Zeitschrift: Technische Mitteilungen / Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafenbetriebe = Bulletin technique / Entreprise des postes, téléphones et télégraphes suisses = Bollettino tecnico / Azienda delle poste, dei telefoni e dei telegrafi svizzeri

Herausgeber: Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafenbetriebe

Band: 32 (1954)

Heft: 1

Artikel: Ein neues Verfahren zur Fernsehabtastung von Filmen

Autor: Stutz, Theo

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-874455

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 12.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Nº 1 - BERN, 1. I. 1954 - JAHRGANG - ANNÉE - ANNO XXXII

TECHNISCHE MITTEILUNGEN

BULLETIN TECHNIQUE

PTT

BOLLETTINO TECNICO

Herausgegeben von der Schweizerischen Post-, Telegraphen- und Telephonverwaltung. Publié par l'administration des postes, télégraphes et téléphones suisses. Pubblicato dall'amministrazione delle poste, dei telegrafi e dei telefoni svizzeri

Ein neues Verfahren zur Fernsehabtastung von Filmen

Von *Theo Stutz*, Zürich

621.397.5:778.53

Zusammenfassung. *Bei der Fernsehübertragung von Kinofilmen treten Probleme auf, die sich bei der Wiedergabe von Diapositiven oder bei der Direktaufnahme mit einer Kamera nicht stellen. Diese werden in ihrer Abhängigkeit von den gewählten Film- und Fernsehnormen dargestellt und die verschiedenen möglichen Kombinationen von Filmwiedergabe- und Fernsehaufnahme-Verfahren kritisch miteinander verglichen. Nach Ansicht des Verfassers wäre die Filmwiedergabe mit optischem Ausgleich der Filmbewegung am vorteilhaftesten und wird nur deshalb selten verwendet, weil bis jetzt keine einfache und doch leistungsfähige Anordnung zur Durchführung des optischen Ausgleichs bekannt war.*

Die in dieser Arbeit entwickelte Lösung ermöglicht den Bau eines relativ einfachen und qualitativ hochwertigen Filmabtasters, was auch durch die günstigen Betriebserfahrungen mit dem vom Institut für technische Physik an der ETH für die PTT-Verwaltung gebauten Prototyp eines Schmalfilmabtasters bestätigt wird.

Résumé. *La transmission de films cinématographiques en télévision fait surgir des problèmes que ne posent pas la transmission de diapositives ou la prise de vues directe au moyen d'une caméra. L'auteur expose l'incidence des normes de films et de télévision choisies sur ces problèmes et compare entre elles les diverses possibilités de combiner les procédés de projection de films et de prises de vues de télévision. A son avis, la projection du film avec compensation optique de sa progression serait la plus avantageuse. Si elle n'est utilisée que rarement, c'est uniquement parce qu'on ne connaissait pas jusqu'à ce jour un procédé simple et cependant efficace d'obtenir cette compensation.*

La solution présentée permet de construire un explorateur de films relativement simple et de bonne qualité, ce que confirment aussi les bonnes expériences faites dans la pratique avec le prototype construit pour l'administration des PTT par l'institut de physique technique de l'Ecole polytechnique fédérale de Zurich.

Das Institut für technische Physik der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH), an dem die vorliegende Arbeit entstand, befasst sich schon lange mit Problemen der Fernsehtechnik. Wohl am bekanntesten wurde die Entwicklung des «Eidophor»-Grossprojektionsverfahrens, das inzwischen zur kommerziellen Verwertung der Privatindustrie übergeben werden konnte. Die für Versuche und Demonstrationen verwendeten Bildquellen hatten immer höheren Anforderungen zu genügen, und daher baute sich das Institut für technische Physik folgende Filmabtaster:

einen mechanischen Bildzerleger für Film- und Personenabtastung mit optischem Differential (1938) [1]*);

einen Filmabtaster mit *Farnsworth*röhre (1948) [2];

einen Filmabtaster mit Superikonoskopröhre (1948);

einen Leuchtpunktabtaster mit *Mechau*projektor (1950).

*) Die Zahlen in eckigen Klammern beziehen sich auf die am Ende des Beitrages aufgeführte Bibliographie.

Die in dieser Arbeit dargelegten Überlegungen führten den Verfasser dazu, einen neuartigen Abtaster mit optischem Ausgleich der Filmbewegung und Leuchtpunktabtastung zum Bau vorzuschlagen, der seit seiner Vollendung für den Zürcher Fernseh-Versuchsbetrieb der PTT-Verwaltung eingesetzt ist.

Die Notwendigkeit der Filmabtastung

Die Gestaltung von Fernsehprogrammen wird weitgehend erleichtert, wenn es möglich ist, Programmteile zum voraus aufzunehmen und in der Sendung unter anderen wohlvorbereitete Aufnahmen zu übertragen. Wiederholungen und Programmaustausch werden wirtschaftlicher, und der Regisseur hat die Möglichkeit, durch geschickte Montage von früher aufgenommenen Bildern besondere Effekte herauszuholen. Oft bedingen auch Art und Zeitpunkt aktueller Ereignisse eine Aufnahme.

Die nächstliegende Lösung besteht in der Verwendung von Filmen, weil die ganze Technik der Filmherstellung schon von der Filmindustrie ausgearbeitet wurde. Daneben wird in neuester Zeit

versucht, nicht unmittelbar das Bild, sondern das elektrische Fernsehsignal in einer Aufnahme festzuhalten. Aus grundsätzlichen Überlegungen über die zu verarbeitende Informationsmenge kommt man jedoch zum Schluss, dass derartige, rein elektronische Aufnahmeverfahren den Film nie ganz werden aus der Fernsehtechnik verdrängen können, vorausgesetzt, dass überhaupt je ein derartiges Verfahren bis zur praktischen Brauchbarkeit entwickelt wird.

Grundlagen der Bildwiedergabe

Film und Fernsehen wollen dem menschlichen Auge mit möglichst geringem Aufwand ein möglichst gutes Bild darbieten. Was man dabei unter einem guten, dem Auge wohlgefälligen Bild zu verstehen hat, kann nur nach künstlerischen Gesichtspunkten entschieden werden. Man könnte sich nun auf den Standpunkt stellen, dass alles Künstlerische am Bild Sache des bildgestaltenden Regisseurs sei und dass die Bildwiedergabetechnik eine möglichst «natürliche» Darstellung anzustreben habe, bei der alle physikalisch messbaren Eigenschaften eines Bildes erhalten bleiben. Eine derartige Aufteilung der Aufgabe erweist sich aber bei jeder Art einer Bildwiedergabe als undurchführbar: Der Bildgestalter muss seine Tätigkeit nach dem unvollkommen wiedergegebenen Bild beurteilen, und der Wiedergabetechniker muss die Kompromisse, die er wegen der Wirtschaftlichkeit seines Wiedergabeverfahrens eingehen muss, so gestalten, dass sie die Bildgestaltung möglichst wenig behindern. Dies setzt jedoch voraus, dass der Wiedergabevorgang immer so abläuft, wie ihn der Regisseur im Moment der Gestaltung des Bildes sich vorstellt. Es trifft dies zum Beispiel dann nicht zu, wenn ein Film über ein Fernsehsystem übertragen wird, der zum Zwecke der Wiedergabe in Kinotheatern aufgenommen wurde. Hier ist das Ziel der Wiedergabetechnik ein Fernsehbild, das in allen Eigenschaften möglichst genau mit dem Kinobild übereinstimmt. Es ist aber nicht nötig, wegen dieses Sonderfalles die voranstehend erwähnten Zusammenhänge zwischen Bildgestaltung und Wiedergabetechnik zu modifizieren, denn bezüglich aller Eigenschaften, bei denen sowohl die Film- als auch die Fernsehtechnik die gleichen Kompromisse eingehen, kommen bei der Weiterübertragung des Filmbildes über ein Fernsehsystem keine grundsätzlich neuen Veränderungen des Bildinhaltes hinzu. Und tatsächlich verwenden die beiden Bildwiedergabeverfahren weitgehend die gleichen Normierungen, von denen ein grosser Teil, zum Beispiel die Projektionsart, die Tiefenschärfe, die Formatbegrenzung und die Farbwertskala, durch die zweimalige Übertragung nicht mehr verändert werden. Nur bei gewissen Eigenschaften, wie der Begrenzung des Helligkeitsumfanges, der Auflösungsschärfe und den geometrischen Verzeichnungen, addieren sich die Fehler der nacheinander verwendeten Bildwiedergabeverfahren.

Kompromisse können ein Wiedergabeverfahren überhaupt erst ermöglichen. Aus wirtschaftlichen Gründen undurchführbar ist zum Beispiel die Wiedergabe bewegter stereoskopischer und farbiger Bilder, die das ganze Gesichtsfeld des menschlichen Auges überdecken, obwohl dies technisch durchaus möglich wäre. So haben sich die Fachleute im Verlaufe der Entwicklung auf verschiedene Vereinfachungen ihrer Bildwiedergabesysteme geeinigt, von denen die folgenden Punkte eine gewisse Allgemeingültigkeit erlangt haben:

1. Der räumlich ausgedehnte Gegenstand wird durch Zentralprojektion auf eine Ebene abgebildet. Der dabei verwendete Bildwinkel soll so gut als möglich dem bei der Betrachtung des wiedergegebenen Bildes vorliegenden entsprechen.
2. Das Bildformat wird auf ein Rechteck begrenzt, das bei Film und Fernsehen ein Verhältnis der Höhe zur Breite von 3:4 aufweist und normalerweise horizontal betrachtet wird.
3. Die Mannigfaltigkeit der Farben wird einer Helligkeitsskala zugeordnet, wobei die Helligkeitsempfindung des menschlichen Auges angenähert werden soll.
4. Der Absolutwert der Helligkeit im wiedergegebenen Bilde wird derart reguliert, dass alle für den Bildaufbau wichtigen Helligkeiten zwischen den durch das Wiedergabesystem festgelegten Grenzhelligkeiten liegen. Die relativen Helligkeitsunterschiede werden, wenn immer möglich, gegenüber der Wirklichkeit etwas verstärkt. (Beim Film meistens um einen Faktor $\gamma = 1{,}4$.)

   Eine weitere Gruppe von Vereinfachungen ist dadurch bedingt, dass auch bei ebenen und nicht bunten Bildern die wiederzugebende Informationsmenge eine dreidimensionale Mannigfaltigkeit darstellt, während der Film als Informationsträger zweidimensional ist und das Fernsehsignal sogar nur eine Dimension hat. Die wiederzugebende Helligkeit an irgendeiner Stelle des Bildes ist eine Funktion von zwei Flächenkoordinaten und der Zeit, während die Filmschwärzung nur eine Funktion der zwei Flächenkoordinaten des Filmes ist und das Fernsehsignal sogar nur eine Funktion der Zeit darstellt.

   Die dadurch bedingten Umformungen der Bildinformation sind folgende:
5. Beim Film wird die Zeit quantisiert, das heisst auf dem Film ist die Helligkeitsverteilung des Bildes in unveränderter geometrischer Anordnung aufgezeichnet, jedoch nur für diskrete Zeitmomente.
6. Beim Fernsehen wird die Zeit der Wiedergabe und die eine Flächenkoordinate des Bildes quantisiert. Die Helligkeit als Funktion der andern Koordinate muss nun mit dem Fernsehsignal, einer elektrischen Spannung, die eine stetige Zeitfunktion darstellt, in Zusammenhang gebracht werden. Man einigte sich auf folgende Konventionen:
   a) Proportionalität zwischen Helligkeit und Signalspannung.

b) Verwendung von kartesischen Koordinaten und Quantisierung der Ordinate.
c) Proportionalität zwischen Abszisse und Zeit der Übertragung.
d) Innerhalb der durch die Quantisierung gegebenen Toleranzen, Proportionalität zwischen der negativen Ordinate und der Zeit der Übertragung.

Da die Bildabmessungen endlich sind, braucht es nur eine endliche Zeit, bis die Helligkeitsverteilung bei festgehaltenem Ordinatenwert übertragen ist. Wegen der Quantisierung muss diese Übertragung nacheinander nur für endlich viele Ordinatenwerte stattfinden; so ist es tatsächlich möglich, periodisch die Helligkeitsverteilung über der ganzen Bildfläche zu übertragen.

Zur Wiedergabe eines Filmes oder eines Fernsehsignales müssen neben den erwähnten Übereinkünften noch eine Reihe quantitativer Angaben bekannt sein, die diese beiden Bildträger in ihren physikalischen Eigenschaften kennzeichnen und deren Normierung erst ihren Austausch ermöglicht.

Beim Film muss vor allem die Filmbreite, Abmessung und Lage des Bildes, der Perforation und der Tonspur sowie die Bildfrequenz normiert sein. Normal sind 35, 16, 9,5 und 8 mm Filmbreite und Frequenzen von 16 oder 24 Bildern in der Sekunde.

Beim Fernsehen sind ausser der Bildfrequenz die Zeilenzahl, die Dauer der Zeilen- und der Bildaustastung, die Form, Lage und Höhe der Zeilen- und Bildsynchronimpulse und alle Angaben über die hochfrequente Übertragung des Bildsignals zu normieren. Normal sind Bildfrequenzen von 25 oder 30 Bildern je Sekunde und Zeilenzahlen von 405, 525, 625 und 819 Zeilen. Diese Zahlenwerte stellen Kompromisse zwischen der Wirtschaftlichkeit einer Bildwiedergabe und einer Einschränkung in der Bildgestaltung dar; es ist daher ohne weiteres verständlich, dass im Kinotheater ein teureres Filmformat verwendet wird als für Heimkinovorführungen und dass die Ansprüche an ein Fernsehbild nicht von Anfang an international standardisiert werden konnten.

Eine grundsätzliche Grenze für die Auflösung in irgendeiner Bildwiedergabe liegt schon in der Natur des Lichtes. Seine Wellennatur gibt die Möglichkeit, die optischen Abbildungssysteme zu bauen, die beim Film und beim Fernsehen unentbehrlich sind; sie ist aber auch der Grund dafür, dass selbst die besten denkbaren Optiken nur ein begrenztes Auflösungsvermögen haben. Die Quantennatur des Lichtes verknüpft die Lichtempfindlichkeit des Aufnahmegerätes irgendeiner Bildwiedergabeeinrichtung mit den statistischen Helligkeitsschwankungen (dem «Rauschen») am Empfangsort. Dabei treten Quantenausbeute, Auflösung und Speicherzeit als Parameter auf, denn durch örtliche und zeitliche Mittelwertbildung kann die Wirkung der statistischen Schwankung der endlich vielen je Zeiteinheit registrierten Lichtquanten vermindert werden.

Durch die gleichen Gesetze wird jedoch auch die Leistungsfähigkeit des menschlichen Auges begrenzt, und nur dieses hat schliesslich das wiedergegebene Bild zu beurteilen. Auch das Auge muss notwendigerweise örtliche und zeitliche Mittelwerte bilden, und es ist sich an ein gewisses Helligkeitsrauschen gewöhnt. Der Sehnerv überträgt mit seinen endlich vielen Nervenfasern nur die Helligkeit einer beschränkten Anzahl von Bildpunkten nach dem Gehirn, und dies nur mit einer gewissen Trägheit.

Es gibt also eine Grenze, wo eine noch feinere Auflösung des Bildes vom Auge nicht mehr wahrgenommen würde. Als Richtwert wird meistens angenommen, das Auge könne nur solche Bildpunkte getrennt wahrnehmen, die voneinander um einen Bildwinkel von mehr als einer Minute entfernt sind. Die zeitliche Quantisierung darf wegen des Helligkeitsflimmerns und dem Eindruck einer kontinuierlichen Bewegung nicht beliebig grob gemacht werden. Die Erfahrung zeigt, dass das wiedergegebene Bild bei den gebräuchlichen Helligkeiten etwa 50mal je Sekunde aufleuchten muss, damit kein Flimmern mehr sichtbar ist, während der Eindruck einer ruckweisen Bewegung (bei gleichbleibender Helligkeit) schon bei einer Frequenz von etwa 16 Bildern je Sekunde verschwindet.

Für die praktische Durchführung einer Fernsehübertragung bedeutet es eine wesentliche Erleichterung, dass das Auge bei den meisten Bildern für Abweichungen in der geometrischen Anordnung der Bildpunkte ziemlich unempfindlich ist. Sofern diese Verzeichnungsfehler einigermassen gleichmässig über die Bildfläche verteilt sind, darf ein bestimmter Bildpunkt ruhig um mehrere Bildpunktdurchmesser von dem eigentlich gewünschten Ort entfernt aufgezeichnet werden, ohne dass dies den Betrachter stört. Diese Tatsache nützt die Fernsehtechnik aus, wenn sie heute allgemein zur Bildzerlegung am Sendeort und zum Aufzeichnen des wiederzugebenden Bildes am Empfangsort elektronenoptische Abbildungs- und Ablenksysteme verwendet, die Verzeichnungsfehler von der Grösse eines Vielfachen der Bildpunktabmessungen aufweisen. Eine geometrisch exakte Bildwiedergabe lässt sich höchstens mit mechanischen Bildzerlegern oder in gewissen Fällen mit Servosteuerungen erzwingen.

Bei den heutigen Fernsehnormen kommen mechanische Abtaster für die Zeilenrichtung wegen der zu grossen Geschwindigkeiten nicht mehr in Betracht; hingegen kann es bei dem hier vorliegenden Problem der Fernsehübertragung von Filmen interessant sein, die Vertikalbewegung des gleichförmig durch den Projektor laufenden Filmes mit der Bildzerlegung in der vertikalen Richtung zu kombinieren. Dabei darf man aber die vom bewegten Film her stammende Abtastbewegung nur derart mit einer elektronenoptisch gesteuerten Bewegung zusammensetzen, dass

die Verzeichnungsfehler der Elektronenoptik gegenüber dem Fernsehraster stillstehend wiedergegeben werden.

Dies ist in folgenden drei Fällen möglich:

1. wenn die Bildfrequenz des Filmes und die Frequenz der Vertikalablenkung des Fernsehrasters übereinstimmen;
2. wenn die Frequenz der Vertikalablenkung des Fernsehrasters das n-fache der Bildfrequenz des Filmes beträgt und n optische Abbildungssysteme abwechselnd benützt werden;
3. wenn die Verzeichnungsfehler des elektronenoptischen Bildzerlegers klein gegenüber den Bildpunktabmessungen gemacht werden können (z. B. durch eine Servosteuerung der elektronischen Ablenkbewegung auf Grund ihrer Abweichung gegenüber der programmgemässen Bewegung).

Die Umwandlung eines Filmbildes in ein Fernsehbild und umgekehrt

Die Umwandlung des auf einem Film festgehaltenen Bildes in ein Fernsehsignal verlangt grundsätzlich die Kombination einer Filmwiedergabeeinrichtung mit einem Fernsehaufnahmegerät und das umgekehrte Problem, ein Fernsehsignal auf einem Film festzuhalten, könnte im Prinzip mit einem Fernsehempfänger und einer Filmkamera gelöst werden. Als Folge der erwähnten Eigenschaften von Film und Fernsehen zeigt es sich jedoch, dass die Filmkameras und Filmprojektoren der heutigen Filmtechnik nicht ohne weiteres mit einem Fernsehsystem zusammenarbeiten können. In die folgenden Betrachtungen müssen daher auch solche Film- und Fernsehgeräte aufgenommen werden, die für Direktaufnahmen und für visuelle Bildbetrachtung nicht interessant sind.

Zusammenstellung möglicher Kombinationen von Filmwiedergabe- und Fernsehaufnahmeverfahren

In der Wirkungsweise unterscheidet sich ein Filmprojektor von einer Filmkamera nur durch die Lichtrichtung; für beide zusammen kann man folgende grundsätzlich verschiedenen Funktionsweisen unterscheiden:

a) intermittierender Filmtransport mit Hilfe eines Malteserkreuzes oder eines Greifers mit Verdunkelung während des Filmtransportes durch eine Flimmerblende;
b) gleichförmiger Filmtransport, einfache Abbildung. (Das Bild wandert vertikal, nur im Zusammenhang mit der Fernseh-Bildabtastung interessant.);
c) gleichförmiger Filmtransport, mehrfache Abbildung durch n stillstehende, optische Abbildungssysteme, mit Umschaltung auf je ein bestimmtes System synchron zur Filmbewegung;
d) gleichförmiger Filmtransport mit elektronischem Ausgleich der Filmbewegung im Fernseh-Bildzerleger;
e) gleichförmiger Filmtransport mit optischem Ausgleich der Filmbewegung.

Nach der unter a) beschriebenen Art arbeiten die heute üblichen Kinoprojektoren und -kameras. Bei gewissen Zeitlupenkameras und bei den vor etwa zwanzig Jahren in einigen Kinotheatern benützten *Mechau*projektoren wird die Filmbewegung mit optischen Mitteln ausgeglichen, wie unter e) angegeben. Die Varianten b) bis d) sind nur im Zusammenhang mit einer Fernsehübertragung interessant.

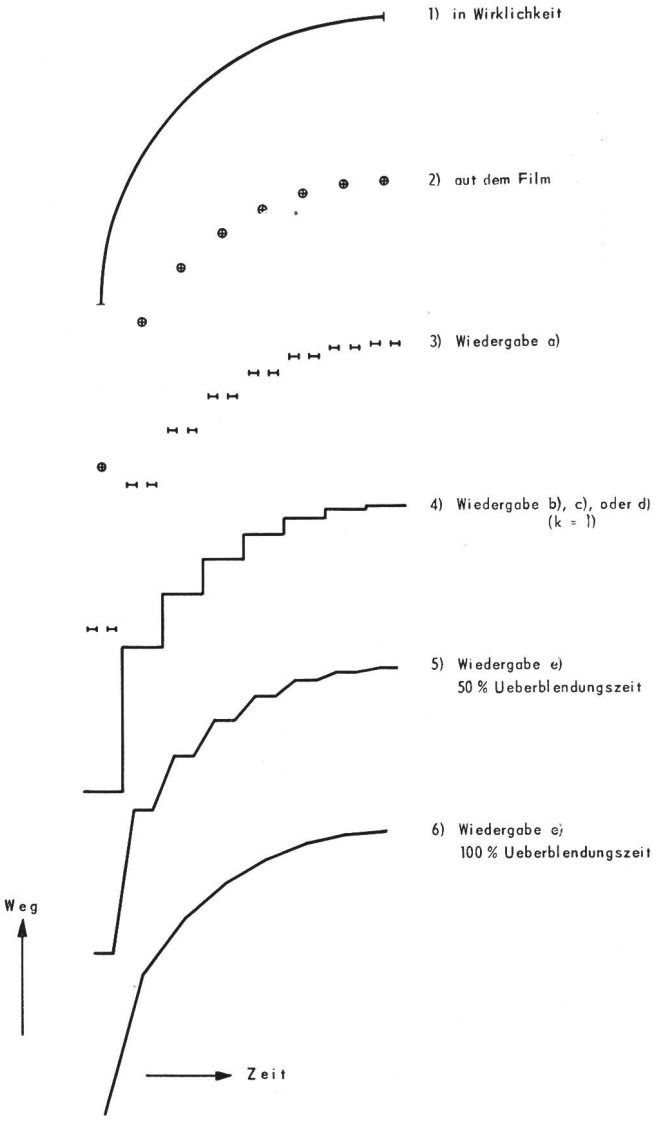

Fig. 1. Schematische Darstellung der Wiedergabe einer Bewegung durch verschiedene Filmwiedergabeverfahren. 3) entspricht der normalen Kinoprojektion mit zweimaliger Projektion jedes Filmbildes und 50% Dunkelpause. In den Kurven 4) bis 6) ist für Wiedergabemethoden ohne Dunkelpause die Wanderung des Helligkeitsschwerpunktes dargestellt.

In Fig. 1 ist die Wiedergabe einer Bewegung durch die genannten Filmwiedergabeverfahren graphisch dargestellt. In Wirklichkeit ist der Weg eines bewegten Punktes eine stetige und differenzierbare Funktion der Zeit (1). Auf dem Film werden Momentaufnahmen aus dieser Bewegung festgehalten (2). Die normale Filmwiedergabe mit ruckweisem Filmtransport (Verfahren a) entspricht der Darstellung 3, wobei

Tabelle I	Intermittierender Filmtransport mit Flimmerblende a)	Gleichförmiger Filmtransport, einfache Abbildung b)	Gleichförmiger Filmtransport, mehrfache Abbildung durch n feststehende optische Systeme mit Umschaltung c)	Gleichförmiger Filmtransport, elektronischer Ausgleich der Filmbewegung d)	Gleichförmiger Filmtransport, optischer Ausgleich der Filmbewegung e)
Speichernde Bildaufnahmeröhre, wie in Kamera für Direktaufnahme α)	Blitzbeleuchtung (oder Bildwandler austasten)	Blitzbeleuchtung, verlangt spezielle Filmkopien mit 50 oder 60 Bildern je Sekunde	Blitzbeleuchtung	Das elektronenoptische Zwischenbild müsste vertikal verschoben werden, entsprechend Filmbewegung. Dazu ist die heutige Elektronenoptik noch zu ungenau	
Nichtspeichernde Bildaufnahmeröhren, wie *Farnsworth*röhre β)	Filmtransportzeit müsste < 2 ms sein (normal 10 ms), was höchstens bei Schmalfilm mit grossem Aufwand realisiert werden kann	Verlangt besondere Filmkopien mit 50 oder 60 Bildern je Sekunde	$n = 2$	Zusätzliche Vertikalablenkung des elektronenoptischen Bildes entsprechend Filmbewegung. Dazu ist die heutige Elektronenoptik noch zu ungenau	
Leuchtpunktabtaster mit einer Kathodenstrahlröhre als Lichtquelle γ)	wie oben	Verlangt besondere Filmkopien mit 50 oder 60 Bildern je Sekunde	$n = 2$	Mit mehrfacher Abbildung des Rasters auf dem Leuchtschirm und Servosteuerung lösbar	

Tabelle II	Intermittierender Filmtransport mit Flimmerblende a)	Gleichförmiger Filmtransport einfache Abbildung b)	Gleichförmiger Filmtransport, mehrfache Abbildung durch n feststehende optische Systeme mit Umschaltung c)	Gleichförmiger Filmtransport, elektronischer Ausgleich der Filmbewegung d)	Gleichförmiger Filmtransport, optischer Ausgleich der Filmbewegung e)
$k = \frac{\text{Frequenz der Vertikalablenkung}}{\text{Frequenz der Filmbilder}}$	$k = 1, 1{,}5, 2, 3$	$k = 1$	$k = \frac{n}{m}$ (n, m ganze Zahlen)	keine Einschränkung	keine Einschränkung
k' = Anzahl der Übertragungen eines Filmbildes	$k' = 1, 2, 3$	$k' = 1$	k' = ganze Zahl	k' = ganze Zahl	keine Einschränkung
Beziehung zwischen Filmtransport und Abtastvorgang	synchron	synchron, phasenstarr	synchron, phasenstarr	keine	keine
Schrumpfkompensation notwendig	nein	nein	ja	ja	ja
Gleichförmige Wiedergabe von Bewegungen bei $k \neq$ ganze Zahl			nein	nein	Überblendung $\geqslant$ 100%: ja. Überblendung $<$ 100%: Fehler nicht sichtbar
Umschaltung von 16 auf 24 Bilder/sek. möglich	ja		nein	ja	ja
Betrieb im Stillstand möglich	ja	nein	nach Umschaltung	ja	ja
Start aus Stillstand möglich	nein	nein	nein	ja	ja
Nachleuchtkorrektur bei Leuchtpunktabtaster streng richtig		nein	nein	nein	ja
Filmaufnahme ab Kathodenstrahlröhre möglich	nur ein Halbraster	mit Nachleuchten: nein	mit Nachleuchten: nein	nein, wenn Helligkeit beim Leuchtpunktabtaster zur Servosteuerung benützt	ja

die Lücken von 25 % der Bilddauer durch den Filmtransport (Dunkelpause) bedingt sind. Bei den Verfahren b), c) und d) kann der Wechsel zwischen zwei Filmbildern grundsätzlich beliebig kurz gemacht werden, was durch Kurve 4 dargestellt ist. Das Verfahren e) erlaubt ein Überblenden der Bewegungsphasen, was (abgesehen von der Bewegungsunschärfe) den Kurven 5 und 6 entspricht.

Für die Fernsehaufnahme kommen heute folgende Verfahren in Betracht:

α) die Verwendung von speichernden Bildaufnahmeröhren, wie Ikonoskop, Super-Ikonoskop, Orthicon, Image-Orthicon, Vidicon usw., wie bei Direktaufnahmen mit einer Kamera;

β) die Verwendung von nichtspeichernden Bildaufnahmeröhren, zum Beispiel der *Farnsworth*röhre;

γ) Durchleuchtung des Filmes in einem sogenannten Leuchtpunktabtaster mit einer Kathodenstrahlröhre als Lichtquelle.

Die 15 grundsätzlich möglichen Lösungen unseres Problems, die sich als Kombinationen je eines der 5 erwähnten Filmwiedergabeverfahren mit je einem der drei angegebenen Fernsehaufnahmeverfahren ergeben, sind in *Tabelle I* zusammengestellt. Die 7 durch Umrahmung hervorgehobenen Lösungen sind durch Publikationen bekannt geworden (z. B. [2, 3, 4, 5, 6, 8, 10]).

Im folgenden sollen nun die Vor- und Nachteile der verschiedenen möglichen Lösungen unseres Problems eingehender besprochen werden. Dabei erweist es sich als zweckmässig, die Eigenschaften aufzuteilen in solche, die zu dem betreffenden Filmwiedergabeverfahren gehören (*Tabelle II*), und solche, die für die Fernsehaufnahmeart typisch sind (*Tabelle IV*).

Zusammenstellung der Eigenschaften verschiedener Filmwiedergabeverfahren

Von den in *Tabelle II* aufgeführten Eigenschaften der Filmapparatur ist die Angabe der möglichen Werte des Verhältnisses k am wichtigsten, denn dadurch scheiden gewisse Verfahren aus den weiteren Betrachtungen überhaupt aus. Mit k sei hier der Quotient der Frequenz der Vertikalablenkung des Fernsehrasters und der Bildfrequenz auf dem Film bezeichnet. Für die heute interessanten Fälle hat k folgende Werte:

Tabelle III

In dieser Zusammenstellung nimmt die Variante a) eine Sonderstellung ein; für einen einwandfreien Betrieb sollte für jede Periode der vertikalen Abtastbewegung das stillstehende Filmbild einmal auf die für die Fernsehübertragung massgebende Ebene projiziert werden. Da dies nicht mit der Filmtransportperiode zusammenfallen darf, die normalerweise 25 % der pro Filmbild zur Verfügung stehenden Zeit beträgt, sind die k-Werte auf 1, 1,5, 2 und 3 beschränkt. Wenn man in Amerika trotzdem derartige Filmabtaster mit $k = 2{,}5$ betreibt, so muss man die ungleichen Beleuchtungsverhältnisse für verschiedene Halbraster mit Bildaufnahmeröhren zu bekämpfen suchen, die den Bildinhalt über mehrere Filmbilder hinweg aufspeichern. Derartige Methoden können aber nie ganz befriedigen, weil die hohen Speicherzeiten alle Bewegungen verschmieren.

Die Variante b) erlaubt nur $k = 1$ und ist daher nur zusammen mit speziellen Fernseh- oder Filmnormen interessant. Wegen ihrer Einfachheit wurde sie trotzdem für Versuchszwecke oft verwendet.

Variante c) lässt sich praktisch nur für kleine Werte der Zahl n, am besten für $n = 2$ realisieren, was mit $m = 1$ auf $k = 2$ führt.

Im Gegensatz dazu erlauben die Verfahren d) und e) beliebige k-Werte, das heisst, sie sind für alle denkbaren Film- und Fernsehnormen ohne irgendeine Umänderung brauchbar.

Die Variante e) unterscheidet sich noch in einer anderen Beziehung grundsätzlich von allen anderen Verfahren:

Beim optischen Ausgleich der Filmbewegung geschieht der Übergang von einem Filmbild zum folgenden durch stetige Überblendung, das heisst, um gleichviel wie die Helligkeit des neuen Filmbildes zunimmt, nimmt die Helligkeit des vorhergehenden langsam ab. Die Zeitdauer dieses Überganges kann grundsätz-

Tabelle III

k-Werte für verschiedene Normen

$$k = \frac{f_v}{f} = \frac{\text{Frequenz der Vertikalablenkung}}{\text{Bildfrequenz des Filmes}}$$

	Stummfilm Geschwindigkeit		Tonfilm Geschwindigkeit	
	normal	4% übernormal	normal	4% übernormal
f in Hz =	16	$16\frac{2}{3}$	24	25
Europa f_v = 50 Hz schwarz-weiss und farbig, Simultanverfahren	3,125	3	2,0833	$\boxed{2}$
f_v = 150 Hz farbig, Sequenzverfahren	9,375	9	6,25	6
Amerika f_v = 60 Hz schwarz-weiss und farbig, Simultanverfahren	3,75	3,6	$\boxed{2{,}5}$	2,4
f_v = 144 Hz farbig, Sequenzverfahren	9	8,64	6	5,76

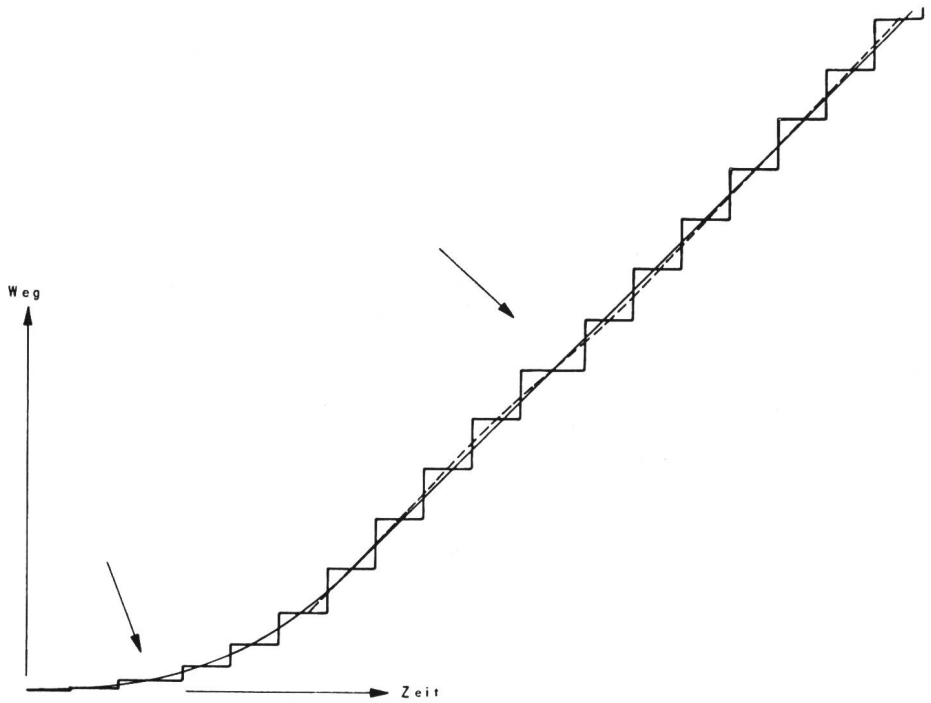

Fig. 2.
Schematische Darstellung der Interferenzerscheinungen zwischen verschiedenen Zeit-Quantisierungen der Film- und Fernsehseite bei Verfahren ohne optischen Ausgleich der Filmbewegung
Filmbildfrequenz $f = 16$ Hz
Fernseh-Vertikalablenkfrequenz $f_V = 50$ Hz
$k = 3{,}125$ $k' = 3$ oder 4

lich beliebig lang gemacht werden. Beim *Mechau*-projektor ist sie fast so lang wie die mittlere Projektionsdauer eines Filmbildes. Der *Mechau*projektor zeigt also fast immer zwei Bilder, von denen die stillstehenden Partien aufeinanderfallen, während von den bewegten Bildteilen zwei Bewegungsphasen sichtbar sind, von denen die eine aus- und die andere eingeblendet wird. Die derart entstehende Bewegungs-Unschärfe ist aber nicht wesentlich grösser als die ohnehin wegen der verhältnismässig langen Belichtungszeit schon auf dem Film vorhandene. Zudem beachtet sie das menschliche Auge nicht, da es rasche Bewegungen nur sehr unscharf wahrnimmt. Für irgendeine Art der Bildauswertung, auch eine solche, die von dem mit optischem Ausgleich wiedergegebenen Bild wieder Momentaufnahmen macht, erscheint die Bildhelligkeit konstant und jede Bewegung im Bild stetig, denn der Schwerpunkt der Helligkeit bewegter Objekte wandert stetig weiter.

Im Gegensatz dazu erlauben die übrigen Verfahren keinerlei Übergänge von einem Filmbild zum andern. Jedes Filmbild wird eine ganze Zahl von Malen zur

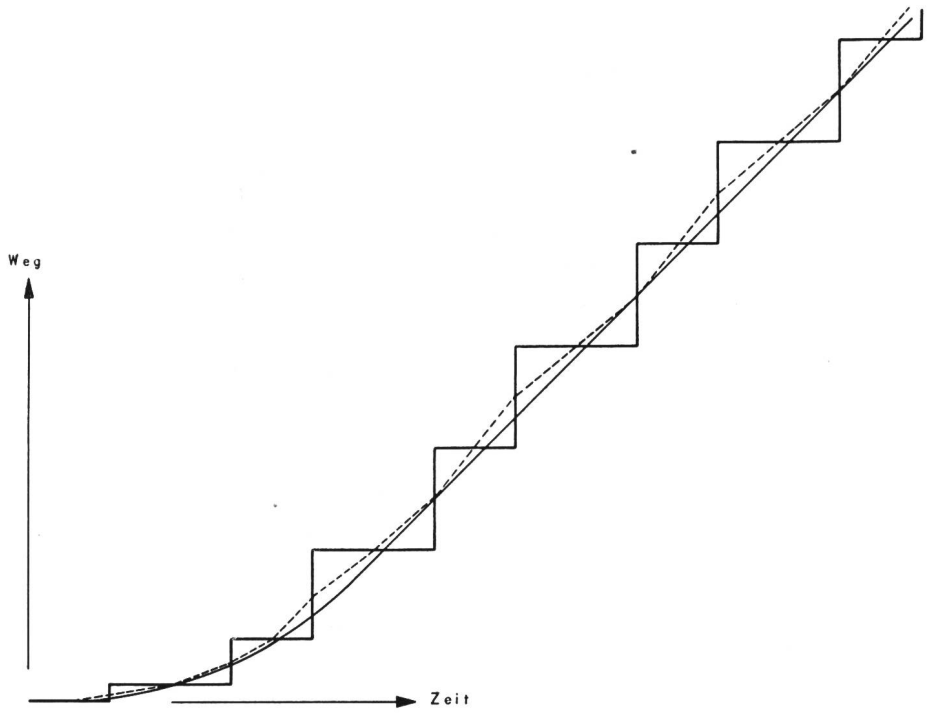

Fig. 3.
wie Fig. 2., jedoch
Filmbildfrequenz $f = 24$ Hz
Fernseh-Vertikalablenkfrequenz $f_V = 60$ Hz
$k = 2{,}5$ $k' = 2$ oder 3

Tabelle IV	Speichernde Bildaufnahmeröhren wie in Kamera für Direktaufnahme *α)*	Nichtspeichernde Bildaufnahmeröhren, wie *Farnsworth*röhre *β)*	Leuchtpunktabtaster mit Kathodenstrahlröhre und Photozelle mit Sekundärelektronenvervielfacher *γ)*
Helligkeitsumfang	beidseitig begrenzt, bedingt Nachregulierung	grundsätzlich nur durch Rauschabstand einseitig begrenzt	grundsätzlich nur durch Rauschabstand einseitig begrenzt
Gradationskurve streng linear	nur in beschränktem Bereich	ja	ja
Schwarzpegel bleibt erhalten	nein	ja	ja
Störsignale (spurious signals) möglich	ja	nein	nein
Rauschabstand	grundsätzlich am günstigsten	ausreichend	ausreichend
Gedächtnis kann stören	ja	nein	nein
Betriebsmässige Justierungen	am meisten	wenig (allenfalls Bogenlampe)	wenig
Filmaufnahme mit dem gleichen Gerät möglich	nein	nein	ja
Farbabtastung mit 1 Raster im Sequenzverfahren möglich	bei kleiner Speicherzeit	ja	ja
Farbabtastung mit 1 Raster im Simultanverfahren möglich	nein	nein	ja

Fernsehabtastung benützt. Auch beim elektronischen Ausgleich der Filmbewegung kann die Rückbewegung der elektronischen Zusatz-Vertikalablenkung nicht trägheitslos erfolgen und damit ist der Bildwechsel nur während des Bildrücklaufes im Fernsehraster möglich (vgl. auch Fig. 1). Wenn bei irgendeinem Abtastverfahren ohne optischen Ausgleich der Filmbewegung das einzelne Filmbildchen k' mal abgetastet wird, so muss k' eine ganze Zahl sein. Ist k als Mittelwert von k' keine ganze Zahl, so springt k' jeweils von der grössten ganzen Zahl kleiner als k zur kleinsten ganzen Zahl grösser als k und zurück mit einer Frequenz, die gleich dem grössten gemeinsamen Teiler von Vertikalablenkfrequenz und Filmbildfrequenz ist. Eine auf dem Film aufgenommene Bewegung erscheint somit in der Wiedergabe als mit einer periodischen Geschwindigkeitsmodulation behaftet, ein Effekt, der auch beim Betrachten von Filmen auffällt, die mit 16 Bildern je Sekunde aufgenommen und auf 24 Bilder je Sekunde durch Verdoppeln jedes zweiten Bildes umkopiert wurden.

In Fig. 2 ist dargestellt, wie eine Bewegung bei Aufnahme mit 16 Bildern je Sekunde und einer Fernsehabtastung mit 50 Halbrastern je Sekunde mit einem Verfahren ohne optischen Ausgleich wiedergegeben wird ($k = 3{,}125$; $k' = 3$ oder 4). Jede ½ Sekunde springt die Bewegung um 4% des in dieser ½ Sekunde zurückgelegten Weges zurück. Auch bei einfacheren Verhältnissen, wie bei den amerikanischen Normen mit $k = 2{,}5$, ist nach Fig. 3 eine Ungleichförmigkeit in der Wiedergabe einer Bewegung mit einer Wiederholungsfrequenz von 12 Hz festzustellen.

Bei den Verfahren a), b) und c) besteht zwischen Filmtransport und Fernsehabtastung ein fester Zusammenhang. Der Film muss genau synchron zum Abtastrhythmus transportiert werden. Bei b) und c) wirkt sich zudem jede Phasenschwankung als vertikales Pendeln des Bildes aus. Diese Verfahren stellen daher sehr hohe Anforderungen an die Präzision des Filmtransportes und seiner Kopplung mit dem Impulsgeber des Fernsehsystems. Das Fernsehbild kann beim Anlassen erst beurteilt werden, wenn der Filmtransport bis zum Synchronismus beschleunigt ist und die Einschwingvorgänge in den elastischen Stellen der Kopplung zwischen Impulsgeber und Filmtransport abgeklungen sind. Im Gegensatz dazu sieht man dem nach Verfahren d) oder e) gewonnenen Bild während des Anlassvorganges überhaupt nichts an, sofern nicht schon im Vorspann des Filmes eine Bewegung aufgenommen ist, die dann als im gleichen Masse beschleunigt erscheint. Dies bedeutet für die Bildgestaltung eine grosse Erleichterung, wenn zum Beispiel ein Stück Film in eine mit Fernsehkameras direkt aufgenommene Sendung eingeblendet werden soll. Kein Regisseur kann nämlich den genauen Zeitmoment, in dem auf die Filmwiedergabe umgeschaltet werden soll, schon mehr als 10 Sekunden vorher genau angeben.

Bei den Verfahren d) und e) kann auch jederzeit, wenn nötig während des Betriebes, die Filmgeschwindigkeit oder die Abtastnorm verändert werden. Dies ist zum Beispiel bei der Wiedergabe von Schmalfilm nötig, wo ein grosser Prozentsatz als Stummfilm mit 16 Bildern je Sekunde aufgenommen wird.

Bei Verwendung eines Leuchtpunkt-Abtasters als Fernseh-Aufnahmeorgan kann die elektrische Korrektur des Leuchtschirmnachleuchtens nur dann erfolgreich sein, wenn das Bild des Filmes sich während des Nachleuchtens höchstens um einen Bruchteil eines Bildpunktes gegenüber dem Leuchtschirm bewegt. Für normal nachleuchtende Leuchtschirme und die heutigen Zeilenzahlen kommt daher nur das Verfahren e) in Frage, während extrem kurz nachleuchtende Phosphore oder kleine Zeilenzahlen auch die Verfahren b), c) und d) erlauben.

Die umgekehrte Aufgabe, ein Fernsehbild auf einem Film festzuhalten, kann grundsätzlich dadurch gelöst werden, dass man in einem Filmabtaster in der für die Fernsehabtastung massgebenden Bildebene den Leuchtschirm einer Kathodenstrahlröhre montiert und den Film durch unbelichteten Rohfilm ersetzt. Diese Anordnung ist bei Leuchtpunkt-Abtastern schon vorhanden. Nach *Tabelle II* kommt aber nur Verfahren e) ohne weiteres zur Filmaufnahme in Betracht; b) und c) wären bei vernachlässigbarem Nachleuchten brauchbar.

Die Methoden a) und b) sind so einfach, dass bei ihrer Anwendung nichts über den Abstand analoger Bildpunkte auf zwei aufeinanderfolgenden Filmbildern bekannt sein muss. Sie haben daher den Vorteil, dass man bei veränderlicher Filmschrumpfung nichts nachzuregulieren braucht.

Zusammenstellung der Eigenschaften verschiedener Fernseh-Aufnahmeverfahren

Zu den in *Tabelle IV* zusammengestellten Eigenschaften der drei zur Diskussion stehenden Fernseh-Abtastverfahren ist zunächst zu bemerken, dass die Schwierigkeiten mehr technologischer als grundsätzlicher Art sind. Je nach den technologischen Gegebenheiten, das heisst der Erfahrung der Herstellerfirma, kann die eine oder andere Lösung, zum Beispiel die Qualität der Bildauflösung betreffend, vorteilhafter sein. Meistens ist jedoch die einfachste Methode auch die beste. Seitdem Kathodenstrahlröhren für Leuchtpunkt-Abtaster mit sehr guten Auflösungs- und Nachleucht-Eigenschaften zu verhältnismässig günstigen Preisen im Handel erhältlich sind, ist der Leuchtpunkt-Abtaster nicht nur die einfachste, sondern auch die billigste Art der Diapositiv- oder Filmabtastung.

Der verarbeitbare Helligkeitsumfang ist bei Kameraröhren enger begrenzt als beim Film, so dass kaum ein zur Vorführung in Kinotheatern bestimmter Film ohne fortwährendes Nachregulieren mit einer speichernden Kameraröhre (α) verarbeitet werden könnte. Im Gegensatz dazu ist das Ausgangssignal bei den

Methoden β) und γ) streng linear von der Helligkeit abhängig und der Helligkeitsumfang im Abtastvorgang selbst nicht begrenzt. Da hier der Schwarzpegel genau erhalten bleibt, hat man die Möglichkeit, die Gradationskurve (den Zusammenhang zwischen der Filmhelligkeit und dem zu übertragenden Fernsehsignal) mit elektrischen Mitteln beliebig umzuformen. Besonders lässt sich die Wiedergabe der Helligkeitsstufen, gekennzeichnet durch die *Goldberg*-Konstante γ, allen Bedürfnissen anpassen. Dank der linearen Helligkeitsempfindung kann durch Umkehren der Signalpolarität der Negativfilm als Positiv wiedergegeben werden.

Das Bildsignal der meisten speichernden Kameraröhren benötigt den Zusatz eines Korrektursignales (shading-Korrektur), mit dem eine gleichmässige Helligkeitswiedergabe über die ganze Bildfläche eingestellt werden kann. Bei Kameraaufnahmen mit nur selten wechselnder Helligkeit ist es relativ einfach, in den Betriebspausen einer Kamera dieses Korrektursignal dem veränderten Bildinhalt anzupassen. Beim Abtasten von Filmen wechselt die Helligkeitsverteilung viel rascher, und es gibt keine Möglichkeit, das Bild zu beurteilen, bevor es zum Sender geht. Jede vom Bildinhalt abhängige shading-Korrektur ist hier unmöglich, weil sie erst zu spät nachgestellt werden kann.

Der Abstand des Ausgangssignales gegenüber dem Rauschen ist bei speichernden Bildaufnahmeröhren naturgemäss am günstigsten, doch ist er auch bei richtig dimensionierten Abtastern nach Verfahren β) und γ) ausreichend gross.

Die meisten speichernden Bildaufnahmeröhren haben die Eigenschaft, Bilder, die sie während längerer Zeit übertragen haben, viel länger zu speichern als bewegte Bilder. Ihr Gedächtnis für Filmtitel und ähnliches kann stören.

Je komplizierter der Abtastvorgang ist, desto mehr Fokussierungen, Elektrodenpotentiale, Ablenk- und Fokussierkorrekturen müssen nachjustiert werden. Der Leuchtpunkt-Abtaster (γ) braucht dabei sicher weniger Justierarbeit als ein Abtaster mit speichernder Kameraröhre (α). Bei den nichtspeichernden Bildaufnahmeröhren (β) ist meistens die Filmbeleuchtung mit einer Bogenlampe nötig, was zusätzliche Bedienungsarbeit erfordert.

Beim Leuchtpunktverfahren γ) kann im Bedarfsfall der Filmabtaster jederzeit auch zur Filmaufnahme von Fernsehbildern verwendet werden, indem die Helligkeit der Abtaströhre mit dem Fernsehsignal moduliert wird.

Bei der Übertragung von farbigen Fernsehbildern stellt sich die Aufgabe, entweder von einem farbigen Film dreierlei Fernsehsignale, entsprechend den drei Farbauszügen, herzustellen oder drei, die Farbauszüge darstellende Filme gleichzeitig abzutasten. Dabei kann die Übertragung der drei so erhaltenen Fernsehsignale zeitlich nacheinander (Sequenzverfahren) oder gleichzeitig (Simultanverfahren) erfolgen. Wegen der eben geschilderten Mängel in der geometrischen Präzision elektronenoptisch erzeugter Raster hat man zurzeit noch grosse Schwierigkeiten mit der Aufnahme farbiger Bilder nach dem Simultanverfahren, weil bei der Verwendung von Kameraröhren drei deckungsgleiche Raster erzeugt werden müssen. Nur die Leuchtpunkt-Abtastung eines farbigen Filmes stellt keinerlei Deckungsprobleme, da man nur ein einziges, auf einen weissleuchtenden Phosphor geschriebenes Raster normal auf den Film abzubilden braucht, und das Licht erst nach dem Durchtritt durch den Film in seine Farbkomponenten aufgespalten und drei verschiedenen Photozellen zugeführt wird. Bei Verwendung von Farbauszügen auf drei getrennten Filmen sind nur die drei Filmbilder mit optischen Mitteln zur Deckung zu bringen, ein Problem, das schon bei der Aufnahme der Farbauszüge gelöst sein muss.

Der Leuchtpunkt-Abtaster hat also auch für die Übertragung farbiger Bilder am meisten Vorteile.

Die anzustrebende Kombination eines Filmwiedergabe- und eines Fernsehaufnahmeverfahrens

Der Vergleich der Eigenschaften der verschiedenen Verfahren der Filmwiedergabe und der Fernsehaufnahme führt zu folgenden Schlüssen:

I) Aus rein grundsätzlichen Erwägungen ist eine Filmwiedergabe mit optischem Ausgleich der Filmbewegung allen andern Methoden vorzuziehen. Voraussetzung zur Verwirklichung dieses Prinzips ist jedoch, dass es gelingt, einen Mechanismus zum optischen Ausgleich zu finden, der mit einem tragbaren Aufwand realisierbar ist.

II) Aus den erwähnten Gründen verdient die Leuchtpunkt-Abtastung den Vorzug vor den anderen Verfahren.

Im folgenden ist nun ein Gerät zur praktischen Verwirklichung dieses Programms zu entwickeln.

Das Prinzip der Leuchtpunkt-Abtastung mit einer Kathodenstrahlröhre

Fig. 4 zeigt die Übertragung eines stillstehenden Diapositives in einem Leuchtpunkt-Abtaster. Auf dem Leuchtschirm der Kathodenstrahlröhre K bringt ein feiner Strahl freier Elektronen eine kleine Kreisfläche zum Aufleuchten. Dieser leuchtende Fleck wird durch das Objektiv O auf das Diapositiv D abgebildet. Je nach der Schwärzung des Diapositives an der durchleuchteten Stelle tritt mehr oder weniger Licht durch das Diapositiv hindurch auf die Photozelle Ph. Der Emissionsstrom dieser Photozelle ist proportional zur Bildhelligkeit am durchleuchteten Punkt. Er stellt nach einer passenden Verstärkung das fertige Fernsehsignal dar, da der Leuchtpunkt durch Ablenkung des Elektronenstrahles gezwungen wird, im Takte mit allen Fernsehempfängern ein Bildraster zu schreiben.

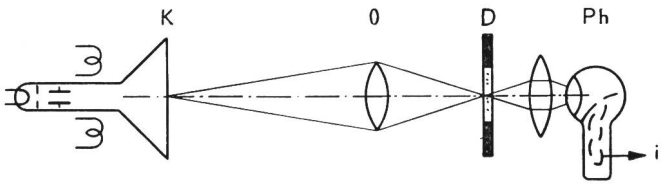

Fig. 4. Prinzip eines Leuchtpunktabtasters

Ein idealer Leuchtpunkt-Abtaster sollte unter anderen auch die folgenden, am schwierigsten zu realisierenden Bedingungen gleichzeitig erfüllen:

1. In jedem Zeitmoment soll das Diapositiv nur auf einer Fläche durchleuchtet werden, die nicht grösser ist als ein Bildelement.
2. Der auf die Photozelle gelangende Lichtstrom soll so gross sein, dass das durch die statistische Natur der Photoemission bedingte Teilchenrauschen vom Auge bei der Wiedergabe nicht störend empfunden wird.

Im folgenden seien diese Zusammenhänge noch etwas eingehender dargestellt. Es ist jedoch zu beachten, dass die angegebenen Formeln mehr für die Beurteilung der gegenseitigen Abhängigkeiten als für zahlenmässige Berechnungen geeignet sind, weil sie die physiologischen Eigenschaften des beobachtenden Auges nur summarisch erfassen und weil sie Grössen enthalten, die sich nur ungefähr abschätzen lassen.

Nach den Gesetzen der Statistik gilt für einen stochastischen Prozess, wie ihn die Photoemission darstellt:

$$\left(\frac{\Delta i}{i}\right)^2 = \frac{e \cdot P \cdot f_0}{2 \cdot i}$$

i = Signalstrom
Δi = dessen Schwankung
e = Elementarladung des Elektrons = $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ A. sek.
P = Punktezahl des Fernsehbildes ($0{,}5 \cdot 10^6$)
f_0 = Flimmerfrequenz des Auges (50 Hz)

Weiss: $\left(\frac{\Delta i_w}{i_w}\right)^2 = \Delta_w^2 = \frac{e \cdot P \cdot f_0}{2 \cdot i_w}$

Schwarz: $\left(\frac{\Delta i_s}{i_s}\right)^2 = \Delta_s^2 = \frac{e \cdot P \cdot f_0}{2 \cdot i_s} = \frac{e \cdot P \cdot f_0 \cdot h}{2 \cdot i_w}$

Δs = relative Schwankung dunkler Bildpartien (0,1)
$h = \frac{i_w}{i_s}$ = Helligkeitsumfang (100)

$$\left(i_w\right)_{\min} = \frac{e \cdot P \cdot f_0 \cdot h}{2 \cdot \Delta_s^2}$$

$$\Phi_{\min} = \frac{i_w}{\varrho} = \frac{e \cdot P \cdot f_0 \cdot h}{2 \cdot \Delta_s^2 \cdot \varrho} \qquad (1)$$

ϱ = Ausbeute der Photokathode (50 μA/Lumen)

Das Einsetzen der angegebenen Zahlenwerte ergibt

$$\Phi_{\min} = \underline{4 \cdot 10^{-4}\,\text{Lumen}}$$

Die auf dem Leuchtschirm der Kathodenstrahlröhre vorhandene Flächenleuchtdichte beträgt

$$B = \frac{U_a \cdot J_a \cdot \eta_{Sch} \cdot P}{A_{Sch}} \qquad (2)$$

B = Flächenleuchtdichte in Stilb $\left(\frac{\text{HK}}{\text{cm}^2}\right)$
U_a = Anodenspannung ($27 \cdot 10^3$ V)
J_a = Strahlstrom ($15 \cdot 10^{-6}$ A)
η_{Sch} = Schirmausbeute $\left(1 \frac{\text{HK}}{\text{w}}\right)$
P = Punktezahl des Fernsehbildes ($0{,}5 \cdot 10^6$)
A_{Sch} = Leuchtschirmfläche (48 cm²)

Was für die der Röhre 5ZP16 entsprechenden Zahlenwerte ergibt $B = \underline{4{,}2 \cdot 10^{+3}\ \text{Stilb}}$

Der durch den Film durchtretende Lichtstrom wird

$$\Phi = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{D}{f}\right)^2 \cdot \frac{A_F}{P} \cdot B \cdot t \qquad (3)$$

$\frac{D}{f}$ = relative Öffnung des Objektives
A_F = Fläche des Filmbildes (bei 16 mm Schmalfilm: 0,75 cm²)
t = Transparenz aller Linsen und «weisser» Filmstellen für die verwendete Wellenlänge von λ = 370 mμ (0,5)

Die minimal notwendige relative Öffnung des abbildenden Objektives wird

$$\left(\frac{D}{f}\right)^2_{\min} = \frac{4\,\Phi_{\min} \cdot P}{\pi\, A_F \cdot B \cdot t} = \frac{2 \cdot e \cdot P \cdot f_0 \cdot h}{\pi \cdot \Delta_s^2 \cdot U_a \cdot J_a \cdot \eta_{Sch} \cdot t \cdot \varrho \cdot A_F} \cdot A_{Sch} \qquad (4)$$

Das Einsetzen der angegebenen Zahlenwerte führt zu folgendem Resultat für die Leuchtpunkt-Abtastung von 16-mm-Schmalfilm:

$$\frac{D}{f} \geqslant \frac{1}{2{,}5}$$

für Normalfilm ($A_F = 3$ cm²) $\frac{D}{f} \geqslant \frac{1}{5}$

Diese Werte stimmen mit der Erfahrung ziemlich gut überein. Jedenfalls verlangt der Leuchtpunkt-Abtaster bei den angegebenen Qualitätsansprüchen und besonders bei Schmalfilmabtastung eine Optik von grosser relativer Öffnung, was bei der verlangten Schärfe der Abbildung schon ein hochkorrigiertes Spezialobjektiv erfordert. Der Konstrukteur eines guten Filmabtasters muss also mit der zur Verfügung stehenden Lichtmenge sehr sparsam umgehen, und es lohnt sich, nochmals alle Faktoren zusammenzustellen, die den Rauschabstand beeinflussen.

Wenn der Leuchtpunkt der Kathodenstrahlröhre auf eine Fläche fokussiert ist, die den Bildpunktabmessungen entspricht, so gilt

$$J_a = \sigma \cdot \frac{A_{sch}}{P} \qquad (5)$$

σ = Stromdichte im Elektronenstrahl

Die Gleichungen (1), (2), (3) und (5) ergeben zusammen:

$$\frac{h}{\Delta_s^2} = \frac{\pi}{2 \cdot e \cdot f_0} \cdot \underbrace{\frac{1}{P^2}}_{\text{I}} \cdot \underbrace{U_a \cdot \sigma \cdot \eta_{sch}}_{\text{II}} \cdot \underbrace{\frac{D^2}{f}}_{\text{III}} \cdot \underbrace{A_F \cdot t}_{\text{IV}} \cdot \underbrace{\varrho}_{\text{V}} \qquad (6)$$

Für diesen Ausdruck ist ein möglichst hoher Wert anzustreben, das heisst, jeder der Faktoren I bis V ist so gross als möglich zu wählen.

$$\mathrm{I} \longrightarrow \frac{1}{P^2}$$

Dieser Faktor stellt zwei Tatsachen mathematisch dar: Erstens, dass die statistische Helligkeitsschwankung eines Bildpunktes von der Anzahl der für diesen Bildpunkt zur Verfügung stehenden Lichtquanten abhängt und zweitens, dass die Leuchtpunktfläche um einen der Bildpunktzahl umgekehrt proportionalen Faktor verkleinert auf das Filmbild abgebildet wird. Die praktische Folge dieser Tatsache ist die, dass der Lichtbedarf mit der zweiten Potenz der Bildpunktzahl, das heisst mit der vierten Potenz der Zeilenzahl, wächst, wodurch bei hohen Zeilenzahlen Schwierigkeiten auftreten können, die bei niederen Zeilenzahlen noch nicht bemerkt wurden.

$$\mathrm{II} \longrightarrow U_a \cdot \sigma \cdot \eta_{sch}$$

Dieser Faktor zeigt, welche Eigenschaften der Kathodenstrahlröhre vor allem anzustreben sind. Die Stromdichte σ hängt von der Emissionsstromdichte der Kathode und der Öffnung der Elektronenoptik ab, wenn nicht Abbildungsfehler oder die Strahlverbreiterung durch gegenseitige Abstossung der Elektronen die Leuchtpunktfläche vergrössern.

Die Grössen U_a und η_{sch} sind nicht unabhängig voneinander: Bei zu kleiner Strahlspannung bleiben die Elektronen in der hinter dem Leuchtschirm angebrachten Metallisierung stecken, bei zu grosser Spannung durchschiessen sie den Leuchtschirm ohne Energieabgabe.

Der Leuchtschirm muss ausser einem guten Wirkungsgrad η_{sch} auch eine kurze Nachleuchtdauer aufweisen, da die Lichtleistung des nachleuchtenden Schweifes hinter dem Leuchtpunkt für den Abtastvorgang verloren ist und nur zusätzliches Rauschen erzeugt.

$$\mathrm{III} \longrightarrow \left(\frac{D}{f}\right)^2$$

Wie schon erwähnt, sind hochwertige Objektive grosser relativer Öffnung unumgänglich notwendig. Sie unterscheiden sich von photographischen Objektiven vor allem dadurch, dass sie für die Wellenlänge des Leuchtschirmlichtes auskorrigiert und noch genügend transparent sein müssen. (Bei der heute meistverwendeten Röhre 5ZP16 beträgt diese Wellenlänge 370 mμ, liegt also im Ultraviolett.)

$$\mathrm{IV} \longrightarrow A_F \cdot t$$

Leider wird der Lichtbedarf durch kleine Filmformate umgekehrt proportional zur Bildfläche vermehrt. Ein 16-mm-Schmalfilm-Abtaster braucht 4,6 mal mehr Licht als ein gleichwertiger Abtaster für Normalfilm. Um die Transparenz t des optischen Systems nicht durch einen Schleier auf dem Film zu verkleinern, sind möglichst schleierarme Filmkopien anzustreben.

$$\mathrm{V} \longrightarrow \varrho$$

Es sind unbedingt die empfindlichsten, herstellbaren Photokathoden zu verwenden. Die Ausbeute moderner Photozellen ist nicht mehr weit von der theoretischen Grenze einer 100prozentigen Quantenausbeute entfernt. Eine Empfindlichkeitssteigerung kann daher den Lichtbedarf eines Leuchtpunkt-Abtasters nicht mehr wesentlich reduzieren, hingegen ist es interessant, Kathoden mit besonders geringer thermischer Emission zu verwenden.

Der optische Ausgleich der Filmbewegung

Für die Abtastung von Filmen ist der Leuchtpunkt-Abtaster nach Fig. 4 zu ergänzen durch eine Anordnung von teilweise beweglichen optischen Elementen, die das Raster auf dem Leuchtschirm derart auf den kontinuierlich durchlaufenden Film abbilden, dass das Rasterbild gegenüber dem Film stillsteht. Da alle Filmbilder gleich behandelt werden müssen, soll dieses Bild des Leuchtschirm-Rasters dem Film nur über eine der Filmbildhöhe entsprechende Strecke nachfolgen und dann auf das nächstfolgende Filmbild überblendet werden. Die Überblendung soll so vor sich gehen, dass die Summe der auf die beiden Filmbilder fallenden Lichtströme über das ganze Bildfeld konstant ist (Fig. 5).

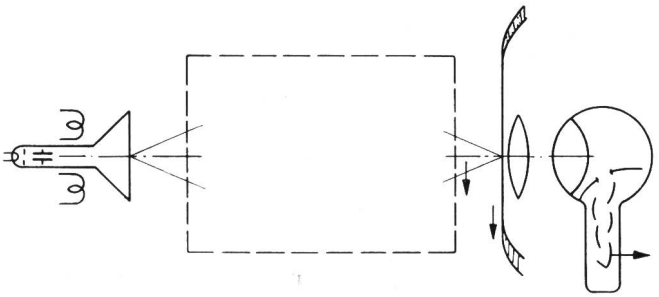

Fig. 5. Prinzip eines Leuchtpunkt-Filmabtasters mit optischem Ausgleich der Filmbewegung

Das analoge Problem des optischen Ausgleichs der Filmbewegung trat schon im Anfang der Filmtechnik auf, bevor man zur Projektion von Filmen in Kinotheatern allgemein zum ruckweisen Filmtransport mit Malteserkreuz überging. Aus jener Zeit stammen verschiedene Lösungsvorschläge, von denen nachfolgend drei besonders bekannte etwas ausführlicher dargestellt seien.

1. Das starre Spiegelrad

Fig. 6 zeigt, wie ein Leuchtpunkt-Abtaster unter Verwendung eines starren Spiegelrades funktionieren würde. Das Spiegelrad ist mit dem Filmtransport gekoppelt und dreht sich mit der Hälfte der Winkelgeschwindigkeit, mit der sich der Film, vom Objektiv aus gesehen, bewegt. Das gespiegelte Bild des Filmes scheint daher für das Objektiv stillzustehen.

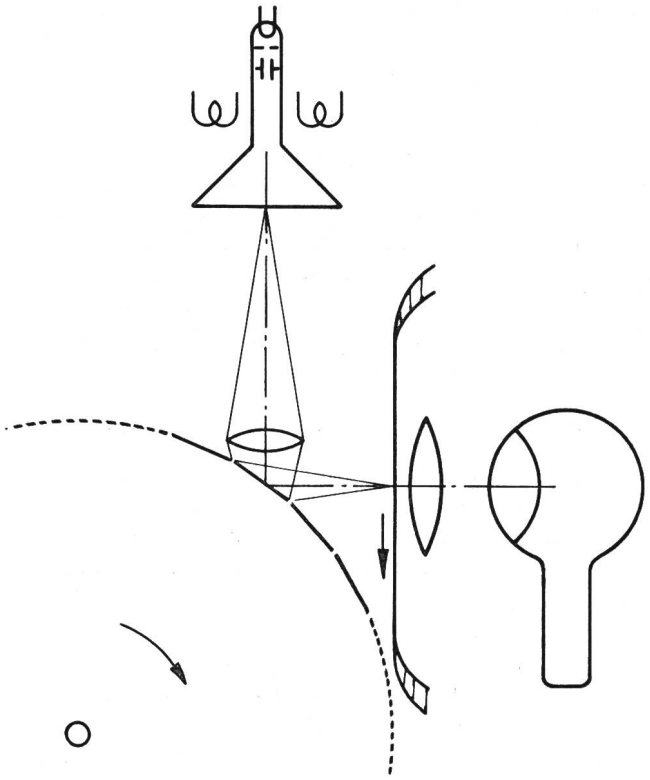

Fig. 6. Prinzip eines Leuchtpunkt-Filmabtasters mit optischem Ausgleich der Filmbewegung durch ein starres Spiegelrad

Diese Lösung scheitert an konstruktiven Schwierigkeiten. Mit einer Anordnung des Spiegelrades im telezentrischen Strahlengang, zwischen zwei Hälften des aufgeteilten Objektives und Bewegung des Filmes auf einer gekrümmten Bahn, lässt sich zwar auch bei grossen Objektivöffnungen eine befriedigende Abbildung erzielen, das Spiegelrad bekommt jedoch dann zu grosse Abmessungen. Wollte man zum Beispiel die optischen Qualitäten des *Mechau*projektors mit einem starren Spiegelrad realisieren, so müsste dieses 100 Spiegel und einen Durchmesser von 5,5 Metern aufweisen.

2. *Das rotierende Prisma*

Der optische Ausgleich könnte grundsätzlich auch nach Fig. 7 funktionieren, da ein Filmbild, durch ein Prisma mit parallelen Endflächen hindurch betrachtet, um eine vom Drehwinkel abhängige Strecke verschoben erscheint. Bei richtiger Dimensionierung und synchronem Antrieb von Film und Prisma scheint tatsächlich für das vom Leuchtschirm ausgehende Licht der Film stillzustehen.

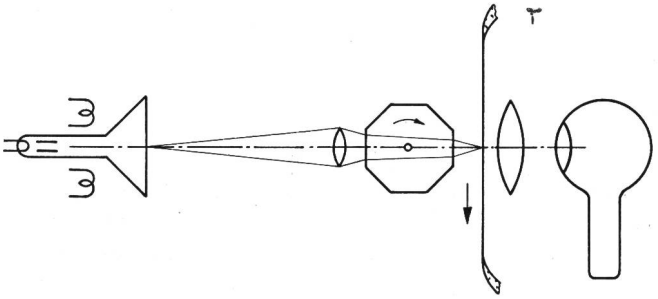

Fig. 7. Prinzip eines Leuchtpunkt-Filmabtasters mit optischem Ausgleich der Filmbewegung durch einen rotierenden Prismenkörper

Die Schwierigkeiten liegen auch hier in der quantitativen Dimensionierung. Das Prisma erzeugt chromatische Fehler und Astigmatismus, sobald nicht mit sehr kleinen Öffnungen und Ablenkwinkeln gearbeitet wird. 16 Flächen am Prisma gelten für einen Schmalfilmprojektor als Minimum. Dies begrenzt die Objektivöffnung auf einen Wert, der weit unter dem liegt, der nach Gleichung (4) gefordert werden muss (vgl. [6, 7]).

3. *Das Linsenrad*

Im Gegensatz zu gewissen mechanischen Filmabtastern, die an Stelle einer *Nipkow*scheibe einen Linsenkranz zur Bildzerlegung verwendeten, geht es bei Fig. 8 nur darum, durch eine Anzahl von Linsen, die mit mindestens einem Rad umlaufen, die Filmbewegung optisch auszugleichen.

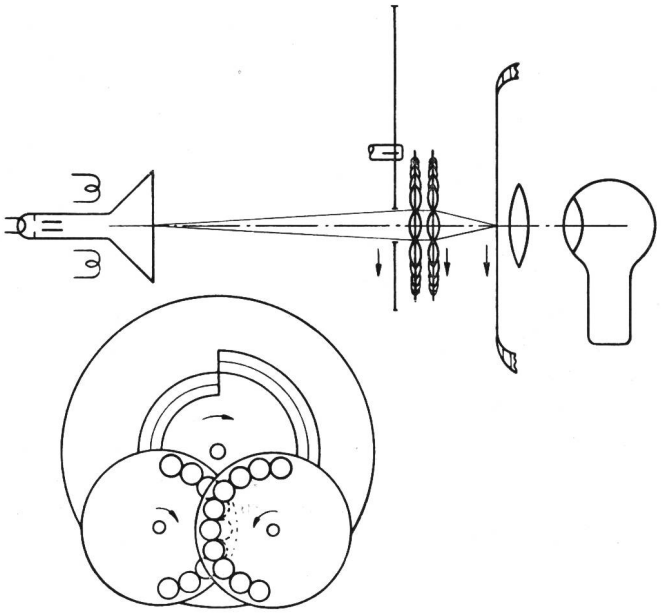

Fig. 8. Prinzig eines Leuchtpunkt-Filmabtasters mit optischem Ausgleich der Filmbewegung durch rotierende Linsenräder

In einem von der *Farnsworth Television Inc.* in Amerika gebauten Filmabtaster befinden sich die Linsen auf zwei gegenläufigen Scheiben nach Fig. 8. Eine dritte Scheibe mit einem spiralförmigen Schlitz gibt jeweils ein Linsenpaar für die Abbildung frei und überblendet auf das nächstfolgende.

Die Schwierigkeiten liegen auch hier in der Beschränkung der Objektivöffnung, indem der Linsendurchmesser immer kleiner als die Filmbildhöhe sein muss. Für Schmalfilmabtastung ist die daraus resultierende Helligkeit etwa um einen Faktor 16 zu klein (vgl. [8]).

4. *Der Ausgleichsprojektor nach Mechau*

Vom optischen Gesichtspunkt aus ist zweifellos der Projektor von *E. Mechau* die beste Lösung zum opti-

schen Ausgleich der Filmbewegung von allen bisher genannten. Er ist auch der einzige Filmprojektor mit kontinuierlichem Filmtransport, der sich im praktischen Betrieb gegenüber der Konkurrenz durch Projektoren mit ruckweisem Transport eine gewisse Zeit lang behaupten konnte. Ein erstes Modell wurde schon 1912 gebaut, und seine Blütezeit erlebte der *Mechau*projektor etwa 1928 bis 1935.

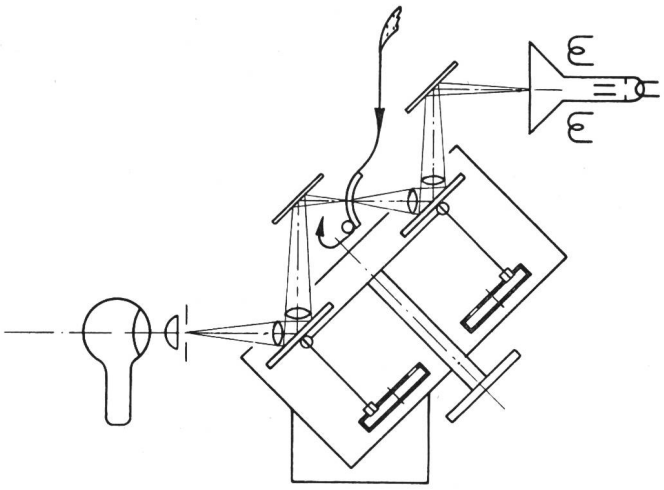

Fig. 9. Prinzip eines Leuchtpunkt-Filmabtasters mit optischem Ausgleich der Filmbewegung durch Verwendung des Projektors von E. Mechau.

Mechau verwendet eine Anordnung von acht Spiegeln, die sich gesamthaft um die in Fig. 9 angegebene Achse drehen. Jeder einzelne Spiegel hat zudem eine eigene Kurvenscheibe, nach der er eine Drehbewegung um eine senkrecht zur Zeichenebene stehende Achse ausführt. Erst diese zweite Bewegung bewirkt den Ausgleich des Filmvorschubes.

Durch die Aufteilung der zwei Funktionen der Spiegel, nämlich des Einschwenkens in den optischen Strahlengang und die eigentliche Ausgleichsbewegung, erreichte Mechau zwei wichtige Vorteile gegenüber dem starren Spiegelrad: Erstens fällt die vorhin erwähnte Forderung nach einem Rad von 100 Spiegeln und 5,5 m Durchmesser weg, und zweitens können dieselben Spiegel an einer andern Stelle ihres Umlaufes noch ein zweites Mal nach einem anderen Teil der Kurvenscheiben betrieben werden. Von dieser Möglichkeit machte Mechau Gebrauch, um während der Überblendungszeit die Lichtbündel, die nach dem Durchtritt durch zwei verschiedene Filmbilder stark divergieren, wieder zur Deckung zu bringen. Beim Betrieb als Kinoprojektor ist dieser optische Ausgleich auf der Beleuchtungsseite unumgänglich notwendig, erstens, damit das Bild nur auf der Leinwand und nicht zeitweise auch darüber und darunter erscheint, zweitens vervielfacht er die Helligkeit, und drittens setzt er eine Ungleichmässigkeit in der Bildfeldausleuchtung gegenüber der Leinwand still, was erst das Flimmern ganz vermeidet. Alle Spiegel liegen im telezentrischen Strahlengang, so dass sie nicht oberflächenverspiegelt zu sein brauchen. Dank der Orthogonalität der Überblendungsbewegung zur Ausgleichsbewegung wird die zur Korrektur des Schrumpfungszustandes des Filmes notwendige multiplikative Beeinflussung der Ausgleichsbewegung besonders einfach [9].

Die Konstruktion von Mechau erlaubt die Verwendung eines hochwertigen Objektives mit der grossen relativen Öffnung von 1:2,1, was für die Zwecke der Leuchtpunkt-Abtastung alle Lichtsorgen beseitigen könnte, wenn nicht die zahlreichen und dicken Linsen das ultraviolette Licht zu etwa 90% absorbieren würden. Tatsächlich entsprechen die Verhältnisse ungefähr dem vorhin berechneten erwünschten Wert für Normalfilm mit $t = 0{,}5$ und $\frac{D}{f} = 1:5$, und das abgetastete Bild ist von ansprechender Qualität.

Die Fabrikation der *Mechau*projektoren benötigte einen umfangreichen Park besonderer Präzisions-Werkzeugmaschinen, die seit der Einstellung der Fabrikation kaum mehr vorhanden sind. Es ist kaum damit zu rechnen, dass für die wenigen Interessenten für Fernsehabtaster je wieder *Mechau*projektoren fabriziert werden. Der Nachbau von Einzelexemplaren ist nur dann interessant, wenn es gelingt,

a) den Mechanismus wesentlich zu vereinfachen (besonders die hochpräzisen Spiegelantriebe),
b) ein Modell für Schmalfilm zu realisieren, und
c) eine für ultraviolettes Licht besser geeignete Optik zu finden.

5. *Der Ausgleichsprojektor der Bell Telephone Laboratories*

Fig. 10 zeigt das Prinzip der Lösung der Bell Laboratories in Amerika, die speziell zum Zwecke der Fernseh-Filmabtastung in den letzten Jahren entwickelt wurde [10]. Die optische Anordnung gleicht der in Fig. 6 beschriebenen, denn sie enthält als Hauptbestandteil ebenfalls ein Spiegelrad mit 18 Spiegeln, die jedoch um eine zur Radachse parallele Achse drehbar sind und von einer gemeinsamen Kurvenscheibe zusätzlich zur Radumdrehung verdreht werden. Die oberflächen-metallisierten Spiegel sind direkt vor dem Film in den Strahlengang eingeschaltet und nicht telezentrisch. Dadurch muss eine zusätzliche Bedingung zwischen dem Weg des Spiegels und seiner Verdrehung erfüllt sein, die unter anderem besagt, dass der Drehwinkel zwischen zwei aufeinanderfolgenden Spiegeln gleich demjenigen zwischen starren Spiegeln auf einem Rad mit doppelter Spiegelzahl sein muss. Die Lösung der Bell Laboratories unterscheidet sich also von der in Fig. 6 dargestellten unter anderem dadurch, dass sie bei gleichem Objektiv nur die Hälfte der Spiegel braucht und diese auch im nicht-telezentrischen Strahlengang verwenden kann. Andererseits ist die Justierung von 18 beweglichen Spiegeln heikler; der wegen der Bewegung notwendige Spalt zwischen den Spiegeln bedingt ein Helligkeitsflimmern, das durch eine Helligkeits-

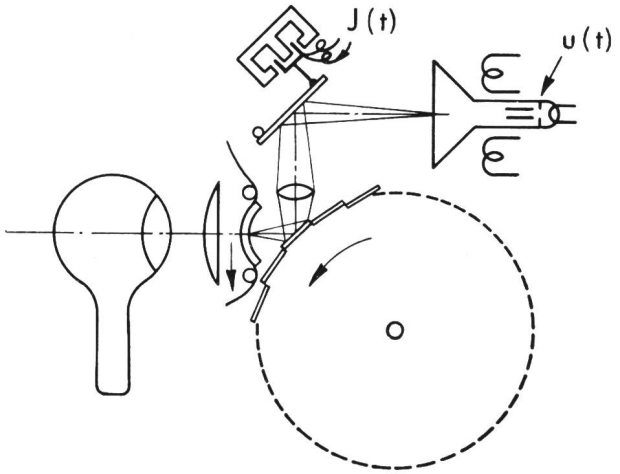

Fig. 10. Prinzip eines Leuchtpunkt-Filmabtasters mit optischem Ausgleich der Filmbewegung nach dem Verfahren der Bell Laboratories (A. G. Jensen)

steuerung des Leuchtfleckens auf der Kathodenstrahlröhre ausreguliert werden muss. Diese Helligkeitsregulierung verringert das Flimmern, auch wenn es zum Beispiel im ungleichen Reflexionsvermögen der 18 Spiegel seine Ursache haben sollte. Auch für die Gewährleistung der nötigen Präzision in der Lage des auf den bewegten Film abgebildeten Leuchtschirmrasters verwenden die Bell Laboratories eine Servosteuerung, welche die Abbildung zwischen einem Perforationsloch des Filmes und der ihm entsprechenden Stelle in der Leuchtschirmebene kontrolliert. Jede Abweichung zwischen der gewünschten und der tatsächlichen Höhenlage des Perforationsloches wird einem magnetisch verdrehbaren Spiegel mitgeteilt, der den Fehler korrigiert.

Der Ausgleich des Schrumpfungszustandes kann bei der Anordnung der Bell Laboratories nicht durch Veränderung der Spiegeldrehung vorgenommen werden, sondern geschieht durch Abstandsänderung zwischen Film und Spiegelrad. Dass dann die Krümmung der Filmbahn nicht mehr stimmt, soll nach Angaben der Erbauer nicht stören. Ebenso soll die Filmkrümmung noch innerhalb des Tiefenschärfebereiches der Optik liegen, wenn deren relative Öffnung 1:4 nicht überschreitet.

Zur Abtastung von Schmalfilm sind die Genauigkeitsanforderungen noch grösser. Jedenfalls dürfte es schwierig sein, bei der Konstruktion eines Schmalfilm-Abtasters nach dem Prinzip der Bell Laboratories die Linsenöffnung über 1:4 hinaus zu erhöhen, wie dies nach Gleichung (4) dringend erwünscht wäre.

Gesichtspunkte zur Entwicklung einer eigenen Lösung

Es soll nun versucht werden, eine Lösung für einen Fernseh-Filmabtaster anzugeben, welche die Leuchtpunkt-Abtastung eines kontinuierlich transportierten Filmes mit optischem Ausgleich der Filmbewegung praktisch verwirklicht, ohne die erwähnten Nachteile der bekannten Lösungen aufzuweisen. Es sind dazu vor allem folgende Gesichtspunkte massgebend:

1. Durch Anwendung von Servosteuerungen kann jedes Verfahren verbessert werden. Die Möglichkeiten derartiger Servosteuerungen sind aber nicht unbegrenzt; sie arbeiten um so besser, je kleiner die Fehler sind, die sie auszugleichen haben. Eine Positionssteuerung, die auch grössere Fehler korrigieren könnte, wäre nicht mehr weit entfernt vom elektronischen Ausgleich der Filmbewegung, der schon im Zusammenhang mit den *Tabellen I* und *II* als Variante d) diskutiert wurde. Unabhängig von der Anwendung einer Servosteuerung ist also stets die schon ohne Regelung beste Lösung zu suchen.

2. Es kommt nur eine Lösung in Frage, bei der die relative Öffnung des Objektives durch keine Nebenbedingungen begrenzt ist, da besonders bei der Abtastung von Schmalfilm unbedingt die lichtstärksten Objektive zu verwenden sind, die überhaupt mit der notwendigen Auflösung und Ultraviolett-Transparenz hergestellt werden können. Daraus folgt erstens, dass bei gekrümmter Filmbahn die Bildfeldwölbung auf eine Zylinderfläche korrigiert werden müsste, wie dies beim *Mechau*projektor mit Hilfe von torusförmiggewölbten Linsen geschah, oder dass ein ebenes Filmfenster anzustreben ist. Zweitens zeigen einfache Überlegungen, dass die notwendige Glasdicke und damit die Ultraviolett-Absorption der Objektivlinsen bei einer Anordnung von Spiegeln im telezentrischen Strahlengang grösser wird als bei der anzustrebenden Lösung mit einem einfachen Objektiv.

3. Die Präzision der Abbildung ist sicher dann am ehesten gewährleistet, wenn möglichst wenige optische Abbildungssysteme am Abtastvorgang beteiligt sind, deren Justierung sich mit der Zeit verändern könnte. Auch im Interesse der Einfachheit ist die minimale Zahl der zur Abbildung nötigen optischen Systeme anzustreben.

4. Die Helligkeitsschwankungen während des Überblendungsvorganges sollen beliebig klein gemacht werden können.

5. Im Interesse eines möglichst grossen Helligkeitsumfanges soll auf dem ganzen Weg der optischen Abbildung möglichst wenig Streulicht entstehen. Es ist also eine Lösung mit möglichst wenigen für Staub zugänglichen Glasoberflächen und Spiegeln anzustreben.

6. Es soll eine Einrichtung vorhanden sein, die es gestattet, die Ausgleichsbewegung dem Schrumpfungszustand des Filmes anzupassen, ohne dass durch diese Veränderung andere Nachjustierungen nötig werden.

7. Das fertige Gerät soll möglichst wenig bewegte Massen und möglichst kleine Abmessungen aufweisen.

Die minimale Zahl der benötigten optischen Abbildungssysteme

Bei einem Filmprojektor mit optischem Ausgleich der Filmbewegung nehmen gewisse optische Elemente

nur zeitweise am Abbildungsvorgang teil. In diesem Moment bestimmen sie jedoch die optische Achse der Abbildung. Man kann daher auch sagen, dass von den bewegten Elementen jedes sein eigenes Abbildungssystem bestimmt, wobei gewisse Elemente dieser beweglichen Abbildungssysteme allen gemeinsam und fest sein können. Da alle Systeme dieselbe Vergrösserung und dieselbe Öffnung haben, kann der gemeinsame Teil sogar die eigentlich abbildenden Linsen umfassen, und die einzelnen Systeme mit beweglicher optischer Achse können nur noch durch einzelne Spiegel oder Prismen repräsentiert sein, doch ist dies nicht notwendig.

Es ist auffällig, dass verschiedene Lösungen des optischen Ausgleichs eine verschiedene Zahl von Abbildungssystemen aufweisen, obwohl alle Konstrukteure ein Interesse daran hätten, möglichst wenige Einzelsysteme zu verwenden. Offenbar hängt die Anzahl nur von konstruktiven Gegebenheiten und nicht von der Problemstellung selbst ab. Die bisher erwähnten Lösungen benützen zum Beispiel 16 Prismenflächen eines Glaskörpers, 2×24 Linsen auf 2 Linsenrädern oder 8 (Mechau) und 18 (Bell) bewegliche Spiegel auf Spiegelrädern.

Die Zahl notwendiger Abbildungssysteme ist sicher grösser als eins, denn mit nur einem beweglichen System (zum Beispiel mit einem Kippspiegel) liesse sich wohl ein Filmbild stillstehend abbilden, der Übergang zum nächstfolgenden könnte hingegen nicht durch Überblendung stattfinden. Dieser Sachverhalt könnte auch mit einem elektronischen Ausgleich der Filmbewegung verwirklicht werden und wurde schon in jenem Zusammenhang besprochen. Ein Gerät zum optischen Ausgleich der Filmbewegung kann erst mit Hilfe des Überblendungsvorganges die geforderte Konstanz der Abbildung und ihrer Helligkeit gewährleisten. Da es erwünscht ist, dass die Überblendungsdauer die mittlere Projektionsdauer eines Filmbildes nicht übersteigt, so sind in jedem Zeitmoment höchstens zwei optische Systeme an der Abbildung beteiligt. Zwischen zwei Überblendungen liegt eine Zeit, während der nur ein Abbildungssystem in Funktion ist. *Es muss also möglich sein, den gewünschten optischen Ausgleich der Filmbewegung mit nur zwei optischen Abbildungssystemen durchzuführen,* obwohl zurzeit noch keine derartige Lösung bekannt ist.

Unsere Aufgabe besteht darin, dasjenige Abbildungssystem, das die vorerwähnten grundsätzlichen Anforderungen am besten erfüllt, zu verdoppeln, und die optischen Achsen der beiden Teilsysteme geeignet zu bewegen.

Der Wunsch nach einer möglichst lichtstarken Abbildung würde schon durch ein einzelnes Objektiv erfüllt, das für den verwendeten Wellenlängenbereich korrigiert ist und das möglichst wenig ultraviolettabsorbierende Glassorten enthält. Denkt man sich ein derartiges Objektiv so zwischen dem Leuchtschirm der Kathodenstrahlröhre und dem Film angeordnet, dass es das Raster verkleinert auf das Filmbild abbildet, so muss dieses Objektiv zum Zwecke des Ausgleichs der Filmbewegung um einen gewissen Betrag parallel zur Filmvorschubrichtung verschoben werden. Im Moment, in dem auf das nächstfolgende Filmbild überblendet werden muss, soll ein zweites Objektiv mit jenem nächsten Bild wandern und so zur Übernahme der Abbildung bereit sein. Dies bedeutet aber, dass die Hauptpunkte jenes zweiten Objektives von denen des ersten um weniger als die Filmbildhöhe entfernt sein müssen. Es muss also eine Anordnung gefunden werden, die beliebig grosse Öffnungen der zwei gleichartigen Objektive erlaubt, bei einem beliebig kleinen Abstand der entsprechenden Hauptpunkte. Eine einfache Lösung dieses Problems besteht darin, dass man die zwei Hälften eines Objektives verwendet, das durch eine die optische Achse enthaltende Schnittebene halbiert wurde. Diese Lösung ist in Fig. 11 dargestellt und im folgenden näher beschrieben.

Beschreibung des auf Grund der vorerwähnten Überlegungen gebauten Filmabtasters

Kurz zusammengefasst unterscheidet sich das hier zu beschreibende Verfahren zur Fernsehübertragung von Filmen mit optischem Ausgleich der Filmbewegung von den bekannten Lösungen vor allem dadurch, dass nur zwei optische Systeme vorhanden sind, die abwechslungsweise die Abbildung zwischen dem bewegten Film und der für die Fernsehübertragung massgebenden Bildebene besorgen. Dabei werden die optischen Achsen dieser beiden Abbildungssysteme zum Zwecke des Ausgleiches der Filmbewegung einzeln derart bewegt, dass sich jeweils abwechselnd die optische Achse des einen Systems im Sinne der Filmvorschubrichtung bewegt und so ein bestimmtes Filmbild als scheinbar stillstehend abbildet, während die optische Achse des anderen Systems sich entgegen der Filmrichtung vom vorhergehenden zum nächstfolgenden Filmbild zurückbewegt. Die Rückbewegung geschieht etwas rascher als die Bewegung mit dem Film, so dass während einer gewissen Zeitdauer beide Abbildungssysteme je ein Filmbild stillstehend abbilden. Während dieser Zeit wird das neuere Filmbild ein- und das ältere ausgeblendet, so dass jedes System während des Rücklaufes der optischen Achse ausser Betrieb ist.

Ein besonders einfaches Gerät zur Verwirklichung dieses Verfahrens enthält zwei nebeneinander angeordnete Objektive, die das Raster der Leuchtpunkt-Röhre auf den Film abbilden und unabhängig voneinander parallel zur Filmvorschubrichtung verschiebbar sind. Sie sind derart gebaut, dass sich beim Verschieben die Hauptpunkte beider Objektive auf derselben Parallelen zur Filmvorschubrichtung bewegen, was sich am einfachsten durch Verwendung zweier Hälften eines Objektives verwirklichen lässt, das durch eine, die optische Achse enthaltende Schnittebene geteilt wurde. Die Überblendung geschieht

dadurch, dass sich in der Nähe der Objektivpupillen Blenden bewegen, die von der einen Objektivpupille die gleiche Fläche freigeben, wie sie von der andern zudecken.

Diese Anordnung ist in Fig. 11 dargestellt. Darin ist 1 der zu übertragende Film und 2 die für die Fernsehübertragung massgebende Bezugsebene, im vorliegenden Falle die Leuchtschirmfläche der den Leuchtpunkt schreibenden Kathodenstrahlröhre. Film und Leuchtschirm werden aufeinander abgebildet, sowohl durch das Objektiv 3 als auch durch das gleichartige Objektiv 4. Beide sind, unabhängig voneinander, parallel zur Filmrichtung verschiebbar und derart montiert, dass sich die Hauptpunkte beider Objektive auf derselben Parallelen zur Filmrichtung bewegen. 5 ist eine zweiteilige Blende, mit 6 sind die Kurvenscheiben bezeichnet, die die Objektive 3 und 4 verschieben, 7 ist ein Kondensor und 8 die Photokathode.

Jeder Punkt auf dem Leuchtschirm 2 wird wegen der beschriebenen Anordnung durch jedes der beiden Objektive 3 und 4 derart auf den Film 1 abgebildet, dass die Bildpunkte des Objektives 3 gegenüber denjenigen des Objektives 4 in der Filmrichtung verschoben sind. Durch den mit dem Filmvorschub gekuppelten Antrieb 6 werden die beiden Objektive 3 und 4 derart parallel zur Filmvorschubrichtung bewegt, dass jeweils das eine der beiden Objektive 3 und 4 sich im gleichen Sinne wie der Film bewegt und so das Raster auf dem Leuchtschirm 2 als gegenüber dem bewegten Film stillstehend auf diesen abbildet, während sich das andere Objektiv entgegen der Filmvorschubrichtung in diejenige Lage zurückbewegt, die der Abbildung des nächstfolgenden Filmbildes entspricht. Da diese Rückwärtsbewegung gegen den Film etwas rascher als die Bewegung mit dem Film erfolgt, gibt es bei jedem Wechsel der Funktion der beiden Objektive eine gewisse Zeit, während der das Raster auf dem Leuchtschirm gleichzeitig auf dieselbe Stelle in zwei aufeinanderfolgenden Filmbildern abgebildet wird. Während dieser Zeit besorgen die Blenden 5 die Überblendung vom älteren Filmbild auf das neuere.

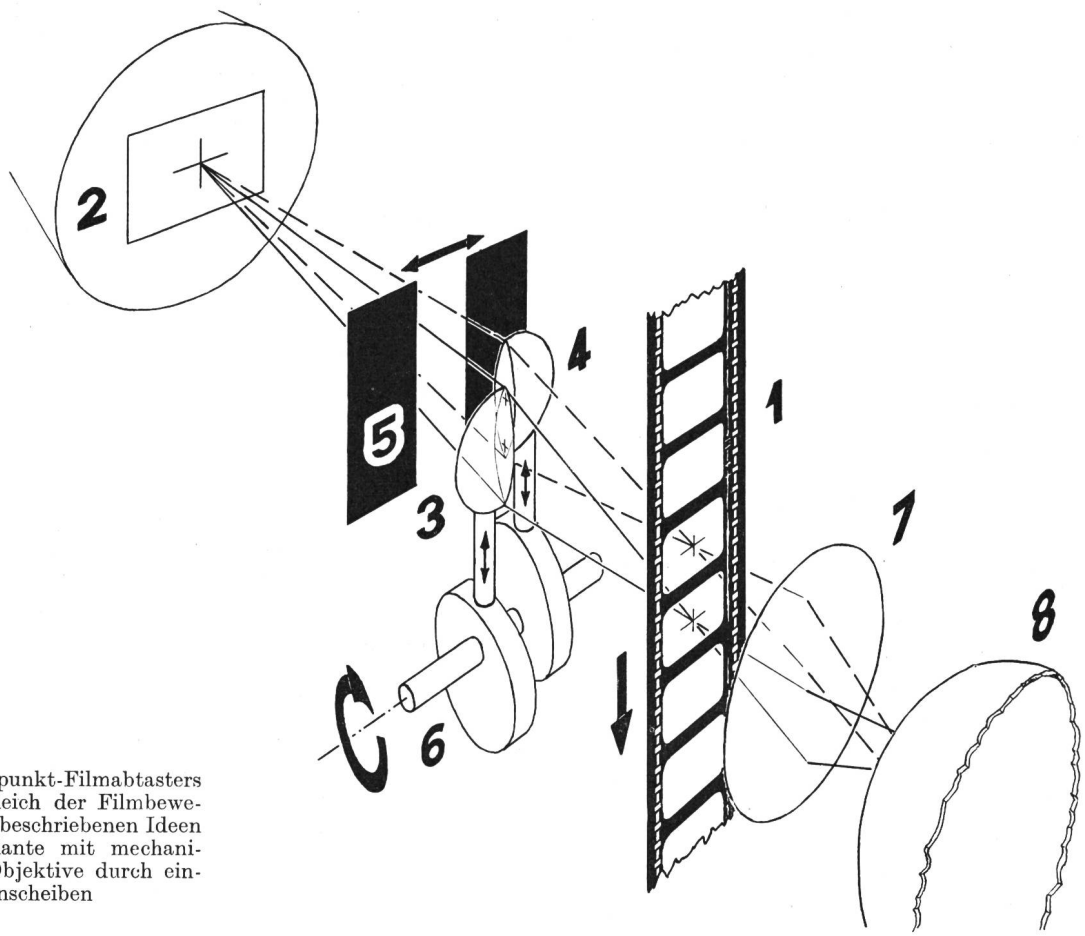

Fig. 11
Prinzip eines Leuchtpunkt-Filmabtasters mit optischem Ausgleich der Filmbewegung nach den hier beschriebenen Ideen des Verfassers. Variante mit mechanischem Antrieb der Objektive durch einfachwirkende Kurvenscheiben

Bei dieser Überblendung soll die Summe der Helligkeiten beider Bilder konstant bleiben. Dies wird dann zwangsläufig erreicht, wenn die Blenden 5 die Fläche der einen Objektivpupille im gleichen Masse freigeben, wie sie die andere Pupillenfläche zudecken. Dies lässt sich durch einen geeigneten Antrieb der Blenden 5 erzwingen, zum Beispiel dadurch, dass die Blendenbleche 5 auf einer relativ grossen rotierenden Scheibe oder Trommel mit horizontaler Achse angebracht werden, so dass sie in der Filmrichtung an den Objektivpupillen vorbei rotieren (vgl. Fig. 17 und 19).

Zum Filmantrieb

Die Filmlänge zwischen aufeinanderfolgenden Perforationslöchern ist vom Schrumpfungszustand des Filmes abhängig und daher keine Konstante. Die Bewegung der Objektive muss jedoch starr mit der Bewegung der Perforation gekoppelt sein, so dass es auf den ersten Blick zweckmässig erscheint, den Film mit einer Zahntrommel anzutreiben, die starr mit dem Antrieb der Objektive verbunden ist. Dabei müsste jedoch wegen der Toleranzen in der Filmlänge ein gewisses Rutschen des Filmes gegen die Zähne in Kauf genommen werden. Dieses ist erfahrungsgemäss beim Normalfilm von 35 mm Breite dank der acht Perforationslöcher je Filmbild gerade noch tolerierbar, beim 16-mm-Tonfilm mit nur einem Perforationsloch je Bild würde es hingegen starke und unregelmässige Störungen im Filmvorschub zur Folge haben.

Grundsätzlich ist von der Filmbewegung nur bekannt, wann ein Perforationsloch einen bestimmten Bezugspunkt passieren sollte. Die Filmbewegung ist auf Grund der Zeitfehler bei den letzten Lochdurchgängen zu extrapolieren und erst nach dem Durchgang eines neuen Loches lässt sich der Fehler der Extrapolation angeben.

Die so definierte Filmbewegung lässt sich am einfachsten erreichen durch Ausfiltern der Geschwindigkeitsschwankungen eines mit Zahntrommel angetriebenen Filmes in einem mechanischen Tiefpassfilter. Der Film macht dann nur noch diejenigen Änderungen der Antriebsgeschwindigkeit mit, die langsam gegenüber der Filmbildfrequenz erfolgen.

Zum Objektivantrieb

Von der Objektivbewegung ist vorerst nur ein Teil festgelegt, nämlich, dass jedes Objektiv während der Zeit, da es die Abbildung vermittelt, mit gleichförmiger Geschwindigkeit den Film verfolgen muss. Die Art der Rückwärtsbewegung ist dagegen noch frei wählbar. Sie soll so gewählt werden, dass die auftretenden Beschleunigungskräfte möglichst klein bleiben. Bezeichnet man das Verhältnis der Dauer der Überblendung zur Wiedergabedauer eines Filmbildes mit ε, und ist f die Filmfrequenz, so kann man angeben, dass jedes Objektiv während der Zeit $\frac{1+\varepsilon}{f}$ dem Film folgen und während der Zeit $\frac{1-\varepsilon}{f}$ zum übernächsten Filmbild zurückbewegt werden muss.

In Fig. 12 ist die beschriebene Bewegung der beiden Objektive graphisch dargestellt. Die Abszisse stellt die Zeit oder den Drehwinkel der gleichförmig rotierenden Kurvenscheiben dar; die Ordinate gibt die Höhenverstellung (im folgenden mit s bezeichnet) der beiden Objektive an. Die schraffierten Flächen entsprechen der Überblendung vom jeweils unten angelangten auf das in jenem Moment oben befindliche Objektiv.

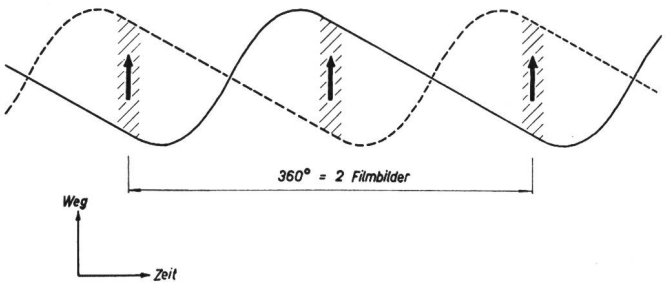

Fig. 12. Schematische Darstellung der Bewegung der beiden Objektive 3 und 4 in Fig. 11

Für die Drehbewegung der Kurvenscheiben gilt:

$$\varphi = \omega \cdot t$$

Die gewünschte Bewegung der Objektive

$$s(\varphi) = s(\omega \cdot t)$$

erfolgt mit einer Momentangeschwindigkeit

$$\frac{ds}{dt} = \omega \cdot \frac{ds}{d\varphi} \quad (\omega = \text{Konst.})$$

und einer Beschleunigung

$$\frac{d^2s}{dt^2} = \omega^2 \cdot \frac{d^2s}{d\varphi^2}$$

Der Antrieb hat also eine Trägheitskraft vom Betrage

$$K = m \cdot \frac{d^2s}{dt^2} = m \cdot \omega^2 \frac{d^2s}{d\varphi^2}$$

zu überwinden, wozu die Kurvenscheiben ein Antriebsmoment

$$M = K \cdot \frac{ds}{d\varphi} = m \cdot \omega^2 \cdot \frac{d^2s}{d\varphi^2} \cdot \frac{ds}{d\varphi}$$

benötigen.

Die Trägheitskräfte sind offenbar dann minimal, wenn die Rückbewegung mit einer konstanten Beschleunigung erfolgt, die auf halbem Wege ihr Vorzeichen umkehrt, wie dies in Fig. 13 dargestellt ist.

Bezeichnet man mit H den dem Filmbildabstand entsprechenden Hub der Objektive, so wird

für $-\frac{\pi}{2}(1+\varepsilon) < \varphi < \frac{\pi}{2}(1+\varepsilon)$

$$s = -\frac{H}{\pi} \cdot \varphi$$

$$\frac{ds}{d\varphi} = -\frac{H}{\pi}$$

$$\frac{d^2s}{d\varphi^2} = 0$$

für $\frac{\pi}{2}(1+\varepsilon) < \varphi < \pi$

$$s = -\frac{H}{\pi} \cdot \varphi + \frac{4H}{\pi^2(1-\varepsilon)^2}\left(\varphi - \frac{\pi}{2}(1+\varepsilon)\right)^2$$

$$\frac{ds}{d\varphi} = -\frac{H}{\pi} + \frac{8H}{\pi^2(1-\varepsilon)^2}\left(\varphi - \frac{\pi}{2}(1+\varepsilon)\right)$$

$$\frac{d^2s}{d\varphi^2} = \frac{8H}{\pi^2(1-\varepsilon)^2}$$

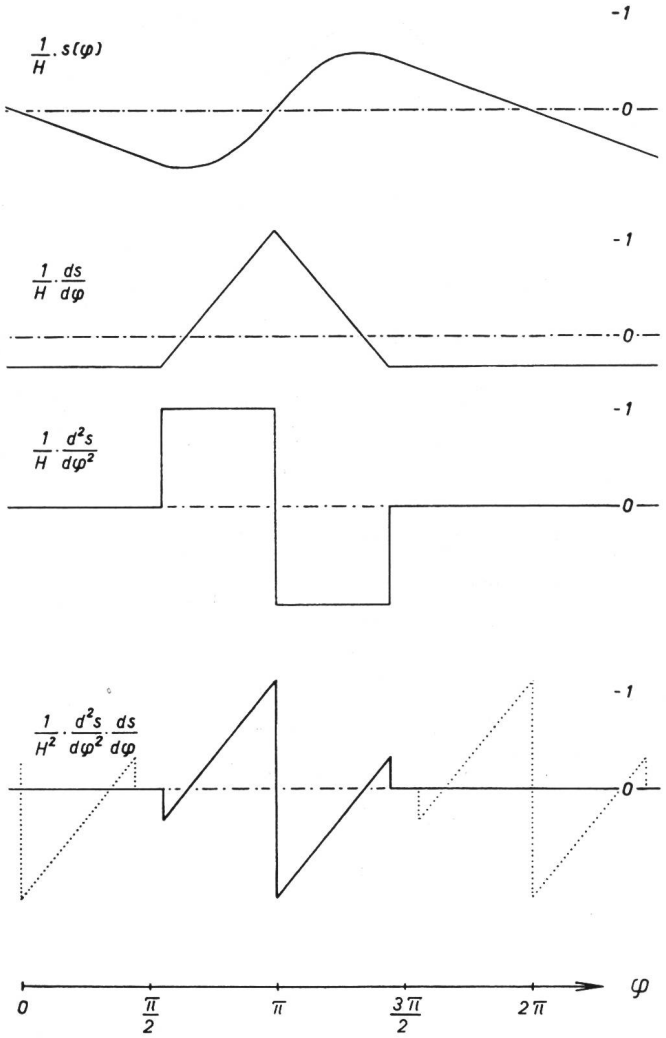

Fig. 13. Normierte Werte von Weg, Geschwindigkeit und Antriebsleistung der Objektive bei einer Überblendungsdauer von $\varepsilon = 0{,}111$

$$\text{für} -\pi < \varphi < -\frac{\pi}{2}(1+\varepsilon)$$

$$s = -\frac{H}{\pi} \cdot \varphi - \frac{4\,H}{\pi^2(1-\varepsilon)^2}\left(\varphi + \frac{\pi}{2}(1+\varepsilon)\right)^2$$

$$\frac{ds}{d\varphi} = -\frac{H}{\pi} - \frac{8\,H}{\pi^2(1-\varepsilon)^2}\left(\varphi + \frac{\pi}{2}(1+\varepsilon)\right)$$

$$\frac{d^2s}{d\varphi^2} = -\frac{8\,H}{\pi^2(1-\varepsilon)^2}$$

Daraus lässt sich unter anderem entnehmen, dass die bei $\varphi = \pi$ auftretenden Maximalwerte der Geschwindigkeit, der Beschleunigung und der Leistung betragen:

$$v = \left|\frac{ds}{dt}\right|_{max} = \frac{\omega \cdot H}{\pi} \cdot \frac{3+\varepsilon}{1-\varepsilon} = H \cdot f \cdot \frac{3+\varepsilon}{1-\varepsilon} \qquad (7)$$

$$b = \left|\frac{d^2s}{dt^2}\right|_{max} = \frac{8\omega^2 \cdot H}{\pi^2} \cdot \frac{1}{(1-\varepsilon)^2} = 8 \cdot H \cdot f^2 \frac{1}{(1-\varepsilon)^2} \qquad (8)$$

$$P_{max} = \left|m \cdot \omega^3 \frac{d^2s}{d\varphi^2} \cdot \frac{ds}{d\varphi}\right|_{max} = \frac{8 \cdot m \cdot \omega^3 \cdot H^2}{\pi^3} \cdot \frac{3+\varepsilon}{(1-\varepsilon)^3}$$

$$= 8 \cdot m \cdot H^2 \cdot f^3 \cdot \frac{3+\varepsilon}{(1-\varepsilon)^3} \qquad (9)$$

An diesen Ausdrücken fällt auf, dass sie bei kleinen ε-Werten nur langsam wachsen, wie dies in Fig. 14 dargestellt ist. Die Materialbeanspruchung ändert sich also bei einer Veränderung der Überblendungszeit, zum Beispiel von 10 % auf 20 %, nur unwesentlich.

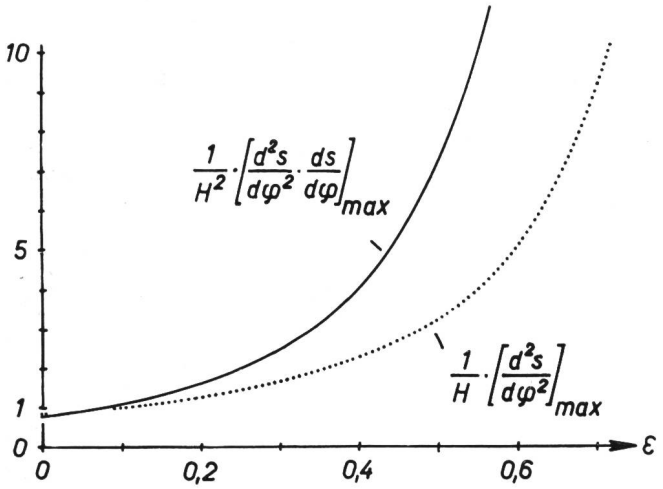

Fig. 14. Zunahme der Beschleunigungs- und Leistungsspitzen im Objektivantrieb mit wachsender Überblendungszeit ε, ausgedrückt in normierten, dimensionslosen Grössen

Bei 16-mm-Schmalfilm wird das Raster der Röhre 5ZP16 um einen Faktor 8:1 verkleinert auf den Film abgebildet, so dass sich $H = 6{,}77$ mm ergibt. Bei Normalfilm von 35 mm Breite wäre $H = 14{,}5$ mm.

In *Tabelle V* sind für verschiedene Werte der Filmbildfrequenz $f = \frac{\omega}{\pi}$ die dazugehörigen Beträge der maximalen Geschwindigkeit und der Beschleunigung der Objektive sowie der Leistungsspitzen angegeben. Alle Resultate beziehen sich auf $\varepsilon = 0{,}111$.

Tabelle V

($\varepsilon = 0{,}111$)	$f =$	16	16⅔	24	25
Maximale Geschwindigkeit in m · sek^{-1}	16 mm	3,8	4,0	5,7	5,9
	35 mm	7,4	8,5	12,2	12,7
Maximale Beschleunigung $\frac{b}{g}$ bezogen auf die Erdbeschleunigung	16 mm	1,8	1,9	4,0	4,4
	35 mm	3,8	4,2	8,6	9,4
Leistungsspitze $\frac{P}{m}$ in W je kg bewegter Masse	16 mm	6,7	7,6	22,5	25,5
	35 mm	30,5	34,5	103	116

Zur konstruktiven Lösung der Filmschrumpfungs-Kompensation

Obwohl die Normen für frisch perforierten Film nur Längenabweichungen von 0,08 % bei Normalfilm und 0,1 % bei Schmalfilm tolerieren, muss man doch wegen der unvermeidlichen Feuchtigkeits- und Temperaturschwankungen mit grösseren Abweichungen rechnen. Für die Dimensionierung von Zahntrommeln sehen die Normen maximale Längenfehler des Filmes von 0,5 % für Dehnung und 1,5 % für Schrumpfung vor.

Die durch die bewegten Objektive vermittelte Abbildung des Rasters auf dem Leuchtschirm muss daher einem in diesen Grenzen längenveränderten Film richtig folgen können. Bezeichnet man die Bewegung dieses Rasterbildes mit $h(\varphi)$, so verlangt die Tatsache der veränderlichen Filmschrumpfung einen veränderlichen Faktor C im Ausdruck

$$h_{\text{korr.}}(\varphi) = C \cdot h(\varphi) \qquad \begin{array}{l} C > 1 \text{ für Dehnung} \\ C < 1 \text{ für Schrumpfung} \end{array}$$

Aus geometrischen Gründen ist

$$h(\varphi) = \left(1 + \frac{1}{v}\right) \cdot s(\varphi)$$

Der Filmschrumpfungsausgleich kann also auf zwei Arten erreicht werden:

a) durch proportionale Veränderung der Objektivbewegung $s(\varphi)$, indem zweckmässigerweise die wirksame Länge eines die Kurvenscheibenbewegung auf dem Objektivschlitten übersetzenden Hebels verändert wird, oder

b) durch Änderung des Vergrösserungsverhältnisses v der Abbildung zwischen Film und Leuchtschirm.

Bei Variante b) ist zu beachten, dass

$$\mathrm{d}\left(\frac{h}{s}\right) = -\frac{\mathrm{d}v}{v^2}$$

$$\frac{\mathrm{d}v}{v} = -(v+1)\,\frac{\mathrm{d}\left(\frac{h}{s}\right)}{\frac{h}{s}}$$

das heisst, der Vergrösserungsmaßstab v ändert sich $(v+1)$mal stärker als der Quotient $\frac{h}{s}$ (für die Röhre 5ZP16 und 16 mm Schmalfilm ist $v = 8$, für Normalfilm $v = 3{,}7$).

Die dadurch bedingte Anpassung der Rastergrösse von —4,5 % bis +9 % ist praktisch noch tolerierbar.

Im folgenden werden verschiedene konstruktive Ausführungen des Objektivantriebes näher betrachtet.

a) Mechanischer Antrieb mit einfach wirkenden Kurvenscheiben

Für den praktischen Gebrauch ist die Anordnung der Prinzipdarstellung in Fig. 11 allenfalls zu ergänzen durch die vorerwähnte Hebelübersetzung, vor allem aber durch Federn zum Andruck der Gleitrollen gegen die Kurvenscheiben, da das Eigengewicht der bewegten Teile bei den 1 g übersteigenden Beschleunigungen hierzu nicht ausreichen kann.

Die Kurvenscheiben vermitteln eine verlustlose Energieübertragung zwischen der rotierenden Antriebswelle und den hin- und herbewegten Objektiven. Die in *Tabelle V* angegebenen Spitzenwerte der Antriebsleistung treten abwechselnd mit beiden Vorzeichen auf, das heisst, das Abbremsen und Beschleunigen der Objektive verlangt eine gewisse Blindleistung. Die entsprechende Energie pendelt hin und her zwischen dem rotierenden Antrieb und den vertikal bewegten Objektivschlitten, deren kinetische Energie sie darstellt. Weitere Blindleistung wird zwischen den Federn und den rotierenden Massen ausgetauscht. Die praktisch verwendeten Synchronmotoren wirken bei den zugelassenen Lastwinkeländerungen derart elastisch, dass sie von dieser Blindleistung nichts übernehmen und nur die Reibungsverluste decken. Die periodischen Impulse zur Beschleunigung der Objektive und das periodische Spannen der Federn bewirken folglich eine Ungleichförmigkeit in der Drehbewegung des Kurvenscheibenantriebes, die unbedingt zu bekämpfen ist, weil sie sich dem Filmvorschub aus den bereits erwähnten Gründen nicht mitteilen kann und daher eine Vertikalverschiebung Δs des abgebildeten Filmbildes bewirkt.

Bei einem elastischen Antrieb, der nur die Reibungsverluste deckt, gilt für den beschriebenen Objektivantrieb der Energiesatz in der Form:

$$\frac{\theta}{2} \cdot \omega^2 + \frac{m}{2} \cdot \left(\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t}\right)^2 + F \cdot s = \text{konst.}$$

θ = Trägheitsmoment aller starr mitrotierenden Massen.
m = Masse der um s verschobenen Konstruktionsteile (Objektivmasse).
F = Federkraft einer (sehr langen) Feder.

Wegen $\omega = \frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}t}$ kann man auch schreiben

$$\frac{\omega^2}{2}\left(\theta + m\left(\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}\varphi}\right)^2\right) + F \cdot s = \text{konst.}$$

Wenn die Federn bis zur Filmbildfrequenz $f_{\max}$ das Abheben von der Kurvenscheibe verhindern sollen, so muss nach Gleichung (8) gelten:

$$F = 8 \cdot m \cdot H \cdot f^2_{\max} \cdot \frac{1}{(1-\varepsilon)^2}$$

Mit dem Mittelwert

$$M = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi}\left(\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}\varphi}\right)^2 \mathrm{d}\varphi$$

kann man eine Drehzahlabweichung $\Delta\omega$ finden aus

$$\frac{(\omega + \Delta\omega)^2}{2} \cdot \left\{\theta + m\left[\left(\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}\varphi}\right)^2 - M\right]\right\} + F \cdot s = \frac{\omega^2}{2} \cdot \theta$$

was für $\frac{\Delta\omega}{\omega} \ll 1$ ergibt

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} = \frac{m}{2\theta}\left[M - \left(\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}\varphi}\right)^2\right] - \frac{F}{\omega^2\theta} \cdot s$$

$$\boxed{\frac{\Delta\omega}{\omega} = \frac{m}{\theta}\left\{\frac{1}{2}\left[M - \left(\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}\varphi}\right)^2\right] - \frac{8}{\pi^2}\cdot\frac{1}{(1-\varepsilon)^2}\cdot\frac{f^2_{\max}}{f^2}\cdot H\cdot s\right\}} \tag{10}$$

Der Fehler in der Vertikalbewegung Δs wird

$$\frac{\Delta s}{H} = \frac{\Delta\varphi}{\pi} = \frac{1}{\pi}\int \Delta\omega\, dt = \frac{1}{\pi}\int\frac{\Delta\omega}{\omega}\,\mathrm{d}\varphi$$

$$\boxed{\frac{\Delta s}{H} = \frac{m}{\theta}\left\{\frac{1}{2\pi}\int\left[M - \left(\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}\varphi}\right)^2\right]\mathrm{d}\varphi - \frac{8}{\pi^3(1-\varepsilon)^2}\cdot\frac{f^2_{\max}}{f^2}\cdot H\cdot\int s\cdot\mathrm{d}\varphi\right\}} \tag{11}$$

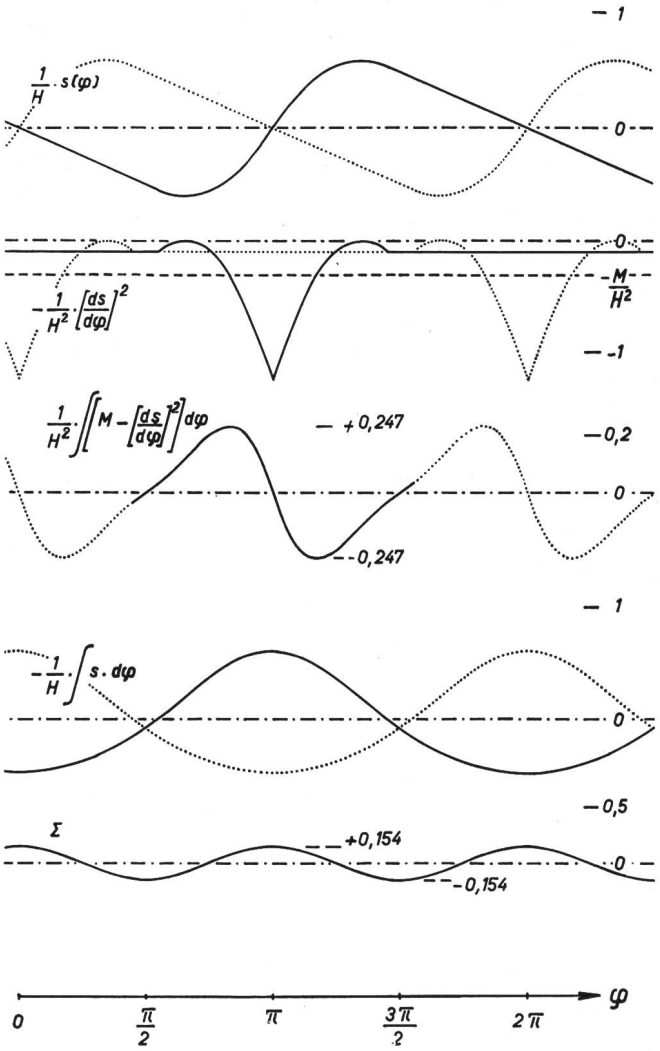

Fig. 15. Potentielle Energie der Federn;
kinetische Energie der Objektivmasse;
durch die kinetische Energie der Objektivmasse verursachter Wegfehler infolge Drehzahlschwankung;
durch die potentielle Energie der Federn verursachter Wegfehler infolge Drehzahlschwankung;
sowie die Summe beider Fehler bei elastischem Antrieb der Kurvenscheiben und der mitrotierenden Massen

Wie in Fig. 15 dargestellt, betragen für $\varepsilon = 0{,}111$ die Maximalwerte von

$$\left|\int\left[M - \left(\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}\varphi}\right)^2\right]\mathrm{d}\varphi\right|_{\max} = 0{,}247\cdot H^2$$

$$\left|\int s\cdot\mathrm{d}\varphi\right|_{\max} = 0{,}154\cdot H$$

Damit wird $\frac{\Delta s}{H} \leqq \frac{m}{\theta}\cdot H^2\left(0{,}0393 + 0{,}0503\,\frac{f^2_{\max}}{f^2}\right)$

Eine vernünftige Genauigkeitsforderung wäre

$$\frac{\Delta s}{H} \leqq \pm\frac{1}{4000}$$

Sie bedingt $$\boxed{\frac{\theta}{m} \geqq H^2\left(157 + 200\frac{f^2_{\max}}{f^2_{\min}}\right)} \tag{12}$$

Für eine Lösung mit doppelt wirkenden Kurvenscheiben ohne Federn wird wegen $F \equiv 0$

$$\boxed{\frac{\theta}{m} = 157\cdot H^2} \tag{13}$$

Wie *Tabelle VI* zeigt, sind die in diesen Formeln geforderten Trägheitsmomente konstruktiv noch gut realisierbar.

Tabelle VI

$\frac{\theta}{m}$ in m² ($\varepsilon = 0{,}111$)		$\frac{f_{\max}}{f_{\min}} = \frac{30}{24}$	$\frac{f_{\max}}{f_{\min}} = \frac{30}{16}$
Einfachwirkende Kurvenscheiben mit Federn	16 mm	0,022	0,039
	35 mm	0,099	0,18
Doppeltwirkende Kurvenscheiben ohne Federn	16 mm	0,0072	0,0072
	35 mm	0,033	0,033

Die beschriebene Lösung des Antriebes der zwei Objektive mit einfach wirkenden Kurvenscheiben und Federn hat den Vorteil, dass die Kurvenscheiben verhältnismässig einfach herzustellen sind und dass man die Federn gleichzeitig zur Aufnahme eines allfälligen Lagerspieles der Antriebshebel verwenden kann.

Ein Nachteil besteht jedoch darin, dass die Federn die vorhin beschriebene Ungleichförmigkeit des zum Antrieb benötigten Drehmomentes verursachen, so dass in allen Fällen, in denen das Bild schon beim Anlauf abgetastet werden soll, ein starrer Antrieb mit momentunabhängiger Drehzahl notwendig ist.

b) Mechanischer Antrieb mit doppeltwirkenden Kurvenscheiben

Bei dem in Fig. 9 dargestellten *Mechau*projektor, der acht Kurvenscheiben enthält, ist das Antriebsdrehmoment keinen Schwankungen unterworfen,

weil die Kurvenscheiben doppeltwirkend gebaut sind, indem aus jeder umlaufenden Scheibe eine Kurvenbahn ausgefräst ist, in der ein radial beweglicher Zapfen gleitet.

Bei der für einen Schmalfilm-Abtaster notwendigen, sehr hohen Genauigkeit ist jedoch die Herstellung dieser Kurvenbahn zu kostspielig, so dass eine Anordnung gesucht werden muss, bei der, wie in Fig. 11, der Scheibenrand für die gewünschte Bewegung massgebend ist. Dies ist tatsächlich nach folgenden Überlegungen möglich:

Kräfte des einen Vorzeichens werden einwandfrei übertragen durch eine in zwei Dimensionen geführte Rolle, die dem Rand der Kurvenscheibe folgt. Für Kräfte beider Vorzeichen genügen daher zwei gegensinnig gekoppelte Rollen auf zwei gegensinnig geformten Kurvenscheiben.

Die gewünschte Bewegungsfunktion $s(\varphi)$ hat dank gewisser Symmetrien die Eigenschaft, dass die gegensinnig geformten Kurvenscheiben aus den normalen durch Übergang zum negativen Argument-φ, das heisst durch eine einfache Umkehrung, erhalten werden (vgl. Fig. 12).

Die Antriebe der beiden Objektive unterscheiden sich nur durch ein um π verschiedenes Argument φ, das heisst durch eine um 180° verschiedene relative Lage der Rollen gegenüber identischen Kurvenscheiben.

Es ist daher möglich, auch einen doppeltwirkenden Antrieb der beiden Objektive mit zwei Kurvenscheiben gleicher Form zu bauen, die, aufeinandergelegt, gleichzeitig hergestellt werden können. Eine mögliche Konstruktion ist im Prinzip in Fig. 16 dargestellt. Die beiden waagrechten Hebel sind zum Zwecke des Ausgleichs der Filmschrumpfung in der Länge verstellbar.

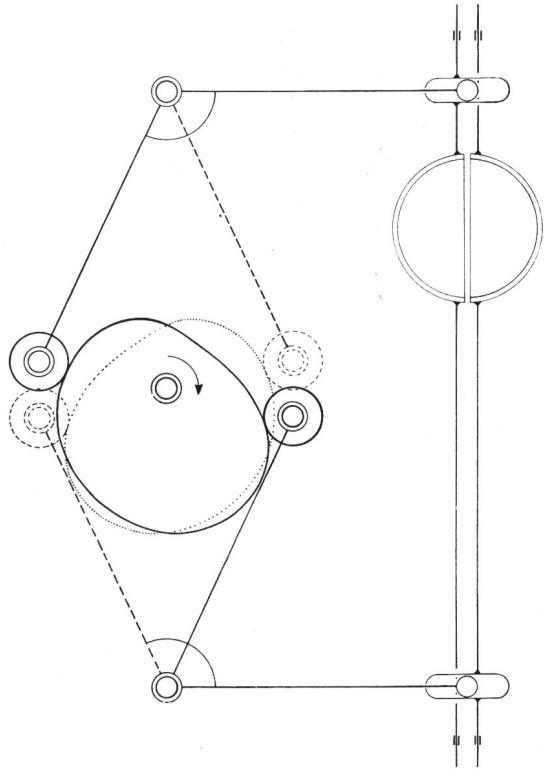

Fig. 16. Schematische Darstellung eines Objektivantriebes mit doppeltwirkenden Kurvenscheiben

Mit der mittleren Achse links rotieren die zwei identischen, jedoch verschieden montierten Kurvenscheiben. Die hintere Kurvenscheibe und ihre Gleitrollen sind der Deutlichkeit halber punktiert gezeichnet.

c) Elektrodynamischer Antrieb mit Servosteuerung der Abbildung eines Perforationsloches

Die Präzision des Abtastvorganges hängt von der Genauigkeit des Filmtransportes und der Objektivbewegung in dem Sinne ab, dass nur die Fehler in der Relativbewegung zwischen Objektiv und Film sichtbar werden. Zu diesem Zwecke ist es grundsätzlich nicht nötig, den Film und die Objektive mit extremer Genauigkeit zu bewegen, sondern es genügt, die Objektivbewegung nach der tatsächlichen Filmbewegung zu richten. Grundsätzlich wäre es also vorteilhafter, die Objektivbewegung mit dem Film und nicht mit dem Antrieb des Filmes zu kuppeln.

Wie bereits in *Tabelle V* dargestellt, betragen die grössten vorkommenden Leistungsspitzen im Objektivantrieb etwa 25 W je kg Objektivmasse bei Schmalfilm und etwa 115 W je kg bei der Normalfilmabtastung. Da auch die lichtstärksten Objektive samt Fassung weniger als 0,5 kg wiegen, so kommt man auch dann mit Antriebsleistungen von 12 bzw. 60 W aus, wenn diese Leistungsspitzen ohne Energierückgewinnung, zum Beispiel mit Elektronenröhren, erzeugt werden müssen.

Es ist also ohne weiteres möglich, die mechanische Anordnung zum Objektivantrieb dadurch zu ersetzen, dass man die Objektive unmittelbar mit elektromechanischen Wandlern zusammenbaut und die gewünschte Bewegung durch Beeinflussung des elektrischen Stromes in diesen Wandlern erzwingt. Diesen Strom kann man von der relativen Lage der Objektive zum bewegten Film abhängig machen, indem man die zwei Abbildungen eines Perforationsloches mit Photozellen kontrollieren lässt und mit dem Photozellenstrom den Antriebsstrom steuert.

Beim Abtaster der Bell Laboratories (vgl. Fig. 9) wird eine ähnliche Servosteuerung als Korrektur der Abbildung entsprechend der Filmbewegung benützt [10]. Während der ungefähr 50% betragenden Überblendungszeit können jedoch nur beide Abbildungen gemeinsam korrigiert werden, so dass die gleiche Filmschrumpfungs-Kompensation wie ohne Servosteuerung notwendig ist.

Im Gegensatz dazu verfolgen bei der hier zuletzt beschriebenen Lösung beide Abbildungen unabhängig voneinander durch je eine Servosteuerung den Film, wobei die Filmschrumpfung automatisch richtig berücksichtigt wird.

Die Genauigkeit der Abtastung hängt damit nur noch von der geometrischen Lage des Filmbildes zum

Perforationsloch ab. Die Aufnahme eines Schmalfilmes geschieht aber ebenfalls durch Festhalten desselben Perforationsloches mit einem Greifer, so dass dieses die beste Referenz zur Bildzentrierung darstellt.

Wie ein derartiger Filmabtaster mit elektronischer Servosteuerung des Antriebes der beiden Objektive verwirklicht werden kann, ist in Fig. 17 im Prinzip dargestellt. Wie in Fig. 11, stellt 1 den abzutastenden Film und 2 den Leuchtschirm der Kathodenstrahlröhre dar. Die beiden Objektive 3 und 4 werden durch die Lautsprecherspulen 6 parallel zur Filmrichtung bewegt. 5 ist eine rotierende Blende, 7 eine Kondensorlinse und 8 die Photozelle, die das zu übertragende Videosignal liefert. Die Hilfseinrichtung zur Kontrolle der Abbildung des Perforationsloches besteht aus einer (in der Figur nicht dargestellten) Beleuchtung der Perforation, der Blende 9, dem Objektiv 10, den vier Photozellen 11 bis 14 und einigen Spiegeln.

Die Wirkungsweise der eigentlichen Filmabtastung wurde schon im Zusammenhang mit Fig. 11 besprochen. Es muss hier nur noch dargestellt werden, weshalb sich bei der in Fig. 17 gewählten Anordnung die beiden Objektive 3 und 4 zwangsläufig derart bewegen, dass sie eine stillstehende Abbildung zwischen dem Leuchtschirm und dem irgendwie bewegten Film vermitteln. Es wird dabei vorausgesetzt, dass die Blende 5 für die zur Abtastung verwendete Lichtwellenlänge undurchsichtig erscheint, dass sie hingegen die zur Abbildung des Perforationsloches verwendete Lichtfarbe durchlässt. Von der zweckmässig beleuchteten Filmperforation würden in der Ebene des Leuchtschirmes 2 zwei Bilder entstehen, die von den zwei Objektiven 3 und 4 herrühren, wenn nicht ein kleiner Spiegel Strahlen von ausserhalb des eigentlichen Filmbildes zur Seite ablenken würde. Wenn sich die Objektive 3 und 4 in der gewünschten Lage befinden, bei der das Leuchtpunktraster genau auf ein Filmbild abgebildet wird, so fallen die Bilder eines Perforationsloches genau auf die Blende 9. Bei Durchsichtbeleuchtung der Perforation wird also stets dann Licht auf die oberen Photozellen 11 und 12 fallen, wenn sich ein Objektiv gegenüber der richtigen Lage nach oben verschoben hat. Im umgekehrten Falle, das heisst einer Abweichung nach unten, werden die unteren Photozellen 13 und 14 beleuchtet. Dabei bildet das Objektiv 10 die Öffnungen der Objektive 3 und 4 derart auf die Spiegelkante zwischen den Photozellenpaaren 11–12 oder 13–14 ab, dass das vom Objektiv 3 her stammende Licht nur auf die Photozellen 12 oder 14 gelangen kann und das von 4 her stammende nur auf 11 oder 13. Wenn nun die Photozellen 12 und 14 im Gegentakt über einen kräftigen Verstärker die zum Objektiv 3 gehörende

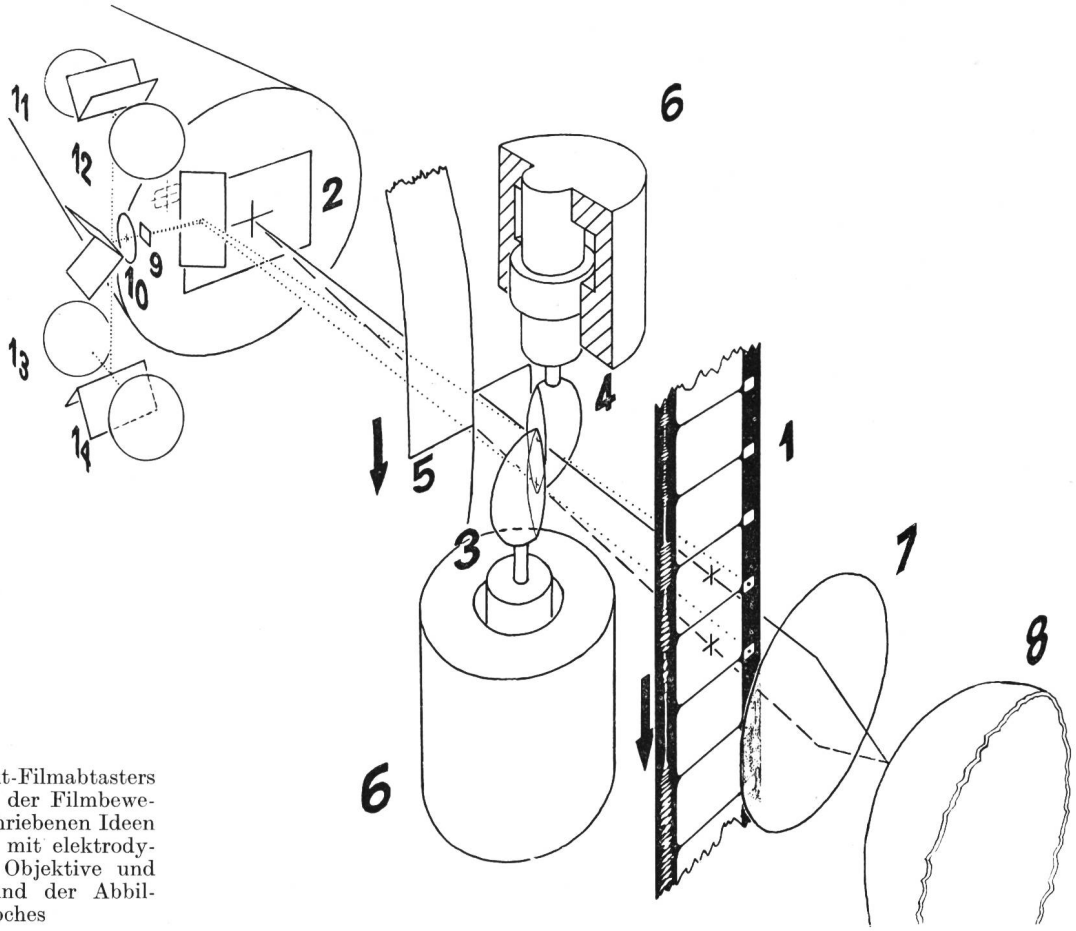

Fig. 17
Prinzip eines Leuchtpunkt-Filmabtasters mit optischem Ausgleich der Filmbewegung nach den hier beschriebenen Ideen des Verfassers. Variante mit elektrodynamischem Antrieb der Objektive und Servosteuerung auf Grund der Abbildung eines Perforationsloches

Spule 6 im richtigen Sinn speisen, so korrigiert sich jede Abweichung des Bildes eines Perforationsloches gegenüber der Blende 9 selbsttätig. Dasselbe geschieht auch mit 11, 13 und dem Objektiv 4. Jede Bewegung des Filmes teilt sich so den Objektiven mit, ohne dass irgend etwas über die Art des Filmvorschubes oder den Abstand zweier Filmbilder bekannt sein müsste.

Die beiden Servo-Mechanismen müssen noch in Abhängigkeit von der mit dem Filmtransport gekoppelten Blende 5 beeinflusst werden, und zwar so, dass während der Zeit, in der ein Objektiv durch die Blende 5 vom Abtastvorgang abgetrennt ist, sein Servoantrieb das übernächste Perforationsloch einfängt. Dies kann durch Beifügen eines von der Blende 5 ausgelösten Impulses in den Steuerstromkreis geschehen und dürfte keine weiteren Probleme stellen.

Praktische Betriebserfahrungen

Da die schweizerische PTT-Verwaltung dem Institut für Technische Physik der ETH den Auftrag erteilt hatte, für den Zürcher Fernseh-Versuchsbetrieb einen Fernsehabtaster für 16-mm-Schmalfilm zu bauen, setzte sich dessen Leiter, Herr Prof. *E. Baumann*, spontan dafür ein, die hier beschriebenen Ideen praktisch zu realisieren. Ich möchte ihm, meinem verehrten Chef, auch bei dieser Gelegenheit bestens danken für sein Zutrauen und die sonstige Förderung dieser Arbeit. Die konstruktive Gestaltung des neuen Filmabtasters ist weitgehend das Werk meines Kollegen *D. Diebold*, dipl. El.-Ing., der sich mit uneigennützigem Interesse auch undankbarer Detailarbeiten angenommen hat. Seine grossen Verdienste um die praktische Realiserung dieses Filmabtasters seien dankbar anerkannt.

Für den Bau des ersten Prototyps wurde die rein mechanische Variante nach Fig. 11 gewählt, weil sie zum Studium des neuen Verfahrens dank ihrer Einfachheit am geeignetsten schien. Das fertige Gerät ist in den Figuren 18 und 19 abgebildet.

Interessant war besonders die Abklärung folgender Teilprobleme:

1. Das Objektiv

Die zwei verwendeten Objektivhälften entstanden durch Zersägen eines fünflinsigen Objektives der relativen Öffnung 1:2, das speziell für unsere Zwecke berechnet und hergestellt wurde. Es ist für das verwendete Ultraviolettlicht korrigiert und aus Gläsern guter Ultraviolettransparenz aufgebaut. Beide Hälften sind erschütterungssicher gefasst und trotz der Trennungsebene hundertprozentig vignettierungsfrei.

2. Der Objektiv- und Filmantrieb

Die Erfahrung lehrte, dass sich die für Schmalfilm notwendige hohe Präzision im Objektivantrieb leichter verwirklichen lässt als im Filmantrieb. Bei der in den Figuren 18 und 19 dargestellten Ausführung des Prototyps bewirkt die Summe aller Ungenauigkeiten ein unregelmässiges vertikales Wandern des Bildes im Kontrollempfänger um einen sehr kleinen Betrag, der nur mit speziellen Testfilmen festgestellt werden kann. Alle diesbezüglichen Schwierigkeiten sind jedoch nur konstruktiver und nicht etwa grundsätzlicher Art.

3. Die Homogenität der Photokathode

Bei jeder Art einer Filmwiedergabe muss dafür gesorgt werden, dass eine Ungleichförmigkeit in der Bildfeldhelligkeit gegenüber dem Bildinhalt stillsteht oder dass sie nicht in einem feststellbaren Masse auftritt. Diese Forderung ist nur beim intermittierenden

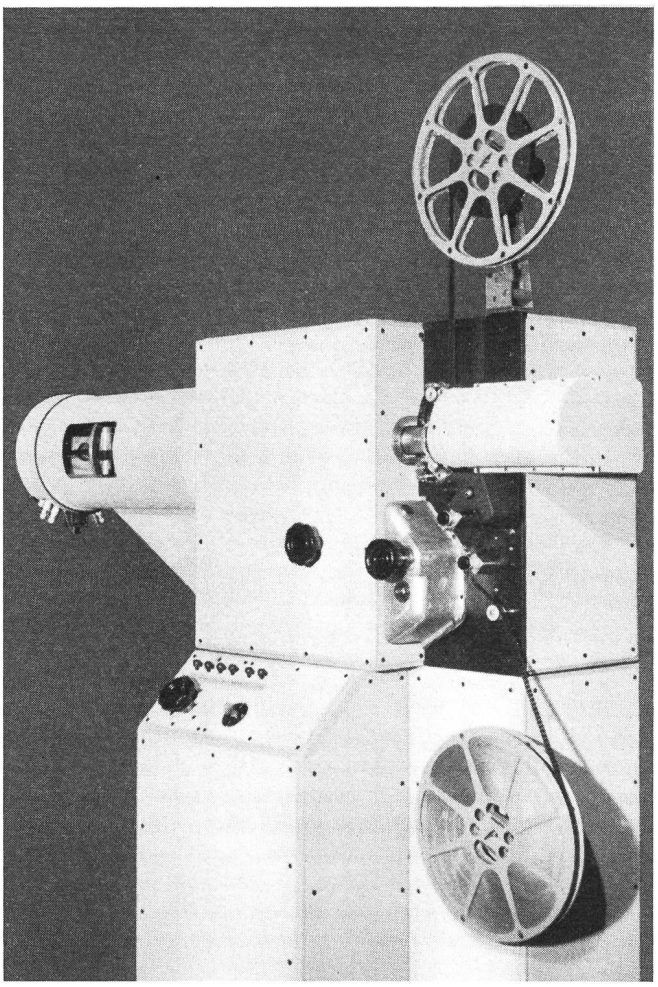

Fig. 18. Der fertige Filmabtaster für 16-mm-Schmalfilm, Gesamtansicht

Filmtransport trivial; bei allen andern Verfahren muss gleichzeitig mit der bildseitigen Veränderung des optischen Abbildungssystems eine analoge Veränderung auf der Beleuchtungs-, bzw. Photozellenseite einhergehen, wie dies für den *Mechau*projektor (Fig. 9) beschrieben wurde, oder es muss für eine hinreichend gleichmässige Helligkeitsverteilung gesorgt werden. Beim vorliegenden Abtaster wurde dieser zweite Weg gewählt: die Objektiv- und Kondensorlinsen sind vignettierungsfrei, und die von Herrn Dr. *N. Schaetti*, einem Mitarbeiter an unserem

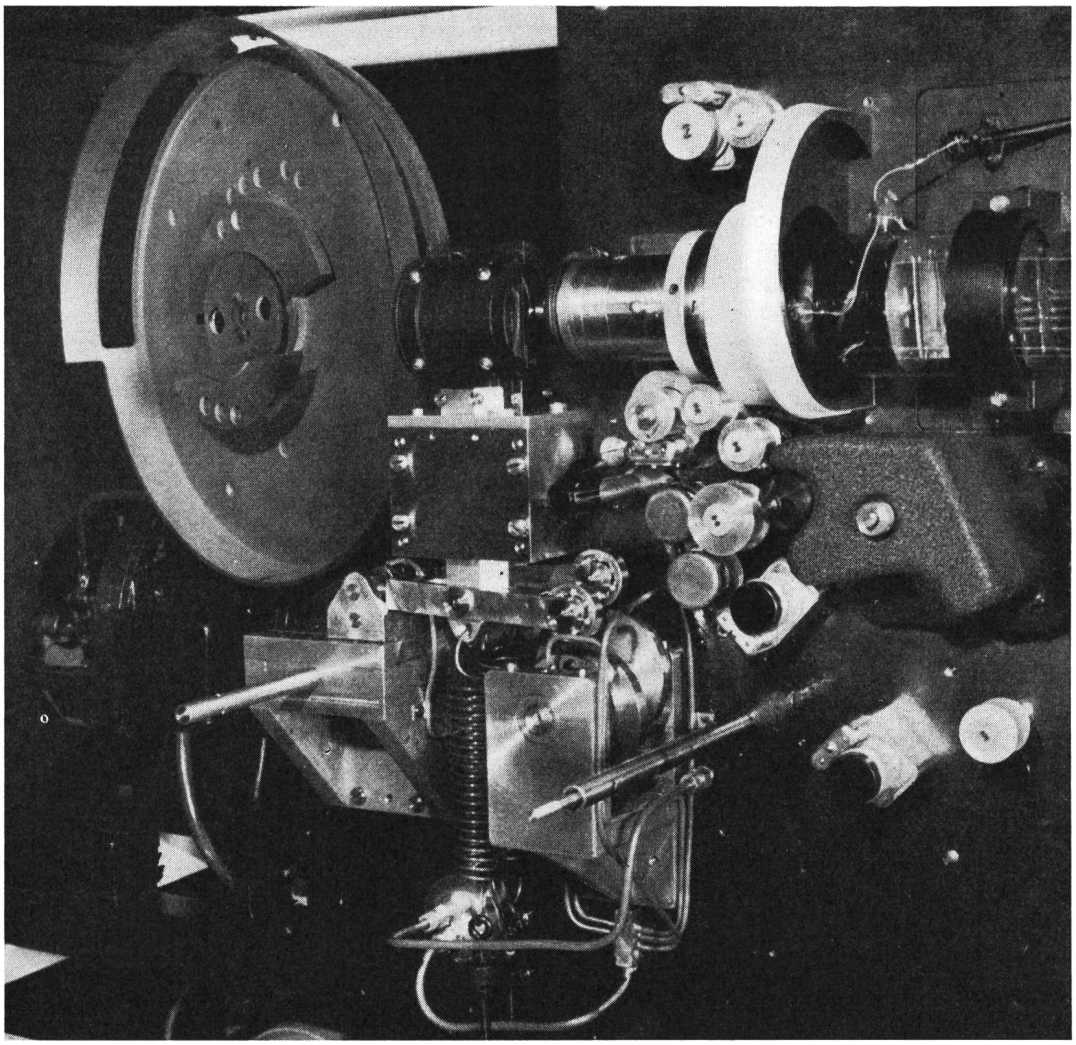

Fig. 19.
Der fertige Filmabtaster für 16-mm-Schmalfilm. Nahaufnahme der in Fig. 11 dargestellten optisch wirksamen Teile. Von links nach rechts: Leuchtpunktröhre (ausserhalb des Bildrandes); Umschaltblende (als Rad ausgebildet); die zwei Objektivhälften mit den darunterliegenden Kurvenscheiben und den zur Filmschrumpfungs-Korrektur längenveränderlichen Hebeln; Bildfenster; Kondensoroptik; Photokathode mit Sekundäremissionsvervielfacher. Unterhalb der Photokathode Tonköpfe für Licht- und Magnetton

Institut, entwickelte Vervielfacher-Photozelle hat nicht nur eine sehr hohe Empfindlichkeit, sondern diese weicht über der ganzen Kathodenfläche weniger als 1 % von ihrem Mittelwert ab. Dementsprechend ist beim wiedergegebenen Bild kein Flimmern und kein Helligkeitsabfall bemerkbar.

4. Ausgleich der bewegten Massen

Der Prototyp weist keinerlei Massnahmen zum Kompensieren der Rüttelkräfte auf, die durch die auf- und abgehenden Objektive verursacht werden. Die Erfahrung zeigt, dass dadurch bei einigermassen starrem Aufbau der optisch wichtigen Teile keine Störungen auftreten.

Der neue Abtaster funktioniert einwandfrei, und ausser den bereits besprochenen Vorteilen aller Leuchtpunktabtaster mit optischem Ausgleich der Filmbewegung wurden folgende Vorteile gegenüber den bisher bekannten Verfahren tatsächlich erreicht:

a) Die höchste realisierbare Lichtstärke der Optik ist nicht begrenzt durch Platzfragen, durch die Forderung auf eine Strecke mit telezentrischem Strahlengang, einen Minimalabstand Objektiv–Film, durch eine gekrümmte Filmbahn oder durch Rücksichten auf weitere optische Bestandteile. (Die neue Forderung auf symmetrische Vignettierung der Objektivhälften begrenzt die Objektivöffnung nicht im selben Ausmass.)

b) Alle optischen Qualitäten der Bildwiedergabe, wie Schärfe, Verzeichnung und Streulicht, hängen allein vom verwendeten Objektiv ab. Andere optische Teile, die diese Eigenschaften nur verschlechtern könnten, gibt es nicht. So ist zum Beispiel der verarbeitbare Helligkeitsumfang grösser als bei Spiegelanordnungen mit ihrem unvermeidlichen Streulicht.

c) Auch beim Überblenden entsteht grundsätzlich keine Helligkeitsschwankung, im Gegensatz etwa zu Spiegelmechanismen, die dann Licht in den Fugen verlieren.

d) Es sind nur zwei optische Elemente zu justieren, und diese bewegen sich nur in einer Dimension. Eventuelle Justierfehler treten mit keiner tieferen Wiederholungsfrequenz als der halben Bildfrequenz auf.

e) Die Anpassung der Ausgleichsbewegung an verschiedene Schrumpfungszustände des Filmes geschieht ohne Kompromisse geometrischer oder optischer Art.

Adresse des Verfassers: *Theo Stutz*, dipl. El.-Ing., Susenbergstrasse 208, Zürich 44.

BIBLIOGRAPHIE

[1] *W. Amrein.* Eine neuartige mechanische Abtastvorrichtung. Bull. Schweiz. Elektrotechn. Vereins **29** (1938), 596.

[2] *N. Schaetti.* Eine Bildzerlegerröhre ohne Speicherung für Filmabtastung. Bull. Schweiz. Elektrotechn. Vereins **40** (1949), 569.

[3] *Rolf Möller.* Mehrfach-Filmabtastung. Hausmitteilungen der Fernseh G.m.b.H., Berlin, **2** (1942), 129.

[4] *A. G. Jensen.* Film Scanner for use in television transmission tests. Proc. Inst. Radio Eng. **29** (1941), 243.

[5] *F. Schröter.* Die Bedeutung des Bildausgleichs-Projektors als Fernsehgeber. Telegraphen- und Fernsprechtechnik **27** (1938), 534.

[6] *A. Ehrenhaft* and *F. G. Back.* A non-intermittent Motion Picture Projector. J. Soc. Motion Picture Eng. **34** (1940), 223.

[7] *G. Schwesinger.* Reducing Aberrations in Rotating-Prism. Compensators for Nonintermittent Motion Pictures. J. Optical Soc. Am. **42** (1952), 923.

[8] *Harry S. Bamford.* A New Television Film Projector. Electronics **11** (1938), 25.

[9] *L. Burmester* und *E. Mechau.* Untersuchungen der mechanischen und optischen Grundlagen des Mechau-Projektors. Kinotechnik **10** (1928), 395.

[10] *A. G. Jensen, R. E. Graham* and *C. F. Mattke.* Continuous Motion Picture Projector for Use in Television Film Scanning. J. Soc. Motion Picture and Television Eng. **58** (1952), 1.

Untersuchungen zur Konstruktion eines eindimensionalen Richtmikrophons

Von *G. Kurtze,* Bern

621.395.613.385.1

Zusammenfassung. *Es wird ein neuartiges eindimensionales Richtmikrophon beschrieben, bei dem der von ausserhalb der Richtkeule einfallende Schall durch Interferenz unterdrückt wird. Das wesentliche Element ist ein geschlitztes Rohr, das einem normalen Mikrophon vorgeschaltet wird. Die Richtcharakteristik solcher Mikrophone ist normalerweise frequenzabhängig, jedoch wird auch eine Variante dieses Mikrophons beschrieben, die eine in gewissen Grenzen frequenzunabhängige Charakteristik aufweist. Sowohl die berechneten, als auch die praktisch gemessenen Richtdiagramme sind wiedergegeben.*

Résumé. *L'auteur décrit un nouveau microphone à caractéristique directionnelle dans lequel le son incident provenant d'une zone extérieure à la zone de haute sensibilité est supprimé par interférence. L'élément essentiel en est un tube fendu monté devant un microphone ordinaire. Normalement, la caractéristique directionnelle de ce genre de microphone dépend de la fréquence, mais l'auteur parle aussi d'une variante qui présente une caractéristique indépendante de la fréquence dans certaines limites. L'article est illustré de diagrammes polaires calculés ou mesurés dans la pratique.*

Einleitung

Richtungsempfindliche Mikrophone werden für Übertragungsanlagen aller Art, insbesondere für Film und Fernsehen, wo das Mikrophon nicht an den Ort des Sprechers gebracht werden kann, immer wieder benötigt. Dabei ist meist eine 8-Charakteristik (Schnelleempfänger) oder eine Cardioid-Charakteristik (Schnelle- + Druckempfänger) nicht ausreichend. Eine über diese Charakteristiken hinausgehende Richtwirkung verlangt aber Lineardimensionen des Empfängers, die gross gegen die Wellenlänge des zu empfangenden Schalles sind, das heisst, man muss eine gewisse Unhandlichkeit der Mikrophone in Kauf nehmen. Um eine Empfindlichkeit in nur einer Richtung zu erzielen, braucht man entweder eine entsprechend grosse Empfangsfläche senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung des Schalles oder aber einen eindimensionalen Empfänger in Fortpflanzungsrichtung. Die erste Möglichkeit wird, wie auch im elektrischen Analogon, heute fast ausschliesslich angewandt, zum Beispiel in Gestalt eines Parabolspiegels mit einem Mikrophon im Brennpunkt. Sie hat den Vorteil grosser Empfindlichkeit, da durch die Bündelung des Schalles eine Anhebung des Nutzpegels erfolgt, während beim zweiten Typ, dessen elektrisches Analogon die Beverage-Antenne ist, die Richtwirkung durch Senkung des Störpegels erzielt wird. Immerhin hat aber das eindimensionale Mikrophon den Vorteil wesentlich geringeren Raumbedarfes, der die geringere Empfindlichkeit sicher oft aufwiegt.

Das erste brauchbare Mikrophon dieser Art ist das Röhrenmikrophon von *Mason* und *Marshall* [1]. Das bereits von *Rayleigh* [2] beschriebene Prinzip dieser Mikrophone ist die Interferenzauslöschung (bzw. -schwächung) aller nicht in Achsenrichtung einfallenden Schallwellen am Mikrophon. Mason und Marshall erreichten das mit Hilfe eines Bündels von 50 verschieden langen Aluminiumröhren, das einem normalen Mikrophon vorgeschaltet wird. Die grosse Anzahl von Röhren ist erforderlich, da die Längendifferenz zwischen zwei Röhren kleiner als die kürzeste zu empfangende Wellenlänge sein muss.

Grundsätzlich kann der gleiche Effekt natürlich auch mit einem einzigen Rohr mit entsprechend vielen Öffnungen erzielt werden. Es ist dabei jedoch zu bedenken, dass jede Öffnung einen Sprung im Wellenwiderstand des Rohres zur Folge hat, wodurch die Verhältnisse im Rohr sehr unübersichtlich werden. Aus diesem Grunde gingen Mason und Marshall zu 50 Röhren über. Andererseits führt die Tatsache, dass die Qualität des Rohres mit der Zahl der Öffnungen zunimmt, konsequenterweise zu einem geschlitzten Rohr, in dem das Schallfeld durchaus übersichtlich ist. Allerdings muss hier die im Falle des Röhrenmikrophons vernachlässigbare Dämpfung im Rohr berücksichtigt werden. Da das Prinzip verlangt, dass alle «Schallanteile», ohne Rücksicht auf die «Eintrittsstelle» in das Rohr, mit gleicher Amplitude am Mikrophon ankommen, muss dem Schlitz ein Strömungswiderstand vorgeschaltet werden, dessen Betrag zum Mikrophon hin monoton zunimmt.