektive
400	2,5	160	Aero-Xenon	
350	2,5	140	UEREK Obj. Schneider, Göttingen	
500	8	63	Zweilinsige Achromate (Zeiss)	Langbrennweitige Zweilinser
500	6,3	80		
500	5	100		
350	5	70		
307	3,8	80		
300	4	75		
100	0,85	118	Röntgenoptik Zeiss, Jena	Kurzbreitenweitige Objektive und Ob- jektive extrem grosser Öffnung
55	0,85	64,7		
75	0,87	86,2	Super Farron*)	*) korrigiert für 16:1, 4:1, ∞:1
13	0,9	14,5	Optik f. Film- kamera	
135	5,4	25,0	Quarzanastigmat	Quarz-Flußspat- Zweilinser Korrigiert f. Abb. 4:1
50	1	50	Wray CTR copying Lens	

2. Einfluss des Filmmaterials +)

Geht man von der häufig realistischen Annahme aus, dass das abbildende System nur 20 Striche/mm in der Bildebene aufzulösen gestattet, so erübrigt sich im wesentlichen die Diskussion der Frage, ob ein relativ unempfindliches Filmmaterial mit feiner Körnung (z.B. Korndurchmesser $< 1/1000$ mm) einem empfindlicheren mit grösserem Korn (z.B. $\varnothing = 1/100$ mm) vorzuziehen ist, da auch sehr empfindliche Filme im allgemeinen keine grösseren Korndurchmesser als $1/100$ mm aufweisen.

Dass Empfindlichkeitsangaben der Firmen für Film- und Plattenmaterial, z.B. der notwendige Lichtstrom in erg/cm^2 oder Lumen/m^2 zur Erzielung ausreichender Schwärzung im nsec- oder μsec -Bereich nicht mehr zur Ermittlung der nötigen Beleuchtungsstärke B brauchbar sind, ist wohl allgemein bekannt [6] .

Zu berücksichtigen ist auch noch die unterschiedliche spektrale Empfindlichkeit der verschiedenen Fotoschichten, die u.a. dazu führt, dass relativ unempfindliche "Prozess"-Platten im UV-Bereich evtl. brauchbarer sein können als sensibilisierte "empfindliche" Materialien [7].

Da nicht nur die Helligkeiten, sondern auch die Kontraste des Bildes mitbestimmend sind, würde eine genauere Diskussion der hier angeschnittenen Fragen die Untersuchung der Übertragungsfunktionen des gesamten Übertragungsprozesses notwendig machen [8], [47] . Das ist im Rahmen dieser Untersuchung natürlich unmöglich.

Im folgenden soll deshalb der Standpunkt angenommen werden, dass nicht der Film, sondern die Optik mit 20 Linien/mm im Bild das Auflösungsvermögen bestimmt.

+)
siehe auch [32] , [33] , [48] . [49] .

3. Vignettierungseffekte

Darunter versteht man die Eigenschaft mancher optischer Systeme, gleich helle Gegenstandspunkte in Bildpunkte unterschiedlicher Helligkeit abzubilden. Die Aperturblende ist dann also eine Funktion des Ortes in der Gegenstandsebene. Handelsübliche Objektive sind so gebaut, dass im Bereich des angegebenen Bildfeldwinkels die Vignettierungseffekte vernachlässigbar sind. Werden aber mehrere Optiken hintereinandergeschaltet, so kann die Vignettierung sehr merklich werden; bei vielen Drehspiegelkameras ist sie es tatsächlich.

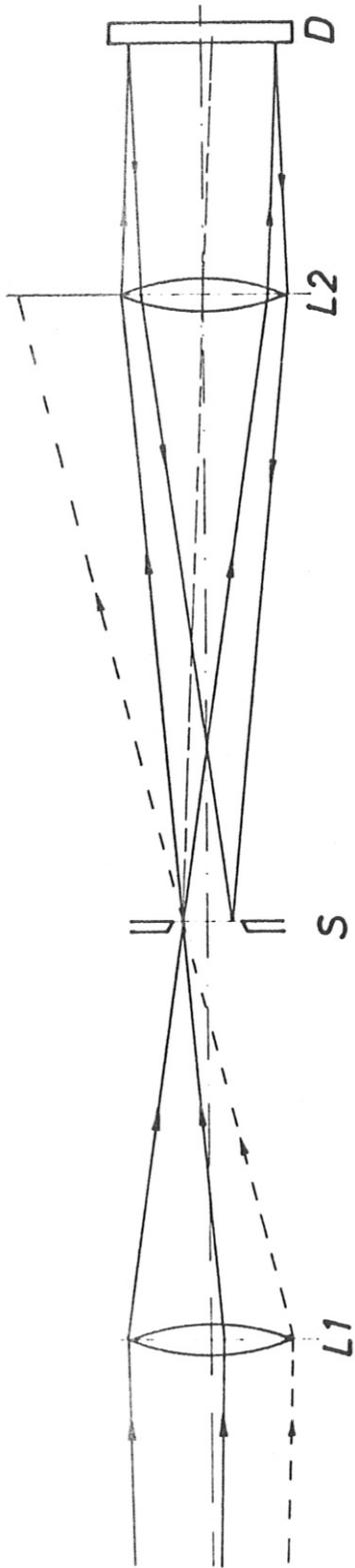
Wenn nur der allgemeine Eindruck eines Bildes betrachtet wird, und der Film einen grossen Belichtungsspielraum besitzt, wird die Vignettierung leicht übersehen. Besonders wichtig wird ihre Kenntnis aber, wenn eine Drehspiegelkamera in Verbindung mit einem Spektrografen benutzt wird, sei es unter Benutzung gekreuzter Spalte zur Erzeugung von Schmierenspektren, sei es, dass bei parallelen Spalten der Drehspiegel als Kurzzeitverschluss wirkt.

Die drei Schmierkameratypen, die anhand von Fig.1 unterschieden wurden, verhalten sich bezüglich der Vignettierungseffekte sehr unterschiedlich:

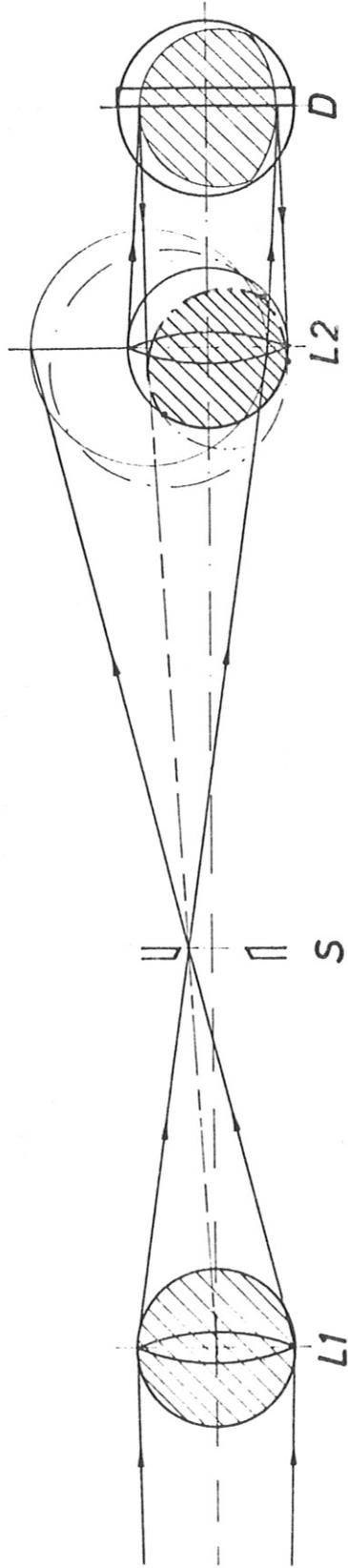
Bei der "üblichen" Bauart, bei der L_2 fehlt, lässt sich Vignettierung für eine grosse Schreibzeit relativ leicht vermeiden. Der Drehspiegel muss nur so gross sein, dass seine Ränder das Strahlenbündel nicht begrenzen.

Fehlt dagegen L_1 , so wird die Kamera für Vignettierung extrem anfällig, es sei denn, dass die Spiegelfläche gegenüber der Linsenfläche (oder umgekehrt) sehr klein ist. Nur für sehr kurze Schreibzeiten ist dann die Vignettierung zu vernachlässigen.

Ähnlich ist die Situation bei einer "Autokollimationskamera", bei der sowohl der Spiegel als auch die Optik L_2 erhebliche Vignettierungserscheinungen verursachen können [9]. Dieser Fall soll anhand von Fig.3 näher erläutert werden. Dabei wird gleichzeitig ein relativ einfaches Verfahren aufgezeigt, den Einfluss der Vignettierung zahlenmässig zu erfassen.



a



b

Fig. 3a, 3b Zur Vignettierung

Fig.3a zeigt (Blick von oben) den Strahlengang in einer Autokollimationsschmierkamera. Die ausgezogenen Strahlen begrenzen den Teil des Bündels, der für die Abbildung in der (Spalt-) Film-Ebene wirksam ist. Diese Bündelbegrenzung ist für jeden Punkt des Zwischenbildes auf dem Spalt verschieden. Nur bei der Abbildung des mittleren Spalt-punktes wird die Linse L2 voll ausgeleuchtet.

Fig.3b soll die quantitative Ermittlung der Vignettierung erläutern. Gezeichnet ist das abbildende Bündel eines speziellen Punktes des Zwischenbildes auf den Spalt S. Alle möglichen Blenden sind dabei in die Zeichenebene geklappt. Die erste Blende ist der Rand der Optik L1. Er stanzt ein Bündel mit quasi kreisförmigem Querschnitt aus dem Lichtstrom in den Halbraum aus. Dieses Bündel passiert S in einem Punkt und leuchtet L2 (evtl.) nicht voll aus. Dabei wirkt auch der Rand von L2 als Blende. Das Bündel ist nun von einem Kreiszwieck (aus dem Rand von L2 und der Projektion des Randes von L1 in die Ebene von L2) begrenzt. Befindet sich S in der Brennebene von L2, so verlässt das Bündel L2 parallel und trifft den Drehspiegel D. Es hat noch dieselbe Form des Kreiszwiecks (die bei D schraffiert gezeichnet ist). Engt nun (in dem hier angenommenen einfachen Fall) der Rand von D das Bündel nicht weiter ein, so wird es mit dem gleichen Querschnitt je nach Spiegelstellung (z.B. schräg nach oben oder nach unten) reflektiert und durchsetzt L2 zum zweiten Mal. Die Stellung des Spiegels, also der Winkel zwischen einfallendem und reflektiertem Strahl bewirkt nun die (in der geklappten L2-Ebene seitliche) Versetzung des Bündels. Dadurch wirkt ein Teil des Randes von L2 zum zweiten Mal als Blende. Ein Bündel vom Querschnitt eines Kreisbogendreiecks (bei L2 schraffiert) entsteht und trifft den Film in der S-Ebene.

Die Flächen der Kreisbogendreiecke für alle Spaltpunkte und alle infrage kommenden Drehspiegelstellungen sind ein Mass für die Vignettierung. Durch Planimetrieren dieser leicht zu konstruierenden Flächen lassen sich leicht relative Beleuchtungsstärken auf dem Film für vorgegebene Geometrie des Strahlenganges und konstanten Lichtstrom durch jeden Punkt des Spaltes ermitteln.

Für das Beispiel der im folgenden beschriebenen Autokollimationskamera sind die Vignettierungseffekte in der Bildfläche in der folgenden Figur 4 dargestellt.

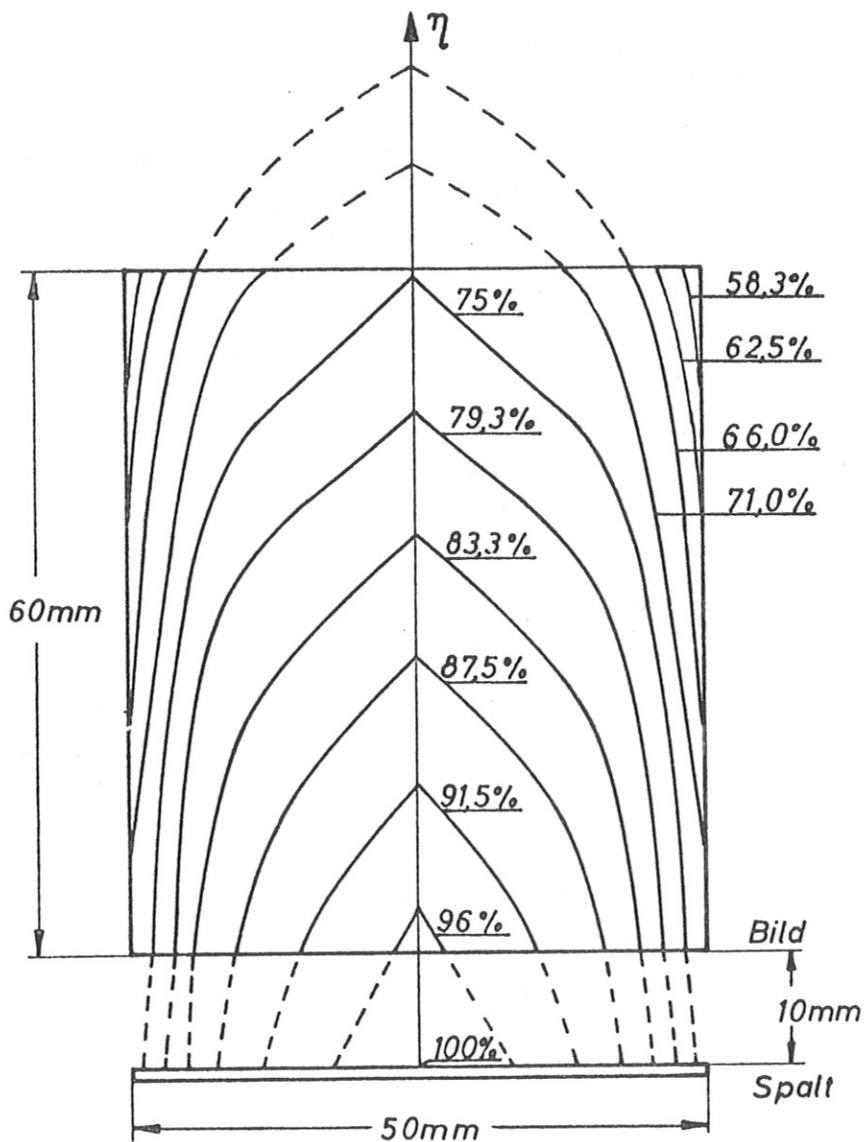


Fig.4 Vignettierung im 50x60 mm grossen Bildfeld einer Autokollimationskamera

4. Schreibgeschwindigkeit *)

Häufig werden Schmierkamaseras ausschliesslich anhand der erreichbaren Schreibgeschwindigkeit bewertet. Obwohl dies prinzipiell falsch ist (siehe dazu auch III.6), ist sie doch ein wesentliches Kriterium.

Bekanntlich ist die Schreibgeschwindigkeit

$$(1) \quad v_F = 2 \cdot 2\pi \nu \cdot \ell$$

oder (1') $v_F = 0,21 \cdot n \cdot \ell$

mit v_F = Schreibgeschwindigkeit auf dem Film
 ν = Frequenz des Spiegels
 n = Umdrehung des Spiegels pro Minute
 ℓ = Länge des Schreibarmes

Für den "Normaltyp" der Kamera (Spiegel zwischen Optik und Film) ist $\ell = b-d$ mit b = Bildweite, d = Abstand zwischen Optik und Spiegelachse.

Unübersichtlicher ist die Situation, wenn die Optik zwischen Spiegel und Film plaziert ist. Dieser Fall ist in Fig.5 am Beispiel einer 1:1 Abbildung erläutert. Hier ist $g \approx b \approx 2f$. Als Schreibarm wirkt $\ell \approx 2f-d$, also praktisch derselbe Arm der auch wirksam ist, wenn der Spiegel im Abstand d hinter der Linse angeordnet ist. Für den Abbildungsmaßstab $m = b/g$ ist näherungsweise

$$(2) \quad \ell \approx (g-d) \cdot \frac{b}{g}$$

Die exakte Formel ist im Anhang kurz abgeleitet.

Aufgrund der vorstehenden Betrachtungen ergibt sich sofort, dass für eine Autokollimationskamera (Spiegel im parallelen Strahlengang) der Schreibarm gleich der Brennweite ist:

$$(3) \quad \ell = f$$

*) Hierzu auch [9], [10]

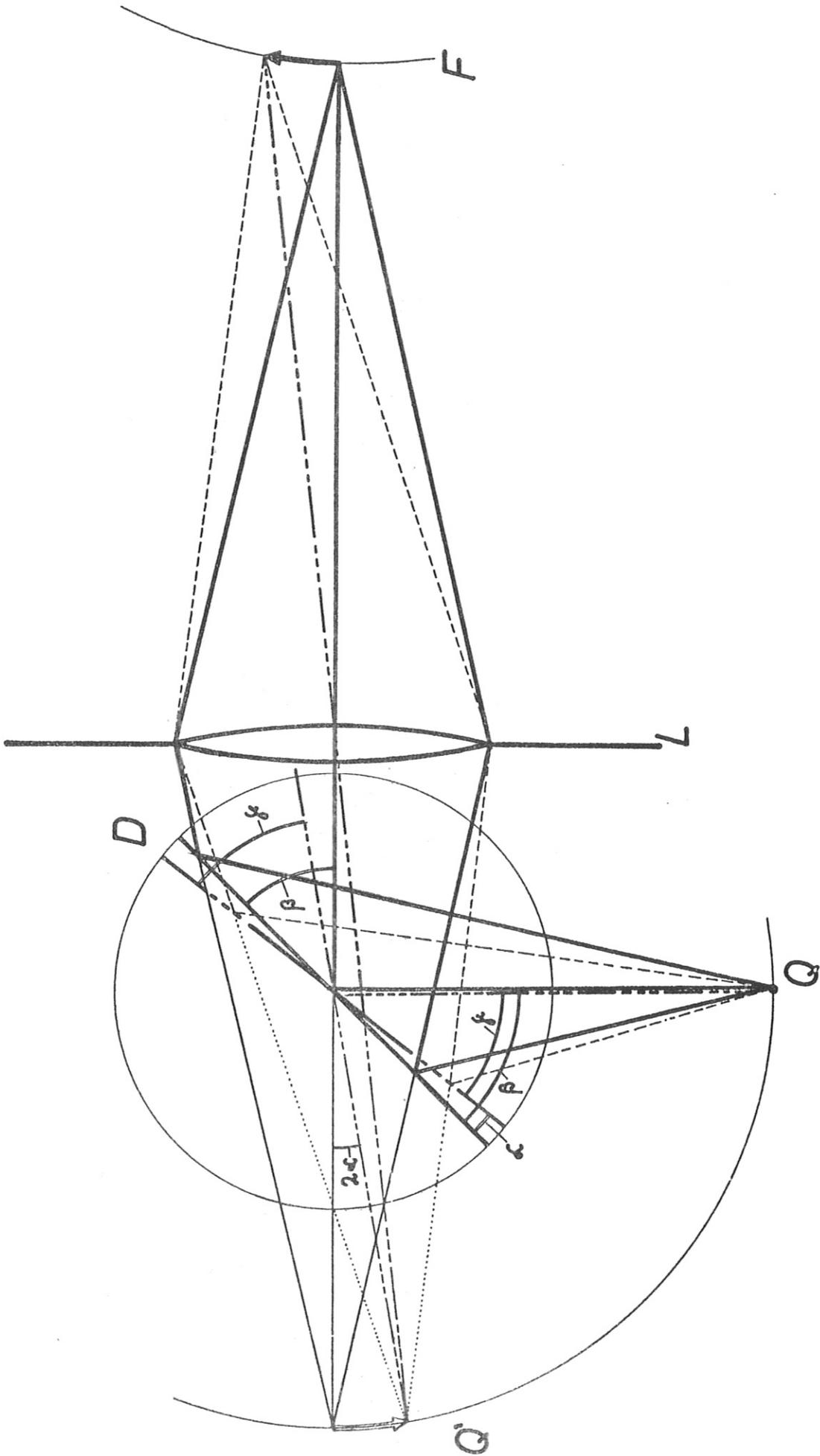


Fig. 5 Zur Schreibgeschwindigkeit

Wegen Formel (1) wird man natürlich bestrebt sein, eine möglichst hohe Spiegelfrequenz ν zu erreichen. Deren Grenze ist durch den Spiegel selbst und das Antriebsaggregat gegeben. Zu den damit zusammenhängenden Fragen soll noch Stellung genommen werden.

Auch der Schreibarm ℓ müsste möglichst lang gemacht werden. Er wird aber durch die Optik mitbestimmt, und seine Wahl ist deshalb eng mit der des Abbildungsmaßstabes und der Lichtstärke des Systems verbunden.

Beim "Normaltyp" ist der Schreibarm theoretisch beliebig lang wählbar, aber das bedingt einen grossen Abbildungsmaßstab oder (und) eine grosse Brennweite der Optik. Das würde umgekehrt (siehe z.B. Fig.2) geringe Lichtstärke zur Folge haben. Wegen Formel (2) ist der Spiegel möglichst nahe an der Optik anzuordnen. Dies ist auch bei den anderen Kameratypen zweckmässig.

Für Kameras mit grosser bildseitiger Öffnung geht dagegen die Länge des Schreibarmes im wesentlichen gegen die Bildweite b . Damit zeichnet sich der Zwang zu Kompromissen zwischen Lichtstärke und Zeitauflösung schon deutlich ab.

Durch einen Kunstgriff lässt sich die Schreibgeschwindigkeit ohne wesentliche Verluste an Lichtstärke erhöhen: Der Strahl muss den Drehspiegel mehrfach überlaufen. Wie leicht abzuleiten ist, führt (unter gewissen Bedingungen) n -fache Reflexion am Drehspiegel auch zu n -facher Schreibgeschwindigkeit. Im Kapitel IV ist eine Kamera beschrieben, bei der auf diese Weise eine Verdopplung der Schreibgeschwindigkeit erzielt werden kann. Geringe Lichtverluste im Verhältnis $1:\sqrt{2}$ müssen in diesem Spezialfall in Kauf genommen werden.

Ein Hinweis scheint schon hier angebracht zu sein:

Die Drehspiegelachse sollte immer senkrecht zum Strahlengang stehen. Das erspart in jedem Fall komplizierte Überlegungen [1], [4], [5]

Stände die Achse schräg, würde z.B. beim "Normaltyp" einer Kamera und auch bei dem, bei dem die Optik zwischen Spiegel und Film angeordnet ist, die Schreibgeschwindigkeit an den verschiedenen Stellen des Filmes unterschiedlich sein. Die dadurch verursachte Bilddrehung erschwerte die Auswertung erheblich. Besonders schwierig wird in einem solchen Fall die Berechnung der Schreibgeschwindigkeit dann, wenn der Strahl mehrfach über den Drehspiegel läuft.

Dabei und überhaupt kann es manchmal praktisch sein, die Schreibgeschwindigkeit experimentell, z.B. mit Hilfe von Multipliersignalen zu bestimmen. (Die Anordnung von Multipliern hinter Spalten in der Filmebene erleichtert oft auch das Auffinden des richtigen Triggerzeitpunktes wesentlich.)

5. Räumliches Auflösungsvermögen

Die Abbildung irgendeiner feinen Struktur im Gegenstand (im Plasma) wird einerseits durch die Qualität der Optiken, andererseits durch die kleinste Struktur des Filmes - das Korn - wesentlich bestimmt. Das Verhältnis von Korndurchmesser zu Strukturgröße im Gegenstand gibt also eine unterste Grenze für den Abbildungsmaßstab m .

Wie eingangs erwähnt wurde, sind allerdings in den meisten Fällen die Fehler bei der optischen Abbildung so gross, dass an die Stelle des Kornes das durch die Abbildungsfehler verwaschene kleinste Bild der Gegenstandsstruktur tritt.

Verschiedene Ursachen tragen dazu bei, dass die Bildstruktur einen Durchmesser von $1/20$ mm kaum unterschreiten kann [12] [13] [14] [15]. Einige sind mechanischer Art:

a) Zylinderfläche des Filmes

Befindet sich der Drehspiegel zwischen Optik und Film, ist die ideale Bildfläche ein Kreiszyylinder. Allein ihre Justierung relativ zur Spiegelachse ist ein Problem. Bei grossen Öffnungen bewirken Justierfehler von einigen Hundertstel mm auch Unschärfen von Hundertstel mm. Häufig werden für kurze Schreibzeiten sogar ebene Film- oder Plattenflächen in Kauf genommen werden, so dass die Fehler sofort recht gross sind.

Z.B. ist die mittlere Abweichung zwischen Ebene und Zylinderfläche für einen Radius von 50 mm und eine Schreiblänge von 30 mm mehr als 0.1 mm, so dass bei einer Öffnung von 1:2 Unschärfen von ca. 60μ entstehen würden [10].

b) Vibration der Spiegelachse

Je nach Spiegelkonstruktion ist durchaus mit Schwingungen der Spiegelachse in der Grössenordnung von Hundertstel mm zu rechnen, noch häufiger wird der Fall eintreten, dass der Spiegel während der Rotation eine zwar stabile, aber um einige Hundertstel mm von der Ruhelage abweichende Achslage einnehmen wird. Die dadurch verursachten Änderungen der Lichtwege führen leicht zu Unschärfen

von einigen Hundertstel mm, wenn grosse Öffnungen benutzt werden. Auch geringste Schrägstellungen der Achse haben den gleichen Effekt.

c) "Dicker" Spiegel

In den seltensten Fällen wird die Drehachse in der verspiegelten Fläche liegen. Im allgemeinen wird sie sich aus Wuchtungs- und Festigungsgründen einige mm ausserhalb der Achse befinden. Die dadurch verursachten Abweichungen der Bildfläche von einer Zylinderfläche sind verschiedentlich behandelt worden [1] [11] [16] [34] [35] [40] [41] .

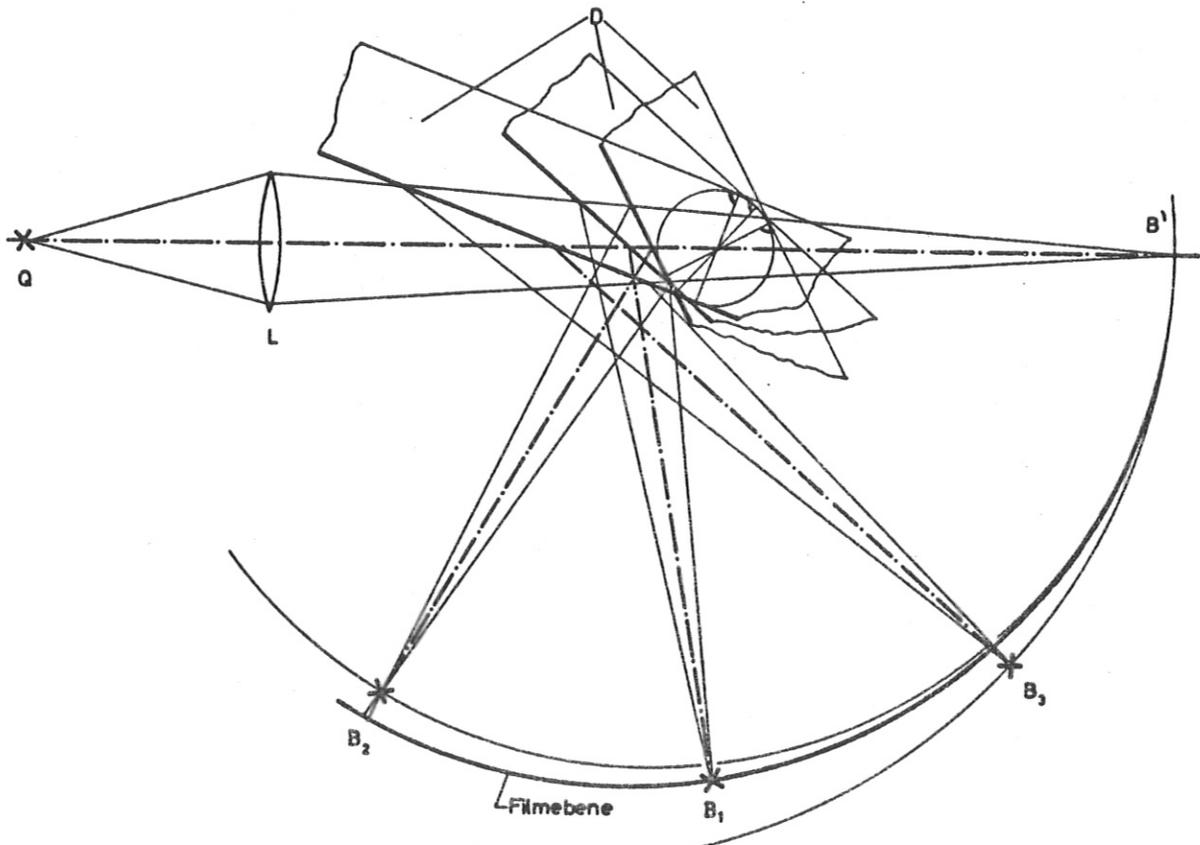


Fig.6 "Dicker Spiegel"

Bei einem Abstand Achse - Spiegelfläche von 5 mm und einem Winkel von 60° zwischen einfallendem und reflektiertem Strahl bringt schon eine Drehung um 1° eine Verschiebung um $7/100$ mm.

Bemerkenswert ist, dass diese Fehler bei einer Autokollimationskamera wesentlich kleiner sind oder ganz wegfallen [9].

Hinzu kommen noch Fehler der Optiken:

d) Zweilinser

Hier machen sich besonders bald Astigmatismus und Comafehler bemerkbar, wenn die Optik zwischen Drehspiegel und Film angeordnet ist [17].

e) Listenobjektive

Diese sind im allgemeinen für den Abbildungsmaßstab $\infty : 1$ korrigiert, so dass sie bei Abbildungen unter 20:1 auch erhebliche Fehler aufweisen. Häufig ist der Einfluss solcher Fehler bei der Angabe der erreichbaren Auflösung bei käuflichen Kameras nicht berücksichtigt.

f) Hohlspiegel

Der Vollständigkeit halber sei hier die Abbildung mit Hohlspiegeln noch erwähnt, die z.B. im einfachsten Fall so vorgenommen werden kann, dass der Drehspiegel selbst als Hohlspiegel ausgebildet werden kann. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass sehr bald eine erhebliche Comaquerabweichung auftreten wird (dergegenüber der Astigmatismus vernachlässigbar ist), die durch die Formel

$$(4) \quad \Delta K = \frac{3}{16} \cdot f \cdot \frac{1}{K^2} \cdot W$$

mit ΔK = Comaquerabweichung
 f = Brennweite
 K = Öffnung
 W = Einfallswinkel gegeben ist.

Z.B. ist für $W \stackrel{\Delta}{=} 1^\circ = \frac{1}{57,3}$; $K = 5$; $f = 500$ mm

$$(4') \quad \Delta K = \frac{3}{16} \cdot 500 \cdot \frac{1}{25} \cdot \frac{1}{57,3} = 67 \mu \quad [17]$$

Auch hier ist bemerkenswert, dass eine Autokollimationskamera die von den Optiken herrührenden Fehler klein hält, die Eigenschaften von Listenobjektiven sogar vorteilhaft auszunutzen gestattet.

Der postulierte Grenzwert für den kleinsten Bildpunkt mit 50μ ist also durchaus realistisch. Werden Abbildungsmaßstäbe angewandt, die zu kleineren Bildpunkten für die aufzulösenden Gegenstandsstrukturen führen, ist eine gewisse Skepsis am Platze.

6. Zeitauflösung

Die erreichbare Zeitauflösung hängt so eng mit dem räumlichen Auflösungsvermögen zusammen, dass jetzt erst die Grundlagen für ihre Diskussion gelegt sind. Wie schon in III.4 angedeutet, ist das zeitliche Auflösungsvermögen (allerdings in Verbindung mit der Lichtstärke)

das Qualitätskriterium einer Schmierkamera.

Definiert ist diese Zeitauflösung $\Delta \tau$ durch

$$(5) \quad \Delta \tau \text{ [}\mu\text{sec]} = \frac{\text{Höhe des Hilfsspalt} h \text{ [mm]}}{\text{Schreibgeschwindigkeit } v \text{ [mm}/\mu\text{sec]}}$$

Diese übliche Definition ist mit einer gewissen Willkür behaftet, da sie ja nur sagt, dass nach der Zeit $t + \Delta \tau$ das Bild des einen Spaltrandes den Ort des andern zur Zeit t überläuft.

Die Spalthöhe h sollte nun zweckmässig so klein gewählt werden, dass

$$(6) \quad h \cdot m = 0,05 \text{ mm}$$

werden, wobei m der Abbildungsmaßstab Spalt-Film ist. Als Spalt kann dabei ein Spektrografenspalt dienen, der den Vorteil reproduzierbarer Einstellung hat. Diese Spalte mit kleinster Weite 5μ haben allerdings meistens nur Längen von höchstens 2 cm. Da sie für Parallelführungen der Backen einen ziemlichen Raumbedarf haben, bringt ihre Verwendung in Autokollimationskameras es evtl. mit sich, dass der Film erst in ziemlichem Abstand vom Spalt angeordnet sein kann.

Für die Schreibgeschwindigkeit gilt (nach III.4)

$$(1'') \quad v = 2 \cdot 2\pi \nu \cdot \ell \cdot z \cdot 10^{-6} \text{ [mm}/\mu\text{sec]}$$

(1 [mm] = Schreibarm, z = Zahl der Reflexionen am Drehspiegel).

Damit ist

$$(5') \quad \Delta \tau \text{ [}\mu\text{sec]} = \frac{0,05 \cdot 10^6}{4\pi} \frac{1}{m \cdot \nu \cdot \ell \cdot z} \\ \approx \frac{4 \cdot 10^3}{m \cdot \nu \text{ [Hz]} \cdot \ell \text{ [mm]} \cdot z}$$

Unter Annahme plausibler Werte, z.B.

$$m = 1 ; \nu = 300 \text{ [Hz]} ; \ell = 480 \text{ mm} ; z = 2$$

(für eine Kamera ziemlich grosser Öffnung) ergibt sich

$$(5'') \quad \Delta \tau \approx \frac{4 \cdot 10^3}{1 \cdot 300 \cdot 480 \cdot 2} \text{ [\mu sec]} \approx 1,4 \cdot 10^{-8} \text{ [sec]}$$

Nur für Kameras geringer Lichtstärke erscheinen Zeitauflösungen unter 10^{-8} sec erreichbar.

Die Vorzüge der Autokollimationsanordnung für das erreichbare räumliche Auflösungsvermögen machen sich selbstverständlich in gleicher Weise bei der Zeitauflösung bemerkbar.

Bei einer Autokollimationskamera lassen sich vor allem der Drehspiegel und der übrige Teil, die "eigentliche Kamera" exakt trennen, was z.B. die Verwendbarkeit des Drehspiegels für andere Zwecke erleichtert, vor allem aber den festen, sorgfältig justierten Zusammenbau der "eigentlichen Kamera" ermöglicht, ohne dass dabei Rücksicht auf Schwingungen des Spiegels genommen werden muss.

Die von Schardin für Framing-Kameras angegebene Grenze [14][52] für räumlich-zeitliches Auflösungsvermögen ist zwar auch im Bereich der Schmierkameras gültig und wird manchmal zitiert [15], aber da als Bildgrösse die Höhe des Spaltbildes in die Formel eingesetzt werden muss, bestimmen in praxi immer andere Grössen als die Beugung das Auflösungsvermögen.

7. Lichtstärke

Ein Korn des Film- oder Plattenmaterials braucht eine gewisse Minimalenergie

$$\eta_K \left[\frac{\text{erg}}{\text{Korn}} \right],$$

um den chemischen Prozess zu bewirken, der eine ausreichende Schwärzung über dem Schleier garantiert. Dies Korn ist die kleinste Struktur des Films und hat die Grösse

$$Q_K \left[\frac{\text{cm}^2}{\text{Korn}} \right]$$

Korngrösse und Minimalenergie sind nicht unabhängig voneinander. Die Gesetzmässigkeiten ihrer Abhängigkeit sind aber (mindestens der Fotoindustrie) bekannt. Sie sind von anderen Grössen (z.B. Entwicklung, Filmalter, Spektralbereich des Lichtes, Kontrast, Kurzzeiteffekten usw.) abhängig. Sind diese Effekte beeinflussbar, soll hier optimale Verarbeitung vorausgesetzt werden.

Hier sei also angenommen:

$$(6) \quad \eta_K = \eta_K(a_K) \quad \text{sei empirisch bekannt.}$$

Die Lichtquelle Q (z.B. das Plasma) ist vom Experiment bestimmt, sie hat die Leuchtdichte

$$B_Q \left[\frac{\text{erg}}{\text{sec} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{Rad}} \right]$$

Die kleinste Struktur der Lichtquelle, die aufgelöst werden soll, ist auch durch das Experiment vorgegeben

$$a_Q \left[\text{cm}^2 \right]$$

Bisher war in diesem Abschnitt vom "Übertrager", von der Schmierkamera noch nicht die Rede. Sie hat zwei Aufgaben

- a) die notwendige Energie im optischen Kanal bis zum Ende zu transportieren
- b) dabei auch noch die durch das Experiment bedingte Zeitauf-
lösung zu garantieren.

Dabei lässt Punkt a) keine Kompromisse zu, denn es muss erfüllt sein

$$(7) \quad \eta_K \left[\frac{\text{erg}}{\text{Korn}} \right] \leq B_Q \left[\frac{\text{erg}}{\text{sec} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{Rad}} \right] a_K \left[\frac{\text{cm}^2}{\text{Korn}} \right] \Omega_F [\text{Rad}] t [\text{sec}]$$

worin B_Q (als Invariante des Strahlenganges auch die Flächenhelligkeit auf dem Film) vorgegeben ist,

$a_K = a_K(\eta_K)$ empirisch bekannt ist und noch in engen Grenzen wählbar,

$\Omega_F = \Omega_F(F, M, m) =$ filmseitiger Raumwinkel des Lichtbüschels eine Funktion der Lichtstärke der Optik und der Abbildungsmaßstäbe, darin wieder

$M = M(a_Q, a_K)$ und schliesslich

$t = \Delta \tau$ so gross sein muss (oder so klein sein darf), dass die Ungleichung noch erfüllt ist.

Ist das Licht knapp (nur dieser Fall ist diskutierenswert), muss die von der Gegenstandsstruktur in den optischen Kanal emittierte Energie so rationell wie möglich ausgenutzt werden, also möglichst nur auf 1 Korn konzentriert werden. Damit wäre der Abbildungsmaßstab festgelegt

$$(8) \quad M_{th} = \sqrt{\frac{a_K}{a_Q}}$$

Da die Abbildung im allgemeinen in zwei Schritten vorgenommen wird, Lichtquelle-Spalt und Spalt-Film, kann nach Festlegung des gesamten Abbildungsmaßstabes nun noch m (Spalt-Film) gewählt werden. Durch die Öffnung F der zugehörigen Optik wäre dann auch der Raumwinkel Ω_F festgelegt und damit die erreichbare Zeitauflösung $\Delta \tau$.

Leider sind die Grössen m und F nicht unabhängig voneinander und über die "Mechanik" des Drehspiegels auch noch mit der Zeitauflösung $\Delta \tau$ verbunden. Ausserdem komplizieren die schon diskutierten Fehler der optischen Abbildung die Situation noch mehr.

Deshalb muss in vielen Fällen anstelle von M_{th} ein ungünstiger aber realistischerer Wert (siehe III.5) zugrundegelegt werden:

$$(9) \quad M = \frac{0,005 \text{ cm}}{\sqrt{a_Q [\text{cm}^2]}}$$

Um eine vielseitige Verwendung einer Kamera zu garantieren, wird weiterhin ein festes m ein für alle Mal gewählt werden, z.B. $m=1$ (bei einer Autokollimationskamera). Allgemeinerer Grundsatz sollte sein, die Verkleinerung auf die beiden Schritte gleichmässig zu verteilen [17].

Im Endeffekt ergibt sich also, dass die benötigte Lichtstärke es ist, die im allgemeinen die für den Bau einer Schmierkamera ausschlaggebende Grösse ist, und dass die anderen Grössen nur unter Inkaufnahme von Kompromissen gegeneinander festzulegen sind.

Eine allgemeinere "Schmierkamerateorie" sollte deshalb von der notwendigen Lichtstärke als einer unbedingt einzuhaltenden Grösse ausgehen, wenn sie z.B. nach einem Extremalprinzip eine optimale Lösung des Problems sucht.

Auch hier ist wieder zu bemerken, dass Autokollimationskameras dem Bedürfnis nach grosser Lichtstärke sehr entgegenkommen, weil sie durch Abbildung in der Brennebene die Öffnung der verfügbaren Optiken voll auszunutzen gestatten.

8. Drehspiegelantrieb

Eng mit den bisher erörterten optischen Problemen hängen die mechanischen zusammen, die beim Bau des Drehspiegels selbst auftreten. Er ist einerseits Bestandteil des optischen Systems, andererseits bestimmen Antrieb, Lagerung, Festigkeit seine Konstruktion. Schliesslich sind einfache sichere Bedienung und ähnliches bei der Planung nicht zu vergessen.

Einfache Bedienung spricht für die Benutzung von Elektromotoren, einfacher Aufbau für die Wahl relativ niedriger Drehzahlen. In Fig.7 und Tabelle 2 sind Leistung und Drehzahl von handelsüblichen Elektromotoren angegeben, die für den Antrieb infrage kommen. Universalmotoren sind praktisch, weil bei ihnen (z.B. mittels Regeltrafo) leicht die Drehzahl variiert werden kann. Dagegen kommen Schnellfrequenzmotoren häufig unter Last nicht auf ihre Nenndrehzahl, wenn nicht mit Hilfe eines relativ teuern Umformers die Frequenz selbst hochgefahren werden kann. Beide Arten von Motoren mit hohen Drehzahlen werden fast ausschliesslich als Antriebsmotoren für Fräswerkzeuge in Tischlereibetrieben und für Schleifköpfe zur Metallbearbeitung (evtl. als Zusatzgeräte für Werkzeugmaschinen) hergestellt.

Verschiedentlich werden für den Antrieb 2-Phasenmotoren spezieller Bauart vorgeschlagen [18] [19], aber darauf und auf den Antrieb mit Turbinen soll hier nicht weiter eingegangen werden, obwohl er immer häufiger benutzt wird [37] [38] [46] .

Die durch den Antrieb gegebenen Drehzahlen bedingen auch die Anforderungen an die Lager des Spiegels [19]. Fig.8 gibt einen Überblick über verfügbare Kugellager. Es zeigt sich, dass die damit gegebenen Möglichkeiten mit den Erfordernissen aufgrund des Antriebs in Einklang sind.

Für die Schmierung kommen sowohl Stoffe auf Molybdändisulfid-Basis als auch Ölnebel infrage, wobei erstere auch den Betrieb der Lager im Vakuum ermöglichen. Luftlagerung scheint für grössere Wellendurchmesser bei den zu erwartenden Belastungen nicht mehr infrage zu kommen [20] [25] [46] .

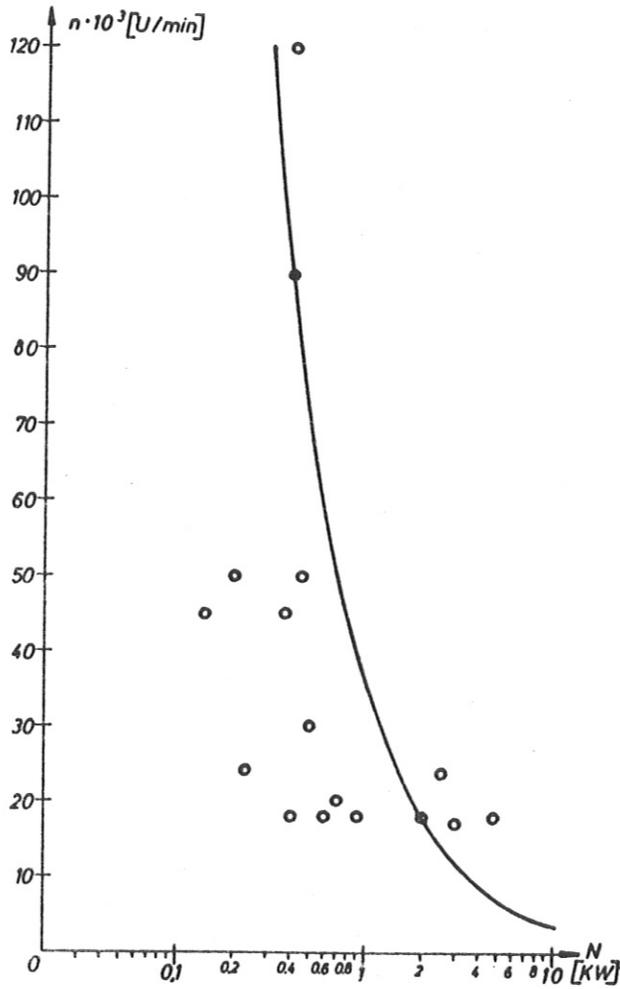


Fig. 7
Drehzahl handelsüblicher
Motore als Funktion ihrer
Leistung

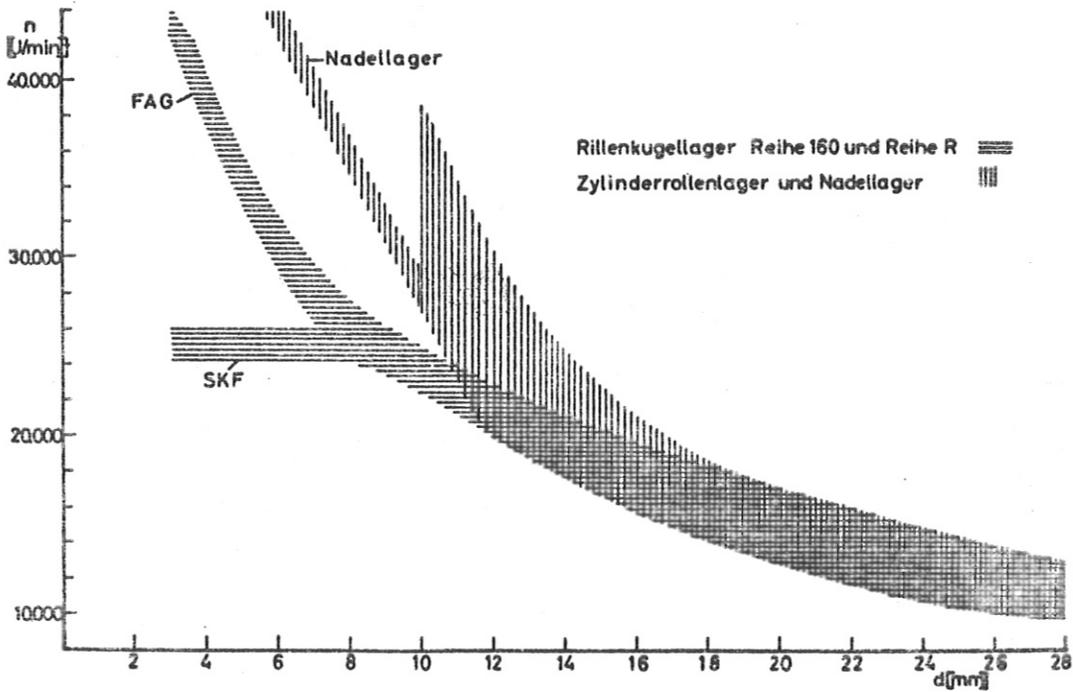


Fig. 8 Lager

Tabelle 2

Lfd. Nr.	Type, Firma	Leistung N(W)	Drehzahl n(Umdr/min)	Spannung U(Volt)	
1	Perske DNS	4 800	18 000	165	300 Hz
2	Hess Oberfräsmotor	2 500	24 000	165	300/400 Hz
3	Elu MoF 11	2 000	18 000	220	Univers.Mot.
4	Haffner UH 45	950	18 000	220	50 Hz
5	Elu MoF 13	700	20 000	220	Univers.Mot.
6	Perske DV Fr	600	18 000	165	300 Hz
7	Precise Super 60	600/370	45 000	220	Univers.Mot.
8	Bösch UG 30	500	30 000		
9	Bösch HDH 30 L 50	450	50 000	200	300 Hz
10	Müller Tempo TS R 25	450	90 000	145	500-1500 Hz
11	Müller Tempo TS R 19	400	120 000	145	500-2000 Hz
12	Stiffler S5-2	400	18 000	220	Univers.Mot.
13	Bosch Supportschleifer	230	24 000	220	50 Hz
14	Bösch HDH 15 L 50	220	50 000	200	150 Hz
15	Bosch Präzisions- schleifer	140	45 000	220	50 Hz

Die Kupplung zwischen Motor- und Spiegelachse ist im allgemeinen nicht problematisch, obwohl darauf geachtet werden muss, dass beide Wellen sorgfältig gegeneinander justiert sind. Anders ist die Situation, wenn der Spiegel im Vakuum laufen soll. Dann können z.B. Magnetkupplungen benutzt werden, von denen es heute einige gibt, die genügend hohe Leistungen zu übertragen gestatten. Vakuumdichte Wellendurchführungen für hohe Drehzahlen sind hingegen nicht handelsüblich. Sie bedingen immer einen ziemlichen Aufwand. (Siehe z.B. [21], wo Remy und Mitarbeiter eine noch relativ einfache Lösung des Problems beschreiben.)

Zu beachten ist, dass der Leistungsbedarf für den Drehspiegelantrieb mehr als quadratisch mit der Frequenz ansteigt. Das führt dazu, dass für Drehspiegel bestimmter Grösse von den Motoren her eine ziemlich definierte Drehzahlgrenze vorgegeben ist.

Der Leistungsbedarf kann verringert werden, indem man anstelle eines Glasspiegels, der eine Fassung benötigt, einen Metallspiegel benutzt, an den die Wellenstummel direkt angeflanscht werden können. Häufig haben Metallspiegel aber eine schlechtere Oberfläche.

Wird anstelle von Luft als Füllgas der Drehspiegelkammer Helium verwandt, sinkt der Leistungsbedarf merklich (siehe später). Da dies im allgemeinen viel einfacher ist, als den Spiegel im Vakuum laufen zu lassen, wird der Preis für das Helium häufig gerechtfertigt sein, zumal der Schritt vom Helium zu Vakuum manchmal nicht den erhofften Gewinn bringen wird, da ein grosser Teil der Leistung in den (durch die Vakuumbedingungen unter Umständen komplizierteren) Lagern verbraucht wird.

Erwähnenswert ist noch, dass der Spiegel als Pumpe wirken kann, die durch die Lager Luft ansaugt und so die Spiegelkammer mit Ölnebel füllen kann [19] [21]. Der Spiegel kann dadurch unbrauchbar werden. Der Anschluss einfacher Vakuumpumpen an die Lager kehrt die Strömungsrichtung um und bringt dann sofort Abhilfe.

9. Festigkeit des Drehspiegels

Ohne auf Einzelheiten einzugehen, von denen einige im Anhang näher diskutiert werden sollen, sei kurz gesagt, dass die grössten Zugspannungen aufgrund der Fliehkräfte in der Spiegelachse auftreten.

Für rechteckige Spiegel gilt dabei

$$(10) \quad \frac{K}{F} = \frac{\rho \cdot (\omega \cdot R)^2}{2} = \frac{\rho \cdot v^2}{2}$$

oder für die zulässige Umfangsgeschwindigkeit mit $K/F \leq \sigma$

$$(11) \quad v_{Gr} \left[\frac{m}{sec} \right] = \sqrt{\frac{2\sigma}{\rho}} \frac{26 \left[\frac{Kg^*}{cm^2} \right] \cdot 10^4}{\rho \frac{gr}{cm^3}}$$

K = Kraft in $[dyn]$ oder $[Kg^*]$ (981 000 dyn $\hat{=} 1 Kg^*$)

F = Querschnittsfläche des Spiegels in der Achse

v = Geschwindigkeit

ρ = Dichte des Spiegelmaterials

σ = Spannung (üblicherweise $\sigma_{0,1}$, $\sigma_{0,2}$ oder Proportionalitätsgrenze)

ω = Kreisfrequenz

R = Abstand: Aussenkante Spiegel-Achse

Der günstigere Fall eines quadratischen Spiegels, der um seine Diagonale rotiert, wird oft nicht betrachtet. Dafür gilt

$$(12) \quad \frac{K}{F} = \frac{\rho \cdot (\omega \cdot R)^2}{6} \quad \text{oder}$$

$$(13) \quad v_{Gr} = \sqrt{\frac{6\sigma}{\rho}}$$

Dieser Fall kommt der vom Standpunkt der Fliehkräfte günstigsten Spiegelform nahe.

Die einleuchtenden Folgerungen für die Konstruktion von Spiegel und Spiegelfassung lauten also: Möglichst kurze, möglichst dicke Achsstummel, Fassung oder Spiegel keinesfalls in der Achse an- oder durchbohren, sondern gegebenenfalls aussen (zum Zentrieren) Zylinder andrehen.

Zur Wahl des Materials für den Spiegel (oder die Fassung) gibt der Quotient σ/ρ einfache Hinweise. Wie z.B. bei Remy [21] näher ausgeführt, gestattet Titan die höchste Umfangsgeschwindigkeit, gefolgt von Berylliumbronze, Dural, Beryllium [15] [38] [43] und Molybdän. Dagegen ist mit Glas (und auch mit Stahl) nur etwa die halbe Geschwindigkeit erlaubt. - Da diese Geschwindigkeiten in der Gegend der Schallgeschwindigkeit in Luft liegen, wären auch die mit der "Schallmauer" verbundenen Probleme zu beachten.

Es darf übrigens nicht übersehen werden, dass auch erhebliche andere Kräfte auf das Spiegelmaterial und vor allem auf die Achse wirken. Das Spiegelgehäuse ist z.B. kein Zylinder, denn es wird von den planen Fenstern durchbrochen. Läuft der Spiegel nun nicht im Vakuum, so führt die von den Spiegelflächen in diese Ecken abströmende Luft zu erheblichen Stößen sowohl auf die Spiegelflächen als auch auf die Achsen, die Biegebeanspruchung, vor allem aber periodische Torsionsbeanspruchungen verursachen.

Zum mindesten sollte deshalb das Gehäuse symmetrisch sein, um radiale Stöße auf die Achse zu kompensieren. Aber darüber hinaus lässt sich durch geschickte Luftführung die Beanspruchung von Spiegel und Achse stark reduzieren, die Laufruhe vergrößern und die Lagerbeanspruchung verringern.

Unter anderen befassen sich neben Remy [21] auch [5] [15] [22] [23] mit diesen Problemen.

10. Triggerung und Drehzahlmessung

Sind die Schreibzeiten kurz und die Schreibgeschwindigkeiten gross, wird die richtige Triggerung ausserordentlich wichtig. Dabei ist es erstrebenswert, den "Ur"-Triggerimpuls mit einem möglichst geringen Zeitabstand vor dem zu beobachtenden Ereignis abzunehmen, damit eventuelle Drehzahlschwankungen des Spiegels nicht stören können.

Ist die Spiegelfrequenz konstant, so kann natürlich zu beliebigem Zeitpunkt der "Ur"-Impuls abgenommen und dann einstellbar verzögert werden.

Der Urimpuls kann entweder ein Lichtimpuls auf eine Fotozelle sein oder auch der elektrische Impuls, den ein in unmagnetischem Material eingebettetes Eisenstück beim Vorbeilauf an einem magnetischen Tastkopf erzeugt [9] [21] [24] .

Geht man mit dem Lichtstrahl für den Triggerimpuls über einen getrennten Spiegel auf derselben Welle oder über die Rückseite des Drehspiegels, sind meistens keine wesentlichen Vorsichtsmassnahmen zu treffen. Läuft der Triggerlichtstrahl aber über die Vorderfläche des Drehspiegels, so kann Streulicht den zu beobachtenden Vorgang stören. Das kann z.B. durch einen Infrarotempfänger und ein Rotfilter vor der Lampe vermieden werden, wodurch das Triggerlicht einem Wellenlängenbereich angehört, der ausserhalb der Filmempfindlichkeit liegt. Ein solcher Empfänger ist z.B. der Fotowiderstand TP 50.

Zur Drehzahlmessung bieten sich die Impulse an, die auch zur Triggerung benutzt werden. Verschiedene - mehr oder weniger einfache - elektronische Schaltungen sind möglich, auch die direkte Beobachtung der Impulse auf einem Oszillografen oder die Beobachtung von Lissajousfiguren auf dem Oszillografenschirm, die von den Triggerimpulsen auf dem einen Plattenpaar und dem Signal eines Meßsenders auf dem anderen Plattenpaar geformt werden.

IV. Einige spezielle Ausführungen von Drehspiegelkamas

Zur zeitaufgelösten Fotografie von Vorgängen in Stosswellenrohren wurden auf der Grundlage der im vorigen Kapitel ange-
stellten Überlegungen einige Drehspiegelkamas gebaut. Bau
und Konstruktion erfolgten grossenteils in enger Zusammen-
arbeit mit dem Konstruktionsbüro und der Zentralwerkstatt des
Institutes. Einige Einzelheiten der ausgeführten Schmierkame-
ras sollen hier mitgeteilt werden:

1. Kamerateil und optisches System

In allen Fällen handelt es sich um Autokollimationskamas.
Der Strahlengang entspricht dem in Fig. 3 dargestellten.

a) Zur Abbildung des Gegenstandes auf den Spalt werden wahl-
weise verschiedene Optiken benutzt:

- | | | |
|--|---------|--------|
| α) Schneider Göttingen Aeroxenar | 1 : 2,5 | 400 mm |
| β) Schneider Kreuznach Telexenar | 1 : 4,5 | 480 mm |
| γ) Schneider Kreuznach Kinoprojektar | 1 : 1,7 | 130 mm |

Die Optiken α und γ garantieren eine so grosse spaltseitige
Öffnung, dass die Kameraoptik vor dem Drehspiegel immer voll
ausgeleuchtet ist, auch wenn relativ lange Stosswellenrohre
fotografiert werden. Damit ist wenigstens ein vignettierender
Faktor eliminiert. Dabei wird α üblicherweise für einen Abbil-
dungsmaßstab 10 : 1 oder 20 : 1 benutzt, γ für einen solchen
von 50 : 1 bis 100 : 1 oder in Fällen räumlicher Begrenztheit.

Die Benutzung der Optik β führt zu zusätzlichen Vignettierungs-
erscheinungen, da die Kamera eine Optik desselben Typs enthält.

Die Optiken sind auf massiven optischen Bänken mit Schwalben-
schwanzführung montiert, die eine Justierung sowohl der Höhe
als auch des Abstandes vom Spalt in einem Justierbereich von
einigen cm mit Hilfe von Feingewindebolzen gestattet. Skalen
mit Nonius erlauben reproduzierbare Einstellung.

b) Der Spalt hat eine Länge von 6 cm, wodurch noch eine rationelle Ausnutzung von 6 cm Rollfilmmaterial und 6 x 9 cm Fotoplatten gewährleistet ist. Alle Spalte sind in der Zentralwerkstatt des Institutes gefertigt, wobei auf geringe Spaltbackenbreite geachtet wurde, damit die Film- oder Plattenkassette sehr nahe am Spalt angeordnet sein kann (zur Verringerung der Vignettierungseffekte). Das Stahlmaterial der Spalte wurde zwischen den verschiedenen Bearbeitungsvorgängen monatelang gelagert und im Ofen entspannt, so dass nach Fertigstellung keine Verformungen mehr auftraten. Die Spalteinstellung ist (nicht vollständig reproduzierbar) an einer Skala abzulesen. Sie sollte in kritischen Fällen optisch kontrolliert werden. Bis zu einer Spaltbreite von 0,05 mm machen sich Keilfehler und Scharten noch nicht störend bemerkbar. Zum einfachen Konstruktionsprinzip der Spalte siehe Fig. 9:

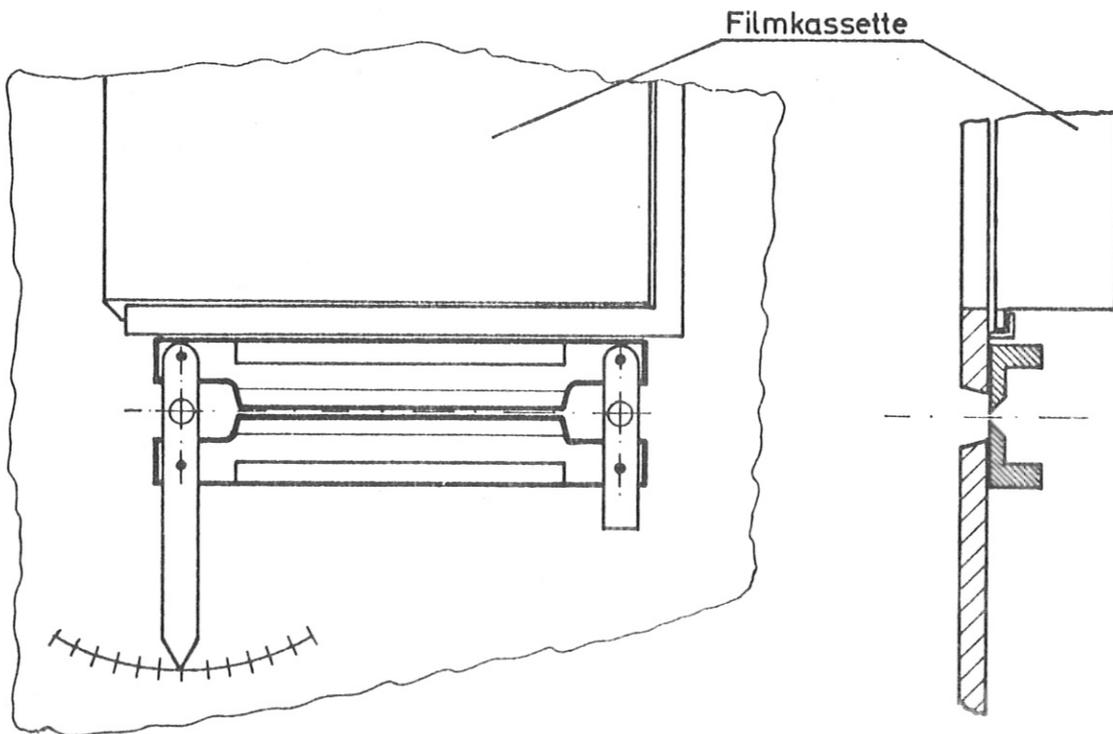


Fig. 9 Spalt

c) Die Kameraoptik ist in allen Kameras gleich; gewählt wurde ein Telexenar 1 : 4,5 480 mm von Schneider Kreuznach.

Diese Optik ist durch einen Balg mit dem Restgehäuse der Kamera verbunden, das Kassette, Spalt und Triggereinrichtung trägt. Gegen dieses Gehäuse ist die Optik wieder mit einem Feingewindebolzen reproduzierbar in einem Justierbereich von einigen cm zu verschieben, wie in Fig. 10 skizziert. Der gesamte Kamerateil ist auf einer massiven Platte montiert. - Durch die Wahl der Optik ist gleichzeitig die volle Ausnutzung der Öffnung 1 : 6 eines Försterlingspektrografen von Zeiß Jena bei einer Kombination Drehspiegel-Spektrograf möglich.

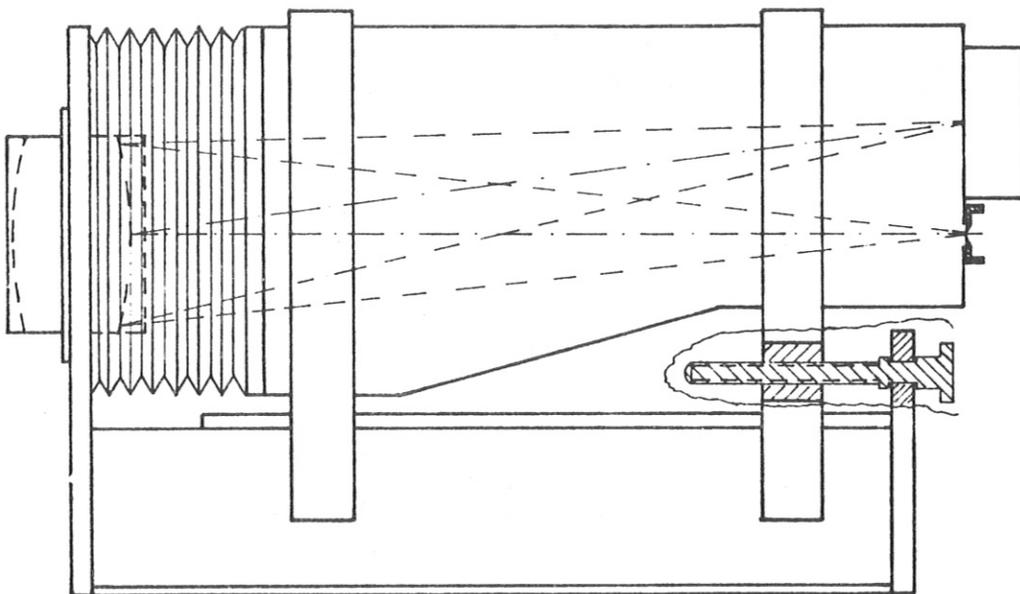


Fig. 10 Kameraoptik u. Kameragehäuse

d) Als Filmkassetten werden in allen Kameras handelsübliche Normkassetten für 6 x 9 Film benutzt oder Plattenkassetten mit dem gleichen Falz. Diese Kassetten sind dem Spalt so eng wie möglich benachbart. Aus Gründen der einfachen Justierbarkeit liegt der Spalt in der optischen Achse der Kameralinse, die Kassette darüber. Die Justierung der Kameras erfolgt mit Hilfe von Plattenkassetten, deren Rückwand ausgeschnitten wurde, und Mattscheiben, als die z.B. auch schwach belichtete Fotoplatten benutzt werden können.

e) Seitlich von Spalt und Filmkassette ist eine optische Triggeranordnung montiert, über die in einem entsprechenden Abschnitt noch ausführlichere Angaben gemacht werden.

f) Ein verbesserter Kamerateil, der die wahlweise Benutzung von Kleinbild-, Rollfilm-, Planfilm-, Platten- und Polaroidfilm - kassetten gestattet, befindet sich in der Entwicklung. Der Spalt wird hier seitlich angebracht (siehe Fig. 11), so dass für die Kassettenmontage alle Freiheiten gewahrt bleiben.

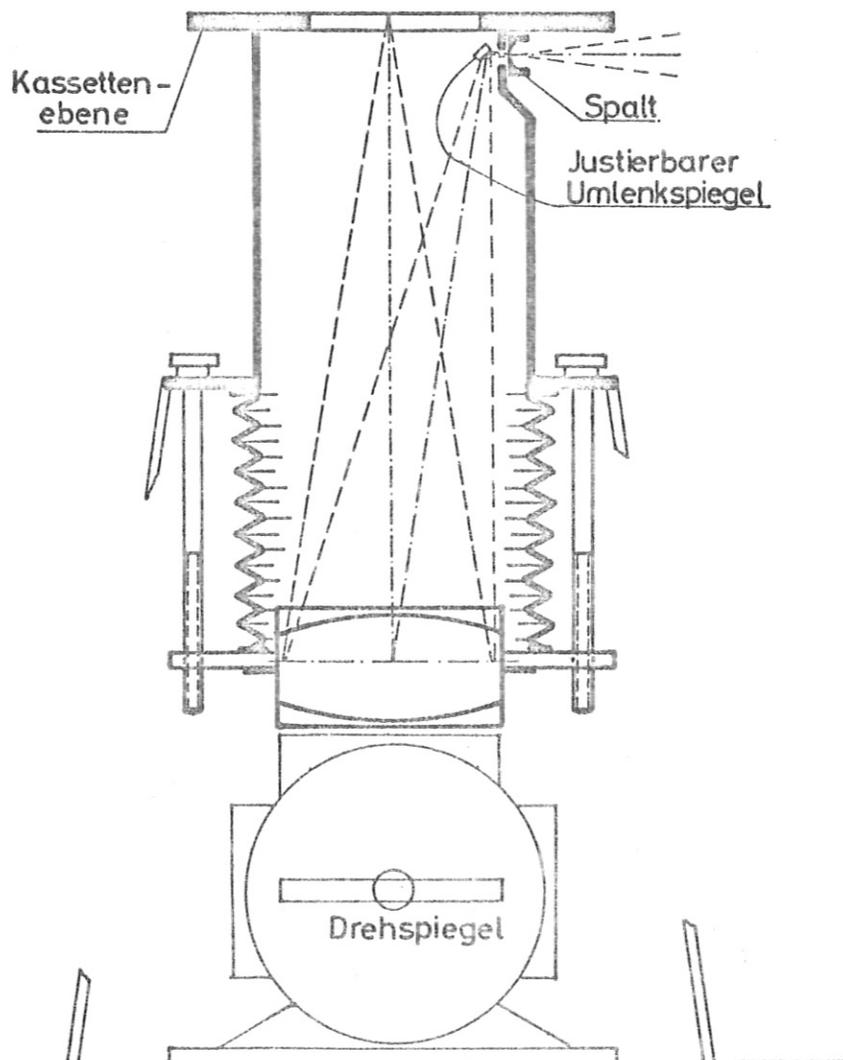


Fig. 11 Verbesserter Kamerateil

2. Drehspiegelaggregat

Die verschiedenen Drehspiegel unterscheiden sich zwar in manchen konstruktiven Einzelheiten, weisen aber auch wesentliche gemeinsame Prinzipien auf. Mit einer Ausnahme, die gesondert behandelt werden soll, bestehen sie alle aus dem eigentlichen Drehspiegel im Gehäuse mit Lagerböcken, der über eine Kupplung mit dem justierbar gelagerten Motor verbunden ist.

a) Als Motoren wurden solche vom Typ

Elu MoF 11 18000 Umdr/min 2 kW ,

also Universalmotore gewählt. Diese Motoren wurden mit ihren Achs-enden zwischen Spitzen auf die Drehbank genommen. Dann wurde ein am Gehäuse befindlicher Bund von ca. 60 mm \varnothing und 20 mm Länge zur Achse laufend abgedreht, womit eine genaue Montage möglich war. Diese Montage erfolgte in einigen Fällen auf einer winkelförmigen massiven Halterung (siehe Fig. 12), auf der der Motor am Bund eingespannt wurde, worauf dann mit einer

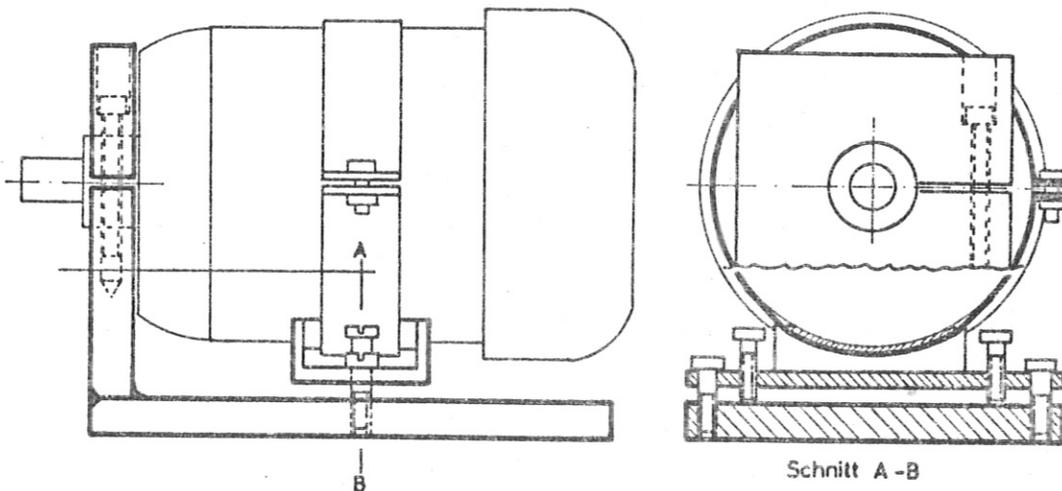


Fig. 12 Motorhalterung

Vorrichtung am Gehäuse die Welle parallel ausgerichtet werden konnte. Die Grundfläche dieser Halterung, ursprünglich mit genügendem Aufmass versehen, musste nun auf die der Drehspiegelachse entsprechende Höhe abgefräst werden. Mit dieser Halterung wurde der Motor dann nach sorgfältiger Justierung auf der gemeinsamen Grundplatte montiert.

Bei einer einfacheren Drehspiegelausführung für Drehzahlen bis 200 Hz genügte es, den Motor nur am Bund zu halten, wozu ein Bock von 20 mm Dicke und 100 mm Breite (nachdem er auf die richtige Höhe abgefräst wurde) auf die Grundplatte geschraubt wurde.

Schliesslich sind bei zwei Kameras die Motoren noch nach einem dritten Prinzip gehalten: Die Böcke für die Drehspiegellager wie auch die zur Motorhalterung wurden auf der schweren Grundplatte aufgeschweisst und dann gemeinsam - fluchtend - auf einem Bohrwerk gebohrt, so dass das Justierproblem entfiel.

Die Motoren selbst nehmen bei einer Spannung von 220 Volt noch nicht ihre Nennleistung auf. Sie werden - ohne Schwierigkeiten - mit Spannungen bis zu 400 Volt betrieben. Dann setzt Rundfeuer am Kollektor ein. Die Stromversorgung erfolgt über handelsübliche Regeltransformatoren. - Auch bei Überschreitung der Nenn-drehzahl bis zu 400 Hz $\hat{=}$ 24000 Umdr/min ergaben sich keine Schwierigkeiten.

b) Das Drehspiegelgehäuse mit einem Innendurchmesser von ca. 150 mm und einer Länge von ca. 200 mm ist ebenfalls sorgfältig justiert auf der Grundplatte befestigt. Bei seiner Bearbeitung wurde Wert darauf gelegt, dass die beiden Flansche zur Aufnahme der Lagerböcke planparallel sind und fluchten. Die eingepassten Lagerböcke müssen allein durch die Montage richtig justiert sein.

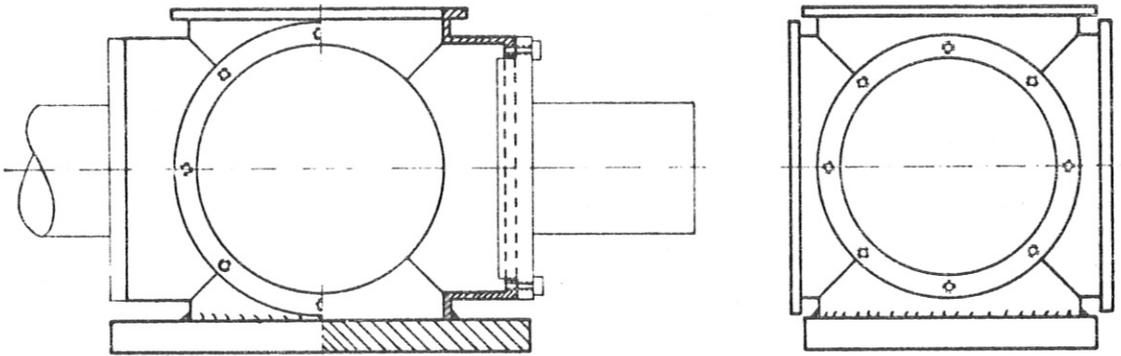


Fig. 13 Drehspiegelgehäuse

In den Fällen, in denen die Lagerböcke auf dem Bohrwerk gebohrt wurden, steht das eigentliche Spiegelgehäuse ohne direkten Kontakt mit den Böcken zwischen diesen.

Schliesslich genügt bei der einfachen Drehspiegelausführung für Frequenzen unter 200 Hz ein einfaches eckiges Blechgehäuse, das zwischen ebenfalls einfache Lagerböcke geschraubt wird.

Das Gehäuse ist mit zwei oder drei Fenstern versehen, wobei auf Symmetrie der inneren Flächen zur Achse geachtet wurde. Die nicht benutzten Fenster sind mit massiven Metallplatten verschlossen. Das Glasfenster muss eine genügende Dicke haben, damit es durch die Pumpwirkung des rotierenden Spiegels nicht verformt wird und die optische Abbildung stört. In kritischen Fällen wurde das Fenster ganz entfernt und das Spiegelgehäuse durch eine Balg direkt mit der Kameraoptik verbunden.

Der Fensterdurchmesser ist so gewählt, dass bei Benutzung von Glasspiegeln von 120 mm \emptyset diese in ihrer Fassung ausgewechselt werden können, ohne dass der ganze Drehspiegel demontiert werden muss.

Anstelle des dritten Fensters wurde manchmal ein Spiegel montiert, der die Schreibgeschwindigkeit verdoppelt, wodurch allerdings die Lichtstärke geringfügig herabgesetzt, die Vignettierung merklich erhöht wird (siehe III, 3 und 4).

Einer der Drehspiegel wurde mit einem Anschlußstutzen zur Fremdgaszufuhr (benutzt wurde Helium) versehen. Nach einigen Sekunden Laufzeit ist durch die Vakuumpumpe über die Lager die ursprüngliche Luftfüllung des Gehäuses abgesaugt und im wesentlichen durch das Fremdgas ersetzt.

c) Auf die Lagerböcke wurde besondere Sorgfalt verwandt. Bei der einfachsten Kameraausführung genügen ausgedrehte und geschlitzte Stahlplatten von 20 mm Dicke, in die je ein hochgenaues Kugellager (z.B. vom Typ SKF 6002) eingespannt wird.

Für höhere Drehzahlen wurde jeder Achsstummel des Spiegels zweifach gelagert mit einem Abstand der Kugellager von ca. 80 mm. Die Lager wurden mit Tropfölnern ausgerüstet (1 Tropfen je 1-10 sec. genügt). Die Ölführung ist so ausgebildet, dass das Öl von den rotierenden Teilen zerstäubt wird, und dieser Nebel von einer Grobvakuumpumpe durch die Kugellager in einen Auffangbehälter gesaugt wird, wobei gleichzeitig von beiden Lagerenden, also auch aus dem Drehspiegelgehäuse Luft abgesaugt wird. Dadurch wird auch verhindert, dass der Spiegel Ölnebel in sein Gehäuse saugt.

In den Fällen, in denen die Lagerböcke auf dem Bohrwerk gebohrt wurden, verhindern Turbinen auf den Wellenstummeln das Eindringen der Ölnebel in das Spiegelgehäuse, ihre Pumpleistung reicht aber nicht aus, um das Gehäuse merklich zu evakuieren. Ausserdem muss die benötigte Leistung vom Antriebsmotor des Drehspiegels aufgebracht werden, so dass auf diesem Wege keine höheren Spiegelfrequenzen erzielt werden können.

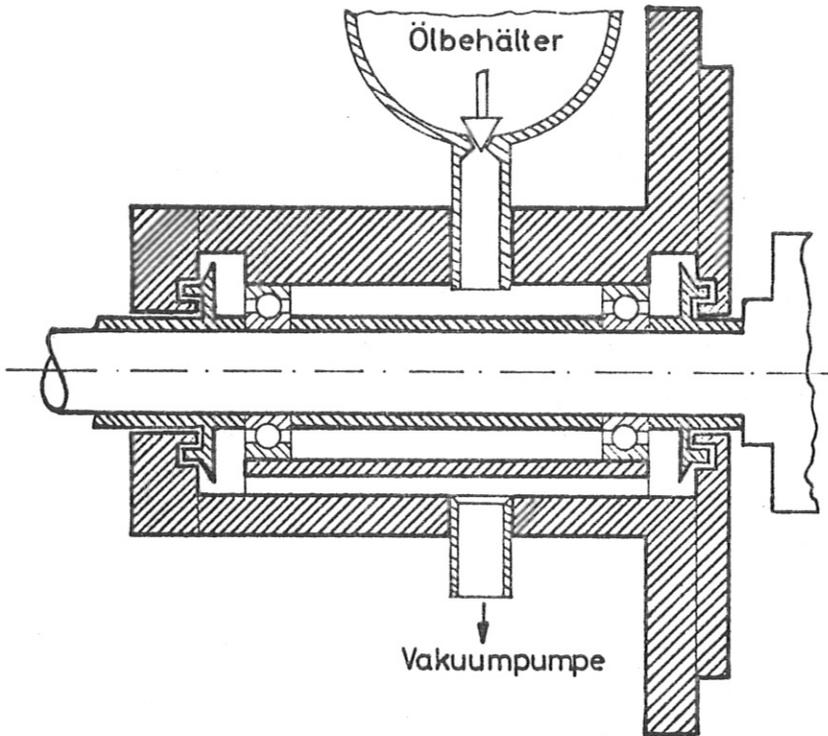


Fig. 14 Lagerbock

d) Als Kupplung genügt im einfachen Fall eine Scheibe aus nicht zu weichem Gummi mit vier Löchern, in die kreuzweise je zwei Bolzen von den Kupplungshälften eingreifen. Zur Vermeidung von Geräuschen und aus Sicherheitsgründen greift eine Kupplungshälfte mit einer zylindrischen Hülse über die andere.

Für höhere Drehzahlen wurde die Kupplung sorgfältiger ausgebildet. Die eine Hälfte greift mit vier Bolzen, die je zwei Gummiringe tragen, in Bohrungen der anderen Hälfte, die genau zu den Bolzen passen. Ein Schlagen von weniger als 10μ wurde beim Zusammenbau zugelassen.

e) An den Spiegel werden im Rahmen der optischen Abbildung erhebliche Anforderungen gestellt. Deshalb sind im allgemeinen Glasspiegel eingebaut, die von B. Halle Nachf. in Berlin mit einer Oberflächengüte von $\lambda/10$ hergestellt wurden. Aus Gründen der einfachen Herstellung der Fassung wurden kreisrunde Spiegel (von 120 mm \emptyset) gewählt. Für die Bearbeitung der Spiegeloberfläche ist ein Verhältnis Durchmesser zu Dicke von weniger als 10:1 erstrebenswert, was durch eine Dicke von 15 mm erfüllt ist. - Bei 300 Hz beträgt die grösste Umfangsgeschwindigkeit 113m/sec. Gemäss III.9 ist sie für Glas vertretbar.

Die Fassung für diese Spiegel wurde aus Dural hergestellt, das zwischen den einzelnen Arbeitsgängen sorgfältig entspannt wurde. Auf einer Fräsbank vom Typ FP1 wurde die Bearbeitung mit der maximal erreichbaren Genauigkeit von einigen μ vorgenommen. Die Dicke der Fassung ist der des Spiegels angepasst.

An vier Stellen ist die Fassung zum Ausgleich für Bohrungen verstärkt. In diese Bohrungen werden acht Schrauben mit flachen breiten Köpfen eingeschraubt, die den Glasspiegel in der Aluminiumfassung halten, ohne ihn direkt zu pressen, und ohne den Luftabfluss von der Spiegelfläche wesentlich zu stören.

In Achsenrichtung ist die Fassung ebenfalls wesentlich verstärkt und mit Flanschen und zylindrischen Ansätzen versehen, die das genaue Fluchten der angeflanschten Wellenstümpfe garantieren. Diese Wellenstümpfe sind gehärtet und geschliffen und haben einen Durchmesser von 13 mm.

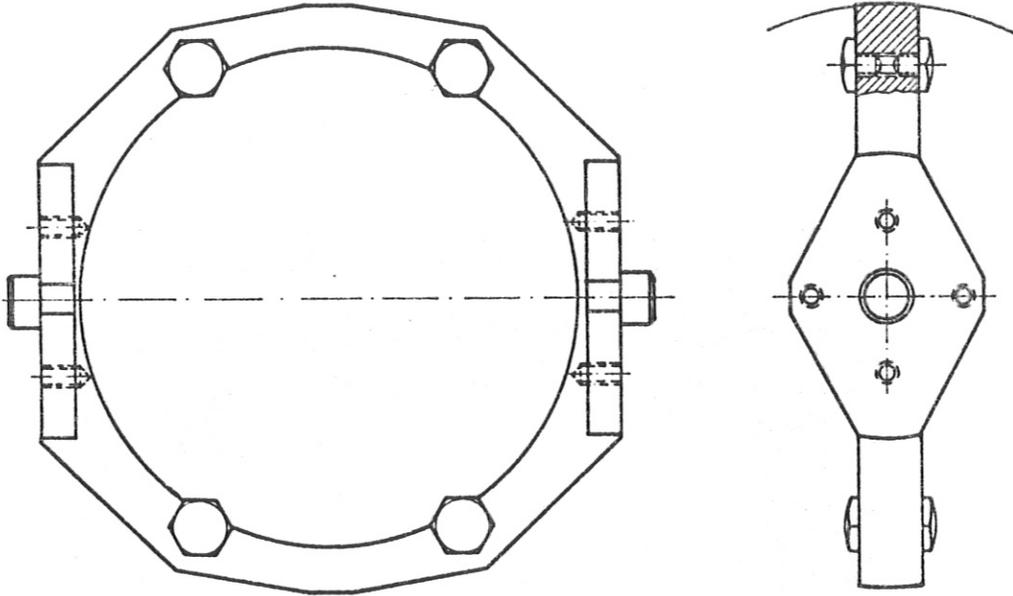


Fig. 15 Spiegelfassung

Genaueres Einpassen des Glasspiegels in die Fassung verhindert übrigens auch eine ovale Verformung der Fassung unter dem Einfluss der Fliehkräfte. Bei einem grössten Durchmesser von 150 mm treten bei 300 Hz Umfangsgeschwindigkeiten von 142 m/sec. auf.

Da aus Gründen der Kostenersparnis auf die Forderung nach bester Planparallelität der Spiegelflächen verzichtet wurde, musste beim Einsetzen der Spiegel in die Fassungen darauf geachtet werden, dass die dickste und die dünnste Spiegelkante in der Achse der Fassung lagen.

Die genaue Bearbeitung und Zusammensetzung von Spiegel, Fassung und Wellenstummeln wurde immer durch statisches Wuchten auf Schneiden kontrolliert. - Es gab dabei keine einzige Beanstandung. - Der Verzicht auf dynamisches Wuchten erwies sich durch den geringen Verschleiss an Lagern auch bei exzessiver Beanspruchung als gerechtfertigt.

Um Erfahrungen zu sammeln, wurden auch zwei Titanspiegel für diesen Kameratyp konstruiert. Die Firmen Carl Zeiß, Oberkochen, und B. Halle Nachf., Berlin, schliffen je einen Spiegel und hatten dabei erhebliche Schwierigkeiten zu überwinden. Die Oberflächengüte beträgt aber immerhin noch $1-2 \lambda$. Da bei diesen Spiegeln die Fassung unnötig ist, kann Motorleistung gespart, oder bei gleicher Leistung eine höhere Drehzahl erzielt werden.

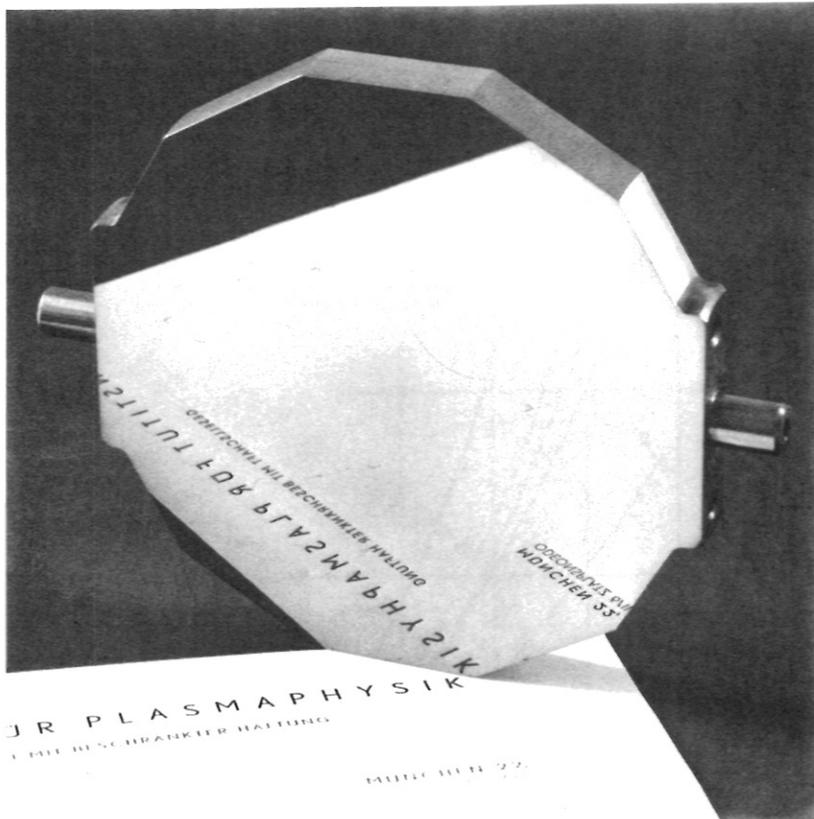


Fig. 16 Titanspiegel

f) Die Leistungsaufnahme verschiedener Spiegelaggregate dieses Typs wurde als Funktion der Drehzahl und der Gasart, in der der Spiegel rotiert, gemessen. Die Messwerte sind in Fig. 17 dargestellt. Durch Zusatz von Helium zum Gas im Spiegelgehäuse lässt sich der Leistungsbedarf ungefähr halbieren. Eine Analyse der Messwerte ergibt, dass die Leistung mehr als quadratisch mit der Frequenz ansteigt.

Fig. 17

LEISTUNGSMESSUNG
AN DREHSPIEGELN

- | | | |
|----|-------------|---|
| 1 | Drehspiegel | D1 in Luft |
| 3a | " | D3 " Luft |
| 3b | " | D3 " Helium-Luft-Gemisch |
| 3c | " | D3 " Helium-Luft-Gemisch bei
größerem He-Durchsatz |
| 4 | " | D4 " Luft |

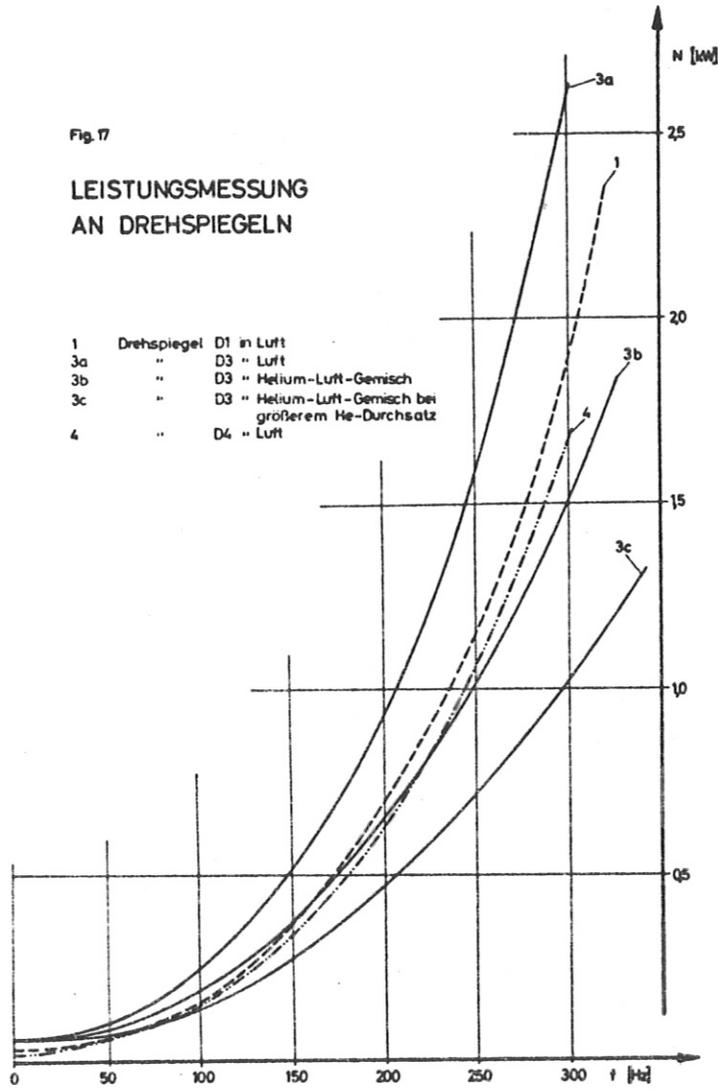


Fig. 17 Leistungsaufnahme

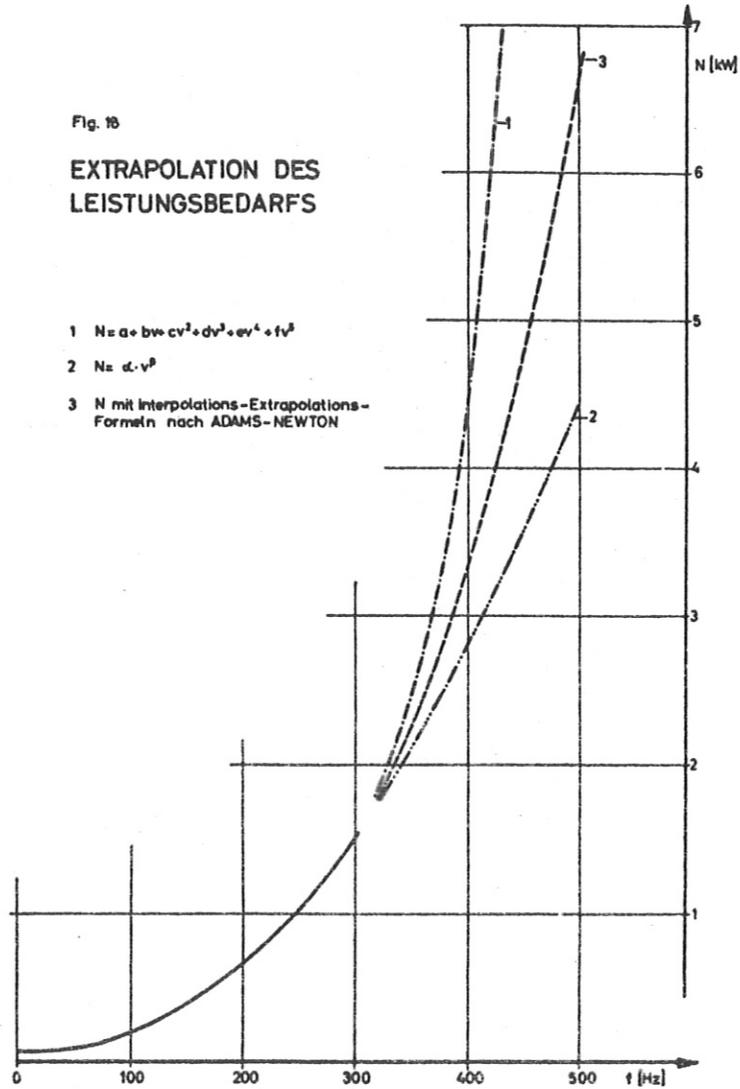


Fig. 18 Extrapolation

Um einen Überblick über die Frequenzen zu erhalten, die vom Antrieb her für diesen Spiegeltyp erreichbar scheinen, wurde der Leistungsbedarf extrapoliert. Verschiedene Verfahren ergeben so unterschiedliche Werte, dass schliesslich mit aller Sorgfalt das Interpolations-Extrapolationspolynom nach Adams-Newton benutzt wurde (Fig. 18). Legt man eine Leistungsgrenze von 6 bis 10 kW für Motoren des interessierenden Drehzahlbereiches zugrunde, so ergibt sich auf diese Weise die erreichbare Drehzahl zu ungefähr 30 000 Umdr/min $\hat{=}$ 500 Hz.

g) Die zur Synchronisation notwendige Triggerung (und die Frequenzmessung) konnte in einfacher Weise mit Hilfe eines induktiven Messkopfes der Firma Kirem GmbH, Frankfurt/Main vom Typ 480 realisiert werden. Wie Fig. 19 zeigt, trägt das eine Ende der Spiegelachse eine Aluminiumscheibe von 6 cm \varnothing , in die eine Stahlfolie eingeklebt ist, die beim Vorbeilaufen an der Tastkopfspitze in diesem einen Impuls erzeugt. Der Tastkopf kann an seinem Arm um die Achse geschwenkt werden und mit Hilfe einer 360° Skala auf spezielle Winkelstellungen des Spiegels beim Triggern eingestellt werden. Torsions- und andere Schwingungen des Achs-endes können zu einem erheblichen Jitter bei der Triggerung führen.

- F = Feststellschraube
- M = Skala (Einstell-
marke verdeckt)
- S = Stahlfolie
- T = Induktiver Tast-
kopf
- J = zum Impulsverstär-
ker

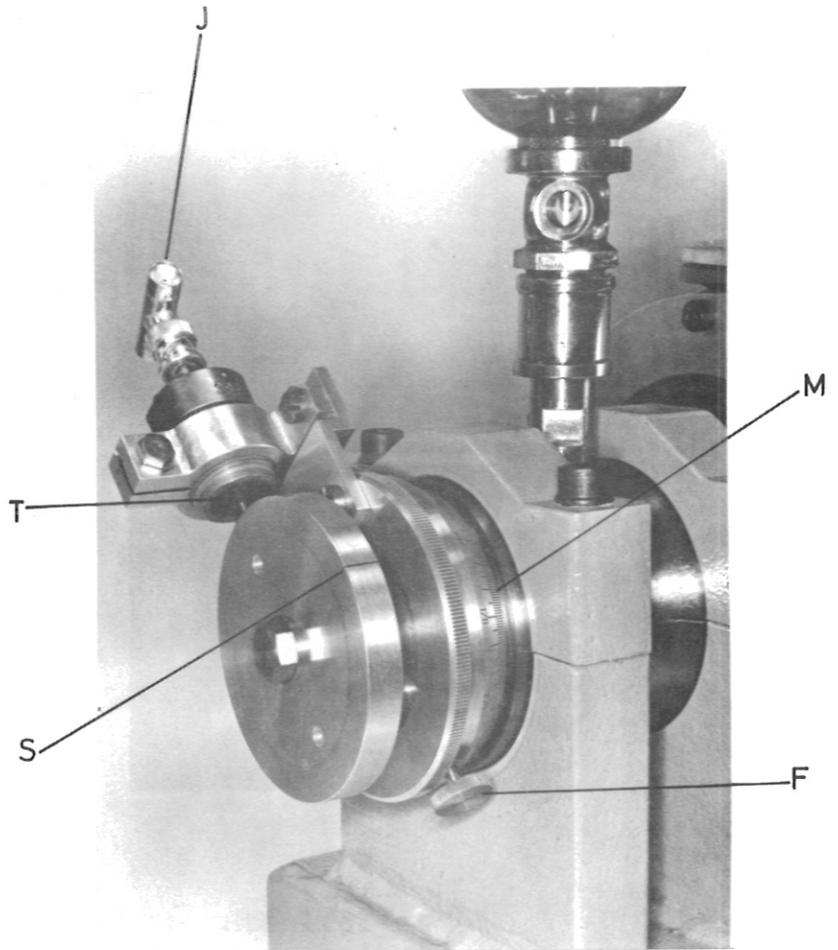
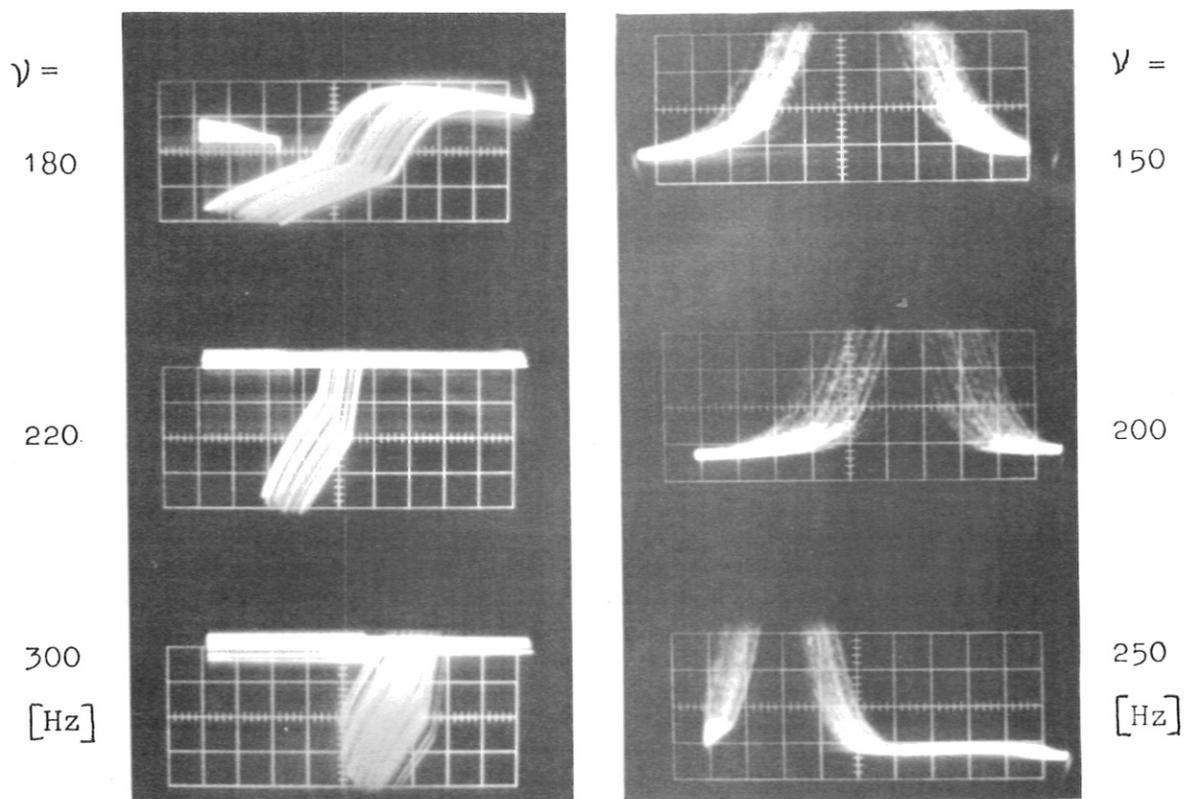


Fig. 19 Ur-Triggeranordnung mit induktivem Tastkopf

Zuerst wurde als Träger der Stahlfolie ein Aluminiumzylinder von 20 mm \varnothing und 50 mm Länge benutzt. Dabei traten Schwingungen auf, die einen Jitter von ca. 30 μ sec bewirkten. Der relativ grosse Durchmesser der dann benutzten Aluminiumscheibe gibt ihr einerseits eine genügend grosse Masse, um diese Schwingungen zu reduzieren, andererseits wird dadurch die Rotationsachse zur Hauptachse, so dass die Rotation stabilisiert wird. Der Jitter konnte auf diese Weise um den Faktor 10 reduziert werden. Fig. 20 a,b zeigen den Jitter in den beiden erwähnten Fällen.



a. Stahlfolie
in Aluzylinder
von 20 mm \varnothing und
50 mm Länge
10 μ sec/Teilung

b. Stahlfolie
in Aluscheibe
von 60 mm \varnothing und
10 mm Dicke
2 μ sec/Teilung

Fig. 20 Jitter der Triggerimpulse
Die Impulse triggern extern einen Oszillografen, mit dem das Multipliersignal vom Überlauf des Spaltbildes über eine bestimmte Stelle der Kassette registriert wird.

Die Form des "Ur"-Triggerimpulses ist in Fig. 21 wiedergegeben. Beim steilen Durchgang durch die Nulllinie wird ein Nadelimpuls erzeugt (Schaltung siehe Fig. 22), der nach weiterer Verstärkung die Entladung auslöst. In die Leitung vom Tastkopf zum Impuls-generator ist (Fig. 23) ein Schalter eingebaut, der erst beim Schließen dem darauf folgenden Impuls die Auslösung der Entladung gestattet, während unabhängig davon mit Hilfe eines Berkeley-Zählers die Frequenz angezeigt (und gedruckt) wird.

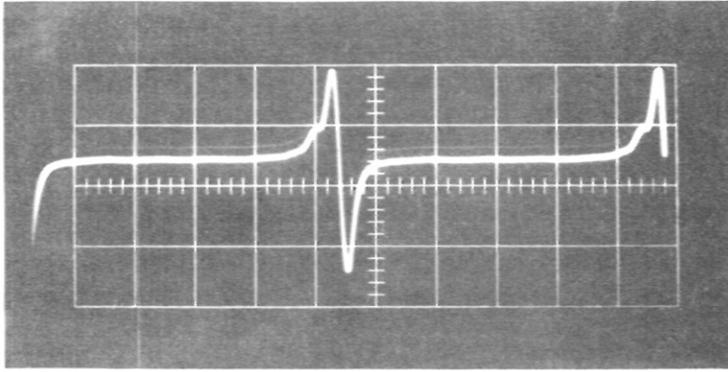


Fig. 21 "Ur"-Triggerimpulse
 1msec/cm
 1V/cm

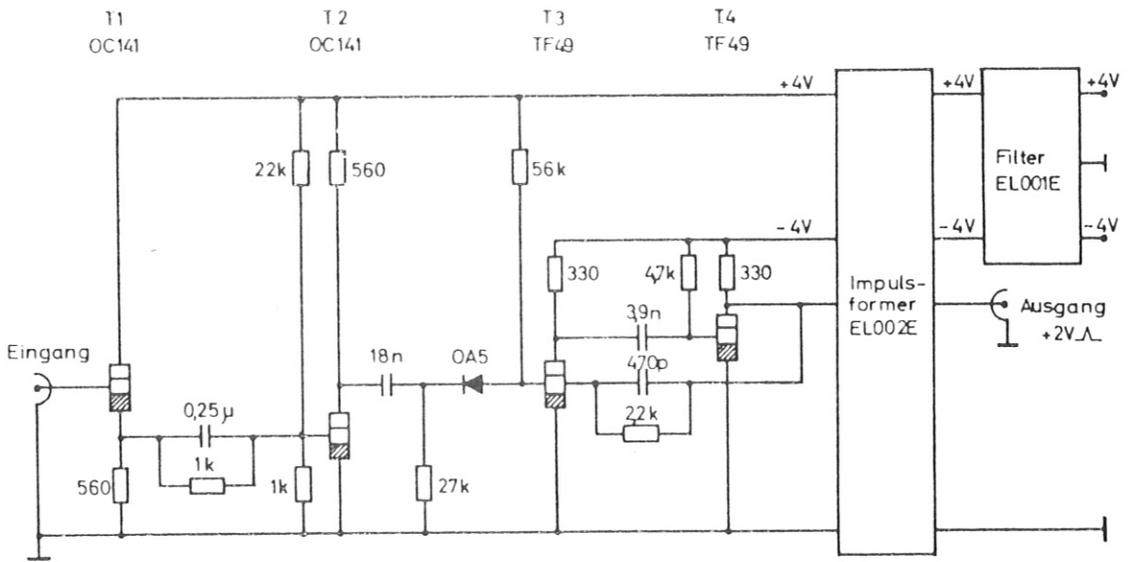


Fig. 22 Impulsformer für EL 005 E

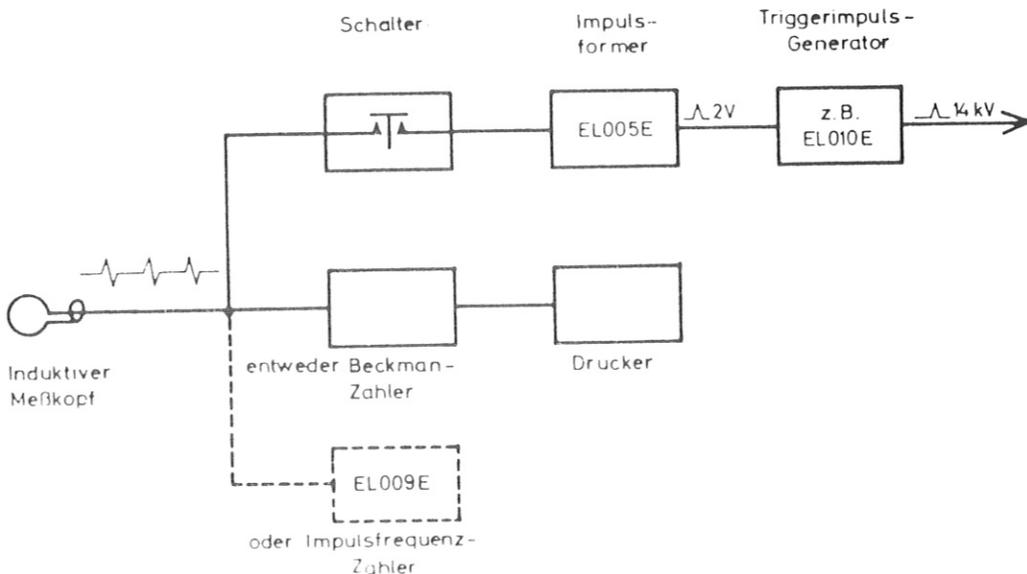


Fig. 23 Blockschaltbild für Triggerung und Frequenzmessung

Für Messungen mit geringeren Genauigkeitsansprüchen stehen einfachere Drehzahlzeiger zur Verfügung, die ebenfalls die Tastkopfsignale benutzen (Fig. 24).

Die Einstellung des Triggerzeitpunktes erfolgt zweckmässig mit Hilfe eines Multipliers hinter einem Spalt in der Kassettenöffnung, indem man Tastkopf- und Multipliersignal auf die beiden Strahlen eines Zweistrahloszillografen gibt. Mit zwei Spalten in definiertem Abstand geben die Multipliersignale gleichzeitig auch eine Möglichkeit, die Schreibgeschwindigkeit experimentell zu ermitteln.

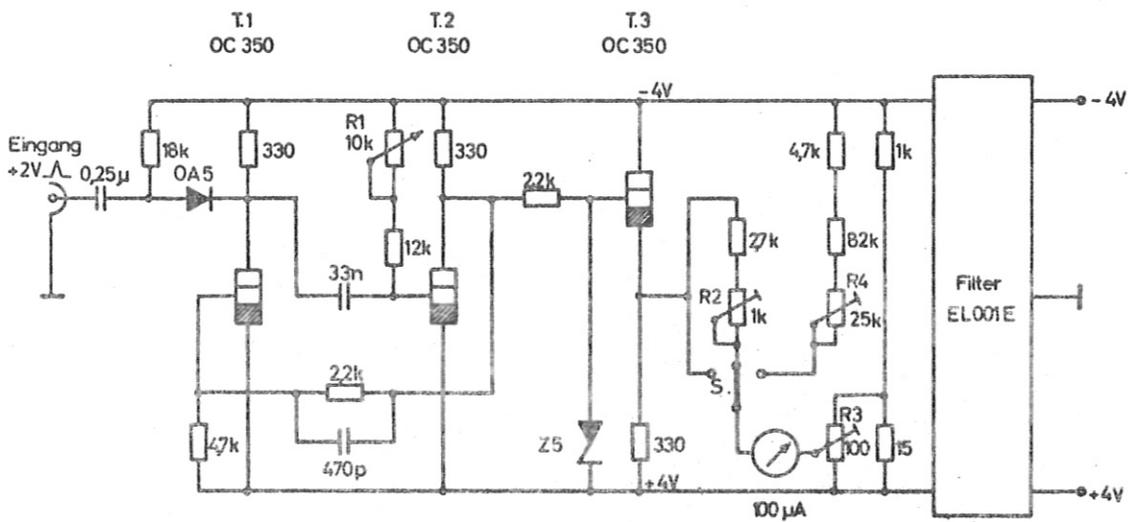


Fig. 24 Impuls-Frequenzzähler EL 009 E

h) Eine optische Triggeranordnung wurde an zwei Kameragehäusen vorgesehen. Wie in Fig. 25 zu sehen ist, trägt die eine Kamera-seite ein Lampengehäuse, das einerseits durch eine Spindel in der Höhe, andererseits durch eine Exzenterfassung seitlich verschoben werden kann. Auf der anderen Kameraseite befindet sich, ebenfalls mit einer Spindel verschiebbar eine Fassung für einen Fotowiderstand TP50.

Sowohl Lampe als auch Fotodiode befinden sich in der Brennebene der Kameraoptik, so dass das Bild der Wendel der Lampe bei richtiger Exzenterstellung über den Fotowiderstand gewischt wird. Dadurch wird ein Impuls erzeugt (Schaltung in Fig. 26) und nach weiterer Verstärkung zur Zündung der Entladung benutzt. Der Triggerzeitpunkt kann durch Drehen der Spindeln variiert werden. Da bei diesem Triggerprinzip die "Ur"-Impulse steiler sind und eventuelle Torsionsschwingungen der Spiegelachse nicht stören, bietet es gewisse Vorteile. Die Justierung von Lampe und Fotozelle ist aber verhältnismässig mühsam und gegen geringe Verrückungen der Kamera relativ zum Spiegel empfindlich. Praktisch genügte immer die "magnetische" Triggerung.

- L = Lampengehäuse
mit Exzenter
- F = Fassung für Foto-
zelle TP 50
- J = Justierspindeln
- S = Spalt
- K = Kassette

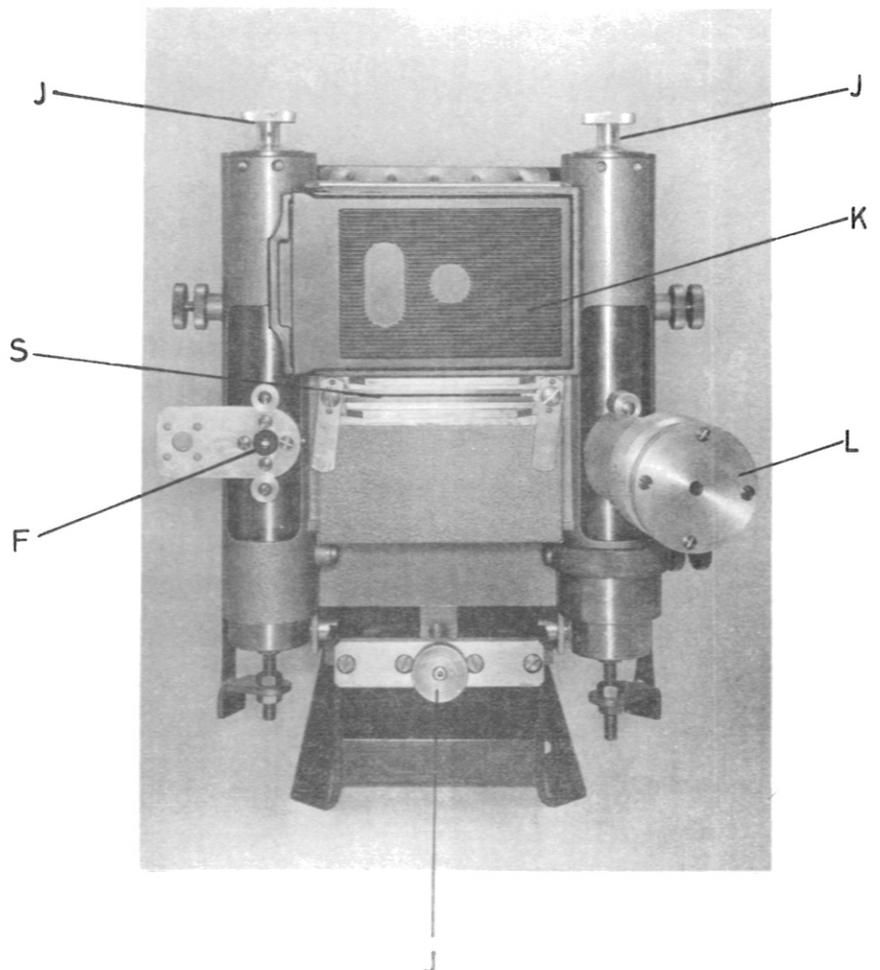


Fig. 25 Kamerarückseite

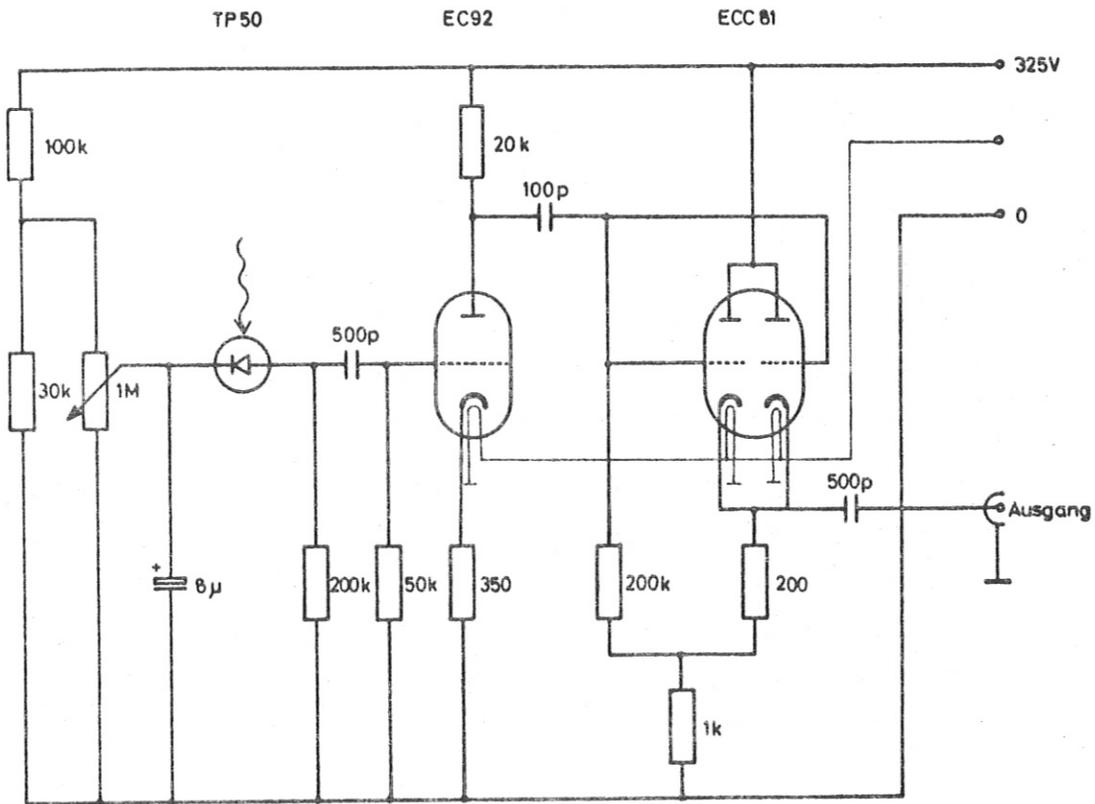


Fig. 26 Schaltung mit TP 50

1) "Precisespiegel": Unter diesem Namen wurde ein Drehspiegel gebaut, der auch zur Benutzung in Autokollimationskameras gedacht ist. Dabei wurden die speziellen Eigenschaften der "Precise"-Motoren ausgenutzt, die, als Zusatzgeräte zu Präzisionsfräsbänken gedacht, auch auf 1/100 mm genau bearbeitete Gehäuse aufweisen. Zu diesen Gehäusen gibt es dann auch entsprechend genaue Spannvorrichtungen.

Zwei Motoren, von denen der eine die der üblichen entgegengesetzte Drehrichtung besitzt (was im wesentlichen andere Gewinde in der Spannvorrichtung bedeutet), sind gegeneinandergerichtet auf eine Grundplatte montiert. In einer Nut dieser Platte können sie mit ihren Halterungen aufeinanderzugefahren und dann festgeschraubt werden. Mit ihren Spannvorrichtungen nehmen die Motoren direkt die Achsen des Drehspiegels aus Silberstahl auf.

Beide Motoren werden über denselben Regeltrafo hochgefahren und "teilen" sich automatisch in die Antriebsleistung. Ohne luftführendes Gehäuse wurden z.B. mit einem Spiegel von 8 cm Durchmesser bei einer Leistungsaufnahme von 600 W je Motor ohne Schwierigkeiten Drehzahlen von 36000 Umdr/min = 600 Hz erzielt.

Die Vorteile dieser Anordnung sind erheblich: Die Torsionsbeanspruchung der Drehspiegelachse ist auf ein Minimum reduziert, Lagerprobleme sind in den Motoren selbst gelöst, die Kupplung entfällt, komplizierte Bearbeitungsgänge werden eingespart, und die doppelte Antriebsleistung wird an den Spiegel herangebracht.

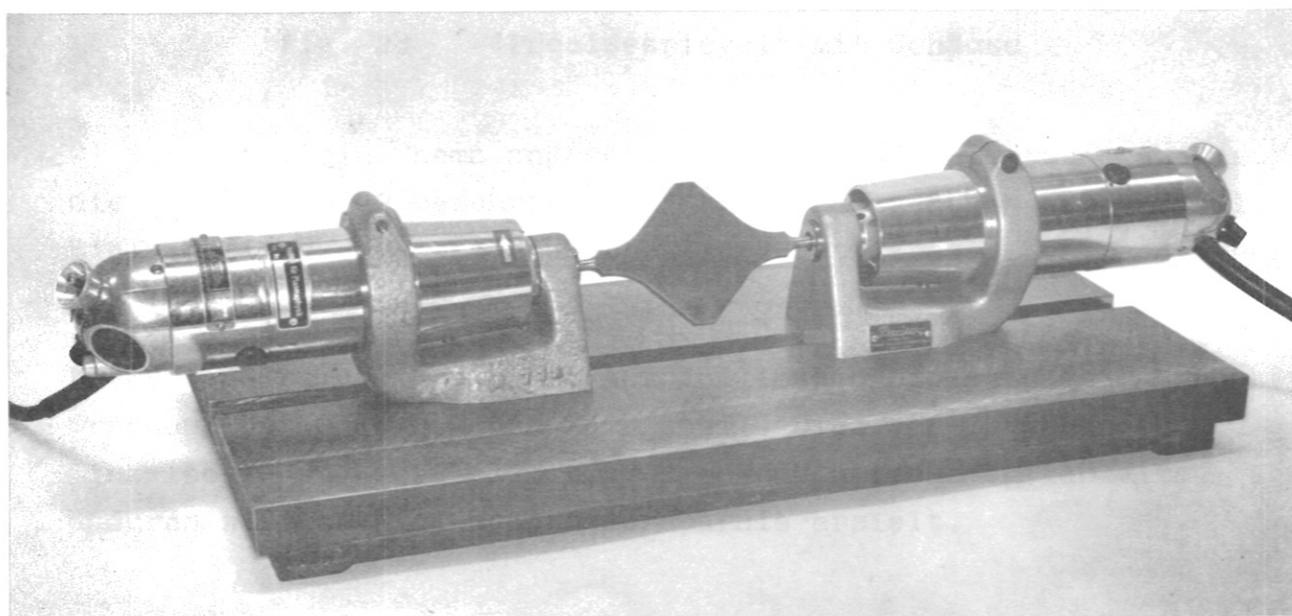


Fig. 27 "Precisespiegel" ohne Gehäuse

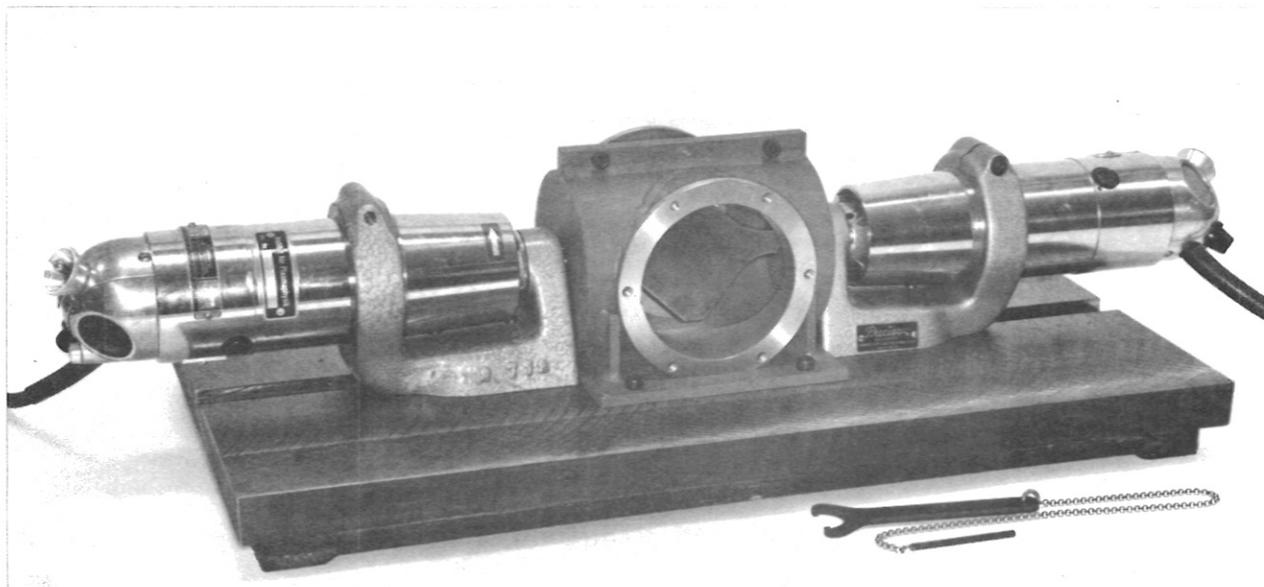


Fig. 28 "Precisespiegel" mit Gehäuse

k) Damit ist ein Thema angeschnitten, das abschliessend auch auf die in IV.1 und 2 beschriebenen Kameras ausgedehnt werden soll: Einfachheit des Baues, Sicherheit des Betriebes , Kosten der Herstellung.

Drehspiegelkameras nach dem Autokollimationsprinzip gestatten eine Trennung von Spiegel- und Kamerateil. Dies vereinfacht den Bau der Einzelteile und vervielfältigt die Kombinationsmöglichkeiten. Schon dadurch wird auch eine Kostenersparnis erzielt.

In der Kamera selbst wird dabei die Optik doppelt genützt und zwar mit ihrer maximalen Öffnung. Fast immer genügen im Kamerateil Optik, Spalt und Filmkassette. Alle drei Teile sind einzeln käuflich, evtl. auch ausserhalb der Kamera zu benutzen und mit einfachen Mitteln gegeneinander genau justierbar. Diese Justierung ist praktisch endgültig. Oft genügen Rasierklingen als Spaltbacken. Fast immer kann auf eine optische Triggeranordnung verzichtet werden. - An Materialkosten treten z.B. auf :

1 Telexenar 1:4,5 480 mm	1500.--
1 Zeiß-Spektrografenspalt	250.--
1 Rollfilmkassette	70.--
2 Plattenkassetten	40.--
1 Balg	30.--
	<hr/>
	1890.--

Dabei wurden für Spalt und Optik besondere Qualitäten gewählt.

Das Spiegelaggregat wird von einem einfachen, sicheren, billigen, leicht zu beschaffenden und auswechselbaren Universalmotor angetrieben. Bei Frequenzen bis 200 Hz genügt einfache Lagerung. Mit ihr auszukommen erscheint besonders erstrebenswert, da bessere Lagerung besonders qualifizierte Werkstätten voraussetzt oder auf andere Weise teuer wird. Reicht diese Drehzahl nicht aus, sollte das Lichtbündel über einen zweiten Spiegel gelenkt werden. Das ist wesentlich billiger als die bessere Lagerung. Ausserdem wird evtl. die Vakuumpumpe gespart. Bei niedrigeren Drehzahlen werden auch an die Fassung eines Glasspiegels geringere Anforderungen gestellt, ebenfalls an die Wuchtung. Selbst bei Drehzahlen von 150 Hz und Verdoppelung der Schreibgeschwindigkeit ergibt diese sich zu 1,8 mm/ μ sec, bei einer Spaltweite von 0,1 mm (noch mit Rasierklingen erreichbar) eine Zeitauflösung von ca. $5 \cdot 10^{-8}$ sec. - Hier treten an wesentlichen Materialkosten z.B. auf :

1 Elu Motor MoF 11	350.--
2 Lager	10.--
1 Drehspiegel	300.--
1 Regeltrafo 0-450 V	400.--
	<hr/>
	1060.--

Auch hier sind natürlich vor allem der Regeltrafo, aber auch der zweite Spiegel anderweitig ohne Schwierigkeit verwendbar.

Keinesfalls müssen für die Herstellungskosten der einfachen Ausführung der Autokollimationskamera mehr als 1000.-- DM veranschlagt werden. Ein Kauf handelsüblicher Geräte muss also im allgemeinen als verfehlt angesehen werden.

Es wäre ein Versäumnis, den Mitarbeitern der Instituts- und Abteilungswerkstatt nicht für ihre sorgfältige Arbeit, Frau Elsholz und Herrn Nett für ihre Hilfe bei der Zusammenstellung und Auswertung des Materials zu danken. Besondere Anerkennung gebührt aber den Herren Kaspar und Sebastian für Konstruktion und Erprobung der Drehspiegelkamas.

Anhang

A) Zur Schreibgeschwindigkeit

In III.4 wurde die Schreibgeschwindigkeit kurz diskutiert. Für den "Normaltyp" der Schmierkamera (Spiegel zwischen Optik und Film im Abstand d von der Optik) gilt für den Schreibarm ersichtlich

$$(A1) \quad \ell = b - d = f \cdot (m + 1) - d$$

Dass der Schreibarm der Kamera, in der die Optik zwischen Spiegel und Film angeordnet ist, die Länge

$$(A2) \quad \ell \approx (g - d) \cdot \frac{b}{g} = (g - d) \cdot m = f \cdot (m + 1) - d \cdot m$$

hat, ist nicht so einfach zu übersehen. Die Formel (A2) soll hier kurz hergeleitet werden.

Voraussetzungen:

L sei "dünne" Linse, in deren Ebene die Achse b liege. Die Drehspiegelachse stehe in A senkrecht auf der optischen Achse a , die selbst in O senkrecht auf b stehe. Die Achse des Spiegels D liege in seiner spiegelnden Fläche. D und L bilden die Lichtquelle Q ab. (Siehe Fig. A1)

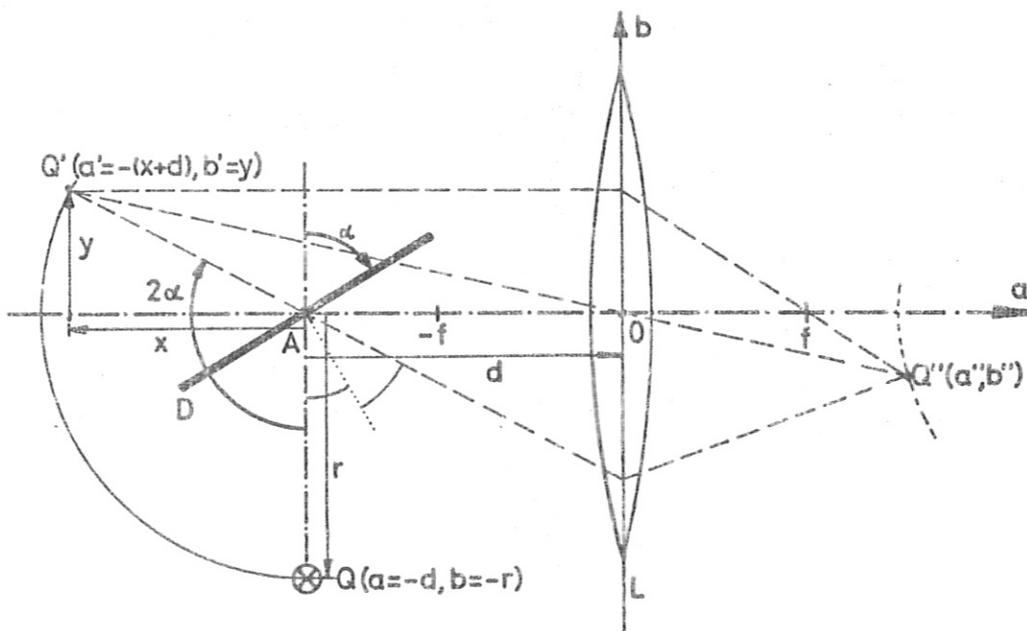


Fig. A 1

Dreht sich der Spiegel im (in Fig. A1) dargestellten Sinn von $\alpha=0^\circ$ nach $\alpha=90^\circ$, so wandert der virtuelle Punkt Q auf dem Halbkreis mit dem Radius r um A. Dreht sich D um den Winkel α , so wandert Q also um den Winkel 2α . Die Linse L bildet den virtuellen Gegenstand Q' ab. Dieser hat die Ortskoordinaten

$$(A3) \quad a' = - (d + r \cdot \sin 2\alpha) = - (d + x)$$

$$b' = - r \cdot \cos 2\alpha = y$$

und die Ortskoordinaten des Bildpunktes Q'', also a'' und b'', müssen aus den Abbildungsgleichungen

$$(A4) \quad b'' = \frac{a''}{a'} \cdot b'$$

$$b'' = \frac{b' \cdot f}{a' + f}$$

ermittelt werden. Es ergeben sich

$$(A5) \quad a'' = \frac{(d + r \cdot \sin 2\alpha) \cdot f}{(d + r \cdot \sin 2\alpha) - f}$$

$$b'' = \frac{r \cdot f \cdot \cos 2\alpha}{(d + r \cdot \sin 2\alpha) - f}$$

und nach einigen Umformungen für die Bahnkurve des Bildpunktes

$$(A6) \quad b'' = \mp \frac{1}{f} \cdot \sqrt{a''^2 \cdot [r^2 - (d-f)^2] - 2a'' \cdot f \cdot [r^2 - d(d-f)] + f^2(r^2 - d^2)}$$

Mit $\alpha=\omega t$ ergeben sich aus den Gleichungen (A5), die ja eine Parameterdarstellung der Bahnkurve sind, durch Differenzieren nach t die Geschwindigkeitskomponenten des Bildpunktes v_a'' und v_b'' .

$$(A7) \quad v_a'' = - \frac{f^2 \cdot r \cdot 2\omega \cdot \cos 2\omega t}{(d - f + r \cdot \sin 2\omega t)^2}$$

$$v_b'' = \frac{(f - d) \cdot r \cdot f \cdot 2\omega \cdot \sin 2\omega t - r^2 \cdot f \cdot 2\omega}{(d - f + r \cdot \sin 2\omega t)^2}$$

Daraus lässt sich die Bahngeschwindigkeit des Bildpunktes

$$(A8) \quad v''_S = \frac{2 \omega r f}{(d-f+r \sin 2\omega t)^2} \cdot \sqrt{(r+d \sin 2\omega t)^2 + f^2 + 2f(r-d \sin 2\omega t) \sin 2\omega t}$$

gewinnen.

In der Nähe des Grenzfalles $\alpha=45^\circ$, also in der Nähe der optischen Achse ergeben sich besonders einfache und übersichtliche Verhältnisse, denn für $\alpha=45^\circ$ sind

$$(A9) \quad a'' = \frac{f(d+r)}{d+r-f}$$

$$b'' = 0$$

An dieser Stelle ist damit

$$(A10) \quad v''_a = 0$$

$$v''_b = v''_S = \frac{2\omega \cdot f \cdot r}{f-d-r} = \frac{4\pi\nu \cdot f \cdot r}{f-d-r}$$

In der früheren Terminologie ist die Gegenstandsweite $g = d + r$ und die Bildweite b , so dass sich ergibt

$$(A11) \quad v''_S = 4\pi\nu \cdot \frac{f(g-d)}{f-g} = 4\pi\nu \cdot (g-d) \frac{b}{g}$$

Diese Formel gilt natürlich nur in einem genügend kleinen Bereich.

Läuft der Spiegel im parallelen Strahlengang einer Autokollimationskamera, so ist dafür $d = 0$ und $f = \frac{f^*}{2}$ (f ist die effektive Brennweite des Systems aus zwei Optiken der Brennweite f^*).

Damit gilt für Autokollimationskameras

$$(A12) \quad v''_S = 4\pi\nu \cdot b = 4\pi\nu \cdot 2f = 4\pi\nu f^*$$

B. Zur Festigkeit von Drehspiegeln

Die Festigkeit von Drehspiegeln war in III.9 behandelt worden. Unter anderem war für zwei bestimmte Fälle die Grenze für die Umfangsgeschwindigkeit angegeben worden, die die Spiegel erreichen dürfen.

Im folgenden ist kurz skizziert, wie sich diese Werte ergeben. Ferner sind einige weitere Belastungsfälle zusammengestellt, und schliesslich wird eine Spiegelform diskutiert, die in allen Querschnitten derselben Spannung unterliegt.

a) Der Spiegel unterliegt den Einwirkungen der Fliehkraft von der Form $K = M \cdot r \cdot \omega^2$. In der Achse wirkt die Kraft

$$(B1) \quad K = \omega^2 \int_0^R r dm = \omega^2 \rho \int_0^R r \cdot F(r) \cdot dr = \omega^2 \cdot \rho \cdot d \int_0^R r \cdot \ell(r) \cdot dr$$

worin ρ die Dichte

ω die Kreisfrequenz

r der Radius

d die Dicke

$F(r)$ die Querschnittsfläche in Schnitten parallel zur Achse

$\ell(r)$ die Länge dieser Querschnittsflächen

R der Aussenradius des Spiegels

sind.

Für die Zugspannungen im Material gilt dann in erster Näherung

$$(B2) \quad \sigma(r) = \frac{K(r)}{F(r)} = \frac{\omega^2 \cdot \rho}{\ell(r)} \int_r^R r \cdot \ell(r) \cdot dr$$

und

$$(B2') \quad \sigma(0) = \frac{\omega^2 \rho}{\ell(0)} \int_0^R r \cdot \ell(r) dr$$

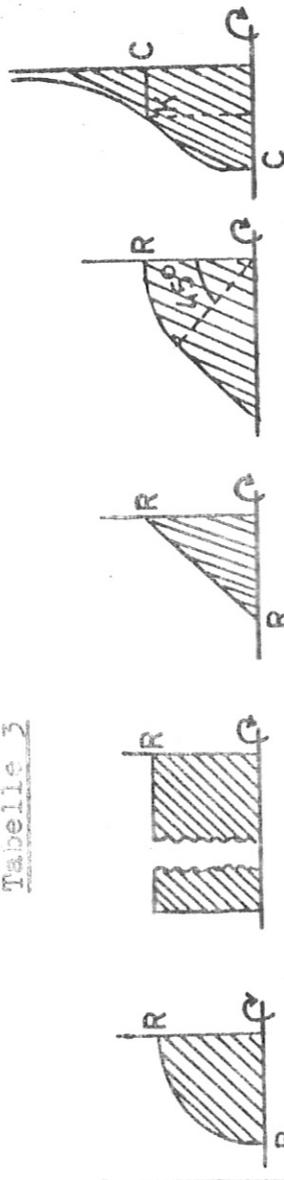
Wegen $\omega \cdot R = v$ ist

$$(B3) \quad v = \sqrt{\omega^2 \cdot R^2} = \sqrt{\frac{\ell(0) \cdot \sigma(0) \cdot R^2}{\rho \cdot \int_0^R r \cdot \ell(r) \cdot dr}}$$

Darin ist $\sigma(o)$ eingesetzt, weil im allgemeinen die grössten Spannungen in der Achse auftreten werden. Wird für $\sigma(o)$ der Wert " $\sigma_{0,1}$ " des gewählten Materials eingesetzt, so ergibt sich die Grenzggeschwindigkeit, die nicht überschritten werden darf.

b) Für einige Spezialformen seien hier Werte zusammengestellt:

Tabelle 3

Spiegelform		Kreisförmig Rechteckig Quadratisch Kreisförmig	mit Ansatz umDiagonale	Glockenkurve	
Spannung in der Achse: $\sigma_o =$	$\frac{\rho_w^2 R^2}{3}$	$\frac{\rho_w^2 R^2}{2}$	$\frac{\rho_w^2 R^2}{6}$	$\frac{\rho_w^2 R^2}{4}$	$\frac{\rho_w^2 c^2}{2 \cdot \ln(\frac{c}{R})}$
Winkelgeschw. für Spannung " σ " in der Achse: $w =$	$\sqrt{\frac{3 \sigma}{\rho \cdot R^2}}$	$\sqrt{\frac{2 \sigma}{\rho \cdot R^2}}$	$\sqrt{\frac{6 \sigma}{\rho \cdot R^2}}$	$\sqrt{\frac{4 \sigma}{\rho \cdot R^2}}$	$\sqrt{\frac{2 \sigma}{\rho \cdot c^2} \ln(\frac{c}{R})}$
Maximal zulässige Umfangsgeschw. für " $\sigma_{0,1}$ ": $v_{max} =$	$\sqrt{\frac{3 \sigma}{\rho}}$	$\sqrt{\frac{2 \sigma}{\rho}}$	$\sqrt{\frac{6 \sigma}{\rho}}$	$\sqrt{\frac{4 \sigma}{\rho}}$	$\sqrt{\frac{2 \sigma}{\rho} \ln(\frac{c}{R})}$ an der Stelle $r = c$

c) Interessant ist auch der Fall, bei dem die Spannung im Drehspiegel in allen Zonen gleich ist. Für diesen Fall sind die geringsten Verformungen zu erwarten.

Die Bedingung lautet dann

$$(B4) \quad \sigma(r) = \sigma = \frac{\omega^2 \rho}{\ell(r)} \left[\int_0^R r \cdot \ell(r) dr - \int_0^r r \cdot \ell(r) dr \right],$$

woraus sich sofort

$$(B5) \quad \ell(r) = \frac{\omega^2 \rho}{\sigma} \left[\int_0^R r \cdot \ell(r) dr - \int_0^r r \cdot \ell(r) dr \right]$$

ergibt. Differentiation führt zu

$$(B6) \quad \frac{d}{dr}(\ell(r)) = \frac{\omega^2 \rho}{\sigma} \cdot r \cdot \ell(r)$$

Dies ist eine lineare homogene Differentialgleichung 1. Ordnung für ℓ als Funktion von r mit der Lösung

$$(B7) \quad \ell(r) = c \cdot e^{-\frac{\omega^2 \rho r^2}{2\sigma}}$$

Nun kann ersichtlich für einen endlichen Aussenradius des Spiegels die Bedingung $\sigma = \text{const.}$ nicht erfüllt werden. Es muss also gefordert werden $R = \infty$. Andererseits muss zur Erzwingung von $\sigma = \text{const.}$ dann $\ell(r)$ in geeigneter Weise gegen 0 gehen.

Diese Bedingungen werden von der Lösung erfüllt. Für $r = 0$ ist $\ell(0) = c$. Die Konstante c gibt also die Länge des Spiegels in der Achse an. Die Funktion

$$(B7') \quad \ell(r) = c \cdot e^{-(ar)^2} \quad \text{mit } a = \sqrt{\frac{\omega^2 \rho}{2\sigma}}$$

stellt eine Kurve ähnlich der Gaußschen Glockenkurve dar.

Die Kurve hat die Form der in Fig. B1 dick eingezeichneten Linie.

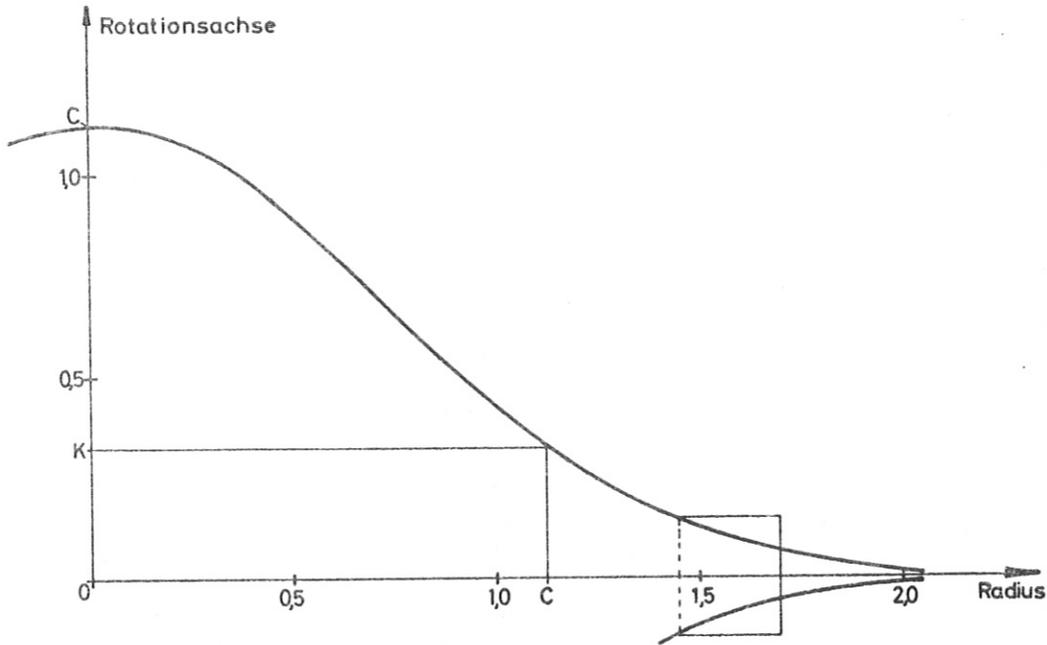


Fig. B1 Drehspiegelform mit $\sigma = \text{const.}$

Die Funktion konvergiert um so schneller gegen Null, je grösser $a = \sqrt{\frac{\omega^2 \rho}{2 \sigma}}$ ist. Sie hat ein Maximum mit den Koordinaten ($l=c, r=0$) und einen Wendepunkt mit den Koordinaten ($l = \frac{c}{\sqrt{e}}, r = (\pm) \frac{1}{\sqrt{\frac{\omega^2 \rho}{\sigma}}}$). Steigung der Wendetangente ist $\text{tg } \varphi = (\mp) \sqrt{\frac{\omega^2 \rho}{\sigma \cdot e}}$.

Die Form des Spiegels kann nun z.B. dadurch festgelegt werden, dass ausser $l(0) = c$ noch $l(R) = l(c) = K$ vorgegeben wird. Dann bestimmen c und K die Form des Spiegels. Damit ergibt sich die erlaubte Kreisfrequenz

$$(B8) \quad \omega = \sqrt{\frac{2\sigma_{0,1}}{\rho c^2} \ln\left(\frac{c}{K}\right)}$$

oder die maximale Geschwindigkeit am Umfang

$$(B9) \quad v_{\max} = \sqrt{\frac{2\sigma_{0,1}}{\rho} \ln\left(\frac{c}{K}\right)}$$

oder die nötige Zugfestigkeit

$$(B10) \quad \sigma = \frac{\omega^2 \rho c^2}{2(\ln c - \ln K)}$$

Nach Voraussetzung soll der Spiegel in jedem Schnitt im Abstand r von der Achse die Zugspannung σ aufweisen. Er darf deshalb nicht ohne weiteres (z.B. im Abstand c) abgeschnitten werden. Es lässt sich aber auch für Spiegel mit endlichem R erreichen, dass die Zugspannung im engeren Bereich (z.B. bis c) konstant bleibt und erst zwischen c und R auf Null sinkt. Dazu muss der Spiegel von der Stelle c an zweckmässig (als Rechteck) fortgesetzt werden. Die Bedingung für die Grösse einer solchen rechteckigen Fortsetzung (siehe hierzu auch Fig. B1) ergibt sich aus der Gleichung für die Kraft, die im Abstand c von der Achse zieht:

$$(B11) \quad K_c = \omega^2 \cdot \rho \cdot d \cdot \int_c^R \ell(r) \cdot r \cdot dr = \omega^2 \cdot \rho \cdot d \cdot \int_c^R K \cdot r \cdot dr = \frac{\omega^2 \cdot \rho \cdot d \cdot K}{2} (R^2 - c^2)$$

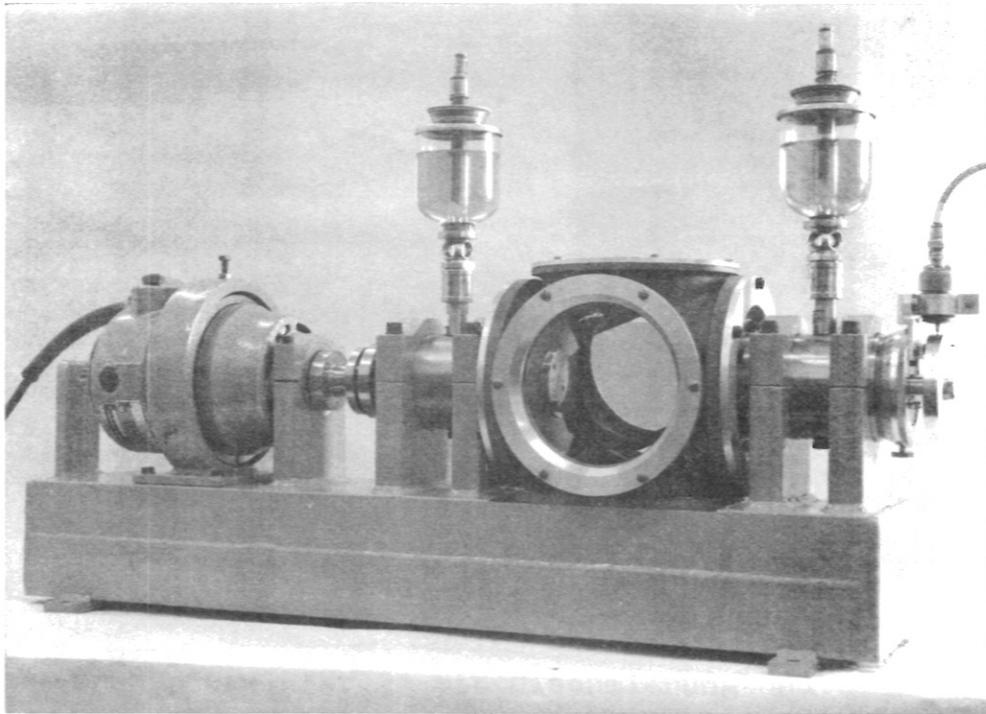
Damit wird

$$(B12) \quad \sigma = \frac{\omega^2 \rho}{2} (R^2 - c^2) \quad \text{und}$$

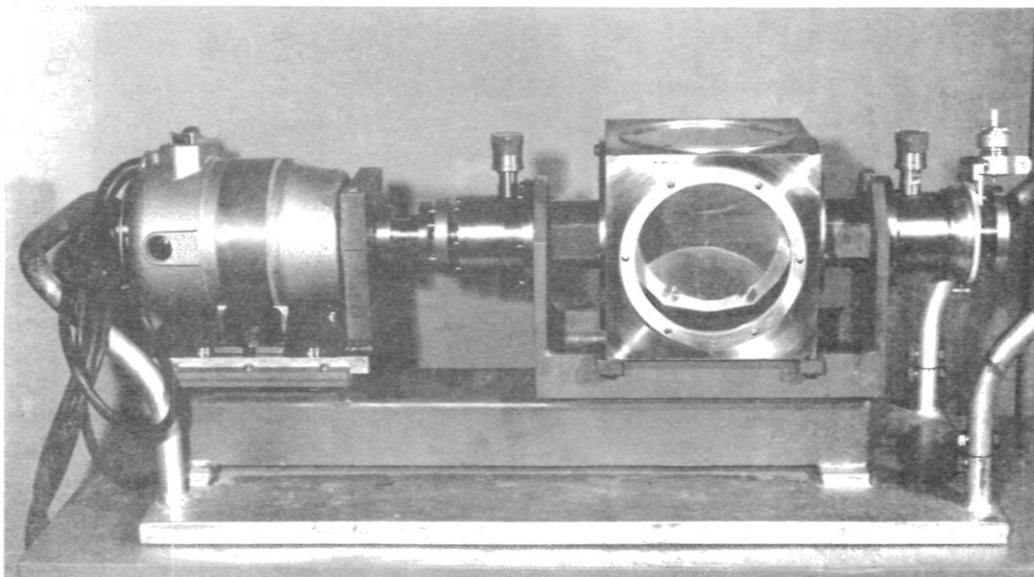
$$R = \sqrt{\frac{2\sigma}{\omega^2 \rho} + c^2}$$

Die Kompensation des abgeschnittenen Stückes garantiert die Konstanz der Spannung innerhalb von c unabhängig von der Frequenz.

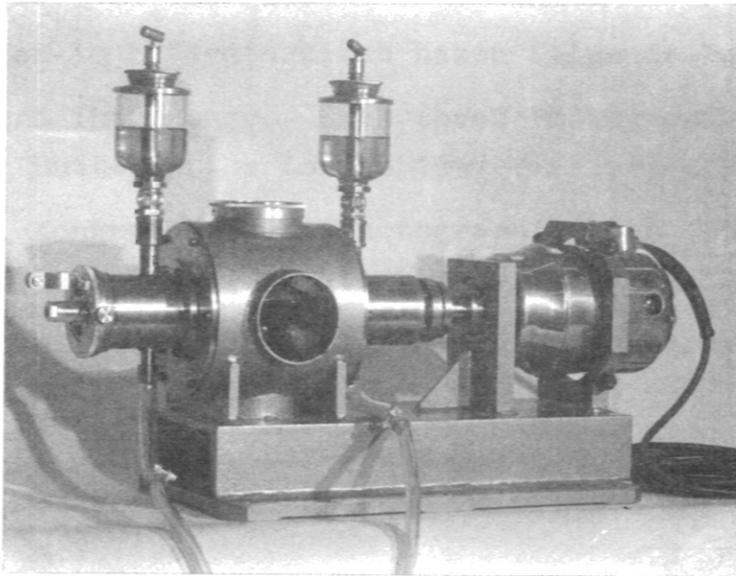
Bilder einiger Drehspiegelanordnungen



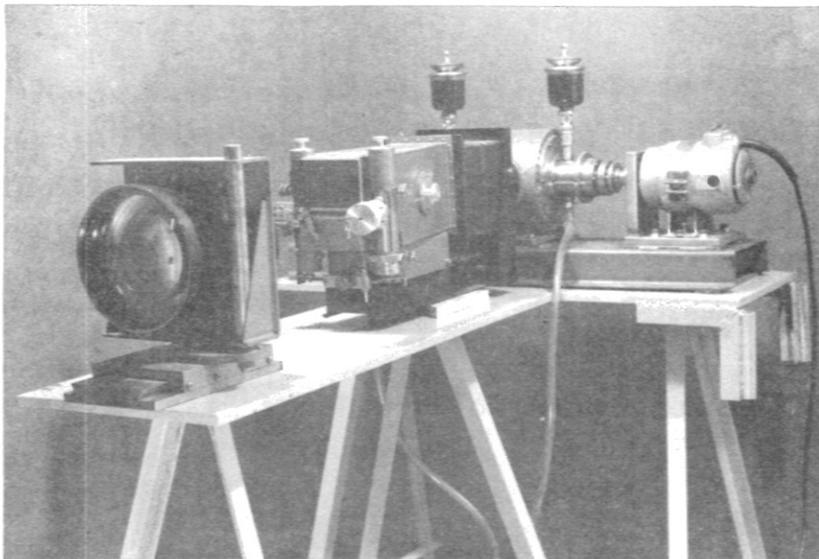
C1 Drehspiegel "Nr.5" mit Olschmierung u. "Turbinen"
Lagerböcke auf Bohrwerk gebohrt



C2 Drehspiegel "Nr.4" mit Fettschmierung u. "Turbinen"
Motor in Winkelhalterung justiert



C3 Drehspiegel "Nr.2" mit Olschmierung und abgesaugten Lagern. Lagerböcke auf Bohrwerk gebohrt.



C4 Drehspiegelkamera mit Spiegelaggregat, Kamerarückteil und Objektiv auf getrennten, gummigefederten Montagetischen aufgebaut.

Literatur

Vorbemerkungen:

Römische Zahlen im Literaturzitat haben folgende Bedeutung

III = Proc. 3rd Int. Congr. High speed Photography 1956

Verlag: Butterworths London 1957

IV = 4. Int. Kongreß Kurzzeitphotographie Köln 1958

Verlag: O. Helwich Darmstadt 1959

V = Proc. 5th Int. Congr. High speed Photography

Washington DC USA Okt. 1960

Edited by J.S. Courtney-Pratt

Society of Motion Picture and Television Engineers

(SMPTE) N.Y. 1962

VI = High speed Photography

(6. Kongreß Scheveningen 1962)

Herausgegeben von J.G.A. de Graaf und P. Tegelaer

Verlag: H.P. Tjeenk Willink u. Zoon N.V. Haarlem

- [1] H. Edels, D. Whittaker
The Theory and Design of Rotating Mirror Cameras
J. Sci. Instr. 32 (1955) 103 - 107
- [2] W. Payman, W.C.F. Sheperd, D.W. Woodhead
Safety in Mines Research Board Paper No 99 (1937)
(H.M. Stationery Office)
- [3] N.M. Gegechkori
J. Exp. Theor. Phys. USSR 21 (1951) 493
- [4] K.R. Coleman
Some Problems in the Design of Lenses for High-Speed Photography
IV 81 - 84
- [5] B. Brixner
Measurement and Correction of Astigmatic Images in
Rotating-Mirror Sweeping-Image Cameras
III 319 - 323

- [6] J. Castle, W. Woodbury, W.A. Shelton
Reciprocity-Law, Failure at Very Short Exposure Times
III 219 - 224
- [7] R.J. North, N.A. North
Test, to determine the suitability of various commercially
available emulsions for photography of high-speed airflow
with short-duration spark light sources
III 204 - 210
- [8] Freundliche Mitteilung der Agfa-AG Leverkusen
Über die Empfindlichkeit photographischen Aufnahmematerials
- [9] B. Brixner
A Simple Sweeping-Image Camera (Chronograph) with 10^{-8} sec
Time-Resolution
III 289 - 293
- [10] M. Nagel
Restausgleichsunschärfe und nutzbares Bildfeld beim opti-
schen Ausgleich mit ebenen Drehspiegeln
Optik 3 (1948) 541-554
- [11] A.S. Dubowik
Theoretische Untersuchungen über Mehrfachreflexionen an
Drehspiegeln
IV 182 - 188
- [12] E. Djurle, A. Bäck
Some Measurements of the Effect of Air Turbulence on Photo-
graphic Images
J. Opt. Soc. Am. 51 (1961) 1029 - 1030
- [13] Private Mitteilung aus der Firma
Beckman u. Witley, San Carlos, Californien
- [14] H. Schardin
The Relationship Between Maximum Frame-Frequency and Reso-
lution in Rotating Mirror Framing Cameras
III 316 - 318
- [15] A. Skinner
A Versatile Rotating Mirror Camera
IV 172 - 176

- [16] M. McChesney, M. Coltman
The Design and Construction of a Rotating Mirror
Smear-Camera for Arc-Discharge Studies
J.Sci.Instr. 39 (1962) 344 - 348
- [17] Freundliche Mitteilung von
Prof. Dr. H. Köhler in Fa. Carl Zeiß Oberkochen
- [18] A.E. Huston
Magnetically Suspended High-Speed Rotors
III 294 - 299
- [19] A.E. Huston
Some Developments in Rotating Mirror Cameras
IV 163 - 166
- [20] Freundliche Mitteilung von
Prof. Dr. C. Vogelpohl
MPI für Strömungsforschung , Abt. Reibungsforschung
Göttingen
- [21] R. Remy, H. Schubäck, W. Spensberger
Entwicklung einer 2-KHz-Drehspiegelcamera
MPI/PA - 7 (1963)
- [22] Deformation of Rotating Mirrors from Centrifugal Forces
J.Opt.Soc.Am. 46 (1956) 1090
- [23] Rotating Mirror Smearcamera and Elastic Distortion and
Time Resolution
J.Opt.Soc.Am. 48 (1958) 365
- [24] P.R. Smy, J.H. Turner, D. Stonebridge
An Unexpensive Rotating Mirror Smearcamera
J.Sci.Instr. 39 (1962) 309 - 311
- [25] A. Skinner (AWRE Aldermaston)
New Development at Aldermaston in the Rotating Mirror
Camera Field
VI 45 - 51

- [26] A. Skinner
Versatile high speed rotating mirror cameras
J.Sci.Instr. 39 (1962) 336 - 343
- [27] Schnirman et al (Akad. Nauk Moskau UdSSR)
Superhochgeschwindige wartende Zeitlupe LW1
VI 107 - 114
- [28] C.H. Bagley
Application of a Simultaneously Recording
Streak- and Framing-Camera
VI 84 - 92
- [29] Boys
On the Electric Spark Photography
Nature 47 (1893) 413 - 421
- [30] B. Brixner
An Improved f/10 Sweeping Image Camera
SMPTE 69 (1960) 109 - 112
- [31] B. Brixner
The Improved f/10 Sweeping Image Camera
SMPTE 70 (1961) 180 - 188
- [32] J.K. Crosby
Reciprocity Failure of Photographic Films
at Very Short Exposure Times
VI 378 - 382
- [33] W.B. Farrand
The Absolute Energy Calibration of Photographic Film
VI 383 - 387
- [34] A.S. Dubowik, A.B. Granigg
Über die Bestimmung der Lage des Mittelpunktes
der Bildabtastung und über die Unregelmäßigkeit der
Aufnahmefrequenz in Zeitlupen mit einer Bildumschaltung
VI 290 - 300
- [35] J.M. Kelly
General Equations for Writing Rates of Streak Cameras
VI 72 - 83

- ³⁷
[36] B. Brixner
High Speed Turbine Driven Rotating Mirror
Rev.Sci.Instr. 30 (1959) 1041 - 1048
- ³⁸
[37] W.E. Buck
A High-Speed Rotating Mirror with Greater
Dynamic Resolution
V 318
- ³⁹
[38] J.N. Mack
"Miscellaneous Physical and Chemical Techniques
of the Los Alamos Project". Volume 3 Chapter 6:
"Optical Methods and Instruments"
McGraw-Hill 1952
- ⁴⁰
[39] E.B. Turner
Description of the Revolving Mirror Streak Camera
Built by the Aeronautical Research Laboratory
ARL - 7 - 40 Sept. 30, 1957
- ⁴¹
[40] F.L. Brauer, D.F. Hansen
f/2,9 Streak Camera
J.Opt.Soc.Am. 49 (1959) 421 - 424
- ⁴²
[41] K.B. Earnshaw, C.M. Benedict
An Ultra-High Speed Image Dissectiory Camera
for Photographing Strong Shock Waves
NBS Rept. 7228 15/3/62
- ⁴³
[42] Preprint:
J.K. Landré (B+W)
Time Resolution of Streak Cameras
Equipped with Rotating Mirrors Made out of Beryllium
- ⁴⁴
[43] J.H. Waddell
Design Considerations for Rotating-Prism Cameras
V 367
- ⁴⁵
[44] T. Anderson
Model 200 Reflecting-Optics Sweep Camera
V 319 - 321

- [⁴⁶
45] E.H. Dudgeon
Streak-Camera Development at the
National Research Council
V 303 - 308
- [⁴⁷
46] F.H. Perrin
What is the Sensitivity of a Photographic System
V 417 - 423
- [⁴⁸
47] H. Sauvenier
Reasons for the Reciprocity Failure at
Very Short Exposure Times
V 72 - 75
- [⁴⁹
48] Z. Pressman
A Comparison of High Speed Photographic Films
with Different Vigorous Development Conditions
V 80 - 86
- [⁵⁰
49] A.S. Dubovik
Some Problems of Mirror Scanning Theory for Inclined Mirrors
and Inclined Light Beams
V 91 - 93
- [⁵¹
50] J. Dyron, R.F. Hemmings, R.T. Waters
An f/1 Streak Camera for Spark Studies in
Both Ultraviolet and Visible
V 297 - 302
- [⁵²
51] T.E. Holland
Study of Resolution Limits in High -Speed
Framing Cameras
V 430 - 437
- [⁵³
52] M. Sultanoff
Some Philosophical Aspects of High Speed
Photografic Instrumentation

Außerdem sei noch auf folgende Darstellungen verwiesen:

- a) P. Naslin et J. Vivie
Photographie et Cinématographie Ultra Rapides
(2. Congrès International de Photographie et
Cinématographie Ultra Rapides Paris Sept. 1954)
Verlag Dunod Paris 1956
- b) High Speed Photography
(1. Int. Congr. High-Speed Photography
Washington 1952)
Verlag J SMPTE NY.1954
- c) P. Naslin, P. Fayolle
Photographie Instantanée et Cinématographie
Ultra-Rapide
Éditions de la Revue d'Optique Paris 1950
- d) G.A. Jones
High Speed Photography
Chapman + Hall Ltd. London 1952
- e) W.D. Chesterman
The Photographic Study of Rapid Events
Claredon Press Oxford 1951
- f) W.G. Hyzer
Engineering and Scientific
High-Speed Photography
Macmillan Comp. NY. 1962

Figuren

	Seite
1. Prinzipieller Aufbau einer Drehspiegelkamera	3
2. Brennweiten und Öffnungen von Optiken	7
3. a,b) Zur Vignettierung	11
4. Vignettierungsbeispiel	13
5. Zur Schreibgeschwindigkeit, Optik zwischen Spiegel und Film	15
6. Dicker Spiegel	19
7. Drehzahl und Leistung von Motoren	27
8. Lager	27
9. Spalt	34
10. Kameraoptik und Kameragehäuse	35
11. Verbesserter Kamerateil	36
12. Motorhalterung	37
13. Drehspiegelgehäuse	39
14. Lagerbock	41
15. Spiegelfassung	43
16. Titanspiegel	44
17. Leistung als Funktion der Drehzahl	45
18. Extrapolation des Leistungsbedarfs	46
19. Ur-Triggeranordnung mit induktivem Tastkopf	48
20. Jitter der Triggerimpulse	49
21. Ur-Triggerimpulse	50
22. Impulsformer für EL 005 E	50
23. Blockschaltbild für Triggerung und Frequenz- messung	50
24. Impuls-Frequenzzähler EL 009 E	51
25. Kamerarückseite	52
26. Schaltung mit TP 50	53
27. Precisespiegel ohne Gehäuse	54
28. Precisespiegel mit Gehäuse	55
A1 Schreibarm einer Schmierkamera (Optik zwischen Spiegel und Film)	58
B1 Drehspiegelform mit $\sigma = \text{const}$	64
C1-C4 Drehspiegelfotos	66

Tabellen

Seite

1.	Brennweiten, Durchmesser, Öffnungen von Objektiven ...	8
2.	Leistung und Drehzahl von E-Motoren	28
3.	Zugspannung und maximale Umfangsgeschwindigkeit für verschiedene Spiegelformen	62